

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.582308.1274>

ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG8.0 در شبیه‌سازی نمایه‌های فرین دمایی و بارشی و پیش‌نگری تغییرات آن‌ها در افق نزدیک (مطالعه موردی: ایستگاه مهر آباد تهران)

منصوره کوهی^۱، ابراهیم اسعدی اسکویی^{۱*}، فاطمه عباسی^۲، راضیه پهلوان^۳^۱ استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران^۲ کارشناس مسوول، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران^۳ دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

چکیده

با توجه به افزایش فراوانی و شدت رخداد‌های فرین اقلیمی در دهه‌های اخیر، لزوم بهره‌گیری از ابزارهای دقیقی همچون مدل‌های اقلیمی جهانی برای پیش‌نگری تغییرات دما و بارش و نمایه‌های فرین این دو متغیر در مقیاس‌های ایستگاهی و منطقه‌ای دوچندان شده است. به این منظور استفاده از روش‌های مقیاس‌کاهی به منظور استخراج اطلاعات اقلیمی در مقیاس ایستگاهی ضروری است. در این پژوهش، توانمندی نسخه جدید مدل تولیدکننده تصادفی آب و هوا LARS-WG8.0 در شبیه‌سازی دما، بارش و نمایه‌های فرین اقلیمی ارزیابی و سپس تغییرات آتی این متغیرها برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ پیش‌نگری شد. برای این منظور، داده‌های روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه همدیدی مهرآباد تهران طی دوره پایه ۱۹۸۱-۲۰۱۰ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. نتایج مقایسه نمایه‌های ETCCDI نشان داد LARS-WG قادر به شبیه‌سازی مناسب مقادیر مرکزی و پراکندگی اکثر نمایه‌های فرین (حدود ۱۲ نمایه از ۱۶ نمایه) برای این ایستگاه می‌باشد، بیشترین عدم انطباق در نمایه‌های مرتبط با رخداد‌های تداوم‌دار و بسیار فرین (R99p, ID, CSDI, WSDI) به دست آمد. نتایج پیش‌نگری با استفاده از خروجی پنج مدل CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نشان داد نمایه دمایی تعداد روزهای گرم (SU) بین ۱۰ تا ۲۳ روز و شب‌های حاره‌ای (TR20) بین ۱۲ تا ۳۰ روز نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین، بیشینه بارش یک‌روزه (RX1day) تحت سناریوی SSP5-8.5 تا ۱۹٪ افزایش نشان داد، برای نمایه تداوم دوره‌های خشک (CDD) تغییرات قابل ملاحظه‌ای پیش‌نگری نشد. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت مخاطرات جوی در منطقه تهران مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نمایه‌های فرین، مقیاس‌کاهی، LARS-WG8.0، تغییر اقلیم، سناریوهای SSP.

مقدمه

در طول نیم قرن گذشته، به طور متوسط، جهان روزانه شاهد یک حادثه مرتبط با تغییرات جوی، آب‌شناسی و اقلیمی بوده است. همچنین، به طور متوسط، روزانه ۱۱۵ نفر جان باخته و میزان خسارات بالغ بر ۲۰۲ میلیون دلار در هر روز ارزیابی شده است که بیش از ۹۱ درصد مرگ‌ومیرهای مرتبط با حوادث و بلایای طبیعی در کشورهای در حال توسعه رخ داده است (CRED, 2018). بر اساس آمار اطلس سازمان جهانی هواشناسی، در پنج دهه اخیر، بیش از ۵۷۷ هزار نفر بر اثر وزش توفان‌های شدید، نزدیک به ۵۹ هزار نفر بر اثر بروز سیل و نزدیک به ۵۶ هزار نفر بر اثر افزایش شدید دمای هوا (امواج گرمایی) جان باخته‌اند (قاسمیان و همکاران، ۲۰۲۶؛ WMO, 2021). طی سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۷۰ در پایگاه داده رویدادهای اضطراری (EM-DAT^۲) مرکز تحقیقات همه‌گیری بلایای طبیعی ۹۳ مورد گزارش بلایای جوی از ایران ثبت شده است که به طور متوسط ۶۰۰۰ نفر تلفات جانی و ۳۳ میلیارد دلار خسارت اقتصادی به همراه داشته است (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹).

تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم، تأثیرات گسترده‌ای بر سامانه‌های طبیعی و انسانی بر جای گذاشته است. افزایش دمای جهانی، تغییر الگوی بارش و تشدید رخدادهای فرین اقلیمی نظیر امواج گرما، خشکسالی‌ها و بارش‌های فرین، پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته‌اند (یو^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). گزارش‌های سازمان هواشناسی جهانی نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد

خسارات و تلفات ناشی از بلایای طبیعی در دهه‌های اخیر با مخاطرات جوی و اقلیمی مرتبط بوده‌اند. در این میان، ارزیابی دقیق تغییر اقلیم در مقیاس‌های محلی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در حوزه‌های مدیریت بحران، کشاورزی، منابع آب و برنامه‌ریزی شهری در این مقیاس انجام می‌شود. با این حال، برون‌داد مدل‌های گردش عمومی به دلیل قدرت تفکیک مکانی پایین، برای استفاده مستقیم در مطالعات محلی مناسب نیستند. از این‌رو، روش‌های مقیاس‌کاهی آماری مانند LARS-WG^۵ این شکاف را با تبدیل برون‌داد مدل‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس به اطلاعات اقلیمی با قدرت تفکیک بالاتر زمانی و مکانی و در مقیاس محلی پر می‌کنند (گودرزی و همکاران، ۲۰۱۵).

LARS-WG یکی از روش‌های مهم مقیاس‌کاهی آماری است که توسط سمنف و بروکز^۶ (۱۹۹۹) توسعه داده شد و در حال حاضر نسخه هشتم آن در دسترس قرار دارد (سمنف^۷، ۲۰۲۴). این مدل، پیش‌نگرهای اقلیمی با وضوح بالا را برای مطالعات تغییر اقلیم در مقیاس محلی و برای بخش‌هایی مانند منابع آب، کشاورزی و برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها ارائه می‌دهد. با وجود کاربرد گسترده این مدل در مطالعات تغییر اقلیم (طالبی و همکاران، ۲۰۲۵)، توتیش باین و سبیرت^۸ ۲۰۱۲؛ لطفی و همکاران، ۲۰۲۲؛ دوان و می^۹، ۲۰۱۴؛ چن^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳؛ صابری و خیون^{۱۱}، ۲۰۲۴؛ روشنگر و عبدالزاد، ۲۰۲۳؛ هایلسیلاسی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۳؛ اعتمادی و همکاران، ۲۰۱۴).

نیاز به بررسی توانمندی این مدل در شبیه‌سازی رویدادهای فرین و عدم قطعیت‌های ناشی از آن وجود

⁷ Smenov

⁸ Teutschbein & Seibert

⁹ Duan and Mei

¹⁰ Chen

¹¹ Saberi and Khayyun

¹² Hailesilassie

¹ The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

² The Emergency Events Database (EM-DAT)

³ Zhang

⁴ Yu

⁵ Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG)

⁶ Brooks

دارد (گیتاو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ویسلی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). پژوهش‌هایی در این زمینه برای متغیرهای دما و بارش در مناطق مختلف اقلیمی ایران (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ کوهی و همکاران، ۱۳۹۲) و جهان انجام شده است (ال-مالکی، ۲۰۲۵؛ هاشمی و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج برخی از این پژوهش‌ها نیز نشان داده است که این مدل در بازتولید توزیع‌های آماری فرین، به ویژه در دمای بیشینه و بارش‌های شدید، با خطاهایی در مناطق مورد بررسی مواجه است (گیتاو و همکاران، ۲۰۱۸؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ سمنف، ۲۰۰۸). این اختلاف در نتایج، به تفاوت ناشی از شرایط اقلیمی مناطق و عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های GCM برمی‌گردد (والام و کین^۳، ۲۰۱۸). با این وجود، نادیده‌انگاشتن این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی نادرست در بخش‌های حیاتی مانند کشاورزی و مدیریت سیلاب شود (ژو^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ والان و کین، ۲۰۱۸؛ چن و همکاران، ۲۰۱۲؛ چن و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین نیاز است به طور خاص برای هر منطقه، توانمندی این مدل در شبیه‌سازی فرین‌های دما و بارش مورد ارزیابی قرار گیرد. به عنوان نمونه، سمنف (۲۰۰۸) نشان داد به رغم اینکه این مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی بیشینه سالانه بارش روزانه و میانگین‌های آن در ایستگاه‌های مورد بررسی دارد، اما دقت این مدل در شبیه‌سازی دماهای بیشینه روزانه کمتر برآورد شد، به طوری که تقریباً در نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه، میانگین‌های دماهای شبیه‌سازی شده خارج از بازه اطمینان ۹۵ درصدی قرار داشتند.

