

## مدلسازی و پیش‌بینی روند بارش و خشکسالی شمال غرب ایران برای کاهش مخاطرات

علی محمد خورشید دوست

استاد گروه آب‌وهواشناسی، دانشگاه تبریز

علی‌اکبر رسولی

استاد گروه سنجش از دور، دانشگاه تبریز

سعید زنگنه\*

دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۷ تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۳/۱۹)

### چکیده

پیش‌بینی احتمال وقوع خشکسالی در سال‌های مختلف و فعالیت‌های پیشگیرانه در رأس تدابیر اتخاذ شده در مقابل خشکسالی قرار دارد. هدف پژوهش حاضر، پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی و تکنیک تولید داده‌های مصنوعی است. در این تحقیق به‌منظور دستیابی به این اهداف، مطالعه‌ای ترکیبی با استفاده از داده‌های ایستگاهی، خروجی مدل‌های آماری و تولید داده‌های مصنوعی انجام گرفت. ابتدا با استفاده از مدل آماری CLIMGEN داده‌های مصنوعی تولید شده و با استفاده از شاخص SPI خشکسالی‌های آینده منطقه تحقیق استخراج شد. در نهایت با استفاده از MINITAB روند خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب شمال غرب ایران ترسیم شد. برای صحت‌سنجی، توسط داده‌های مشاهداتی دوره پایه به پیش‌بینی داده‌های دوره ۲۰۱۰-۲۰۱۱ به‌وسیله مدل پرداخته شد. همبستگی بین داده‌های تولید شده با داده‌های مشاهداتی توسط SPSS صورت گرفت که در اکثر ایستگاه‌ها دقت به نسبت خوبی را نشان می‌دهد. براساس نتایج، ایستگاه‌های اردبیل، جلفا و تکاب روند ملایم کاهش بارش و افزایش خشکسالی را دارند و ایستگاه‌های خوی، میانه و سردشت روند ملایم افزایش بارش و افزایش ترسالی را نشان می‌دهند. در نمودارهای ایستگاه‌های تبریز، ارومیه و پارس‌آباد نیز روند یکنواخت و بدون تغییر البته با دوره‌های خشک و مرطوب مشاهده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی خشکسالی، شمال غرب ایران، مدل CLIMGEN، MINITAB.

## مقدمه

خشکسالی را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: خشکسالی آب‌وهوایی، کشاورزی، هیدرولوژیک و اقتصادی. بی‌شک رخداد خشکسالی در یک منطقه همانند سایر پدیده‌های آب‌وهوایی نتیجه تغییر و تحولات آب‌وهوایی ناشی از گردش عمومی اتمسفر است. به نظر بران و رادیر وقوع خشکسالی ممکن است ناشی از عوامل محلی باشد، ولی اغلب به دلیل روابط بین بخش‌هایی از اجزای گردش عمومی اتمسفر است [۷]. به بارش کمتر از درازمدت، خشکسالی آب‌وهوایی اطلاق می‌شود [۶]؛ بنابراین می‌توان گفت خشکسالی از جمله مخاطرات اقلیمی است که به صورت تدریجی ظاهر می‌شود و خسارات فراوانی را به جای می‌گذارد. مناطق مختلف ایران نیز مانند دیگر نقاط جهان از وقوع پدیده خشکسالی در امان نیست؛ در گذشته خشکسالی‌هایی به وقوع پیوسته و در آینده نیز خشکسالی‌هایی اتفاق خواهد افتاد. در منطقه شمال غرب ایران نیز با توجه به وجود دریاچه ارومیه، خشکسالی‌های رخ داده، خسارات دوچندانی برای کشاورزی در پی داشته و نیز کاهش ذخیره آب و افت آب‌های زیرزمینی و در نتیجه خشک شدن تدریجی دریاچه و وقوع توفان‌های نمکی را سبب شده است. با توجه به مطالب یادشده می‌توان گفت خشکسالی و کمبود بارش و نبود مدیریت مخاطرات و مدیریت نادرست منابع آبی موجود، عامل اصلی مشکلات این منطقه است که با پیش‌بینی آن می‌توان تدابیر حفاظتی و پیشگیرانه را برای جلوگیری از رخداد آن در مناطقی که احتمال وقوع آن بیشتر است به کار برد. یکی از روش‌های پیش‌بینی خشکسالی، استفاده از روش تولید داده‌های مصنوعی است.

پیش‌بینی داده‌های هواشناسی با هدف پیش‌بینی خشکسالی و سیل و گرمایش جهانی و ... برای مدیریت تولید محصول در آینده و مدیریت منابع آب و جلوگیری از ایجاد بحران در آینده ضروری است. پیش‌بینی اطلاعات هواشناسی به برنامه‌ریزان و مسئولان در موارد مذکور کمک خواهد کرد. پژوهشگران مدل‌های مختلفی را برای پیش‌بینی اطلاعات هواشناسی، معرفی کرده‌اند که از آن جمله می‌توان مدل‌های WGEN [۱۷]، WXGEN [۲۲]، USCLIMATE [۱۱]، CLIMAX [۹] و CLIMGEN [۲۳] را نام برد. اکثر این مدل‌ها برای پیش‌بینی داده‌های هواشناسی، از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌کنند [۲۱]. در مطالعه‌ای، به ارزیابی مدل CLIMGEN و پیش‌بینی اطلاعات هواشناسی برای منطقه تبریز پرداخته شد که نتایج نشان داد مدل CLIMGEN مقادیر دمای هوا، درصد رطوبت نسبی، و بارش را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند [۳]. محققان زیادی در نقاط مختلف جهان این مدل را آزموده‌اند و اعتبار آن تأیید شده است [۲۴].

استفاده از مدل‌های آماری، سابقه‌ای طولانی در پیش‌بینی خشکسالی دارد. گابریل و نیومن [۱۰] و تورانیان [۲۶] اولین بار از مدل‌های رگرسیون و مارکوف برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده کردند. پوجویچ [۲۷] نیز از اولین افرادی بود که ویژگی‌های خشکسالی را با استفاده از توزیع احتمالی هندسی بررسی کرد.

مک کی و همکاران [۱۴] توانمندی مدل CLIMGEN را برای شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های انتاریوی جنوبی در کانادا بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مدل مذکور از توانایی خوبی برای شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی برخوردار است. در مطالعه‌ای دیگر سه مدل LARS-WG، SDSM و شبکه عصبی مصنوعی آزمون شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل SDSM توانست در سطح اطمینان ۹۵ درصد داده‌های مشاهداتی را بهتر از سایر مدل‌ها در مقادیر ریزمقیاس شده حفظ کند [۱۳].

سمنوف و همکاران [۲۰] به بررسی و مقایسه دو مدل LARS-WG و WGEN بر روی ۱۸ ایستگاه در آمریکا، آسیا و اروپا پرداختند که نتایج این مقایسات بیانگر توانایی زیاد مدل لارس در تولید داده برای اقلیم‌های متفاوت بود.

در تحقیق دیگری تامسون<sup>۱</sup> [۲۵] خشکسالی را پدیده‌ای هیدرولوژیک استوکاستیک دانست و سه رهیافت تئوری Runs، شاخص‌های خشکسالی و تحلیل فراوانی را برای ارزیابی و تحلیل وضعیت خشکسالی به کار گرفت.

