

آشکارسازی تغییرات بارش‌های حدی و نسبت دهی به تغییر اقلیم با استفاده از روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران)

توفیق سعدی^۱، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

بهلول علیجانی، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

علیرضا مساح بوانی، دانشیار منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.
مهری اکبری، استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۵/۲۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱

چکیده

هدف از این تحقیق، تعیین سهم اثرات محرک‌های مختلف تغییر اقلیم بر تغییرات بارش‌های حدی جنوب غرب ایران می‌باشد. محدوده مورد مطالعه شامل حوضه‌های آبریز مهمی چون حوضه‌های کارون بزرگ، زهره و جراحی و کرخه می‌باشد. شاخص‌های حداکثر بارش سالانه و حداکثر مجموع بارش پنج روزه در سال، طی دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۵ با استفاده از پایگاه داده‌های بارش روزانه افروودیت (APHRODITE) به عنوان مشاهدات و شبیه‌سازی‌های مدل NorESM1-M، تهیه و بررسی شدند. با استفاده از رویکرد بزرگ مقیاس نمایی و با استفاده از روش نزدیکترین همسایگی، میانگین سلول منطقه‌ی مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۲ درجه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ شمالی محاسبه گردید. سهم محرک‌های خارجی پدیده تغییر اقلیم شامل اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی (ALL)، اثرات جداگانه طبیعی (NAT) و اثرات جداگانه گازهای گلخانه‌ای (GHG) بر تغییرات بارش‌های حدی منطقه با استفاده از روش انگشت نگاشت بهینه آشکارسازی و نسبت دهی برای اولین بار در ایران در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که سهم سیگنال (ALL) در تغییرات بارش‌های حدی جنوب غرب ایران طی دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۵ قابل آشکارسازی و نسبت دهی هستند. اما هیچ‌گونه آشکارسازی برای اثرات جداگانه طبیعی (NAT) و اثرات جداگانه گازهای گلخانه‌ای (GHG) تایید نگردید. درصد تغییرات روند قابل نسبت دهی به اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی برای Rx1day و Rx5day به ترتیب ۱/۶۴ درصد (۰/۱۸ تا ۳/۱) و ۲/۵ درصد (۱ تا ۴ درصد) برآورد گردید.

واژگان کلیدی: آشکارسازی، نسبت دهی، انگشت نگاشت بهینه استاندارد، بارش‌های حدی، جنوب غرب ایران

مقدمه

فشار بخار اشباع اتمسفر^۱، با افزایش دما بر اساس رابطه ترمودینامیک کلازیوس - کلاپیرون^۲ افزایش می‌یابد. از آنجا که انتظار نمی‌رود رطوبت نسبی، تغییر چندانی داشته باشد لذا گرمایش جهانی کره زمین، می‌تواند موجب افزایش حجم گنجایش رطوبت اتمسفر گردد. به تبع آن، به دلیل اینکه بارشهای حدی به طور عمده به در دسترس بودن رطوبت وابسته می‌باشند بنابراین بارشهای حدی افزایش خواهند داشت (Allen and Ingram, ۲۰۰۲). شواهد نشان می‌دهد که اثرات انسانی، توزیع مکانی بارش را در نواحی مختلف کره زمین تغییر داده است و بارش در عرضهای جغرافیایی بالا و ظرفیت رطوبت اتمسفر افزایش یافته است (Min et al., ۲۰۰۸; Santer et al., ۲۰۰۷; Willett et al., ۲۰۱۳; Zhang et al., ۲۰۰۷; Polson et al., ۲۰۱۳). همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که بارش‌های حدی در مناطق کره زمین به طور متوسط تشدید شده است (Alexander et al., ۲۰۰۶; Donat et al., ۲۰۱۳; Westra et al., ۲۰۱۳). این تغییرات ممکن است تحت تاثیر گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد. وسترا و همکاران (Westra et al., ۲۰۱۳) نشان دادند که افزایش مشاهده شده در بارش حداکثر سالانه^۳ (Rx1day) به ازای هر افزایش دمای سطح، نرخ معادل ۵.۹ درصد بر درجه کلون تا ۷.۷ درصد بر درجه کلون افزایش می‌یابد. این نتیجه به تخمینی که از رابطه کلوزیوس-کلاپیرون بدست می‌آید (۷ درصد بر درجه کلون) نزدیک می‌باشد.

تعیین سهم تغییر اقلیم بر پدیده‌های مختلف که به نمونه‌هایی از آنها اشاره گردید در شاخه‌ای از علم تغییر اقلیم تحت عنوان آشکارسازی و نسبت دهی مطالعه می‌گردد. آشکارسازی یک تغییر، به عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که در آن اقلیم یا یک سیستم تحت تأثیر اقلیم، به گونه‌ای تغییر می‌کند که از لحاظ آماری به هر ترتیبی معنادار تلقی شده و برای آن تغییر، دلیلی ارائه نگردد و نسبت دهی به عنوان فرآیند ارزشیابی مشارکت نسبی عوامل مختلف در یک تغییر یا واقعه با تعیین حدود اطمینان از لحاظ آماری تعریف می‌شود (Hegerl et al., ۲۰۱۰). همانطور که از عبارت پیداست، نسبت دهی، پیچیده‌تر از آشکارسازی است که این امر به دلیل ترکیب تحلیل‌های آماری به همراه فهم فیزیکی است (Hegerl and Zwiers, ۲۰۱۱).

روش انگشت نگاشت بهینه^۴، بهترین و گسترده‌ترین روش مورد استفاده برای آشکارسازی تغییرات اقلیم و نسبت دهی در دهه اخیر بوده است (Ribes et al., ۲۰۱۳). نامگذاری روش "انگشت نگاشت" به این نام، به این دلیل است که در آن، ضرایبی موسوم به ضرایب مقیاس ساز^۵ برای هر محرک یا عامل محاسبه می‌گردد که به مثابه اثر انگشت یا میزان دخالت یک عامل خاص در تغییرات تلقی می‌شود. در این بخش از مقاله به شرح مختصری از مهمترین مطالعات صورت گرفته در جهان که از نظر روش شناسی با پژوهش حاضر ارتباط بیشتری دارد بسنده می‌گردد. مطالعات کمی، آشکارسازی و نسبت دهی بارش‌های حدی را بررسی نموده‌اند و اکثر این مطالعات در مقیاس بزرگ و جهانی انجام شده‌اند. ماین و همکاران (Min et al., ۲۰۱۱) با استفاده از روش انگشت نگاشت بهینه، شدت بارش‌های حدی را در ارتباط با اثرات فعالیت‌های انسانی مورد بررسی قرار دادند. آنها از شبیه‌سازی‌های مجموعه مدلهای فاز سوم پروژه قیاسی مدل جفت شده^۶ (CMIP۳) و داده‌های مشاهداتی محدود به سال ۲۰۰۰ استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها

^۱ Atmospheric saturation vapor pressure

^۲ Clausius-Clapeyron relationship

^۳ Annual maximum of daily precipitation

^۴ Optimal Fingerprinting

^۵ Scaling Factor

^۶ Coupled Model Intercomparison Project Phase III

نشان داد که آشکارسازی پاسخ ها به اثرات نیروهای خارجی ترکیبی انسانی و طبیعی^۱ (ALL) نسبت به اثرات انسانی به طور جداگانه^۲ (ANT) از قوت کمتری برخوردار است. همچنین تغییرات در شبیه سازی های مدل های اقلیمی، به طور قابل ملاحظه ای، از تغییرات مشاهدات کوچکتر می باشند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۱۳) نیز به روش انگشت نگاشت بهینه و با استفاده از داده های مشاهداتی به روزتر و همچنین با بهره گیری از میانگین گروهی مدل های^۳ مجموعه فاز پنجم پروژه مدل جفت شده (CMIP۵)، آشکارسازی و نسبت دهی بارش های حدی را در مقیاس کره زمین مطالعه نمودند. بر اساس نتایج آنها، اثرات انسانی چه به صورت ترکیبی با اثرات طبیعی و چه به صورت جداگانه، در ارتباط با تغییرات بارش های حدی در طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۵۱ در نیمکره شمالی قابل آشکارسازی می باشند اما اثرات جداگانه طبیعی، قابل آشکارسازی نبودند. آنها برآورد نمودند که اثرات انسانی، بارش حداکثر سالانه را در نیمکره شمالی به میزان ۳/۳٪ (۱/۱٪ تا ۵/۸٪ و با فاصله اطمینان بالای ۹۰ درصد) به طور متوسط افزایش داده است.