تهران طی دهه‌های اخیر شاهد بالاترین نرخ رشد فیزیکی و جمعیتی بوده به طوری که جمعیت آن از ۴/۵ میلیون ساکن در سال ۱۹۷۶ به ۸/۷ میلیون در سال ۲۰۱۶

رسیده است. طی همین دوره مساحت این شهر از ۲۴۵۰۰ هکتار در سال ۱۹۷۶ به ۷۳۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۱۶ رسیده است. چنین تغییرات شدید همراه با توسعه شهر در مناطق مستعد خطر، ساختمان‌هایی با کیفیت پایین و فقدان برنامه‌های مدیریت کاهش خطرپذیری بلایا بوده است (تقی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲). چنین شرایطی نشان می‌دهد این شهر تا چه حد می‌تواند در معرض خطرپذیری ناشی از مخاطرات جوی و رویدادهای فرین باشد. علل ریشه‌ای آسیب‌پذیری این شهر به شرایط اقتصادی-اجتماعی آن وابسته است که با پویایی‌های رشد شهری، فقدان رهیافت‌های توسعه شهری با توجه به احتمال و یا وجود مخاطرات، مهاجرت و وابستگی به دیگر خدمات نجات و زیرساختی، تشدید شده است (فکته^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

اولین بلای طبیعی که استان تهران را تهدید می‌کند زلزله است. این شهر توسط گسل‌های لرزه‌ای فعالی احاطه شده است (شکل ۱) و طی تاریخ خود چندین بار تحت تأثیر زلزله‌های مخرب قرار گرفته است و احتمال وقوع زلزله‌ای بزرگ در این منطقه طی سال‌های آتی دور از انتظار نیست (حاجی بابایی و همکاران، ۲۰۱۴؛ تقی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲). تغییر اقلیم دومین عامل طبیعی است که تهران را در معرض خطر و آسیب قرار خواهد داد. به دلایل زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی رودخانه‌ها، این منطقه در معرض وقوع سیل‌های ناگهانی از رواناب‌های سطحی قرار دارد. با افزایش شدت بارش و خطر سیل خسارات جبران‌ناپذیری به شهر وارد خواهد شد (حاجی بابایی و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس آمار منتشر شده تا پایان سال ۱۴۰۳ مخاطرات جوی (۵۷ مورد) منجر به بروز خسارات زیاد اقتصادی و فوت ۱۶ نفر در سطح استان تهران و شهرستان‌های آن شده است.

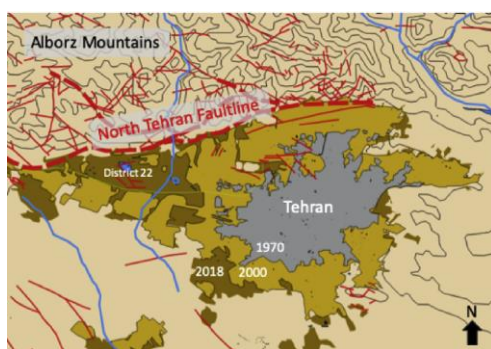
^۴ Xu

^۵ Fekete

^۱ Gitau

^۲ Vesely

^۳ Vallam & Qin



راه‌نما

خطوط گسل
خطوط اصلی گسلرودخانه های اصلی
خطوط کنٹوری توپوگرافیناحیه شهری ۱۹۷۰
ناحیه شهری ۲۰۰۰
ناحیه شهری ۲۰۱۸

شکل ۱. توسعه شهری تهران از سال ۱۹۷۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۸ بر مبنای داده‌های ماهواره لندست و ETM و Crona. خطوط گسل از نقشه ژئولوژیک ۱:۱۰۰۰۰۰. توجه شود که خطوط اصلی گسل و رودخانه اصلی نشان داده شده است (فکته و همکاران، ۲۰۲۰)

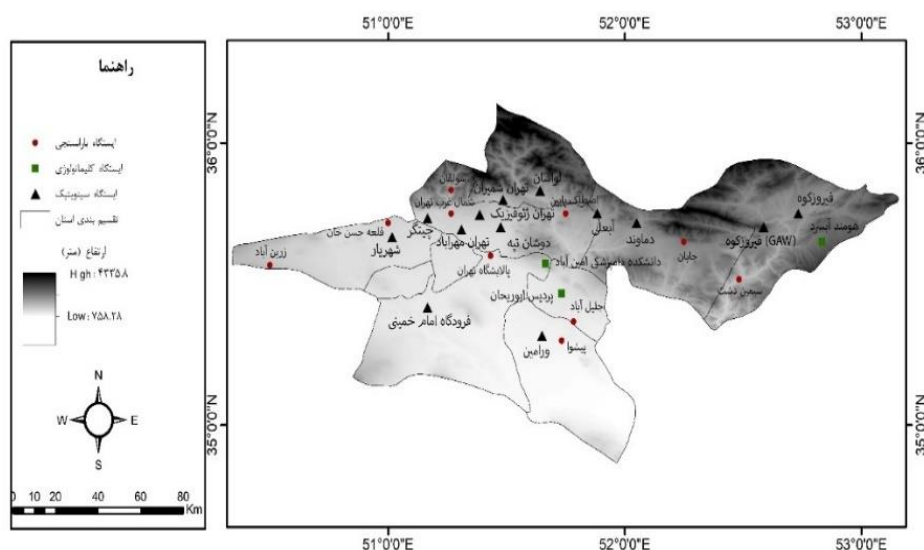
نزدیک با استفاده از پرونداد ۵ مدل اقلیمی منتخب از پروژه ارزیابی متقابل مدل های اقلیمی فاز ششم (CMIP6) است که تحت جدیدترین سناریوهای خط سیر مشترک اجتماعی- اقتصادی (SSPs) اجرا شده‌اند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان تهران با وسعتی حدود ۱۸۸۱۴ کیلومترمربع بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب غرب به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود است. استان تهران، از شهرهای تهران، شهریار، اسلامشهر، ری، پاکدشت، دماوند، شمیران، ورامین و فیروزکوه تشکیل شده است. از دید ناهمواری‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه دشتی و کوهپایه‌ای البرز تقسیم می‌شود و گستره کنونی آن از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است (شکل ۲).

با توجه به مرکزیت این استان در ایران و تمرکز بالای صنایع، وزارتخانه‌ها، سازمان‌های دولتی و خدمات رفاهی، لزوم مدیریت مخاطرات جوی و اقلیمی مشخص می‌شود، زیرا ترکیب چنین شرایطی نشان‌دهنده در معرض قرارگیری این شهر و افزایش خطرپذیری آن نسبت به رویدادهای فرین اقلیمی و جوی و افزایش پتانسیل خسارات جانی و مالی است. بنابراین، بررسی و پیش‌نگری مخاطرات مهم اقلیمی و جوی، امکان مدیریت بهتر مخاطرات را برای مدیران در بخش‌های مختلف فراهم خواهد آورد (فکته و همکاران، ۲۰۲۰). در این راستا نیاز است تا توانمندی مدل‌های اقلیمی و روش‌های ریزمقیاس‌گاهی، به عنوان معتبرترین ابزار در ارایه سناریوهای آتی تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا با توجه به موارد مطرح شده، هدف از این پژوهش، ابتدا ارزیابی توانمندی جدیدترین نسخه LARS-WG8.0 در ریزمقیاس‌گاهی میانگین دما و بارش و نمایه‌های فرین این دو متغیر در ایستگاه مهرآباد و در ادامه، پیش‌نگری نمایه‌های مذکور برای دوره آینده



شکل ۲. توزیع مکانی ایستگاه‌های هواشناسی استان تهران بر روی نقشه رقومی ارتفاعی آن

داده‌ها

اخذ شده است (جدول ۱). ایستگاه همدیدی مهرآباد تهران در ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا و در محدوده‌ای با اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد. این ایستگاه به دلیل موقعیت شهری و جمعیت‌پذیری بالا، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات اقلیم شهری برخوردار است.

در این مقاله از داده‌های روزانه دمای کمینه ($^{\circ}\text{C}$)، دمای بیشینه ($^{\circ}\text{C}$)، ساعت آفتابی (h) و بارش (mm) برای ایستگاه منتخب مهرآباد در دوره نرمال اقلیمی ۱۹۸۱-۲۰۱۰ استفاده شد که از سازمان هواشناسی کشور

جدول ۱. مشخصات ایستگاه همدیدی مورد بررسی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه-دهم درجه)	عرض جغرافیایی (درجه-دهم درجه)	ارتفاع (m)	سال تاسیس
مهرآباد تهران	۵۱/۳	۳۵/۶۹	۱۱۹۱	۱۹۵۱

مدل‌های CMIP6

از برون‌داد پنج مدل اقلیمی سری CMIP6 شامل ACCESS-ESM1.5، CNRM-CM6-1، MPI-ESM-2-LR، HadGM3-GC31-LL و MRI-ESM2-0 که تحت سناریوهای SSP5-8.5

و SSP1-2.6 و SSP245 اجرا شده‌اند، به منظور ارزیابی سناریوهای آبی دما و بارش استفاده شد (جدول ۲). در ادامه و در متن مقاله نام این مدل‌ها به طور خلاصه به ترتیب به صورت ACCESS، CNRM، HadGEM، MPI و MRI خواهد آمد.

