

پیش بینی و تحلیل امواج گرمایی شهر زنجان با استفاده از ریز گردان LARS-WG و شاخص بالدی

برومند صلاحی*

استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

زینب قدرتی

دانشجوی دکترای تخصصی اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۶

چکیده

موج‌های گرمایی یکی از مهم‌ترین بلاهای آب‌وهوایی است که پیامدهای زیست‌محیطی را بر طبیعت بر جای می‌گذارند. هدف اصلی پژوهش، پیش‌بینی امواج گرمایی شهرستان زنجان در دو بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۹ و ۱۴۲۵-۱۴۴۴ توسط نرم‌افزار LARS-WG با دو مدل HadCM3 و BCM2 و با سناریوی A1B است. پس از آماده‌سازی و کنترل کیفی، داده‌ها به صورت روزانه وارد نرم‌افزار LARS-WG شدند و خروجی مدل پس از صحت‌سنجی توسط روش‌های آماری، برای تحلیل موج گرمایی با استفاده از شاخص بالدی آماده شد. نتایج پژوهش نشان داد که بر اساس مقادیر R^2 ، RMSE، MAE و آزمون کولموگروف اسمیرنوف، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در ایستگاه مورد مطالعه از دقت قابل قبولی برخوردارند. نتایج پژوهش همچنین نشان داد که در شهر زنجان بر اساس دو مدل BCM2 و HadCM3، موج کوتاه گرمایی در هر دو بازه روند افزایشی داشته است. بیشترین فراوانی موج کوتاه گرمایی در بازه زمانی اول در ماه‌های خرداد و تیر قرار دارد و در بازه زمانی دوم، فراوانی امواج کوتاه گرمایی در ماه‌های فروردین و اردیبهشت بیشتر شده و در نتیجه با توجه به پیش‌بینی انجام گرفته در هر دو مدل، بر تعداد روزهای گرم افزوده می‌شود. بر اساس پیش‌بینی انجام شده بر اساس مدل BCM2، طول دوره گرم در ایستگاه مورد مطالعه در حال افزایش است و ماه‌های خنک فصل بهار به تدریج به سمت گرم‌تر شدن پیش می‌روند. با توجه به پیش‌بینی انجام شده بر اساس مدل BCM2، احتمال جابه‌جایی فصول در این ایستگاه در سال‌های آینده وجود دارد و به تدریج فصل بهار به لحاظ ویژگی‌های اقلیمی به فصل تابستان شباهت زیادی پیدا خواهد کرد. با توجه به پیش‌بینی انجام شده بر اساس مدل HadCM3، موج کوتاه گرمایی در بازه زمانی اول روند افزایشی تندتری نسبت به بازه زمانی دوم دارد و در دوره زمانی دوم، تغییرات فراوانی امواج گرمایی کوتاه بیشتر است و در کل، روند افزایشی دمای ایستگاه سینوپتیک زنجان را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی موج گرمایی، شهرستان زنجان، شاخص بالدی، مدل LARS-WG.

مقدمه

پژوهش حاضر به‌منظور پیش‌بینی روند امواج گرمایی شهرستان زنجان که رویدادی فرین است انجام گرفته است. رویداد فرین عبارت است از پدیده نادری که از دیدگاه آماری در ناحیه‌های بالا و پایین توزیع آماری قرار گیرد و از این‌رو، احتمال وقوع آن رویداد خیلی کم است (رحیم زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۲۵). پدیده‌های حدی را می‌بایست، شاخصه‌های اصلی تغییرات اقلیمی دانست که مطالعه بر روی آن‌ها می‌تواند نتایج ملموس‌تری از تغییرات را نشان دهد. پدیده‌های حدی به اتفاق‌های نادری اطلاق می‌شوند که از دیدگاه آماری در ناحیه بالا و پایین توزیع آماری قرار می‌گیرند به‌طوری که احتمال وقوع آن کم باشد (اسماعیلی و کوهی، ۱۳۹۱: ۸۴). روند تغییرات دما در چند دهه اخیر در حال افزایش بوده و این تغییرات در مناطقی همچون ایران که در کمربند خشک و نیمه‌خشک دنیا واقع شده است چشمگیرتر است. (یزدان پناه و علیزاده، ۱۳۹۰: ۵۲). تغییرپذیری و تنوع آب و هوا، رخداد زمانی - مکانی دماهای حدی را تعیین می‌کند (اسمعیل نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). در ایران دمای هوا به‌شدت تابع ارتفاع و عرض جغرافیایی و محتوای رطوبتی جو است که اثر ارتفاع صدها برابر عرض جغرافیایی است. حاکمیت پرفشار جنب‌حاره‌ای در دوره گرم سال اثر چشمگیری بر دمای ایران دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دمای شبانه‌روزی ایران با آهنگ ۲ درجه در هر صد سال در حال افزایش است و این بدان معناست که ایران نه‌تنها در منطقه گرمسیر جهان قرار گرفته است و میانگین دمای شبانه‌روزی آن ۱۸ درجه سلسیوس است بلکه رو به گرم‌تر شدن هم می‌رود و نسبت به ۵۰ سال گذشته ۱ درجه سلسیوس گرم‌تر شده است. این در حالی است که افزایش دمای جهانی حدود ۰/۵ درجه سلسیوس در هر صد سال برآورد می‌شود. در این صورت آهنگ گرم شدن ایران ۴ برابر سرعت جهانی است (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۹۵). موج گرمایی از مهم‌ترین بلایای آب‌وهوایی بوده که هر سال پیامدهای زیست‌محیطی مخربی را در طبیعت بجای می‌گذارند. اندازه‌گیری این گرما در رابطه با هوای معمول و دمای نرمال منطقه برای آن فصل انجام می‌شود. امواج گرمای شدید می‌توانند امواج گرمایی می‌تواند در مقیاس محلی روی دهند و سبب از دست رفتن محصول کشاورزی، مرگ‌ومیر قابل‌توجه در اثر گرم‌زدگی، دیگر مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی شدند. امواج گرمایی خسارات اقتصادی بالایی به جنگل‌ها به دلیل آتش‌سوزی و مرگ‌ومیر انسان‌ها به وجود می‌آورند. برآورد ابتدایی خسارات امواج گرمایی در جهان بیش از ۱۳ میلیارد دلار است. موج گرمایی یکی از بدترین فجایع آب‌وهوایی است که پیش‌بینی مناسب و به‌موقع آن می‌تواند، یک سیستم هشدار دهنده کارآمد بسیار مطلوب باشد (بالدی، ۲۰۰۴).