در مقاله حاضر، روش انگشت نگاشت بهینه استاندارد، برای اولین بار در ایران، به منظور آشکارسازی و نسبت دهی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه، محدوده جنوب غرب ایران بین طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ شمالی می باشد. این منطقه به دلیل وجود حوضه های آبریز مهمی نظیر کارون بزرگ، دز، کرخه، زهره، مارون و جراحی، بسیار حائز اهمیت می باشد و از نظر پتانسیل و منابع آب و انرژی، از نقش حیاتی و مهمی در کشور برخوردار است. سیل خیزی از ویژگیهای بارز حوضه های آبریز فوق به خصوص حوضه کارون بزرگ بوده و رکورد بزرگترین سیلاب سالهای اخیر کشور در فروردین ماه سال ۱۳۹۵ در حوضه مذکور شکسته شد. در رخداد فوق، بارش های شدید در مناطق غرب و جنوب غربی کشور، باعث جریان سیلاب در رودخانه های استان های ایلام، لرستان و خوزستان گردید؛ اوج این بارش ها در حوضه کارون بزرگ و سد دز بود که باعث جاری شدن سیلابی با شدت ۸ هزار مترمکعب در ثانیه گردید که در سال های اخیر بی سابقه بوده است. پیش از این، بزرگترین سیل در حوضه کارون در تاریخ ۲۳ اسفند ۸۳ اتفاق افتاده بود که آن سیلاب هم حدود ۷ هزار مترمکعب در ثانیه بوده است. علاوه بر سهم قابل توجه بارش های سنگین، حوضه های مذکور، دارای شرایط خاصی هستند که بر آسیب پذیری آنها را در برابر سیلاب می افزاید. در بخش جلگه ای حوضه کارون بزرگ یا به عبارت دیگر در پایین دست حوضه، شهرهای بزرگ و صنعتی نظیر کلانشهر اهواز قرار دارد، همچنین بخشهای میانی حوضه کارون بزرگ و دیگر حوضه های آبریز جنوب غرب کشور را روستاها و شهرهای کوچک تشکیل می دهند که در سالهای اخیر به دلیل توسعه اقتصادی، تعداد اینگونه مراکز جمعیتی و اقتصادی افزایش پیدا کرده است. بنابراین به منظور جلوگیری از خسارتهای جانی و مالی ناشی از سیلاب، ضرورت دارد با شناخت و کسب آگاهی کافی نسبت به تغییرات عامل اصلی این پدیده یعنی بارش های سنگین، مدیریت و برنامه ریزی لازم اتخاذ گردد. یکی از عواملی که برای وقوع پدیده های بی سابقه اخیر، متصور است، اثرات پدیده تغییر اقلیم است. مطالعه تغییرات بارش های حدی نسبت به پدیده تغییر اقلیم می تواند ضمن پاسخ گویی به پرسش ها و ابهامات متعدد برنامه ریزان و تصمیم گیران در این زمینه، افق روشن تر و شفاف تری را برای مدیریت پایدار و سازگار با گرمایش جهانی فراهم نماید لذا این تحقیق در نظر دارد به منظور نشان دادن آسیب پذیری منطقه مورد مطالعه در برابر اثرات تغییر اقلیم، سهم عوامل و اثرات

^۱ Combined effect of external anthropogenic and natural forcing

^۲ Anthropogenic forcing alone

^۳ Multi Model Ensemble Mean

پدیده مذکور را بر تغییرات بارش‌های حدی در دوره‌های گذشته مورد بررسی قرار دهد. ساختار ارائه مطالب این مقاله بدین ترتیب می‌باشد که توضیحات مربوط به داده‌ها، مراحل پردازش آنها و روش انگشت نگاشت بهینه استاندارد، در بخش داده‌ها و روش کار ارائه شده است. یافته‌های بررسی میزان نقش سیگنال‌های مختلف در منطقه و تحلیل آنها در بخش شرح و تفسیر نتایج و در پایان به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

داده‌ها و روش کار

مطالعات آشکارسازی و نسبت دهی نیازمند داده‌های مشاهدات، شبیه‌سازی‌های سیگنال‌ها و شبیه‌سازی‌های اجرای کنترل می‌باشند. شبیه‌سازی‌های اجرای کنترل برای تخمین تغییر پذیری درونی^۱ اقلیم و همچنین تهیه نمونه نويز برای آزمون عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر برای تهیه سری زمانی شاخص‌های بارش حدی شامل حداکثر بارش سالانه (Rx1day) و حداکثر بارش پنج روزه در سال^۲ (Rx5day) از پایگاه داده‌های شبکه ای روزانه افروdit^۳ در مقیاس ۲۵ کیلومتر در ۲۵ کیلومتر به عنوان داده‌های مشاهدات برای بارش استفاده گردید. این پایگاه توسط مؤسسه تحقیقات هواشناسی سازمان هواشناسی کشور ژاپن^۴ و مؤسسه پژوهشی بشر و طبیعت در سال ۲۰۰۶ بنا و پایه‌گذاری شده است. هدف این پایگاه داده ایجاد یک پایگاه داده روزانه بارش برای آسیا با تفکیک مکانی بالاست. داده‌های افروdit با هدف ارتقاء کیفیت داده‌های مشاهداتی مورد نیاز مطالعات اقلیمی و هیدرولوژی، بر اساس داده‌های مشاهداتی ۱۲۰۰-۵۰۰۰ ایستگاه زمینی در گستره اوراسیا، ژاپن، خاورمیانه و مونسون آسیا تهیه شده است. بررسی وضعیت توزیع ایستگاه‌های مشاهداتی محدوده مورد نظر تحقیق حاضر در داده‌های افروdit نشان می‌دهد که توزیع ایستگاه‌ها از وضعیت خوبی برخوردار است (Yatagai et al., ۲۰۱۲). بر اساس ادعای یاتاگای و همکاران (Yatagai et al., ۲۰۱۲)، این پایگاه داده در حال حاضر، تنها محصول بارش روزانه با تفکیک و دقت بالا، در مقیاس قاره‌ای است.

