نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۳، پاییز۱۳۹۵
صفحات ۸۰- ٦٥

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[1] ، 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.

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۵/۲۶

چکیده

هدف از این تحقیق ، تعیین سهم اثرات محرّکهای مختلف تغییر اقلیم بر تغییرات بارش های حدّی جنوب غرب ایران می باشد. محدوده مورد مطالعه شامل حوضه های آبریز مهمی چون حوضه های کارون بزرگ ، زهره و جراحی و کرخه می باشد. شاخص های حداکثر بارش سالانه و حداکثر مجموع بارش پنج روزه در سال ،طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۱ با استفاده از پایگاه داده های بارش روزانه افرودیت(APHRODITE) به عنوان مشاهدات و شبیه سازی های مدل NorESM۱-M ، تهیه و بررسی شدند . با استفاده از رویکرد بزرگ مقیاس نمایی و با استفاده از روش نزدیکترین همسایگی ، میانگین سلول منطقه ی مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۲ درجه ی شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ شمالی محاسبه گردید . سهم محرک های خارجی پدیده تغییر اقلیم شامل اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی (ALL) ، اثرات جداگانه طبیعی (NAT) و اثرات جداگانه گازهای گلخانه ای (GHG) بر تغییرات بارش های 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 می دهند که سهم سیگنال (ALL) در تغییرات بارش های حدی جنوب غرب ایران طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۱ قابل آشکارسازی و نسبت دهی هستند . اما هیچ گونه آشکارسازی برای اثرات جداگانه طبیعی (NAT) و اثرا جداگانه گازهای گلخانه ای (GHG) تایید نگردید. درصد تغییرات روند قابل نسبت دهی به اثرات ترکیبی انسانی و طبیعی برای Rx۱day و Rx۵day 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، بارش های حدی ، جنوب غرب ایران

[1]. نویسنده مسئول

Email: tofigh_sadi@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

مقدمه

فشار بخار اشباع اتمسفر[۱]، با افزایش دما بر اساس رابطه ترمودینامیک کلازیوس – کلاپیرون[۲] افزایش می یابد. از آنجا که انتظار نمی رود رطوبت نسبی ، تغییر چندانی داشته باشد لذا گرمایش جهانی کره زمین ، می تواند موجب افزایش حجم گنجایش رطوبت اتمسفر گردد. به تبع آن، به دلیل اینکه بارشهای حدی به طور عمده به در دسترس بودن رطوبت وابسته می باشند بنابراین بارشهای حدی افزایش خواهند داشت (Allen and Ingram,۲۰۰۲). شواهد نشان می دهد 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.,۲۰۰۸; Zhang et al.,۲۰۰۷; Polson et al., ۲۰۱۳). همچنین مشاهدات نشان می دهد که بارش های 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 فعالیت های انسانی باشد. وسترا و همکاران (Westra et al.,۲۰۱۳)نشان دادند که افزایش مشاهده شده در بارش حداکثر سالانه[۳] (Rx۱day) به ازای هر افزایش دمای سطح ، نرخی معادل ۵.۹ درصد بر درجه کلوین تا ۷.۷ درصد بر درجه کلوین افزایش می یابد.این نتیجه به تخمینی که از رابطه کلوزیوس–کلاپیترون بدست می آید (۷درصد بر درجه کلوین)نزدیک می باشد.

تعیین سهم تغییر اقلیم بر پدیده های مختلف که به نمونه هایی از آنها اشاره گردید در شاخه ای از علم تغییر اقلیم تحت عنوان آشکارسازی و نسبت دهی مطالعه می گردد. آشکارسازی یک تغییر، به عنوان فرآیندی تعریف می شود که در آن اقلیم یا یک سیستم تحت تأثیر اقلیم، به گونه ای تغییر می کند 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 می شود(Hegerl et al.,۲۰۱۰). همانطور که از عبارت پیداست، نسبت دهی ، پیچیده تر از آشکارسازی است که این امر به دلیل ترکیب تحلیل های آماری به همراه فهم فیزیکی است(Hegerl and Zwiers, ۲۰۱۱) .

