

ارزیابی و مقایسه عملکرد سامانه‌های جهانی پیش‌بینی در پیش‌بینی همادی بارش‌های سنگین؛ ۸ بارش موردی در حوضه آبریز رودخانه کن

لیلا گودرزی - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
محمدابراهیم بنی‌حیب* - دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
پروین غفاریان - استادیار پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوئی
عباس روزبهانی - استادیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۹

چکیده

به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های عددی، پیش‌بینی‌های همادی^۱ کاربرد گسترده‌ای یافته است. در مطالعه حاضر، عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی جهانی در پیش‌بینی همادی بارش‌های سنگین در حوضه کن ارزیابی شده است. برای مقایسه پیش‌بینی‌های ۸ بارش سنگین، از سه معیار دقت، اطمینان‌پذیری، و تیزی با دو آستانه مختلف بارش استفاده شده است. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های مرکز UKMO2 دارای کمترین دقت، اطمینان‌پذیری، و تیزی است. همچنین، مشاهده شد که در آستانه بارش ۵ میلی‌متر از نظر دقت و اطمینان‌پذیری تفاوت درخور توجهی میان پیش‌بینی‌های مراکز NCEP^۲ و ECMWF^۳ وجود ندارد؛ اما با افزایش سطح آستانه، دقت و اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های NCEP افزایش می‌یابد و در این آستانه امتیاز بربر برابر ۰/۱۹۴ و مساحت زیر منحنی اطمینان‌پذیری تا نیم‌ساز برابر ۰/۲۹۷ است. از نظر شاخص تیزی، سامانه NCEP با میانگین شاخص تیزی ۰/۱۰۹ مناسب‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهد. بنابراین مقایسه پیش‌بینی‌های مراکز مختلف با سه معیار یادشده نشان می‌دهد که مرکز NCEP عملکرد بهتری در پیش‌بینی همادی بارش‌های سنگین در منطقه مورد مطالعه داشته و برای پیش‌بینی بارش‌های مولد سیلاب در حوضه‌های کوهستانی مشابه قابل بررسی است.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی‌های همادی، حوضه رودخانه کن، ECMWF، NCEP، UKMO

مقدمه

بارش یکی از مهم‌ترین فراسنج‌های جوئی است که پیش‌بینی آن برای اهداف مختلفی نظیر برآورد سیلاب، رواناب، مدیریت حوضه آبخیز، و برنامه‌ریزی آبیاری دارای اهمیت زیادی است. تا کنون، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی بارش ارائه شده است. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (موستریس و همکاران، ۲۰۱۱)، مدل‌های سری زمانی (سامپسون و همکاران، ۲۰۱۳)، روش تئوری موجک‌ها (پارتال و کیسی، ۲۰۰۷)، و رگرسیون درختی (فلاحی و همکاران، ۱۳۹۰) از جمله روش‌هایی است که تا کنون در حوزه پیش‌بینی بارش به کار گرفته شده است. مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا ابزاری هستند که در ارتقای کیفیت پیش‌بینی‌ها نقش بسزایی دارند. بیشتر عدم قطعیت پیش‌بینی بارش توسط مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا ناشی از گسترش خطاهای کوچک در شرایط اولیه مدل‌های اتمسفری است. به دلیل ماهیت

غیرخطی روابط در مدل، حتی خطاهای کوچک در شرایط اولیه می‌توانند به خطاهای بزرگی در پیش‌بینی منجر شوند. بنابراین، روش استاندارد برای ارزیابی عدم قطعیت تولید یک مجموعه پیش‌بینی مختلف از فرایندهای اتمسفری است که به وسیله شرایط اولیه تغییر می‌کند (کوما و همکاران، ۲۰۰۷: ۴۳۱). سامانه‌های پیش‌بینی همادی^۱ (EPS) به منظور برآورد عدم قطعیت شرایط اولیه در پیش‌بینی‌های وضع هوا ارائه شده‌اند.

