

استفاده از تحلیل همبستگی متعارف در مقیاس کاهی بارش سامانه‌های پیش‌بینی فصلی و توسعه همادی چند مدلی در شرایط زمان واقعی

حسین نجفی^۱، علیرضا مساح‌بوانی^{۲*}، پرویز ایران‌نژاد^۳ و اندرو ویلیام رابرتسون^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۴. مدیر مطالعات اقلیمی مؤسسه پژوهشی بین‌المللی برای اقلیم و جامعه، مؤسسه زمین، دانشگاه کلمبیا، نیویورک، آمریکا

(دریافت: ۹۶/۳/۲۱، پذیرش نهایی: ۹۶/۱۱/۱۷)

چکیده

هدف از این پژوهش، ارزیابی روش تحلیل همبستگی متعارف (CCA) در ارائه پیش‌بینی‌های فصلی به‌صورت مقیاس‌کاهیشده در یک دوره بلندمدت ۳۰ ساله است. این بررسی در غرب کشور ایران و با استفاده از برون‌داد بارش سامانه‌های پیش‌بینی فصلی همادی آمریکای شمالی انجام شد. بدین‌منظور، در ابتدا بارش شبکه‌بندی شده بر اساس اطلاعات سنجنش‌ازدور (PERSIANN-CDR) با داده‌های ثبت‌شده از ۲۳ ایستگاه هم‌دیدگی ارزیابی شد. ضریب همبستگی PERSIANN-CDR با داده‌های ایستگاهی هم‌دیدگی بین ۰/۷ و ۰/۹۵ محاسبه شده است. سپس اریب داده‌های سنجنش‌ازدور به‌نسبت داده‌های ایستگاهی هم‌دیدگی تصحیح و در انتها هر دو مجموعه داده (سنجنش از دور- ایستگاه) تلفیق شدند. از مجموعه داده تلفیق‌شده به‌عنوان بارش مرجع در ارزیابی سامانه‌های پیش‌بینی فصلی با تفکیک مکانی ۱ و ۰/۲۵ درجه (برون‌داد مستقیم و پس از کاربست CCA) استفاده شد. مدل‌های پیش‌بینی فصلی به‌صورت انفرادی و وزن‌دهی شده (سامانه‌های همادی متشکل از ۲ تا ۸ مدل) مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی مهارت این مدل‌ها، معیارهای ارزیابی شامل معیارهای پیوسته و طبقه‌بندی‌شده است که در دوره صحت‌سنجی محاسبه شده است. در این دوره، همبستگی اسپیرمن به‌عنوان شاخص نیکویی برازش، بیشینه شده است. شاخص‌های ارزیابی به‌صورت برون‌داد مستقیم و تصحیح شده مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که همه شاخص‌ها پس از اعمال CCA بهبود می‌یابند. لذا روش‌شناسی پیشنهادی در مقیاس‌کاهی و پس‌پردازش سامانه‌های پیش‌بینی فصلی در محدوده مورد مطالعه کارا است. همچنین، سامانه همادی سه‌مدلی متشکل از دارای همبستگی اسپیرمن بیش از ۰/۶ با داده‌های مرجع می‌باشد، به‌عنوان مدل برتر با بیشترین نیکویی برازش در محدوده مورد مطالعه است. در اکثر محدوده مورد مطالعه، GFDL-aer04 و سامانه‌های همادی چند مدلی توانسته‌اند در ۸۰ درصد از سال‌هایی که بارش زیر‌نرمال اتفاق افتاده، بارش زیر‌نرمال را به‌درستی پیش‌بینی نمایند. یافته‌های این پژوهش، کاربست روش‌شناسی پیشنهادی در پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی به‌صورت زمان واقعی در فصل اکتبر- دسامبر در محدوده غرب کشور ایران را آشکار می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های همادی آمریکای شمالی، مقیاس کاهی، حوضه کرخه، همادی چند مدلی، پیش‌بینی فصلی بارش.

۱. مقدمه

اقلیم مبتنی بر سناریوهای IPCC در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. اما به آن دسته از مدل‌های عددی که پیش‌بینی ماهانه و فصلی تولید می‌کنند، در مطالعات محدودی پرداخته شده است. رویکرد رایج در عمده مطالعات انجام‌شده در کشور ایران در این زمینه، استفاده از شاخص‌های اقلیمی و متغیرهای بزرگ‌مقیاس به‌عنوان درون‌داد روش‌های آماری همچون روش‌های داده‌محور، سری زمانی و روش‌های مبتنی بر هوش

ارائه پیش‌بینی‌های ماهانه و فصلی قابل اطمینان برای متغیرهای اقلیمی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند ارزش افزوده بسیاری را برای تصمیم‌گیران بخش آب کشور فراهم سازد. استفاده مؤثر از این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به بهره‌برداری از سامانه‌های رودخانه مخزن به‌خصوص در برنامه‌ریزی تحویل حجمی آب به بخش کشاورزی در فصول کشت کمک مؤثری کند. تاکنون، بررسی متغیرهای اقلیمی در دورنمای تغییر

مصنوعی است (احمدی باصری و همکاران، ۱۳۹۳؛ باقرزاده، ۱۳۹۳؛ زهرایی، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰؛ فلاح قاهری و همکاران، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸؛ ناظم السادات و شیروانی، ۱۳۸۵؛ نیکبخت شهبازی و همکاران، ۲۰۱۲). به عنوان مثال، دو شاخص اقلیمی SOI و Nino 3.4 به عنوان درونداد پنج مدل شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته، رگرسیون بردار پشتیبان، نزدیک ترین K همسایه (KNN) و رگرسیون خطی با ساختار بهینه برای بارش پاییزه زیرحوضه سیمره مورد استفاده قرار گرفتند (مدرسی و همکاران، ۱۳۹۴). در یک رویکرد دیگر، برونداد مدل های دینامیکی به صورت آماری پس پردازش می شوند. در این رویکرد، اطلاعات با تفکیک مکانی مناسب به صورت آماری، مقیاس گاهی (Downscaling) می شود. یک مزیت این رهیافت نیز هزینه محاسباتی پایین است. در مطالعات مختلف در سطح جهانی، این رویکرد (دینامیکی-آماری) مورد بررسی قرار گرفته است (به عنوان مثال باربرو و همکاران ۲۰۱۷، ما و همکاران ۲۰۱۵). در یکی از مطالعات انجام شده برای استان خراسان رضوی در کشور ایران، کارایی مدل CGCM3 MRI با کاربست سه روش رگرسیون چندمتغیره، میانگین متحرک و شبکه عصبی مصنوعی بررسی شد (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج نشان داد امتیاز مهارتی ROC حتی با اعمال روش های پس پردازش، تقریباً برای تمامی ماه ها در محدوده قابل قبول (۰/۵) قرار نمی گیرد. در دیگر مطالعه انجام شده برای کشور ایران، نمره ROC محاسبه شده برای تعدادی از مدل های همادی آمریکای شمالی (NMME) به روش تحلیل همبستگی متعارف (CCA) برای هر دو حالت زیرنرمال و بیش از نرمال محاسبه و نشان داده شد مقدار این شاخص در اکثر مناطق کشور، مناسب و قابل استفاده برای تصمیم گیران است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۵).

باید توجه داشت در حرکت به سوی تولید پیش بینی های فصلی با تفکیک مکانی مناسب برای تصمیم سازی بخش های کشاورزی و منابع آب، قابلیت پیش بینی (پیش بینی پذیری) و مهارت مدل ها در ابتدا در مقیاس کلان (از لحاظ مکانی) ارزیابی شود. بدین منظور، قبل از مقیاس گاهی روی ایستگاه یا روی یک مجموعه داده شبکه بندی شده با تفکیک مکانی بالا، پیش بینی پذیری روی یک محدوده وسیع مورد ارزیابی قرار می گیرد. بدین صورت یک دید از مهارت مدل های پیش بینی از ابتدا فراهم می شود. به عنوان مثال، مهارت همادی چند مدلی (MME) متشکل از تعدادی از مدل های همادی آمریکای شمالی به همراه سامانه فصلی مرکز اروپایی پیش بینی میان مدت وضع هوا (ECMWF) در محدوده جغرافیایی ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی و ۱۰ تا ۶۵ درجه شرقی (شامل تعدادی از کشورهای خاورمیانه و آسیای مرکزی و جنوب غربی) در پیش بینی بارش زمستانه مورد ارزیابی قرار گرفت (احسان و همکاران، ۲۰۱۶). نمونه دیگر، ارزیابی مهارت پیش بینی بارش مدل های آمریکای شمالی در ۱۷ منطقه هیدرو اقلیمی در کشور چین است (ما و همکاران، ۲۰۱۶). اما در تعیین مقیاس مکانی مناسب برای تولید پیش بینی های فصلی، ملاحظات دیگری نیز وجود دارد. اولین مورد، ضرورت های مدل سازی است که به واسطه آن از برونداد پیش بینی های اقلیمی به عنوان درونداد مدل بعدی در زنجیره مدل سازی استفاده می شود. در مدل سازی توزیعی هیدرولوژیکی، مقیاس گاهی متغیرهای اقلیمی برای تولید پیش بینی های هیدرولوژیکی باید بر روی داده های شبکه بندی شده صورت پذیرد. این الزام در مدل سازی یکپارچه هیدرولوژیکی وجود ندارد. دومین مورد، تناسب مقیاس مکانی پیش بینی ها با اطلاعاتی است که در سطوح مدیریتی مختلف به کار گرفته می شود که در جدول ۱، نمونه هایی از آن ارائه شده است.

جدول ۱. مقیاس مکانی مناسب برای ارائه پیش‌بینی‌های فصلی متناسب با سطوح مدیریتی بخش آب و کشاورزی.

هدف	مقیاس مکانی مناسب برای ارائه پیش‌بینی فصلی	سطح مدیریتی
تصمیم‌گیری‌های کلان	حوضه‌های آبریز شش‌گانه درجه ۱	- شورای عالی آب - شورای هماهنگی مدیریت به‌هم‌پیوسته حوضه آبریز
- تخصیص و انتقال آب بین حوضه‌های آبریز سی‌گانه - پیش‌بینی آورد به مخازن	متوسط مکانی در سطح حوضه آبریز درجه ۲ یا تفکیک مکانی بالاتر	- مدیران ارشد وزارت نیرو
- برنامه‌ریزی کمی و کیفی سامانه‌های رودخانه-مخزن - مدیریت خشک‌سالی - تحویل حجمی آب به کشاورزان	- شبکه‌های آبیاری و زهکشی - ایستگاه‌های شاخص در سطح استان یا حوضه آبریز	- جهاد کشاورزی - شرکت‌های آب منطقه‌ای استان‌ها