جدول ۲. مدل‌های موجود در نسخه جدید LARS-WG8.0

نام مدل	قدرت تفکیک	کشور	مرکز تحقیقاتی
ACCESS-ESM1-5	1.25° x 1.875°	استرالیا	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع (CSIRO)
CNRM-CM6-1	1.40° x 1.406°	فرانسه	مرکز ملی مطالعات هواشناسی (CNRM) فرانسه
HadGEM3-GC31-LL	1.25° x 1.88°	انگلستان	اداره هواشناسی مرکز هدلی (MOHC) انگلستان
MPI-ESM1-2-LR	1.39° x 1.41°	آلمان	پژوهشگاه هواشناسی ماکس پلانک (MPI-M)
MRI-ESM2-0	1.113° x 1.125°	ژاپن	پژوهشگاه هواشناسی (MRI)

$$v_i = \min\{v : P(vobs \leq v) \geq p_i\}$$

(۱)

$$i = 0, \dots, n$$

که در این رابطه $P()$ نشان دهنده‌ی احتمال بر مبنای داده‌ی مشاهداتی $\{vobs\}$ می‌باشد. برای هر متغیر اقلیمی، دو مقدار p_0 و p_n به صورت $p_0 = 0$ و $p_n = 1$ متناظر با $v_0 = \min\{vobs\}$ و $v_n = \max\{vobs\}$ تعیین می‌شود. در این مدل، دمای کمینه و بیشینه روزانه، به عنوان فرآیندهای تصادفی با میانگین‌ها و انحراف معیار روزانه بر مبنای تر یا خشک بودن آن روز محاسبه می‌شوند. مدل‌سازی تابش مستقل از دما صورت می‌گیرد. با توجه به متفاوت بودن توزیع تابش خورشیدی در دو وضعیت روزهای تر و خشک، توزیع نیمه تجربی جداگانه‌ای برای توصیف تابش خورشیدی در روزهای تر و خشک به کار می‌رود (سمنف و بروکس، ۱۹۹۹). در این پژوهش از نسخه (۲۰۲۴) LARS-WG8.0 استفاده شده است که بر اساس سناریوهای مستخرج از ۵ مدل از مدل‌های سری CMIP6 می‌باشد.

مدل LARS-WG8.0

LARS-WG یک مدل تولیدکننده تصادفی

آب‌وهواست که با استفاده از توزیع‌های نیمه‌تجربی (SED)، سری‌های زمانی روزانه اقلیمی را شبیه‌سازی می‌کند. نسخه ۸.۰ این مدل از سناریوهای جدید SSP و خروجی‌های CMIP6 پشتیبانی می‌کند.

این مدل، توزیع نیمه تجربی را برای برآورد توزیع احتمالاتی سری‌های خشک و تر، بارش روزانه، بیشینه و کمینه دما و تابش خورشیدی به کار می‌برد. خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره آماری بوده، اما انحراف معیار آنها به نسبت اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره آینده و گذشته پریشیده می‌شود (بابایان و نجفی، ۱۳۸۹). این توزیع به صورت تابع توزیع تجمعی احتمالات i مشخص می‌شود. برای هر متغیر اقلیمی (v)، یک مقدار از متغیر اقلیمی (v_i) متناظر با احتمال p_i به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

نمایه‌های فرین اقلیمی

در بررسی و تحلیل مقادیر فرین بارش و دما می‌توان از مجموعه نمایه‌های فرین که توسط شبکه پشتیبانی اقلیم اروپا (۲۷ نمایه فرین شامل ۱۶ نمایه بارش و ۱۱ نمایه دما) معرفی شده است، استفاده کرد. این نمایه‌ها توسط کمیته مشترک اقلیم‌شناسی سازمان جهانی هواشناسی^۱ (CCL) برنامه پژوهش در اقلیم جهان^۲ (WCRP) وابسته به طرح قابلیت پیش‌بینی و تغییرپذیری اقلیم^۳ (CLIVAR)، متشکل از گروه متخصصین پیش‌بینی، پایش و نمایه‌های

تغییر اقلیم^۴ (ETCCDI) در سال ۱۹۹۸ به منظور بررسی و تعیین نمایه‌های فرین اقلیمی معرفی شدند. این نمایه‌ها بر اساس داده‌های روزانه بیشینه و کمینه دما و بارش محاسبه می‌شوند و توصیف‌کننده رویدادهای فرین متوسط هستند که به طور معمول چندین بار در سال رخ می‌دهند. این نمایه‌ها نظیر RX5day، X1day، CDD، FD، TR20، SU و تغییرات بسامد، شدت و تداوم رخداد‌های فرین را توصیف می‌کنند (جدول ۳).

جدول ۳. برخی نمایه‌های فرین دما و بارش کارگروه کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و نمایه‌ها (ETCCDI) مورد استفاده در این تحقیق (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱)

تعریف	واحد	نمایه
روزهای یخبندان: تعداد روزهایی از سال که دمای کمینه روزانه کوچکتر از صفر درجه سلسیوس باشد	روز	FD
موج گرما: تعداد روزهایی از سال که حداقل ۶ روز پیاپی دمای روزانه بیشتر از صدک ۹۰ام دوره مبنا باشد	روز	WSDI
موج سرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز متوالی دمای شبانه کوچکتر از صدک ۱۰ام دوره مبنا باشد	روز	CSDI
دامنه دمای شبانه روزی: تفاوت میانگین ماهانه دمای روزانه و شبانه	°C	DTR
بیشترین مقدار بارش یکروزه: بیشترین بارش یکروزه در ماه	mm/day	RX1
نمایه ساده شدت بارش روزانه: از تقسیم مقدار کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارشی (دستکم ۱ میلیمتر) سالانه به دست می‌آید.	mm/day	SDII
روزهای متوالی خشک: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش کمتر از ۱ میلیمتر باشد.	روز	CDD
روزهای متوالی مرطوب: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش بیشتر از ۱ میلیمتر باشد	روز	CWD
روزهای یخی (دمای بیشینه کمتر از صفر درجه سلسیوس)	روز	ID

بحث و تفسیر نتایج

ارزیابی عملکرد مدل

نتایج مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل LARS-WG8.0 در بازتولید میانگین

ماهانه دما و بارش عملکرد قابل قبولی دارد. آزمون‌های آماری در مقیاس ماهانه، اختلاف معنی‌داری بین میانگین و مقادیر بیشینه بارش و دمای کمینه و بیشینه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در سطح ۰/۰۵ نشان ندادند. به عنوان

⁴ Expert Team on Climatic Change Detection, Monitoring and Indices

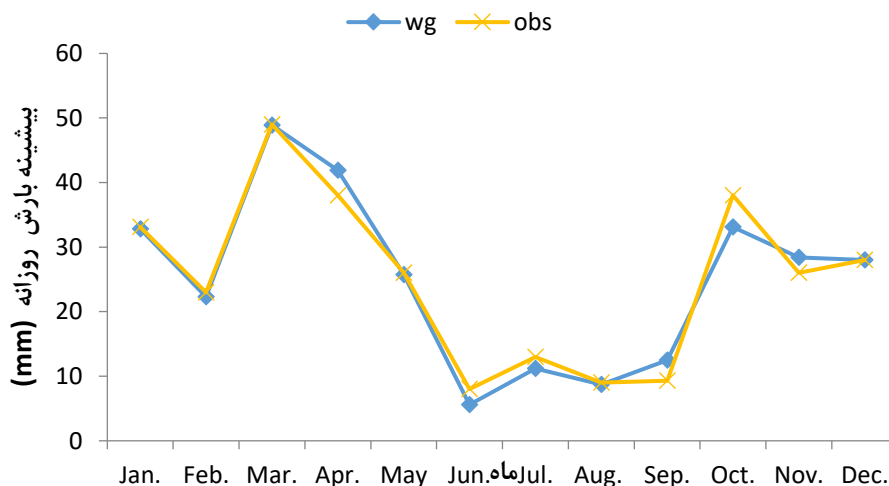
¹ Commission for Climatology

² World Climate Research Program

³ Research Program on Climate Variability and Predictability

مثال، در مقایسه بین دو سری شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نمایه بیشینه بارش روزانه (نشان‌دهنده‌ی میانگین بیشترین مقدار بارش روزانه هر ماه طی دوره آماری) برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ (شکل ۳)، در بین ماه‌های بارشی، بیشترین