روش انگشت نگاشت بهینه[۴] ، بهترین و گسترده ترین 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 می گردد که به مثابه اثر انگشت یا میزان دخالت یک عامل خاص در تغییرات تلقی می شود. 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 می گردد. مطالعات کمی ، آشکارسازی و نسبت دهی بارش های حدی را بررسی نموده اند و اکثر این مطالعات در مقیاس بزرگ و جهانی انجام شده اند. ماین و همکاران(Min et al.,۲۰۱۱) با استفاده از روش انگشت نگاشت بهینه ، شدّت بارش های حدی را در ارتباط با اثرات فعالیت های انسانی مورد بررسی قرار دادند . آنها از شبیه سازی های مجموعه مدلهای فاز سوّم پروژه قیاسی مدل جفت شده[۶] (CMIP۳) و داده های 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 قوّت 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، بارش‌های شدید در مناطق غرب و جنوب‌غربی کشور،باعث جریان سیلاب در رودخانه‌های استان‌های ایلام، لرستان و خوزستان گردید؛ اوج این بارش‌ها در حوضه کارون بزرگ و سد دز بود که باعث جاری شدن سیلابی با شدت ۸ هزار مترمکعب در ثانیه گردید که در سال‌های اخیر بی‌سابقه 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

پدیده مذکور را بر تغییرات بارشهای حدی در دوره های گذشته مورد بررسی قرار دهد. ساختار ارائه مطالب این مقاله بدین ترتیب می باشد که توضیحات مربوط به داده ها ،مراحل پردازش آنها و روش انگشت نگاشت بهینه استاندارد ، در بخش داده ها و روش کار ارائه شده است. یافته های بررسی میزان نقش سیگنالهای مختلف در منطقه و تحلیل آنها در بخش شرح و تفسیر نتایج و در پایان به نتیجه گیری پرداخته شده است.

داده ها و روش کار

مطالعات آشکارسازی و نسبت دهی نیازمند داده های مشاهدات ، شبیه سازی های سیگنالها و شبیه سازی های اجرای کنترل می باشند. شبیه سازی های اجرای کنترل برای تخمین تغییر پذیری درونی[۱] اقلیم و همچنین تهیه نمونه نویز برای آزمون عدم قطعیت مورد استفاده قرار می گیرد. در پژوهش حاضر برای تهیه سری زمانی شاخص های بارش حدی شامل حداکثر بارش سالانه (Rx۱day) و حداکثر بارش پنج روزه در سال[۲] (Rx۵day) از پایگاه داده های شبکه ای روزانه افرودیت[۳] در مقیاس ۲۵ کیلومتر در ۲۵ کیلومتر به عنوان داده های مشاهدات برای بارش استفاده گردید. این پایگاه توسط مؤسسه تحقیقات هواشناسی سازمان هواشناسی کشور ژاپن[۴] و مؤسسه پژوهشی بشر و طبیعت در سال۲۰۰۶ بنا و پایه گذاری شده است. هدف این پایگاه داده ایجاد یک پایگاه داده روزانه بارش برای آسیا با تفکیک مکانی بالاست. داده های افرودیت با هدف ارتقاء کیفیت داده های مشاهداتی مورد نیاز مطالعات اقلیمی و هیدرولوژی ، بر اساس داده های مشاهداتی ۱۲۰۰۰-۵۰۰۰ ایستگاه زمینی در گستره اوراسیا، ژاپن، خاورمیانه و مونسون آسیا تهیه شده است. بررسی وضعیت توزیع ایستگاه های مشاهداتی محدوده مورد نظر تحقیق حاضر در داده های افرودیت نشان می دهد 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 قاره ای است.