تخصیص منابع آب در حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

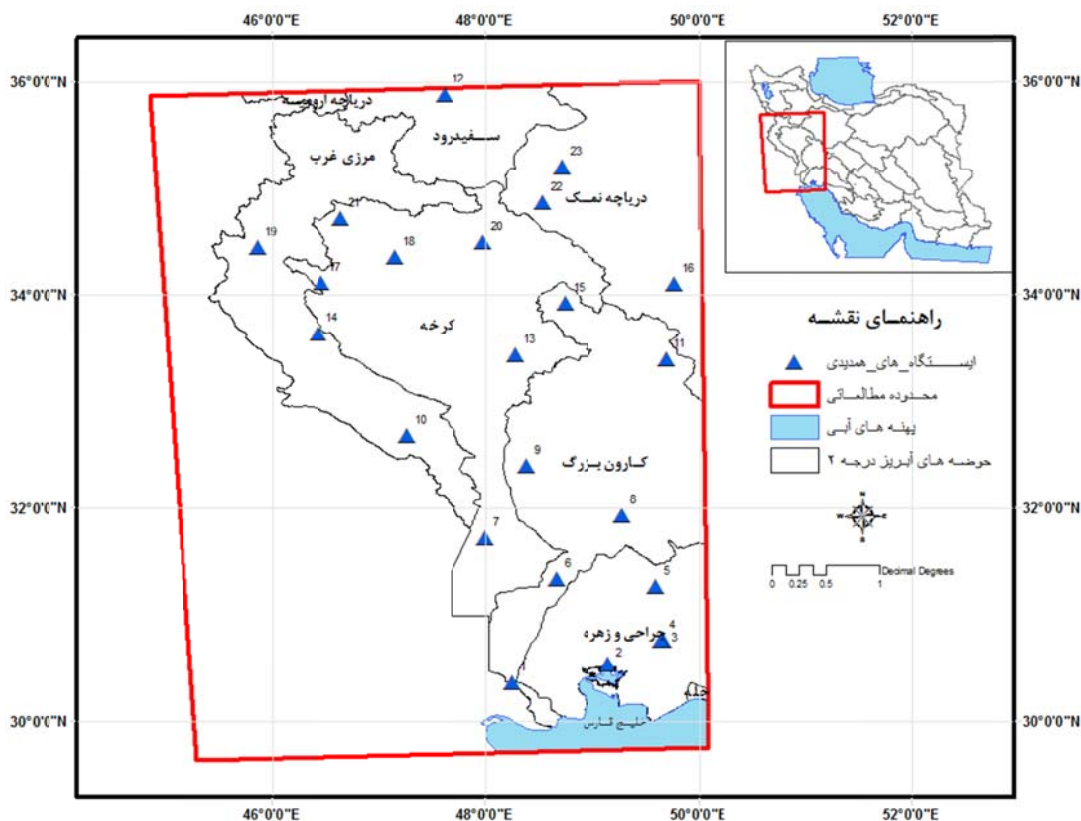
۲-۱. محدوده مطالعاتی و داده‌های بارش مورد استفاده موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه در این پژوهش، محدوده ۴۵ تا ۵۰ درجه شرقی و ۳۰ تا ۳۶ درجه شمالی شامل حوضه آبریز کرخه، مرزی غرب، بخش‌هایی از حوضه‌های کارون بزرگ، زهره- جراحی و سفیدرود بزرگ (بین حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه و دریاچه نمک) در ایران به همراه مساحتی از کشور عراق است (شکل ۱). حوضه کرخه با وسعتی در حدود ۵۱ هزار کیلومتر مربع و جمعیت حدود ۴ میلیون نفر، یکی از زیرحوضه‌های ۳۰ گانه بزرگ و مهم کشور است. استان‌های ایلام، خوزستان، لرستان، کردستان، مرکزی و همدان در این حوضه واقع شده‌اند. طرح‌های متعدد توسعه (در دست مطالعه، اجرا و بهره‌برداری) با مجموع حجم آب تنظیمی ۷۰۹۳ میلیون مترمکعب در این حوضه وجود دارد. حوضه کرخه از منظر برنامه‌ریزی منابع آب یک حوضه استراتژیک در غرب کشور ایران محسوب می‌شود. با این وجود، کاهش بارش و افزایش دمای این حوضه طی سال‌های گذشته به کمک تحلیل بلندمدت روند متغیرهای بارش-دما و مطالعات آشکارسازی و

در جمع‌بندی مرور منابع می‌توان اظهار داشت که پیش‌بینی‌های وضع هوا و اقلیم باید در مقیاس مکانی مناسب به تصمیم‌گیران ارائه شود. همچنین به دلیل وجود خطای سامانمند در مدل‌های گردش کلی جفت‌شده جو اقیانوس، باید از روش‌های پس‌پردازش مناسب برای حذف این گونه خطاها بهره گرفت که نتایج سایر مطالعات انجام شده نیز به ضرورت اعمال آن برای اصلاح و بهبود کارایی مدل‌های پیش‌بینی عددی اشاره داشته‌اند (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵؛ نجفی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین، می‌توان از ترکیب برون‌داد مدل‌های مختلف برای دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر با قابلیت اطمینان بیشتر استفاده کرد. انتظار می‌رود در پاسخ به نیاز صنعت آب کشور در برون‌رفت از چالش‌های کمی و کیفی، کاربست مدل‌های پیش‌بینی عددی در مقیاس فصلی مورد بررسی و توجه بیشتر محققین قرار گیرد. استفاده از این پیش‌بینی‌ها می‌تواند در خدمت مدیریت، برنامه‌ریزی و تخصیص بهنگام منابع آب و کشاورزی باشد (نجفی و مساح‌بوانی، ۱۳۹۵). هدف اصلی این تحقیق، معرفی یک رویکرد مناسب برای ارائه پیش‌بینی‌های فصلی متغیرهای اقلیمی با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه است که ضمن قابلیت به‌روزرسانی و استفاده عملیاتی، برای سطوح مختلف مدیریتی قابل استفاده باشد. این پیش‌بینی‌ها می‌تواند در کاربردهای هیدرولوژیکی، کشاورزی و

این مجموعه داده توسط مرکز هیدرومتئورولوژی و سنجش‌ازدور (CHRS) دانشگاه کالیفرنیا در ارواین واقع در ایالات متحده تهیه شده است. تفکیک مکانی این مجموعه داده برابر ۰/۲۵ درجه است که به صورت روزانه از ابتدای سال ۱۹۸۳ میلادی قابل دسترس است. عملکرد قابل قبول این مجموعه داده در مقایسه با یک شبکه بسیار متراکم از داده‌های مشاهداتی نقطه‌ای در ایران (بیش از ۲۱۰۰ ایستگاه زمینی) در مطالعات مختلف تأیید شده است (کتیرائی و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷). برای اطمینان از کارایی و دقت PERSIANN-CDR در محدوده مورد مطالعه، این مجموعه داده با بارش ثبت شده از ۲۳ ایستگاه همدیدی در دوره زمانی اکتبر-دسامبر، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در جدول ۲، مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی ارائه شده است. در شکل ۱، جانمایی ایستگاه‌ها در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

نسبت‌دهی تغییر اقلیم گزارش شده است (ظهاری و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور نیز نشان می‌دهد که شاخص تنش آبی حوضه در حدود ۰/۴۸ (تنش آبی شدید) است (بهان‌سد، ۱۳۹۲). لذا اطلاع از وضعیت متغیرهای اقلیمی با کمک پیش‌بینی‌های فصلی می‌تواند به منظور حل مشکلات در برنامه‌ریزی‌های سالانه مورد استفاده قرار گیرد. این اطلاعات می‌تواند در بهره‌برداری از سامانه‌های رودخانه مخزن در بالادست و پایین‌دست سدهای واقع در این حوضه در سطح شورای عالی آب، وزارت نیرو، شورای هماهنگی مدیریت به‌هم‌پیوسته حوضه آبریز کرخه، شرکت‌های آب منطقه‌ای و سایر گرداران به کار گرفته شود.

در این پژوهش از داده‌های بارش شبکه‌بندی شده از اطلاعات سنجش‌ازدور بر اساس شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های مشاهداتی اقلیمی (PERSIANN-CDR) استفاده شده است (عاشوری و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه در این پژوهش.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده در این پژوهش.

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریاهای آزاد (متر)	ارتفاع از سطح دریاهای آزاد (متر)	ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریاهای آزاد (متر)
۱	آبادان	۳۰/۳۶	۴۸/۲۵	۶/۶	۱۳	۱۱۴۷/۸	خرم‌آباد	۳۳/۴۳	۴۸/۲۸	۱۱۴۷/۸
۲	بندر ماهشهر	۳۳/۵۳	۴۹/۱۵	۶/۲	۱۴	۱۳۳۷	ایلام	۳۳/۶۳	۴۶/۴۳	۱۳۳۷
۳	امیدیه - آقاجری	۳۳/۷۶	۴۹/۶۶	۲۷	۱۵	۱۶۲۹	بروجرد	۳۳/۹۱	۴۸/۷۵	۱۶۲۹
۴	امیدیه	۳۰/۷۶	۴۹/۶۵	۲۴/۹	۱۶	۱۷۰۸	اراک	۳۴/۱	۴۹/۷۶	۱۷۰۸
۵	رامهرمز	۳۱/۲۶	۴۹/۶	۱۵۰/۵	۱۷	۱۳۴۸/۸	اسلام‌آباد غرب	۳۴/۱۱	۴۶/۴۶	۱۳۴۸/۸
۶	اهواز	۳۱/۳۳	۴۸/۶۶	۲۲/۵	۱۸	۱۳۱۸/۶	کرمانشاه	۳۴/۳۵	۴۷/۱۵	۱۳۱۸/۶
۷	بستان	۳۳/۷۱	۴۸	۷/۸	۱۹	۵۴۵	سر پل ذهاب	۳۴/۴۵	۴۵/۸۶	۵۴۵
۸	مسجدسلیمان	۳۱/۹۳	۴۹/۲۸	۳۲۰/۵	۲۰	۱۴۶۸	کنگاور	۳۴/۵	۴۷/۹۸	۱۴۶۸
۹	دزفول	۳۲/۴	۴۸/۳۸	۱۴۳	۲۱	۱۳۷۹/۷	روانسر	۳۴/۷۱	۴۶/۶۵	۱۳۷۹/۷
۱۰	دهران	۳۲/۶۸	۴۷/۲۶	۲۳۲	۲۲	۱۷۴۱/۵	همدان (فرودگاه)	۳۴/۸۶	۴۸/۵۳	۱۷۴۱/۵
۱۱	الیگودرز	۳۳/۴	۴۹/۷	۲۰۲۲	۲۳	۱۶۷۹/۷	همدان	۳۵/۲	۴۸/۷۱	۱۶۷۹/۷
۱۲	بیجار	۳۵/۸۸	۴۷/۶۱	۱۸۸۳/۴						

۲-۲. مقایسه داده‌های بارش سنجنش‌ازدور با داده‌های (Continuous) در ارزیابی داده‌های سنجنش‌ازدور مورد ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی
 معیارهای دوحالتی (Dichotomous) و پیوسته
 استفاده قرار می‌گیرد. معیارهای دوحالتی بر اساس جدول پیش‌بینی به شرح جدول ۳ است:

۲-۲. مقایسه داده‌های بارش سنجنش‌ازدور با داده‌های (Continuous) در ارزیابی داده‌های سنجنش‌ازدور مورد ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی
 معیارهای دوحالتی (Dichotomous) و پیوسته

جدول ۳. جدول پیش‌بینی دوحالتی بین وقوع/عدم وقوع بارش (مشاهداتی در محل ایستگاه و برآورد شده سنجنش‌ازدور).

بارش مشاهداتی در محل ایستگاه

		رخ داده (Yes)	رخ نداده (No)	مجموع
بارش برآورد شده به کمک سنجنش‌ازدور	رخ داده (Yes)	موفقیت در تعیین وقوع بارش (Hits)	هشدار اشتباه (False alarm)	بارش برآورد شده سنجنش‌ازدور اتفاق افتاده
	رخ نداده (No)	خطا (Misses)	موفقیت در تعیین عدم وقوع بارش (Correct Negatives)	بارش برآورد شده سنجنش‌ازدور اتفاق نیفتاده
مجموع		بارش مشاهداتی رخ داده	بارش مشاهداتی رخ نداده	مجموع

۲-۳. تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌های همدیدی

پس از ارزیابی PERSIANN-CDR در مقایسه با بارش ثبت‌شده از ایستگاه‌های همدیدی، یک مجموعه داده بارش منطقه‌ای جدید به‌عنوان داده مرجع توسعه داده شده است. در این مجموعه داده، میدان بارش PERSIANN CDR تصحیح خطا و بر اساس مقادیر ثبت‌شده از ایستگاه‌های همدیدی میزان می‌شود. سپس تلفیق بین داده‌های سنجش‌ازدور و ایستگاه‌ها انجام می‌شود. بدین‌منظور، ارزیابی متوسط مقادیر بارش برآورد شده سنجش‌ازدور در محل هر ایستگاه محاسبه می‌شود. سپس از روش فاکتور اریب‌ضرب (Multiplicative Bias) برای تصحیح خطا استفاده می‌شود (اینس و هسن، ۲۰۰۶). در این روش، فاکتور اریبی کليما‌تولوژیکی بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$CB_{t,j} = \frac{\sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{23} GG_{t,j}}{\sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{23} REF_{t,j}} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، t شمارنده ماه، $CB_{t,j}$ اریبی متوسط برای ماه t برای هر سال در ایستگاه j، $GG_{t,j}$ مقدار بارش ایستگاه j در ماه t و $REF_{t,j}$ مقدار بارش برآورد شده سنجش‌ازدور در سلولی است که ایستگاه در آن واقع می‌باشد. رابطه (۵) برای داده‌های روزانه نیز با اصلاحاتی قابل استفاده خواهد بود. پس از تعیین اریبی متوسط، مقادیر آن در شبکه درون‌یابی می‌شود و تصحیح خطا اعمال می‌شود. در گام بعد، از روش مدل خطی فضایی-زمانی برای تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با داده‌های ایستگاهی استفاده شده است. در کاربست این روش، مدل‌سازی بخش قطعی با برازش رگرسیون خطی ساده و در نظر گرفتن مؤلفه زمان در مختصات x و y، انجام می‌شود. برای هر ماه از سال، یک رگرسیون خطی بین داده‌های ایستگاهی و داده‌های استخراج شده سنجش‌ازدور در محل ایستگاه برازش داده می‌شود. سپس پیش‌بینی روند مکانی به کمک این روابط صورت می‌گیرد. درون‌یابی مقادیر باقی‌مانده‌ها، گام بعدی

