

مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نگاشت چندک برای تصحیح اریبی

داده‌های بارش بازتحلیل ERA^۵

کاوه باپیرزاده؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

حسام سیدکابلی^۱؛ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

لیلا نجفی؛ مربی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

چکیده

این تحقیق به ارزیابی توانایی روش‌های مختلف نگاشت چندک (QM) به عنوان یک تکنیک تصحیح اریبی داده‌های بارش بازتحلیل ERA^۵ می‌پردازد. نوع اقلیم و موقعیت جغرافیایی می‌توانند عملکرد روش تصحیح اریبی را به دلیل تفاوت در خصوصیات بارش تحت تأثیر قرار دهند. به این منظور داده‌های بارش بازتحلیل ERA^۵ برای سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۸۹ به صورت روزانه برای ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب در اقلیم‌هایی با ویژگی‌های توپوگرافیک گوناگون از سایت مرکز پیش‌بینی میان مدت جوی اروپا (ECMWF) دریافت شد. تصحیح اریبی این داده‌ها با استفاده از ۵ روش نگاشت چندک بر پایه داده‌های مشاهداتی در محیط نرم‌افزار R انجام گرفت. ارزیابی دویخشی و دیاگرام تیلور برای مقایسه عملکرد روش‌های مختلف به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که عملکرد روش نگاشت چندک به توابع عملکرد، مجموعه پارامترها و شرایط اقلیمی بستگی دارد. به طور کلی روش‌های ناپارامتریک نگاشت چندک عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش‌های پارامتریک دارند به گونه‌ای که بهترین عملکرد مربوط به روش QUANT و RQUANT است، در این بین روش DIST ضعیف‌ترین عملکرد را دارد.

واژه‌های کلیدی: نگاشت چندک، تصحیح اریبی، ERA^۵، ECMWF.

مقدمه

بارش یکی از مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی است که تغییرات زمانی-مکانی زیادی دارد و این عنصر اقلیمی سهم بسزایی در توسعه پایدار منابع آب دارد. در دسترس نبودن داده‌های روزآمد و نیز وجود داده‌های گم‌شده فراوان در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی از اساسی‌ترین مشکلاتی است که پژوهشگران با آن روبرو هستند. در سال‌های اخیر برآورد کمیت بارش به صورت نقشه‌های بارندگی توسط مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا^۱ NWP بسیار مورد توجه است [Collischonn et al., ۲۰۰۷]. به کمک این مدل‌ها می‌توان مقادیر نزولات جوی و پارامترهای هواشناسی را پیش‌بینی نمود. پیش‌بینی‌های مدل‌ها همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است، بنابراین پیش‌بینی اولیه با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای موجود باید کنترل شوند. داده‌های تولید شده در این فرایند را داده‌های بازتحلیل^۲ می‌نامند که از ترکیب نتایج پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP) با داده‌های مشاهده‌ای به دست می‌آیند. اولین داده‌های بازتحلیل شده با نام FGGE در ۱۹۷۹ تولید شد. بعد از آن ایرادهای موجود در مدل‌ها و داده‌های مورد استفاده در مدل برطرف شد و خروجی‌ها بهبود یافت. اگر چه اصلاح پیوسته مدل‌ها باعث کاهش خطای پیش‌بینی‌ها و داده‌های بازتحلیل شد، ولی این باعث شد که سری‌های زمانی داده‌های بازتحلیل همگنی لازم را از دست بدهند و در نتیجه کارایی لازم را برای بررسی تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین نداشته باشند [Uppala et al., ۲۰۰۵]. این مشکل سبب شد تا منابع [Bengtsson and Shukla, ۱۹۸۸] و [Trenberth and Olsen, ۱۹۸۸] پیشنهاد استفاده از یک مدل معین ولی با داده‌های روزآمد را عرضه کنند. این پیشنهاد سازنده سبب شد تا مراکز تولید داده‌های بازتحلیل مانند NCAR/NCEP،^۳ ERA و ECMWF هر یک مدل معینی را مورد استفاده قرار دهند. با استفاده از این رویکرد ECMWF توانست ERA-۱۵ را عرضه کند. مرکز NCAR/NCEP نیز داده‌های را به صورت تقریباً روزآمد عرضه کرده است. مرکز NASA نیز چنین داده‌هایی را ارائه داده است [Uppala et al., ۲۰۰۵]. مرکز ECMWF بعدها داده‌های ERA-۴۰ را عرضه کرد. با توجه به بازخورد داده‌های ERA-۱۵ و ERA-۴۰ این مرکز توانست ERA-Interim را عرضه کند [Dee et al., ۲۰۱۱]. پس از آن مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت اروپا، ERA^۵ را منتشر نموده است. ERA^۵ نسل پنجم داده‌های بازتحلیل ECMWF از هواشناسی جهانی است که به‌روزرسانی‌های روزانه آن ۵ روز عقب‌تر از زمان واقعی در دسترس هستند.

تحقیقات زیادی در رابطه با داده‌های بازتحلیل در سطح جهان انجام گرفته است. سودودی و همکاران به بررسی کارایی مدل ECMWF برای پیش‌بینی بارش روی ایران پرداختند [Sodoudi et al., ۲۰۱۰]. نتایج نشان داد که مدل ECMWF فقط تا حدی موقعیت مکانی بارش را به درستی پیش‌بینی می‌کند، در حالی که موقعیت بارش‌های بیشینه با مشاهدات سازگار است. بلو-پری‌پرا و همکاران بارش شبه‌جزیره ایبری را با استفاده از داده‌های بارش نسخه ERA-Interim و ERA-۴۰ از پایگاه داده ECMWF و پایگاه‌های GPCC و CRU بررسی و مقادیر بارش پایگاه‌ها یاد شده را با مقادیر بارش پایگاه IBO^۲ مقایسه کردند [Belo-Pereira et al., ۲۰۱۱]. نتایج نشان داد مقادیر بارش برآورد شده پایگاه ECMWF، بهترین داده برای شناخت ویژگی‌های بارش این منطقه بود. لی اوو و همکاران دقت EAR-Interim را در برآورد ویژگی‌های بارش روزانه و ماهانه انگلستان و ولز مورد ارزیابی قرار دادند و مشخص کردند که داده‌های ERA-interim همبستگی زیادی با داده‌های مشاهده‌ای دارد [De Leeuw et al., ۲۰۱۵]. سیمونز و همکاران مقادیر بارش برآورد شده دو نسخه پایگاه داده ECMWF (ERA-۴۰ و ERA-Interim) را با مقادیر بارش نسخه جدید مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی ECMWF، مرکز پیش‌بینی اقلیمی CPC^۴، طرح اقلیم‌شناسی بارش جهانی GPCP^۵، تحلیل ادغام شده بارش و بارش روی خشکی مقایسه کردند [Simmons et al., ۲۰۱۰] و نتایج نشان داد که هماهنگی بین مقادیر بارش نسخه جدید ECMWF و آخرین