برای محاسبه تغییر پذیری درونی اقلیم منطقه و شبیه سازی پاسخ های اقلیم به محرک های مختلف پدیده تغییر اقلیم ، از مدل نروژی سیستم زمین NorESM۱-M[۵] از سری مدلهای CMIP۵[۶] استفاده گردید. مدل مذکور از خانواده نسخه چهارم مدل سیستم جامع اقلیم[۷] (CCSM۴) که محصول مشارکت دانشگاه برای پژوهش های اتمسفری[۸] است می باشد ، اما در هسته پیشرفته مدل اقیانوسی و اندرکنش تشعشع–ابر– آئروسل– 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 می باشد(Bentsen et al.,۲۰۱۳). معیار انتخاب مدل در این پژوهش ، نتایج منتشر شده در پنجمین گزارش ارزیابی تغییر اقلیم[۹] برای ارزیابی مدل ها می باشد. 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 ٤
[۸] The University Corporation for Atmospheric Research
[۹] Fifth Assessment Report(AR۵)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

و همکاران(Sillmann et al. ۲۰۱۲) در رابطه با ارزیابی مدلهای CMIP۵ برای شاخص های مختلف بارش و دما می باشند مدل NorESM۱-M برای مطالعه بارش های حدی Rx۱day و Rx۵day از کارایی مناسب تری نسبت به سایر مدل ها برخوردار است. پاسخ ها[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 گلخانه ای[۵](GHG) ای[۵] (GHG) می باشند.این شبیه سازی های مربوط به دوره ۲۰۰۵-۱۸۵۰ می باشند و در این تحقیق با توجه به دوره آماری داده های مشاهداتی ، سری های زمانی ۲۰۰۵-۱۹۵۱، شبیه سازی های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. شبیه سازی های فوق به ترتیب سیگنال ALL ، سیگنال NAT و سیگنال GHG خوانده می شوند . منظور از سیگنال ALL ، شبیه سازی های پاسخ به کلیه اثرات می باشند ؛ به عبارت دیگر مربوط به شرایط جهان واقعی است . در واقع داده های این شبیه سازی ، معادل داده های مشاهداتی می باشند به همین دلیل در برخی از مطالعات اقلیمی ، می توان این نوع داده ها را بر اساس داده های ایستگاه ها (مشاهدات) ریز مقیاس نمود. سیگنال NAT ، شبیه سازی مربوط به اثرات طبیعی می باشد . به عنوان مثال رفتار بارش را فقط تحت اثرات فعالیتهای خورشیدی و آتشفشانی نشان می دهد. سیگنال GHG نیز فقط شامل اثرات گازهای گلخانه ای است و در مورد بارش ، فقط شبیه سازی های بارش تحت اثرات گازهای گلخانه ای را ارائه می نماید. علاوه بر داده های فوق ، در این تحقیق ، داده های شبیه سازی بارش روزانه پانصد ساله پیش از انقلاب صنعتی[۶] ، برای برآورد تغییر پذیری درونی اقلیم منطقه به کار گرفته شدند . این شبیه سازی ها ، رفتار متغیرها (نظیر بارش) در شرایط بدون اثرات گازهای گلخانه ای و دخالت بشر می باشند ؛ به عبارت دیگر در مدلسازی آنها ، شرایط کره زمین ، از زمان پیش از انقلاب صنعتی ، ثابت و بدون تغییر نگه داشته می شود و سری های زمانی ۵۰۰ ساله ، بدون اضافه شدن هیچگونه اثر انسانی شبیه سازی می شوند به همین دلیل به این نوع شبیه سازی ها ، اجرای کنترل[۷] نیز گفته می شود. در روش انگشت نگاشت بهینه ، از این داده ها علاوه بر تخمین تخمین تغییر پذیری درونی اقلیم ، برای تهیه نمونه نویز مستقل دیگری جهت استفاده در آزمون عدم قطعیت ، استفاده گردید.