بر اساس جدول ۳، معیارهای دوحالتی مورد بررسی در این پژوهش شامل نمره اریبی (فراوانی)، احتمال آشکارسازی (نرخ موفقیت)، نسبت هشدار اشتباه و نمره مهارت Heidke به‌ترتیب بر اساس روابط (۱) تا (۴) است:

$$\text{Frequency BIAS (FBS)} = \frac{\text{هشدار اشتباه} + \text{موفقیت}}{\text{خطا} + \text{موفقیت}} \quad (1)$$

$$\text{POD} = \frac{\text{موفقیت}}{\text{خطا} + \text{موفقیت}} \quad (2)$$

$$\text{FAR} = \frac{\text{هشدار اشتباه}}{\text{هشدار اشتباه} + \text{موفقیت}} \quad (3)$$

$$\text{HSS} = \frac{\text{تصادفی صحیح مورد انتظار} - (\text{موفقیت در تعیین عدم وقوع بارش} + \text{موفقیت تصادفی صحیح مورد انتظار} - N)}{\text{تصادفی صحیح مورد انتظار} - N} \quad (4)$$

می‌باشد. در رابطه (۴)، صحیح مورد انتظار تصادفی از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{N} = \frac{\text{تصادفی صحیح مورد انتظار}}{N} = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{هشدار اشتباه} + \text{موفقیت} \\ \text{خطا} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{خطا} \\ \text{موفقیت در تعیین عدم وقوع بارش} + \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{هشدار اشتباه} \\ \text{موفقیت در تعیین عدم وقوع بارش} + \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{خطا} \\ \text{موفقیت در تعیین عدم وقوع بارش} + \end{array} \right)} \quad (5)$$

برای ارزیابی متغیرهای پیوسته نیز از نمودار پراکنش، ضریب همبستگی (CORR)، مقدار اریبی نسبی (BIAS) و متوسط قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شده است. این شاخص‌ها در ارزیابی دقت و کارایی بارش برآورد شده به کمک سنجش‌ازدور در یک دوره ۳۰ ساله مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط شاخص‌های پیوسته عبارت است از:

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{k=1}^N (S_k - \bar{S})(G_k - \bar{G})}{[\sum_{k=1}^N (S_k - \bar{S})^2 \sum_{k=1}^N (G_k - \bar{G})^2]^{1/2}} \quad (6)$$

$$\text{(Multiplicative)BIAS} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G_k} \quad (7)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} |S_k - G_k| \quad (8)$$

که در آن S_k داده‌های سنجش‌ازدور بارش، G_k داده‌های ایستگاهی می‌باشد.

آزمایشگاه دینامیک شاره‌های ژئوفیزیکی (GFDL) و مرکز زیست‌محیطی کانادا (Environment Canada) توسعه داده شده‌اند. مدل‌های گردش کلی جفت‌شده جو اقیانوس که در فاز اول این پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرند، پیش‌بینی‌های فصلی تا افق ۹ و ۱۱ ماه (ماهانه) تولید می‌کنند. این پیش‌بینی‌ها در دو دوره بازپیش‌بینی و زمان واقعی قابل دسترس هستند. جدول ۳، مشخصات مدل‌های مورد استفاده از این پروژه در تحقیق حاضر را ارائه می‌دهد. ارزیابی برون‌داد مدل‌های همادی آمریکای شمالی برای پیش‌بینی بارش در کشور ایران تاکنون در مطالعات مختلف بررسی شده است. نتایج مطالعات مذکور، نشان‌دهنده‌ی مهارت این مدل‌ها (انفرادی/همادی چندمدلی) در اکثر مناطق کشور است (شیروانی و لندمن، ۲۰۱۶؛ نجفی و همکاران، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶، ۲۰۱۷). برون‌داد هر مدل در زمان انتظار (Lead time) پیش‌بینی صفر (ماه) با تفکیک مکانی ۱ درجه از درگاه برخط کتابخانه داده مؤسسه بین‌المللی پژوهش برای اقلیم و جامعه (IRI) بارگیری شده است (قابل دسترس از <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/Models> //NMME).

در این پژوهش از مدل‌های ارائه شده در جدول ۴ به‌صورت انفرادی و همادی چندمدلی استفاده می‌شود. بدین‌منظور از اعضای همادی هر مدل در آغازگری (Initialization) مربوط به ابتدای ماه اکتبر و زمان انتظار صفر ماه، میانگین گرفته شده است. سامانه‌های همادی چندمدلی نیز با ترکیب برون‌داد چندین مدل انفرادی (۲ تا ۸ مدل) با وزن‌دهی یکسان به برون‌داد هر مدل توسعه داده شده است. مجموع وزن‌ها در توسعه همادی چندمدلی برابر ۱ است (به‌عنوان مثال وزن هر مدل در همادی ۵مدلی برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است). برای همادی چندمدلی، کلیما‌تولوژی هر مدل انفرادی، قبل از وزن‌دهی محاسبه و از برون‌داد مدل مربوطه در هر سلول ۱ درجه کسر شده است.

است. بدین‌منظور از روش معکوس فاصله در درون‌یابی مقدار اریب متوسط روی شبکه داده مرجع استفاده شده است. در مطالعات مختلف نشان داده شده که روش درون‌یابی معکوس فاصله، نتایجی مناسب و مشابه با روش کریجینگ یا رگرسیون در درون‌یابی فضایی بارش ارائه خواهد داد (دیرکس و همکاران، ۱۹۹۸؛ هسیه و همکاران، ۲۰۰۶؛ کنگ و تنگ، ۲۰۰۸؛ کورتزمن و همکاران، ۲۰۰۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ وو و همکاران، ۲۰۱۰). حداقل و حداکثر تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در درون‌یابی به‌روش فاصله معکوس برابر ۲ و ۵ عدد در شعاع ۱۰۰ کیلومتری هر ایستگاه انتخاب شده است. برای جلوگیری از تأثیر محل ایستگاه در فرآیند درون‌یابی و پیاده‌سازی روش‌شناسی تلفیق در نزدیکی مرز محدوده مورد مطالعه، از ایستگاه‌های همدیدی خارج از محدوده نیز استفاده شده است. قابل ذکر است که برای دوره زمانی مورد نظر در این پژوهش، داده‌های روزانه به داده‌های ماهانه (برای هر یک از ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر) و سپس بارش متوسط سه‌ماهه (اکتبر-دسامبر) تبدیل شده است. تفکیک مکانی محصول نهایی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت تلفیق داده‌های ایستگاه سنجش از دور در هر سلول ۰/۲۵ درجه است که در ارزیابی پیش‌بینی‌های فصلی بارش به‌عنوان داده مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. صحت‌سنجی مجموعه تلفیق‌شده، بر اساس داده‌های بارش ثبت‌شده هفت ایستگاه تبخیرسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که در مرحله کالیبراسیون از آنها استفاده نشده است.

۲-۴. مدل‌های همادی آمریکای شمالی

مدل‌های همادی آمریکای شمالی، سامانه‌های پیش‌بینی هستند که در مراکز اقلیمی بزرگ و معتبر واقع در کشورهای آمریکای شمالی نظیر مرکز ملی اقیانوس و جو (NOAA)، سازمان ملی فضایی و هوانوردی (NASA)، مراکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP)،

جدول ۴. مدل‌های استفاده شده در این تحقیق به همراه خصوصیات آنها در همادی مدل‌های آمریکای شمالی (کرتمن و همکاران، ۲۰۱۴)

نام مدل	مرکز توسعه دهنده مدل	افق پیش‌بینی (ماه)	تعداد اعضای همادی	تفکیک مکانی افقی مدل جوی (درجه)	مرجع
CFSv2	مراکز ملی پیش‌بینی‌های زیست‌محیطی (ایالات متحد)	۹	۲۴	۰/۹	(سها و همکاران، ۲۰۱۰)
CMC1-CanCM3	مرکز زیست‌محیطی کانادا	۱۱	۱۰	۲/۵	(مری‌فیلد و همکاران، ۲۰۱۳)
CMC2-CanCM4		۱۱	۱۰		
GFDL-CM2.1-aer04	آزمایشگاه دینامیک شماره‌های ژئوفیزیکی	۱۱	۱۲	۲	(ژنگ و همکاران، ۲۰۰۷)
GFDL-CMp2.5(FLORA)		۱۱	۱۲	۰/۵	
GFDL-CMp2.5(FLOB)		۱۱	۱۲	۰/۵	
NCAR-CCSM4	مرکز ملی برای پژوهش‌های جوی	۱۱	۱۰	۰/۹ × ۱/۲۵	(جنت و همکاران، ۲۰۱۰)
NASA-GMAO	ملی فضایی و هوانوردی (ناسا)	۹	۱۱	۱ × ۱/۲۵	(ورنیرس و همکاران، ۲۰۱۲)

۲-۵. تحلیل همبستگی متعارف

از رویکرد تحلیل همبستگی متعارف در این تحقیق برای پس‌پردازش و مقیاس‌گامی برون‌داد مدل‌های آمریکای شمالی استفاده شده است. در این روش‌شناسی، توابع متعامد تجربی (EOFs) برای استخراج تعداد کمتری سری زمانی مستقل و غیروابسته و کاهش مسئله با اطلاعات و ابعاد زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس، روابط خطی بین پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده (به ترتیب مجموعه داده مرجع و برون‌داد مدل‌های گردش کلی پیش‌بینی فصلی اقلیمی) به گونه‌ای توسعه داده می‌شود که ضریب همبستگی میان این دو مجموعه با تعداد مؤلفه‌های بهینه توابع متعامد تجربی، بیشینه شود. بدین صورت سعی می‌شود بیشترین درصد از واریانس پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود.

در این تحلیل متغیرهای جدیدی تعریف می‌شود که به حداکثرسازی رابطه بین دو بردار X (پیش‌بینی‌کننده) و Y (پیش‌بینی‌شونده) در ماتریس کواریانس منجر خواهد شد (ویلکس، ۲۰۰۷). متغیرهای جدید U_m و W_m از ضرب

داخلی جفت بردارهای متمرکز اصلی \bar{x} و \bar{y} با بردارهای وزن به دست می‌آیند و حداکثرسازی همبستگی بین متغیرهای جدید تعریف شده با جفت بردارهای متمرکز اصلی با محاسبه مجموعه‌ای از زوج وزن‌ها بر اساس معادلات (۱۰) و (۱۱) است:

$$v_m = a_m^T x' = \sum_{i=1}^I a_{m,i} x'_i, \quad m = 1, \dots, \min(I, J) \quad (10)$$

$$w_m = b_m^T y' = \sum_{j=1}^J b_{m,j} y'_j, \quad m = 1, \dots, \min(I, J) \quad (11)$$

که در آن a_m و b_m بردارهای اوزان، I و J مؤلفه‌های \bar{x} و \bar{y} به عنوان یک بردار جزءبندی شده $C^T = [x'^T, y'^T]$ هستند. در نهایت یک ماتریس همبستگی متشکل از چهار بلوک تشکیل خواهد شد. تعداد زوج‌ها یعنی M نیز به صورت کمینه I و J خواهد بود. C^T نیز ماتریس کواریانس است. این مدل آماری برای بیشینه‌سازی همبستگی بین تعداد بهینه‌ای از توابع متعامد تجربی داده‌های مرجع و برون‌داد مدل‌های عددی پیش‌بینی فصلی در یک دامنه مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور، داده‌های متغیر پیش‌بینی‌کننده باید در سطح

روی مدل‌های انفرادی و همادی چند مدلی، ارزیابی در تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در مقایسه با داده‌های مرجع صورت می‌گیرد. مدل برتر، مدلی است که نیکویی برازش آن در مقایسه با سایر مدل‌ها در دوره صحت‌سنجی بیشینه باشد. برای ارزیابی تمامی مدل‌ها (انفرادی و چند مدلی)، معیارهای مختلفی محاسبه می‌شود. معیارهای پیوسته شامل همبستگی اسپیرمن (رابطه ۱۲)، اریبی متوسط (رابطه ۱۳)، خطای ریشه میانگین مربعات (رابطه ۱۴) که معادلات آن به شرح زیر است:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (12)$$

$$\text{Mean Bias (MB)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M - O) \quad (13)$$

$$\text{Root Mean Square Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - O)^2}{n}} \quad (14)$$

در معادله (۱۲)، d_i اختلاف میان رتبه‌های زوجی بین پیش‌بینی و مشاهده، n تعداد مشاهدات است. M و O در روابط ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده می‌باشند. مساحت ROC (زیرنرمال و بیش از نرمال) نیز معیار ارزیابی به صورت متغیر طبقه‌بندی شده است.