^۱. Numerical Weather Prediction

^۲. Reanalysis

^۳. National Aeronautics and Space Administration

^۴. Climate Prediction Center

^۵. GEWEX Modeling and Prediction Panel

نسخه پایگاه داده GPCP با مقادیر بارش ECMWF نسبت به دیگر پایگاه‌ها بیشتر است. زیپتا و همکاران داده‌های نسخه جدید ERA-Interim از پایگاه داده ECMWF را بر روی کشور فرانسه ارزیابی کردند [Szczypta et al., ۲۰۱۱] و نتایج نشان داد که اگر چه مقادیر برآورد شده بارش این پایگاه ۲۷ درصد کمتر از مقادیر مشاهده شده است اما همبستگی بسیار خوبی با داده‌های بارش پایگاه ملی دارد.

پیش‌بینی‌هایی که توسط مدل‌های جهانی ارائه می‌شوند، داده‌های خام هستند. این داده‌ها عدم قطعیت‌های زیادی به همراه دارند. همچنین این‌گونه مدل‌ها می‌توانند نمایان‌گر خوبی از ویژگی‌های گسترده در جو باشند، اما ممکن است خصوصیات اقلیمی مانند رعد و برق، تغییرات در پوشش زمین، اثرات ساحلی و موارد دیگر را در نظر نگیرند. بنابراین، بهتر است که پس پردازش خروجی‌ها به یک مقیاس دقیق‌تر و یا سازگارتر با ویژگی‌های آماری (اقلیم‌شناسی) گذشته در مکان‌های مورد علاقه تبدیل شوند. به طور کلی دو دلیل عمده برای پس پردازش مدل‌های پیش‌بینی عددی جهانی در پیش‌بینی بارش‌های سیل‌زا وجود دارد [Tao et al., ۲۰۱۴]:

۱) صحت پیش‌بینی‌های خام مدل؛ هنوز در اندازه شبکه‌ها محدود است و به طور مستقیم برای پیش‌بینی‌های بارش‌های سیل‌زا مناسب نیست؛

۲) دامنه پیش‌بینی برخی از مدل‌ها، غیرقابل اعتماد است.

بر این اساس، پس پردازش پیش‌بینی‌های خام از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌توان به کمک تکنیک‌های آماری مانند روش‌های تصحیح اریبی، خطای پیش‌بینی‌ها را تصحیح نمود. جوانمرد قصاب و همکاران به ارزیابی داده‌های بارش پیش‌بینی شده مدل‌های عددی جهانی پایگاه TIGGE و بهبود آن‌ها با استفاده از تصحیح اریبی در حوضه آبریز کارون بزرگ پرداختند [JAVANMARD et al., ۲۰۱۸]. ارزیابی‌ها در بخش هواشناسی به صورت نقطه‌ای و منطقه‌ای و ارزیابی خطای جابجایی، حجم و الگوی مکانی بارش مدل‌ها با استفاده از روش شی‌گرا انجام گرفت. سپس با استفاده از روش نگاشت چندک به بهبود بارش‌های پیش‌بینی شده پرداخته شد. در ارزیابی داده‌های اولیه مدل‌های جهانی پایگاه TIGGE، و مدل عددی ECMWF در ارزیابی نقطه‌ای و منطقه‌ای نسبت به دیگر مدل‌ها برتری داشته‌اند. ارزیابی داده‌های تصحیح اریبی شده توسط روش نگاشت چندک نیز نشان از بهبود شاخص‌های ارزیابی نسبت به قبل از استفاده از این روش دارد. نگای و همکاران به بررسی روش نگاشت چندک برای تصحیح اریبی داده‌های بارش و دمای مدل‌های اقلیمی جهانی و منطقه‌ای بر روی جنوب آسیا پرداختند و نتایج نشان داد که این روش برای تصحیح دما بسیار مناسب بوده، اما دقت کمتری برای بارش دارد [Ngai et al., ۲۰۱۷].

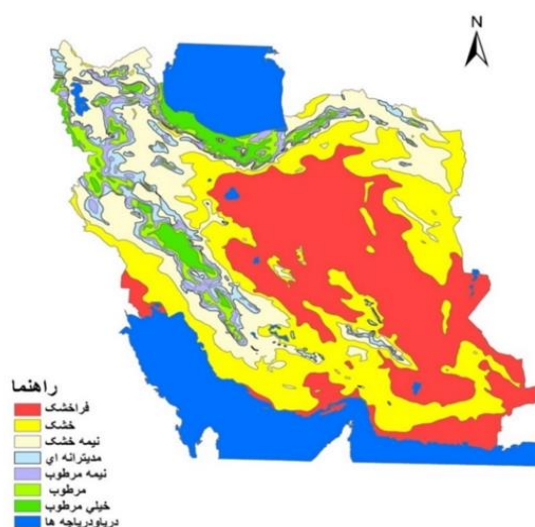
این تحقیق یک مطالعه مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف تصحیح اریبی اعم از نگاشت چندک پارامتریک و ناپارامتریک را به منظور تصحیح اریبی داده‌های بازتحلیل ERA-۵ توسعه داده است. اثر اقلیم‌های مختلف نیز با انتخاب ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در گستره ایران با ویژگی‌های مختلف اقلیمی در نظر گرفته شد. اهداف ویژه این تحقیق عبارتند از ۱- بررسی اثر تفاوت اقلیمی بر روی تصحیح داده‌های بازتحلیلی بارش، ۲- مقایسه روش‌های نگاشت چندک پارامتریک، ۳- مقایسه بین روش‌های چندک پارامتریک و ناپارامتریک. یافته‌های این تحقیق می‌تواند یک راهنما در بهره‌گیری از روش‌های تصحیح اریبی در تهیه نقشه‌های بارش با توزیع مکانی مناسب بر اساس داده‌های بازتحلیل ERA-۵ در اقلیم‌های مختلف ایران باشد.