بزرگی مقادیر بارش از یک ناحیه به ناحیه دیگر ، بسیار تغییر پذیر است. از این رو ، تنوع پذیری زمانی میانگین های مکانی بارش های حدی مشاهداتی ، تحت تأثیر تنوع پذیری نواحی با مقادیر بزرگ بارش قرار می گیرند. علاوه بر این ، تغییر در موجودیت داده ها در زمان ممکن است موجب ناهمگنی در سری زمانی مربوط به میانگین های مکانی گردد(Wan et al.,۲۰۱۴). به عبارتی نسبت سیگنال به نویز در بارش های حدی پایین است و بزرگ مقیاس نمایی یا میانگین گیری بزرگ منطقه ای شاخص های بارش های حدی (به عنوان مثال :وسترا و همکاران Westra et al.,۲۰۱۳))می تواند نویز را کاهش داده و احتمال آشکارسازی پاسخ ها 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 ریز مقیاس

[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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 ، ۵×۵ 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 ، ۴×۴ درجه تعیین گردید. لذا کلیه سری های زمانی Rx۱day و Rx۵day 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[۵] 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 :

$$F\left(x,\mu,\sigma,\xi\right)=\begin{cases}\exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}\right] & , \quad \xi=۰\\ \exp\left[-\left\{۱+\xi\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}^{-\xi^{-۱}}\right], & \xi\neq ۰ \quad ۱+\xi\frac{x-\mu}{\sigma}>۰.\end{cases} \qquad (۱)$$

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 Stott,۲۰۰۳;Allen and Tott,۱۹۹۹). 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 :

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

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) ،رایبس و همکاران (Ribes et al. ۲۰۰۹ ;۲۰۱۳;۲۰۱۶) و هانارت و همکاران(Hannart et al.,۲۰۱٤) 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:

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

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:

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

که $\boldsymbol{\varepsilon}$ 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 ($C_N \neq 6\ I$)، 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:

$$\mathcal{E}(Pvv^TP^T) = I_k\,, \qquad (۵)$$

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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 :

$$r^{۲}(\tilde{\beta}) \equiv (PX\tilde{\beta} - Py)^T(PX\tilde{\beta} - Py) \equiv \tilde{v}^T P^T P\tilde{v} \qquad (۶)$$

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

$$\tilde{\beta} = (X^T P^T PX)^{-۱} X^T P^T Py \equiv F^T y\,, \qquad (۷)$$

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 آزمودن اینکه 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 Stott,۲۰۰۳;Allen and Tott,۱۹۹۹). 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 شکل۱ (الف) ، نتایج مربوط به بررسی سهم اثرات کل عوامل خارجی انسانی و طبیعی یا اصطلاحاً سیگنال ALL بر روی تغییرات سری زمانی ۵۵ ساله Rx۱day ، نشان داده شده است. مقایسه بهترین نتایج قابل برآورد که به کمک اجرای توابع متعامد تجربی(EOF) در برازش داده های مشاهداتی افرودیت 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 Rx۱day 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 Rx۱day ، 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 مدلهای CMIP۳ استفاده کرده بودند تفاوت دارد امّا با یافته های ژانگ و همکاران(Zhang et al., ۲۰۱۳) که مدلهای مجموعه فاز پنجم پروژه مدل جفت شده (CMIP۵) ، را به کار برده بودند ، هماهنگی وجود دارد. اما در بین همان نتایج (شکل۱- 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 ۹۵-۵ 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 Rx۱day 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(شکل۱- 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 Rx۱day ، 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 تجمعی پنج روزه در سال(Rx۵day) ، 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 Rx۱day قابلیت آشکارسازی و نسبت دهی داشته است و فواصل اطمینان ۹۰ درصد ضرایب مقیاس ساز نیز کوتاه تر از نتایج مشابه در Rx۱day می باشد(شکل ۲- الف). همچنین نتایج آزمون ثبات باقیمانده ها ، ضعف مدل رگرسیون در نتایج بدست آمده را همانند نتایج مربوط به Rx۱day نشان می دهد(شکل ۲- ب). اثرات شبیه سازی طبیعی به تنهایی یا سیگنالNAT بر روی تغییرات Rx۵day 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 Rx۵day ، 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 برازش 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 نامتعارفی 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 برازش 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

