نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
صفحات ۹۳ – ۱۱۰

آشکارسازی تغییر نوسانات فصلی متغیرهای اقلیمی و نسبت‌دهی به تغییر اقلیم محدوده مطالعاتی: دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی

عرفان ناصری؛ دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران (پردیس ابوریحان).
علیرضا مساح بوانی[1]؛ دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران (پردیس ابوریحان).
توفیق سعدی؛ دکترای اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی،، شرکت آب منطقه‌ای البرز.

دریافت مقاله : ۱۳۹۸/۱۲/۰۳ پذیرش نهایی:۱۳۹۹/۰۳/۰۱

چکیده

یکی از چالش‌های اصلی پیش روی بشر، بحث گرمایش جهانی و اثرات تغییر اقلیم می‌باشد. در این تحقیق سعی شده تا با بررسی روند متغیرهای اقلیمی مشاهداتی مختلف شامل بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل طی فصول مختلف در محدوده دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی (استان تهران و البرز) علاوه بر اثبات تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی، میزان دخالت هر یک از واداشت-های عمده از جمله گازهای گلخانه‌ای تعیین گردد. در این راستا با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، داده‌های مشاهداتی سه ایستگاه همدیدی آبعلی، مهرآباد و کرج به صورت پهنه‌ای تبدیل شد و با میانگین‌گیری غیرمتداخل سه ساله و محاسبه مقادیر استاندارد متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی عوامل مرکب (ALL)، عوامل طبیعی (NAT)، گازهای گلخانه‌ای (GHG) و اجراهای کنترل پیش از انقلاب صنعتی ارکان مورد نیاز آشکارسازی و نسبت‌دهی فراهم شد. با کاهش حجم داده‌های حاصل از اجراهای کنترلی به وسیله توابع غیرمتعامد تجربی (EOF) و استفاده از روش انگشت نگاشت بهینه و آزمون ثبات باقیمانده‌ها، تأثیر هر یک از سیگنال‌های مذکور بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل شده، برای هر سه متغیر بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل به ترتیب طی فصول زمستان، تابستان و بهار سیگنال ALL، آشکارسازی و نسبت‌دهی گردید. به علاوه برای دمای حداقل بهاره سیگنال GHG در تغییرات دما نقش مؤثری دارد. بدین ترتیب بالاترین ضرایب مقیاس‌ساز (β) تحت واداشت‌های مرکب ALL به ترتیب مربوط به میانگین غیرمتداخل سه ساله بارش‌های زمستانه (۰/۸۸)، میانگین دمای حداقل بهاره (۰/۷۸) و میانگین دمای حداکثر تابستانه (۰/۷۶) می‌باشد. و ضریب مقیاس‌ساز گازهای گلخانه‌ای که فقط برای میانگین دمای حداقل بهاره آشکارسازی و نسبت‌دهی گردید (۰/۷۳) می‌باشد.

واژه های کلیدی: تغییر اقلیم، آشکارسازی، نسبت‌دهی، انگشت نگاشت بهینه، دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی

[1] . نویسنده مسئول: Email:armassah@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

مقدمه

بر اساس مطالعات صورت گرفته در سطح جهان شواهد محکمی مبنی بر تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی، چرخه هیدرولوژی و منابع آب وجود دارد. تغییر درازمدت متغیرهای اقلیمی می‌تواند نقش مهمی در سیستم‌های زیستی و انسانی یک منطقه داشته باشد. زیرا تغییر در چرخه هیدرولوژی از یکسو می‌تواند منجر به وقوع سیل یا خشکسالی شود و اکوسیستم‌های وابسته را دچار دگرگونی کند و از سوی دیگر حافظه اقلیمی کره زمین را دستخوش تغییرات سازد (Ganopolski & Calov, ۲۰۱۱ ; Stocker et al.,۲۰۱۳). لذا به منظور بررسی و ارزیابی این تغییرات ابزار و روش‌های مختلفی برای مدلسازی جو کره زمین و مسائل مرتبط با آن توسعه یافتند، مانند مدل‌های اقلیمی جوی و مدل‌های هیدرولوژیکی. این ابزار و مدل‌ها باعث درک بهتر از پاسخ‌های سیستم کره زمین به واداشت‌های گوناگون داخلی و خارجی طی دوره‌های چند صد ساله می‌گردد (Velasquez et al., ۲۰۱۹). آشکارسازی و نسبت‌دهی تغییر اقلیم ابزار رسمی برای فهم دلایل پیچیده این موضوع است (Mondal & Mujumdar, ۲۰۱۲). بهترین روش آشکارسازی این تغییرات و شناخت عوامل مؤثر در آن روش انگشت نگاشت بهینه می‌باشد (Ribes et al., ۲۰۱۳).

"آشکارسازی" فرآیندی است که بدون آوردن دلیل برای تغییرات، تغییرات اقلیم یا سامانه متأثر از تغییر اقلیم را به وسیله برخی از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد، در حالی که "نسبت‌دهی" به فرآیندی گفته می‌شود که سهم مؤثر ناشی از چندین دلیل را برای یک تغییر یا رویداد با سطوح معنی‌داری مختلف آماری ارزیابی می‌کند (IPCC-AR۵ ،۲۰۱۳). با توجه به ترکیب تحلیل‌های مختلف آماری و در نظر گرفتن مبانی فیزیکی مسأله، فرآیند نسبت‌دهی دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به آشکارسازی است (Hegerl & Zwiers, ۲۰۱۱).

تاکنون اثرات انسانی بر وجوه مختلف چرخه جهانی آب آشکارسازی شده است. این اثرات در الگوهای بارش سالانه و فصلی خشکی‌ها و اقیانوس‌ها قابل آشکارسازی است. (Marvel & Bonfils, ۲۰۱۳). در این زمینه مطالعات مختلفی در سطح جهان صورت گرفته است ولی تنها تعداد معدودی در خصوص بررسی آشکارسازی و بررسی تغییر اقلیم در سطح حوضه‌ای و منطقه‌ای انجام شده و بیشتر تحقیقات صورت گرفته در مقیاس‌های بزرگ جهانی یا قاره‌ای است (سعدی و همکاران، ۱۳۹۵). در ادامه به برخی از مطالعات مشابه در جهان و ایران اشاره می‌شود.

وان و همکاران (Wan et al., ۲۰۱۴)، با بررسی دوره (۲۰۰۵-۱۹۶۶) به روش انگشت نگاشت بهینه دریافتند که اثرات تغییر اقلیم بر عرض‌های بالایی کره زمین (۵۰ درجه شمالی) قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی است. آنها با استفاده از پاسخ شبیه‌سازی مدل‌های مختلف از آرشیو CMIP۵ به این نتیجه رسیدند که هرچند قطع به یقین تغییر اقلیم بر روی بارش سالانه مؤثر بوده است ولی نمی‌توان به تنهایی آن را به سیگنال‌های طبیعی (NAT) یا سیگنال‌های گازهای گلخانه‌ای (GHG) نسبت‌دهی نمود. در تحقیقی دیگر پنگ و همکاران (Peng etal., ۲۰۱۹)، با استفاده از روش انگشت نگاشت بهینه دمای میانگین سالانه را بر پهنه آسیای مرکزی بررسی نمودند و دریافتند از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵، به دمای متوسط به میزان ۱/۳۳ درجه سلسیوس افزایش یافته که ۰/۹ درجه آن مربوط به تابستان، ۱/۲۲ درجه در پاییز، ۲/۴۸ درجه در زمستان افزایش داشته است. و اثرات انسانی از طریق سیگنال گازهای گلخانه‌ای (GHG) اثر معنی‌داری بر روند گرمایش فصلی و سالانه داشته است. به طوری که باعث افزایش دمای ۱/۲۵ درجه‌ای در میانگین دراز مدت گردیده است. همچنین دوآن و همکاران (Duan etal., ۲۰۱۹) با بررسی فصلی دما در گستره عرض‌های میانی شمالی کره زمین دریافتند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه هواویزه‌های سولفات نقش اصلی در افزایش دمای فصلی این منطقه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

از کره زمین ایفا می‌کنند. آنها با استفاده از مجموعه بروندادهای CMIP۵ و به کار بردن روش انگشت نگاشت بهینه دریافتند که می‌توان با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا باعث کاهش اثرات بر تغییرات فصلی دما و تأثیرات وابسته به آن شد. دیلیپکومار و همکاران (Dileepkumar et al., ۲۰۱۸) نیز با مطالعه تغییرات دمای میانگین در هند طی سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۵۶ به این نتیجه رسیدند که واداشت‌های انسانی (ANT) و به ویژه گازهای گلخانه‌ای تأثیر مستقیم بر این متغیر داشته و تغییر کاربری اراضی، پوشش گیاهی و افزایش غلظت هواویزه‌ها این موضوع را تشدید نموده است. آنها با استفاده از مدل انگشت نگاشت بهینه و استفاده از مدل‌های موجود در CMIP۵ و دیتاست‌های CRU دریافتند که عوامل طبیعی به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نیست.