برای صحت‌سنجی CCA، از اعتبارسنجی متقابل به صورت حذف یک سال استفاده شده است. فرآیند بدین صورت است که برای ارزیابی پیش‌بینی هر سال از دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۵، پیش‌بینی همان سال از سری پیش‌بینی‌ها حذف شده است. سپس برای پیش‌بینی بارش همان سال حذف‌شده، از ۲۹ پیش‌بینی سال‌های دیگر در دوره صحت‌سنجی استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال از داده‌های پیش‌بینی سال‌های ۱۹۸۷-۲۰۱۵ برای پیش‌بینی سال ۱۹۸۶ استفاده می‌شود. لذا در این نوع از اعتبارسنجی، ۳۰ سال پیش‌بینی (هر پیش‌بینی برای هر یک سال در دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۵) انجام می‌شود. با کمک اعتبارسنجی متقابل برای آموزش مدل CCA، از بیش‌برازش و هم‌خطی چندگانه جلوگیری می‌شود. از ابزار پیش‌بینی‌پذیری اقلیمی بدین منظور استفاده شده است (میسون و تیپت،

به‌صورت شبکه‌بندی شده) در دسترس باشد. در این پژوهش، ضریب همبستگی اسپیرمن به‌عنوان شاخص نیکویی برازش انتخاب شده است. این ضریب به توزیع متغیر (بارش) حساس نیست. در انتهای فرآیند کاربست تحلیل همبستگی متعارف، شاخص نیکویی برازش با استخراج تعداد مؤلفه‌های اصلی بهینه، بیشینه خواهد شد. در کاربست تحلیل همبستگی متعارف، پیش‌بینی‌های احتمالاتی بارش تهیه می‌شود. با توجه به چولگی متغیر بارش، توزیع اولیه داده‌ها به‌روش تجربی محاسبه و صدک‌ها به توزیع نرمال استاندارد تبدیل شده است. فرض شده است خطاهای پیش‌بینی داده‌های تبدیل شده از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و واریانس خطا نیز با نمونه‌گیری از پارامترهای رگرسیون و خطاهای محاسبه شده در فرآیند اعتبارسنجی متقابل (که در بخش ۲.۵ توضیح داده شده است) تعیین می‌شود. احتمال‌های تجاوز از هر آستانه (زیرنرمال، نرمال و بالای نرمال) نیز از بهترین تخمین پیش‌بینی، توزیع و واریانس خطای فرض شده محاسبه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، با استفاده از بهترین تخمین پیش‌بینی برازش داده شده، حداکثر احتمال قرارگیری که برای یکی از سه طبقه تعریف شده یکتا خواهد بود، تعیین و گزارش می‌شود. لذا برای هر سلول، احتمال قرار گرفتن در هر یک از این طبقات تعیین و مجموع احتمالات قرار گرفتن در همه طبقات تعیین شده برابر ۱ خواهد بود. در پایان محاسبات، بازتبدیل به توزیع اولیه داده‌ها انجام شده است.

۲-۶. ارزیابی مدل‌های انفرادی همادی آمریکای شمالی و سامانه‌های همادی چند مدلی

سامانه‌های پیش‌بینی فصلی برای ۸ مدل انفرادی و سامانه‌های همادی چند مدلی برای دوره زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵ بررسی می‌شوند. این ارزیابی ابتدا روی برون‌داد مستقیم مدل‌ها در دوره صحت‌سنجی انجام خواهد شد. بدین‌منظور، داده‌های مرجع به تفکیک مکانی ۱ درجه، مشابه تفکیک مکانی برون‌داد مستقیم مدل‌ها بازشبکه شده‌اند. پس از اعمال تحلیل همبستگی متعارف

۲۰۱۷).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تعیین دقت و کارایی PERSIANN-CDR در

محدوده مورد مطالعه

در ابتدا معیارهای دو حالتی در ارزیابی داده‌های سنجش‌ازدور ارائه می‌شود. در دوره اکتبر-دسامبر، مقدار اریب (فراوانی)، احتمال آشکارسازی، نسبت هشدار اشتباه و نمره مهارت هایدکه به ترتیب برابر ۲/۰۱۸، ۰/۷۳، ۰/۶۳ و ۰/۳۶ محاسبه شده است. در شکل ۲، نتایج ارزیابی داده‌های PERSIANN-CDR با ایستگاه‌های همیدی در غرب کشور ایران نشان داده شده است. مقایسه PERSIANN CDR با داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که کیفیت داده‌های سنجش‌ازدور در کل محدوده مورد مطالعه یکسان نیست (شکل ۲). همبستگی بارش این مجموعه داده با مقادیر دیده‌بانی شده در اکثر ایستگاه‌ها

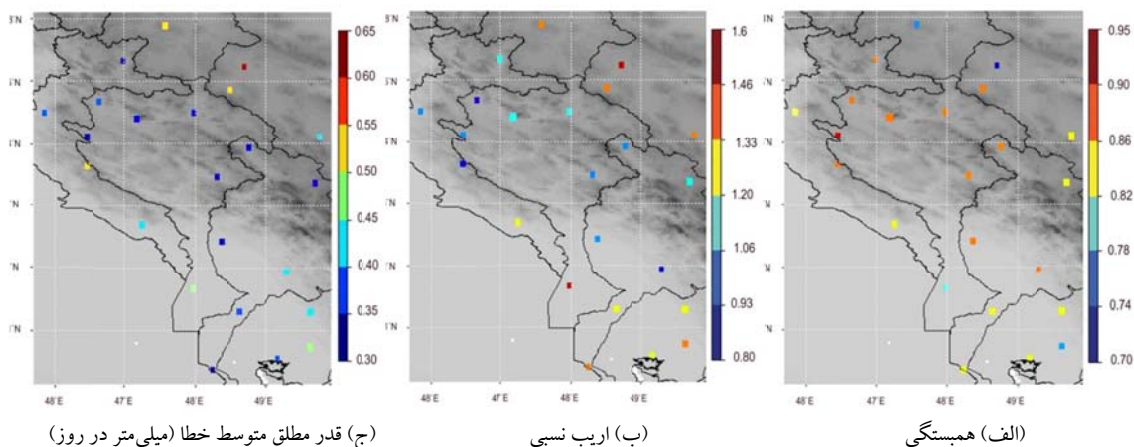
(۱۸ عدد)، بین محدوده ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ می‌باشد. کمترین ضریب همبستگی در ایستگاه امیدیه-آغاجری و بیجار (به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۸) محاسبه شده است. با متوسط‌گیری فضایی از ایستگاه‌ها در محدوده مورد مطالعه، مقادیر شاخص‌ها برابر است با $CORR = 0.95$ ، $BIAS = 1.125$. این مقادیر که به صورت متوسط ارائه شده است، در مجموع مناسب برآورد می‌شود. همچنین، دقت و کارایی PERSIANN-CDR در بالادست حوضه

کرخه را نیز می‌توان مورد پذیرش قرار داد. اما نسبت مجموع بارش PERSIANN-CDR به مقادیر مجموع بارش ایستگاه‌ها (اریب نسبی) در بعضی از قسمت‌ها دارای تفاوت در دامنه ۲۰ درصد (کم‌برآورد) تا ۶۰ درصد (بیش‌برآورد) است. انتظار می‌رود کیفیت داده‌های سنجش‌ازدور شبکه‌بندی شده پس از تصحیح خطا و تلفیق با بارش ثبت‌شده از ایستگاه‌های همیدی ارتقا یابد و برآورد نزدیک‌تری از داده‌های ثبت‌شده زمینی را ارائه دهد.

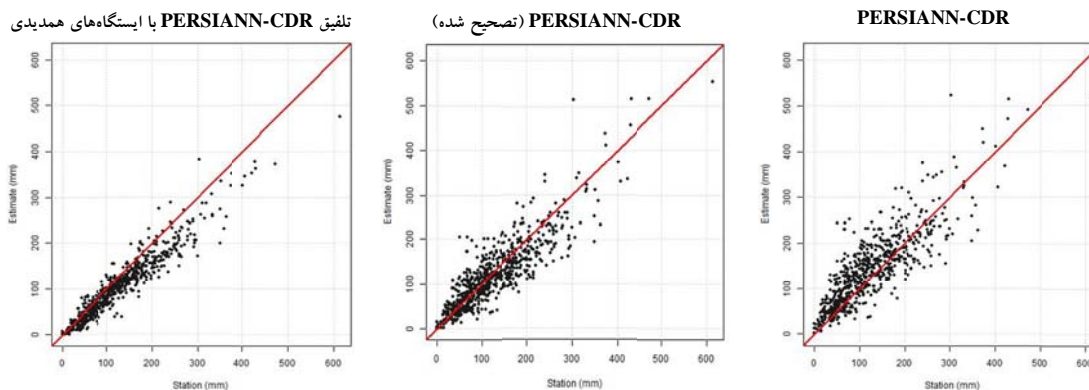
۳-۲. تصحیح خطا و تلفیق داده‌های PERSIANN

CDR با بارش ثبت شده از ایستگاه‌های همیدی

هدف از این بخش، تصحیح خطا و میزان کردن میدان بارش برآورد شده با سنجش‌ازدور بارش بر اساس داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌های همیدی می‌باشد. شکل ۳، نمودار پراکنش سه مجموعه داده (PERSIANN-CDR، PERSIANN-CDR، تصحیح‌شده و تلفیق سنجش از دور ایستگاه) را برای کل داده‌ها در مجموع سه‌ماهه اکتبر-دسامبر نشان می‌دهد. با بررسی منحنی پراکنش سه مجموعه داده مشخص می‌شود که پراکنندگی نقاط حول خط نیمساز برای داده‌های تلفیق‌شده از داده‌های تصحیح‌شده و برای داده‌های تصحیح‌شده در مقایسه با PERSIANN-CDR بیشتر است. پس از تلفیق، مقادیر همبستگی و قدر مطلق متوسط خطا در مقایسه با داده‌های تصحیح‌شده، به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.



شکل ۲. شاخص‌های محاسبه شده در ارزیابی PERSIANN-CDR با ایستگاه‌های همیدی در محدوده مورد مطالعه برای بارش اکتبر-دسامبر ۱۹۸۶-۲۰۱۵.