جهانبخش و ترابی (۱۳۸۳)، به بررسی و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در ایران پرداختند و با استفاده از آمار ۴۱ ایستگاه سینوپتیک به روش تحلیل خوشه‌ای ۵ منطقه اقلیمی همگون را مشخص کردند. تقوی و محمدی (۱۳۸۵)، به بررسی دوره بازگشت رویدادهای حدی به‌منظور شناخت پیامدهای زیست‌محیطی پرداختند و با استفاده از نرم‌افزار شاخص‌های اقلیمی حدی ECIS دوره بازگشت پدیده‌های حدی را در دوره آماری (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دهه آخر قرن بیستم (۲۰۰۰-۱۹۹۰) تعیین کردند. نتایج نشان داد که فراوانی وقوع شاخص‌های حدی گرم و بارش بیشتر شده است. یزدان

پناه و علیزاده (۱۳۹۰) به برآورد احتمال وقوع امواج گرمایی با دوره‌های تداوم مختلف در استان کرمان به کمک زنجیره مار کف پرداختند. اسمعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از آمار روزانه حداکثر دما در ۶۶۳ ایستگاه همدید و اقلیمی طی دوره آماری ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۲ به شناسایی امواج گرمایی ایران پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که موج‌های گرمایی کوتاه رخداد بیشتری داشته است و تعداد امواج گرمایی پرتداوم کمتر بوده است. اسدی و مسعودیان (۱۳۹۳)، به پهنه‌بندی بر پایه دماهای فرین بالا در دوره زمانی ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۳ پرداختند و نشان دادند که ایران را می‌توان به ۵ ناحیه از نظر گرمای فرین تقسیم کرد. دارند (۱۳۹۳)، به شناسایی و تحلیل زمانی- مکانی امواج گرمایی ایران پرداخت. یافته‌ها نشان داد که بسامد رخداد امواج گرمایی و ماندگاری و شدت آن در ایران رو به افزایش است. مجرد و همکاران (۱۳۹۴)، به تحلیل آماری همیدی امواج گرمایی بالای ۴۰ درجه سلسیوس در غرب ایران پرداختند و دو الگوی کلی برای ایجاد امواج گرمایی در منطقه را تشخیص دادند. سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی عملکرد مدل‌های ریز گردان LARS- WG و SDSM در شبیه‌سازی بارش و دما در ایستگاه‌های روانسر و کرمانشاه پرداختند نتیجه‌گیری شده است که در هر دو مدل، حداقل و حداکثر دما در دو دهه آینده تحت سناریوی A2 در هر یک از ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که در هر یک از دوره‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی، مدل SDSM از یک عملکرد مناسب‌تر نسبت به LARS- WG در شبیه‌سازی حداقل روزانه و حداکثر درجه حرارت در دو ایستگاه بهره‌مند می‌شود، در حالی که مدل LARS- WG عملکرد قابل قبولی را در شبیه‌سازی بارش باران روزانه ارائه می‌دهد.

کیسلی^۱ (۲۰۰۲)، به بررسی امواج گرما در پراگ و روابط آن‌ها با گردش اتمسفر پرداخت. بالدی^۲ و همکاران (۲۰۰۴)، به مطالعه موج گرمایی بر فراز مدیرانه پرداختند و با استفاده از داده‌های NCAR/NCEP و داده‌های حداقل و حداکثر دما در سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۳ دریافتند که موج گرمایی کوتاه‌مدت در ماه ژولای و موج گرمایی بلندمدت در ماه اوت اتفاق می‌افتد. هرلینگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی گرمای ثبت شده در سال ۲۰۰۶ پرداختند. کوزلوسکی^۴ و همکاران (۲۰۰۷)، به تجزیه و تحلیل شکست موج گرما در جولای ۲۰۰۶ در سراسر ایالت کالیفرنیا پرداختند. مکسول^۵ (۲۰۰۷)، به تجزیه و تحلیل گرمای شدید ۲۲ تا ۲۳ جولای در شهر سن دیگو پرداخت. اروپ^۶ و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی روند و عدم قطعیت زیاد دما و امواج گرمایی در قرن ۲۱ پرداختند. مدل سیستم جهانی زمین نشان داد که گرما و امواج گرمایی شدید به همراه عدم قطعیت بالا و تغییرپذیری شدید در قرن ۲۱ در حال افزایش است و روند گرم شدن کره زمین ادامه دارد. تامرازین^۷ و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی موج گرمایی در جنوب کالیفرنیا در رابطه با تکرار و مدت زمان این پدیده فرین پرداختند و نشان دادند که لس‌آنجلس در حال گرم شدن است. آن‌ها با بررسی دمای حداقل و حداکثر روزانه در سال‌های ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۶ همچنین دریافتند که متوسط حداکثر دما در ایستگاه مورد مطالعه ۲/۸ درجه