در تحقیقی دیگر موری و همکاران [۱۶] اطلاعات مورد استفاده از ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی در جنوب پرتغال را اخذ کردند و در یک مدل لگاریتمی خطی قرار دادند. در تحقیق مذکور نتایج ارزیابی تقاطعی در محل ایستگاه‌ها بسیار خوب ارزیابی شد.

میشرا و همکاران [۱۵] از یک مدل هیبرید که ترکیبی از مدل‌های استوکاستیک خطی و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی غیرخطی است، برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده کردند. با استفاده از سری شاخص بارندگی استاندارد (SPI)، مدل هیبرید و همچنین مدل‌های استوکاستیک و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی‌ها در حوضه رودخانه کاساباتی هند به کار رفت و عملکرد مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد. مدل هیبرید از مدل‌های دیگر دقت بیشتری داشت.

در مطالعه‌ای دیگر پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل تصادفی ترکیبی و مدل شبکه عصبی تحلیل شد. در این تحقیق با استفاده از سری شاخص بارش استاندارد، از مدل ترکیبی و همچنین مدل شبکه عصبی و مدل ANN<sup>۲</sup> برای پیش‌بینی خشکسالی در حوضه رودخانه

1. Tamspon  
2. Artificial Neural Network

کانساباتی<sup>۱</sup> در هند بهره گرفته شد و عملکرد آنها مقایسه شد. مدل ترکیبی برای پیش‌بینی خشکسالی با دقت بیشتری اثبات شد [۱۵].

سانتوس و همکاران [۱۸] به پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای سه منطقه هیدرولوژیکی در حوضه رودخانه سان‌فرانسیسکو در برزیل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شبکه عصبی، ابزار مناسبی برای این نوع پیش‌بینی است. هنگامی که مقیاس زمانی شاخص SPI به‌عنوان زمان هدایت (تقدم) افزایش یابد بهبود پیدا می‌کند و نتیجه نهایی تحت تأثیر مناطق مختلف هیدرولوژیکی قرار نمی‌گیرد. در تحقیق دیگری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پیش‌بینی خشکسالی در یزد (مرکز ایران) بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیبی از بارش و دمای حداکثر مناسب‌ترین ورودی مدل برای دریافت بیشترین دقت در خروجی است. به‌طور کلی مشخص شد که شبکه عصبی مصنوعی ابزاری کارآمد برای مدلسازی و پیش‌بینی حوادث خشکسالی است.

کاوالیراتو و همکاران [۱۲] به تحلیل و پیش‌بینی خشکسالی کوتاه‌مدت در حوضه رودخانه آیسون (یونان) پرداختند. نتایج این تحقیق، بینش جامعی درباره رفتار خشکسالی، یک دوره خشکسالی غالب (۱۹۹۱ تا ۱۹۸۸) با رویدادهای خشکسالی شدید و آشکار و در بسیاری از موارد تغییر کلاس خشکسالی ملایم را به ما می‌دهد.

جهانبخش اصل و قویدل رحیمی [۱] مدلسازی روند بارش و پیش‌بینی خشکسالی‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که به‌طور کلی از نظر شدت وقوع خشکسالی، ایستگاه‌های بررسی شده، خشکسالی‌های ضعیف تا متوسطی را نشان می‌دهند، ولی خشکسالی بسیار شدید در طول دوره آماری مشاهده نشد. از بررسی روند بارش و محاسبات مربوط به پیش‌بینی بارش سال‌های آتی که با استفاده از سری‌های زمانی انجام گرفته است، در اکثر ایستگاه‌ها وقوع خشکسالی پیش‌بینی‌پذیر است.

معافی‌مدنی و همکاران [۸] پیش‌بینی وضعیت خشکسالی استان خراسان رضوی طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ را با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل LARS-WG بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دو شاخص SPI و DI همخوانی خوبی دارند و طی دو دهه آینده خشکسالی در اغلب ایستگاه‌ها و در بیشتر سال‌ها کاهش می‌یابد، به‌جز ایستگاه تربت جام که به‌دلیل افزایش ساعت آفتابی و در نتیجه کاهش بارندگی، افزایش خشکسالی را

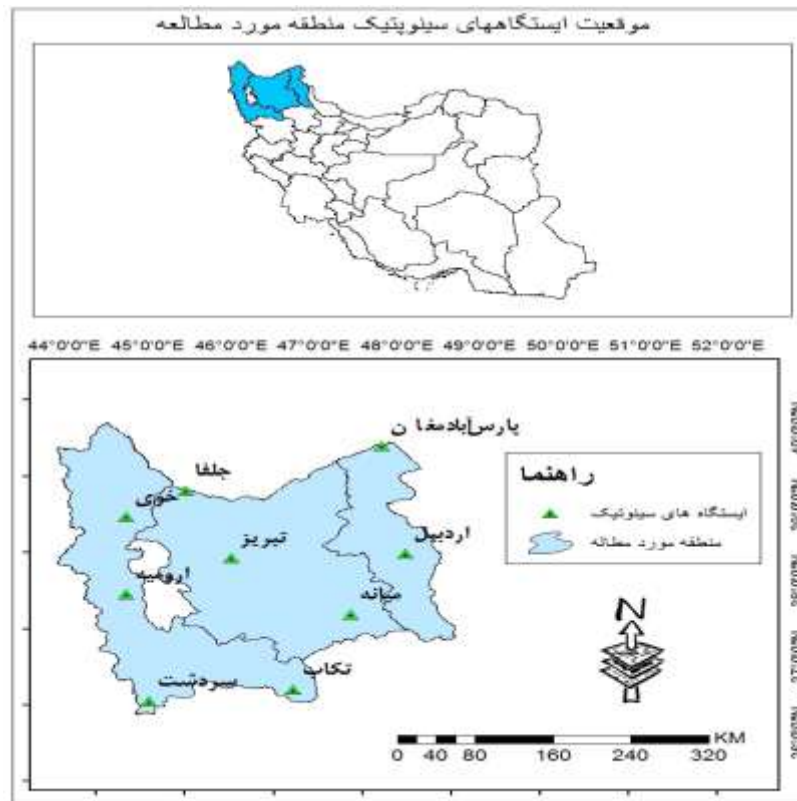
نشان می‌دهد. در حالت کلی، در بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی طی بیست سال آینده وضعیت ترسالی افزایش می‌یابد.

ساری صراف و همکاران [۴]، پایش و پیش‌بینی ترسالی و خشکسالی تبریز را با استفاده از مدل CLIMGEN و شاخص SPI، بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در دوره تحت بررسی روند بارش رو به کاهش گذاشته و از طرف دیگر در دوره پیش‌بینی شده نسبت به دوره مشاهداتی، ترسالی و خشکسالی‌ها رو به افزایش نهاده و از وضعیت نرمال فاصله گرفته است. در تحقیقی دیگر ارزیابی عملکرد دو مدل LARS-WG و CLIMGEN در تولید سری‌های زمانی بارش و درجه حرارت در ایستگاه تحقیقات دیم سیسب-خراسان شمالی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در تولید سری زمانی بارش، مقادیر RMSE و MAE برای مدل LARS-WG کمتر از مدل CLIMGEN بوده و از طرفی مقدار CD در مدل LARS-WG به ۱ نزدیک‌تر بوده است. از نظر شبیه‌سازی درجه حرارت حداقل و حداکثر، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل CLIMGEN در مدلسازی میانگین‌های روزانه و ماهانه درجه حرارت حداقل و حداکثر موفق‌تر از مدل LARS-WG عمل کرده است، به طوری که در مدل LARS-WG از بین آزمون‌های آماری انجام گرفته بر روی میانگین ماهانه درجه حرارت حداقل و حداکثر به ترتیب ۲ و ۳ آزمون در سطح معناداری ۰/۹۵ رد شده‌اند. نتایج همچنین نشان داده که مدل CLIMGEN در مدلسازی دوره‌های یخبندان و گرمای شدید، موفق‌تر از مدل LARS-WG بوده است [۲].