داده و روش کار

• قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

تعداد ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در پهنه کشور ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. ایران کشوری است به مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع که در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه در جنوب منطقه معتدله نیمکره شمالی و همچنین در ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده است؛ بنابراین از نظر جغرافیایی قسمت‌های جنوبی آن در نواحی

گرمسیری، قسمت‌های شمالی آن در نواحی نیمه‌گرمسیر تا معتدل و مرطوب واقع است. شکل ۱ پهنه اقلیمی کشور ایران را بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی به روش دمارتن^۱ نشان می‌دهد. طبقه بندی دومارتن بر مبنای شاخص خشکی^۲ بنا نهاده شده است و در آن از دما و بارندگی برای تعیین نوع اقلیم استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است اقلیم ایران به ۷ دسته از فراخشک تا خیلی مرطوب تقسیم شده است. در این مطالعه تعداد ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در ۵ اقلیم فراخشک، خشک، نیمه خشک، مدیترانه‌ای و خیلی مرطوب با توجه به طول دوره آماری و تکمیل بودن داده‌های ثبت شده انتخاب شدند و در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. البته در انتخاب ایستگاه‌ها معیاری دوری و نزدیکی به دریاها به دلیل تفاوت در شکل بارش نیز مورد توجه قرار گرفت. برای مثال ایستگاه چابهار و یزد هر دو در اقلیم فراخشک دسته‌بندی شدند اما چابهار در مجاورت دریای عمان و یزد در مرکز ایران واقع است. در جدول ۲ ارتفاع از سطح دریا به ترتیب بیانگر مجاورت ایستگاه‌های چابهار، بوشهر و بندرانزلی به دریای عمان، خلیج فارس و دریای خزر است که هر کدام دارای اقلیم متفاوت هستند.



شکل ۱- نقشه طبقه‌بندی اقلیمی سراسر ایران

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در اقلیم‌های مختلف

ایستگاه	تعداد	اقلیم
چابهار، یزد	۲	فراخشک
اهواز، بوشهر	۲	خشک
تهران، مشهد	۲	نیمه‌خشک
ایلام، شهرکرد	۲	مدیترانه‌ای
-	۰	نیمه مرطوب
-	۰	مرطوب
بندرانزلی، ساری	۲	خیلی مرطوب

^۱ De Martonne

^۲ Aridity Index

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های منتخب همدیدی کشور

نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (m)
	طول	عرض	
اهواز	۴۸/۷۴	۳۱/۳۴	۲۲/۵
ایلام	۴۶/۴۰	۳۳/۵۹	۱۳۳۷
بندر انزلی	۴۹/۴۶	۳۷/۴۸	-۲۳/۶
بوشهر	۵۰/۸۲	۲۸/۹۶	۹
تهران	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱
چابهار	۶۰/۶۵	۲۵/۲۸	۸
ساری	۵۲/۹۹	۳۶/۵۴	۲۳
شهرکرد	۵۰/۸۴	۳۲/۲۹	۲۰۴۹
مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹
یزد	۵۴/۲۹	۳۱/۹۰	۱۲۳۰

• روش تحقیق

هدف اصلی این مطالعه بررسی توانایی‌های روش‌های نداشت چندک در اصلاح اربیی داده‌های بارش روزانه تحت شرایط اقلیمی و موقعیت‌های جغرافیایی مختلف در ایران است، برای این منظور ابتدا داده‌های بازتحلیل ERA^۵ از سایت ECMWF و داده‌های بارش روزانه ۱۰ ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور برای بازه ۳۰ ساله ۲۰۱۹-۱۹۸۹ به صورت روزانه دریافت شد، پس از آن، آماده سازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، روش‌های نداشت چندک در محیط نرم‌افزاری R توسط پکیج QM به منظور اصلاح اربیی اجرا شد. در نهایت توانایی روش نداشت چندک برای داده‌های بارش بازتحلیل مدل ERA^۵ توسط معیارهای خطا و در شرایط توپوگرافیک گوناگون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. الگوریتم اصلاح اربیی نداشت چندک (QM) از جمله روش‌های مناسب تصحیح اربیی است. روش QM با استفاده از تابع توزیع تجمعی برای مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی در هر مقیاس زمانی موجب حذف اربیی می‌شود. این الگوریتم معمولاً برای اصلاح اربیی‌های توزیع سیستماتیک در خروجی‌های بارش از مدل‌های آب و هوایی استفاده می‌شود [Cannon et al., ۲۰۱۵]. این روش با جایگزین کردن مقدار پیش‌بینی شده با مقدار مشاهداتی در صدک‌های مشابه انجام می‌گیرد [Voisin et al., ۲۰۱۰].

این روش با استفاده از معادله خط بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌های خام، یک تابع تبدیل $h(x)$ به دست می‌آورد. بر اساس این تابع می‌توان توزیع روزانه بارش‌های پیش‌بینی شده P_F را با توزیع روزانه بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها P_O ، تنظیم و تعدیل کرد، تابع تبدیل بر اساس رابطه ۱ فرمول‌بندی می‌شود [Piani et al., ۲۰۱۲], [Gudmundsson et al., ۲۰۱۰].

$$P_O = h(P_F) \quad (1)$$

در صورتی که متغیر مورد نظر دارای یک توزیع شناخته شده باشد، رابطه‌ی آن به شرح زیر بیان می‌شود:

$$P_F = F_O^{-1}(F_F(P_F)) \quad (2)$$

که در آن تابع توزیع تجمعی F_F تابع توزیع تجمعی F_O^{-1} (CDF) متغیر P_F و F_O^{-1} معکوس CDF متغیر P_O است. روش نداشت چندک برای هر مجموعه پیش‌بینی گروهی در هر روز اعمال می‌شود و روش کار به این صورت است که چندک P_F هر عضو پیش‌بینی بارش توسط تابع توزیع تجمعی F_F یا CDF متناظر پیش‌بینی (یک پنجره ۳۱ روزه که مورد نظر در وسط این پنجره است) محاسبه می‌شود. چندک محاسبه شده با مقدار مشاهداتی متناظر با همان چندک در F_F روزانه جایگزین می‌شود.