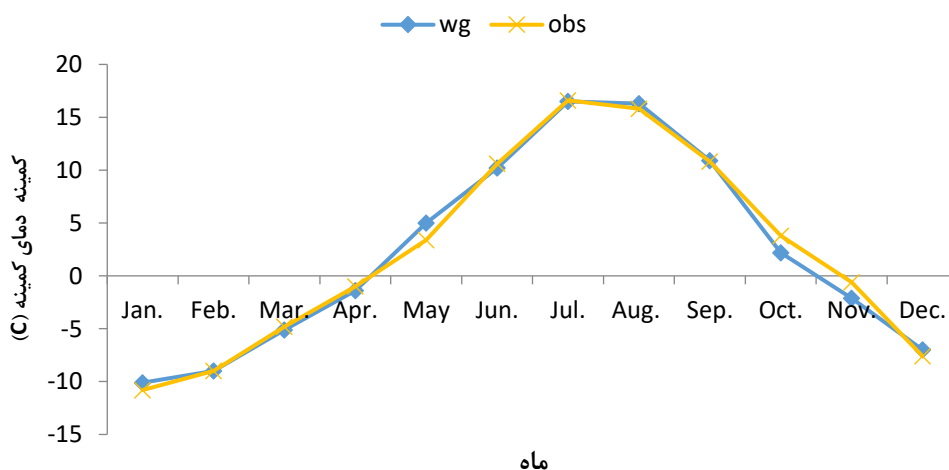
اختلاف در ماه اکتبر با کم‌برآوردی این نمایه به میزان حدود ۵ میلی‌متر و در ماه آوریل با بیش‌برآوردی به میزان ۴ میلی‌متر به دست آمد. در سایر ماه‌ها تطابق خوبی بین مقادیر فرین بارش دو سری به دست آمد.



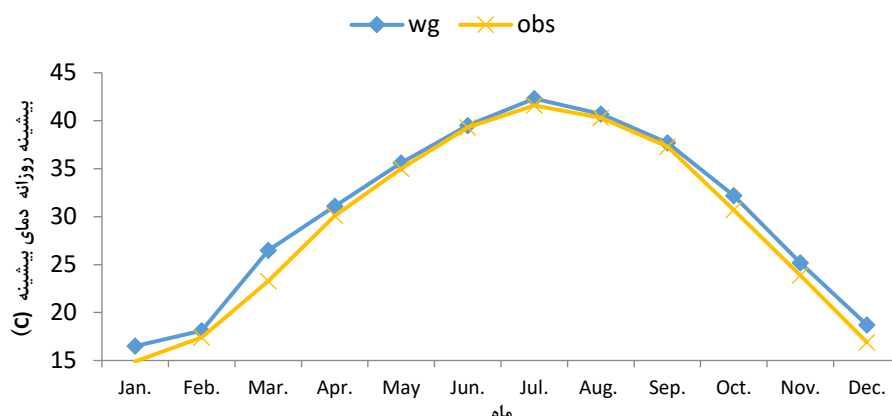
شکل ۳. مقایسه مقادیر ماهانه بیشینه بارش روزانه شبیه‌سازی شده (wg) در مقابل مشاهداتی (obs) (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

در شکل ۴، مقادیر دمای مطلق کمینه شبیه‌سازی شده‌ی هر ماه در مقابل مقادیر مشاهداتی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تفاوت

در مقدار میانگین این نمایه برای دو ماه اکتبر و نوامبر (کم‌برآورد) به دست آمد.



شکل ۴. مقایسه مقادیر ماهانه دمای مطلق کمینه شبیه‌سازی شده (wg) در مقابل مشاهداتی (obs) (۱۹۸۱-۲۰۱۰)



شکل ۵. مقایسه مقادیر ماهانه مطلق دمای بیشینه شبیه‌سازی شده (wg) در مقابل مشاهداتی (obs) (۲۰۱۰-۱۹۸۱)

مقادیر پرت در هر دو گروه، این نمودار نشان می‌دهد که مدل توانسته است وقوع برخی رخدادهای فرین را برآورد کند که نشان دهنده توانمندی مناسب مدل LARS-WG است. برای بیشینه بارش پنج‌روزه نیز میانه‌ها نزدیک هستند، اما مدل اندکی بیش‌برآورد در مقادیر مرکزی نشان می‌دهد. با این وجود، دامنه تغییرات و داده‌های پرت در دو گروه مشابه است که می‌توان نتیجه گرفت مدل در بازتولید بارش‌های سنگین چندروزه عملکرد نسبتاً خوبی دارد. برای نمایه CDD، میانه در هر دو گروه تقریباً مشابه (حدود ۱۰۰-۱۱۰ روز) است، اما پراکندگی داده‌های مشاهده‌ای بیش از داده‌های شبیه‌سازی شده است. این موضوع نشان می‌دهد مدل مقدار مرکزی دوره‌های خشک طولانی را به خوبی بازسازی کرده، اما قادر به شبیه‌سازی نوسانات این نمایه نبوده است. در مورد نمایه CWD، میانه‌ها نزدیک بوده و دامنه تغییرات نیز مشابه است. بنابراین، مدل در بازنمایی تداوم دوره‌های مرطوب عملکرد قابل قبولی دارد. برای نمایه PRCPTOT، میانه داده‌های مشاهده‌ای اندکی بیش از داده‌های شبیه‌سازی شده است، اما همپوشانی زیاد جعبه‌ها نشان‌دهنده توافق مناسب مدل با مشاهدات است. در مجموع، مدل قادر به بازتولید بارش سالانه بوده است، هرچند ممکن است با توجه به دامنه تغییرات، اندکی

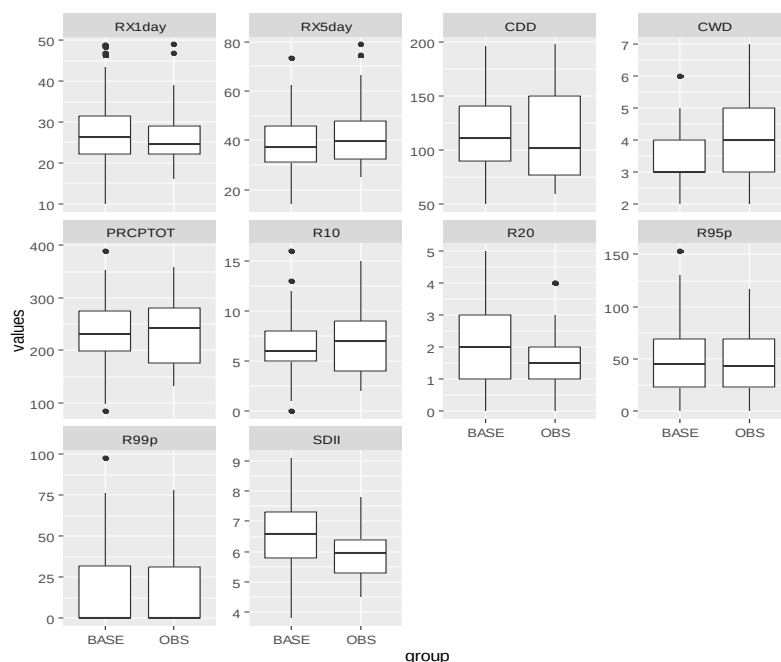
بیش‌برآورد مدل در برآورد میانگین ماهانه دمای مطلق بیشینه در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس قابل مشاهده است (شکل ۵). بیشترین مقدار اختلاف برای ماه مارس به میزان $3/2^{\circ}\text{C}$ به دست آمده است. با این وجود تطابق مناسبی بین دو سری مشاهداتی و شبیه‌سازی به دست آمد. نمایه‌های فرین

شکل ۶ نمودار جعبه‌ای مقایسه نمایه‌های فرین بارش ETCCDI بین داده‌های مشاهداتی (OBS) و داده‌های شبیه‌سازی شده (BASE) توسط مدل LARS-WG را برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ در ایستگاه مهرآباد نشان می‌دهد. با استفاده از این نوع نمودار و مقایسه میزان نزدیکی میانه‌ها (خط وسط جعبه)، میزان همپوشانی دامنه میان چارکی (IQR) و گستره تغییرات، می‌توان عملکرد مدل را در شبیه‌سازی نمایه‌های فرین بارش و دما ارزیابی کرد.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود برای نمایه RX1day، میانه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بسیار نزدیک به یکدیگر (حدود ۲۵-۲۷ میلی‌متر) است. دامنه میان چارکی این نمایه در مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مشابه هستند، اگرچه در داده‌های مدل (BASE) پراکندگی بیشتری مشاهده شد. به رغم وجود