هدف این مطالعه نیز پیش‌بینی خشکسالی در منطقه تحقیق بوده است. به منظور پیش‌بینی خشکسالی از خروجی مدل اتمسفر-اقیانوس استفاده می‌شود. به همین منظور ابتدا بعد از تجزیه و تحلیل داده‌های بارش، داده‌های بارندگی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری CLIMGEN تولید می‌شود. برای کمی کردن ویژگی‌های خشکسالی نیز از شاخص خشکسالی SPI در مقیاس‌های سالانه و متحرک ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه استفاده می‌شود. در این تحقیق از نرم‌افزار SPSS برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و از نرم‌افزار MINI TAB برای روندیابی بارش و خشکسالی استفاده شد.

## روش‌ها و داده‌ها

منطقه تحقیق، در شمال غرب ایران قرار دارد و شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل است. با توجه به قرارگیری دریاچه ارومیه در منطقه شمال غرب ایران و افت آب این دریاچه در سال‌های اخیر، مطالعات پیش‌بینی بارش و خشکسالی در این منطقه حائز اهمیت است. شکل ۱ موقعیت منطقه تحقیق و ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه تحقیق و ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب

در این پژوهش، داده‌های مورد نیاز ایستگاه‌های هم‌دید منطقه تحقیق طی دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۸۲ از مرکز آمار سازمان هواشناسی اخذ شد. برای پیش‌بینی و تولید داده‌های آماری دوره ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ از مدل CLIMGEN استفاده شد. برای سنجش کارایی مدل، داده‌های هواشناسی روزانه از دوره پایه تا ۲۰۰۱ برای پیش‌بینی داده‌های هواشناسی برای سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. همبستگی بین داده‌های تولیدشده و داده‌های مشاهداتی توسط SPSS صورت گرفت. از نرم‌افزار MINITAB نیز برای روندیابی بارش و خشکسالی در دوره آتی استفاده شد. در این تحقیق با توجه به ویژگی و مزایای شاخص SPI، از این شاخص استفاده شد که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$spi = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $X_i$  مقادیر بارش برای  $i$  امین ایستگاه،  $\bar{X}$  میانگین بارندگی برای ایستگاه  $i$ ام و  $S$  انحراف معیار از داده‌های  $i$  امین ایستگاه است. بر اساس این شاخص، مناطق خشک و تر معرفی می‌شود. این دسته‌بندی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای EXCEL2010, SPSS16 و MINTAB14 نیز استفاده شد.

جدول ۱. مقادیر SPI و طبقه‌بندی خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها [۵]

مقادیر SPI	
+۲ و بیشتر	ترسالی خیلی شدید
۱/۹۹ تا ۱/۵	ترسالی شدید
۱/۴۹ تا ۱	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا ۰/۵	ترسالی خفیف
۰/۴۹ تا -۰/۴۹	نرمال
-۰/۹۹ تا -۰/۵	خشکسالی خفیف
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	خشکسالی خیلی شدید

#### مدل آماری CLIMGEN

CLIMGEN به‌عنوان یک مولد داده‌های هواشناسی تصادفی، قابلیت برآورد پارامترهای بارندگی، دما، تابش خورشیدی، نقطه شبنم، رطوبت نسبی و سرعت باد برای یک مکان جغرافیایی مشخص را دارد (ژانگ، ۲۰۰۳: ۳۱۲). مدل CLIMGEN در مکان‌های زیادی از جهان، برای مثال در شمال آمریکا، آفریقا و استرالیا آزمون شده است (کو و همکاران، ۲۰۰۷: ۳۴۸). مدل CLIMGEN رخدادهای بارندگی روزانه را با استفاده از روش زنجیره مارکف شبیه‌سازی می‌کند که اساس کار آن دوره‌های خشک و مرطوب است (مک‌کاگو و همکاران، ۲۰۰۳).

مدل CLIMGEN نسخه ارتقا یافته مدل WGEN است که در سال ۱۹۹۰ در دانشگاه ایالتی واشینگتن توسط کمپل توسعه یافت. این مدل توانایی تولید متغیرهای دمای بیشینه، دمای کمینه، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارش را دارد؛ برای تولید عوامل هواشناسی، دست‌کم گرفتن داده‌های ۲۵ سال بارش، ۱۰ سال دما، ۵ سال تابش خورشیدی، و ۷۳۰ روز سرعت باد و درصد رطوبت نسبی ضرورت دارد (رشیدنیقی و همکاران، ۱۳۸۹)؛ بارش در مقیاس روزانه و ماهانه به روش زیر تولید می‌شود:

در فرایند تولید بارش توسط CLIMGEN هم احتمال وقوع و هم مقدار بارش محاسبه می‌شود. برای برخی کاربردها ممکن است شدت و مدت بارش نیز لازم باشد. وقوع بارش روزانه با استفاده از زنجیره مارکف دوحالتی برای تولید تعداد و توزیع بارش انجام می‌گیرد. احتمال وقوع یک روز تر بعد از یک روز خشک با  $\alpha$  و احتمال وقوع یک روز خشک بعد از یک روز تر با  $\beta$  نشان داده می‌شود. روزی که بارش آن ۰/۲۵ میلی‌متر یا بیشتر باشد، روز تر در نظر گرفته می‌شود. در این صورت زنجیره مارکف دوحالتی برای ترکیب احتمالات شرطی به این صورت خواهد بود:

$$\begin{aligned} P(W/D) &= \alpha \\ P(D/D) &= 1 - \alpha \\ P(D/W) &= \beta \\ P(W/W) &= 1 - \beta \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} P(W/D) & \text{ احتمال وقوع یک روز تر بعد از یک روز خشک،} \\ P(D/D) & \text{ احتمال وقوع یک روز خشک بعد از یک روز خشک،} \\ P(D/W) & \text{ احتمال وقوع یک روز خشک بعد از یک روز تر، و} \\ P(W/W) & \text{ احتمال وقوع یک روز تر بعد از یک روز تر است.} \end{aligned}$$

مقادیر احتمالات بالا برای هر ماه از طریق تجزیه و تحلیل بارش‌های بلندمدت ایستگاه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. در روزی که مشخص شد بارش رخ می‌دهد، مقدار بارش براساس احتمال تجمعی توزیع ویبول محاسبه می‌شود. سلکر و هیث<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) نشان دادند که ویبول بهترین توزیع برای ۳۳ ایستگاه هواشناسی آمریکا در شرق کوه‌های راکی است. فرض دیگر مدل CLIMGEN این است که توزیع ویبول برازش مناسبی بر مقادیر بارش روزانه دارد که احتمال تجمعی آن به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$F_R(r) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