سعدی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از بروندادهای سری پنجم مدل‌های مقایسه‌ای و داده‌های شبکه‌بندی افرودیت (APHRODITE) برای نخستین بار از روش انگشت نگاشت بهینه در کشور استفاده کردند و با بررسی بارش‌های تجمعی یک روزه (RX۱day) و پنج روزه (RX۵day) در محدوده جنوب غربی کشور دریافتند که سیگنال مجموع عوامل انسانی و طبیعی (ALL) قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی است. به عبارت دیگر نتایج نشان داد که تغییرات صورت گرفته با تنوع پذیری درونی اقلیم هماهنگی نداشته و خارج از نوسانات طبیعی اقلیم است. آنها به این نتیجه رسیدند که برای متغیر RX۱day و RX۵day میزان تغییرات قابل نسبت‌دهی به تغییر اقلیم به ترتیب ۱/۶۴ و ۲/۵ درصد است. در حالی‌که هیچ یک از سیگنال‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و سیگنال ناشی از عوامل طبیعی (NAT) به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نبودند. این نتایج با مطالعات ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۱۳) هماهنگی دارد، زیرا ایشان نیز با مطالعات متغیرهای مذکور طی سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۵۱ پی بردند که سیگنال مرکب (ALL) قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی است ولی سیگنال‌های طبیعی و گازهای گلخانه‌ای به طور جداگانه قابل آشکارسازی و نسبت-دهی نبودند. آنها معتقدند که این موضوع ممکن است به دلیل عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) باشد.

در این تحقیق سعی شده تا برای اولین بار از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های همدیدی در مقیاس منطقه‌ای استفاده شود. محدوده مطالعاتی در این تحقیق دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی است که از لحاظ موقعیت سیاسی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا علاوه بر این که پایتخت کشور در این منطقه واقع است، از نظر تراکم جمعیت و میزان منابع آبی در دسترس آن مهم می‌باشد. از این‌رو داشتن درک بهتری از شرایط اقلیمی منطقه تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌تواند مدیران و تصمیم‌گیران کشور را در کنترل عوامل و واداشت‌های مؤثر و تدوین سناریوهای سازگاری و ارائه برنامه کاهش اثرات یاری نماید. از سوی دیگر می‌توان میزان آسیب‌پذیری منطقه را تحت تأثیر گرمایش جهانی ارزیابی نمود. لذا این تحقیق با بررسی واداشت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای (GHG)، عوامل طبیعی نظیر تشعشعات خورشیدی و آتشفشان-ها (NAT) و ترکیبی از مجموع عوامل انسانی و طبیعی (ALL)، تلاش دارد تا علاوه بر آشکارسازی اثر تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی، عوامل دخیل را بررسی نموده و تأثیر هر یک از واداشت‌ها را تعیین نماید و اصطلاحاً نسبت‌دهی کند. در این راستا در ادامه ضمن معرفی محدوده مطالعاتی، منابع اخذ داده‌ها و روش‌های به کار برده شده اشاره خواهد شد و سپس به شرح و تفسیر نتایج پرداخته می‌شود و در نهایت پس از نتیجه‌گیری کلی، منابع و مأخذ مورد استفاده در مقاله معرفی می‌گردد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

داده‌ها و روش کار

محدوده مطالعاتی در این پژوهش دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی است که شامل استان‌های تهران و البرز می‌شود. قرار گرفتن پایتخت سیاسی کشور در این منطقه و وجود یک چهارم جمعیت کشور در استان‌های تهران البرز این منطقه را حائز اهمیت ویژه‌ای نموده است (شکل-۱). وجود حداقل سه سد بزرگ به منظور تأمین آب شرب و واقع شدن قطب‌های صنعتی و اقتصادی در این منطقه باعث شده که این محدوده به شدت در مقابل مخاطرات طبیعی آسیب‌پذیر باشد. لذا بررسی دوره تاریخی اقلیم منطقه به منظور شناخت بهتر عوامل دخیل هواشناسی برای مدیریت بهینه منطقه ضروری است.

شکل۱: محدوده مطالعاتی (استان‌های تهران و البرز)

بنابراین حداکثر طول دوره آماری مشترک از ایستگاه‌ها همدیدی این مناطق انتخاب شد. بر این اساس داده‌های تمامی ایستگاه منتخب از سال ۱۹۸۵ میلادی شروع شد و با توجه به محدودیت شبیه‌سازی‌های مدل‌های موجود در آرشیو CMIP۵ تا ۲۰۰۵ ادامه یافت. لذا داده‌های خام ایستگاه‌های همدیدی کرج، مهرآباد و آبعلی از مرکز داده‌های مشاهداتی سازمان هواشناسی کشور (https://irrimo.data.ir/) اخذ شد و به منظور بررسی شرایط اقلیمی این منطقه سه متغیر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه استخراج شدگردید و در نهایت از بررسی همگنی به کمک آزمون ران تست و تکمیل خلاء آماری مورد استفاده قرار گرفت (جدول-۱).

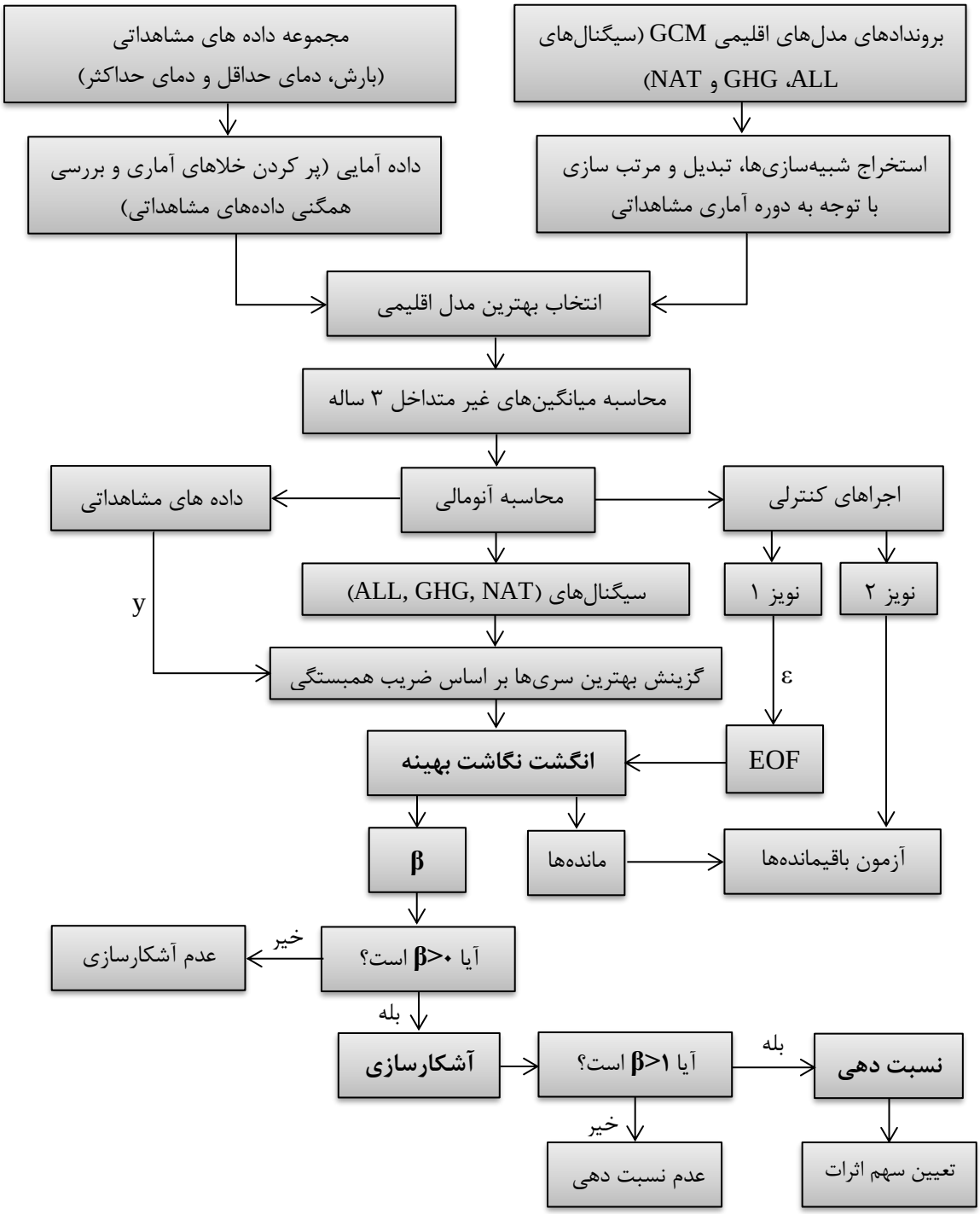
جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی (سینوپتیک) مورد مطالعه