برای محاسبه تغییر پذیری درونی اقلیم منطقه و شبیه‌سازی پاسخ‌های اقلیم به محرک‌های مختلف پدیده تغییر اقلیم، از مدل نیروی سیستم زمین^۵ NorESM۱-M از سری مدل‌های CMIP۵^۶ استفاده گردید. مدل مذکور از خانواده نسخه چهارم مدل سیستم جامع اقلیم^۷ (CCSM۴) که محصول مشارکت دانشگاه برای پژوهش‌های اتمسفری^۸ است می‌باشد، اما در هسته پیشرفته مدل اقیانوسی و اندرکنش تشعشع-ابر-آئروسول-شیمی با قبلی متفاوت است. قدرت تفکیک افقی مدل NorESM۱-M، ۲ درجه برای اتمسفر و عناصر زمینی و یک درجه برای اقیانوس و اجزاء یخچالی می‌باشد (Bentsen et al., ۲۰۱۳). معیار انتخاب مدل در این پژوهش، نتایج منتشر شده در پنجمین گزارش ارزیابی تغییر اقلیم^۹ برای ارزیابی مدل‌ها می‌باشد. بر اساس این نتایج که حاصل بررسی‌های سیلمن و

^۱ Internal Variability

^۲ Annual maximum of ۵-day consecutive precipitation amount

^۳ APHRODITE: Asian Precipitation—Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources

^۴ Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency

^۵ The Norwegian Climate Center's Earth System Model (Bentsen et al., ۲۰۱۳).

^۶ Coupled Model Intercomparison Project Phase ۵

^۷ The Community Climate System Model version ۴

^۸ The University Corporation for Atmospheric Research

^۹ Fifth Assessment Report (AR۵)

و همکاران (۲۰۱۲، Sillmann et al.) در رابطه با ارزیابی مدل‌های CMIP۵ برای شاخص‌های مختلف بارش و دما می‌باشند مدل NorESM۱-M برای مطالعه بارش‌های حدی Rx۱day و Rx۵day از کارایی مناسب تری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. پاسخ‌ها^۱ یا سیگنال‌های^۲ مورد بررسی در این مقاله شامل اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی طبیعی (ALL)، اثرات جداگانه انسانی^۳، اثرات جداگانه طبیعی^۴ (NAT) و اثرات جداگانه گازهای گلخانه‌ای^۵ (GHG) می‌باشند. این شبیه‌سازی‌های مربوط به دوره ۲۰۰۵-۱۸۵۰ می‌باشند و در این تحقیق با توجه به دوره آماری داده‌های مشاهداتی، سری‌های زمانی ۲۰۰۵-۱۹۵۱، شبیه‌سازی‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های فوق به ترتیب سیگنال ALL، سیگنال NAT و سیگنال GHG خوانده می‌شوند. منظور از سیگنال ALL، شبیه‌سازی‌های پاسخ به کلیه اثرات می‌باشند؛ به عبارت دیگر مربوط به شرایط جهان واقعی است. در واقع داده‌های این شبیه‌سازی، معادل داده‌های مشاهداتی می‌باشند به همین دلیل در برخی از مطالعات اقلیمی، می‌توان این نوع داده‌ها را بر اساس داده‌های ایستگاه‌ها (مشاهدات) ریزمقیاس نمود. سیگنال NAT، شبیه‌سازی‌های مربوط به اثرات طبیعی می‌باشد. به عنوان مثال رفتار بارش را فقط تحت اثرات فعالیت‌های خورشیدی و آتشفشانی نشان می‌دهد. سیگنال GHG نیز فقط شامل اثرات گازهای گلخانه‌ای است و در مورد بارش، فقط شبیه‌سازی‌های بارش تحت اثرات گازهای گلخانه‌ای را ارائه می‌نماید. علاوه بر داده‌های فوق، در این تحقیق، داده‌های شبیه‌سازی بارش روزانه پانصد ساله پیش از انقلاب صنعتی^۶، برای برآورد تغییرپذیری درونی اقلیم منطقه به کار گرفته شدند. این شبیه‌سازی‌ها، رفتار متغیرها (نظیر بارش) در شرایط بدون اثرات گازهای گلخانه‌ای و دخالت بشر می‌باشند؛ به عبارت دیگر در مدلسازی آنها، شرایط کره زمین، از زمان پیش از انقلاب صنعتی، ثابت و بدون تغییر نگه داشته می‌شود و سری‌های زمانی ۵۰۰ ساله، بدون اضافه شدن هیچگونه اثر انسانی شبیه‌سازی می‌شوند به همین دلیل به این نوع شبیه‌سازی‌ها، اجرای کنترل^۷ نیز گفته می‌شود. در روش انگشت نگاشت بهینه، از این داده‌ها علاوه بر تخمین تخمین تغییرپذیری درونی اقلیم، برای تهیه نمونه نوین مستقل دیگری جهت استفاده در آزمون عدم قطعیت، استفاده گردید.

بزرگی مقادیر بارش از یک ناحیه به ناحیه دیگر، بسیار تغییرپذیر است. از این رو، تنوع پذیری زمانی میانگین‌های مکانی بارش‌های حدی مشاهداتی، تحت تأثیر تنوع پذیری نواحی با مقادیر بزرگ بارش قرار می‌گیرند. علاوه بر این، تغییر در موجودیت داده‌ها در زمان ممکن است موجب ناهمگنی در سری زمانی مربوط به میانگین‌های مکانی گردد (Wan et al., ۲۰۱۴). به عبارتی نسبت سیگنال به نویز در بارش‌های حدی پایین است و بزرگ مقیاس‌نمایی یا میانگین‌گیری بزرگ منطقه‌ای شاخص‌های بارش‌های حدی (به عنوان مثال: وسترا و همکاران (Westra et al., ۲۰۱۳)) می‌تواند نویز را کاهش داده و احتمال آشکارسازی پاسخ‌ها به نیروهای خارجی را افزایش دهد. این رویکرد در برخی از مطالعات گذشته برای کاهش عدم قطعیت در نتایج آشکارسازی و نسبت دهی مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang et al., ۲۰۱۳; Wan et al., ۲۰۱۴; Min et al., ۲۰۱۴). همچنین با توجه به اینکه امکان ریزمقیاس

^۱ Responses^۲ Signals^۳ Anthropogenic forcing alone^۴ Natural forcing alone^۵ Greenhouse gases forcing alone^۶ Pre-industrial Control run simulation^۷ Control Run

نمایی شبیه سازی های GHG، NAT و اجرای کنترل، به دلیل نبود داده های مشاهداتی معادل آنها وجود ندارد. بنابر این یکی از روشهای نزدیک نمودن مقیاس مشاهدات و داده های مدل، استفاده از بزرگ مقیاس نمایی^۱ یا میانگین حوضه ای است. در مطالعات آشکارسازی، داده های شبکه ای مشاهدات نسبت به داده های نقطه ای (ایستگاه) ارجحیت دارد زیرا بر خلاف موضوع بررسی اثرات تغییر اقلیم در دوره های آتی، در مبحث آشکارسازی و نسبت دهی، رویکرد ریز مقیاس نمایی مرسوم نیست، بلکه به جهت کاهش عدم قطعیت نتایج، رویکرد بزرگ مقیاس نمایی داده ها مورد توجه می باشد. معمولاً ابعاد سلول ها را برای بزرگ مقیاس نمایی داده ها، 5×5 درجه در نظر می گیرند که به عنوان نمونه می توان به مطالعات صورت گرفته توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۱۳) اشاره نمود. در تحقیق حاضر، ابعاد بزرگ مقیاس نمایی با توجه به وسعت منطقه، 4×4 درجه تعیین گردید. لذا کلیه سری های زمانی Rx1day و Rx5day اعم از مشاهدات و شبیه سازی های مدل، به ابعاد مذکور باز نقشه نمایی^۲ شدند. این کار به روش نزدیکترین همسایگی^۳ و توسط نرم افزار CDO^۴ انجام گردید.