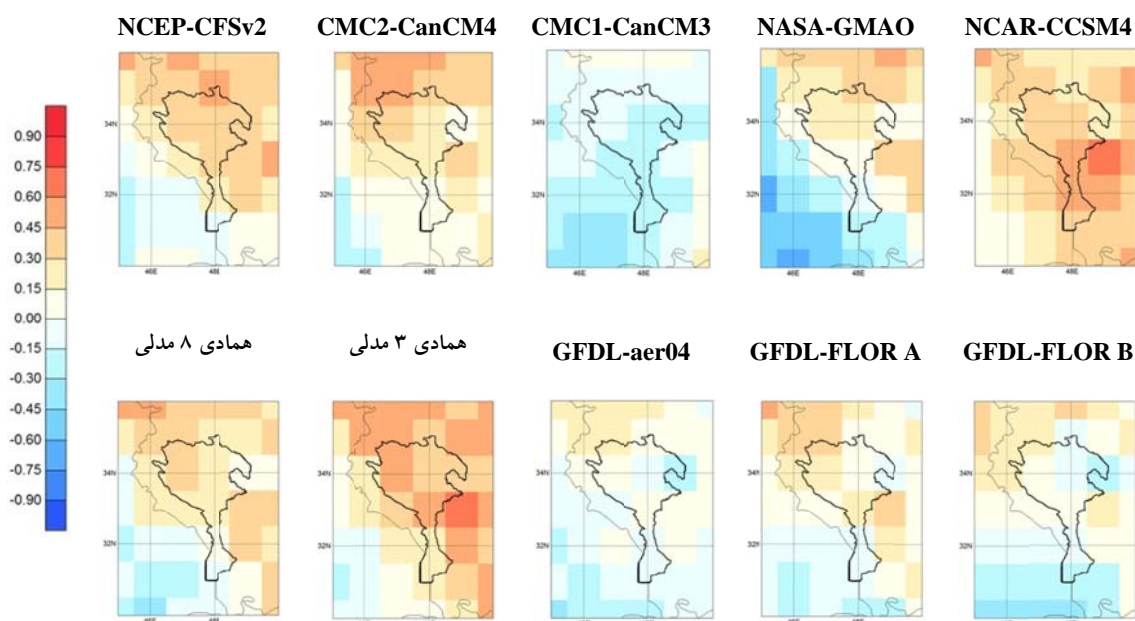
شکل ۳. نمودار پراکنش PERSIANN-CDR (شکل راست)، تصحیح خطا شده (شکل وسط) و تلفیق شده ایستگاه-سنجش از دور (شکل چپ) در محدوده مورد مطالعه برای مجموع بارش اکتبر-دسامبر.

درجه، می‌توان در سایر مطالعات با هدف پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی و عملکرد محصولات کشاورزی نیز قابل استفاده است.

۳-۳. ارزیابی بلندمدت مدل‌های پیش‌بینی انفرادی و

همادی چند مدلی آمریکای شمالی در دوره واسنجی شکل ۵ مقادیر همبستگی اسپیرمن را به صورت شبکه‌بندی شده برای سامانه‌های پیش‌بینی فصلی مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، برونداد مستقیم مدل‌های GFDL-aer04 و CMC1 دارای مقادیر همبستگی منفی و نزدیک به صفر در محدوده مورد مطالعه هستند. برونداد مدل‌های انفرادی CCSM4، CMC2 و CFSv2 دارای بیشترین شاخص نیکویی برازش (به ترتیب برابر با ۰/۴۸۶، ۰/۴۳۳ و ۰/۳۹۸) هستند. نتایج این پژوهش که مهارت مدل‌های انفرادی را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد، با یافته‌های سایر مطالعات در فصل اکتبر-دسامبر (به عنوان مثال نجفی و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت دارد. همادی ۳ مدلی متشکل از سه سامانه انفرادی برتر، دارای بیشترین مقدار همبستگی اسپیرمن (۰/۵۶) در بین همه مدل‌های انفرادی و سامانه‌های همادی چند مدلی متشکل از ۲ تا ۸ مدل است. برای همادی ۴ مدلی (متشکل از مدل‌های CFSv2، CCSM4، NASA-GMAO و CMC2-CanCM4) و همادی ۸ مدلی، شاخص نیکویی برازش به ترتیب برابر با ۰/۵۲۴ و ۰/۴۳۴ می‌باشد.

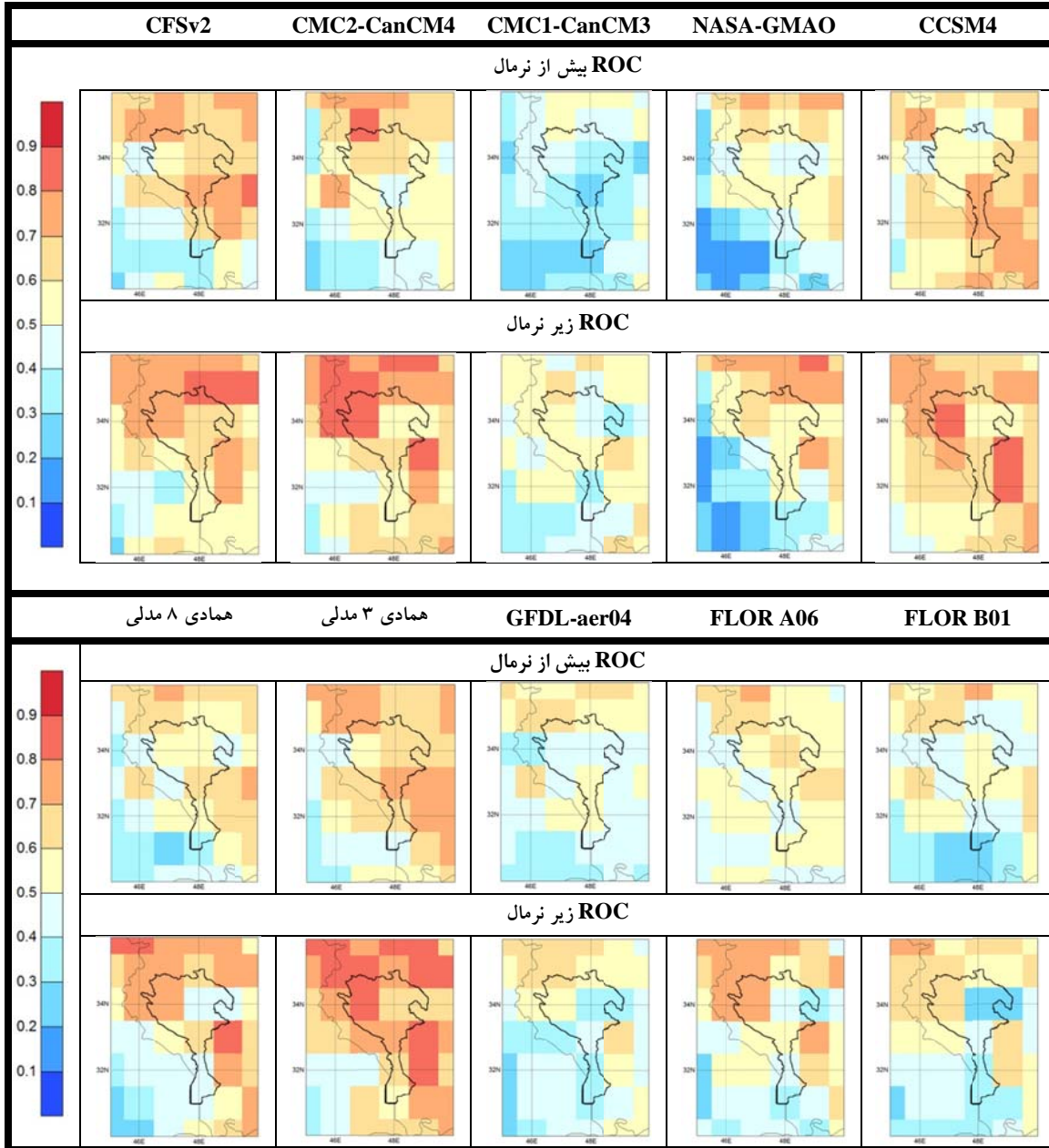
برای داده‌های تلفیق شده، مقدار اریب (فراوانی) برابر ۱/۲۶، احتمال آشکارسازی (نرخ موفقیت) برابر ۰/۸۵، نسبت هشدار اشتباه برابر ۰/۳۲ و نمره مهارت هایدکه برابر ۰/۷ می‌باشد. نسبت مجموع بارش برآورد شده سنجش‌ازدور به ایستگاه‌های همدمیدی پس از تلفیق کاهش پیدا کرده است (بین ۰/۷ تا ۰/۹۵). این بدان معنی است که داده‌های تلفیق شده در مقایسه با ایستگاه‌های همدمیدی کم‌برآورد است. برای صحت‌سنجی روش-شناسی مورد استفاده در تلفیق نیز، از بارش ثبت شده در هفت ایستگاه تبخیرسنجی (عبدالخان، عرب‌اسد، ایذه، بند سرخ لالی، باران‌گرد، سوسن ده‌شیخ و سد شهید عباسپور) در دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۱ استفاده شده است. قابل ذکر است که از این ایستگاه‌ها در فرآیند تلفیق استفاده نشده است. ضریب همبستگی بارش این ایستگاه‌های تبخیرسنجی با داده‌های تلفیق شده بین ۰/۷۹ و ۰/۹ می‌باشد که حاکی از کارایی مناسب مجموعه توسعه داده شده می‌باشد. قدر مطلق متوسط خطا نیز بین ۰/۸۲- و ۰/۰۳ میلی‌متر در روز (به ترتیب برای شهید عباسپور و باران‌گرد) محاسبه شده است. ارزیابی مجموعه شاخص‌های دوحالتی و پیوسته داده‌های تلفیق شده، عملکرد مناسب روش‌شناسی مورد استفاده را آشکار می‌سازد. لذا از داده‌های تلفیق شده می‌توان در ارزیابی پیش‌بینی‌های فصلی به عنوان یک مرجع مناسب استفاده کرد. این مجموعه داده بارش شبکه-بندی ارائه شده در این پژوهش با تفکیک مکانی ۰/۲۵



شکل ۵. ضریب همبستگی اسپیرمن بین پیش‌بینی بارش اکتبر-دسامبر مدل‌های آمریکای شمالی (انفرادی و سامانه‌های همادی ۳ و ۸ مدلی) با داده‌های مرجع (۱۹۸۶-۲۰۱۵).

ترسیم نمودار ROC فراهم خواهد شد. در شکل ۶، مساحت زیر منحنی ROC برای بارش‌های زیرنرمال و بیش از نرمال ۸ مدل انفرادی به همراه سامانه همادی ۳ و ۸ مدلی ارائه شده است. بر اساس شکل ۶، مهارت مدل‌ها در تشخیص پیش‌بینی بارش زیر نرمال در اکثر مناطق بیشتر از پیش‌بینی بارش زیرنرمال است. تعداد مدل‌هایی که قادر به پیش‌بینی صحیح بارش زیرنرمال در ۸۰٪ موارد بوده‌اند در مقایسه با شرایط بیش از نرمال مؤید این امر است. مقادیر زیرمنحنی ROC برای بارش زیرنرمال در همادی ۳ مدلی در اکثر مناطق واقع در کشور ایران بیش از ۰/۷ است.

ارزیابی شاخص‌های پیوسته نشان می‌دهد که کمترین دامنه تغییرات خطای ریشه میانگین مربعات در بین مدل‌ها مربوط به CCSM4 و GFDL-aer04 (حدود ۰/۶ میلی‌متر در روز) می‌باشد. ارزیابی متوسط تمامی مدل‌ها در محدوده بین ۰/۱۴- و ۳/۶۹ میلی‌متر در روز می‌باشد که ضرورت پس‌پردازش برون‌داد مستقیم مدل‌ها را نشان می‌دهد. اطلاع از احتمال وقوع بارش زیرنرمال در مقابل بارش بیش از نرمال اهمیت خاصی برای تصمیم‌گیران به‌خصوص در برنامه‌ریزی منابع آب دارد. این قابلیت تفکیک (پیش‌بینی زیرنرمال از پیش‌بینی بالای نرمال) با



شکل ۶. مساحت زیر منحنی ROC (زیرنرمال و بیش از نرمال) برونداد مستقیم مدل‌های انفرادی و سامانه‌های همادی ۳ و ۸ مدلی برای بارش اکتبر-دسامبر (۱۹۸۶-۲۰۱۵).

پیش‌بینی‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از اجراهای متعدد، محدوده با موقعیت جغرافیایی ۴۵ تا ۵۶ درجه شرقی و ۲۹ تا ۳۷ درجه شمالی برای استخراج الگوهای توابع متعامد تجربی بهینه در این پژوهش انتخاب شد. سپس، معیارهای ارزیابی برای هر مدل محاسبه و شکل‌های مرتبط با محاسبات همبستگی اسپیرمن و مساحت ROC زیرنرمال و بیش از نرمال تهیه شد.