در روش نگاشت چندک برای مدل‌سازی روابط چندک-چندک، تبدیلات آماری متعددی وجود دارد. تابع تبدیل از یک توزیع نظری برای حل رابطه ۲ استفاده می‌کند. از طرفی برای مدل‌سازی رابطه چندک-چندک با کمک رابطه ۱، می‌توان مستقیم از تبدیلات پارامتری استفاده کرد. در نهایت به جای در نظر گرفتن توزیعات پارامتری، از توابع توزیع تجمعی تجربی در تبدیلات غیرپارامتری برای حل معادله ۲ یا رگرسیون‌های غیرپارامتری مانند SSPLIN، QUANT و RQUANT برای حل معادله ۱ استفاده می‌شود [Gudmundsson et al., ۲۰۱۲].

روش‌های نگاشت چندک به عنوان مهم‌ترین، محبوب‌ترین و نتیجه‌بخش‌ترین روش‌های اصلاح اریبی در نظر گرفته می‌شوند [Kouhestani et al., ۲۰۱۶]، [Villani et al., ۲۰۱۴]. بعضی روش‌های پارامتریک (۶ فرمول ذکر شده در روش PTF) بستگی به روابط از پیش تعیین شده‌ای دارد که باید برای هر مورد خاص تنظیم شود. علاوه بر این همان‌طور که توسط معادلات آن‌ها نشان داده شد این روش‌ها مبتنی بر رگرسیون هستند و برای داده‌ها یک توزیع نظری خاص فرض شده‌اند. در روش‌های ناپارامتریک (QUANT, RQUANT and SSPLINE) برای داده‌ها، توزیع تجربی مورد استفاده قرار گرفته و بنابراین فرض اولیه برای این توزیع‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. علاوه بر این بر خلاف گزینه‌ها پارامتریک، این روش‌ها به هیچ رابطه از پیش تعیین شده‌ای محدود نیستند که این روش‌ها را انعطاف‌پذیرتر می‌کند.

○ انواع روش‌های نگاشت چندک

- روش تبدیلات پارامتریک PTF^۱

این روش با یک چارچوب پارامتر محور ارائه می‌شود که از توابع تغییر پارامتریک برای ایجاد یک رابطه چندک-چندک استفاده می‌کند، این روابط که به صورت ریاضی در قالب زیر توصیف می‌شوند [Kouhestani et al., ۲۰۱۶].

$$P_o = bP_m \quad \text{PTF:scale} \quad (۳)$$

$$P_o = a + bP_m \quad \text{PTF:linear} \quad (۴)$$

$$P_o = (a + bP_m) \times (1 - e^{-\frac{P_m}{\xi}}) \quad \text{PTF:expasympt} \quad (۵)$$

$$P_o = bP_m^c \quad \text{PTF:power} \quad (۶)$$

$$P_o = b(P_m - y)^c \quad \text{PTF:power} \times \bullet \quad (۷)$$

$$P_o = (a + bP_m) \left(1 - e^{-\frac{P_m - y}{\xi}}\right) \quad \text{PTF:expasympt} \times \bullet \quad (۸)$$

که P_o و P_m احتمال متغیرهای مشاهداتی و مدل شده است. a ، b ، c ، y و ξ پارامترهای مرتبط به کالیبراسیون روش است.

- روش تبدیلات توزیع تجمعی DIST^۲

به طور کلی متغیرهای CDF مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را می‌توان در توزیع تجربی یا تئوری قرار داد [Maraun et al., ۲۰۱۰]. مطابق روش DIST، یک CDF نظری مناسب می‌تواند برای عملکرد انتقال مورد استفاده قرار گیرد.

$$x^o = f(x^m) \quad (۹)$$

$$x^o = F_o^{-1}[F_m(x^m)] \quad (۱۰)$$

در این روابط x^o متغیر مشاهداتی، x^m متغیر مدل‌شده، $f()$ تابع انتقال، $F_m(x^m)$ برابر CDF x^m و $F_o^{-1}[]$ شکل معکوس CDF x^o است.

^۱. Parametric Transformations

^۲. Distribution Derived Transformations

این روش فقط می‌تواند برای کاهش انحراف متغیر بارندگی استفاده گردد [Li et al., ۲۰۱۰], [Ines et al., ۲۰۰۶]. در این روش CDF نظری $[F_m(\cdot)]$ از دو توزیع گاما^۱ و برنولی^۲ تشکیل شده است، به طوری که توزیع برنولی برای محاسبه احتمال وقوع متغیر بارش و توزیع گاما برای مدل‌سازی شدت بارندگی استفاده می‌شود [Maraun et al., ۲۰۱۰].

- روش ناپارامتریک با استفاده از چندک‌های تجربی QUANT^۳

QUANT یک روش ناپارامتریک نگاشت چندک است که از عملگرهای انتقال ناپارامتریک نیز استفاده می‌کند. این روش مقدار سری‌های زمانی تابع CDF مشاهداتی و مدل شده را در چندک با فاصله معین تخمین می‌زند. بر همین اساس روش QUANT از درون‌یابی برای تنظیم یه داده با مقدار چندک نامشخص استفاده می‌کند [Teutschbein and Seibert, ۲۰۱۲].

- روش ناپارامتریک با استفاده از چندک‌های تجربی استوار RQUANT^۴

RQUANT نیز یک روش ناپارامتریک نگاشت چندک است که از رگرسیون خطی حداقل مربعات محلی برای تخمین مقدار رابطه چندک-چندک سری‌های زمانی مشاهداتی و مدل شده برای چندک‌ها با فواصل منظم استفاده می‌شود. مقادیر نامشخص چندک‌ها با استفاده از درون‌یابی از مقادیر متناسب تخمین زده می‌شود [Osuch et al., ۲۰۱۷].

- روش منحنی هموارساز SSPLIN^۵

این روش نیز یک روش ناپارامتریک است که با استفاده از یک منحنی هموارساز متناسب با سری‌های زمانی مشاهداتی و مدل شده طرح چندک-چندک استفاده می‌کند. در این شیوه نمودار چندک-چندک سری‌های زمانی پیش‌بینی‌ها و داده‌های مشاهداتی ترسیم می‌شوند و با استفاده از تابع منحنی، توزیع پیش‌بینی‌ها با داده‌های مشاهداتی تطبیق داده می‌شوند [Jolliff et al., ۲۰۰۹].