که در آن  $F_R(r)$  احتمال تجمعی مقدار بارش کوچک‌تر یا مساوی  $r$ ، و  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای توزیع است. با استفاده از روش معکوس و تبدیل توزیع متغیر یکنواخت استاندارد به توزیع ویبول، مقدار بارش در روزهای بارانی از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$r = \beta(-\ln u_t)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

1. Selke and Haith



مدل CLIMGEN در تولید درجه حرارت حداقل ( $T_n$ ) و درجه حرارت حداکثر ( $T_x$ ) از روش ریچاردسون<sup>۱</sup> استفاده می‌کند. در این روش، دماهای حداکثر و حداقل به‌عنوان فرایندهای تصادفی چندگانه در نظر گرفته می‌شود که میانگین و انحراف معیار آنها توسط وضعیت بارش تر و خشک مشخص می‌شود. سری‌های زمانی باقی‌مانده‌های دماهای حداکثر و حداقل به‌وسیله انتقال میانگین‌های دوره‌ای و تأثیر انحراف معیار به‌دست می‌آیند. براساس این روش، با فرض ایستایی ضعیف (ایستایی مرتبه دوم) داده‌ها، رابطه بین متغیرهای  $T_n$  و  $T_x$  به‌شکل مدل اتورگرسیون چندمتغیره مرتبه اول به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$z_t(j) = Az_{t-1}(j) + B\varepsilon_t(j) \quad (5)$$

که در آن  $Z_t(j)$  ماتریس  $2 \times 1$  برای روز  $T$  است که درایه‌های آن، باقی‌مانده‌های استانداردشده  $T_x$  (به‌ازای  $j=1$ ) و  $T_n$  (به‌ازای  $j=2$ )،  $\varepsilon_t$  ماتریس  $2 \times 1$  شامل مؤلفه‌های تصادفی مستقل است و فرض می‌شود که از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس تبعیت می‌کند.  $A$  و  $B$  ماتریس‌های  $2 \times 2$  هستند که عناصر آنها به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که توالی‌های جدید دارای ضرایب دوره‌ای و همبستگی مطلوب باشند. پس از محاسبه  $Z_t$  مقادیر روزانه  $T_x$  و  $T_n$  از رابطه زیر برآورد می‌شود.

$$X_t(j) = z_t(j)S_t(j) + \bar{X}(j) \quad (6)$$

که  $X_t(j)$  مقادیر روزانه  $T_x$  (به‌ازای  $j=1$ )،  $S_t(j)$  و  $\bar{X}(j)$  به‌ترتیب، انحراف معیار و میانگین متغیر  $Z$  برای روز  $t$  است. مقادیر  $\bar{X}(j)$  و  $S_t(j)$  بسته به وضعیت تری یا خشکی یک روز معین فرق می‌کند.

### یافته‌های پژوهش

برای صحت‌سنجی مدل CLIMGEN ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش دوره پایه، داده‌های دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۱ تولید شد. سپس همبستگی بین داده‌های ساخته‌شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی با استفاده از SPSS برای هر کدام از ایستگاه‌ها صورت گرفت. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین داده‌های میانگین بارش ماهانه تولیدشده توسط مدل و داده‌های واقعی ایستگاه ارومیه در سطح ۰/۰۱ با اطمینان بیش از ۰/۹۶ وجود دارد. جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین داده‌های بارش ماهانه تولیدشده توسط مدل و داده‌های واقعی ایستگاه سردشت در سطح ۰/۰۱ با اطمینان بیش از ۰/۸۶ وجود دارد. همچنین در جدول ۴ ضریب همبستگی بین داده‌های میانگین بارش ماهانه تولیدشده توسط مدل و داده‌های واقعی ایستگاه خوی در سطح ۰/۰۱ با اطمینان بیش از ۰/۹۶ وجود دارد. شکل ۲ تا ۴ نشان‌دهنده

مقادیر بارش مشاهداتی و بارش برآوردشده توسط مدل CLIMGEN در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۱ در ایستگاه‌های ارومیه، سردشت و خوی است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود روند افت‌وخیزها در بارش برآوردشده توسط مدل تقریباً هماهنگ با روند افت‌وخیز در بارش مشاهداتی است؛ هرچند که مقداری اختلاف در مقادیر بارش تولیدشده توسط مدل و بارش مشاهداتی وجود دارد. اما همبستگی بین داده‌های تولیدشده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی ایستگاه نشان‌دهنده این است که در اغلب ایستگاه‌ها همبستگی به نسبت زیادی وجود دارد. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، در اکثر ایستگاه‌های منتخب شمال غرب ایران، بهار فصل پربارش محسوب می‌شود، اما در ایستگاه سردشت، زمستان، فصل پربارش سال به‌شمار می‌رود.

جدول ۲. ضریب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی ایستگاه ارومیه (۲۰۱۰-۲۰۰۱)

ضرایب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی		
داده‌های مدل	داده‌های مشاهداتی	
۰/۹۶۴**	۱	ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مشاهداتی)
	۰	معناداری
۱۲	۱۲	تعداد
۱	۰/۹۶۴**	ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مدل)
	۰	معناداری
۱۲	۱۲	تعداد

\*\* همبستگی در سطح ۰.۰۱ معنادار است (۲ طرفه).

جدول ۳. ضریب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی ایستگاه سردشت (۲۰۱۰-۲۰۰۱)

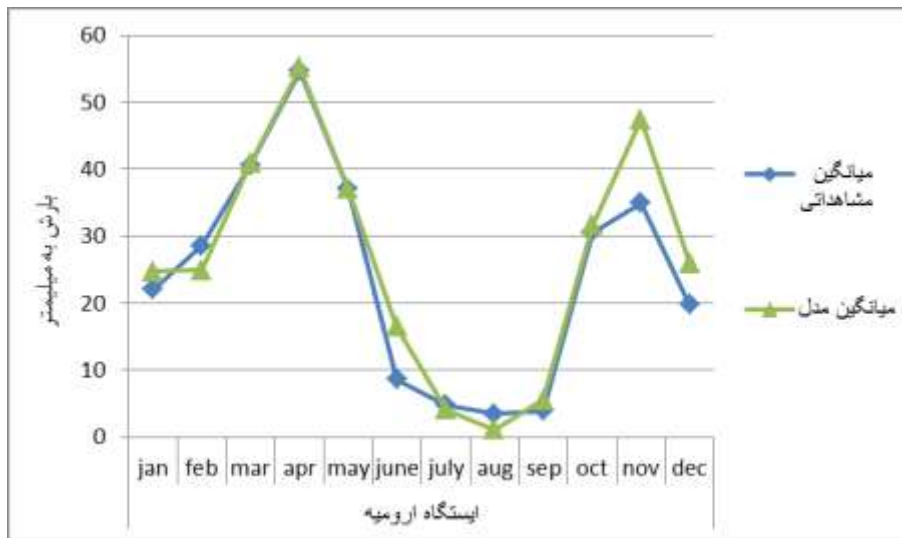
ضرایب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی		
داده‌های مدل	داده‌های مشاهداتی	
۰/۸۶۰**	۱	ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مشاهداتی)
	۰	معناداری
۱۲	۱۲	تعداد
۱	۰/۸۶۰**	ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مدل)
	۰	معناداری
۱۲	۱۲	تعداد