روش های انگشت نگاشت بهینه، نیازمند مقادیر استاندارد شده نظیر آنومالی و یا شاخص احتمالاتی PI^5 می باشند. در تحقیقات گذشته، برای افزایش دقت نتایج آشکارسازی و نسبت دهی بارش های حدی، این رویکرد توصیه شده است (Zhang et al., ۲۰۱۳). شاخص احتمالاتی PI به وسیله برازش^۶ توزیع مقادیر حدی عمومی^۷ یا GEV به مقادیر سری های زمانی بارش محاسبه می گردد. در این توزیع یک متغیر x توزیع داده شده GEV، یک تابع توزیع تجمعی^۸ دارد که به وسیله پارامترهای موقعیت^۹ یا μ ، مقیاس یا δ و شکل^{۱۰} یا ξ به شرح زیر مشخص می شود:

$$F(x, \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp \left[-\exp \left\{ -\frac{x-\mu}{\sigma} \right\} \right] & , \quad \xi = 0 \\ \exp \left[-\left\{ 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \right] & , \quad \xi \neq 0 \quad 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} > 0. \end{cases} \quad (1)$$

شاخص های احتمالاتی PI مربوط به مقادیر قوی تر، به عدد ۱، نزدیک تر می باشند و مقادیر ضعیف تر، PI نزدیک به عدد صفر خواهند داشت (Min et al., ۲۰۱۱).

در روش های انگشت نگاشت بهینه آشکارسازی و نسبت دهی، با توجه به اینکه حجم زیادی از داده های شبیه سازی مدل برای برآورد تغییر پذیری اقلیم درونی، مورد نیاز است لذا این روشها به منظور محاسبه بهترین نتایج، اغلب نیاز به کاهش حجم داده های اجرای کنترل دارند. این کار معمولاً به وسیله پروژه نمودن شبیه سازی های تغییر پذیری درونی با استفاده از توابع متعامد تجربی^{۱۱} صورت می گیرد (Allen and Tott, ۱۹۹۹; Allen and Stott, ۲۰۰۳). این توابع، از آنجایی که همبستگی غیر صفر، دلالت بر نسبتی از اطلاعات اضافی دارد، اساسی ترین ماتریس ها را استخراج می نمایند. توابع متعامد تجربی با مولفه های اصلی در ارتباط است. EOF، نشاندهنده یک ساختار فضایی

^۱ Up scaling

^۲ Remap

^۳ Nearest neighbor remapping

^۴ Climate Data Operators (<https://code.zmaw.de/projects/cdo>)

^۵ Probability Index

^۶ Fitting

^۷ Generalized extreme value distributions (GEV)

^۸ Cumulative distribution function (CDF)

^۹ Location

^{۱۰} Shape

^{۱۱} Empirical Orthogonal Functions

می باشد در حالی که مولفه اصلی، قدرت نمایش آنها را در زمان توصیف می کند. در واقع هدف اصلی توابع تجربی غیر متعامد (EOF) رسیدن به یک تجزیه فیلد زمانی - مکانی پیوسته $X(t,s)$ به شرح رابطه ی زیر است:

$$X(t,s) = \sum_{k=1}^M ck(t)uk(s) \quad (۲)$$

که در آن M تعداد مدل ها یا نمونه های به کار رفته در فیلد مورد نظر با استفاده از یک سری بهینه از توابع فضایی پایه $uk(s)$ و $ck(t)$ توابع گستره ی زمان می باشند.

• روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه آشکارسازی و نسبت دهی

همانگونه که در مقدمه اشاره گردید یکی از روش های معروف آشکارسازی و نسبت دهی تغییر اقلیم، روش انگشت نگاشت بهینه است. این روش توسط هسلمن (Hasselmann, ۱۹۷۹; ۱۹۹۳; ۱۹۹۷) برای آشکارسازی و نسبت دهی معرفی گردید و توسط دانشمندان دیگری توسعه داده شد. از مهمترین مطالعات صورت گرفته در توسعه این روش می توان به هگرل و نورث (Hegerl and North, ۱۹۹۷)، هگرل و زویرز (Hegerl and Zwiers, ۲۰۰۴)، آلن و تات (Allen and Tett, ۱۹۹۹)، آلن و استات (Allen and Stott, ۲۰۰۳)، رایس و همکاران (Ribes et al. ۲۰۰۹; ۲۰۱۳; ۲۰۱۶) و هانارت و همکاران (Hannart et al., ۲۰۱۴) اشاره نمود. پایه مدل ریاضی این روش، یک الگوریتم رگرسیون خطی استاندارد است. مدل استاندارد آشکارسازی فرض می نماید که الگوهای پاسخ های شبیه سازی مدل، بدون نویز هستند. نحوه تحلیل نتایج روش انگشت نگاشت بهینه بدین صورت است که ضرایب محاسبه شده بتا یا اصطلاحاً ضرایب مقیاس ساز و فواصل اطمینان ۹۵ درصد آنها اگر از صفر بزرگتر باشند آشکارسازی نتیجه گیری می شود و اگر نتایج شامل مقدار ۱ باشند نسبت دهی صورت گرفته است. معادله زیر الگوریتم رگرسیون خطی استاندارد مورد استفاده در روش انگشت نگاشت بهینه را نشان می دهد:

$$y = \sum_{i=1}^m X_i \beta_i + v = X\beta + v \quad (۳)$$

که در آن، y بردار رتبه ای مشاهدات، m ستونی از x یا الگوهای پاسخ های شبیه سازی مدل و اجزاء β و β_i ، مقادیر الگوی مجهول که بایستی محاسبه گردند و v ، نویز اقلیم در مشاهدات می باشد. کواریانس نویز اقلیم به شرح زیر است:

$$C_N \equiv \mathcal{E}(vv^T), \quad (۴)$$

که $\mathcal{E}$ نشاندهنده عملگر امید ریاضی است که معمولاً مجهول است و بایستی از یک اجرای کنترل مدل اقلیمی برآورد گردد. کواریانس نویز از آنجا که به طور کلی، دور از نوفه ی سفید است ($C_N \neq I$)، رگرسیون مربعات وزن دهی نشده، برآوردهای خیلی ضعیفی برای β و برآوردهای خیلی قوی از خطاها در β ارائه می دهد. لذا به عنوان راه حل، یک عملگر Pre-Whitening توصیه شده است که به شرح زیر تعریف می گردد:

$$\mathcal{E}(Pvv^T P^T) = I_k, \quad (۵)$$

که در آن، I_k ، ماتریس واحد، k رتبه ای است. نکته قابل توجه این است که رتبه مربوط به P ، ممکن است خیلی کوچکتر از n یا رتبه مشاهدات y باشد. به طور کلی، یک عملگر Pre-Whitening با رتبه کامل (که بتواند واریانس نویز برابر برای همه مقیاسهای زمانی - مکانی ارائه دهد) غیر قابل دستیابی است زیرا واریانس نویز مقیاس کوچک، مجهول بوده و یا انتظار می رود که به صورت ضعیفی به وسیله مدل اقلیمی شبیه سازی گردد.

به دلیل اینکه P_v ، نویز سفید توزیع داده شده مستقل^۱ می باشد لذا بهترین (کمترین واریانس) محاسبه گر بدون خطای خطی مربوط به β ، یعنی $\tilde{\beta}$ به وسیله کمینه سازی تابع مناسب، بدست می آید:

$$r^{\tilde{}}(\tilde{\beta}) \equiv (PX\tilde{\beta} - Py)^T(PX\tilde{\beta} - Py) \equiv \tilde{v}^T P^T P \tilde{v} \quad (6)$$

و با توجه به $\tilde{\beta}$ ، در حداقل خواهیم داشت:

$$\tilde{\beta} = (X^T P^T P X)^{-1} X^T P^T P y \equiv F^T y, \quad (7)$$

در رابطه فوق منظور از F ، "انگشت نگاشتهای متمایز"^۲ می باشد.