کم‌برآورد یا بیش‌برآورد در برخی سال‌ها وجود داشته باشد. در مورد نمایه R10 (تعداد روزهای با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر)، میانه‌ها اختلاف اندکی دارند و پراکندگی داده‌ها نیز مشابه است. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل در برآورد رخدادهای بارش نسبتاً شدید به خوبی عمل کرده است. در مقابل، برای نمایه R20، تفاوت بیشتری (میانه و دامنه تغییرات مدل بیش از مشاهداتی) مشاهده می‌شود. بنابراین مدل تمایل به بیش‌برآورد تعداد روزهای با بارش بسیار شدید (>20 mm) دارد. در مورد

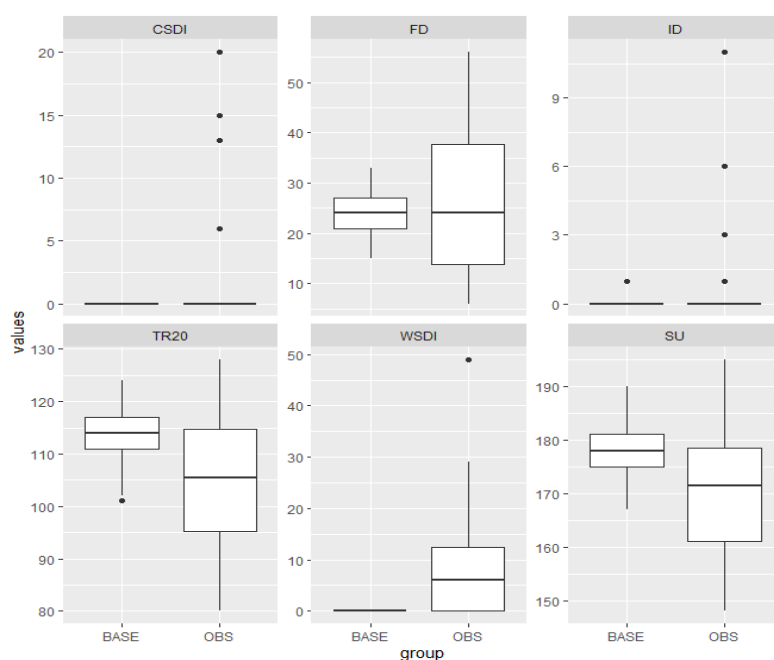
نمایه‌های صدکی، ارزیابی توانمندی مدل با استفاده از نمودار جعبه‌ای نشان داد در این دو نمایه، میانه‌ها تقریباً مشابه‌اند و دامنه تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی نیز تا حد زیادی همپوشانی دارد. این موضوع بیانگر توانایی مناسب مدل در بازتولید سهم بارش‌های بسیار مرطوب است. با این حال، در مقادیر حداکثری، داده‌های BASE اندکی بالاتر از مقادیر از OBS هستند که می‌تواند نشانه بیش‌برآورد رخدادهای شدید باشد.



شکل ۶. مقایسه نمایه‌های فرین بارش شبیه‌سازی شده (BASE) و مشاهداتی (OBS) برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ (ایستگاه مهرآباد)

برای نمایه R99p، هر دو گروه پراکندگی زیادی دارند و میانه نزدیک به صفر است که نشان‌دهنده فراوانی کم این رخدادها در اقلیم نیمه‌خشک تهران است. با وجود شباهت کلی توانمندی مدل در شبیه‌سازی نمایه‌های فرین، عدم قطعیت بیشتری در شبیه‌سازی رخدادهای نادر مانند R99p وجود دارد که در مدل‌های مولد آب و هوا به کرات گزارش شده است. برای نمایه

SDII، میانه داده‌های شبیه‌سازی شده اندکی بیش از مشاهدات است (حدود ۶/۷ در برابر ۶ میلی‌متر در روز). همچنین، پراکندگی در BASE بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که LARS-WG تمایل دارد شدت متوسط بارش در روزهای مرطوب را کمی بیش از مقدار واقعی برآورد کند.



شکل ۷. مقایسه نمایه‌های فرین دمایی شبیه‌سازی شده (BASE) و مشاهداتی (OBS) برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ (ایستگاه مهرآباد)

در شکل ۷ نیز توانمندی مدل LARS-WG با مقایسه نمایه‌های فرین دما با استفاده از نمودار جعبه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. برای نمایه CSDI (موج سرما) در هر دو گروه، میانه برابر صفر و دامنه بین چارکی نیز تقریباً صفر است که نشان می‌دهد در بیشتر سال‌های دوره مطالعه، وقوع موج‌های سرمای طولانی در ایستگاه مهرآباد بسیار کم رخ داده است. با این حال، در داده‌های مشاهده‌ای چند مقدار پرت (حدود ۶ تا ۲۰ روز) دیده می‌شود که توسط مدل برآورد نشده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که این مدل در بازتولید رخداد‌های نادر و شدید موج سرمای برای این ایستگاه عملکرد ضعیفی داشته است. برای نمایه FD، میانه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای تقریباً مشابه (حدود ۲۴ تا ۲۵ روز) است، اما دامنه تغییرات در داده‌های مشاهده‌ای بسیار بزرگ‌تر است که این امر بدین معناست که مدل دامنه تغییرات بین‌سالی را کمتر از واقعیت برآورد کرده و قادر به شبیه‌سازی مقادیر فرین مشاهده‌شده نبوده است. بنابراین LARS-WG مقدار متوسط روزهای یخبندان را

مناسب شبیه‌سازی کرده، اما در نمایش نوسانات سالانه و سال‌های بسیار سرد توانمند نیست. در مورد نمایه ID، هر دو سری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل، میانه صفر محاسبه شده است که بیانگر نادر بودن روزهای یخی در اقلیم مهرآباد است. در داده‌های مشاهده‌ای چند مقدار پرت (تا حدود ۱۰ روز) دیده می‌شود، در حالی که مدل تقریباً همه سال‌ها را بدون روز یخی شبیه‌سازی کرده است که نشانه دقت پایین مدل برای این نمایه است. در نمایه TR20، میانه داده‌های شبیه‌سازی شده حدود ۱۱۴ روز و در داده‌های مشاهده‌ای حدود ۱۰۵ روز به دست آمد که نشان می‌دهد مدل تعداد شب‌های گرم را بیش‌برآورد کرده است. علاوه بر این، پراکندگی داده‌های مشاهده‌ای بیشتر بوده و دامنه تغییرات وسیع‌تری نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده نشان داد. در نمایه WSDI تقریباً تمامی مقادیر داده‌های شبیه‌سازی شده برابر صفر است، در حالی که در داده‌های مشاهده‌ای میانه حدود ۶ روز بوده و در برخی سال‌ها مقادیر بسیار بالاتری، (تا حدود ۵۰ روز) نیز مشاهده می‌شود. این

اختلاف نشان می‌دهد که LARS-WG در برآورد موج‌های گرمای طولانی عملکرد ضعیفی دارد و فراوانی و تداوم این رخدادها را خیلی کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد می‌کند. در میان نمایه‌های مورد بررسی، بیشترین اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای این نمایه به دست آمد. برای نمایه SU، میانه داده‌های شبیه‌سازی شده حدود ۱۷۸ روز و در داده‌های مشاهداتی حدود ۱۷۱ روز محاسبه شد. با توجه به مقادیر به دست آمده، مدل برای این نمایه اندکی بیش‌برآورد دارد. همچنین، پراکندگی داده‌های مشاهده‌ای بیشتر از داده‌های شبیه‌سازی شده است که بیانگر نوسانات بین‌سالی بیشتر در داده‌های واقعی است. با این حال، همپوشانی قابل توجه جعبه‌ها نشان می‌دهد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی این نمایه نسبتاً مناسب است. در کل، نتایج بیانگر آن است که مدل در بازتولید نمایه‌های FD و SU عملکرد مناسبی داشته و مقادیر میانه این نمایه‌ها با داده‌های مشاهداتی همخوانی مطلوبی دارد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که LARS-WG در شبیه‌سازی میانه نمایه‌های دمایی در ایستگاه مهرآباد عملکرد مناسب دارد، اما در بازتولید رخدادهای فرین وابسته به تداوم و همچنین رویدادهای بسیار نادر، با عدم قطعیت بالایی مواجه است. این اختلاف‌ها را می‌توان ناشی از ماهیت پارامتریک و نیمه‌تجربی مدل LARS-WG دانست. برخلاف مدل‌های دینامیکی که بر پایه حل معادلات فیزیکی عمل می‌کنند، LARS-WG یک مولد تصادفی آب و هوا است که بر اساس توزیع‌های احتمال، داده تولید می‌کند. بنابر ماهیت این مدل، شبیه‌سازی دقیق دم‌های انتهایی توزیع و تداوم‌های طولانی مدت (مانند توالی روزهای خشک یا گرم) به سادگی امکان پذیر نیست (Semenov, 2008; Duran & Mei, 2014). زیرا این رویدادها دارای وابستگی‌های زمانی و حافظه اقلیمی هستند که در فرضیات ساده‌شده مدل به خوبی لحاظ نشده‌اند.