1. Kysely
2. Baldi
3. Hoerling
4. Kozlowski
5. Maxwell
6. Auroop
7. Tamranzian

سانتی‌گراد افزایش داشته است در حالی که متوسط حداقل دما $3/2$ درجه بالاتر رفته است. بومباکو^۸ و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی تاریخچه امواج گرمایی در شمال غربی اقیانوس آرام با استفاده از تحلیل روند و سینوپتیکی پرداختند و معلوم کردند که فراوانی امواج گرمایی در بیشتر قسمت‌های ایالات متحده در حال افزایش است. تواردوژ و کوزوفسکا^۹ (۲۰۱۳)، به بررسی تابستان‌های بسیار داغ در مرکز و شرق اروپا از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ پرداختند و دریافتند که فراوانی تابستان گرم رو به افزایش است. نتایج بررسی‌های مذکور نشان دادند که رخداد امواج گرمایی به مناطق خاصی محدود نبوده و امکان رخداد آن در همه مکان‌ها وجود دارد. نوری و همکاران (۲۰۱۴)، به مقایسه ژنراتورهای آب‌وهوایی SDSM و LARS-WG در مدل‌سازی تغییرات آب و هوا در استان گلستان پرداختند. هدف از این مقاله، پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی بر اساس مدل‌های گردش عمومی (GCM)، با استفاده از دو ژنراتور هواشناسی، یعنی SDSM و LARS-WG، در استان گلستان در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ است و مقایسه نتایج آن برای انواع مختلف آب‌وهوایی از داده‌های مشاهداتی و مصنوعی مانند طول سری‌های مرطوب و خشک، توزیع بارش و دما است. عثمان و همکارانش (۲۰۱۴)، به پیش‌بینی آینده بارش عراق با استفاده از لارس پرداختند و تغییرات بارش را بر اساس خروجی مدل GCM از سناریو A2 از سال ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ بررسی کردند. نتایج تغییرات بارش با روند شدید را نشان داد. عثمان و همکارانش (۲۰۱۷)، به بررسی مدل تغییرات اقلیمی به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی برای مدیریت منابع آب در شمال عراق با مطالعه موردی رودخانه بزرگ زاب پرداختند که نتایج حاصل از اثرات مدل نشان می‌دهد که جریان کل سالانه در حوضه آبریز در آینده به شدت کاهش می‌یابد. در ایران نیز به‌ویژه در سال‌های اخیر شاهد افزایش روزافزون روزهای گرم هستیم که به دنبال وقوع امواج گرمایی رخ می‌دهند. شهرستان زنجان نیز در سال‌های اخیر درگیر این مسئله بوده و با توجه به نیمه‌خشک بودن اقلیم آن منطقه و بیلان منفی آب، وجود امواج گرمایی می‌تواند این بیلان منفی را تشدید نموده و مشکلات ناشی از آن را تقویت کند. لذا در این پژوهش سعی شده است امواج گرمایی این شهرستان بر اساس برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو و تحت ریز گردان LARS-WG که امروزه مورد قبول پژوهشگران است مورد واکاوی قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهر زنجان برای ارزیابی موج گرمایی در دهه‌های اخیر استفاده شده است. به دلیل اینکه ایستگاه سینوپتیک زنجان حاوی داده‌های مورد نیاز این پژوهش است و معرف شهر زنجان می‌باشد از آن استفاده گردیده است. (جدول ۱)، مشخصات ایستگاه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد (شکل ۱)، نیز موقعیت جغرافیایی شهرستان زنجان را نشان می‌دهد.

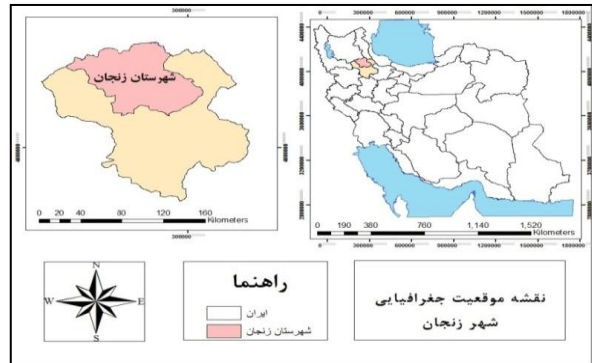
8. Bumbaco

9. Twardosz & Kossowska

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
زنجان	۴۸ ۲۹	۳۶ ۴۱	۱۶۶۳

مأخذ: نگارندگان



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در پژوهش پیش رو پس از آماده سازی و کنترل کیفی داده ها، متغیرها به صورت روزانه وارد مدل LARS-WG شدند. مدل LARS-WG مدلی است که خروجی مدل های GCM را ریزمقیاس می کند. در این مقاله توانائی مدل LARS-WG در شبیه سازی داده های مشاهده شده در ایستگاه زنجان مورد ارزیابی قرار گرفت. این فرایند به سه مرحله تقسیم می شود که شامل تجزیه و تحلیل مکانی، اعتبار سنجی مدل و تولید داده های مصنوعی آب و هوا است. مدل مورد استفاده در این پژوهش مدل HadCM3 و BCM2 تحت سناریوی A1B است. با ترکیب این مدل-سناریو، گرمایی شهر زنجان در دو بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ (۱۴۰۹-۱۳۹۰) و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ (۱۴۴۶-۱۴۲۵) به عنوان یک پدیده حدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده های ورودی مدل های مورد استفاده در این پژوهش شامل متغیرهای بارش، حداقل دما، حداکثر دما و ساعت های آفتابی در مقیاس روزانه طی دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۹۹۲ می باشند که با توجه به موضوع پژوهش، از داده های خروجی حداکثر دمای ایستگاه مورد مطالعه استفاده شده است.

مدل گردش عمومی HadCM3، یکی از مدل های جفت شده اقیانوسی - جوی توسط مرکز پژوهش ها و پیش بینی اقلیمی هادلی در بریتانیا طراحی و ارائه شده است. قدرت تفکیک مدل شبکه ای با ابعاد ۲/۷۵ درجه عرض جغرافیایی و ۳/۷۵ طول جغرافیایی و قدرت تفکیک اقیانوسی آن ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی و ۲/۷۵ درجه طول جغرافیایی می باشد (معافی مدنی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین در این مطالعه از مدل گردش عمومی جو - اقیانوس BCM2 که دارای قدرت تفکیک افقی ۱/۵ درجه عرض جغرافیایی در ۱/۵ درجه طول جغرافیایی است و توسط مرکز تحقیقات اقلیمی دانشگاه برگن نروژ ارائه شده نیز استفاده گردیده است. مدل های مذکور، تحت سناریوی A1B که زیرمجموعه سناریوی A1 می باشند، برای مدل سازی تغییرات اقلیمی در آینده مورد استفاده قرار گرفته اند. سناریوی A1B از نظر تخمین شرایط اقلیم آینده، در حداقل بین سناریوهای خانواده A1 و B1 قرار دارد که به ترتیب، جهانی با رشد بسیار سریع اقتصادی و

جمعیتی تا نیمه‌های قرن حاضر و جهانی همگون با افزایش مداوم جمعیت تا نیمه قرن ۲۱ را برای آینده پیش‌بینی می‌کند.

در پژوهش حاضر پس از بازتولید و آنالیز داده‌های تولید شده توسط مدل‌های ذکر شده، جهت ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک زنجان در دوره مشاهداتی از آزمون اسمیرنوف و آماره p-value و همچنین رسم نمودار استفاده شده است و پس از آن به مدل‌سازی رفتار آینده حداکثر دما و موج گرمایی در دو بازه پرداخته شده است. داده‌های حداکثر دما پس از استخراج با استفاده از شاخص بالدی در شش ماه گرم سال به امواج گرمایی کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم شده‌اند. بر اساس شاخص بالدی ابتدا میانگین و انحراف معیار حداکثر دما محاسبه می‌شود. در این پژوهش از شاخص بالدی با توجه به رابطه $\sigma_1 = m + 1.5$ استفاده شده است. در این رابطه، m میانگین و σ انحراف معیار است که برای هر ایستگاه به‌طور جداگانه محاسبه شده است و روزهایی که آمار حداکثر دما از شاخص مورد نظر بیشتر بوده به دو دسته موج گرمایی کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم شده است که دسته اول امواجی هستند که بین ۱ تا ۳ روز تداوم داشتند و دسته دوم امواجی هستند که ۶ روز یا بیشتر تداوم داشته‌اند (بالدی: ۲۰۰۴). جهت ارزیابی توانایی کلی مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی در دوره تحت بررسی، از شاخص‌های خطای مطلق (MEA)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است.