○ روش‌های ارزیابی عملکرد

مانند هر فرایند مدل‌سازی دیگری، خروجی مدل‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. دیاگرام تیلور برای انتخاب بهترین مدل PFT و مقایسه با روش‌های ناپارامتریک نگاشت چندک استفاده می‌شود. دیاگرام تیلور بر اساس سه فاکتور عملکرد مختلف شامل ضریب همبستگی (R) معادله ۱۱، ضریب انحراف معیار (σ^*) معادله ۱۲ و ریشه مربعات انحراف میانگین (CRMSD) معادله ۱۳ است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^o - \bar{x}_i^o)(x_i^m - \bar{x}_i^m)}{\sigma^o \sigma^m} \quad (11)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma^m}{\sigma^o} \quad (12)$$

$$\sigma^* = \sum_{i=1}^N [(x_i^o - \bar{x}_i^o) - (x_i^m - \bar{x}_i^m)]^2 \quad (13)$$

که σ^o و σ^m به ترتیب انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی و مدل هستند، و N تعداد داده است. محدوده R -۱ تا +۱ است. هر چه همبستگی بین x^o و x^m بیشتر باشد مقدار R به مرزهای خود نزدیک‌تر می‌شود. σ^* همچنین به صورت بی‌بعد است، مقدار ایده‌آل آن برابر +۱ است که برابری مقدار انحراف استاندارد مشاهداتی و مدل شده را بیان می‌کند.

^۱ Gamma

^۲ Bernoulli

^۳ Non-parametric quantile mapping using empirical quantiles

^۴ Non-parametric quantile mapping using robust empirical quantiles

^۵ Smoothing Spline

هرچه عملکرد مدل بهتر باشد مقدار *CRMSD* کاهش پیدا می‌کند و بهترین حال آن مقدار صفر است. در کل ایده اصلی دیاگرام تیلور مهیا کردن یک دید کلی برای مقایسه این ۳ فاکتور کمی است. ارزیابی دویخشی به منظور مقایسه بهتر بین پیش‌بینی مدل و داده‌های مشاهداتی نیز صورت گرفت. در این ارزیابی طبق جدول ۳، پیش‌بینی‌ها بر دو بخش است: بله، یعنی رویداد اتفاق خواهد افتاد و خیر، رویداد اتفاق نخواهد افتاد. بر اساس این جدول چهار ترکیب پیش‌بینی‌ها (بله/خیر) و مشاهدات (بله/خیر) از توزیع مشترک استفاده می‌کنند. موفقیت یا Hit رویدادی است که پیش‌بینی شده اتفاق می‌افتد و در واقعیت اتفاق افتاد. رویدادهای از دست رفته یا Miss رویدادی است که پیش‌بینی شده اتفاق نمی‌افتد ولی در واقعیت اتفاق نیفتاد. هشدار اشتباه یا False Alarm رویدادی است که پیش‌بینی شده اتفاق می‌افتد ولی در واقعیت اتفاق نیفتاد. منفی‌های صحیح یا Correct Negative رویدادی است که پیش‌بینی شده اتفاق نمی‌افتد و در واقعیت هم اتفاق نیفتاد. بر اساس جدول احتمالاتی ارزیابی دویخشی ۷ معیار ارزیابی تعریف می‌شوند.

جدول ۳- جدول احتمالاتی برای ارزیابی دویخشی

کل	مشاهدات خیر	مشاهدات بله
پیش‌بینی بله	هشدار اشتباه (False alarm)	موفقیت (Hit)
پیش‌بینی خیر	منفی‌های صحیح (Correct Negative)	رویدادهای از دست رفته (Miss)
تعداد کل رویدادها	مشاهدات خیر	مشاهدات بله
	کل	کل

معیار موفقیت بحرانی (نمره تهدید) یا CSI، میزان نزدیکی تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده (بله) به رویدادهای اتفاق افتاده را محاسبه و ارزیابی می‌کند. محدوده آن بین صفر تا یک و بهترین مقدار آن برابر با یک است.

$$CSI = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{Misses} + \text{False Alarms}} \quad (14)$$

معیار تشخیص رویدادهای صحیح یا POD را بیان می‌کند، چه تعدادی از رویدادهای مشاهداتی (بله) به درستی پیش‌بینی شده‌اند. دامنه تغییرات آن بین صفر تا یک و مقدار ایده‌آل آن برابر با یک است.

$$POD = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{Misses}} \quad (15)$$

معیار تشخیص رویدادهای غلط یا POFD را بیان می‌کند، چه تعدادی از رویدادهای مشاهداتی (خیر) نادرست پیش‌بینی شده‌اند. دامنه تغییرات آن بین صفر تا یک و مقدار ایده‌آل آن برابر با صفر است.

$$POFD = \frac{\text{False Alarms}}{\text{Correct Negatives} + \text{False Alarms}} \quad (16)$$

روش بعدی که در ارزیابی کیفیت پیش‌بینی‌ها به کار گرفته می‌شود، روش نسبت هشدارهای اشتباه یا FAR است. این معیار بیان می‌کند که چه تعدادی از رویدادهای مشاهداتی اشتباه پیش‌بینی شده‌اند. دامنه تغییرات آن بین صفر تا یک و مقدار ایده‌آل آن برابر با صفر است.

$$FAR = \frac{\text{False Alarms}}{\text{Hits} + \text{False Alarms}} \quad (17)$$

معیار دقت یا ACC، روشی است که در کل مشخص می‌کند چه مقداری از پیش‌بینی‌ها درست هستند. دامنه تغییرات آن بین صفر تا یک و مقدار ایده‌آل آن برابر با یک است.

$$ACC = \frac{\text{Hits} + \text{Correct Negatives}}{\text{Total}} \quad (18)$$

معیار نسبت موفقیت یا SR است. این معیار مشخص می‌کند که چه مقدار از پیش‌بینی‌های (بله) رویدادها، به درستی مشاهده شدند. دامنه تغییرات آن بین صفر تا یک و مقدار ایده‌آل آن برابر با یک است.

$$SR = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{False Alarms}} \quad (19)$$