۳-۴. مقیاس گاهی برونداد مدل‌های انفرادی و همادی

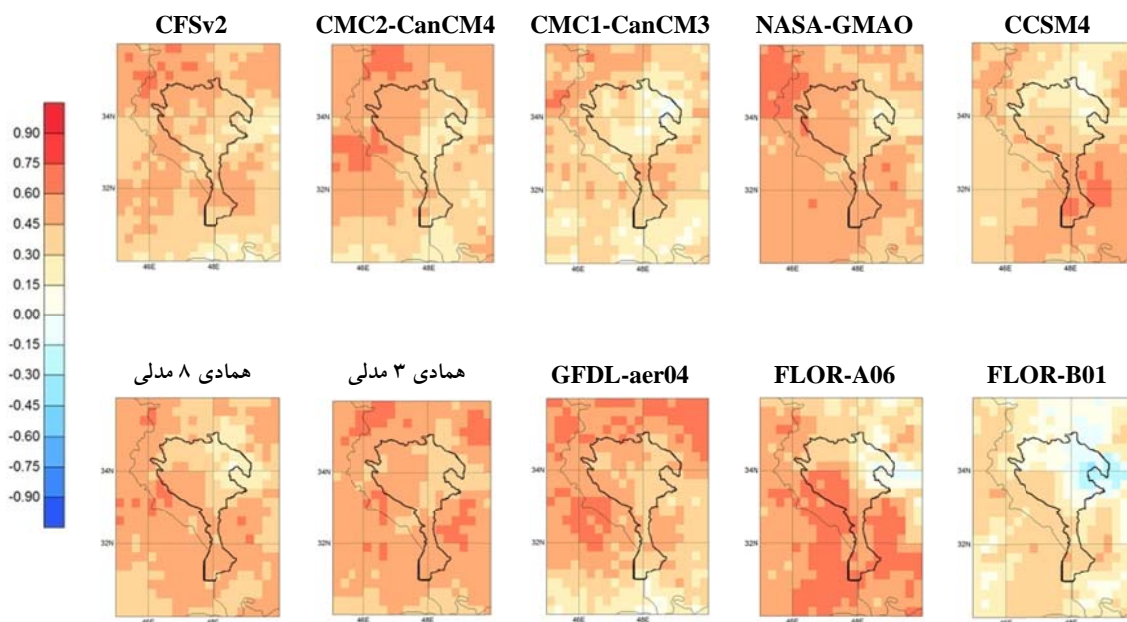
چند مدلی

نتایج ارزیابی برونداد مدل‌های انفرادی و همادی چند مدلی پس از اعمال تحلیل همبستگی متعارف (به صورت مقیاس گاهی شده) در دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۵ ارائه شده است. با توجه به قابلیت CCA در تصحیح خطای فضایی، دامنه‌های مختلفی برای تعیین محدوده مکانی مناسب برای

قبل و پس از اعمال CCA) برای دو مدل CMC1 و GFDL-aer04 قابل ملاحظه می‌باشد (شکل ۷). همچنین در بین اکثر سامانه‌های همادی چند مدلی مقیاس کاهی شده (متشکل از سامانه‌های همادی ۳ تا ۶ مدله)، شاخص نیکویی برازش پس از اعمال CCA از ۰/۶ فراتر می‌رود که معیاری از یک پیش‌بینی فصلی مناسب است. در مقایسه نتایج ارائه شده در بخش ۳.۳ و ۴.۳، نقش پس‌پردازش در استفاده از برون‌داد مدل‌های عددی پیش‌بینی اقلیمی آشکار می‌شود که نشان می‌دهد کاربست CCA منجر به ارتقای کلی پیش‌بینی‌های بارش در محدوده مورد مطالعه در مقایسه با برون‌داد مستقیم مدل‌ها شده است.

محاسبات ROC برای مدل‌های انفرادی همادی چند مدلی به صورت مقیاس کاهی شده در محدوده مورد مطالعه در شکل ۸ ارائه شده است. مقایسه شکل ۶ با شکل ۸ نشان می‌دهد که در اکثر مدل‌ها، مساحت زیرمنحنی ROC (برای بارش بیش از نرمال) پس از اعمال CCA در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرد.

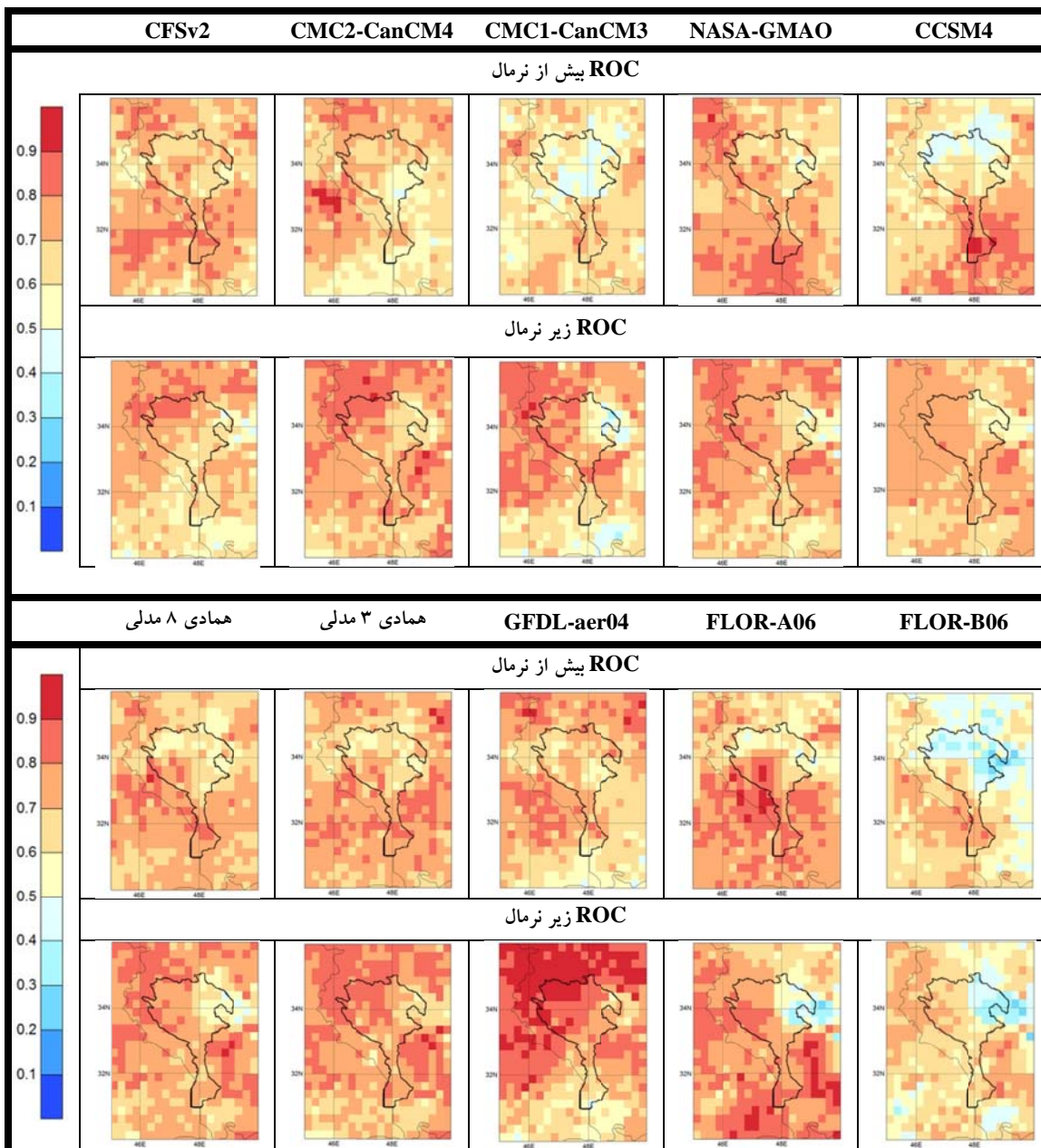
شکل ۷، همبستگی اسپیرمن مدل‌های مورد بررسی تحقیق را به شکل مقیاس کاهی شده نشان می‌دهد. در بین ۸ مدل انفرادی، بیشترین مقدار نیکویی برازش متعلق به GFDL aer04 (۰/۶۰۹) است. تعداد مدهای بهینه برای پیش‌بینی کننده، پیش‌بینی شونده و مدهای تحلیل همبستگی متعارف در مقیاس کاهی این مدل به ترتیب برابر ۱۰، ۱۵ و ۲ است. در بین سامانه‌های چند مدلی، مقدار همبستگی اسپیرمن برای سامانه همادی ۳ مدلی (برابر با ۰/۶۲۳) از سایر سامانه‌های چند مدلی (از جمله سامانه همادی ۸ مدلی با همبستگی اسپیرمن ۰/۵۷۸) بیشتر است. تفاوت ضریب همبستگی نشان داده شده بین مدل‌های مورد بررسی در تعداد نقاطی از شبکه است که در آنها $0.45 \leq \rho \leq 0.60$ و $0.60 \leq \rho \leq 0.75$. کمترین ضریب همبستگی (در مقایسه با همه مدل‌ها) برابر با ۰/۴۰۳ برای FLOR-B01 می‌باشد. در اکثر مدل‌های بررسی شده، بیشترین مقادیر همبستگی در مناطق خارج از حوضه کرخه دیده می‌شود (به عنوان مثال در بخش شرقی پایین دست حوضه کرخه در مدل‌های FLOR-A06 و سامانه همادی ۳ مدلی). تفاوت شاخص نیکویی برازش



شکل ۷. ضریب همبستگی اسپیرمن بین پیش‌بینی بارش مقیاس کاهی شده مدل‌های آمریکای شمالی (انفرادی و سامانه‌های همادی ۳ و ۸ مدلی) با داده‌های مرجع (۱۹۸۶-۲۰۱۵) اکتبر-دسامبر.

محدوده مورد مطالعه شده است به‌نحوی که ROC زیرنرمال در مناطق شمالی محدوده مورد مطالعه در مدل GFDL-aer04 بین ۰/۹ و ۱ (طبقه مطلوب حداکثر) قرار می‌گیرد. تغییرات مکانی ROC زیرنرمال مربوط به سامانه همادی ۳ مدلی در شکل ۶ و ۸ دارای الگوی نسبتاً مشابه می‌باشد.

تنها در بخش شمالی حوضه کرخه، مقدار این شاخص در مدل‌های CCSM4، FLOR-B06 و CMC1 بهبود پیدا نکرده است. همچنین، کاربست CCA منجر به افزایش قابل‌ملاحظه ROC زیرنرمال برای مدل‌های GFDL-aer04، NASA-GMAO، CMC1 و همادی ۸ مدلی به‌خصوص در مناطق جنوب غرب



شکل ۸. مساحت زیر منحنی ROC (زیرنرمال و بیش از نرمال) مدل‌های انفرادی و سامانه‌های همادی ۳ و ۸ مدلی (مقیاس‌های شده برای بارش اکتبر-دسامبر

ذکر است که پس از استفاده از CCA، مقادیر اریب متوسط به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است به نحوی که مقدار آن در بیشتر نقاط شبکه بین صفر و ۰/۱۱- میلی متر در روز است. مقادیر خطای ریشه میانگین مربعات نیز در اکثر نقاط شبکه پیش‌بینی شده در محدوده بین ۰/۳۹ و ۱ میلی متر در روز می‌باشد.

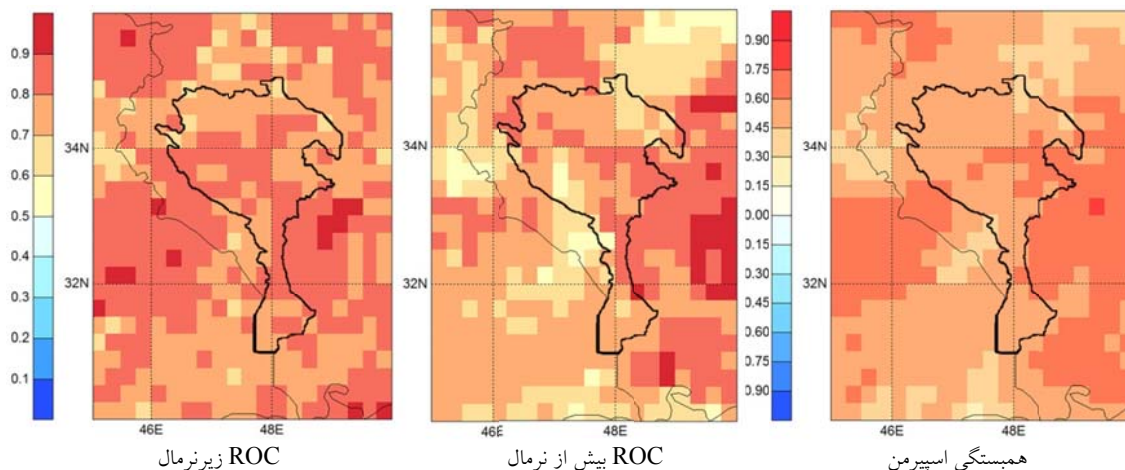
۳-۵. مهارت مدل‌های پیش‌بینی فصلی در زمان‌های

انتظار یک و دو ماه

قابل ذکر است که تعدادی از مدل‌های مورد بررسی در زمان‌های انتظار بیش از صفر ماه نیز دارای مهارت هستند. با اعمال CCA روی سامانه ۸ مدلی، همبستگی اسپیرمن در زمان انتظار یک (آغازگری ابتدای سپتامبر) و دو ماه (آغازگری ابتدای اوت) به ترتیب برابر ۰/۵۷۷ و ۰/۶۵۳ است. مهارت بالای سامانه ۸ مدلی در زمان انتظار ۲ ماه نشان می‌دهد که مدیران منابع آب و بخش کشاورزی می‌توانند با استفاده از سامانه‌های پیش‌بینی فصلی در خصوص برنامه‌ریزی مخازن و انتخاب الگوی کشت پاییزه از ۲ ماه پیش از آغاز سال آبی برنامه‌ریزی نمایند. شکل ۹، ضریب همبستگی اسپیرمن، ROC زیرنرمال و بیش از نرمال را برای سامانه همادی ۸ مدلی در زمان انتظار دو ماه (آغازگری ابتدای اوت) نشان می‌دهد.