ایستگاه مورد مطالعه	عرض جغرافیایی (°درجه)	طول جغرافیایی (°درجه)	ارتفاع از سطح دریا (m)	بارش متوسط (mm)	میانگین دمای حداکثر (C°)	میانگین دمای حداقل (C°)
کرج	۵۰/۹۵	۳۵/۸۱	۱۲۹۲/۹۰	۳۱۰/۸۵	۲۱/۵۰	۸/۹۰
مهرآباد	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱	۳۲۷/۸۱	۲۳/۱۸	۱۳/۲۵
آبعلی	۵۱/۸۸	۳۵/۷۵	۲۴۶۵/۲۰	۷۱۴/۹۲	۱۳/۳	۴/۲۵

به منظور شبیه‌سازی سیگنال‌ها و واداشت‌های مؤثر بر اقلیم جهانی و منطقه از بروندادهای مدل کانادایی CanESM-۲.۰ استفاده شد. مدل CanESM-۲،۰ در واقع نسل دوم مدل‌های سیستم‌های کره زمین می‌باشد که شامل ترکیبی از مدل‌های جوی-اقیانوسی (CanCM٤) و مدل‌های کربن زمینی (CTEM) و مدل‌های کربن اقیانوسی (CMOC) است. این مدل محصول مرکز تحلیل و مدلسازی اقلیمی کانادا می‌باشد که در واقع بخشی از شاخه سازمان محیط زیست کانادا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

است و در دانشگاه ویکتوریا (واقع در بریتیش کلمبیا) قرار دارد. دقت این مدل ۵۰۰ کیلومتر است و یکی از معتبرترین مدل‌ها جهت شبیه‌سازی‌های آب و هوایی کره زمین می‌باشد (Scinocca etal., ۲۰۱۶). فلوچارت روند تحقیق به صورت زیر می‌باشد که جهت درک بهتر تحقیق ارائه شده است (شکل -۲).



شکل ۲: فلوچارت روند تحقیق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

شبیه‌سازی‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل سه سیگنال (ALL)، (GHG) و (NAT) می‌باشد. سینگال (ALL) بیانگر شرایط جهان واقعی است به این معنی که تمامی عوامل انسانی، گازهای گلخانه‌ای و عوامل طبیعی پس از انقلاب صنعتی (۱۸۵۰ میلادی) در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردیده و جهت مقایسه و صحت‌سنجی با دوره متناظر مورد مطالعه استفاده شد. شبیه‌سازی اثرات گازهای گلخانه‌ای یا سیگنال (GHG) شرایط جوی کره زمین را صرفاً تحت تأثیر فرآیندهای گازهای گلخانه‌ای در نظر می‌گیرد و شبیه‌سازی‌های تحت واداشت‌های طبیعی (نظیر فعالیت‌های خورشیدی و آتشفشانی) یا سیگنال (NAT) که کره زمین را بدون در نظر گرفتن گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر سیگنال‌های منتخب، به منظور شبیه‌سازی تغییرپذیری درونی اقلیم (نشان‌دهنده شرایط جوی جهان پیش از انقلاب صنعتی) و کنترل محاسبات با آزمون ثبات باقیمانده‌ها از اجراهای کنترلی (Pi-ctrl) استفاده شد که در مجموع شامل ۱۸۰۰ سال شبیه‌سازی برای متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد. این مدل بر اساس بالاترین ضریب همبستگی از بین تمامی مدل‌ها انتخاب شد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۸). این بروندادها پس از استخراج و تبدیل واحد به صورت دوره‌های ۲۱ ساله متناظر با دوره مطالعاتی تهیه شدند و جهت شبیه‌سازی تغییرپذیری درونی اقلیم به عنوان ورودی به فرآیند آشکارسازی و نسبت‌دهی معرفی شدند.

- **داده‌آمایی**

با نزدیک نمودن مقیاس مشاهدات به شبیه‌سازی‌ها می‌توان نویز ناشی از تغییرپذیری درونی اقلیم را کاهش داده و احتمال آشکارسازی را افزود. یکی از روش‌های نزدیک نمودن مقیاس مشاهدات به داده‌های مدل، استفاده از میانگین-گیری حوضه‌ای یا منطقه‌ای است (Westra et al., ۲۰۱۳). در این مطالعه به منظور محاسبه میانگین منطقه‌ای از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده شد. هرچند سایر روش‌های آماری برای میان‌یابی قابل استفاده می‌باشند، اما روش میان‌گیری مورد استفاده تأثیر معنی‌داری بر تغییرات بلندمدت میانگین و نتایج نهایی ندارد (Wan et al., ۲۰۱۴). لذا جهت تقویت نتایج و افزایش قدرت آشکارسازی داده‌ها نقطه‌ای ایستگاه‌های همدیدی به روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) میان‌یابی و به صورت پهنه‌ای تبدیل شدند (رابطه-۱).

$$\lambda_i = \left(\frac{D_\cdot}{D_i}\right)^{\alpha} - ۱ \qquad (۱)$$

در این رابطه، λ_i: وزن نطقه نمونه i ام، D_i: فاصله بین نطقه نمونه و نقطه مجهول، α: توان وزن‌دهی و $D_\cdot$ شعاع همسایگی می‌باشد. در این روش به نقاط دارای فاصله یکسان از نقطه مورد نظر، وزن یکسان داده می‌شود و آرایش آنها لحاظ نمی‌شود. در این تحقیق α در رابطه (۱) برابر یک در نظر گرفته شده است (جنانی و ملکی‌نژاد، ۱۳۹۱).

یکی دیگر از روش‌های افزایش قدرت آشکارسازی (Detectability) در روش‌های انگشت‌نگاشت بهینه استفاده از مقادیر استاندارد شده نظیر آنومالی یا شاخص احتمالی (PI) است (Zhang et al., ۲۰۱۳). لذا به منظور بررسی دوره آماری مورد مطالعه از مقادیر استاندارد شده متغیرها جهت مقایسه داده‌ها استفاده شد. بدین صورت که ابتدا میانگین غیرمتداخل ۳ ساله برای داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌ها به دست آمد (کل دوره آماری به ۷ دوره سه ساله تقسیم شد) و سپس مقادیر به دست آمده نسبت به میانگین کل (۲۱ سال) استاندارد گردید. این روش باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز (S/N) و بهبود قدرت آشکارسازی می‌گردد. جهت محاسبه مقادیر استاندارد دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش از رابطه (۲) استفاده شد:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

$$Z = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \qquad (۲)$$

که در آن Z : معادل استاندارد شده مشاهدات، x_i مقدار متغیر در سال i ام، μ: میانگین متغیر درازمدت طی دوره آماری و σ مقادیر انحراف معیار است.

- **توابع متعامد تجربی (EOF)**

یکی از مسائل مهم در فرآیند آشکارسازی و نسبت‌دهی به روش انگشت نگاشت بهینه استفاده از اجراهای کنترلی به منظور شبیه‌سازی‌ها تغییرپذیری درونی اقلیم است. اجراهای کنترلی در حقیقت شبیه‌سازی‌هایی از اقلیم دست نخورد کره زمین پیش از انقلاب صنعتی هستند که معمولاً در دوره‌های ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ ساله تولید می‌شوند. به منظور دخیل نمودن تغییرپذیری دروتی اقلیم، این شبیه‌سازی‌ها به دوره‌هایی متناظر با دوره مطالعاتی (۲۱ سال) تقسیم شده و به طور متناظر به همراه شبیه‌سازی‌های سیگنال‌های اصلی (ALL، NAT و GHG) و مشاهدات به مدل انگشت نگاشت بهینه معرفی می‌شوند. به عبارت دیگر این شبیه‌سازی‌ها بستری از داده‌های تصادفی تولید می‌نمایند تا سیگنال‌های مورد مطالعه در صورت معنی دار بودن تغییرات قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی باشند. برونداد این شبیه‌سازی با توجه به طول دوره بلند آماری و تکرار دوره‌هایی متناظر با دوره مطالعاتی، باعث تولید حجم انبوهی از داده‌های اقلیمی می‌شوند. لذا برای انجام فرآیند آشکارسازی و نسبت‌دهی، باید حجم داده‌ها را در شبیه‌سازی‌های کنترلی تا حد ممکن کاهش داد. یکی از روش‌های کاهش حجم داده‌ها استفاده از روش توابع متعامد تجربی یا (EOF) است (Allen & Tett, ۱۹۹۹؛ Allen & Stott, ۲۰۰۳). در این توابع همبستگی غیرصفر بر نسبت اطلاعات اضافی دلالت دارد، بنابراین این روش با تحلیل مؤلفه‌های اصلی، اساسی‌ترین ماتریس‌ها را استخراج می‌نماید. به عبارت دیگر مؤلفه‌های اصلی قدرت نمایش ماتریس‌ها را در زمان نشان می‌دهند، در حالی که توابع غیرمتعامد تجربی (EOF) با تشکیل یک ساختار فضایی در جستجوی یک تجزیه ساختار زمانی-مکانی پیوسته می‌باشد که رابطه آن به شرح زیر است:

$$X(t,s) = \sum_{k=1}^{M} ck(t)uk(s) \qquad (۳)$$

در این رابطه M تعداد مدل‌ها یا نمونه‌های به کار رفته در ساختار مورد نظر با استفاده از یک سری بهینه از توابع فضایی پایه $uk(s)$ و $ck(t)$ توابع گستره زمان می‌باشند (سعدی و همکاران، ۱۳۹۵).