سرویس‌ها و مراکز هواشناسی مختلفی شامل مرکز پیش‌بینی میان‌مدت اروپا (ECMWF)، مرکز ملی پیش‌بینی زیست‌محیطی (NCEP)، آژانس هواشناسی ژاپن (JMA)، سازمان هواشناسی انگلیس (UKMO)، سرویس هواشناسی کانادا^۲ (MSC)، و مراکز مشابه دیگر پیش‌بینی‌های همادی بارش را با حل معادلات عددی وضع هوا در سراسر کره زمین ارائه می‌کنند (هسیائو و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۵). ذکر این نکته لازم است که پیش‌بینی‌های این مراکز در مقیاس بزرگ شبکه‌بندی شده‌اند. تعداد اعضای همادی، قدرت تفکیک مکانی پیش‌بینی‌ها، تعداد اجرا در روز، و برخی مشخصه‌های دیگر بسته به مرکز ارائه‌دهنده پیش‌بینی‌ها متفاوت است. تاکنون تحقیقات مختلفی درباره ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های مراکز هواشناسی مختلف انجام گرفته است. هامیل (۲۰۱۲) در آمریکا، پیش‌بینی‌های همادی مراکز ECMWF، NCEP، UKMO، و MSC را طی یک دوره چهارماهه و با استفاده از سه معیار دقت^۳، اطمینان‌پذیری^۴، و تیزی^۵ ارزیابی کرد و نشان داد که پیش‌بینی‌های همادی مرکز ECMWF دارای بیشترین دقت، مرکز MSC دارای بالاترین مقدار اطمینان‌پذیری، و پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بالاترین میزان تیزی است. یه و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های همادی بارش مرکز ECMWF در حوضه رودخانه هوای^۶ در چین پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت پیش‌بینی‌ها در زیرحوضه‌های مختلف به مساحت، میانگین ارتفاع، و متوسط بارش سالانه زیرحوضه بستگی دارد و هر چه مساحت زیرحوضه بزرگ‌تر و میانگین بارش کمتر باشد پیش‌بینی‌های ECMWF از دقت بیشتری برخوردار است. دوئان و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه پیش‌بینی‌های همادی مراکز ECMWF، CMA^۷، NCEP، و JMA^۸ پرداختند. این تحقیق بر روی ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال انجام شد؛ نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های همادی مرکز ECMWF از بیشترین میزان دقت برخوردارند و پیش‌بینی‌های همادی مراکز NCEP، JMA، و CMA به ترتیب در رده‌های بعد قرار گرفتند. سدودی و همکاران (۲۰۱۰) برای اولین بار در ایران عملکرد پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF را در پیش‌بینی بارش بررسی کردند و نشان دادند که بارش‌های بیشینه با مشاهدات به‌خوبی در تطابق‌اند؛ اما رویدادهای بارش کم تا متوسط کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد شدند. همچنین، نشان دادند که پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF در نواحی کوهستانی ایران عملکرد بهتری نسبت به نواحی مسطح و بیابانی دارد. دارند و زندکریمی (۱۳۹۴) دقت پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF را بر روی گستره ایران با تفکیک مکانی ۰/۱۲۵ درجه قوسی بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که نه تنها از نگاه هماهنگی زمانی، بلکه به لحاظ مقدار کمی نیز همانندی بسیار زیادی بین مقادیر برآوردشده بارش و مقادیر مشاهداتی وجود دارد. همچنین، نتیجه این تحقیق نشان داد که خطای پیش‌بینی بر روی هسته‌های پُربارش سواحل جنوبی دریای خزر و زاگرس میانی نسبت به دیگر مناطق زیاد است. شایان ذکر است که تحقیقات انجام‌شده در ایران بر روی پیش‌بینی‌های قطعی سامانه‌های جهانی از جمله مرکز پیش‌بینی

1. Ensemble Prediction Systems
2. Meteorological Service of Canada
3. Accuracy
4. Reliability
5. Sharpness
6. Huai
7. China Meteorological Administration
8. Japan Meteorological Agency

میان مدت اروپا صورت گرفته است (دارند و زندکریمی، ۱۳۹۴) و تاکنون تحقیقی در این زمینه درباره پیش‌بینی‌های همادی توسط سایر مراکز جهانی پیش‌بینی و مقایسه عملکرد این مراکز انجام نشده است.

در تحقیق حاضر عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی‌های جهانی در پیش‌بینی همادی بارش‌های سنگین در حوضه رودخانه کن ارزیابی شده است. شایان ذکر است که مقصود از بارش‌های سنگین در تحقیق حاضر بارش‌های مولد سیلاب است. با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد وسعت شهرهای ایران در معرض وقوع سیل قرار دارد (معیری و انتظاری، ۱۳۸۷)، پیش‌بینی و پیش‌آگاهی بارش‌های شدید و سیلابی می‌تواند اطلاعات مفیدی برای برنامه‌ریزی شهری، بهره‌برداری از زمین، سیل، و مدیریت منابع آب در یک حوضه ارائه دهد. اگر هشدار یا اخطار به‌موقع داده شود، امکان به حداقل رساندن خسارت‌های سیل با روش‌هایی نظیر تخلیه افراد و امکانات از محدوده سیل‌گیر وجود دارد (بنی‌حیب و عربی، ۱۳۸۹). بنابراین، استفاده از مدل‌های عددی وضع هوا در پیش‌بینی بارش‌های سنگین امری ضروری است. بسیاری از سامانه‌های هشدار سیلابی که تا کنون در کشور اجرا شده‌اند بر اساس بارش‌های مشاهده‌ای است. این سامانه‌ها برای حوضه‌هایی که دارای زمان تمرکز کافی‌اند مناسب است. به عبارت دیگر، در حوضه‌های بزرگ، استفاده از بارش‌های مشاهده‌ای در پیش‌بینی سیلاب غالباً زمان پیش‌هشدار مورد نیاز برای مقابله با سیلاب را فراهم می‌کند؛ اما در حوضه‌های کوچک، استفاده از بارش‌های مشاهده‌ای در سامانه هشدار سیلاب به کوتاه‌شدن زمان پیش‌هشدار سیل منجر می‌شود؛ به طوری که در بسیاری از زیرحوضه‌های استان تهران زمان پیش‌هشدار^۱ سیل به کمتر از ربع ساعت می‌رسد (بنی‌حیب و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، مسئله پیش‌بینی بارش‌های سنگین در حوضه‌های سیل‌خیز کوچک از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، در این تحقیق عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی جهانی در حوضه رودخانه کن تهران ارزیابی شده است. در این راستا، سعی بر این است: ۱. بررسی شود که آیا درون‌یابی سامانه‌های جهانی و بزرگ‌مقیاس دقت کافی برای پیش‌بینی همادی بارش‌های سنگین در حوضه‌های کوچک را دارد؟ ۲. با توجه به اینکه مراکز هواشناسی مختلفی پیش‌بینی‌های همادی را ارائه می‌دهند، دقت پیش‌بینی‌های مراکز هواشناسی مختلف مقایسه و بهترین مرکز پیش‌بینی‌کننده برای محدوده مورد مطالعه معرفی می‌شود.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز کن در استان تهران با مساحت ۱۹۷ کیلومتر مربع و در فاصله بین طول‌های جغرافیایی ۵۱°۱۰ تا ۵۱°۲۳ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵°۴۶ تا ۳۵°۵۸ شمالی است و مشرف به مناطق شهری ۵، ۲۱، و ۲۲ تهران است. ارتفاع متوسط حوضه ۲۴۲۸/۷ متر از سطح دریا، شیب متوسط ۴/۴ درصد، و متوسط بارندگی سالانه حدود ۶۰۰ میلی‌متر است. این حوضه، با حوضه‌های حصارک در غرب، جاجرود در شمال و شمال شرقی، سد کرج در شمال و شمال غرب، حوضه وردیج در شرق و شهر تهران در جنوب هم‌مرز است. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در طی سال‌های گذشته، وقوع بارش‌های سنگین در حوضه کن به رخداد سیلاب و خسارت‌های هنگفتی منجر شده است. مطالعه حاضر بر روی هشت رویداد بارش سنگین مولد سیلاب رخ داده در گذشته انجام شده است (جدول ۱).