در این تحقیق برای بررسی صحت نتایج بدست آمده، از روش آزمون ثبات باقیمانده ها^۳ استفاده گردید. این روش برای آزمون اینک آیا باقیمانده های برآورد شده توسط روش انگشت نگاشت بهینه با تغییر پذیری درونی هماهنگی دارد یا خیر؟ معرفی و توسعه داده شد (Allen and Tott, ۱۹۹۹; Allen and Stott, ۲۰۰۳). در این آزمون، محدوده های قابل قبول مانده ها تعیین می گردد و در صورتی که باقیمانده های حاصل از رگرسیون درون این محدوده قرار بگیرند نتیجه می گیریم که نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

در این تحقیق، پس از محاسبه ضرایب مقیاس ساز مربوط به سیگنالهای مورد مطالعه و مشخص نمودن سیگنالهای قابل آشکارسازی و نسبت دهی، درصد تغییرات شاخص های احتمالاتی (PI) بارش های حدی قابل نسبت دهی (δPI) محاسبه گردید. برای این کار ابتدا روند خطی سری زمانی به PI را برای سیگنالهای نسبت دهی شده بدست آورده و در ضرایب مقیاس ساز مربوطه ضرب می نماییم.

شرح و تفسیر نتایج

در شکل ۱ (الف)، نتایج مربوط به بررسی سهم اثرات کل عوامل خارجی انسانی و طبیعی یا اصطلاحاً سیگنال ALL بر روی تغییرات سری زمانی ۵۵ ساله $Rx \setminus day$ ، نشان داده شده است. مقایسه بهترین نتایج قابل برآورد که به کمک اجرای توابع متعامد تجربی (EOF) در برازش داده های مشاهداتی افروودیت و شبیه سازی های مدل NorESM۱-M حاصل شده اند؛ نشان می دهد که تعدادی از ضرایب بتا مربوط به سیگنال ALL به طور معناداری بزرگتر از صفر می باشند. بدین معنی که اثرات کل عوامل خارجی انسانی و طبیعی در تغییرات $Rx \setminus day$ منطقه مورد مطالعه، آشکارسازی شدند. همچنین فواصل اطمینان همه بتاهای مذکور، شامل مقدار یک (۱) نیز می باشند؛ بدین معنی که تغییرات شبیه سازی شده در $Rx \setminus day$ ، تحت سیگنال ALL، با تغییرات در مشاهدات جنوب غرب ایران هماهنگی دارد؛ به عبارت دیگر علاوه بر آشکارسازی، نسبت دهی نیز صورت گرفته است. این نتایج با یافته های ماین و همکاران (Min et al., ۲۰۱۱)، که از شبیه سازیهای مدل های CMIP۳ استفاده کرده بودند تفاوت دارد اما با یافته های ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۱۳) که مدل های مجموعه فاز پنجم پروژه مدل جفت شده (CMIP۵)، را به کار برده بودند، هماهنگی وجود دارد. اما در بین همان نتایج (شکل ۱-الف)، نتایج متفاوتی نیز به چشم می خورد و علی رغم اینکه بتاها در همه آنها مثبت است؛ لیکن فواصل اطمینان ۹۰ درصد در برخی نتایج، شامل مقادیر منفی می باشد، بدین ترتیب این یافته ها بر خلاف یافته های قبلی برای سیگنال ALL، غیر قابل آشکارسازی می باشند. این اختلاف در میان نتایج مربوط به یک سیگنال مشابه، می تواند به دلیل وجود خطا در شبیه سازی های مدل به کار

^۱ Independent, identically distributed (i.i.d.)