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^K |X_k - Y_k|}{K} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (X_k - Y_k)^2}{K}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^K X_k Y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^K X_k^2 \sum_{k=1}^K Y_k^2}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

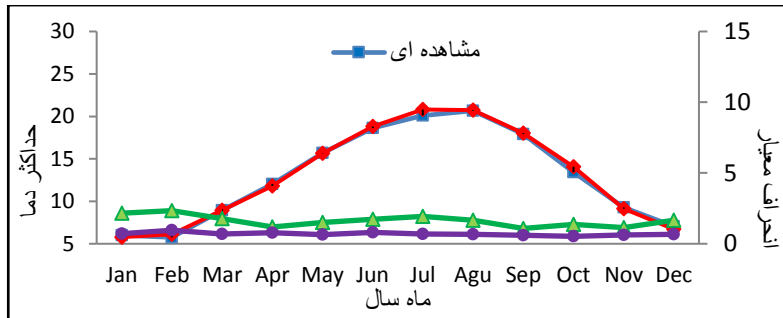
یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج حاصل شده و مقادیر R^2 ، RMSE، MAE و آزمون کولموگروف اسمیرنوف، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر سه ایستگاه از دقت قابل قبولی برخوردارند. با توجه به (شکل ۲)، در ایستگاه سینوپتیک زنجان بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌سازی شده مطابقت خوبی وجود دارد اما این مطابقت در مورد مقادیر انحراف معیار وجود ندارد. در مورد دما، متفاوت بودن انحراف معیار مقادیر مدل‌سازی شده نسبت به انحراف معیار مشاهداتی یکی از ضعف‌های مدل لارس محسوب می‌شود (مشکواتی و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۸). (شکل ۳)، نیز همبستگی بالایی بین حداکثر دمای مشاهده شده و مدل‌سازی شده را تأیید می‌کند و مقدار R^2 به عدد یک نزدیک است بنابراین مقدار ضریب تعیین نیز همبستگی بالا را تأیید می‌کند. بر اساس (جدول ۳)، مقادیر RMSE و MEA نیز حداقل خطای ممکن را نشان می‌دهد که قابل چشم‌پوشی است.

جدول ۲: مقادیر آزمون کولموگروف اسمیرنوف و P-value آن برای ایستگاه سینوپتیک زنجان در ۶ ماه گرم سال

ایستگاه	RMSE	MAE	R ²
زنجان	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۹۸

مأخذ: نگارندگان



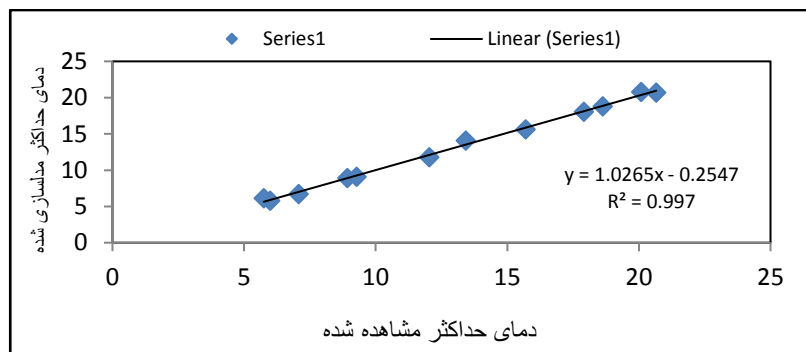
مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

جدول ۳: مقادیر R2, MAE, RMSE

ماه	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر
KS statistic	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۱۰۶	۰/۱۵۸	۰/۱۰۵	۰/۱۰۶
P-value	۱	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۹۹

مأخذ: نگارندگان



مأخذ: نگارندگان

شکل ۳: رابطه دمای حداقل مشاهده شده و شبیه‌سازی شده

پیش‌بینی بر اساس مدل BCM2

با استفاده از شاخص بالدی روزهای موج گرمایی کوتاه‌مدت و بلندمدت شناسایی شد. بر اساس تعریف بالدی (۲۰۰۴)، موج گرمایی عبارت است از روزهایی که دمای حداکثر آنها بین ۱ تا ۶ روز است موج گرمایی کوتاه‌مدت است و روزهای بالاتر از ۶ روز موج گرمایی بلندمدت نام‌گرفته است. نتایج حاصل از پیش‌بینی موج گرمایی بر اساس مدل BCM2 در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۶ در (جدول ۴-۶) آمده است.

جدول ۴: تعداد موج‌های کوتاه مدل BCM2 بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰

موج کوتاه	موج بیش از یک روز	
۴۵	۶	فروردین
۴۷	۱۲	اردیبهشت
۵۳	۷	خرداد
۴۵	۱۰	تیر
۵۰	۹	مرداد
۴۸	۱۲	شهریور

مأخذ: نگارندگان

جدول ۵: تعداد موج‌های کوتاه مدل BCM2 بین سال‌های ۲۰۶۵ تا ۲۰۴۶

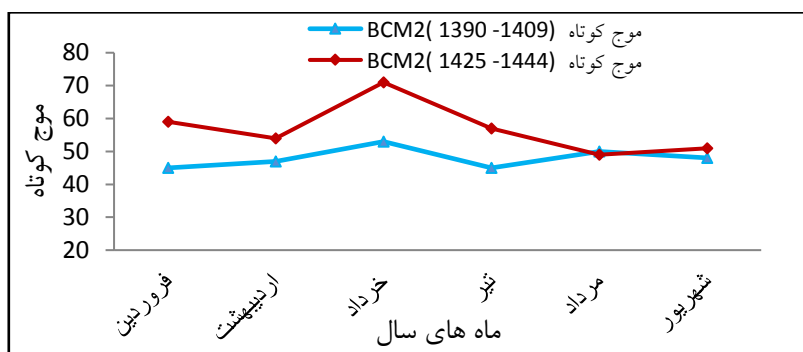
موج کوتاه	موج بیش از یک روز	
۵۹	۱۱	فروردین
۵۴	۸	اردیبهشت
۷۱	۱۰	خرداد
۵۷	۱۱	تیر
۴۹	۱۱	مرداد
۵۱	۶	شهریور