پیش‌بینی همادی بارش‌ها توسط مراکز هواشناسی ECMWF، NCEP، و UKMO از طریق پایگاه داده TIGGE^۲ به آدرس <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/tigge/levtype=sfc/type=pf/> و در محدوده

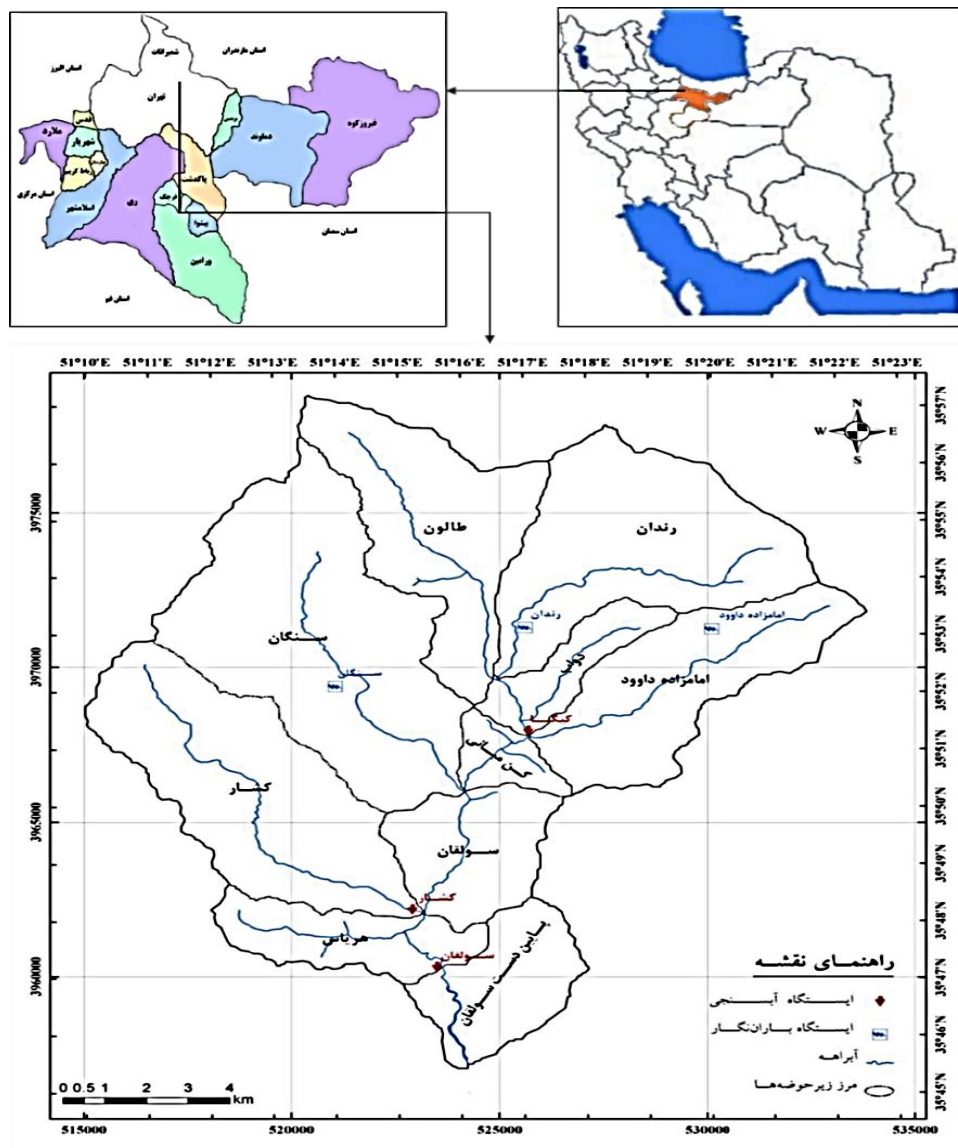
1. Forecast Lead Time

2. Interactive Grand Global Ensemble

جغرافیایی منطقه مورد مطالعه برای ۸ بارش مذکور استخراج شد. در شکل ۲، یک نمونه از پیش‌بینی همادی بارش‌ها توسط مرکز NCEP ارائه شده و به سبب بالابودن حجم اطلاعات، از آوردن سایر بارش‌های همادی خودداری شده است.