\*\* همبستگی در سطح ۱ درصد معنادار است (دوطرفه)

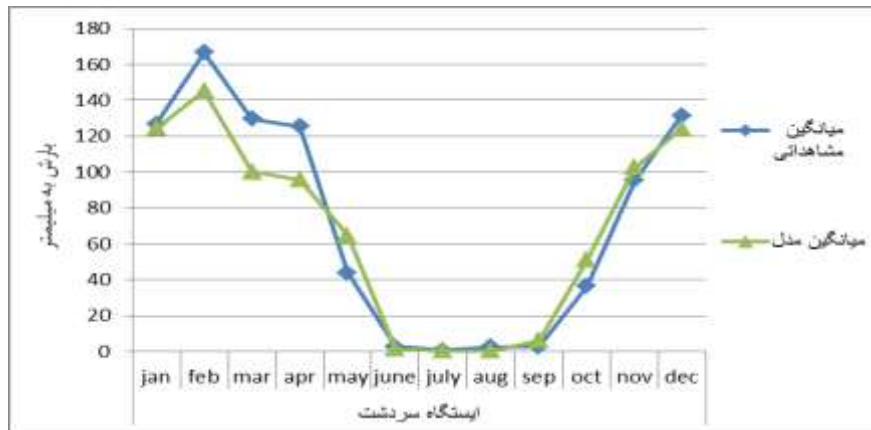
جدول ۴. ضریب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی ایستگاه خوی (۲۰۱۰-۲۰۰۱)

ضرایب همبستگی بین میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی		
	داده‌های مشاهداتی	داده‌های مدل
ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مشاهداتی)	۱	۰/۹۶۱**
معناداری	۰	
تعداد	۱۲	۱۲
ضریب همبستگی پیرسون (داده‌های مدل)	۰/۹۶۱**	۱
معناداری	۰	
تعداد	۱۲	۱۲

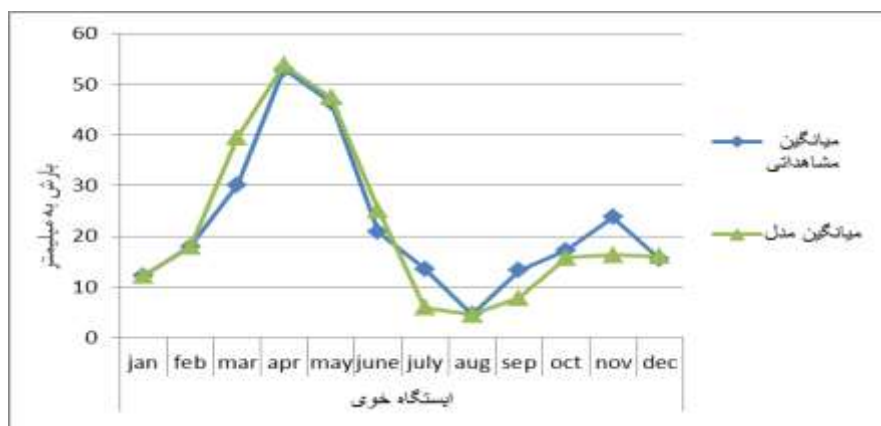
\*\* همبستگی در سطح ۱ درصد معنادار است (دوطرفه).



شکل ۲. نمودار میانگین بارش ماهانه ساخته‌شده و واقعی ایستگاه ارومیه (۲۰۱۰-۲۰۰۱)



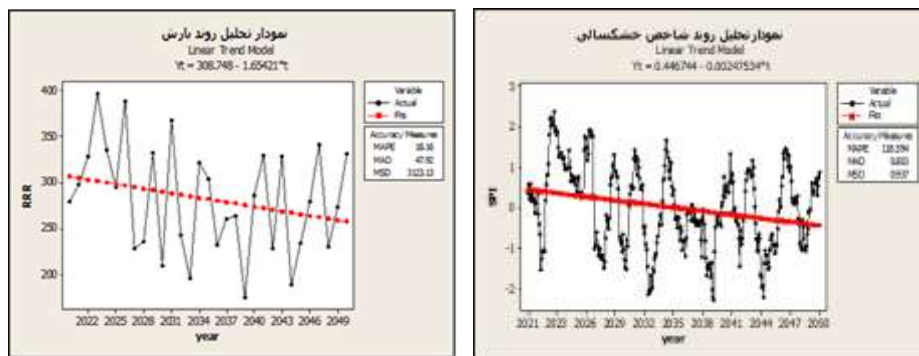
شکل ۳. نمودار میانگین بارش ماهانه ساخته شده و واقعی ایستگاه سردشت (۲۰۱۰-۲۰۱۱)



شکل ۴. نمودار میانگین بارش ماهانه ساخته شده و واقعی ایستگاه خوی (۲۰۱۰-۲۰۱۱)

شکل‌های ۵ تا ۱۱ نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) و روند بارش سالانه سه دهه آینده ایستگاه‌های منتخب سینوپتیکی منطقه تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ایستگاه‌های اردبیل، جلفا و تکاب روند ملایم کاهش بارش و افزایش خشکسالی را نشان می‌دهند. برای مثال نمودار ایستگاه اردبیل چند دوره به نسبت خشک و خیلی خشک با چند دوره به نسبت مرطوب و خیلی مرطوب و همچنین یک دوره فوق‌العاده مرطوب را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های خوی، میانه و سردشت روند ملایم افزایش بارش و افزایش ترسالی را نشان می‌دهند. برای مثال ایستگاه سردشت چند دوره به نسبت خشک و

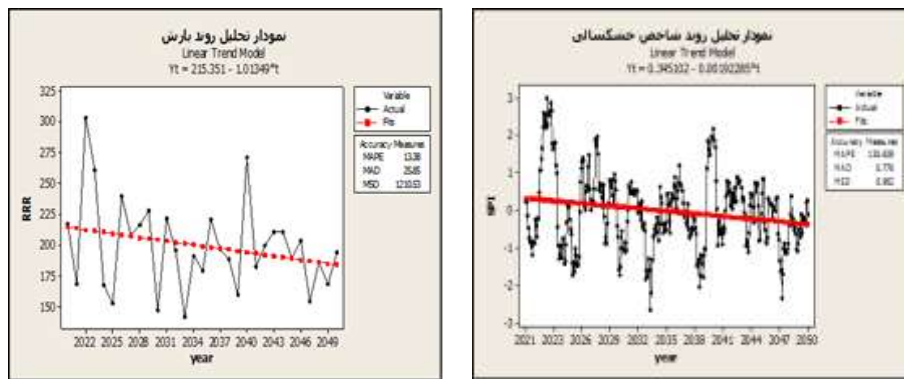
مرطوب و یک دوره فوق‌العاده خشک در سال ۲۰۲۴ و دو دوره فوق‌العاده مرطوب در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۳۷ را نشان می‌دهد. بقیه ایستگاه‌ها روند یکنواخت و بدون تغییر البته با دوره‌های خیلی خشک و خیلی مرطوب در نمودارهای آنها مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی داده‌های بارش و خشکسالی و روندیابی آنها می‌توان گفت که در سه دهه آینده، مقدار بارش و خشکسالی در مناطق مختلف شمال غرب ایران متفاوت است که این مسئله ممکن است حاکی از تأثیر عوامل محلی بر شکل‌گیری بارش و در نتیجه خشکسالی باشد.