^۲ Distinguishing fingerprints

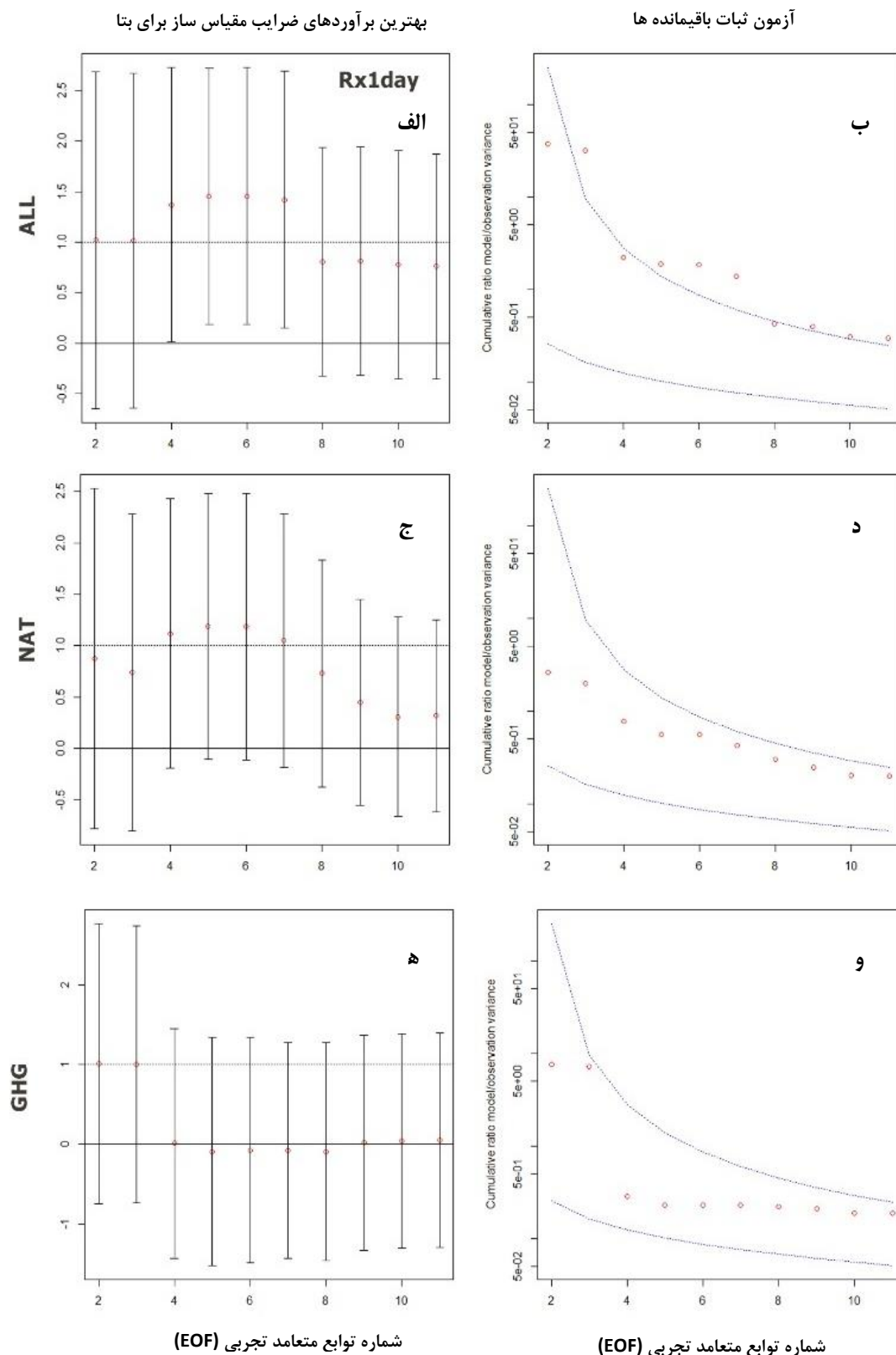
^۳ Residual consistency test

رفته و به ویژه شبیه سازی های پیش از انقلاب صنعتی باشد. چرا که در تخمین تغییر پذیری درونی اقلیم منطقه، از تعداد بسیار زیادی سری های داده شبیه سازی اجرای کنترل استفاده می گردد و احتمال بروز خطا هم در اثر عدم یکنواختی بین الگوهای شبیه سازی کنترل و سیگنال ALL و هم در بین خود نمونه های نویز وجود دارد. لازم به یادآوری است که یکی از مفروضات اصلی مبحث آشکارسازی و نسبت دهی، این است که این شبیه سازی ها به درستی رفتارها و پاسخ های اقلیم را برآورد نموده اند. لذا این نوع نتایج با توجه به ویژگی های مدلها دور از انتظار نیست. ضمن اینکه روش های مختلفی برای کاهش این عدم قطعیت ها قابل استفاده می باشد که یکی از این روشها، استفاده از توابع تجربی متعامد (EOF) است که در این تحقیق نیز به کار گرفته شده است. همچنین در کاربرد مدل رگرسیون، لازم است که کارایی مدل مورد آزمون قرار گیرد. شکل ۱ (ب)، نتایج مربوط به آزمون ماندگاری یا ثبات باقیمانده ها را نشان می دهد. منحنی های آبی رنگ، محدوده های ۵-۹۵ درصد قابل قبول آزمون را مشخص می نماید. همانگونه که ملاحظه می گردد اکثر باقیمانده های مربوط به ضرایب مقیاس ساز سیگنال ALL، خارج از این ناحیه قرار دارند و این بدان معناست که مدل رگرسیون نتوانسته است این نتایج را به خوبی برآورد نماید. اثرات جداگانه طبیعی (فعالیت های خورشیدی + آتشفشانی) یا سیگنال NAT بر تغییرات Rx1day در دوره ۲۰۰۵-۱۹۵۱، در منطقه مورد مطالعه، غیر قابل آشکارسازی و نسبت دهی تشخیص داده شد و بتاهای بدست آمده شامل مقادیر صفر می باشند (شکل ۱-ج). نتایج آزمون ثبات باقیمانده ها در شکل (۱-د)، بیانگر کارایی مناسب بتاهای بدست آمده برای سیگنال NAT می باشد. نتایج برآورد شده برای اثرات جداگانه گازهای گلخانه ای یا سیگنال GHG بر تغییرات بارش Rx1day، مشابه سیگنال NAT می باشد (شکل ۱-ه) با این تفاوت که علاوه بر فواصل اطمینان ۹۰ درصد، تعدادی از بتاها یا ضرایب مقیاس GHG به طور معنی داری کمتر از صفر هستند در حالی که کلیه بتاهای NAT مثبت بوده و فقط فواصل اطمینان آنها منفی می باشند. نتایج آشکارسازی و نسبت دهی تغییرات حداکثر بارش جمعی پنج روزه در سال (Rx5day)، تحت سیگنال ALL، در شکل شماره ۲ نشان می دهد که پاسخ های شبیه سازی شده به اثرات مجموع عوامل خارجی انسانی و طبیعی یا ALL در تعداد بیشتری از EOF ها، نسبت به نتایج مربوط به Rx1day قابلیت آشکارسازی و نسبت دهی داشته است و فواصل اطمینان ۹۰ درصد ضرایب مقیاس ساز نیز کوتاه تر از نتایج مشابه در Rx1day می باشد (شکل ۲-الف). همچنین نتایج آزمون ثبات باقیمانده ها، ضعف مدل رگرسیون در نتایج بدست آمده را همانند نتایج مربوط به Rx1day نشان می دهد (شکل ۲-ب). اثرات شبیه سازی طبیعی به تنهایی یا سیگنال NAT بر روی تغییرات Rx5day نشان می دهد که همه ضرایب مقیاس ساز شامل صفر هستند و حتی در برخی از آنها، مقادیر و فواصل اطمینان ۹۰ درصد، کمتر از صفر می باشند (شکل ۲-ج). در مورد سیگنال اثرات گازهای گلخانه ای (GHG) بر روی Rx5day، نتایج مشابهی بدست آمده است و تعدادی از ضرایب مقیاس ساز به طور معنا داری از صفر پایین تر هستند (شکل ۲-ه). این مسئله می تواند بنا به دلایل مختلفی باشد. به عنوان مثال برآزش مشاهدات به سیگنال ها با نسبت سیگنال به نویز پایین از طریق مدل حداقل مربعات استاندارد، ممکن است سیگنال ها را منحرف نموده و مقادیر سیگنال نامتعاریفی را تولید نماید (Ribes and Terray, ۲۰۱۳)، علاوه بر این، از نقطه نظر انتخاب مدل رگرسیون، عدم استفاده از پیش گوهایی نظیر اثرات فعالیت های انسانی یا آنتروپوژنیک ANT که به عنوان اجزاء اصلی نیروهای خارجی می باشند می تواند موجب ایجاد خطا در برآزش بر پایه یک سیگنال NAT یا یک سیگنال GHG گردد. آزمون ثبات باقیمانده ها به جز در مواردی که مقادیر بتا کمتر از صفر هستند تایید گردید و نتایج بدست آمده در حد قابل قبول می باشند (شکل ۲-د و شکل ۲-و). نتایج تحقیق حاضر در

رابطه با سیگنال NAT، با یافته‌های ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) هماهنگی دارد. البته سیگنال GHG در مطالعه آنها مورد بررسی قرار نگرفته بود. از نقطه نظر کاربرد توابع متعامد تجربی (EOF)، نتایج آشکارسازی، نسبت به EOF های بدست آمده در این مطالعه، حساسیت نشان می‌دهند. به خصوص در سیگنال‌های GHG و NAT، اختلاف بیشتری دیده می‌شود و حتی در برخی از آنها مقادیر کمتر از صفر ملاحظه گردید. همانگونه که پیشتر اشاره شده بود این مسئله می‌تواند هم به دلیل خطاهای ناشی از مدل اقلیمی و هم مدل رگرسیون باشد. روند های خطی شاخص احتمالاتی PI در سری ۵۵ ساله میانگین پنج ساله غیرمتداخل برای شبیه سازی های پاسخ اقلیم به نیروهای ترکیبی انسانی و طبیعی (ALL) در $Rx\backslash day$ و $Rx\Delta day$ به ترتیب $1/13$ و $1/89$ درصد برآورد گردید. از ضرب نمودن این روندها در ضرایب مقیاس ساز نسبت دهی شده سیگنال ALL، درصد تغییرات روند شاخص احتمالاتی قابل نسبت دهی ALL به ترتیب $1/64\%$ ($3/1 - 0/18$) با احتساب فواصل اطمینان $2/5\%$ ($4-1$) برآورد گردید.