جدول ۱. بارش‌های سنگین رخ داده در منطقه مورد مطالعه

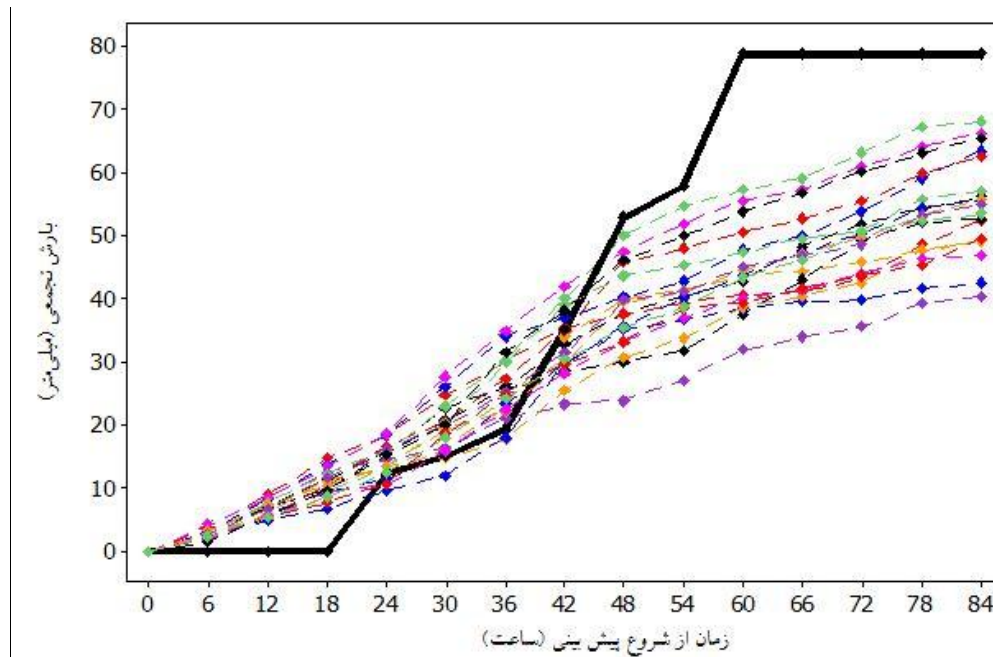
شماره ردیف	تاریخ رویداد	مدت بارش (ساعت)	مقدار بارش مشاهداتی (میلی‌متر)
۱	۱۳۸۹/۱/۱۹	۱۳	۴۸٫۸
۲	۱۳۹۰/۱/۱۶	۲۴	۵۵٫۶
۳	۱۳۸۶/۱/۷	۱۵	۲۵٫۳
۴	۱۳۹۰/۶/۷	۱۰	۵۶٫۵
۵	۱۳۹۰/۸/۵	۲۲	۵۵٫۹
۶	۱۳۹۱/۸/۲۳	۴۰	۷۸٫۹
۷	۱۳۸۹/۱۲/۲۲	۱۴	۲۸٫۵
۸	۱۳۹۱/۱/۲۶	۱۴	۶۷٫۷



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

در این تحقیق از بارش‌های درون‌یابی شده با قدرت تفکیک افقی ۰/۱۲۵ درجه و از داده‌های اجرای ساعت صفر به وقت هماهنگ جهانی^۱ استفاده شده است. پیش‌بینی‌های یک روز قبل از وقوع رخداد و در گام‌های زمانی شش‌ساعته (ساعت ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸) ارزیابی شده است. در خصوص تعداد داده‌ها، در طول دوره پیش‌بینی هر شش ساعت یک بار داده‌ها موجود است. بنابراین، تعداد داده‌ها برای هر رویداد بسته به مدت زمان بارندگی متفاوت است. پیش‌بینی‌های یک روز قبل از وقوع رخداد و در گام‌های زمانی شش‌ساعته (ساعت ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸) ارزیابی و زوج داده‌های مشاهداتی پیش‌بینی در هر گام زمانی شش‌ساعته مقایسه شده است.

از سایر مراکز پیش‌بینی‌کننده به دلایل مختلف (از جمله در دسترس نبودن پیش‌بینی‌های برخی از مراکز در ساعت صفر) در این تحقیق استفاده نشده است. جدول ۲ برخی از مشخصات پیش‌بینی‌های همادی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. پیش‌بینی همادی بارش‌ها توسط سه مرکز هواشناسی ECMWF، NCEP و UKMO با بارش‌های مشاهداتی متناظر در ایستگاه باران‌سنجی امامزاده داوود مقایسه شده است. پیش‌بینی‌های متناظر در محل ایستگاه باران‌سنجی از روش میان‌یابی نزدیک‌ترین همسایه به‌دست آمده است.



شکل ۲. پیش‌بینی همادی بارش مرکز NCEP در تاریخ ۱۳۹۱/۸/۲۳ (خط‌چین‌ها اعضای همادی بارش و خط ممتد بارش مشاهداتی)

جدول ۲. خصوصیات پیش‌بینی‌های همادی مراکز مختلف

مرکز	نوع مدل	تعداد اعضا	قدرت تفکیک مکانی (کیلومتر)	طول پیش‌بینی (روز)
ECMWF	طیفی	۵۰	تا ده روز آینده حدود ۳۳ کیلومتر و بعد از آن ۶۵ کیلومتر	۱۵
UKMO	تفاضل محدود	۲۳	۳۳ کیلومتر	۱۵
NCEP	طیفی	۲۰	تا ۷ روز آینده حدود ۳۵ کیلومتر و بعد از آن حدود ۵۵ کیلومتر	۱۶

مهارت پیش‌بینی‌های همادی با استفاده از سه معیار دقت، اطمینان‌پذیری، و تیزی ارزیابی می‌شود (کراچمور و همکاران، ۲۰۱۶: ۱). در این تحقیق به ترتیب از شاخص‌های امتیاز بریر^۱، نمودار اطمینان‌پذیری، و فاصله اطمینان ۵۰ درصد و ۹۰ درصد پیش‌بینی‌ها برای ارزیابی سه معیار مذکور استفاده شده است.

امتیاز بریر (BS) یک شاخص راستی‌آزمایی برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی و همادی است که در واقع میانگین مربعات خطای پیش‌بینی است و به صورت زیر تعریف می‌شود (آزادی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۱۳؛ یانگ، ۲۰۱۰: ۱۳۶۴):

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

که در آن، P_i احتمال پیش‌بینی شده و O_i دیدبانی متناظر برای روز i ام است، با این فرض که در صورت وقوع مقدار O_i برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. N تعداد جفت داده دیدبانی - پیش‌بینی است. با توجه به رابطه ۱، بیشترین مقدار امتیاز بریر برای یک پیش‌بینی کامل برابر صفر خواهد بود.