علاوه بر این، شرایط محلی و ناهمگونی اقلیم نیمه‌خشک تهران (مانند تأثیرپذیری از پدیده‌های همرفتی موضعی) می‌تواند دقت شبیه‌سازی و برآورد این نمایه‌ها را کاهش دهد.

به رغم نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG و با وجود عدم قطعیت در برآورد دقیق مقادیر مطلق برخی از نمایه‌های فرین دمایی و بارش، در ادامه نتایج پیش‌نگری این نمایه‌های فرین برای دوره آتی در ایستگاه مهرآباد ارایه شده است. زیرا پیش‌نگری روندهای کلی و جهت تغییرات شناسایی شده در این پژوهش، می‌تواند به عنوان هشدار اولیه برای برنامه‌ریزان شهری و مدیران بحران مورد استفاده قرار گیرد.

پیش‌نگری تغییرات مقادیر فرین برای دوره آینده نزدیک میزان تغییرات میانگین نمایه‌های فرین دمایی در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نمایه‌ی SU و TR20 تحت دو سناریو و در هر ۵ مدل افزایش معنی‌داری را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، افزایش بیشتری به نسبت سناریوی مقابل پیش‌نگری شده است. بیشترین میزان افزایش توسط مدل‌های ACCESS، CNRM، MRI و کمترین افزایش با مدل HadGEM3 و MPI به دست آمد.

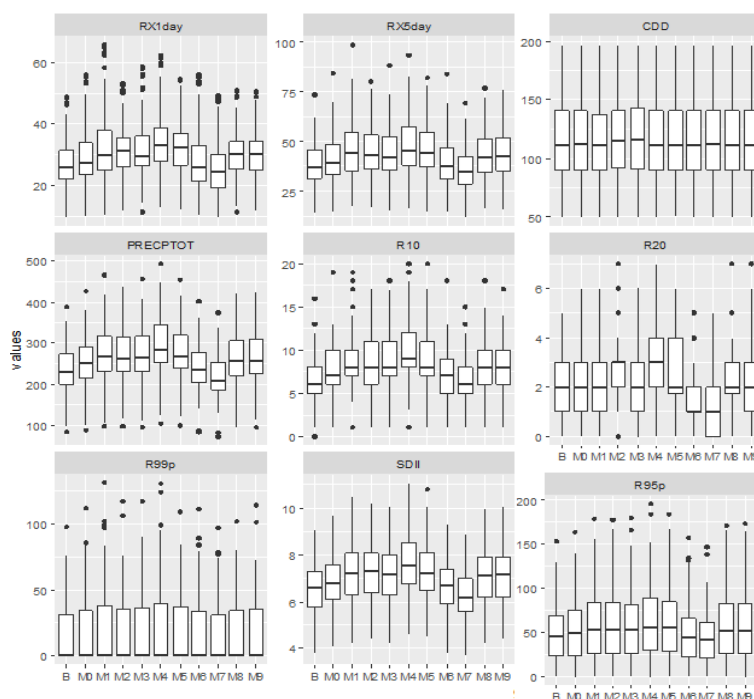
در شکل ۸، نمودار جعبه‌ای مربوط به مقادیر پیش‌نگری شده نمایه‌های فرین بارش با استفاده از ۵ مدل اقلیمی تحت دو سناریوی بدبینانه SSP585 و خوش‌بینانه SSP126 در مقایسه با دوره پایه (B) آورده شده است. مدل MPI تحت هر دو سناریو و مدل ACCESS تحت سناریوی SSP126، تغییری در دو نمایه RX1day و RX5day نسبت به دوره پایه نشان نمی‌دهند، درحالی‌که تحت سناریوی SSP585 برای مدل ACCESS و تحت هر دو سناریو برای سه مدل دیگر، طی دوره آتی ایستگاه مهرآباد شاهد افزایش در این دو نمایه خواهد بود. نمایه

CDD طی دوره آتی، تغییر معنی‌داری نسبت به دوره پایه نشان نمی‌دهد. نمایه تعداد روزهای تر (R10mm)، نیز در مدل MPI و تحت هر دو سناریو تفاوتی با دوره پایه نشان نمی‌دهد، اما در سایر وضعیت‌ها (۴ مدل دیگر تحت دو سناریو) افزایش معنی‌داری را نسبت به دوره پایه نشان

می‌دهد که بیشترین میزان افزایش توسط مدل HadGEM3 به دست آمد. در مقابل، برای نمایه روزهای خیلی مرطوب (R20mm) تغییر معنی‌داری تنها در دو مدل CNRM و HadGEM3 تحت سناریوی SSP126 مشاهده شد.

جدول ۴. میزان تغییرات میانگین نمایه‌های فرین دما (بر حسب روز) ۲۰۳۱-۲۰۵۰

مدل/سناریو	نام مدل	FD	TR20	SU30
ACCESS-SSP126	M0	-۷/۴	۲۳	۱۹
ACCESS-SSP585	M1	-۱۱/۴	۲۶/۴	۲۱
CNRM-SSP126	M2	-۱۴/۹	۲۶/۷	۲۲/۵
CNRM-SSP585	M3	-۱۹/۱	۳۰/۳	۲۵/۲
HadGEM3-SSP126	M4	-۱۳/۸	۱۲/۳	۱۰/۳
HadGEM3-SSP585	M5	-۱۷/۴	۲۳/۲	۲۲/۱
MPI-SSP126	M6	-۸/۴	۱۱/۶	۸/۸
MPI-SSP585	M7	-۱۲/۵	۱۸/۶	۱۶/۴
MRI-SSP126	M8	-۱۲/۹	۲۲/۷	۱۹/۸
MRI-SSP585	M9	-۱۳	۲۶/۷	۲۳/۴



شکل ۸. مقایسه نمایه‌های فرین بارش پیش‌نگری شده با دوره پایه برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (ایستگاه مهرآباد) با استفاده از ۵ مدل CMIP6 تحت دو سناریوی SSP

در مدل MPI تحت هر دو سناریو، کاهش نسبت به دوره پایه به دست آمد. در حالی که در سایر مدل‌ها، تفاوتی با مقادیر دوره پایه به دست نیامد. همچنین، در ۵ مدل و تحت هر دو سناریو، دو نمایه صدکی بارشی تفاوتی با دوره پایه نشان ندادند. افزایش معنی‌دار در نمایه SDII در دو مدل CNRM و HadGEM3 تحت دو سناریو و همچنین در مدل ACCESS تحت سناریوی SSP585 به دست آمد. بر اساس نتایج، مدل MPI

کاهش معنی‌داری در نمایه شدت بارش روزانه برای دوره آتی در این ایستگاه پیش‌نگری کرده است. در جدول ۵ درصد تغییرات این نمایه‌ها نسبت به دوره پایه آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین درصد تغییرات در تمامی نمایه‌ها توسط مدل HadGEM3 تحت سناریوی SSP126 به دست آمده است. مدل MPI تحت سناریوی SSP585 کاهش بارش کل را برای دوره آتی پیش‌نگری کرده است.