- **گزینش بهترین سری‌ها**

با توجه به ارتباط مستقیم بین ضریب همبستگی و قابلیت آشکارسازی، سری‌های زمانی در مقیاس‌های روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفتند و در هر مرحله با بررسی ضریب همسبتگی خطی (پیرسون) بهترین همبستگی بین سری‌های مشاهداتی و سیگنال ALL که از نظر مدلسازی متناظر شرایط واقعی کره زمین می‌باشد مقایسه شد. به منظور تعیین فصول مختلف سال ماه‌های میلادی مختلف در قالب ۳ و ۴ ماهه بررسی شد و بهترین نتایج در قالب ۴ فصل تقویمی شمسی تهیه شد. بر این اساس به ترتیب سه ماهه نخست سال میلادی، زمستان، سه ماهه دوم بهار، سه ماهه سوم، تابستان و سه ماهه چهارم، پاییز در نظر گرفته شد. در این تحقیق از تجمیع ماه‌های مختلف برای تعیین فصل‌ها سپس بر اساس بالاترین ضریب همبستگی آشکارسازی و نسبت‌دهی صورت گرفت.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

- **انگشت نگاشت بهینه**

یکی از روش‌های آشکارسازی و نسبت‌دهی روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه می‌باشد. این روش نخستین بار توسط هسلمن (۱۹۹۷؛ ۱۹۹۳؛ Hasselman, ۱۹۷۹) ابداع گردید و به تدریج به کمک سایر دانشمندان و محققان توسعه یافت. از جمله تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیقات هگرل و زوئرس (Hegerl & Zwiers, ۲۰۰۴) و هانارت و همکاران (Hannart et al., ۲۰۱۴) و رایبس و همکاران (Ribes et al., ۲۰۱۶) اشاره نمود. این روش بر مبنای رگرسیون خطی استاندارد توسعه یافته است. فرض روش استاندارد آشکارسازی و نسبت دهی بر این است که پاسخ‌های شبیه‌سازی شده مستخرج از مدل بدون نویز است. در این روش چنانچه ضرایب مقیاس‌ساز (Scaling factors) یا بتا (β) و محدوده اطمینان ۹۵ درصد آنها بزرگتر از صفر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که آشکارسازی صورت گرفته است و اگر این نتایج شامل مقدار ۱ باشند می‌تواند اثرات را به سیگنال مربوطه نسبت داد. رابطه (۵) الگوریتم رگرسیون خطی استاندارد مورد استفاده در روش انگشت نگاشت بهینه را نشان می‌دهد:

$$y = \sum_{i=1}^{m} X_i\beta_i + v = X\beta + v \qquad (۴)$$

در این رابطه، y بردار رتبه‌ای داده‌های مشاهداتی، m ستونی از الگوهای پاسخ‌های شبیه‌سازی یا X است و مقادیر مجهول مورد محاسبه β و $i\beta$ می‌باشند؛ نویز یا تغییرپذیری درونی اقلیم نیز با v نمایش داده می‌شود.

کوواریانس تغییرپذیری اقلیم نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_N = \varepsilon(vv^T) \qquad (۵)$$

در رابطه اخیر، ε تابع امید ریاضی می‌باشد و مجهول است و از یک اجرای کنترل مدل اقلیمی تخمین زده می‌شود. با توجه به این که عموماً، کوواریانس نویز از نوفه سفید دور می‌باشد ($C_N \neq 6I$)، رگرسیون مربعات وزن‌دهی نشده، تخمین‌های خیلی قوی از خطاهای β ارائه می‌دهد، در حالی که خود β را خیلی ضعیف برآورد می‌کند. لذا جهت حل این مسأله از یک عملگر اصلاحی (pre-whitening) استفاده می‌شود که به شرح زیر است:

$$\varepsilon(Pvv^tP^T) = I_k \qquad (۶)$$

در این رابطه I_k، ماتریس واحد، k رتبه‌ای است. باید توجه داشت که رتبه P، می‌تواند از n یا رتبه مشاهدات y بسیار کوچکتر باشد. به طور کلی، یک تابع پری-وایتنینگ با رتبه‌دهی کامل به طوری که بتواند واریانس نویز را برای همه مقیاس‌های زمانی-مکانی ارائه دهد، وجود ندارد. زیرا واریانس نویز مقیاس کوچک، مجهول بوده یا انتظار می‌رود که به صورت ضعیفی توسط مدل اقلیمی شبیه‌سازی شود. از آنجا که Pv، نویز سفید توزیع یافته مستقلی است، بنابراین بهترین تابع با کمترین واریانس بدون خطای خطی مربوط به β، یعنی $\tilde{\beta}$ است که با حداقل نمودن تابع مناسب، محاسبه می‌شود:

$$r^2(\tilde{\beta}) \equiv \left(PX\tilde{\beta} - Py\right)^T\left(PX\tilde{\beta} - Py\right) \equiv \tilde{v}^TP^TP\tilde{v} \qquad (۷)$$

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

$$\tilde{\beta} = (X^TP^TPX)^{-1}X^TP^TPy \equiv F^Ty \qquad (۸)$$

در رابطه اخیر، F همان انگشت نگاشت متمایز است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

در این مقاله به منظور بررسی صحت نتایج حاصل شده، از روش آزمون ثبات باقیمانده‌ها استفاده شد. این روش جهت پاسخ به این پرسش که آیا باقیمانده‌های تخمین زده شده به وسیله انگشت نگاشت بهینه با تغییرپذیری درونی هماهنگی دارد یا خیر؟ ایجاد شده و توسعه یافته است (Allen & Tett, ۱۹۹۹؛ Allen & Stott, ۲۰۰۳). به عبارت دیگر چنانه‌های تمامی مؤلفه‌های روند، فصلی و دوره‌ای یک سری زمانی را حذف کنیم، سری باقیمانده در صورت تصادفی بودن باید از توزیع نرمال تبعیت کند. یکی از فرضیات مهم در شبیه‌سازی‌های اقلیمی مانا بودن متغیر اقلیمی می‌باشد که لازمه آن تصادفی بودن داده‌ها است. بنابراین چنانچه سیگنال‌ها مورد مطالعه در محیطی تصادفی دارای روند معنی داری باشند می‌توان تغییرات صورت گرفته را به عواملی نظیر گازهای گلخانه‌ای نسبت داد. شرط صحت این استدلال تصادفی بودن تغییرپذیری درونی اقلیم است که توسط اجراهای کنترلی فراهم گردیده است. از این رو، آزمون باقیمانده‌ها به منظور بررسی این موضوع صورت می‌گیرد. در این آزمون، محدوده‌های قابل قبول باقیمانده‌ها بر اساس سطح اطمینان مورد مطالعه مشخص می‌شود و چنانچه باقیمانده‌های به دست آمده از رگرسیون درون این محدوده واقع شوند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج دارای دقت قابل قبولی می‌باشند. در این تحقیق پس از محاسبه ضرایب مقیاس‌ساز مربوط به سیگنال-های مورد مطالعه و مشخص نمودن سیگنال‌هایی که قابلیت آشکارسازی و نسبت‌دهی دارند، درصد تغییرات متغیرهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر طی دوره مطالعاتی ۲۰۰۵-۱۹۸۵ محاسبه گردید. به این منظور پس از محاسبه روند خطی سری‌های زمانی به مقادیر استاندارد شده برای سیگنال‌های نسبت‌دهی شده، در ضرایب مقیاس‌ساز مربوط ضرب می‌شود.