نمودار اطمینان‌پذیری^۲ نمایش تصویری فراوانی نسبی مشاهداتی بر حسب احتمال‌های پیش‌بینی است که به ترتیب در محورهای x و y ترسیم می‌شوند. ذکر این نکته لازم است که احتمال پیش‌بینی شده با توجه به تابع چگالی احتمال پیش‌بینی‌ها برآورد می‌شود. مقادیر پیش‌بینی‌های احتمالی به K طبقه (به عنوان مثال، ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، و ... ۹۰-۱۰۰) تقسیم می‌شود. فراوانی نسبی در هر یک از دسته‌ها بر روی نمودار تصویر می‌شوند و سپس با پاره‌خطهایی به یکدیگر متصل می‌گردند. هر چه منحنی حاصل به نیم‌ساز نزدیک‌تر باشد از اطمینان‌پذیری بیشتری برخوردار است. بخش‌هایی از منحنی که در زیر نیم‌ساز قرار می‌گیرند نشان می‌دهد که پیش‌بینی در این احتمال‌ها فرای بیش‌بینی دارند. به عبارت دیگر، در این بخش‌ها، فراوانی نسبی مشاهداتی بیشتر از احتمالی است که توسط سامانه پیش‌بینی همادی صادر می‌شود. همچنین، بخش‌هایی که در بالای نیم‌ساز قرار می‌گیرند نشان‌دهنده فروپیش‌بینی در آن احتمال‌هاست و فراوانی نسبی مشاهداتی کمتر از احتمالی است که توسط سامانه پیش‌بینی همادی صادر شده است (فتحی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۰).

تیزی معیاری است که به جمع‌شدگی توزیع پیش‌بینی اشاره می‌کند. این معیار فقط به داده‌های پیش‌بینی بستگی دارد و داده‌های مشاهداتی در آن دخالتی ندارند. هر چه توزیع پیش‌بینی متمرکزتر باشد، پیش‌بینی‌ها تیزترند. به عبارت دیگر، در پیش‌بینی‌های تیزتر تجمع مشاهدات بیشتر در یک یا چند احتمال صورت می‌گیرد. از آنجا که در یک پیش‌بینی کامل با احتمال صفر یا یک مواجهیم، هر چه تعداد مشاهدات در احتمال ۰ و ۱ بیشتر باشد توزیع پیش‌بینی تیزتر است و هر چه یک پیش‌بینی تیزتر باشد مناسب‌تر است. برای ارزیابی این معیار از هیستوگرام تیزی استفاده می‌شود که نمایش تصویری تعداد مشاهدات بر حسب احتمال‌های پیش‌بینی است. هر چه در این هیستوگرام، پراکندگی کمتر و احتمال مشاهدات نزدیک به صفر یا یک باشد پیش‌بینی تیزتر است (نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۴۶).

یافته‌های پژوهش

امتیاز بریر

در این بخش، پیش‌بینی همادی بارش‌های توسط مراکز هواشناسی NCEP، ECMWF، و UKMO با بارش‌های مشاهداتی متناظر در ایستگاه باران‌سنجی امامزاده داوود مقایسه شده است. مقایسه‌ها در گام‌های زمانی شش‌ساعته و بر روی دو آستانه بارش ۵ و ۱۰ میلی‌متر انجام گرفته است. این آستانه‌ها با توجه به تحقیقات گذشته تعیین شده است

1. Brier score
2. Reliability diagram

(ذوالجودی و همکاران، ۱۳۹۲؛ تقوی و همکاران، ۱۳۹۲) و از آنجا که تمرکز تحقیق حاضر بر روی بارش‌های سنگین است، از بررسی آستانه بارش‌های کوچک‌تر صرف‌نظر شده است. در جدول ۳ امتیاز بریر برای پیش‌بینی‌های هر سه مرکز هواشناسی نام‌برده ارائه شده است.

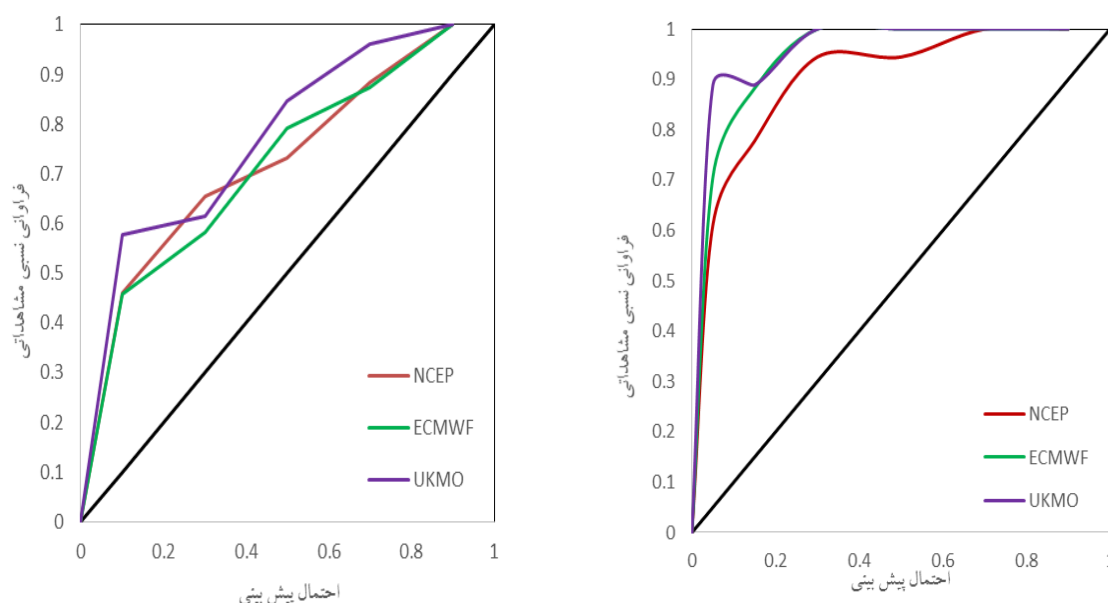
جدول ۳. امتیاز بریر در پیش‌بینی‌های همادی بارش برای هشت مورد انتخابی