آخرین و مهم‌ترین معیار ارزیابی در این بخش معیار نسبت ارببی یا BIAS، پیش‌بینی‌ها را با فراوانی رویدادهای اتفاق افتاده داده‌های مشاهداتی مقایسه می‌کند. تمایل مدل به پیش‌بینی دست پایین ($BIAS < 1$) یا پیش‌بینی دست بالا ($BIAS > 1$) را نشان می‌دهد. این شاخص مقدار تطابق پیش‌بینی با مشاهداتی را اندازه‌گیری نمی‌کند، بلکه فقط فراوانی‌های نسبی را بررسی و ارزیابی می‌کند. دامنه تغییرات آن بین $-\infty$ تا $+\infty$ تغییر می‌کند و مقدار ایده‌آل آن برابر با یک است. همچنین لازم به ذکر است که این معیار از متغیرهای توزیع مشترک استفاده می‌کند.

$$BIAS = \frac{\text{Hits} + \text{False Alarms}}{\text{Hits} + \text{Misses}} \quad (20)$$

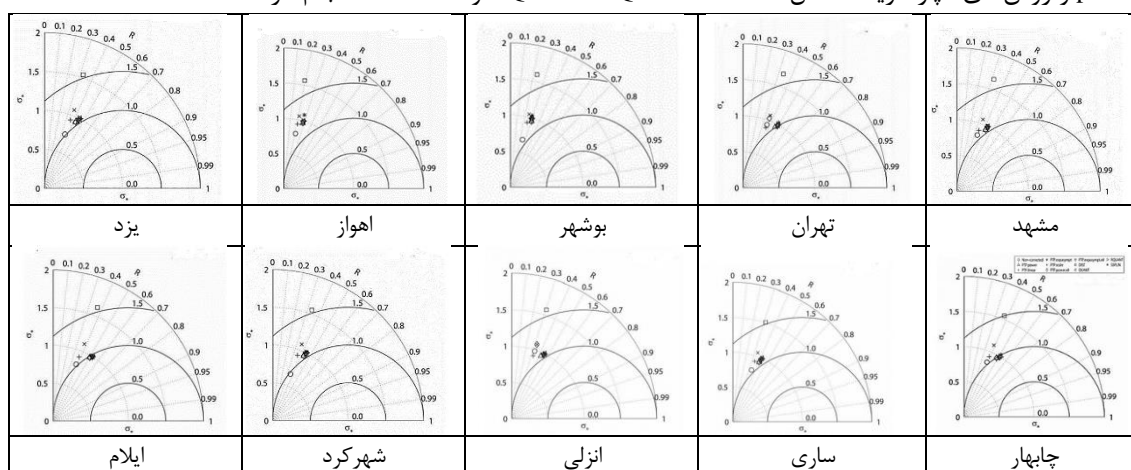
شرح و تفسیر نتایج

مقایسه داده‌های ERA⁵ با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد نظر بر اساس هفت معیار ارزیابی دوبخشی انجام شد و در جدول ۴ نشان داده شده است. شاخص ACC نشان داد که ۸ ایستگاه بالای ۸۰ درصد بارش‌ها را برآورد کرده‌اند. در این بین ایستگاه ساری با ۰/۴۹ کمترین مقدار را ثبت کرده است، پس از واکاوی در داده‌های بارش این ایستگاه مشخص شد که تعداد روزهای بارانی آن ۲۳۳۴ روز است اما از بین این تعداد، ۱۲۳۱ روز دارای بارش زیر دو میلی‌متر است و مدل در پیش‌بینی این مقدار اندک موفق عمل نکرده و بسیاری از این روزها را بدون بارش گزارش کرده است. در بررسی نسبت SR مشخص شد که تمامی ایستگاه‌ها قادر به پیش‌بینی بیش از ۳۰ درصد روزهای دارای بارش نشده است، در این بین شهرکرد با ۰/۴۸ دارای کمترین میزان است. شاخص POFD نشان داد که ۷ ایستگاه مقدار کمتر از ۰/۱ را ثبت کرده‌اند، این معیار بیانگر این واقعیت است که رویدادهایی را که مدل ERA⁵ در ایستگاه‌های مورد بررسی به غلط پیش‌بینی کرده بسیار اندک بوده و این مدل از دقت بالایی برخوردار است. شاخص POD که بیانگر دقت مدل در درست پیش‌بینی کردن رویدادهای مشاهداتی است، نشان می‌دهد که ۷ ایستگاه بیش از ۷۰ درصد وقایع را به درستی نشان می‌دهند. معیار FAR نیز نشان می‌دهد که ۷ ایستگاه زیر ۰/۴ هستند، کمترین مقدار آن ایستگاه ایلام با ۰/۲۵ و بیشترین مقدار ایستگاه شهرکرد با ۰/۵۱ است. نتایج این شاخص نشان‌دهنده‌ی این نکته است که درست است که مدل ERA⁵ جدیدترین نسل پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل داده است، با این حال این امکان وجود دارد که حتی تا ۵۰ درصد پیش‌بینی‌های درست نباشد. شاخص CSI برای ۷ ایستگاه بین بیش از ۰/۵ است و تنها در ایستگاه یزد این مقدار با ۰/۲۶ کمترین مقدار و ایستگاه‌های انزلی و ایلام با ۰/۶۳ بیشترین مقدارهای این شاخص ارزیابی بودند. ترکیب ۷ شاخص بر اساس میانگین مجذور معیارها از مقدار ایده‌آل خودشان نشان می‌دهد که داده‌های ERA⁵ برای ایستگاه ایلام بهترین دقت و برای ایستگاه یزد بدترین پیش‌بینی را دارا است. اثر هم‌زمان نوع اقلیم و موقعیت جغرافیایی می‌تواند بر دقت و کارایی داده‌های ERA⁵ تأثیر بسزایی بگذارد. با این وجود برای اقلیم فراهشک (ایستگاه‌های چابهار و یزد) داده‌های ERA⁵ کارایی مطلوبی نخواهند داشت.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌ها در ارزیابی داده‌های بارش ERA^۵ در ایستگاه‌های منتخب