در تعدادی از مدل‌ها (به‌عنوان مثال FLOR-A، CCSM4 و CFSv2)، نمره ROC از ۰/۷ بیشتر است. تقریباً در همه نقاط شبکه بارش پیش‌بینی شده توسط مدل‌های انفرادی و سامانه همادی ۳ مدلی (به غیر از دو مدل FLOR-B01 و CMC1)، مقدار مساحت زیرمنحنی ROC برای شرایط زیرنرمال از ۰/۵ بیشتر است. برای نمونه، فاصله اطمینان ۹۵ درصد خودگردان (bootstrapping) با ۵۰۰ نمونه در دو نقطه از شبکه (۳۴/۳۸ شمالی و ۴۸/۸۸ شرقی با ROC زیرنرمال برابر با ۰/۵۴ و سلول ۳۳/۱۳ شمالی و ۴۹/۱۳ شرقی با ROC زیرنرمال برابر با ۰/۹) در همادی ۳ مدلی، به ترتیب در محدوده بین ۰/۷۶-۰/۲۸ و ۰/۹۹-۰/۷۶ می‌باشد. این نتایج بیانگر مهارت مناسب سامانه‌های پیش‌بینی فصلی مورد بررسی در این تحقیق، به‌خصوص سامانه ۳ مدلی در پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس یک ارزیابی بلندمدت است.

در جدول ۴، نتایج بخش‌های ۳.۳ و ۳.۴ برای مدل‌های انفرادی و همادی چند مدلی به‌طور خلاصه ارائه شده است. در این جدول نشان داده شده که شاخص نیکویی برازش (همبستگی اسپیرمن) برای همه مدل‌ها پس از اعمال تحلیل همبستگی متعارف، افزایش یافته است. این امر کارایی روش‌شناسی پیشنهادی را در مقیاس‌گامی و پس‌پردازش سامانه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. قابل



شکل ۹. شاخص‌های ارزیابی مهارت سامانه همادی ۸ مدلی در زمان انتظار ۲ ماه برای پیش‌بینی بارش فصل هدف اکتبر-دسامبر در دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۵.

جدول ۴. خلاصه یافته‌های پژوهش در ارزیابی پیش‌بینی بارش اکتبر- دسامبر مدل‌های انفرادی مدل‌های آمریکای شمالی و سامانه‌های همادی چند مدلی (برونداد مستقیم و مقیاس‌گامی شده).

نتایج ارزیابی برونداد مقیاس‌گامی شده مدل‌ها (پس از اعمال CCA)		نتایج ارزیابی برونداد مستقیم مدل‌ها (قبل از اعمال CCA)			سامانه پیش‌بینی فصلی/شاخص ارزیابی
مدهای بهینه*	ρ	RMSE (میلی‌متر در روز)	MB (میلی‌متر در روز)	ρ	
۱، ۱۱، ۲	۰/۵۵۵	بین ۰/۳۸ و ۳/۹۰	بین ۰ و ۳/۶۹	۰/۳۹۸	CFSv2
۱، ۱۱، ۵	۰/۴۰۳	بین ۰/۳۷ و ۱/۲۸	بین ۰ و -۰/۱۲	۰/۱۷۰	GFDL-FLORB-01
۱، ۸، ۷	۰/۵۸۶	بین ۰/۳۷ و ۱/۲۲	بین -۰/۱۴ و ۰/۰۹	۰/۳۳۸	NASA-GMAO-061012
۱، ۵، ۲	۰/۵۱۸	بین ۰/۳۵ و ۰/۹۵	بین ۰/۱۲ و -۰/۱۳	۰/۴۸۶	CCSM4
۳، ۱۵، ۹	۰/۴۶۰	بین ۰/۰۷ و ۱/۲۴	بین -۰/۱۲ و ۰/۳۷	۰/۰۸	CMC1-CanCM3
۱، ۱۲، ۳	۰/۵۴۳	بین ۰/۳۷ و ۱/۱۹	بین -۰/۱۳ و ۰/۱۱	۰/۴۳۳	CMC2-CanCM4
۲، ۱۵، ۷	۰/۵۷۹	بین ۰/۳۷ و ۱/۳۹	بین -۰/۱۵ و -۰/۰۲	۰/۲۸۶	GFDL-FLOR-A06
۲، ۱۵، ۱۰	۰/۶۰۹	بین ۰/۳۶ و ۰/۹۵	بین -۰/۱۲ و ۰/۰۸	۰/۲۲۵	GFDL-aer04
۱، ۵، ۴	۰/۶۲۳	بین ۰/۳۶ و ۱/۱۴	بین -۰/۰۹ و ۰/۱۱	۰/۵۶۰	همادی ۳مدلی
۱، ۱۲، ۳	۰/۵۷۸	بین ۰/۳۶ و ۱/۱۹	بین -۰/۱۱ و ۰/۱۱	۰/۴۳۴	همادی ۸مدلی

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعات متعددی در سطح کشور با هدف ارزیابی مدل‌های گردش کلی جفت‌شده جو-اقیانوس و مقیاس‌گامی برونداد آنها در چشم‌انداز تغییر اقلیم انجام شده است. اما ارزیابی برونداد مدل‌های عددی که به‌صورت عملیاتی پیش‌بینی‌های فصلی متغیرهای اقلیمی تا افق ۹ و ۱۱ ماه تولید می‌کنند در مطالعات معدودی در سطح کشور ایران صورت گرفته است. لذا در پاسخ به نیاز صنعت آب کشور در مدیریت چالش‌های کمی و کیفی بحران آب در حوضه‌های آبریزی که مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا و اقلیم دارای مهارت کافی هستند، انتظار می‌رود مطالعات در تلاش برای کاربست عملیاتی در خدمت مدیریت، برنامه‌ریزی و تخصیص بهنگام منابع آب و کشاورزی مورد بررسی و توجه بیشتر محققین قرار گیرد. در حال حاضر در کشور ایران مدل دینامیکی برای

پیش‌بینی عددی ماهانه و فصلی اجرا نمی‌شود و از برونداد سایر مدل‌های دینامیکی پیش‌بینی فصلی معتبر در بهبود پیش‌بینی‌های فصلی و ماهانه بهره گرفته می‌شود (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۵). لذا هدف از این مطالعه، ارائه یک روش‌شناسی عملیاتی در مقیاس‌گامی برونداد مدل‌های همادی آمریکای شمالی است به‌نحوی که با ارائه پیش‌بینی‌ها با تفکیک مکانی مناسب برای مدل‌سازی، طیف وسیعی از گروداران در سطح حوضه آبریز بتوانند از این اطلاعات بهره بگیرند.

در این پژوهش از تحلیل همبستگی متعارف برای پس‌پردازش و مقیاس‌گامی متغیر بارش در منطقه غرب کشور (شامل حوضه آبریز درجه ۲ کرخه، مرزی غرب، بخش‌هایی از کارون بزرگ و زهره- جراحی) استفاده شد. این مطالعه برای هر یک از مدل‌های همادی آمریکای شمالی به‌صورت جداگانه و توسعه سامانه‌های همادی چند

ارتقای کیفیت این پژوهش شده است، کمال تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

احمدی باصری، ن.، شیروانی، ا. و ناظم السادات، م. ج.، ۱۳۹۳، کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی در خرد مقیاس نمودن پرونده‌های مدل GCM برای پیش‌بینی بارش در پهنه جنوبی ایران، ن. آب‌و‌خاک. ۲۸، ۱۰۴۷-۱۰۳۷.

بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، بیاتانی، ف. و فهیمی‌نژاد، ا.، ۱۳۹۵، کارآیی روش‌های پس‌پردازش در بهبود پیش‌بینی ماهانه بارش مدل MRI-CGCM3 در خراسان رضوی، م. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۲(۲)، ۹۲-۸۳.

بابائیان، ا.، کریمیان، م. و مدیریان، ر.، ۱۳۹۳، پس‌پردازش پرونده مدل دینامیکی MRI-CGCM3 برای پیش‌بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی، م. ژئوفیزیک ایران. ۷(۳)، ۱۳۳-۱۱۹.

باقرزاده، ف.، ۱۳۹۳، پیش‌بینی دراز مدت میزان بارش (ماهانه و فصلی) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

بهبان‌سد، ۱۳۹۲، گزارش نهایی مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز کرخه. مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های آبریز مرزی غرب، کرخه، کارون بزرگ، جراحی و زهره. ۱۳۴ صفحه.

زهراپی، ب.، ۱۳۹۰، تدوین نرم‌افزار پیش‌بینی فصلی بارش استاندارد شده (SPI) و رواناب ورودی به سدهای تهران. طرح پژوهشی دانشگاه تهران، برای شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران، <http://www.thrw.ir/SC.php?type=static&id=90>

زهراپی، ب.، ۱۳۸۸، تدوین مدل خوشه‌بندی اطلاعات

مدلی از پروژه NMME انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد کاربست روش‌شناسی پیشنهادی برای پیش‌بینی بارش پاییزه در یک دوره بلندمدت از کارایی و مهارت قابل قبولی به‌خصوص در پیش‌بینی شرایط زیرنرمال بارشی در محدوده غرب کشور ایران برخوردار می‌باشد. این مطالعه همچنین ضرورت توسعه سامانه‌های همادی چند مدلی و بهره‌گیری از مدل‌های متعدد با تعداد اعضای همادی بیشتر را در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد نشان می‌دهد. نتایج یافت شده در این تحقیق مشابه سایر مطالعاتی است که در حوضه آبریز کرخه در مقیاس فصلی برای بارش انجام شده است (به‌عنوان مثال نجفی و همکاران، ۲۰۱۷) و تأییدی بر قابلیت پیش‌بینی بالای این حوضه با در نظر گرفتن مهارت مدل‌های گردش کلی جفت‌شده جو-اقیانوس در یک دوره ۳۰ ساله است. با ارزیابی فصول هدف دیگر در زمان‌های انتظار یک ماه و بیشتر و اثبات مهارت مدل‌ها در شرایط مختلف جوی-اقیانوسی، اطلاعات مورد نیاز برای کلیه تصمیم‌گیران در وزارت نیرو، بهره‌برداران، گرداران و سایر نهادهای متأثر از شرایط اقلیمی در هر سال آبی به‌صورت عملیاتی نیز فراهم خواهد شد.

تشکر و قدردانی

بخشی از این مطالعه در مؤسسه پژوهش‌های بین‌المللی برای اقلیم و جامعه (IRI) واقع در رصدخانه زمین Lamont Doherty وابسته به دانشگاه کلمبیا در نیویورک انجام شده است. از معاونت محترم بین‌الملل دانشگاه تهران برای حمایت مالی انجام این پژوهش در قالب استفاده از فرصت مطالعاتی کوتاه‌مدت دانشجویان مقطع دکتری تخصصی سپاسگزاری می‌شود. داده‌های ایستگاه‌های تبخیرسنجی و گزارش‌های مربوط به حوضه آبریز کرخه نیز از سوی معاونت محترم مطالعات پایه و برنامه‌ریزی منابع آب سازمان آب و برق خوزستان در اختیار قرار داده شده است که در این خصوص قدردانی می‌شود. همچنین، از داوران محترم برای ارائه نظرات ارزشمند که منجر به

پیش‌بینی فصلی احتمالاتی بارش پاییزه سال‌های آبی ۹۶-۹۵ و ۹۵-۹۴ در گستره ایران: ارزش افزوده همادی مدل‌های آمریکای شمالی (NMME) در تخصیص بهنگام منابع آب. مجموعه مقالات چاپ شده در اولین کنفرانس بین‌المللی تغییر اقلیم با شعار «تغییر اقلیم، مدیریت آب، نجات زمین»، ۹ و ۱۰ اسفندماه، وزارت نیرو، تهران، ایران.