UKMO	NCEP	ECMWF	آستانه بارش
۰٫۲۸۹	۰٫۲۴۵	۰٫۲۳۹	۵ میلی‌متر
۰٫۲۶۴	۰٫۱۹۴	۰٫۲۲۶	۱۰ میلی‌متر

مطابق جدول ۳، در آستانه ۵ میلی‌متر تفاوت درخور توجهی در دقت پیش‌بینی مراکز NCEP و ECMWF وجود ندارد؛ اما پیش‌بینی‌های مرکز UKMO دارای دقت کمتری است. در آستانه ۱۰ میلی‌متر، پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بیشترین دقت‌اند و پیش‌بینی‌های مراکز ECMWF و UKMO به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. همچنین، مشاهده می‌شود که در مدل مرکز NCEP، با افزایش سطح آستانه، دقت پیش‌بینی‌ها تا حدود زیادی افزایش می‌یابد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد پیش‌بینی همادی مرکز NCEP در پیش‌بینی بارش‌های سنگین دقت بسیار زیادی دارد. در ادامه به بررسی دو معیار دیگر، یعنی اطمینان‌پذیری و تیزی، پرداخته شده است.

نمودار اطمینان‌پذیری

نمودار اطمینان‌پذیری برای دو آستانه بارش ۵ و ۱۰ میلی‌متر و برای هر سه مدل جهانی مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. در این شکل‌ها، محور افقی نشان‌دهنده احتمال‌های صادرشده توسط سامانه پیش‌بینی همادی است و محور قائم نشان‌دهنده مقادیر فراوانی نسبی مشاهداتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو آستانه بارش، منحنی اطمینان‌پذیری همواره بالای نیم‌ساز قرار گرفته است و نشان‌دهنده فروپیش‌بینی در این احتمالات است. هر چه فاصله منحنی‌ها تا نیم‌ساز کمتر باشد، فراوانی نسبی مشاهداتی به احتمالی که توسط سامانه پیش‌بینی همادی صادر می‌شود نزدیک‌تر است. از آنجا که مقایسه چشمی نمودارها دشوار و با خطا همراه است، در این تحقیق مساحت بین منحنی‌های اطمینان‌پذیری و نیم‌ساز محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در جدول ۴ مساحت زیرمنحنی‌های اطمینان‌پذیری ارائه شده است. مطابق این جدول، در آستانه ۵ میلی‌متر تفاوت درخور توجهی در اطمینان‌پذیری پیش‌بینی مراکز NCEP و ECMWF وجود ندارد؛ اما پیش‌بینی‌های مرکز UKMO دارای اطمینان‌پذیری کمتری است. در آستانه ۱۰ میلی‌متر، پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بالاترین اطمینان‌پذیری و پیش‌بینی‌های مراکز ECMWF و UKMO به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. همچنین، مشاهده می‌شود که در پیش‌بینی‌های هر سه مرکز مورد مطالعه، مقدار اطمینان‌پذیری در آستانه ۱۰ میلی‌متر در مقایسه با آستانه ۵ میلی‌متر کاهش یافته است. در ادامه به بررسی معیار تیزی در پیش‌بینی‌های همادی پرداخته شده است.



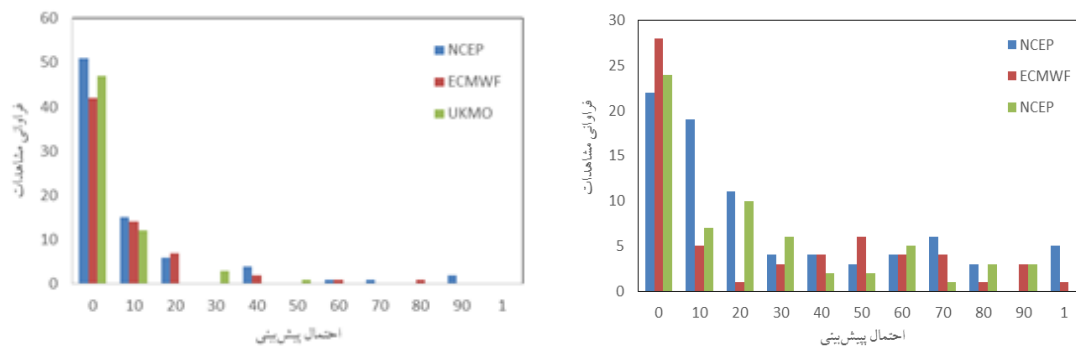
شکل ۳. نمودار اطمینان‌پذیری آستانه بارش ۵ میلی‌متر شکل ۴. نمودار اطمینان‌پذیری آستانه بارش ۱۰ میلی‌متر

جدول ۴. مساحت زیرمنحنی‌های اطمینان‌پذیری در پیش‌بینی‌های همادی بارش

UKMO	NCEP	CMWF	آستانه بارش
۰٫۱۷۱	۰٫۱۲۳	۰٫۱۱۹	۵ میلی‌متر
۰٫۳۵۳	۰٫۲۹۷	۰٫۳۳۸	۱۰ میلی‌متر