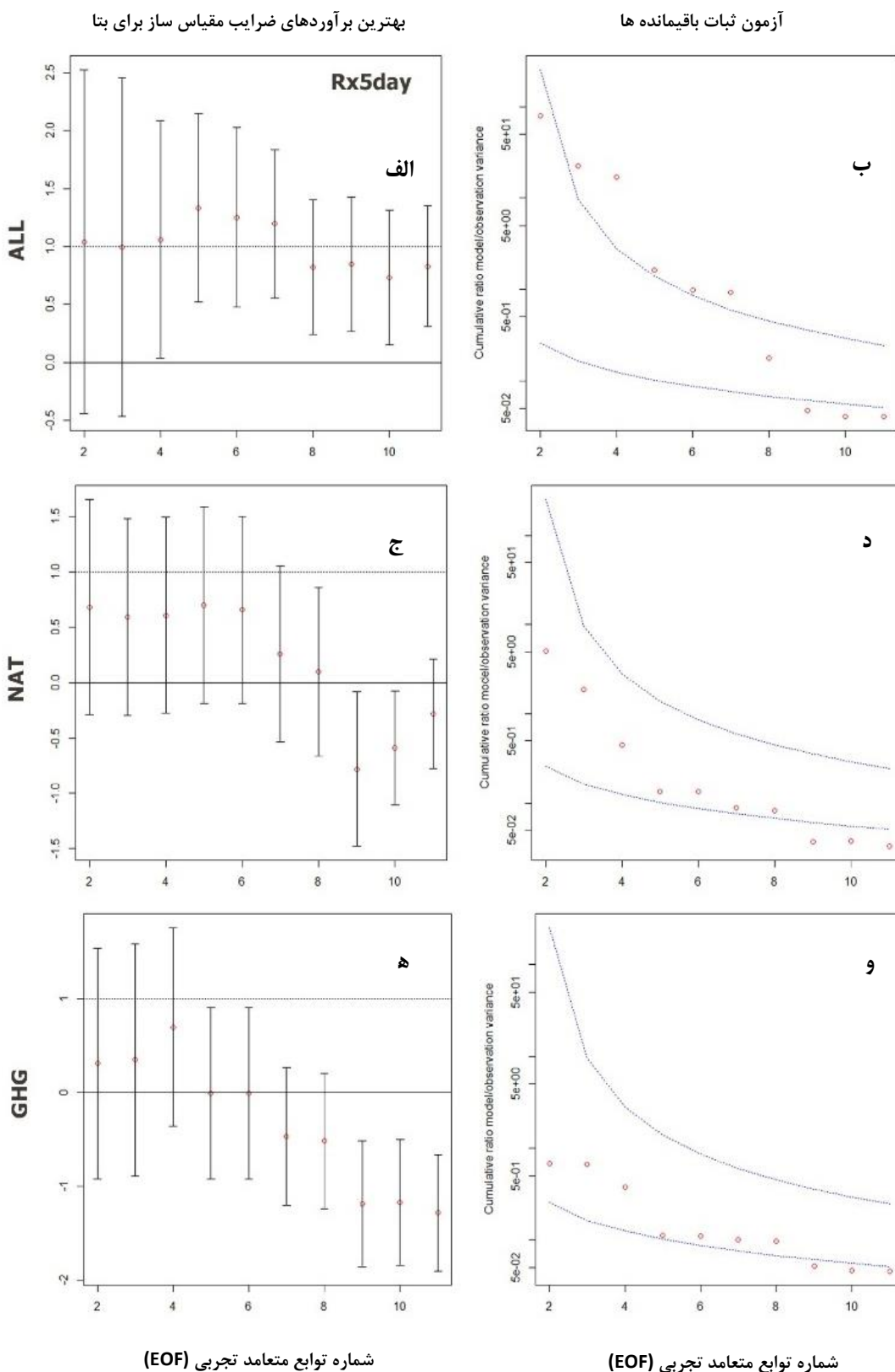
نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی سهم اثرات عوامل انسانی و طبیعی سیستم اقلیم کره زمین بر تغییرات سری زمانی بارش های حداکثر روزانه و حداکثر مجموع بارش پنج روزه در سال در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۱ در منطقه جنوب غرب ایران، با استفاده از روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه پرداخته شد. نتایج بیانگر این است که پاسخ های شبیه سازی مدل NorESM۱-M به اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی (ALL) با تغییرات بارش های $Rx\backslash day$ و $Rx\Delta day$ در جنوب غرب ایران هماهنگی دارند و سیگنال ALL به طور معنا داری، قابل آشکارسازی و نسبت دهی تشخیص داده شد. اما تغییرات مشاهدات مذکور با اثرات جداگانه طبیعی (NAT) هماهنگی نشان نمی دهند و سیگنال NAT قابل آشکارسازی تشخیص داده نشد. همچنین بین تغییرات بارش های حدی منطقه با تغییرات شبیه سازی شده تحت اثرات جداگانه گازهای گلخانه ای (GHG) هماهنگی معنا داری مشاهده نگردید و سیگنال GHG نیز قابل آشکارسازی نبود. با توجه به نتایج بدست آمده، روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه، از کارایی نسبتاً مناسبی در تعیین سهم عوامل انسانی و طبیعی در تغییرات بارشهای منطقه جنوب غرب ایران برخوردار است و به خصوص در مورد اثرات جداگانه طبیعی و اثرات گازهای گلخانه ای، نتایج عدم قطعیت کمتری دارند. همچنین درصد تغییرات قابل نسبت دهی در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت و درصد تغییرات قابل نسبت دهی به سیگنال ALL در شاخص احتمالاتی (PI) مربوط به $Rx\backslash day$ و $Rx\Delta day$ به ترتیب $1/64\%$ ($3/1 - 0/18$) و $2/5\%$ ($4-1$) برآورد گردید. نتایج حاصل از این تحقیق با الگوی کلی بدست آمده در مقیاس جهانی همخوانی دارد. این مسئله تئوری مکانیزم ارتباط بین گرمایش جهانی و افزایش گنجایش رطوبتی اتمسفر و نتیجتاً افزایش شدت بارش های حدی با افزایش درجه حرارت متوسط جهانی را تقویت می کند.



شکل ۱: بهترین ضرایب مقیاس ساز برای سیگنال های ALL, NAT, GHG مربوط به Rx1day

(کادر سمت چپ) و نتایج آزمون ثبات باقیمانده ها (کادر سمت راست)



شکل ۲: بهبودترین ضرایب مقیاس ساز برای سیگنال های ALL, NAT, GHG مربوط به Rx5day

(کادر سمت چپ) و نتایج آزمون ثبات باقیمانده ها (کادر سمت راست)

سپاسگزاری

از حمایت مالی و تخصصی مرکز اقلیم اپک (APEC Climate Center) و همکاری تیم مطالعات تغییر اقلیم مرکز مذکور به خصوص از Dr. Yun Young Lee و Dr. Jaepil Cho سپاسگزاریم. همچنین از Dr. Francis Zwiers از دانشگاه ویکتوریا و Dr. Xuebin Zhang از محیط زیست و تغییر اقلیم کانادا به خاطر اظهار نظرات ریز بینانه و راهنمایی در زمینه متدولوژی به کار رفته، تشکر و قدر دانی می نماییم. از جناب آقای دکتر ایمان باباییان بابت فراهم نمودن بخشی از داده های مورد استفاده و از حمایت های جناب آقای مهندس شمسایی مدیر عامل محترم و سرکار خانم دکتر ظهرایی، مشاور محترم سازمان آب و برق خوزستان، کمال تشکر را داریم.

منابع

- Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J. L. Vazquez-Aguirre. ۲۰۰۶. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal Of Geophysical Research*, ۱۱۱: ۱-۲۲, DOI: ۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۵JD۰۰۶۲۹۰.
- Allen, M. R., and S. F. B. Tett. ۱۹۹۹. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, ۱۵: ۴۱۹-۴۳۴, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲۰۰۵۰۲۹۱.
- Allen, M. R., and W. J. Ingram. ۲۰۰۲. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, ۴۱۹: ۲۲۴-۲۳۲, DOI: ۱۰.۱۰۳۸/nature۰۱۰۹۲.
- Allen, M., P. Stott. ۲۰۰۳. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, Part I: Theory. *Climate Dynamics*, ۲۱: ۴۷۷-۴۹۱, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲۰۰۳-۰۳۱۳-۹.
- Bentsen, M., I. Bethke, J. B. Debernard, T. Iversen, A. Kirkevåg, Ø. Seland, H. Drange, C. Roelandt, I. A. Seierstad, C. Hoose, and J. E. Kristjansson. ۲۰۱۳. The Norwegian Earth System Model, NorESM۱-M - Part ۱: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geosci. Model Dev.*, ۶: ۶۸۷-۷۲۰, DOI: ۱۰.۵۱۹۴/gmd-۶-۶۸۷.
- Donat M. G., L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroel, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, S. Kitching. ۲۰۱۳. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX۲ dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۱۸, ۲۰۹۸-۲۱۱۸, DOI: ۱۰.۱۰۰۲/jgrd.۵۰۱۵۰.
- Groisman, P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl, and V. N. Razuvaev. ۲۰۰۵. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, ۱۸, ۱۳۲۶-۱۳۵۰, DOI: <http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷۵/JCLI۳۳۹۱>.
- Hannart, A., A. Ribes and P. Naveau. ۲۰۱۴. Optimal fingerprinting under multiple sources of uncertainty. *Geophysical Research Letters*, ۴۱, ۱۲۶۱-۱۲۶۸, DOI: ۱۰.۱۰۰۲/۲۰۱۳GL۰۵۸۶۵۳.