میانگین مجذور معیارها از مقدار ایده‌آل	BIAS	CSI	FAR	POFD	POD	SR	ACC	مقدار ایده‌آل
	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	
ایلام	۰/۰۴۹	۱/۰۴	۰/۶۱۴	۰/۲۵۳	۰/۰۶۳	۰/۷۷۶	۰/۷۴۷	۰/۹۰۶
مشهد	۰/۰۶۸	۱/۱۱۳	۰/۵۶۷	۰/۳۱۳	۰/۰۹۷	۰/۷۶۴	۰/۶۸۷	۰/۸۷۳
بوشهر	۰/۰۶۸	۱/۰۶۹	۰/۵۵۰	۰/۳۱۴	۰/۰۳۴	۰/۷۳۴	۰/۶۸۶	۰/۹۴۵
اهواز	۰/۰۷۶	۱/۱۰۵	۰/۵۳۵	۰/۳۳۶	۰/۰۴۳	۰/۷۳۴	۰/۶۶۴	۰/۹۳۳
انزلی	۰/۰۸۴	۱/۲۷۶	۰/۶۱۳	۰/۳۲۲	۰/۲۹۳	۰/۸۶۵	۰/۶۷۸	۰/۷۷۳
تهران	۰/۰۸۵	۱/۱۶۱	۰/۵۲۷	۰/۳۵۸	۰/۰۸۷	۰/۷۴۶	۰/۶۴۲	۰/۸۸۴
ساری	۰/۱۳۲	۱/۳۰۵	۰/۵۵۲	۰/۳۷۲	۰/۲۴۶	۰/۸۲۰	۰/۶۲۸	۰/۴۹۲
چابهار	۰/۱۳۹	۱/۱۵۶	۰/۳۹۹	۰/۴۶۸	۰/۰۱۹	۰/۶۱۵	۰/۵۳۲	۰/۹۶۸
شهرکرد	۰/۱۶۹	۱/۳۹۰	۰/۳۹۴	۰/۵۱۴	۰/۱۱۲	۰/۶۷۵	۰/۴۸۶	۰/۸۵۹
یزد	۰/۲۲۱	۰/۶۹۴	۰/۲۶۳	۰/۴۹۱	۰/۰۳۳	۰/۳۵۳	۰/۵۰۹	۰/۹۱۱

ارزیابی عملکرد روش‌های نگاشت چندک در تصحیح اریبی داده‌های بارش ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب توسط دیگرام تیلور در شکل ۲ ارائه شده است. در بین روش‌های PTF روش PFT-power عملکرد بهتری را در تمامی ایستگاه‌ها دارد. DIST ضعیف‌ترین عملکرد را در بین این روش‌ها از خود نشان می‌دهد؛ به طوری که حتی داده‌های تصحیح شده از داده‌های اولیه بسیار پرت و نامناسب می‌شود. در همین حال دو روش QUANT و RQUANT بهترین عملکرد را در بین این روش‌ها به خود اختصاص می‌دهند. به طوری که نه تنها مقادیر R و CRMSD بهبود می‌بخشند، بلکه مقدار σ^* را نیز به عدد ۱ نزدیک می‌کنند. با این وجود برای بررسی دقیق‌تر ارزیابی دو بخشی روش‌های پارامتریک شامل PFT-power و روش‌های ناپارامتریک شامل QUANT, RQUANT, DIST و SSPLINE انجام گرفت.



شکل ۲- مقایسه عملکرد روش‌های نگاشت چندک برای اصلاح اریب بارش توسط دیگرام تیلور

ارزیابی داده‌های اصلاح شده توسط ۷ شاخص ارزیابی دو بخشی نشان می‌دهد که بر اساس چهار شاخص ACC, SR, FAR و POFD، روش QUANT و RQUANT با بهبود داده‌ها در ۹ ایستگاه بهترین نتایج را ارائه می‌دهند و پس از آن‌ها

BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C		BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C	
۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل
-	+	-	-	-	+	+	PTF	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	PTF
-	+	-	-	-	+	+	DIST	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	DIST
-	+	-	-	-	+	+	QUANT	-	+	-	-	-	+	+	QUANT
-	+	-	-	-	+	+	RQUANT	-	+	-	-	-	+	+	RQUANT
-	+	-	-	-	+	+	SSPLIN	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	SSPLIN
شهرکرد								ساری							
BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C		BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C	
۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل
-	-	-	-	-	+	+	PTF	-	-	-	-	-	+	+	PTF
-	-	-	-	-	+	+	DIST	-	-	-	-	-	+	+	DIST
-	-	-	-	-	+	+	QUANT	-	-	-	-	-	+	+	QUANT
-	-	-	-	-	+	+	RQUANT	-	-	-	-	-	+	+	RQUANT
-	-	-	-	-	+	+	SSPLIN	-	-	-	-	-	+	+	SSPLIN
یزد								مشهد							
BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C		BIA S	CS I	FA R	POF D	PO D	S R	AC C	
۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	مقدار ایده‌آل
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	PTF	-	-	-	-	-	+	+	PTF
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	DIST	-	-	-	-	-	+	+	DIST
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	QUANT	-	-	-	-	-	+	+	QUANT
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	RQUANT	-	-	-	-	-	+	+	RQUANT
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	SSPLIN	-	-	-	-	-	+	+	SSPLIN

+ نشان‌دهنده‌ی افزایش نسبت به مدل است (در سطح معنی‌داری ۵ درصد)

- نشان‌دهنده‌ی کاهش نسبت به مدل است (در سطح معنی‌داری ۵ درصد)

۰ نشان‌دهنده‌ی عدم تغییر نسبت به مدل است (در سطح معنی‌داری ۵ درصد)

نتیجه‌گیری

اگر چه داده‌های بازتحلیل روز به روز پیشرفت چشمگیری در زمینه ثبت داده‌های هواشناسی به خصوص بارش دارند، اما هنوز وجود خطای سیستماتیک در این گونه داده‌ها وجود دارد. فرایند تصحیح اریبی از طریق روش‌های نگاشت چندک برای غلبه به این مشکل بسیار کارآمد است. اگرچه، این را باید به خاطر سپرد که روش‌های متنوع نگاشت چندک لزوماً قابلیت‌های یکسانی با هم ندارند. به عنوان نمونه نتایج این مطالعه تفاوت بسیار زیاد در روش‌های مختلف را به طور برجسته نشان می‌دهد. در بین تمامی روش‌ها، روش DIST ضعیف‌ترین عملکرد و دو روش QUANT و RQUANT بهترین گزینه نسبت به روش‌های دیگر بودند. عملکرد بسیار خوب این دو روش را می‌توان به ماهیت انعطاف‌پذیر آن‌ها و این واقعیت که برخلاف روش‌های پارامتریک به عملگرهای از پیش تعیین شده‌ی وابسته نیستند برگشت داد. در بین روش‌های PTF بدترین و بهترین به ترتیب نتایج مربوط به PTF:scale و PTF-power بود، سایر روش‌های پارامتریک نیز عملکرد نزدیکی به روش‌های ناپارامتریک داشتند. تفاوت اقلیم و ویژگی‌های گوناگون توپوگرافیک نشان داده که استفاده از داده‌های ERA۵ و روش‌های تصحیح اریبی با احتیاط کامل باید انجام شود. به گونه‌ای که برای اقلیم فراخشک (چابهار، یزد) و اقلیم بسیار