معیار تیزی

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب هیستوگرام تیزی را برای پیش‌بینی‌های دو آستانه مورد مطالعه نشان می‌دهند. احتمال پیش‌بینی صفر در این شکل‌ها نشان می‌دهد که هیچ یک از اعضای همادی پیش‌بینی‌شده از آستانه بارش عبور نکرده است. به عبارت دیگر، کلیه اعضای همادی مقداری کمتر از آستانه بارش را پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، هر چه توزیع پیش‌بینی متمرکزتر باشد، پیش‌بینی‌های همادی تیزتر و در نتیجه مناسب‌تر است. در شکل‌های ۴ و ۵ توزیع پیش‌بینی در هر سه مدل مورد مطالعه بسیار نزدیک به هم به نظر می‌رسد. بنابراین، برای بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر معیار تیزی، از مقایسه میانگین فاصله اطمینان ۵۰ و ۹۰ درصد پیش‌بینی‌ها استفاده شده است. شایان ذکر است که محققان دیگری نیز از این شاخص برای ارزیابی معیار تیزی استفاده کرده‌اند (کراچمور و همکاران، ۲۰۱۶؛ نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۷). هر چه میانگین فاصله اطمینان کمتر باشد، پیش‌بینی تیزتر است. در منحنی‌های تیزتر، شیب منحنی توزیع احتمال بیشتر است، بنابراین، شیب این منحنی در فاصله اطمینان ۵۰ و ۹۰ درصد به عنوان شاخص تیزی در نظر گرفته شده و مقادیر مربوط به آن در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بیشترین مقدار شاخص تیزی‌اند و پیش‌بینی‌های مراکز ECMWF و UKMO به ترتیب در رتبه‌های بعد قرار می‌گیرند.



شکل ۵. هیستوگرام تیزی آستانه بارش ۵ میلی‌متر (شکل راست) شکل ۶. هیستوگرام تیزی آستانه بارش ۱۰ میلی‌متر (شکل چپ)

جدول ۵. میانگین فاصله اطمینان ۵۰ و ۹۰ درصد پیش‌بینی‌های همادی

UKMO	NCEP	ECMWF	فاصله	فراسنج
۳٫۵۴	۳٫۸۹	۴٫۲۶	۵۰ درصد	میانگین فاصله اطمینان
۱۶٫۸	۱۰٫۱۷	۱۰٫۰۱	۹۰ درصد	
۰٫۱۴۱	۰٫۱۲۹	۰٫۱۱۷	۵۰ درصد	شاخص تیزی (شیب)
۰٫۰۵۴	۰٫۰۸۸	۰٫۰۹	۹۰ درصد	
۰٫۰۹۷	۰٫۱۰۹	۰٫۱۰۴	-	میانگین شاخص تیزی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی جهانی در حوضه رودخانه کن تهران ارزیابی شد. بدین منظور، پیش‌بینی همادی بارش‌ها توسط مراکز هواشناسی NCEP، ECMWF، و UKMO از طریق پایگاه داده TIGGE^۱ و در محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه استخراج شد. ارزیابی‌ها بر روی ۸ بارش سنگین رخ داده در گذشته و بر روی دو آستانه مختلف بارش انجام گرفت. برای مقایسه پیش‌بینی‌های همادی از سه معیار دقت، اطمینان‌پذیری، و تیزی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، در آستانه ۵ میلی‌متر تفاوت درخور توجهی در دقت پیش‌بینی‌های مراکز NCEP و ECMWF وجود ندارد، اما پیش‌بینی‌های مرکز UKMO دارای دقت کمتری است. در آستانه ۱۰ میلی‌متر، پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بیشترین دقت و پیش‌بینی‌های مرکز UKMO دارای پایین‌ترین دقت است. همچنین، مشاهده شد که پیش‌بینی‌های همادی مرکز NCEP در هر دو آستانه مورد مطالعه از اطمینان‌پذیری بیشتری نسبت به دو مرکز دیگر برخوردار است و پیش‌بینی‌های همادی مراکز ECMWF و UKMO به ترتیب در رده‌های بعدی اطمینان‌پذیری قرار می‌گیرند. از نظر شاخص تیزی نیز به ترتیب مراکز NCEP، ECMWF، و UKMO مناسب‌ترین پیش‌بینی‌های همادی را ارائه می‌دهند. بنابراین، جمع‌بندی و مقایسه سه معیار مورد استفاده نشان می‌دهد که مرکز NCEP، نسبت به دو مرکز دیگر، عملکرد بهتری در پیش‌بینی بارش‌های سنگین داشته است. نتایج تحقیق هامیل و همکاران (۲۰۱۲) در آمریکا نشان داد که پیش‌بینی‌های همادی مرکز ECMWF دارای بیشترین دقت، مرکز MSC دارای بالاترین مقدار اطمینان‌پذیری، و پیش‌بینی‌های مرکز NCEP دارای بالاترین میزان تیزی است. اما در تحقیق حاضر، در هر سه معیار مورد مطالعه، پیش‌بینی‌های مرکز NCEP عملکرد بهتری داشته است. بنابراین، توصیه می‌شود از این مدل برای هشدار سیلاب‌های ناگهانی در حوضه‌های کوهستانی با زمان تمرکز کم استفاده شود.