مأخذ: نگارندگان

جدول ۶: تعداد روزهای موج گرمایی کوتاه بر اساس شاخص بالدی به تفکیک سال آماری مورد پیش‌بینی بر اساس مدل BCM2

سال آماری	موج گرمایی	سال آماری	موج گرمایی	سال آماری	موج گرمایی	سال آماری	موج گرمایی
۱۳۹۰	۸	۱۴۰۰	۸	۱۴۲۵	۸	۱۴۳۵	۸
۱۳۹۱	۷	۱۴۰۱	۹	۱۴۲۶	۷	۱۴۳۶	۱۰
۱۳۹۲	۷	۱۴۰۲	۷	۱۴۲۷	۱۰	۱۴۳۷	۷
۱۳۹۳	۷	۱۴۰۳	۱۱	۱۴۲۸	۸	۱۴۳۸	۸
۱۳۹۴	۶	۱۴۰۴	۷	۱۴۲۹	۵	۱۴۳۹	۸
۱۳۹۵	۱۰	۱۴۰۵	۷	۱۴۳۰	۷	۱۴۴۰	۸
۱۳۹۶	۱۰	۱۴۰۶	۶	۱۴۳۱	۸	۱۴۴۱	۱۰
۱۳۹۷	۶	۱۴۰۷	۷	۱۴۳۲	۹	۱۴۴۲	۹
۱۳۹۸	۶	۱۴۰۸	۸	۱۴۳۳	۷	۱۴۴۳	۷
۱۳۹۹	۹	۱۴۰۹	۷	۱۴۳۴	۷	۱۴۴۴	۱۰

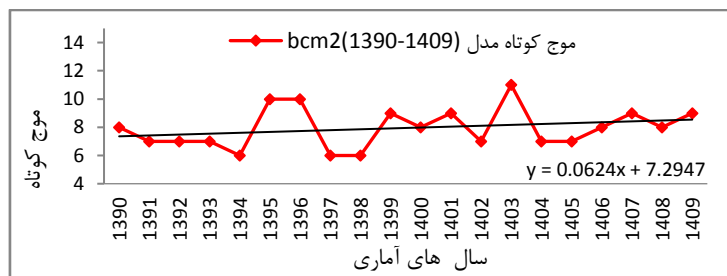
مأخذ: نگارندگان



مأخذ: نگارندگان

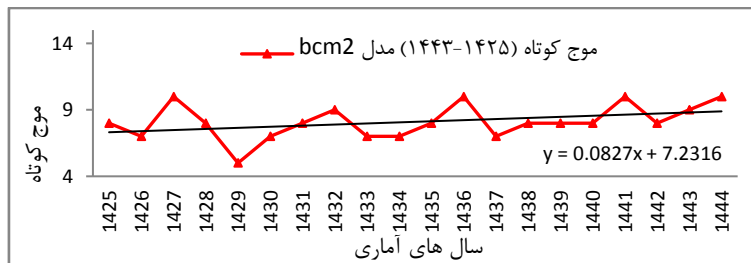
شکل ۴: نمودار موج کوتاه در ماه‌های آماری مدل bcm2

بر اساس (جدول ۶)، بیشترین فراوانی موج کوتاه در ماه‌های آماری با مدل $bcm2$ مربوط به سال‌های ۱۳۹۵، ۱۳۹۶، ۱۴۰۳، ۱۴۲۷ و ۱۴۳۶ است. در تمام سال‌های پیش‌بینی، فراوانی امواج کوتاه بیش از ۶ موج کوتاه در سال بوده است و بر اساس (جدول ۴ و ۵)، در سال‌های بین ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۹ در ماه‌های خرداد تا شهریور فراوانی امواج کوتاه بیشتر بوده و در سال‌های بین ۱۴۲۵ تا ۱۴۴۴ سیر روند به سمت ماه‌های اول دوره گرم سال بوده است بنابراین طول دوره گرم در حال افزایش بوده و فصول خنک‌تر در ماه‌های بهار به تدریج به سمت گرم‌تر شدن می‌رود. با توجه به پردازش مدل مذکور، روند دمای جهانی به سمت گرمایش را به‌نوعی تأیید می‌کند. با این تحلیل، در سال‌های آتی دمای این ایستگاه روند مثبت گرفته و در نتیجه گرمایش را به همراه خواهد داشت و احتمال جابه‌جایی فصول در این ایستگاه‌ها در سال‌های آینده وجود دارد. به‌مرور زمان فصل بهار به لحاظ ویژگی‌های اقلیمی به فصل تابستان شباهت زیادی پیدا خواهد کرد و این امر می‌تواند تبعات نامناسبی به لحاظ زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بسیاری از مسائل دیگر برای این منطقه به دنبال داشته باشد. با توجه به (شکل ۴)، بر مبنای پیش‌بینی مدل $BCM2$ ، بیشترین تعداد موج‌های کوتاه در ماه LARS ای خرداد و تیر است و ماه‌هایی که در دوره گرم دمای بالاتری دارند با توجه به روند نمودار به‌سوی گرمای بیشتر پیش می‌روند. موج کوتاه در بازه زمانی اول (۱۳۹۰-۱۴۰۹) روند ملایمی با یک اوج در ماه خرداد و تیر دارد اما در بازه زمانی دوم (۱۴۲۵-۱۴۴۴) فراوانی در تمام ماه‌ها شدت گرفته است و نسبت به بازه زمانی اول تغییر کرده است و همچنان بیشترین فراوانی در ماه خرداد و تیر قرار دارد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۵: نمودار پیش‌بینی مدل $BCM2$ در سال ۱۳۹۰-۱۴۰۹



مأخذ: نگارندگان

شکل ۶: نمودار پیش‌بینی مدل $BCM2$ در سال ۱۴۲۵-۱۴۴۴

شکل‌های (۵ و ۶)، شیب تغییرات موج کوتاه گرمایی را نشان می‌دهد و سیر صعودی را در طی روند مدل‌سازی تأیید می‌کند. بر اساس BCM2 سیر صعودی شیب ملایمی دارد و روند نشان می‌دهد که موج کوتاه در سال‌های آتی افزایش می‌یابد و در نتیجه دوره گرم بر اساس پیش‌بینی مدل در آینده گرم‌تر خواهد بود. بر اساس مطالعات مسعودیان (۱۳۹۰: ۹۶)، افزایش دما در همه ماه‌ها یکسان نبوده است. در نیمه گرم سال، آهنگ افزایش دما بیشتر بوده است و در نیمه سرد سال آهنگ افزایش دما آرام‌تر و گاهی روند کاهش دما دیده می‌شود؛ بنابراین تفاوت دمای نیمه گرم و سرد سال در کشور رو به افزایش است و رژیم گرمایی کشور الگوی قاره‌ای قوی‌تری پیدا کرده است. بر اساس پیش‌بینی مدل BCM2 نیز روند گرما در آینده افزایشی است.