نجفی، ح. و مساح‌بوانی، ع. ر.، ۱۳۹۵، ارائه روش‌های جدید در پیش‌بینی متغیرهای هیدرو اقلیمی کشور در مقیاس درون‌فصلی تا بین‌ساله. مجموعه مقالات همایش علل و راهکارهای مقابله با بحران کمی و کیفی منابع آب کشور، ۲۲ و ۲۳ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۵، فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران.

نجفی، ح.، مساح‌بوانی، ع. ر. و ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۹۶، کاربرد مدل‌های همادی آمریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش گستره ایران، م. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۴)، ۲۸-۳۸.

نیکبخت شهبازی، ع. ر.، زهرایی، ب. و ناصری، م.، ۱۳۹۱، پیش‌بینی فصلی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان، م. آب و فاضلاب، ۲۳(۲)، ۸۴-۷۲.

Ashoori, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S. and Braithwaite, D. K., 2015, PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96(1), 69-83, doi:10.1175/BAMS-D-13-00068.1.

Barbero, R., Abatzoglou, J. and Hegewisch, K., 2017, Evaluation of statistical downscaling of North American Multi-Model Ensemble forecasts over western USA. *Weather and Forecasting*, 32, 327-34, doi: 10.1175/WAF-D-16-0117.1.

Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D. and Harris, D., 1998, High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island: Part II: Interpolation of rainfall data. *J. Hydrol.*, 208, 187-193.

Ehsan, M. A., Tippet, M. K., Almazroui, M., Ismail, M., Yousef, A., Kucharski, F. and Omar, M., 2016, Skill and predictability in multimodel ensemble forecasts for Northern

و سیگنال‌های هواشناسی باهدف پیش‌بینی دوره‌های کم‌بارش. طرح پژوهشی دانشگاه تهران برای شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران، (http://www.thrw.ir/SC.php?type=static&id=90).

فلاح قاهره، غ. ع.، موسوی‌بایگی، م. و حبیبی نوخندان، م.، ۱۳۸۷، تعیین همبستگی الگوهای سینوپتیکی با سطوح فوقانی به کمک مدل رگرسیونی گام‌به‌گام، م. دانش علوم آب‌و خاک، ۱۹(۱)، ۱۴۳-۱۲۵.

فلاح قاهره، غ. ع.، موسوی بایگی، م. و حبیبی نوخندان، م.، ۱۳۸۸، پیش‌بینی بارش فصلی بر اساس الگوهای سینوپتیکی با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، م. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۶۶، ۱۳۹-۱۲۱.

مدرسی، ف.، عراقی‌نژاد، ش.، و ابراهیمیان، ک.، ۱۳۹۴، ارزیابی راهبرد ترکیب مدل‌ها در افزایش دقت پیش‌بینی بارش پاییزه، ن. هواشناسی کشاورزی، ۳(۲)، ۱۳-۱.

ناظم‌السادات، م. و شیروانی، ا.، ۱۳۸۵، پیش‌بینی بارش زمستانه مناطق جنوبی ایران با استفاده از دمای سطح آب خلیج فارس: مدل‌سازی تحلیل همبستگی متعارف، م. علمی کشاورزی، ۲۹، ۷۷-۶۶.

نجفی، ح.، مساح‌بوانی، ع. ر. و ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۹۵، Hemisphere regions with dominant winter precipitation. *Climate Dyn.*, 48, 3309-3324, doi:10.1007/s00382-016-3267-4.

Gent, P. R., Yeager, S. G., Neale, R. B., Levis, S. and Bailey, D. A., 2010, Improvements in a half degree atmosphere/land version of the CCSM. *Clim Dyn*, 34(6), 819-833.

Hsieh, H. H., Cheng, S. J., Liou, J. Y., Chou, S. C. and Siao, B. R., 2006, Characterization of spatially distributed summer daily rainfall. *J. Chin. Agric. Eng.*, 52, 47-55.

Ines, A. V. M. and Hansen, J. W., 2006, Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agric. For. Meteorol.*, 138, 44-53.

Katiraie-Boroujerdy, P. S., Ashouri, H., Hsu, K. and Sorooshian, S., 2016, Trends of precipitation extreme indices over a subtropical semi-arid area using PERSIANN-CDR. *Theor. Appl. Climatol.*, 1-12, doi:10.1007/s00704-016-1884-9.

- Katiraie-Boroujerdy, P. S., Akbari Asanjan, A., Hsu, K. L. and Sorooshian, S., 2017, Intercomparison of PERSIANN-CDR and TRMM-3B42V7 precipitation estimates at monthly and daily time scales. *Atmos. Res.*, 193, 36-49, doi.org/ 10.1016/ j.atmosres. 2017.04.005.
- Kirtman, B. P., Min, D., Infanti, J. M., Kinter III, J. L., Paolino, D. A., Zhang, Q., Van Den Dool, H., Saha, S., Mendez, M. P., Becker, E. and Peng, P., 2014, The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 95(4), 585-601.
- Kong, Y. F. and Tong, W. W., 2008, Spatial exploration and interpolation of the surface precipitation data. *Geogr. Res.*, 27, 1097-1108.
- Kurtzman, D. Navon, S. and Morin, E., 2009, Improving interpolation of daily precipitation for hydrologic modeling: Spatial patterns of preferred interpolators. *Hydrol. Process*, 23, 3281-3291.
- Li, B. Huang, J. F. Jin, Z. F. and Liu, Z. Y., 2010, Methods for calculation precipitation spatial distribution of Zhejiang Province based on GIS. *J. Zhejiang Univ*, 27, 239-244.
- Ma, F., Ye, A., Deng, X., Zhou, Z., Liu, X., Duan, Q., Xu, J., Miao, C., Dia, Z. and Gong, W., 2016, Evaluating the skill of NMME seasonal precipitation ensemble predictions for 17 hydroclimatic regions in continental China. *Int. J. Climatol*, 36, 132-144.
- Mason, S. J. and Tippett, M. K., 2017, Climate Predictability Tool version 15.5.10, Columbia University Academic Commons, [https://doi.org/ 10.7916/D8G44WJ6](https://doi.org/10.7916/D8G44WJ6).
- Merryfield, W. J., Lee, W. S., Boer, G. J., Kharin, V. V., Scinocca, J. F., Flato, G. M., Ajayamohan, R. S., Fyfe, J. C., Tang, Y. and Polavarapu, S., 2013, The Canadian seasonal to interannual prediction system. Part I: Models and initialization, *Mon. Wea. Rev.*, 141(8), 2910-2945.
- Najafi, H., Massah Bavani, A. R., Wanders, N., Wood, E., Irannejad, P. and Robertson, A.W., 2017, Developing Multi-model Ensemble for precipitation and temperature seasonal forecasts: Implications for Karkheh river basin in Iran, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-18597-3, EGU General Assembly 2017, 23-28 April, Vienne, Austria.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Iredell, M. and Ek, M., 2014, The NCEP climate forecast system version 2, *J. Climate*, 27(6), 2185-2208.
- Shirvani, A. and Landman, A. W., 2016, Seasonal precipitation skill over Iran. *Int. J. Climatol.*, 36, 1887-1900.
- Wilks, D. S., 2011, *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 3rd ed. – (International geophysics series; v. 100). ISBN 978-0-12-385022-5.
- Vernieres, G., Rienecker, M., Kovach, R. and Keppenne, C. H. L., 2012, The GEOS-iODAS: Description and Evaluation. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, TM-2012-104606 30, 1-61.
- Wu, L., Wu, X. J., Xiao, C. C. and Tian, Y., 2010, On temporal and spatial error distribution of five precipitation interpolation models. *Geogr. Geo-Inf. Sci.*, 26, 19-24.
- Zhang, S., Harrison, J., Rosati, M. J. and Wittenberg A. T., 2007, System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies. *Mon. Weather Rev.*, 135, 3541-3564, doi:10.1175/MWR3466.1.
- Zohrabi, N., Goodarzi, E., Massah Bavani, A. R. and Najafi, H., 2016, Detection and attribution of climate change in regional scale: A case study of Karkheh river basin in the West of Iran, *Theor. Appl. Climatol.*, 1-14, doi: 10.1007/s00704-016-1896-5.

Developing Real-time Multi-model Ensemble and Downscaling of Seasonal Precipitation Forecast Systems: Application of Canonical Correlation Analysis

Najafi, H.¹, Massah Bavani, A. R.^{2*}, Irannejad, P.³ and Robertson, A. W.⁴

1. Ph.D. Student, Department of Water Resources Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

4. Head of Climate Group, International Research Institute for Climate and Society (IRI), Erath Institute, University of Columbia, New York, USA

(Received: 11 June 2017, Accepted: 6 Feb 2018)

Summary

The aim of this research is to evaluate a statistical method for downscaling the precipitation output of a number of Coupled General Circulation Models issuing seasonal forecasts 9 month in advance. Canonical Correlation Analysis (CCA) is applied for post-processing precipitation from the North American Multi-model Ensemble (NMME) project. The analysis is done for a long-term period (1986-2015) in the west of Iran. The area under study includes Karkheh River Basin where a significant reduction in renewable water resources has faced policymakers with challenges in water resources allocation and provision of environmental requirements to Hoor-al-Azim marshland downstream. PERSIANN-CDR biases are computed and corrected against in-situ observations by applying the multiplicative method. Bias corrected Satellite-based rainfall data merged with 23 gauge-based data. The approach for merging station-satellite-based rainfall estimation includes a spatio-temporal LM method which fits linear regression to the deterministic part of universal variation. It exhibits appropriate performance in terms of Correlation, Nash-Sutcliffe Efficiency and mean absolute error and multiplicative bias. After merging, correlation coefficients between the merged data and gauge-based rainfall are between 0.92 and 0.98 for all stations whereas it was between 0.7-0.95 for PERSIANN-CDR. The merged precipitation grided dataset is then used as the reference to evaluate NMME seasonal forecasting systems October-December being the target season. Forecasts initialized on the early October, September and August (lead time-0, lead-time-1 and lead-time-2 months, respectively) are evaluated for individual raw model outputs. Multi-Model Ensemble is also developed by assigning equal weights to individual models. Multi-model Ensemble which consists the 3 best individual models (CCSM4, CMC2 and CFSv2) outperforms all other MME which consist 2 to 8 models ($p=0.560$). It also outperforms CCSM4 which has the highest Spearman correlation of 0.486 among all models. Canonical Correlation Analysis (CCA) is then applied to individual and MME seasonal mean precipitation forecasts to correct biases in the position. Probabilistic forecasts are produced based on the best-guess forecast estimated by regression model (CCA). Predictand is transformed to normal distribution before performing the calculations. Then the forecast is transformed back to the empirical distribution. By assuming that the errors in the best-guess forecast are normally distributed, the variance of the errors is defined by the sampling errors in the regression parameters, and by the variance of the errors in the cross-validated predictions. Then the probabilities of exceeding the various thresholds (below normal, normal and above normal terciles) are calculated for issuing probabilistic forecast from 1986-2015. The goodness index is improved for all models after performing CCA especially for GFDL-aer04 and CMC1 having the most correctable systematic biases. 3 model-based MME is recognized to have highest skill (Spearman correlation=0.623) at 0-month lead time. The models also show high skill for initializations made in the early August and early September. ROC-area for below-normal precipitation is more than 0.5 for almost all models which shows the skill of NMME seasonal forecast systems in meteorological drought prediction. The skill of NMME in forecasting October-December precipitation in the west of Iran can help decision makers in real-time water resources and agricultural planning before water-year starts (In the late September).

Keywords: North America Multi-model Ensemble (NMME), Downscaling, Karkheh River Basin, Multi-Model Ensemble, Seasonal Precipitation Forecasts.

*Corresponding author:

armassah@ut.ac.ir