شرح و تفسیر نتایج

- **گزینش سری‌های زمانی**

مقایسه بهترین نتایج قابل برآورد که به کمک اجرای توابع متعامد تجربی (EOF) در برازش داده‌های درون‌یابی محدوده مطالعاتی و شبیه‌سازی‌های مدل CanESM برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۵ به دست آمد، برای فصول مختلف سال نتایج متفاوتی را نشان دادند. به طوری که برای یک متغیر مورد مطالعه در برخی فصول با ضریب همبستگی بالایی همراه بود ولی در فصلی دیگر حتی دارای ضریب همبستگی منفی بود. با توجه به نتایج میزان ضریب همبستگی برای مقادیر استاندارد، میانگین سه ساله بارش سالانه ۰/۴۰ می‌باشد و بیشترین هماهنگی به سه ماهه نخست سال میلادی (ژانویه، فوریه، مارس) که دارای بیشترین تراکم بارندگی است مربوط می‌شود که دارای ضریب همبستگی ۰/۸۳ است. این نتایج برای سایر فصول نتایج خوبی به دنبال نداشته و به ترتیب در فصول پاییز، تابستان و بهار دارای کمترین ضرایب همبستگی است. جهت آشکارسازی و نسبت‌دهی دمای حداکثر نیز از بهترین ضرایب همبستگی فصلی استفاده شد. بر این اساس بالاترین ضریب همبستگی مربوط به مقیاس سالانه متغیر مذکور می‌باشد که دارای ضریب همبستگی ۰/۹۲ است و در بین فصول یاد شده دمای حداکثر مربوط به فصل تابستان با ضریب همبستگی ۰/۷۶ بیشترین هماهنگی بین مشاهدات و شبیه‌سازی را بیان می‌کند. در مورد میانگین سه ساله غیر متداخل دمای حداقل نیز تفاوت چندانی بین ضریب همبستگی مقادیر سالانه و فصل بهار مشاهده نشد و ضرایب ۰/۷۸ و ۰/۷۷ به ترتیب برای میانگین سالانه و فصل بهار به دست آمد. در حالی که این هماهنگی برای فصول پاییز و زمستان به حداقل خود می‌رسد (جدول-۲).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

جدول ۲: ضریب همبستگی مقادیر مشاهداتی با شبیه‌سازی‌های متناظر تحت سیگنال ALL

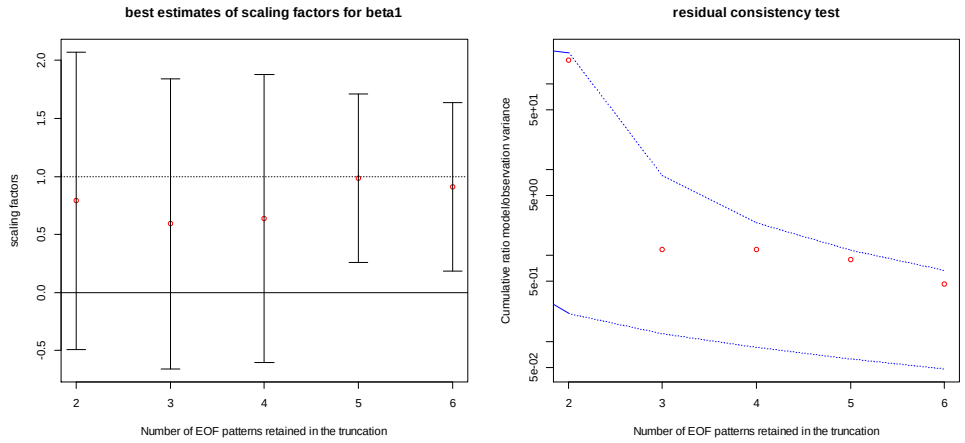
مقطع زمانی مورد محاسبه	میانگین بارش تجمعی ۳ ساله	میانگین دمای حداکثر ۳ ساله	میانگین دمای حداقل ۳ ساله
زمستان (ژانویه، فوریه، مارس)	**۰/۸۳**	۰/۶۷	-۰/۳۶
بهار (آوریل، می، جوئن)	-۰/۵۲	۰/۵۱	**۰/۷۷**
تابستان (جولای، آگوست، سپتامبر)	-۰/۰۴	**۰/۷۶**	۰/۷۱
پاییز (اکتبر، نوامبر، دسامبر)	۰/۲۱	۰/۴۳	۰/۰۲
سالانه (تمامی ماه‌ها)	۰/۴۰	۰/۹۲	۰/۷۸

- **آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال ALL**

پس از محاسبه بهترین نتایج همبستگی فصول مختلف، آشکارسازی و نسبت‌دهی واداشت‌های جهان واقعی (سیگنال ALL) صورت گرفت. با توجه به این نتایج شکل (۱- الف) نتایج آشکارسازی پاسخ به ترکیبی از واداشت‌های خارجی انسانی و طبیعی در تغییرات بارش زمستانه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با قرار گرفتن بخش عمده‌ای از نتایج بالای خط صفر بیانگر این است که قریب به یقین این سیگنال برای منطقه مطالعاتی آشکارسازی شده است. به علاوه با توجه به اینکه همه بتاهای مذکور، شامل مقدار یک (۱) می‌باشند، تغییرات شبیه‌سازی شده در متغیر بارش، تحت سیگنال ALL با تغییرات در مشاهدات دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی هماهنگی داشته و علاوه بر آشکارسازی، نسبت‌دهی نیز صورت گرفته است. بدین ترتیب می‌توان مدعی شد که تغییر اقلیم در محدوده مطالعاتی (استان‌های تهران و البرز) روی داده است ولی نمی‌توان بر اساس نتایج این سیگنال سهم هر یک از اثرات را تعیین کرد. با این حال در بین نتایج (شکل ۱-الف)، موارد متفاوتی نیز به چشم می‌خورد و علی‌رغم داشتن بتاهای مثبت، اما فواصل اطمینان ۹۰ درصد در برخی نتایج، شامل مقادیر منفی است. ممکن است این اختلاف در میان نتایج مربوط به یک سیگنال مشابه به دلیل وجود خطا در شبیه‌سازی‌های مدل مورد استفاده باشد و عدم قطعیت مربوط به مدل و نحوه شبیه‌سازی آن به ویژه در شبیه‌سازی‌های پیش از انقلاب صنعتی (اجراهای کنترلی) باشد، زیرا در برآورد تغییرپذیری درونی اقلیم منطقه از تعداد بسیار زیادی سری داده شبیه‌سازی اجرای کنترل استفاده می‌گردد و احتمال بروز خطا هم در اثر عدم یکنواختی بین الگوهای شبیه‌سازی کنترل و سیگنال ALL، هم در بین خود نمونه‌های نویز وجود دارد. همانطور که ذکر شد یکی از فرضیات اصلی مبحث آشکارسازی و نسبت‌دهی، این است که این شبیه‌سازی‌ها به درستی رفتارها و پاسخ‌های اقلیمی را برآورد می‌کنند. لذا مشاهده این گونه نتایج با توجه به خصوصیات مدل‌های شبیه‌سازی بعید نیست. در این راستا به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها از توابع تجربی متعامد (EOF) استفاده شد. به علاوه برای بررسی کارآیی مدل، آزمون ثبات باقیمانده‌ها به کار گرفته شد (شکل ۱- ب). در این شکل منحنی‌های آبی رنگ، محدوده‌های ۹۵-۵ درصد قابل قبول آزمون نمایش می‌دهند. با توجه به این آزمون تمامی باقیمانده‌های مربوط به ضرایب مقیاس‌ساز سیگنال ALL، در این محدوده قرار دارد که به این معنا است که مدل رگرسیون به خوبی این نتایج را برآورد کرده است.

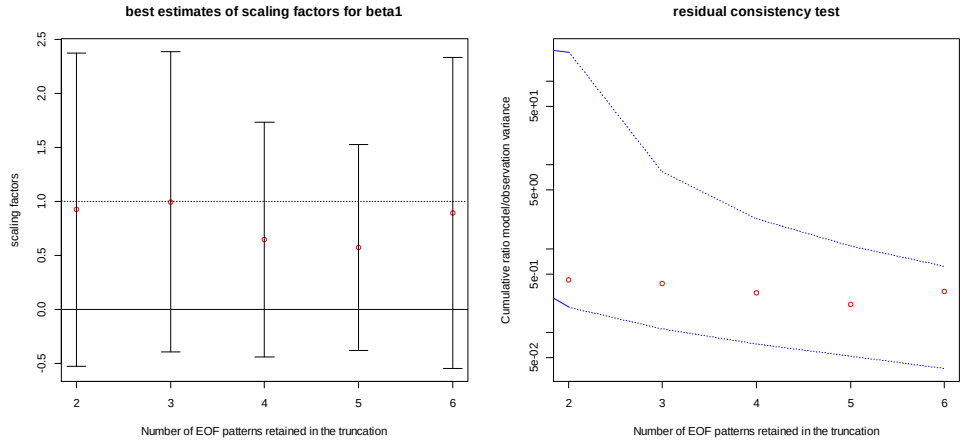
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]



شکل ۱: شکل چپ (الف)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای برای متوسط بارش زمستانه تحت سیگنال ALL، شکل راست (ب)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

نتایج آشکارسازی و نسبت‌دهی تغییرات دمای حداکثر تابستانه تحت سیگنال ALL در شکل (۲- پ) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج توابع متعامد با فاصله اندکی از زیرصفر تا ۲/۵ گسترده شده‌اند که این موضوع بیانگر آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال ترکیبی ALL می‌باشد. به عبارت دیگر به احتمال قریب به یقین سیگنال ALL در تغییرات دمای تابستانه مؤثر می‌باشد و تغییر اقلیم در این محدوده جغرافیایی رخ داده است. نتایج آزمون باقیمانده‌های مربوط به این سیگنال در شکل (۲- ت) نمایش داده شده است که کارآیی نسبتاً خوب توابع متعامد تجربی را برآورد ضریب مقیاس‌ساز نشان می‌دهد.