منابع

- آزادی، م.؛ واشانی، س. و حجام، س. (۱۳۹۱). پیش‌بینی احتمالاتی بارش با استفاده از پس‌پردازش برون‌داد یک سامانه همادی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸: ۲۰۳-۲۱۶.
- بنی‌حبيب، م.ا. و عربی، ا. (۱۳۸۹). ارزیابی اثر عملیات آبخیزداری بر زمان پیش‌هشدار حوضه آبخیز گلابدره- دربند، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۲: ۷۷-۸۱.
- تقوی، ف.؛ نیستانی، ا. و قادر، س. (۱۳۹۲). ارزیابی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش مدل عددی WRF در منطقه ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۲): ۱۴۵-۱۷۰.
- دارند، د. و زندکریمی، س. (۱۳۹۴). واکاوی سنجش دقت زمانی- مکانی بارش پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپایی بر روی ایران‌زمین، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷: ۶۷۵-۶۵۱.
- ذوالجودی، م.؛ قاضی میرسعید، م. و سفیری، ز. (۱۳۹۲). بررسی صحت و دقت طرحواره‌های مختلف مدل WRF و ارزیابی پیش‌بینی بارش در ایران‌زمین، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۸: ۱۸۷-۱۹۴.
- فتحی، م.؛ آزادی، م.؛ ارکیان، ف.؛ کفاش‌زاده، ن. و امیرطاهری افشار، م. (۱۳۹۲). واسنجی پیش‌بینی احتمالی بارش به دو روش بافت‌نگار رتبه‌ای و لجستیک روی ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۲: ۲۳-۳۴.
- فلاحی، م.ر.؛ وروانی، ه. و گلپان، س. (۱۳۹۰). پیش‌بینی بارش با استفاده از مدل رگرسیون درختی به منظور کنترل سیل، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.
- معیری، م. و انتظاری، م. (۱۳۸۷). سیلاب و مروری بر سیلاب‌های استان اصفهان، فصل‌نامه چشم‌انداز جغرافیایی، ۳(۶): ۱۰۹-۱۲۳.
- Azadi, M.; Vashani, S. and Hajjam, S. (2012). Probabilistic precipitation forecast using post processing of output of ensemble forecasting system, *Earth and Space Physics*, 38(3): 203-216. (In Persian).
- Banihabib, M.E.; Arabi, A. and Salha, A. (2015). A dynamic artificial neural network for assessment of land-use change impact on warning lead-time of flood, *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 5(2): 163-178.
- Banihabib, M. and Arabi, A. (2010). Evaluation of the effects of watershed management practices on the lead time, *Environmental Science and Technology*, 12(1): 77-81. (In Persian).
- Crochemore, L.; Ramos, M.H. and Pappenberger, F. (2016). Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill of seasonal streamflow forecasts, *Hydrology and earth system science journal*, 20(9), 3601-3618.
- Darand, M. and Zande Karimi, S. (2015). Evaluation of Spatio-Temporal Accuracy of Precipitation of European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) over Iran. *Physical Geography Research*, 47: 651-675. (In Persian).
- Duan, M.; Ma, J. and Wang, P. (2012). Preliminary comparison of the CMA, ECMWF, NCEP, and JMA ensemble prediction systems, *Acta Meteorologica Sinica*, 26: 26-40.
- Falahi, M.; Varvani, H. and Golian, S. (2011). Rainfall forecasting using the regression tree model in order to flood management, *5th National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management*, Kerman. (In Persian).
- Fathi, M.; Azadi, M.; Arkian, F.; Kafashzadeh, N. and Amirtaheeri Afshar, M. (2012). Precipitation Probabilistic Forecast Calibration by two approaches Rank histogram and Logistics, *Climatology research*, 7(3): 23-34. (In Persian).

- Gneiting, T.; Balabdaoui, F. and Raftery, A.E. (2007). Probabilistic forecasts, calibration and sharpness, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 69(2): 243-268.
- Hamill, T.M. (2012). Verification of TIGGE multimodel and ECMWF reforecast-calibrated probabilistic precipitation forecasts over the contiguous United States, *Monthly Weather Review*, 140(7): 2232-2252.
- Hsiao, L.F.; Yang, M.J.; Lee, C.S.; Kuo, H.C.; Shih, D.S.; Tsai, C.C. and Lin, G.F. (2013). Ensemble forecasting of typhoon rainfall and floods over a mountainous watershed in Taiwan, *Journal of Hydrology*, 506: 55-68.
- Komma, J.; Reszler, C.; Blöschl, G. and Haiden, T. (2007). Ensemble prediction of floods—catchment non-linearity and forecast probabilities, *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(4): 431-444.
- Moayeri, M. and Entezari, M. (2007). A review of floods in Isfahan province, *Geographical landscape*, 3(6): 100-123. (In Persian).
- Moustris, K.P.; Larissi, I.K.; Nastos, P.T. and Paliatsos, A.G. (2011). Precipitation forecast using artificial neural networks in specific regions of Greece, *Water resources management*, 25(8): 1979-1993.
- Partal, T. and Kisi, Ö. (2007). Wavelet and neuro-fuzzy conjunction model for precipitation forecasting, *Journal of Hydrology*, 342(1): 199-212.
- Sampson, W.; Suleman, N. and Gifty, A.Y. (2013). Proposed Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model for Forecasting Rainfall Pattern in the Navrongo Municipality, Ghana, *Journal of Environment and Earth Science*, 3(12):80-85.
- Soudoudi, S.; Noorian, A.; Geb, M. and Reimer, E. (2010). Daily precipitation forecast of ECMWF verified over Iran, *Theoretical and applied climatology*, 99(2): 39-51.
- Taghavi, F.; Neyestani, A. and Ghader, S. (2013). Short range precipitation forecasts evaluation of WRF model over IRAN, *J. of Earth and Space Physics*, 39(2): 145-170. (In Persian).
- Ye, J.; He, Y.; Pappenberger, F.; Cloke, H.L.; Manful, D.Y. and Li, Z. (2014). Evaluation of ECMWF medium-range ensemble forecasts of precipitation for river basins, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(682): 1615-1628.
- Young, R.M.B. (2010). Decomposition of the Brier score for weighted forecast-verification pairs, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(650): 1364-1370.
- Zoljoodi, M.; Ghazimirsaeid, S. and Seifari, Z. (2013). Evaluation of physics scheme of WRF model in precipitation forecasting in Iran. *J of Geographical Research*, 28(2): 187-194. (In Persian).