(ب)

(الف)

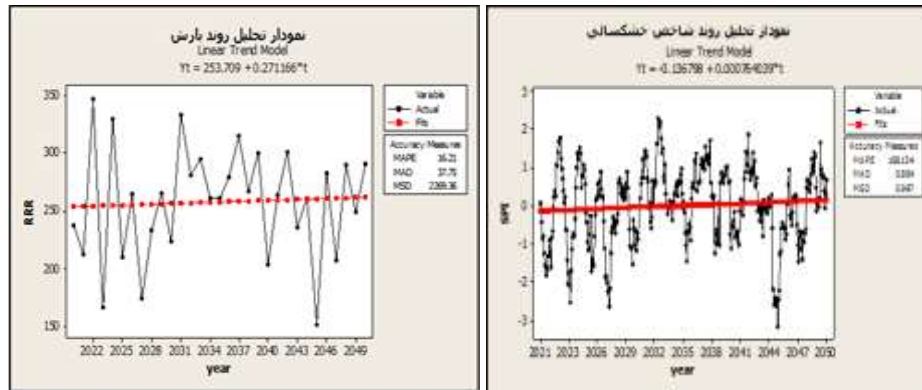
شکل ۵. نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) (ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه اردبیل)



(ب)

(الف)

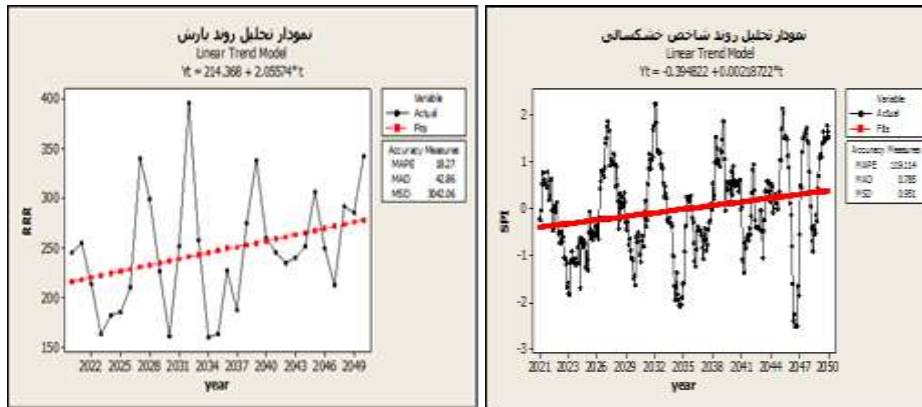
شکل ۶. نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) (ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه جلفا)



(ب)

(الف)

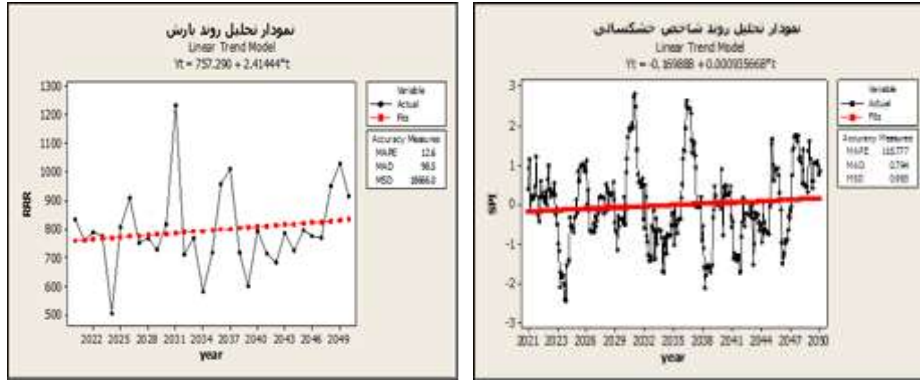
شکل ۷. الف) نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه خوی)



(ب)

(الف)

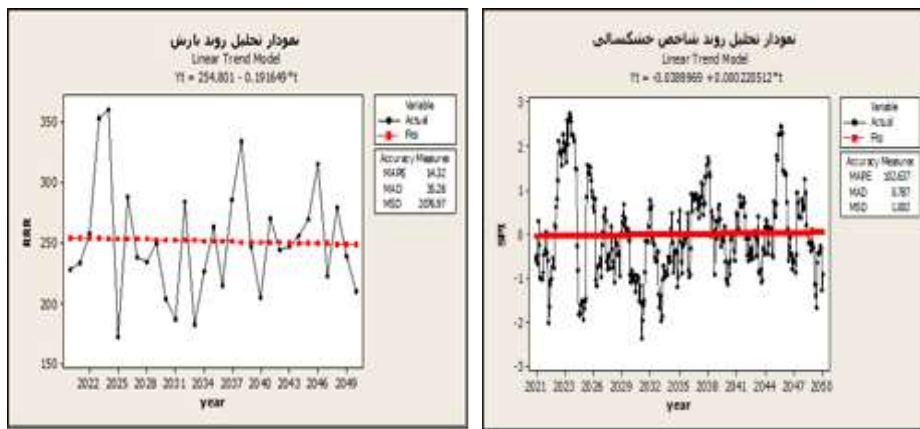
شکل ۸. الف) نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه میانه)



(ب)

(الف)

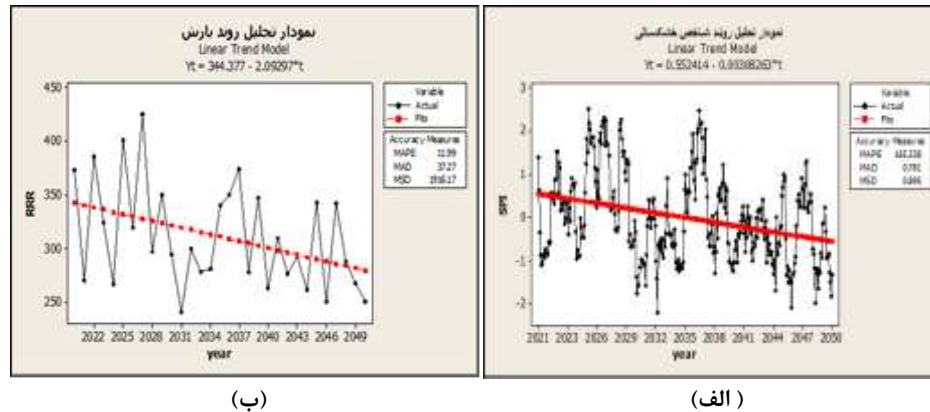
شکل ۹. نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) (ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه سردشت)



(ب)