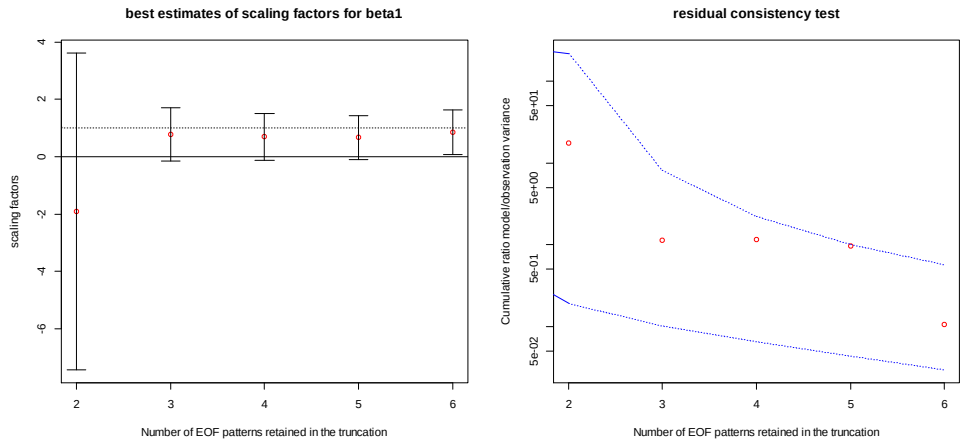


شکل ۲: شکل چپ (پ)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداکثر تابستانه تحت سیگنال ALL، شکل راست (ت)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

همچنین در خصوص بررسی سیگنال ALL برای دمای حداقل بهاره، به طور مشابه با نتایج دو متغیر دیگر (بارش زمستانه و دمای میانگین حداکثر تابستانه)، این سیگنال آشکارسازی و نسبت‌دهی شد (شکل۳- ث). زیرا به استثنای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

EOF نخست سایر توابع متعامد تجربی از هماهنگی خوبی برخودار بوده و دامنه پایین محدوده ۹۰ درصدشان یا نزدیک صفر یا بالاتر می‌باشد. همانطور که اشاره شد ناهماهنگی موجود در EOF ها ممکن است ناشی از عدم قطعیت‌های اجراهای کنترلی باشد. همچنین در شکل (۳- ج) کارآیی فرآیند آشکارسازی و نسبت دهی را خوب ارزیابی می‌کند.



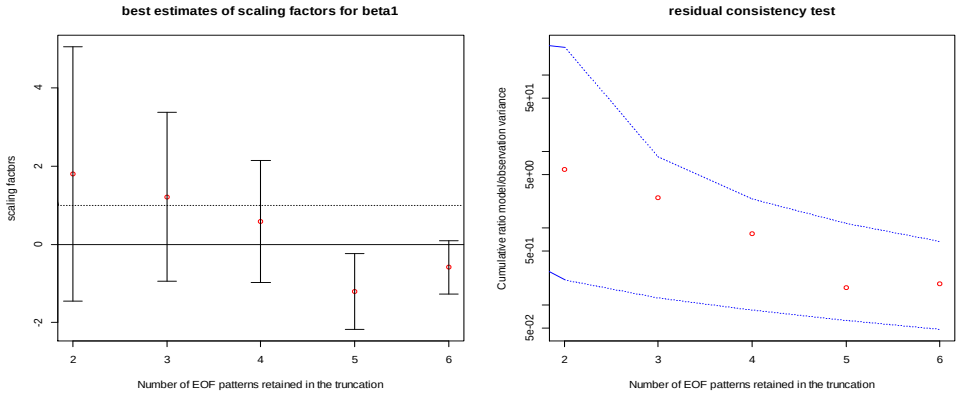
شکل ۳: شکل چپ (ث)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداقل بهاره تحت سیگنال ALL، شکل راست (ج)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

- **آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال GHG**

شکل (۴- چ) بیانگر نتایج متفاوتی از شکل (۱- الف) برای مقادیر استاندارد بارش تجمعی زمستانه می‌باشد. این شکل نشان‌دهنده پاسخ به شبیه‌سازی‌های تحت اثرات گازهای گلخانه‌ای است. به این معنی که قوی‌ترین تجزیه‌های مربوط به ضرایب مقیاس‌سازی است که هرچند شامل مقادیر صفر و یک (به معنی آشکارسازی و نسبت‌دهی) هستند، امّا به دلیل اینکه دامنه پایین محدوده اطمینان تمامی توابع متعامد تجربی کمتر از صفر است و نتایج در EOF های مختلف از هماهنگی کافی برخوردار نیستند، نمی‌توان به این نتایج اطمینان داشت، لذا سیگنال مربوط به گازهای گلخانه‌ای (GHG) به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نیست. نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها نیز این موضوع را کم و بیش تأیید می‌کند (شکل ۴- ح)، هر چند که این نتایج به قوت نتایج سیگنال ALL نمی‌باشد.

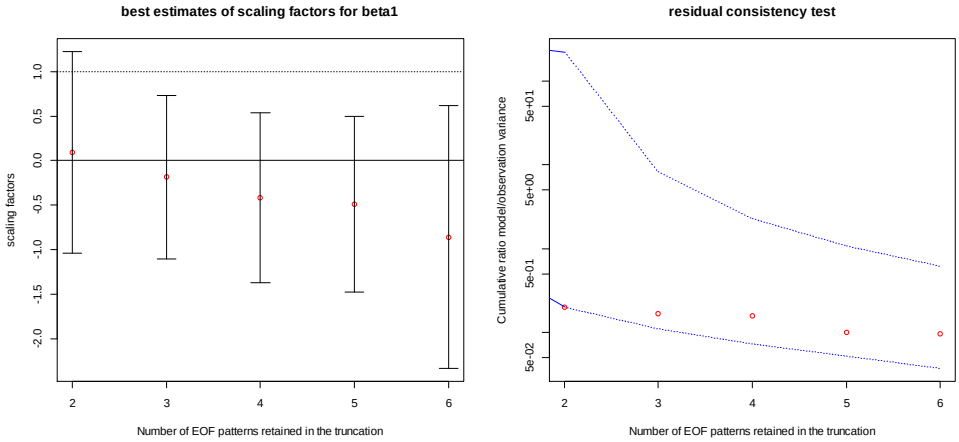
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]



شکل ۴: شکل چپ (چ)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط بارش زمستانه تحت سیگنال GHG، شکل راست (ح)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

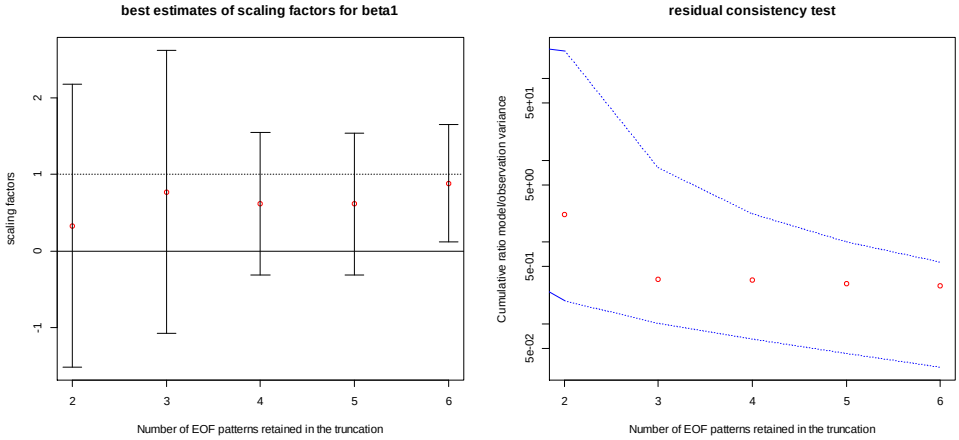
این در حالی است که به دلیل نتایج ضعیف سیگنال GHG در شکل (۵-خ)، به هیچ عنوان نمی‌توان اثری از گازهای گلخانه‌ای را بر تغییرات دمای حداکثر تابستانه آشکارسازی و نسبت‌دهی نمود. به عبارت دیگر قطع به یقین افزایش گازهای گلخانه‌ای به تنهایی روی میانگین دمای حداکثر تابستانه به طور مستقیم تأثیری ندارد. نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها در شکل (۵-د)، تا حدودی این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل ۵: شکل چپ (خ)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداکثر تابستانه تحت سیگنال GHG، شکل راست (د)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

علاوه بر سیگنال ALL که اثر آن بر دمای میانگین حداقل سه ماه سوم سال میلادی (بهار شمسی منطقه) به اثبات رسید، در شکل (۶- ذ) سیگنال گازهای گلخانه‌ای (GHG) آشکارسازی و نسبت‌دهی شد. با توجه به این شکل به جز دو تابع متعامد تجربی ۲ و ۳ که هماهنگی چندانی با سایر توابع ندارند، توابع متعامد تجربی دیگر هر چند ضعیفتر از سینگال ALL، ولی آشکارسازی و نسبت‌دهی شدند. آزمون ثبات باقیمانده‌ها نیز با توجه به اینکه اکثراً EOF ها در دامنه اطمینان قرار گرفته‌اند از نتایج قابل قبولی برخوردار است (شکل ۶- ر).