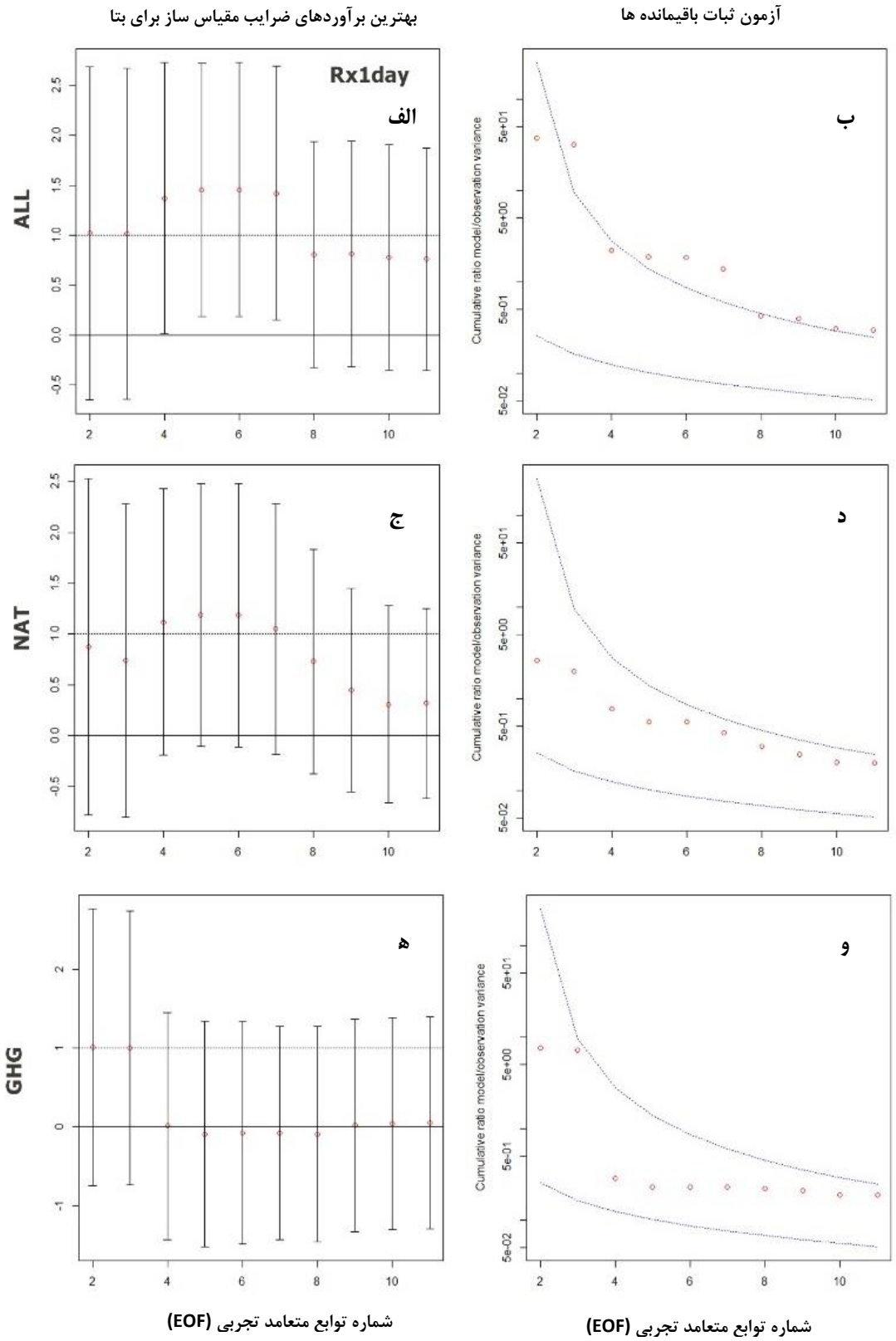
رابطه با سیگنال NAT ، با یافته های ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) هماهنگی دارد . البته سیگنال GHG در مطالعه آنها مورد بررسی قرار نگرفته بود. از نقطه نظر کاربرد توابع متعامد تجربی (EOF) ، نتایج آشکارسازی، نسبت به EOF های بدست آمده در این مطالعه، حساسیت نشان می دهند. به خصوص در سیگنال های GHG و NAT ، اختلاف بیشتری دیده می شود و حتی در برخی از آنها مقادیر کمتر از صفر ملاحظه گردید.همانگونه که پیشتر اشاره شده بود این مسئله می تواند 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 Rx۱day و Rx۵day به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۸۹ 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 ۱/۶۴٪ (۳/۱ – ۰/۱۸ با احتساب فواصل اطمینان) و ۲/۵ ٪ (۴-۱) 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 آماری۲۰۰۵ -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 Rx۱day و Rx۵day 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 Rx۱day وRx۵day به ترتیب ۱/۶۴٪ (۳/۱ – ۰/۱۸) و ۲/۵ ٪ (۴-۱) 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