پیش‌بینی بر اساس مدل HadCM3

تعداد موج‌های کوتاه گرمایی بر اساس خروجی مدل HadCM3 با سناریو A1B برای ایستگاه سینوپتیک زنجان در (جداول ۷ تا ۹) و (شکل ۷)، ارائه شده است. پیش‌بینی مدل HadCM3 (جداول ۷ و ۸) نشان‌دهنده این مطلب است که در دوره گرم در بازه اول سال آماری از ماه خرداد تا شهریور تعداد فراوانی موج گرمایی بیشتر است و در بازه دوم سال آماری این روند ادامه یافته است با این تفاوت که فراوانی امواج کوتاه نسبت به دوره اول اندکی کمتر شده است اما تعداد روزهایی امواج کوتاه بیش از یک روز افزایش یافته است بر اساس این جداول و پیش‌بینی مدل، روند دمایی در زنجان افزایشی است. با توجه به (جدول ۹)، سال‌های ۱۳۹۵، ۱۴۰۹، ۱۴۳۰، ۱۴۳۹ و ۱۳۴۹ بیشترین فراوانی موج کوتاه را دارند. مقایسه پیش‌بینی مدل BCM2 و HadCM3 در سال‌های آماری نشان می‌دهد که در پیش‌بینی به تفکیک سال‌ها در مدل BCM2 فراوانی موج‌های کوتاه بیشتر است در حالی که در مدل HadCM3 فراوانی موج‌های کوتاه کمتر است اما تعداد روزهای موج کوتاه متوالی بیشتر شده است و با توجه به شکل ۷، فراوانی موج‌های کوتاه پیش‌بینی شده بر اساس مدل، دو نقطه اوج را نشان می‌دهد که فراوانی بیشتر در هر دو بازه زمانی بین ماه‌های خرداد و تیر و دومین اوج فراوانی در هر دو بازه زمانی در ماه شهریور اتفاق افتاده است. موج کوتاه در بازه زمانی اول یک‌روند افزایشی تندتر نسبت به بازه زمانی دوم دارد. در بازه زمانی دوم تغییرات فراوانی امواج کوتاه بیشتر است در کل روند افزایشی دمای ایستگاه سینوپتیک زنجان را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس نمودارهای ماهانه تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد.

جدول ۷: تعداد موج‌های کوتاه گرمایی مدل HadCM3 بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۹

موج کوتاه	موج بیش از یک روز	
۴۲	۳	فروردین
۴۱	۶	اردیبهشت
۵۴	۱۲	خرداد
۵۳	۶	تیر
۵۰	۱۵	مرداد
۶۵	۹	شهریور

مأخذ: نگارندگان

جدول ۸: تعداد موج‌های کوتاه گرمایی مدل HadCM3 بین سال‌های ۱۳۲۵ تا ۱۴۴۴

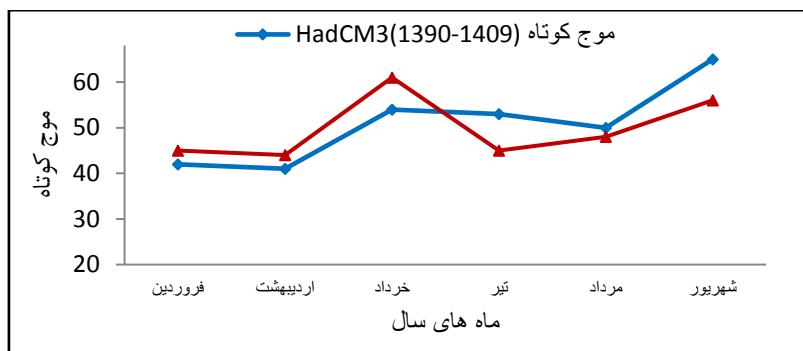
موج بیش از یک روز	موج کوتاه	
۳	۴۵	فروردین
۷	۴۴	اردیبهشت
۱۱	۶۱	خرداد
۸	۴۵	تیر
۱۱	۴۸	مرداد
۱۰	۵۶	شهریور

مأخذ: نگارندگان

جدول ۹: تعداد روزهای موج گرمایی کوتاه بر اساس شاخص بالدی به تفکیک سال آماری مورد پیش‌بینی بر اساس مدل HadCM3

سال آماری	موج کوتاه	سال آماری	موج کوتاه	سال آماری	موج کوتاه	سال آماری	موج کوتاه
۱۳۹۰	۸	۱۴۰۰	۷	۱۴۲۵	۸	۱۴۳۵	۷
۱۳۹۱	۵	۱۴۰۱	۶	۱۴۲۶	۴	۱۴۳۶	۶
۱۳۹۲	۶	۱۴۰۲	۷	۱۴۲۷	۵	۱۴۳۷	۷
۱۳۹۳	۵	۱۴۰۳	۶	۱۴۲۸	۵	۱۴۳۸	۶
۱۳۹۴	۴	۱۴۰۴	۸	۱۴۲۹	۳	۱۴۳۹	۹
۱۳۹۵	۹	۱۴۰۵	۴	۱۴۳۰	۹	۱۴۴۰	۵
۱۳۹۶	۷	۱۴۰۶	۵	۱۴۳۱	۸	۱۴۴۱	۵
۱۳۹۷	۹	۱۴۰۷	۱۰	۱۴۳۲	۹	۱۴۴۲	۱۰
۱۳۹۸	۴	۱۴۰۸	۹	۱۴۳۳	۴	۱۴۴۳	۸
۱۳۹۹	۷	۱۴۰۹	۷	۱۴۳۴	۶	۱۴۴۴	۶