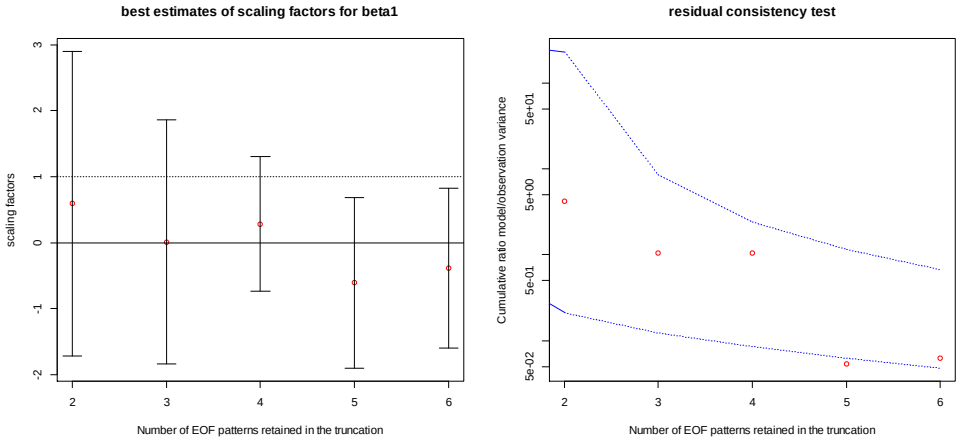
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]



شکل ۶: شکل چپ (ذ)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداقل بهاره تحت سیگنال GHG، شکل راست (ر)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

- **آشکارسازی و نسبت‌دهی سیگنال NAT**

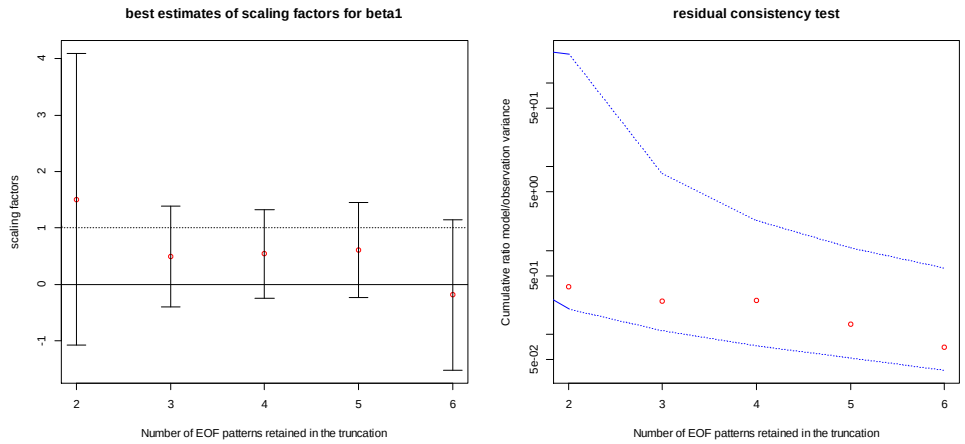
شکل (۷- ز) نیز نتایج مشابهی با شکل (۴- چ) را نمایش می‌دهد، به این معنی که شبیه‌سازی‌های اثرات جداگانه طبیعی (فعالیت‌های خورشیدی+آتشفشانی) یا سیگنال NAT به تنهایی بر تغییرات بارش زمستانه در منطقه مطالعاتی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نبود. زیرا، علاوه بر ناهماهنگی بین بتاهای به دست آمده، دامنه پایین محدوده اطمینان ۹۰ درصد توابع متعامد تجربی کوچکتر از صفر می‌باشند. به عبارت دیگر به احتمال قطع به یقین واداشت‌های طبیعی نظیر فعالیت‌های خورشیدی یا آتشفشانی نقش قابل اثباتی در تغییرات بارش منطقه ایفا نکرده‌اند. نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها در شکل (۷- ژ)، کارآیی بتاهای به دست آمده برای سیگنال NAT را نشان می‌دهد و عدم هماهنگی در ضرایب به ویژه در EOF های ۵ و ۶، این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل ۷: شکل چپ (ز)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای آنومالی متوسط بارش سالانه تحت سیگنال NAT، شکل راست (ژ)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

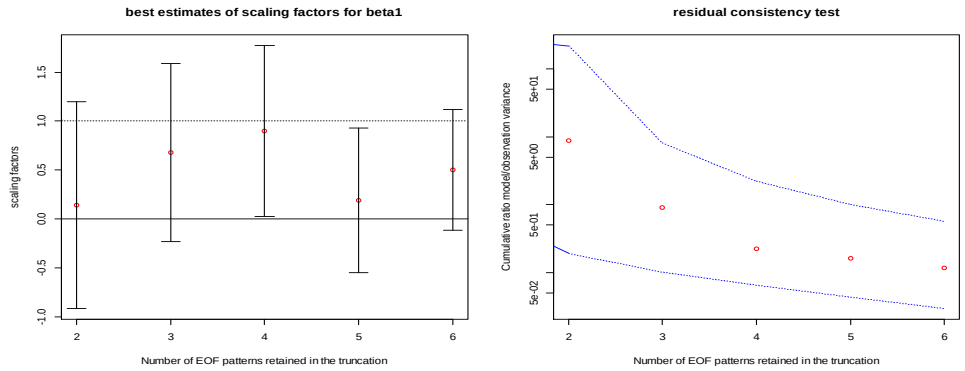
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

شکل (۸- س) بیانگر پاسخ‌های شبیه‌سازی شده متوسط دمای حداکثر تابستانه به اثرات طبیعی (NAT) می‌باشد. این شکل علی‌رغم اینکه از نتایج قوی‌تری نسبت به سیگنال گازهای گلخانه‌ای برخوردار است (شکل ۵- خ)، ولی مانند اثرات گازهای گلخانه‌ای به دلیل عدم هماهنگی کافی در بین تمام توابع متعامد تجربی به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت-دهی نمی‌باشد. همچنین نتایج آزمون نشان می‌دهد کارآیی EOF ها در حد قابل قبولی می‌باشد (شکل ۸- ش).



شکل ۸: شکل چپ (س)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداکثر تابستانه تحت سیگنال NAT، شکل راست (ش)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

در مورد پاسخ متوسط دمای حداقل بهاره به سیگنال واداشت‌های طبیعی (NAT) نتایج اندکی متفاوت است، یعنی با اینکه توابع دارای هماهنگی نسبی می‌باشند و محدوده ۹۰ درصد در برخی توابع شامل یک نیز می‌شوند ولی در مجموع از نتایج ضعیف‌تری نسبت به سیگنال GHG برای همین متغیر برخوردار است و به تنهایی قابل آشکارسازی و نسبت‌دهی نیست (شکل ۹- ص). با توجه به قرار گرفتن نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌ها در محدوده اطمینان ۹۵-۵ درصد، کارآیی نتایج از صحت قابل قبولی برخودارند (شکل ۹-ض).



شکل ۹: شکل چپ (ص)) میانه و محدوده اطمینان ۹۰٪ ضرایب مقیاس‌ساز (β) در EOF های مختلف برای متوسط دمای حداقل بهاره تحت سیگنال NAT، شکل راست (ض)) نتایج آزمون ثبات باقیمانده‌های EOF های منتاظر و دامنه ۹۵-۵ درصد عدم قطعیت آزمون

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

بنابراین به طور قریب به یقین آنچه که باعث تغییر در میانگین دمای حداقل بهاره در محدوده مطالعاتی گشته، ناشی از تغییر گازهای گلخانه‌ای است. ضرایب مقیاس ساز مربوط به متغیرهای مورد مطالعه تحت واداشت‌های مختلف و محدوده ۹۰ درصد آنها که به روش انگشت نگاشت بهینه محاسبه گردید در جدول-۳ ارائه شده است.