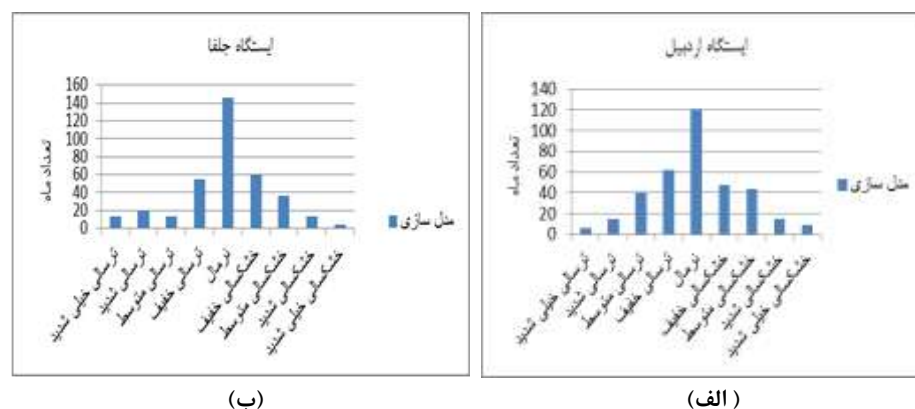
(الف)

شکل ۱۰. نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) (ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه تبریز)

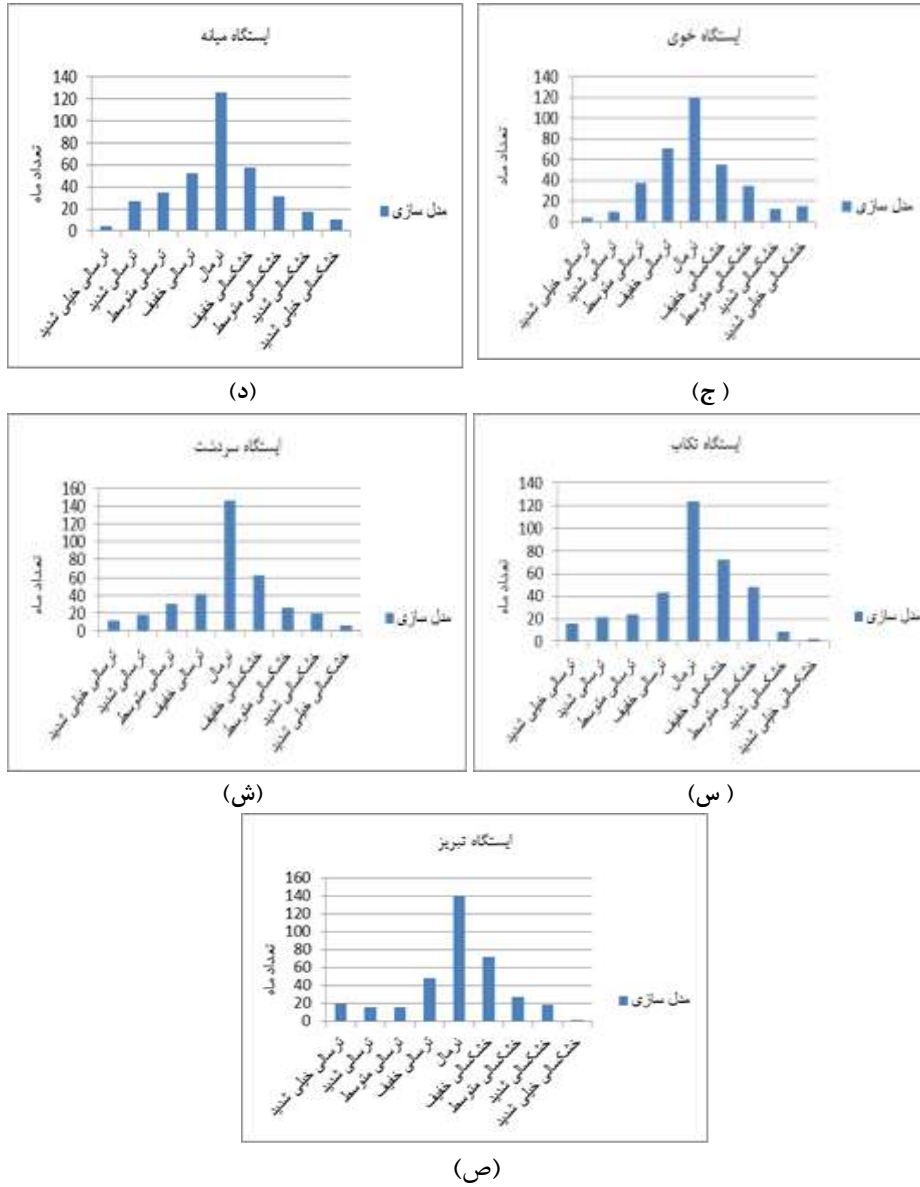


شکل ۱۱. نمودار روند خشکسالی (شاخص SPI ۱۲ ماهه) (ب) روند بارش سالانه سه دهه آینده (ایستگاه تکاب)

شکل ۱۲ (الف-ص) نمودار فراوانی طبقات شاخص SPI را برای ایستگاه‌های سینوپتیکی منتخب منطقه تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که از اشکال پیداست، میزان خشکسالی و ترسالی‌های آبی (دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰) برای هر ایستگاه مدلسازی شده است. در هر کدام از ایستگاه‌ها خشکسالی و ترسالی رخ داده، اما تعداد ماه‌های وضعیت نرمال در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از دیگر وضعیت‌ها رخ داده است. در بعضی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه‌های جلفا و تکاب، تعداد ماه‌های ترسالی شدید و خیلی شدید بیشتر از تعداد ماه‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید است. در بعضی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه خوی تعداد ماه‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید بیشتر از تعداد ماه‌های ترسالی شدید و خیلی شدید است.







شکل ۱۲. (الف-ص) نمودار فراوانی طبقات شاخص SPI ۱۲ ماهه دوره مدلسازی شده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) ایستگاه‌های سینوپتیک

### نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی و تکنیک تولید داده مصنوعی است. در این تحقیق به منظور دستیابی به این اهداف، مطالعه‌ای ترکیبی با استفاده از داده‌های ایستگاهی، خروجی مدل آماری و تولید داده مصنوعی انجام گرفت. ضریب همبستگی بین داده‌های میانگین بارش ماهانه تولیدشده توسط مدل و داده‌های واقعی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح ۰/۰۱ با اطمینان بیش از ۰/۸۰ وجود دارد. از این‌رو با توجه به بررسی همبستگی بین داده‌های تولیدشده و داده‌های مشاهداتی و همچنین بررسی نمودارهای خطی بارش مدل‌سازی‌شده و بارش مشاهداتی، نتایج نشان‌دهنده این است که مدل CLIMGEN توانایی تولید داده‌های مصنوعی را با دقت به نسبت مناسبی دارد. ایستگاه‌های اردبیل، جلفا و تکاب روند ملایم کاهش بارش و افزایش خشکسالی را دارند. ایستگاه‌های خوی، میانه و سردشت روند ملایم افزایش بارش و افزایش ترسالی را نشان می‌دهند. ایستگاه‌های تبریز، ارومیه و پارس‌آباد نیز روند یکنواخت و بدون تغییر البته با دوره‌های خشک و مرطوب در نمودارهای آنها مشاهده می‌شود که این مسئله نشان‌دهنده تغییر زیاد عامل بارش و به تبع آن خشکسالی است. از طرف دیگر وقوع خشکسالی در این منطقه نمی‌تواند عاملی برای کاهش مخاطرات دیگر نظیر سیل باشد و حتی می‌توان گفت با وقوع خشکسالی، مخاطرات دیگر نظیر سیل نیز در این منطقه ممکن است رخ دهد. ضمن اینکه برای کشاورزان منطقه توزیع بارش‌ها باید مناسب باشد؛ از طرف دیگر پیش‌بینی‌ها حاکی از این است که بارش‌ها به صورت نامنظم رخ خواهد داد. در هر کدام از ایستگاه‌ها، خشکسالی و ترسالی به نسبت متغیری رخ داده است، اما تعداد ماه‌های وضعیت نرمال در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از دیگر وضعیت‌ها رخ داده است. در بعضی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه جلفا و تکاب، تعداد ماه‌های ترسالی شدید و خیلی شدید بیشتر از تعداد ماه‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید است. در بعضی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه خوی، تعداد ماه‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید بیشتر از تعداد ماه‌های ترسالی شدید و خیلی شدید است. با توجه به نتایج به دست آمده از پیش‌بینی داده‌های بارش و خشکسالی و روندیابی آنها می‌توان گفت که در دهه‌های آتی بارش و خشکسالی و شاید مخاطراتی نظیر سیل در مناطق مختلف شمال غرب ایران به میزان و شدت متفاوت به وقوع می‌پیوندد، به گونه‌ای که در بعضی از ایستگاه‌های مورد مطالعه بارش افزایش و خشکسالی کاهش می‌یابد و در ایستگاه‌های دیگر بارش کاهش و خشکسالی افزایش می‌یابد که این مسئله ممکن است حاکی از تأثیر عوامل محلی بر شکل‌گیری بارش و در نتیجه خشکسالی باشد.