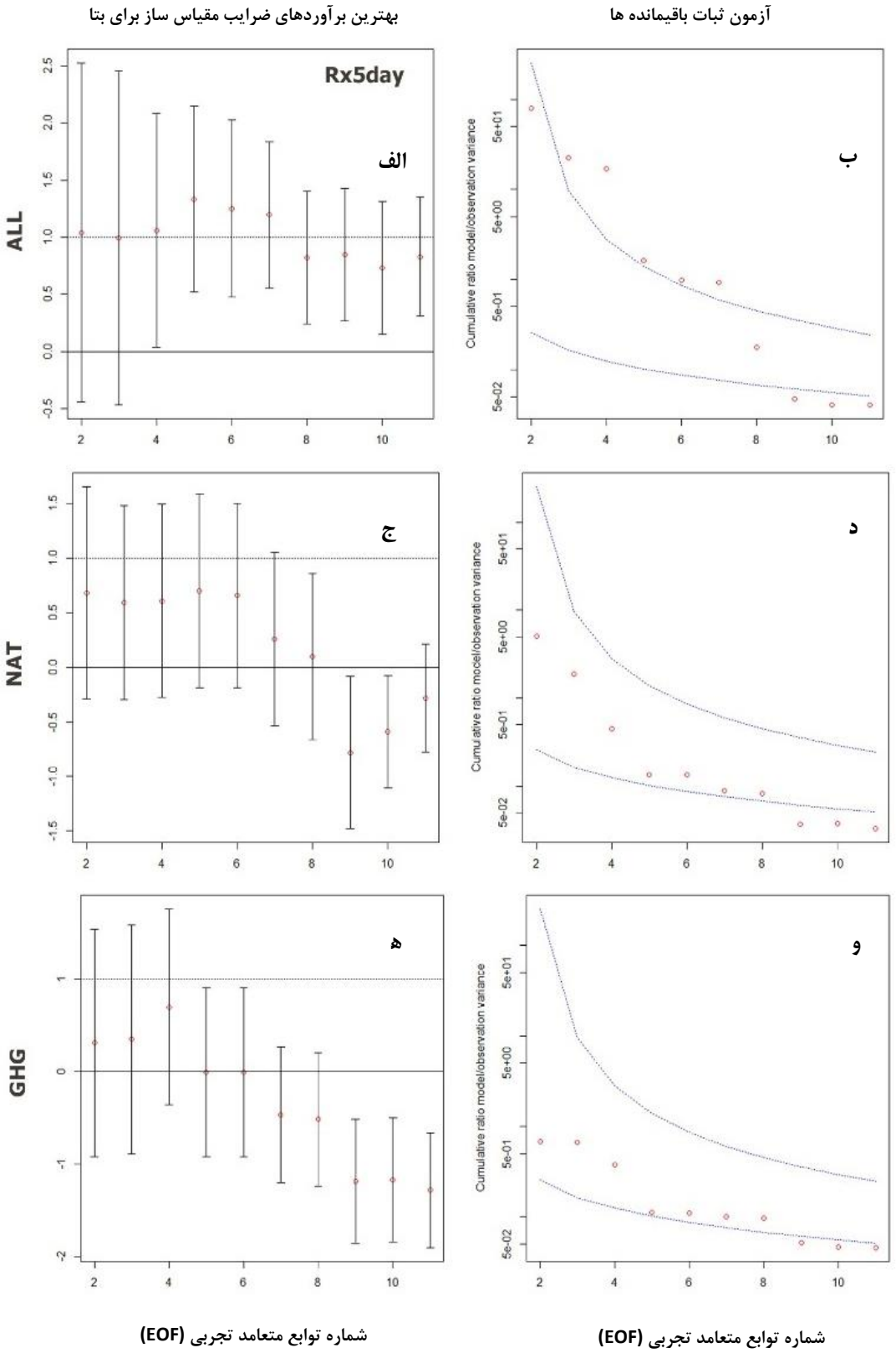


شکل ۱ : بهترین ضرایب مقیاس ساز برای سیگنال های ALL,NAT,GHG مربوط به Rx1day

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]



شکل ۲: بهترین ضرایب مقیاس ساز برای سیگنال های ALL,NAT,GHG مربوط به Rx۱day

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

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 حمایتهای جناب آقای مهندس شمسایی مدیر عامل محترم و سرکار خانم دکتر ظهرابی ، 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**:٤۱۹–٤۳٤, **DOI**: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲۰۰۰۰۲۹۱۰.

Allen, M. R., and W. J. Ingram.۲۰۰۲. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, **٤۱۹**: ۲۲٤–۲۳۲, **DOI**: ۱۰.۱۰۳۸/nature۰۱۰۹۲.

Allen, M., P. Stott. ۲۰۰۳. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, Part I: Theory. *Climate Dynamics*, ۲۱:٤۷۷–٤۹۱, **DOI**: ۱۰.۱۰۰۷/ s۰۰۳۸۲-۰۰۳-۰۳۱۳-۹.

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.*, ٦:٦۸۷-۷۲۰, **DOI**:۱۰.٥۱۹٤/gmd-٦-٦۸۷.

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.٥۰۱٥۰.

Groisman, P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl, and V. N. Razuvaev .۲۰۰٥. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, ۱۸, ۱۳۲٦–۱۳٥۰, **DOI**: http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷٥/JCLI۳۳۳۹.۱.

Hannart, A. , A. Ribes and P. Naveau.۲۰۱٤. Optimal fingerprinting under multiple sources of uncertainty . *Geophysical Research Letters*, ٤۱, ۱۲٦۱–۱۲٦۸, **DOI**: ۱۰.۱۰۰۲/۲۰۱۳GL۰٥۸٦٥۳.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

Hasselmann , K. ۱۹۹۳. Optimal fingerprints for the detection of time dependent climate change. *Journal of Climate*,٦,۱۹۵۷–۱۹۷۱,**DOI**:http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷۵/۱۵۲۰-۰٤٤۲(۱۹۹۳)۰۰٦<۱۹۵۷:OFFTDO>۲.۰.CO;۲

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, ٦۰۱-٦۱۱, **DOI**: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲۰۰۵۰۱۸۵.

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**: ۱۰.۱۰۰۲/wcc.۱۲۱.