مرطوب (ساری) و مناطق مرتفع (شهرکرد) این داده‌ها از دقت مناسبی برخوردار نیستند و روش‌های اصلاح اریبی نمی‌توانند این نواقص را پوشش دهند.

منابع

- Collischonn W, Allasia D, Da Silva BC, Tucci CE. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*. ۲۰۰۷ Oct ۱; ۵۲(۵):۸۷۸-۹۵.
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Bechtold VD, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X. The ERA - ۴۰ re - analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*. ۲۰۰۵ Oct; ۱۳۱(۶۱۲):۲۹۶۱-۳۰۱۲.
- Bengtsson L, Shukla J. Integration of space and in situ observations to study global climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*. ۱۹۸۸ Oct; ۶۹(۱۰):۱۱۳۰-۴۳.
- Trenberth KE, Olsen JG. Evaluation of NMC global analyses: ۱۹۷۹-۱۹۸۷. *Climate and Global Dynamics Division, National Center for Atmospheric Research*; ۱۹۸۸.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer DP, Bechtold P. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. ۲۰۱۱ Apr; ۱۳۷(۶۵۶):۵۵۳-۹۷.
- Sodoudi S, Noorian A, Geb M, Reimer E. Daily precipitation forecast of ECMWF verified over Iran. *Theoretical and applied climatology*. ۲۰۱۰ Jan; ۹۹(۱):۳۹-۵۱.
- Belo-Pereira M, Dutra E, Viterbo P. Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. ۲۰۱۱ Oct ۲۷; ۱۱۶(D۲۰).
- De Leeuw J, Methven J, Blackburn M. Evaluation of ERA-Interim reanalysis precipitation products using England and Wales observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. ۲۰۱۵ Apr; ۱۴۱(۶۸۸):۷۹۸-۸۰۶.
- Simmons AJ, Willett KM, Jones PD, Thorne PW, Dee DP. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. ۲۰۱۰ Jan ۱۶; ۱۱۵(D۱).
- Szczypta C, Calvet JC, Albergel C, Balsamo G, Boussetta S, Carrer D, Lafont S, Meurey C. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. *Hydrology and Earth System Sciences*. ۲۰۱۱ Feb ۲۵; ۱۵(۲):۶۴۷-۶۶.
- Tao Y, Duan Q, Ye A, Gong W, Di Z, Xiao M, Hsu K. An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai river basin. *Journal of hydrology*. ۲۰۱۴ Nov ۲۷; ۵۱۹: ۲۸۹۰-۹۰۵.
- JAVANMARD GM, Delavar M, Morid S. Medium-Term Forecast Evaluation of TIGGE Numerical Weather Prediction Models for Karun Basin. *The Journal of Iran-Water Resources Research (IR-WRR)*. ۲۰۱۸ Jan ۲; ۱۴ (۳): ۱-۱۴.
- Ngai ST, Tangang F, Juneng L. Bias correction of global and regional simulated daily precipitation and surface mean temperature over Southeast Asia using quantile mapping method. *Global and Planetary Change*. ۲۰۱۷ Feb ۱; ۱۴۹:۷۹-۹۰.
- Cannon AJ, Sobie SR, Murdock TQ. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*. ۲۰۱۵ Sep ۱; ۲۸(۱۷):۶۹۳۸-۵۹.
- Voisin N, Schaake JC, Lettenmaier DP. Calibration and downscaling methods for quantitative ensemble precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*. ۲۰۱۰ Dec ۱; ۲۵(۶):۱۶۰۳-۲۷.
- Gudmundsson L, Bremnes JB, Haugen JE, Skaugen TE. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping—a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. ۲۰۱۲; ۹(۵):۶۱۸۵-۲۰۱.
- Piani C, Haerter JO, Coppola E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*. ۲۰۱۰ Jan; ۹۹(۱):۱۸۷-۹۲.
- Villani V, Rianna G, Mercogliano P, Zollo AL, Schiano P. Statistical approaches versus weather generator to downscale rcm outputs to point scale: a comparison of performances. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. ۲۰۱۴ Jul ۱; ۸(۲):۱۴۲-۵۴.
- Kouhestani S, Eslamian SS, Abedi-Koupai J, Besalatpour AA. Projection of climate change impacts on precipitation using soft-computing techniques: A case study in Zayandeh-rud Basin, Iran. *Global and Planetary Change*. ۲۰۱۶ Sep ۱; ۱۴۴:۱۵۸-۷۰.

- Maraun D, Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ, Widmann M, Brienen S, Rust HW, Sauter T, Themeßl M, Venema VK. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*. ۲۰۱۰ Sep; ۴۸(۳).
- Ines AV, Hansen JW. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and forest meteorology*. ۲۰۰۶ Aug ۲۹; ۱۳۸(۱-۴):۴۴-۵۳.
- Li H, Sheffield J, Wood EF. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR۴ models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. ۲۰۱۰ May ۲۷; ۱۱۵(D۱۰).
- Teutschbein C, Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*. ۲۰۱۲ Aug ۱۶; ۴۵۶:۱۲-۲۹.
- Osuch M, Lawrence D, Meresa HK, Napiorkowski JJ, Romanowicz RJ. Projected changes in flood indices in selected catchments in Poland in the ۲۱st century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. ۲۰۱۷ Nov; ۳۱(۹):۲۴۳۵-۵۷.
- Jolliff JK, Kindle JC, Shulman I, Penta B, Friedrichs MA, Helber R, Arnone RA. Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *Journal of Marine Systems*. ۲۰۰۹ Feb ۲۰; ۷۶(۱-۲):۶۴-۸۲.