## منابع

- [۱]. جهانبخش اصل، سعید؛ قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۸۳). «مدلسازی روند بارش و پیش‌بینی خشکسالی‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه». *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ش ۱۷: ۵۲-۳۳.
- [۲]. خلیلی، نجمه؛ داوری، کامران؛ علیزاده، امین؛ انصاری، حسین؛ رضایی پژند، حجت؛ کافی، محمد؛ قهرمان، بیژن (۱۳۹۵). «ارزیابی عملکرد دو مدل LARS-WG و CLIMGEN در تولید سری‌های زمانی بارش و درجه حرارت در ایستگاه تحقیقات دیم سیساب- خراسان شمالی». *آب و خاک*. جلد ۳۰ (ش ۱): ۳۳۳-۳۲۲.
- [۳]. رشیدنیقی، علی؛ مجنون هریس، ابوالفضل؛ ناظمی، امیرحسین؛ دلیر حسن‌نیا، رضا (۱۳۸۹). «ارزیابی مدل CLIMGEN و پیش‌بینی اطلاعات هواشناسی برای منطقه تبریز». اولین کنفرانس بین‌المللی مدلسازی گیاه؛ آب؛ خاک و هوا. دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [۴]. ساری صراف، بهروز؛ محمودی، سعید؛ زنگنه، سعید؛ پاشایی، زهرا (۱۳۹۴). «پایش و پیش‌بینی ترسالی و خشکسالی تبریز با استفاده از مدل CLIMGEN و شاخص SPI». *هیدروژئومورفولوژی*. ش ۲: ۶۱-۷۸.
- [۵]. سلامت، علی رضا؛ آل یاسین، محمدرضا (۱۳۸۰). «راه‌های مقابله با خشکسالی». *نشریه علمی ترویجی حفاظت آب و خاک*. ش ۴۵: ۴۴-۳۸.
- [۶]. ظاهری، محمد (۱۳۹۲). *جغرافیای مخاطرات*. تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز.
- [۷]. فرج‌زاده، منوچهر (۱۳۸۴). *خشکسالی از مفهوم تا راهکار*. تهران: انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.
- [۸]. معافی مدنی، سیده‌فاطمه؛ موسوی بایگی، محمد؛ انصاری، حسین (۱۳۹۱). «پیش‌بینی وضعیت خشکسالی استان خراسان رضوی طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل LARS-WG5». *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ش ۳: ۳۷-۲۱.
- [9]. Danuso, F.; (1997). *CLIMAK reference manual*. DPVTA, University of Udine, Italy.
- [10]. Gabriel, K. R.; Neumann, J. (1962). "A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 88(375): 90-95.
- [11]. Johnson, G.L.; Hanson, C.L.; Hardegree S.P.; Ballard, E.B. (1996). "Stochastic Weather Simulation: Overview and analysis of two commonly used models". *Journal of Applied Meteorology*. 35: 1878-1896.
- [12]. Kavalieratou, S.; Karpouzou, D. K.; Babajimopoulos, C. (2012). "Drought analysis and short-term forecast in the Aison River Basin (Greece)". *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(5): 1561-1572.

- [13]. Khan, M. S.; Coulibaly, P.; Dibike, Y. (2006). "Uncertainty analysis of statistical downscaling methods". *Journal of Hydrology*. 319(1): 357-382.
- [14]. McKee, T. B; Doesken, N. J; Kleist, J. (1995, January). "Drought monitoring with multiple time scales. In Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology" (pp. 233-236). Dallas. Boston. MA: American Meteorological Society.
- [15]. Mishra, A. K; Desai, V. R; Singh, V. P. (2007). "Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model". *Journal of Hydrologic Engineering*. 12(6): 626-638.
- [16]. Moreira, E. E.; Paulo, A. A.; Pereira, L. S.; Mexia, J. T. (2006). "Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models". *Journal of Hydrology*. 331(1): 349-359.
- [17]. Richardson, C.W.; Wright, D.A. (1984). *WGEN: A model for generating daily weather variables*. USDA, Agricultural Research Service ARS-9.
- [18]. Santos, C. A. G.; Morais, B. S.; Silva, G. B. (2009). *Drought forecast using an artificial neural network for three hydrological zones in San Francisco River basin, Brazil*. IAHS publication, 333, 302.
- [19]. Selker, J.S. ; D.A. Haith. (1990). "Development and testing of single-parameter precipitation distributions". *Water Resources Research*. 26(11): 2733-2740.
- [20]. Semenov, M. A.; Brooks, R. J.; Barrow, E. M.; Richardson, C. W. (1998). "Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates". *Climate research*, 10(2): 95-107.
- [21]. Semenov, M.A.; Jamieson, P.D. (1999). Using weather generators in crop modeling. In: CLIMAG Geneva Workshop. Geneva. Switzerland. September 28-29.
- [22]. Sharpley, A.N.; Williams, J.R. (1990). *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. US Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768. 1835 p
- [23]. Stockle, C.O.; Steduto, P.; Allen, R.G. (1998). Estimating daily and daytime mean VPD from daily maximum VPD. 2th Congress of the European Society of Agronomy, Nitra, The Slovak Republic.
- [24]. Stockle, C.O.; Nelson, R.; Donatelli, M.; Castellvi, F. (2001). ClimGen: a flexible weather generation program. In: Proceedings of the Second International Symposium on Modelling Cropping Systems, July 12-19, 2001, Florence, Italy: 229-230
- [25]. Thompson, S. A. (1999). *Hydrology for water management*. AA Balkema.
- [26]. Torranin, P. (1976). Unpredictability of hydrological drought, In Proceeding of the Second International Symposium in Hydrology. Fort Collins, Colorado: 595-604.
- [27]. Yevjevich, V. (1967). an objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydrol. Papers*, Colorado State Univ; Fort Collins, Colo.