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/۱۰.۱۱۷۵/۱۵۲۰-۰٤٤۲(۱۹۹۷)۰۱۰<۱۱۲۵:COSOAT>۲.۰.CO;۲.

Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. A. Stott and V. V. Kharin, ۲۰۰٤. Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *Journal of Climate*, ۱۷, ۳٦۸۳–۳۷۰۰, **DOI**: http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷۵/۱۵۲۰-۰٤٤۲(۲۰۰٤)۰۱۷<۳٦۸۳:DOACIA>۲.۰.CO;۲

Min, S. K., X. Zhang, and F. W. Zwiers .۲۰۰۸. Human-induced Arctic moistening, *Science*, ۳۲۰, ۵۱۸–۵۲۰, **DOI**: ۱۰.۱۱۲٦/science.۱۱۵۳٤٦۸.

Min, S. K., X. Zhang, F. W. Zwiers and G.C. Hegerl . ۲۰۱۱. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, ٤۷۰,۳۷۸-۳۸۱, **DOI**:۱۰.۱۰۳۸/nature۰۹۷٦۳.

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:** ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۰۸-۰۳۷٦-۸.

Polson, D., G. Hegerl, X. Zhang, and T. Osborn .۲۰۱۳. Causes of robust seasonal land precipitation changes. *Journal of Climate*, ۲٦, ٦٦۷۹–٦٦۹۷, **DOI**:۱۰.۱۱۷۵/JCLI-D-۱۲-۰۰٤۷٤.۱.

Ribes, A., J. M. Azaı¨s, 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**:۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۰۹-۰۵٦۱-٤.

Ribes, A.,F. W. Zwiers, J. M. Azaïs, and P. Naveau .۲۰۱٦. A new statistical approach to climate change detection and attribution . *Climate Dynamics*,۱-۲۰,**DOI**: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱٦-۳۰۷۹-٦

Ribes, A.,and L. Terray. ۲۰۱۳. Application of regularised optimal fingerprinting to attribution. Part II: Application to global near-surface temperature. *Climate Dynamics*, ٤۱,۲۸۳۷–۲۸۵۳, **DOI**:۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۳-۱۷۳٦-٦.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

Ribes, A., L. Terray,and S. Planton .۲۰۱۳.Application of regularized optimal fingerprinting to attribution. Part I: method, properties and idealised analysis. *Climate Dynamics*, **٤١**, ۲۸۱۷–۲۸۳٦, **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*, **۱۰٤**, ۲٤۸–۱٥,۲٥۳, **DOI**:۱۰.۱۰۷۳/pnas.۰۷۰۲۸۷۲۱۰٤.

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, ۲۰۱٤. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period ۱۹٦٦–۲۰۰٥ to human influence. *Climate Dynamics*, **٤۷**, ۱۷۱۳–۱۷۲٦, **DOI**: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱٤-۲٤۲۳-y.

Westra, S., L. V. Alexander, and F. W. Zwiers .۲۰۱۳. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, **۲٦**, ۳۹۰٤–۳۹۱۸, **DOI**:۱۰.۱۱۷٥/JCLI-D-۱۲-۰۰٥۰۲.۱.

Willett, K. M., N. P. Gillett, P. D. Jones, and P.W. Thorne .۲۰۰۷. Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, **٤٤۹**, ۷۱۰–۷۱۲, **DOI**:۱۰.۱۰۳۸/nature۰٦۲۰۷.

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**, ۱٤۰۱–۱٤۱٥,**DOI**: http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷٥/BAMS-D-۱۱-۰۰۱۲۲.۱.

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*,**٤۰**, ٥۲٥۲–٥۲٥۷, **DOI**:۱۰.۱۰۰۲/grl.٥۱۰۱۰.

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*, ٤٤۸, ٤٦۱–٤٦٥, **DOI**:۱۰.۱۰۳۸/nature۰٦۰۲٥.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65]