جدول ۵. تغییرات میانگین نمایه‌های فرین بارش ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (بر حسب درصد)

مدل/سناریو	RX1day (mm)	RX5day (mm)	CDD (روز)	Prctotal (mm)	R10mm (روز)	R20mm (روز)	R95P (mm)	R99P (mm)
ACCESS-SSP126	۸/۵	۸/۱	۰	۸/۳	۱۳/۴	۱۰/۱	۱۰/۴	۱۶/۹
ACCESS-SSP585	۱۹/۶	۱۹/۵	-۱/۵	۱۶/۸	۲۹/۷	۲۶/۳	۲۲/۹	۳۶
CNRM-SSP126	۱۴/۶	۱۶	۲/۶	۱۴/۲	۲۴/۲	۴۵/۸	۱۶/۷	۱۶/۲
CNRM-SSP585	۱۵/۴	۱۵/۷	۳/۹	۱۴/۷	۲۷/۲	۳۰/۲	۱۹/۶	۲۳/۴
HadGEM3-SSP126	۲۴/۴	۲۴/۸	۰	۲۵/۱	۴۶/۴	۵۳/۱	۳۱/۳	۳۷/۹
HadGEM3-SSP585	۱۷/۲	۱۸/۶	۰	۱۷/۵	۳۰/۵	۴۴/۱	۲۴/۱	۲۱/۹
MPI-SSP126	۳/۲	۳	۰	۱/۸	۱۰/۵	-۷/۸	۱/۹	۱۳
MPI-SSP585	-۶/۱	-۵/۶	۰/۵	-۷/۳	-۴/۲	-۳۱/۸	-۸/۷	-۰/۶
MRI-SSP126	۱۱/۲	۱۲/۳	۰	۱۱/۳	۱۸/۶	۳۷/۴	۱۴/۹	۱۲/۳
MRI-SSP585	۱۱/۳	۱۲/۷	۰	۱۲	۲۱/۱	۳۵/۸	۱۴/۴	۱۲/۸

== خلاصه و نتیجه گیری

استان تهران به دلیل تمرکز بالای جمعیت (بیش از ۹ میلیون نفر) و گسترش سریع شهرنشینی، به طوری که مساحت اراضی شهری از حدود ۲۴۵۰۰ هکتار در سال ۱۹۷۶ به بیش از ۷۳۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است، در برابر مخاطرات اقلیمی و رخدادهای فرین جوی و اقلیمی آسیب‌پذیری فزاینده‌ای دارد. از این‌رو، استفاده از مدل‌های قابل اعتماد برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و پیش‌نگری تغییر اقلیم در مقیاس محلی، یکی از

پیش‌نیازهای برنامه‌ریزی مدیریت ریسک و سازگاری با تغییر اقلیم به شمار می‌آید.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل LARS-WG 8.0 در برآورد میانگین متغیرهای دما و بارش و شبیه‌سازی نمایه‌های فرین اقلیمی در ایستگاه مهرآباد عملکرد قابل قبولی دارد و می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای مقیاس‌کاهی آماری و پیش‌نگری تغییرات آتی متغیرهای اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. ارزیابی نمایه‌های فرین بارش ETCCDI در دوره پایه (۱۹۸۱-۱۹۸۱)

(۲۰۱۰) نشان داد که مدل توانسته است ویژگی‌های آماری عمده بارش‌های فرین را با دقت مناسبی برآورد کند. این یافته با نتایج مطالعات (تویتش باین و سیرت، ۲۰۱۲؛ طالبی و همکاران ۲۰۲۵؛ لطفی و همکاران، ۲۰۲۲) و کمری و همکاران (۱۳۹۹) همسو است که کارایی مطلوب این مدل را در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی نشان داده‌اند. نزدیکی میانه‌ها و همپوشانی قابل توجه دامنه بین چارکی در اغلب نمایه‌ها، به ویژه $RX1day$ ، $RX5day$ ، $PRCPTOT$ ، CWD و $R10$ ، بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی رفتار عمومی بارش‌های فرین است. با این حال، در نمایه‌های مرتبط با رخدادهای بسیار شدید و با فراوانی کمتر، از جمله $R20$ ، $SDII$ و $R99p$ ، اختلاف بیشتری میان داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مشاهده شد که نشان‌دهنده گرایش مدل به بیش‌برآورد شدت یا فراوانی این رخدادهای فرین است. در ارزیابی نمایه‌های فرین دمایی نیز مدل عملکرد مناسبی در بازتولید FD و SU نشان داد، اما در شبیه‌سازی رخدادهایی با فراوانی کمتر در اقلیم نیمه خشک تهران و همچنین توصیف کننده تداوم گرما و سرما، به ویژه $CSDI$ ، $WSDI$ و ID توانمندی کمتری به دست آمد.

چنین نتایجی با ماهیت مدل و نتایج پژوهش‌های قبلی هم راستا می‌باشد. سمف (۲۰۰۸) نشان داد که فرض توزیع نرمال برای متغیر دما در مدل LARS-WG می‌تواند توانایی مدل را در برآورد مقادیر بسیار فرین این متغیر کاهش دهد. همچنین کالانکا^{۲۳} (۲۰۲۰) کاهش دامنه تغییرات شبیه‌سازی شده دما را یکی از مهم‌ترین عوامل ضعف مدل در شبیه‌سازی رخدادهای فرین دمایی عنوان کرده است. در مورد بارش نیز دوان و می (۲۰۱۴) نشان دادند که عملکرد مدل‌های مولد آب‌وهوا در شبیه‌سازی رخدادهای فرین، به ویژه در اقلیم‌های مختلف، با عدم قطعیت همراه است. بدر ایران نیز

فرزان‌منش و همکاران (۲۰۱۲) به این موارد اشاره کرده‌اند. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده در نمایه‌های فرین در این پژوهش را می‌توان ناشی از محدودیت ذاتی مدل‌های مولد آب‌وهوا در بازتولید رفتار آماری دنباله توزیع و رخدادهای با فراوانی کم دانست.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که LARS-WG 8.0 ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در دوره پایه و پیش‌نگری تغییرات آینده نمایه‌های فرین در ایستگاه مهرآباد است. با این حال، در تفسیر نتایج مربوط به رخدادهای بسیار نادر و شدید، به ویژه موج‌های گرمایی و سرمای پایدار و بارش‌های صدکی، باید عدم قطعیت مدل مدنظر قرار گیرد. نتایج پیش‌نگری نمایه‌های فرین منتخب برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۳۱ نشان داد تعداد روزهای گرم (SU) بین ۱۰ تا ۲۳ روز و شب‌های حاره‌ای ($TR20$) بین ۱۲ تا ۳۰ روز نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. بیشینه بارش یک‌روزه ($RX1day$) تحت سناریوی SSP5-8.5 احتمالاً تا ۱۹٪ افزایش خواهد یافت، در حالی که تغییرات چشمگیری در نمایه تداوم دوره‌های خشک (CDD) پیش‌نگری نشد. این روندهای افزایشی در نمایه‌های گرمایی، اگرچه با عدم قطعیت در مقادیر مطلق همراه است، اما جهت کلی تغییرات به سوی گرم‌تر شدن و تغییر الگوی بارش را به وضوح نشان می‌دهد و لازم است در برنامه‌ریزی شهری و مدیران بحران در کلان‌شهر تهران مدنظر قرار گیرد. در این پژوهش به منظور کاهش عدم قطعیت از ۵ مدل اقلیمی استفاده شد. اما، استفاده همزمان از چند مدل مقیاس‌گاهی می‌تواند اطمینان‌پذیری سناریوهای آتی این نمایه‌ها را برای ایستگاه مورد بررسی افزایش داده و مبنای علمی مناسب‌تری برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت مخاطرات اقلیمی در کلان‌شهر تهران فراهم آورد.

== سپاسگزاری ==

این مقاله از طرح پژوهشی با عنوان " تعیین توزیع مکانی و زمانی مخاطرات جوی و اقلیمی استان تهران و ارائه برنامه جامع مدل سازی تاب آوری در برابر مخاطرات جوی، تغییر اقلیم و پهنه بندی خطرپذیری ناشی از آن" استخراج شده است که با حمایت مالی سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان تهران انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می شود.