- Hasselmann, K. ۱۹۹۳. Optimal fingerprints for the detection of time dependent climate change. *Journal of Climate*, ۶, ۱۹۵۷-۱۹۷۱, DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1957:OFFTDO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1957:OFFTDO>2.0.CO;2)
- Hasselmann, K. ۱۹۷۹. On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies. In: Shaw DB (ed) *Meteorology over the tropical oceans. Royal Meteorological Society*, ۲۵۱-۲۵۹.
- Hasselmann, K. ۱۹۹۷. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics*, ۱۳, ۶۰۱-۶۱۱, DOI: [10.1007/s003820050185](http://dx.doi.org/10.1007/s003820050185).
- Hegerl, G. C., O. Hoegh-Guldberg, G. Casassa, M. P. Hoerling, R. S. Kovats, C. Parmesan, D. W. Pierce, P. A. Stott. ۲۰۱۰. Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. In: Stocker, T. F., C. B. Field, D. Qin, V. Barros, G. K. Plattner, M. Tignor, P. M. Midgley, K. L. Ebi (eds) Meeting report of the intergovernmental panel on climate change expert meeting on detection and attribution of anthropogenic climate change. IPCC Working Group I Technical Support Unit, *University of Bern*, Bern.
- Hegerl, G. C., and F. W. Zwiers. ۲۰۱۱. Use of models in detection and attribution of climate change. *WIREs Climate Change*, ۲, ۵۷۰-۵۹۱, DOI: [10.1002/wcc.121](http://dx.doi.org/10.1002/wcc.121).
- Hegerl, G. C., and G. R. North, ۱۹۹۷. Comparison of statistically optimal approaches to detecting anthropogenic climate change. *Journal of Climate*, ۱۰, ۱۱۲۵-۱۱۳۳, DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1125:COSOAT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1125:COSOAT>2.0.CO;2).
- Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. A. Stott and V. V. Kharin, ۲۰۰۴. Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *Journal of Climate*, ۱۷, ۳۶۸۳-۳۷۰۰, DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3683:DOACIA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3683:DOACIA>2.0.CO;2)
- Min, S. K., X. Zhang, and F. W. Zwiers. ۲۰۰۸. Human-induced Arctic moistening, *Science*, ۳۲۰, ۵۱۸-۵۲۰, DOI: [10.1126/science.1153268](http://dx.doi.org/10.1126/science.1153268).
- Min, S. K., X. Zhang, F. W. Zwiers and G.C. Hegerl. ۲۰۱۱. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, ۴۷۰, ۳۷۸-۳۸۱, DOI: [10.1038/nature09763](http://dx.doi.org/10.1038/nature09763).
- Min, S. K., X. Zhang, F. W. Zwiers, P. Friederichs and A. Hense. ۲۰۰۹. Signal detectability in extreme precipitation changes assessed from twentieth century climate simulations. *Climate Dynamics*, ۳۲, ۹۵-۱۱۱, DOI: [10.1007/s00382-008-0376-8](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0376-8).
- Polson, D., G. Hegerl, X. Zhang, and T. Osborn. ۲۰۱۲. Causes of robust seasonal land precipitation changes. *Journal of Climate*, ۲۶, ۶۶۷۹-۶۶۹۷, DOI: [10.1175/JCLI-D-12-00474.1](http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00474.1).
- Ribes, A., J. M. Azais, and S. Planton. ۲۰۰۹. Adaptation of the optimal fingerprint method for climate change detection using a well-conditioned covariance matrix estimate. *Climate Dynamics*, ۳۳, ۷۰۷-۷۲۲, DOI: [10.1007/s00382-009-0561-4](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0561-4).
- Ribes, A., F. W. Zwiers, J. M. Azais, and P. Naveau. ۲۰۱۶. A new statistical approach to climate change detection and attribution. *Climate Dynamics*, ۱-۲۰, DOI: [10.1007/s00382-016-3079-6](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-016-3079-6).
- Ribes, A., and L. Terray. ۲۰۱۳. Application of regularised optimal fingerprinting to attribution. Part II: Application to global near-surface temperature. *Climate Dynamics*, ۴۱, ۲۸۳۷-۲۸۵۳, DOI: [10.1007/s00382-013-1736-6](http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1736-6).

- Ribes, A., L. Terray, and S. Planton. ۲۰۱۳. Application of regularized optimal fingerprinting to attribution. Part I: method, properties and idealised analysis. *Climate Dynamics*, ۴۱, ۲۸۱۷–۲۸۳۶, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۳-۱۷۳۵-۷.
- Santer, B. D., C. Mears, F. J. Wentz, K. E. Taylor, P. J. Gleckler, T. M. L. Wigley, T. P. Barnett, J. S. Boyle, W. Brüggemann, N. P. Gillett, S. A. Klein, G. A. Meehl, T. Nozawa, D. W. Pierce, P. A. Stott, W. M. Washington, and M. F. Wehner. ۲۰۰۷. Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ۱۰۴, ۲۴۸–۱۵, ۲۵۳, DOI: ۱۰.۱۰۷۳/pnas.۰۷۰۲۸۷۲۱۰۴.
- Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (Eds.) ۲۰۱۳. Climate change ۲۰۱۳: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Wan, H., X. Zhang, F. W. Zwiers and S. K. Min, ۲۰۱۴. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period ۱۹۶۶–۲۰۰۵ to human influence. *Climate Dynamics*, ۴۷, ۱۷۱۳–۱۷۲۶, DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۴-۲۴۲۳-y.
- Westra, S., L. V. Alexander, and F. W. Zwiers. ۲۰۱۳. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, ۲۶, ۳۹۰۴–۳۹۱۸, DOI: ۱۰.۱۱۷۵/JCLI-D-۱۲-۰۰۵۰۲.۱.
- Willett, K. M., N. P. Gillett, P. D. Jones, and P. W. Thorne. ۲۰۰۷. Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, ۴۴۹, ۷۱۰–۷۱۲, DOI: ۱۰.۱۰۳۸/nature۰۶۲۰۷.
- Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi and A. Kitoh. ۲۰۱۲. APHRODITE: Constructing a Long-term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia based on a Dense Network of Rain Gauges. *Bulletin of American Meteorological Society*, ۹۳, ۱۴۰۱–۱۴۱۵, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>.
- Zhang, X., H. Wan, F. W. Zwiers, G. C. Hegerl and S. K. Min. ۲۰۱۳. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophysical Research Letters*, ۴۰, ۵۲۵۲–۵۲۵۷, DOI: ۱۰.۱۰۰۲/grl.۵۱۰۱۰.
- Zhang, X., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. Stott, and T. Nozawa. ۲۰۰۷. Detection of human influence on ۲۰th century precipitation trends. *Nature*, ۴۴۸, ۴۶۱–۴۶۵, DOI: ۱۰.۱۰۳۸/nature۰۶۰۲۵.