مأخذ: نگارندگان

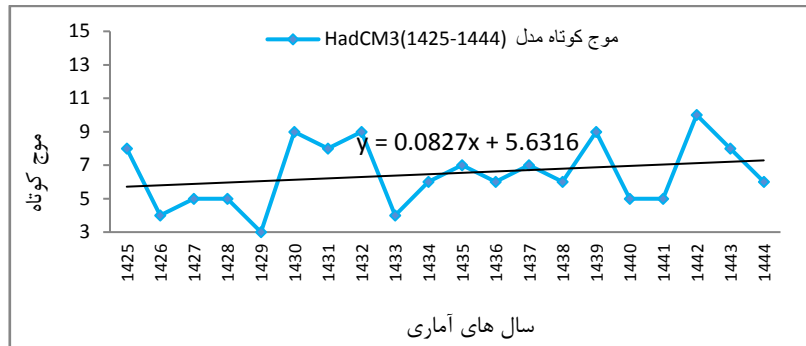


مأخذ: نگارندگان

شکل ۷: نمودار موج کوتاه در ماه‌های آماری مدل HadCM3

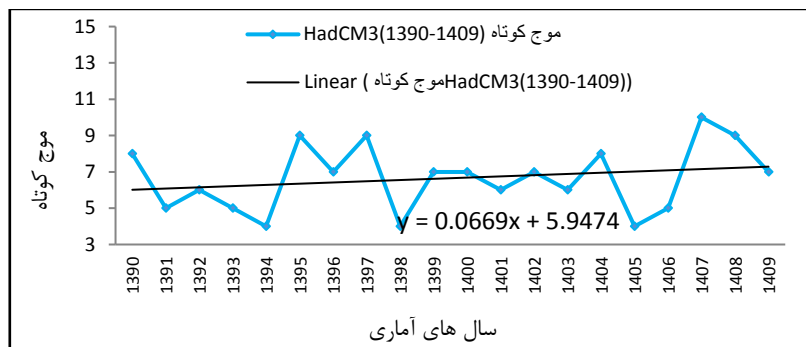
بر اساس پیش‌بینی مدل HadCM3 (شکل‌های ۸ و ۹)، در هر دو بازه زمانی تعداد موج کوتاه در سال‌های آتی افت‌وخیزهای زیادی را نشان می‌دهد ولی در مجموع، شیب خط رگرسیون روند افزایشی را در فراوانی امواج کوتاه نشان می‌دهد؛ بنابراین بر اساس پیش‌بینی این مدل، ایستگاه سینوپتیک زنجان در آینده امواج کوتاه گرمایی بیشتری را در طی دوره گرم خواهد داشت. لازم به ذکر است بر اساس تعریف بالدی که امواج بیش از ۶ روز را موج بلند نامیده است در ایستگاه زنجان امواج متوالی بیش از ۶ روز مشاهده نشده است و مدل‌های مورد بررسی، امواج بلند را برای ایستگاه زنجان پیش‌بینی نکرده‌اند. بر اساس بررسی‌های (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۹۶)، ایران در دهه‌های اخیر دستخوش تغییر فصل

شده است و دوره سرد سال به نفع دوره گرم روند کاهشی داشته است. این مطالعه نیز روند افزایش طول دوره گرم و تغییر فصول در سال‌های آینده در ایستگاه سینوپتیک زنجان که نماینده شهرستان زنجان است را تأیید می‌کند.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۸: نمودار پیش‌بینی مدل HadCM3 در سال ۱۳۹۰-۱۴۰۹



مأخذ: نگارندگان

شکل ۹: نمودار پیش‌بینی مدل HadCM3 در سال ۱۴۴۴-۱۴۲۵

نتیجه‌گیری

با عنایت به مقادیر آماره‌های R^2 ، RMSE، MAE و آزمون کولموگروف اسمیرنوف، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در ایستگاه موردبررسی از دقت قابل قبولی برخوردار است. در ایستگاه سینوپتیک زنجان بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌سازی شده مطابقت وجود دارد اما مقادیر انحراف معیار مطابقت چندانی ندارد و در بین ماه‌های دوره گرم اندکی اختلاف بین داده‌های مدل‌سازی شده و مشاهده شده وجود دارد. بر اساس پیش‌بینی مدل BCM2، طول دوره گرم در ایستگاه سینوپتیک زنجان در حال افزایش است و فصول خنک‌تر در ماه‌های بهار به تدریج به سمت گرم‌تر شدن می‌روند که از این نظر با مطالعات تامرازین و همکاران (۲۰۰۸) و سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. با توجه به پیش‌بینی مدل BCM2، احتمال جابه‌جایی فصول در ایستگاه سینوپتیک زنجان در سال‌های آینده وجود دارد و به‌مرور زمان فصل بهار به لحاظ ویژگی‌های اقلیمی به فصل تابستان شباهت زیادی خواهد کرد. با پیش‌بینی مدل HadCM3، موج کوتاه گرمایی ایستگاه سینوپتیک زنجان در بازه زمانی اول، روند افزایشی تندتری نسبت به بازه زمانی دوم دارد. در بازه زمانی دوم، تغییرات فراوانی امواج کوتاه گرمایی بیشتر است و در کل، روند افزایشی دمای ایستگاه سینوپتیک زنجان را

تأیید می‌کند و پردازش مدل‌های GCM، روند گرمایی ایستگاه سینوپتیک زنجان هم‌راستا با گرمایش جهانی است و در سال‌های آتی، دمای این ایستگاه روند مثبت گرفته و در نتیجه گرمایش را به همراه خواهد داشت که از این منظر نیز با مطالعات اروپا و همکاران (۲۰۰۹) هم‌راستا است. از توانمندی ریز گردان لارس دلبیو جی می‌توان در بازسازی داده‌های دمای حداکثر ایستگاه سینوپتیک زنجان در دوره‌های گذشته و چگونگی ادامه یافتن این روند در آینده بهره جست و اقلیم آینده این ایستگاه من جمله تغییرها فصول را پیش‌بینی کرد. با توجه به اینکه منطقه مورد بررسی در معرض پدیده‌های حدی قرار دارد و این امر به نوبه خود باعث مشکلات جدی مانند بحران‌های آبی خواهد شد و نیز با عنایت به اینکه هنوز روش اصولی برای شناخت آسیب‌پذیری عواملی که باعث تشدید آثار تغییر اقلیم می‌شوند وجود ندارد، نتایج این‌گونه پژوهش‌ها خصوصاً در زمینه مدیریت ریسک بلایای جوی - اقلیمی و تغییر اقلیم می‌تواند همانند مطالعات عثمان و همکاران (۲۰۱۷) برای مدیریت بحران راهگشا باشد. این پژوهش با کارهای مسعودیان (۱۳۹۰)، یزدان پناه و عزیززاده (۱۳۹۰) و اسمعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی نسبی دارد.