== منابع ==

- Chen, H., Xu, C. Y., & Guo, S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.040>
- CRED. (2018). Natural disasters 2017. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.
- Duan, K., & Mei, Y. (2014). A comparison study of three statistical downscaling methods and their model-averaging ensemble for precipitation downscaling in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 116(3–4), 707–719. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0984-y>
- Etemadi, H., Samadi, S., & Sharifikia, M. (2014). Uncertainty analysis of statistical downscaling models using general circulation model over an international wetland. *Climate Dynamics*, 42, 2899–2920. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1855-0>
- Farzanmanesh, R., Abdullah, A. M., Shakiba, A., & Amanollahi, J. (2012). Impact assessment of climate change in Iran using LARS-WG model. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 20(2), 341–352.
- Fekete, A., Asadzadeh, A., Ghafory-Ashtiany, M., Amini-Hosseini, K., Hetkämper, C., Moghadas, M., ... & Kötter, T. (2020). Pathways for advancing integrative disaster risk and resilience management in Iran: Needs, challenges and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 49, 101635. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101635>
- Ghasemian, A., Hooshmand, E., Farkhani, E.M. et al. Delphi consensus validation of an integrated climate sensitive diabetes management model for climate vulnerable health systems in Iran. *Sci Rep* 16, 25943 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-56784-z>
- Gitau, M. W., Mehan, S., & Guo, T. (2018). Weather generator effectiveness in capturing climate extremes. *Environmental Processes*, 5(Suppl 1), 153–165. <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0306-8>
- Goodarzi, E., Dastorani, M., Massah Bavani, A., & Talebi, A. (2015). Evaluation of the Change-Factor and LARS-WG methods of downscaling for simulation of climatic variables in the future (Case study: Herat Azam Watershed, Yazd – Iran). *ECOPERSIA*, 3(1), 833–846.
- Hailesilassie, W. T., Tekleab, S., & Ayenew, T. (2023). Projecting potential evapotranspiration under climate change scenarios using the LARS-WG model in the Lake Ziway Watershed, Ethiopia. *International Journal of Global Warming*, 31(2), 165–177. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.133727>
- Hajibabae, M., Amini-Hosseini, K., & Ghayamghamian, M. R. (2014). Earthquake risk assessment in urban fabrics based on physical, socioeconomic and response capacity parameters (A case study: Tehran city). *Natural*
- بابایان، ا.، و نجفی، ز. (۱۳۸۹). تحلیل تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دوره ی ۳۹–۲۰۱۰ با استفاده از ریزگردانی خروجی الگوی GCM، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۸(۲) <https://doi.org/10.22067/geography.v8i15.950>
- سبحانی، ب.، اصلاحی، م.، و بابائیان، ا. (۱۳۹۶). مقایسه روش های ریزمقیاس نمایی آماری مدل های تغییر اقلیم در شبیه سازی عناصر اقلیمی در منطقه شمال غرب ایران. پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴۹(۲)، ۳۰۱–۳۲۵. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.62847>
- کمری، ح.، زینلی، ا.، سلطانی، ا.، و قادری، ف. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل LARS-WG در پیش بینی پارامترهای هواشناسی مناطق اقلیمی زیر کشت پنبه در ایران. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۳(۴)، ۲۴–۴۰. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.17645.2300>
- کوهی، م.، بابائیان، ا.، موسوی بایگی، م.، فریدحسینی، ع.، و خزانه داری، ل. (۱۳۹۲). تغییرات پیش بینی شده در بارش های فرین مشهد طی قرن بیست و یکم، تحقیقات منابع آب ایران، ۹(۱)، ۶۱–۷۴.
- Al-Maliki, L. A., Mukheef, R. A. A. H., El-Tawil, K., & Al-Ansari, N. (2025). Climate change trends and adaptation strategies in Southern Regions of Iraq. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 13(4), 449–468.
- Calanca, P. (2020, May). Underestimation of temperature variability in weather generators and implications for the representation of extreme temperatures in downscaled climate change scenarios [Conference abstract]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 4572.
- Chen, H., Guo, J., Zhang, Z., & Xu, C. Y. (2013). Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3), 363–375. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0793-8>

simulation of climatic variables in the future (Case study: Herat Azam Watershed, Yazd – Iran). *ECOPERSIA*, 3(1), 833–846. (Duplicate of Goodarzi et al., 2015; check publication year)

Teutschbein, C., Wetterhall, F., & Seibert, J. (2011). Evaluation of different downscaling techniques for hydrological climate-change impact studies at the catchment scale. *Climate Dynamics*, 37(9), 2087–2105. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-0979-3>

Vallam, P., & Qin, X. S. (2018). Projecting future precipitation and temperature at sites with diverse climate through multiple statistical downscaling schemes. *Theoretical & Applied Climatology*, 134(1–2), 669–688. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2296-0>

Vesely, F. M., Paleari, L., Movedi, E., Bellocchi, G., & Confalonieri, R. (2019). Quantifying uncertainty due to stochastic weather generators in climate change impact studies. *Scientific Reports*, 9(1), 9258. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45613-x>

World Meteorological Organization. (2021, August 30). *Weather-related disasters increase over past 50 years, causing more damage but fewer deaths*. <https://wmo.int/media/news/weather-related-disasters-increase-over-past-50-years-causing-more-damage-fewer-deaths>

Xu, Y. P., Zhang, X., & Tian, Y. (2012). Impact of climate change on 24-h design rainfall depth estimation in Qiantang River Basin, East China. *Hydrological Processes*, 26(26), 4067–4077. <https://doi.org/10.1002/hyp.9404>

Yu, E., Liu, D., Yang, J., Sun, J., Yu, L., & King, M. P. (2023). Future climate change for major agricultural zones in China as projected by CORDEX-EA-II, CMIP5 and CMIP6 ensembles. *Atmospheric Research*, 288, 106731. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106731>

Zhang, Q., Li, L., Ebert, B., Golding, B., Johnston, D., Mills, B., ... & Keller, J. (2019). Increasing the value of weather-related warnings. *Science Bulletin*, 64(10), 647–649. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.010>

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

Hazards, 74(3), 2229–2250. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1288-2>

Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., & Melville, B. W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 475–484. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0416-x>

Karimi, S., Karimi, S., Yavari, A. R., & Niksokhan, M. H. (2015). Prediction of temperature and precipitation in Damavand catchment in Iran by using LARS-WG in future. *Earth Sciences*, 4(3), 95–100.

Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H., & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4649–4659. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01406-4>

Roushangar, K., & Abdelzad, S. (2023). River flow modeling in semi-arid and humid regions using an integrated method based on LARS-WG and LSTM models. *Water Resources Management*, 37(10), 3813–3831. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03521-y>

Sabri, N. Q., & Khayyun, T. S. (2024). Estimation of future climate change in Low Folded Zone, Iraq with the LARS-WG and five GMS models under CMIP5 scenarios. *Journal of Ecohumanism*, 3(8), 2207–2222. <https://doi.org/10.62754/joe.v3i8.4898>

Semenov, M. A. (2008). Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 35, 203–212. <https://doi.org/10.3354/cr00731>

Semenov, M. A. (2024). LARS-WG stochastic weather generator for climate change impact assessment (LARS-WG 8.0) [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10632391>

Semenov, M. A., & Brooks, R. J. (1999). Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research*, 11, 137–148. <https://doi.org/10.3354/cr011137>

Taghizadeh, A. O., Hosseini, M., Navidi, I., Mahaki, A. A., Ammari, H., & Ardalan, A. (2012). Knowledge, attitude and practice of Tehran's inhabitants for an earthquake and related determinants. *PLOS Currents Disasters*. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.5d6e7e1e55c3d1c0efff0e58c0ab42f1>

Talebi, A., Massah Bavani, A., Dastorani, M., & Goodarzi, E. (2025). Evaluation of the Change-factor and LARS-WG methods of downscaling for

Performance Evaluation of LARS-WG 8.0 in Simulating Extreme Temperature and Precipitation Indices and Projecting Near-Future Changes (Case Study: Mehrabad Station, Tehran, Iran)

Mansoureh Kouhi¹, Ebrahim Asadi Oskoue^{1*}, Fatemeh Abbasi², Razieh Pahlavan³

¹ Assistant Prof., RIMAS, CRI, Mashhad, Iran

² Expert, RIMAS, CRI, Mashhad, Iran

³ Expert, RIMAS, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: e.asadi.o@gmail.com

Received: 19 May 2026, Accepted: 13 August 2026

ABSTRACT

The increasing frequency and intensity of climate extremes in recent decades highlight the need for reliable tools like Global Climate Models to project future changes in temperature, precipitation, and extreme climate indices at local and regional scales. Given the coarse spatial resolution of GCMs, downscaling approaches (statistical and dynamical) are widely applied to generate station-scale climate information. This study evaluates the performance of the latest version of the stochastic weather generator, LARS-WG8.0, in simulating temperature, precipitation, and climate extreme indices, and subsequently projects their future changes for the near-future period (2031–2050). To this end, daily observed minimum and maximum temperature and precipitation data from Mehrabad synoptic station, Tehran, were obtained from the IRIMO for the baseline period (1981–2010). The comparison of ETCCDI extreme indices revealed that LARS-WG8.0 adequately reproduces the central values and variability of the majority of extreme indices (approximately 12 out of 16 indices) for the study station. However, the most pronounced discrepancies were observed for indices associated with persistent and highly extreme events, including WSDI, CSDI, ID, and R99p. Future projections, derived from the outputs of five CMIP6 models under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, indicate that the number of summer days (SU) and tropical nights (TR20) will increase by 10–23 days and 12–30 days, respectively, relative to the baseline period. Moreover, maximum 1-day precipitation (RX1day) is projected to increase by up to 19% under the SSP5-8.5 scenario, while no significant changes are anticipated for the consecutive dry days index (CDD). These findings provide valuable insights for climate change adaptation planning and weather-related risk management in the Tehran metropolitan area.

Keywords: LARS-WG8.0, Extreme Indices, CMIP6, SSP Scenarios, Climate Change.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kouhi, M., Asadi Oskoue, E., Abbasi, F., and Pahlavan, R. (2026). Performance Evaluation of LARS-WG 8.0 in Simulating Extreme Temperature and Precipitation Indices and Projecting Near-Future Changes (Case Study: Mehrabad Station, Tehran, Iran). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science.*, 9(1): 71–88. Doi: 10.22034/jmas.2026.582308.1274

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