جدول ۳: ضرایب مقیاس ساز (Scaling factors) برای متغیرهای مورد مطالعه تحت واداشت‌های مختلف

متغیر مورد مطالعه	سیگنال	حد بالای بتا	بتا (ضریب مقیاس ساز)	حد پایین بتا
میانگین سه ساله بارش تجمعی زمستانه	ALL	۱/۵۸	**۰/۸۸**	۰/۲۶
	GHG	۰/۱۶	-۰/۴۹	-۱/۱۹
	NAT	۰/۶۶	-۰/۱۶	-۱/۰۱
میانگین سه ساله دمای حداکثر تابستانه	ALL	۱/۶۹	**۰/۷۶**	-۰/۰۷
	GHG	۰/۳۵	-۰/۵۷	-۱/۵۹
	NAT	۱/۲۹	۰/۴۸	-۰/۲۷
میانگین سه ساله دمای حداقل بهاره	ALL	۱/۴۸	**۰/۷۸**	۰/۱۰
	GHG	۱/۴۸	**۰/۷۳**	۰/۰۱
	NAT	۰/۸۹	۰/۳۴	-۰/۲۱

نتیجه‌گیری

همانطور که اشاره شد، تغییرات صورت گرفته در میانگین غیر متداخل سه ساله هر سه متغیر شامل: بارش تجمعی زمستانه، میانگین دمای حداکثر تابستانه و میانگین دمای حداقل بهاره به سیگنال ترکیبی ALL آشکارسازی و نسبت-دهی شد. این نتایج دارای قوت و ضعف می‌باشد که این موضوع می‌تواند ناشی از عدم قطعیت مدل‌ها در شبیه‌سازی سیگنال‌ها و اجرای کنترلی یا ناشی از تأثیر تبدیل مقادیر نقطه‌ای متغیرها به پهنه‌ای باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، بالاترین ضرایب مقیاس‌ساز (β) تحت واداشت‌های مرکب ALL به ترتیب مربوط به میانگین غیرمتداخل سه ساله بارش-های زمستانه (۰/۸۸)، میانگین دمای حداکثر تابستانه (۰/۷۶) و میانگین دمای حداقل بهاره (۰/۷۸) می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده، به احتمال قریب به یقین واداشت‌های ناشی از سیگنال GHG بر میانگین دمای حداقل بهاره مؤثر است و لذا می‌توان تغییرات صورت گرفته در منطقه مطالعاتی را به اثرات ناشی از گازهای گلخانه‌ای نسبت داد. ضریب مقیاس‌ساز گازهای گلخانه‌ای که فقط برای میانگین دمای حداقل بهاره آشکارسازی و نسبت‌دهی گردید (۰/۷۳) می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، سیگنال NAT برای هیچ یک از متغیرهای مورد مطالعه آشکارسازی و نسبت‌دهی نشد و ضرایب مقیاس‌ساز به دست آمده به اندازه‌ای بزرگ نبود که بتوان تغییرات صورت گرفته در منطقه را ناشی از نوسانات طبیعی جو دانست. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده با یافته‌های وان و همکاران (Wan et al., ۲۰۱۴) که از داده-های CMIP۵ برای عرض‌های بالای ۵۰ درجه شمالی استفاده کردند هماهنگی دارد.

قدردانی

در پایان نویسندگان از رهنمودهای جناب آقای پروفسور زوئرس (عضو هیئت علمی دانشگاه ویکتوریا) و جناب آقای دکتر اوجی (عضو هیئت علمی دانشگاه گیلان) و مساعدت شرکت آب منطقه‌ای البرز و سازمان هواشناسی کشور کمال امتنان و تشکر را دارند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

منابع

جنانی عباسی، شهربانو؛ حسین ملکی نژاد. ۱۳۹۱. ارزیابی روش‌های زمین آماری مبتنی بر GIS برای پهنه‌بندی مکانی بارش (مطالعه موردی: دشت کوهپایه-سگزی). *نخستین همایش سطوح آبگیر باران*، مشهد.

سعدی، توفیق؛ بهلول علیجانی، مهری اکبری و علیرضا مساح بوانی. ۱۳۹۵. آشکارسازی تغییرات بارش‌های حدی و نسبت‌دهی به تغییر اقلیم با استفاده از روش استاندارد انگشت نگاشت بهینه (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران)، *نشریه تحلیل فضایی و مخاطرات محیطی*، **۳**: ۶۵-۸۰.

ناصری، عرفان؛ علیرضا مساح بوانی، توفیق سعدی. ۱۳۹۸. ارزیابی کارآیی مدل‌های GCM در برآورد میانگین دمای استان البرز طی دوره آماری (۲۰۱۵-۱۹۸۵). *ششمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم*، تهران.

Allen, M. R., and S. F. B. Tett .۱۹۹۹. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, **۱۵**:٤۰۹–٤۲٤, **DOI:** ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲۰۰۵۰۲۹۱.

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.

Dileepkumar, R.; K, Achutarao and T.Arulalan. ۲۰۱۸. Human influence on sub-regional surface air temperature change over India. *Scientific reports*, **۸**:۸۹٦۷. **DOI**: https//:doi.org.۱۰,۱۰۳۸/s٤۱۵۹۸-۰۱۸-۲۷۱۸۵-۸.

Duan, J.; Z. Ma, P. Wu, E. Xoplaki, G. Hegerl, L. Li, A. Schurer, D. Guan, L. Chen, Y. Daun and J. Luterbacher.۲۰۱۹. *Nature Sustainability*, **DOI**: http//:doi.org.۱۰,۱۰۳۸/s٤۱۸۹۳-۰۱۹-۰۲۷٦-٤.

Ganopolski, A. and Calov, R. ۲۰۱۱. The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in ۱۰۰ kyr glacial cycles. *Clim. Past*, **۷**:۱٤۱۵–۱٤۲۵, **DOI:** https://doi.org/۱۰,۵۱۹٤/cp-۷-۱٤۱۵-۲۰۱۱.

Velasquez, P., M, Messmer and C, C.Raible.۲۰۱۹. A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states. *Geoscientific-model-development*, **۷**:**۱٤۱۵**–۱٤۲۵, **DOI**: https://doi.org/۱۰,۵۱۹٤/gmd-۲۰۱۹-۱۳۱.

Hannart, A., A. Ribes and P. Naveau. ۲۰۱٤. Optimal fingerprinting under multiple sources of uncertainty. *Geophysical Research Letters*, **٤۱**:۱۲٦۱-۱۲٦۸, **DOI:** ۱۰,۱۰۰۲/۲۰۱۳GL۰۵۸٦۵۳.

Hasselmann, K. ۱۹۹۳. Optimal fingerprints for the detection of time dependent climate change. *Journal of Climate*, **٦**:۱۹۵۷–۱۹۷۱, **DOI**: https://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. **۷**:**۱٤۱۵**–۱٤۲۵, **DOI:** https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/qj.٤۹۷۱۰٦٤٤۹۱۸.

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., and F. W. Zwiers .۲۰۱۱. Use of models in detection and attribution of climate change. *WIREs Climate Change*, **۲**:۵۲۰–۵۹۰, **DOI:**۱۰,۱۰۰۲/wcc.۱۲۱.

Intergovernmental Panel on Climate Change.۲۰۱۰. Meeting report of the Intergovernmental Panel on climate change expert meeting on detection and attribution related to anthropogenic climate change, report, pp. ۵۵, IPCC, Working Group I Technical Support Unit, Univ. of Bern, Bern, Switzerland.

Marvel K., and C, Bonfils. ۲۰۱۳. Identifying external influences on global precipitation, *PNAS*, **٤۸**: ۱۹۳۰۱-۱۹۳۰٦, **DOI:** https://doi.org/۱۰,۱۰۷۳/pnas.۱۳۱٤۳۸۲۱۱۰.

Mondal, A.; P. P. Mujumdar. ۲۰۱۲. On the basin-scale detection and attribution of human-induced climate change in monsoon precipitation and stream flow. *Water Resources Research*, **٤۸**:۱۰۵۲۰. **DOI:** ۱۰,۱۰۲۹/۲۰۱۱WR۰۱۱٤٦۸.

Peng, D.; T. Zhou, L. Zhang and L.Zou. ۲۰۱۹. Detecting human influence on the temperature changes in Central Asia. *Climate Dynamics*, **۵۳**:٤۵۵۳–٤۵٦۸. **DOI**: http//:doi.org.۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۹-۰٤۸۰٤-۲.

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., L. Terray, and S. Planton .۲۰۱۳.Application of regularized optimal fingerprinting to attribution. Part I: method, properties and idealized analysis. *Climate Dynamics*, **٤۱**:۲۸۱۷-۲۸۳٦, **DOI:** ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۳-۱۷۳۵-۷.

Scinocca, J.F., V.V. Kharin, Y. Jiao, M.W. Qian, M. Lazare, L. Solheim, G.M. Flato, S. Biner, M. Desgagne, and B. Dugas. ۲۰۱٦. Coordinated Global and Regional Climate Modeling. *J. Climate*, ۲۹:۱۷–۳۵, **DOI:** https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/JCLI-D-۱۵-۰۱٦۱,۱.

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]

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 ۱۹٦٦–۲۰۰۵ 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:** https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/JCLI-D-۱۲-۰۰۵۰۲,۱.

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:** ۵۲۵۲-۵۲۵۷, **DOI:** ۱۰,۱۰۰۲/grl.۵۱۰۱۰.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.93]