منابع

- ۱- اسدی، اشرف، ابوالفضل مسعودیان. (۱۳۹۳): پهنه‌بندی ایران بر مبنای دماهای فرین بالا. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۰، شماره ۴.
- ۲- اسماعیلی، رضا. منصوره کوهی. (۱۳۹۱): پهنه‌بندی وقوع آخرین یخبندان‌های دیررس خراسان رضوی با استفاده از خروجی مدل اقلیمی. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، شماره ۱۷.
- ۳- اسمعیل نژاد، مرتضی. محمود خسروی و بهلول علیجانی و ابوالفضل مسعودیان. (۱۳۹۲): شناسایی امواج گرمایی ایران جغرافیا و توسعه، شماره ۳۳.
- ۴- تقوی، فرحناز، محمدی، حسین (۱۳۸۶): بررسی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی به‌منظور شناخت پیامدهای زیست‌محیطی، محیط‌شناسی، سال سی و سوم، شماره ۴۳.
- ۵- جهانبخش، سعید. سیما ترابی. (۱۳۸۳): بررسی و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در ایران. فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۴.
- ۶- دارند، محمد. (۱۳۹۳): شناسایی و تحلیل زمانی - مکانی امواج گرمایی ایران زمین. جغرافیا و توسعه، شماره ۳۵.
- ۷- رحیم زاده، فاطمه. احمد عسگری و ابراهیم فتاحی و نوشین محمدیان و افسانه تقی پور. (۱۳۸۸): روند نمایه‌های حدی اقلیمی دما در ایران طی دوره ۲۰۰۳-۱۹۵۱، نشریه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۴ شماره ۲، پیاپی ۹۳.
- ۸- سلاجقه، علی. الهام رفیعی ساردوئی و علیرضا مقدم نیا و آرش ملکیان و شهاب عراقی نژاد و شهرام خلیقی سیگارودی و امین صالح پور جم. (۱۳۹۶): بررسی کارایی مدل‌های ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی دما و بارش، تحقیقات آب‌و‌خاک ایران، دوره ۴۸، شماره ۲.
- ۹- مجرد، فیروز. جعفر معصوم پور و طیبه رستمی. (۱۳۹۴): تحلیل آماری - هم‌بندی امواج گرمایی بالای ۴۰ درجه سلسیوس در غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات طبیعی، ۴(۱۳).
- ۱۰- مسعودیان، ابوالفضل. (۱۳۹۰): آب‌وهوای ایران، ناشر شریعه توس، چاپ اول.

- ۱۱- مشکواتی، امیرحسین. محمد کردجزی و ایمان باباییان. (۱۳۸۹): بررسی و ارزیابی مدل لارس در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی استان گلستان در دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۳ میلادی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۱۹.
- ۱۲- معافی مدنی، سیده فاطمه. محمد موسوی بایگی و حسین انصاری. (۱۳۹۱): پیش‌بینی خشک‌سالی استان خراسان رضوی طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل LARS-WG، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سوم.
- ۱۳- یزدان پناه، حجت‌ا... تیمور علیزاده. (۱۳۹۰): برآورد احتمال وقوع امواج گرمایی با دوره‌های تداوم مختلف در استان کرمان به کمک زنجیره مار کف، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۱۰۲.

- 14- Baldi, Marina, Massimiliano Pasqui and Francesco Cesar One and Giovanna De Chiara. (2004): Heat Wave In The Mediterranean Region Analysis and Model Results, Institute of Biometeorology, CNR.ROM.ITALY 10(5).
- 15- Bumbaco, Karrin. Kathie Dello and Nicholas Bond. (2013): History of Pacific Northwest Heat Waves, Synoptic Pattern and Trends, J. Appl. Meteor. Climatol, 52.
- 16- Auroop R. Gangulya. Karsten Steinhäuser and David J Erickson III and Marcia Bran Stetter and Esther S Parish and Nagendra Singha and John B Drake and Lawrence Buja. (2009): Higher Trends But Larger Uncertainty and Geographic Variability in 21st Century Temperature and Heat Waves, PNAS, Vol. 106, No. 37.
- 17- Hoerling, Martin P. Jon Eischeid and Xiaowei Quan and Xu Taiyi. (2007): Explaining The Record U.S. Warmth of 2006, Geophys Res Lett 34, L17704, Doi:10.1029/2007GL030343.
- 18- Kozlowski, Daniel R. Laura M Edwards. (2007): An Analysis and Summary of The July 2006 Record-Breaking Heat Wave Across The State of California, NOAA Western Regional Tech Attach, No. 07-05, Salt Lake City, Utah.
- 19- Kysely, Jan. (2002): Temporal 9Uctuations in Heat Waves at Prague-Klementinum, The Czech Republic, From 1901-97, and Their Relationships to Atmospheric Circulation, International Journal of Climatology, Vol. 22, Issue 1.
- 20- Maxwell, Brandt. (2007): Analysis of The 22-23 July 2006 Extreme Heat in San Diego County, NOAA Western Region Tech Attach, Salt Technical Attachment, No. 07-04, 2-5.
- 21- Noori, Mohammad. Mohammad Bagher Sharifi and Mohammad Heydari. (2014): 8th National Congress on Civil Engineering, 7-8 May 2014, Babol, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
- 22- Osman, Yassin. Nadhir Al-Ansari and Mawada Abdellatif. (2017): Climate Change Model As a Decision Support Tool for Water Resources Management in Northern Iraq, a Case Study of Greater Zab River, Water and Climate Change, Vol. 8, no 4, 1-13.
- 23- Osman, Yassin. Nadhir Al-Ansari and Mawada Abdellatif and Sadeq B. Aljawad and Sven Knutsson. (2014): Expected Future Precipitation in Central Iraq Using LARS-WG Stochastic Weather Generator, Engineering Vol.6 No.13.
- 24- Tamranzian, Arbi. Steve LaDochy and Josh Willis and William Patzert. (2008): Heat Waves in Southern California: Are They Becoming More Frequent and Longer Lasting? APCG YEARBOOK, Vol 70. 59-69.
- 25- Twardosz, Robert. Ursezula Kossowska - Cezak. (2013): Exceptionally Hot Summers in Central and Eastern Europe (1951-2010). Theron. Appl. Climatol, Vol 112.