

## ریزمقیاس‌نمایی تغییرات اقلیم با به‌کارگیری یک رهیافت آماری ناپارامتری در حوضه آبریز کرخه

مهدی قمقامی ورکی<sup>۱</sup> و نوذر قهرمان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲)

### چکیده

سری‌های زمانی خروجی مدل‌های گردش کلی جو (GCM) که براساس سناریوهایی از پیش‌تعریف‌شده در اختیار کاربران قرار می‌گیرد، دارای تفکیک مکانی اندک‌اند و برای منطقه‌ای کردن آنها باید از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده کرد. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در دو دسته کلی فیزیکی و آماری قرار دارند، که روش‌های آماری ساده‌تر و در دسترس‌تر هستند. برای اجرای یک روش ریزمقیاس‌نمایی آماری دو نوع اطلاعات مورد نیاز است: تغییرات پیش‌بینی‌شده و سری‌زمانی مشاهده‌شده یا تاریخی موجود در ایستگاه‌ها. در این تحقیق با استفاده از یک رهیافت ترکیبی که متشکل از دو روش ناپارامتری است، براساس خروجی مدل CGCM3T63 تحت سناریوی A1B در دو چشم‌انداز اقلیمی ۳۰ سال (۱۳۹۱-۱۴۲۰) و ۵۰ سال (۱۳۹۱-۱۴۴۰) متغیرهای اقلیمی دما و بارندگی در مقیاس مکانی منطقه‌ای و زمانی ماهانه برای حوضه آبریز کرخه شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دقت مناسب رهیافت در زمینه شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی و ریزمقیاس‌نمایی تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای است. با توجه به پیش‌بینی افزایشی برای دما و کاهش برای بارندگی در مدل بزرگ‌مقیاس، این تغییرات با تعیین مناسب «پارامتر شکل» به روش کمترین مربعات خطا به سری ریزمقیاس‌شده انتقال یافت. علاوه‌براین، ساده و کم‌پارامتری بودن این رهیافت در کنار ناپارامتری بودن آن، درحکم دلایل برتری آن بر بسیاری از شیوه‌های پارامتری موجود، قابل‌ذکر است. بررسی‌های موردی در سایر مناطق برای ارزیابی بیشتر مدل توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بازنمونه‌گیری، ریزمقیاس‌نمایی، مدل‌های گردش کلی جو، حوضه آبریز کرخه، رهیافت ناپارامتری

## Downscaling of climatic change using a non-parametric statistical approach in Karkheh basin

Mahdi Ghamghami<sup>1</sup> and Nozar Ghahreman<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 7 August 2012, accepted: 12 March 2013)

### Summary

The outputs of General Circulation Models (GCMs) which are available for the users based on predefined scenarios have a low spatial resolution. Hence, downscaling techniques should be used for regional studies. Since climate is an effective factor in natural phenomena, a time series of future weather data is required for meteorological,

\*Corresponding author:

nghahreman@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

agricultural and hydrological prediction or pre-warning applications. It is also important to select and utilize better and more accurate techniques for these purposes. Generally, downscaling methods are classified into two categories: dynamical and statistical. The statistical downscaling is commonly considered due to its simplicity and wide applicability. As an example, LARS-WG is a parametric or semi-parametric model which has been used widely, but it underestimates monthly variances. Undoubtedly, it is more useful to use an approach having a non-parametric structure so that it does not rely on a statistical structure by default. These models use a set of observations in the simulation process not a certain value namely the "parameter".

The aim of this study was to use a nonparametric approach for downscaling the GCM outputs. This approach is composed of one weather generator (WG) and a technique called strategic re-sampling which creates series that match the GCM output. The weather generator itself is based on a Kernel Density Estimator (KDE) and it is a multivariate weather generator. In the KDE method, all of the observations with a definite kernel function, commonly standardized and normalized, are used. Firstly, one of the normal kernels (with probability  $1/n$ ) is selected randomly and its mean is considered as the basic vector. Bandwidth ( $h$ ) is the only parameter that should be estimated. The strategic re-sampling method includes a stochastic function based on the definition of the "shape parameter", which determines the tendency of the new series. At the first step, a strategic re-sampling is run and then strategic series are prepared as input to the WG and the simulating climate prospect.

The study area is Karkheh Basin in Khuzestan Province, Southwest of Iran. Downscaling was done for two periods, 30 years (2011 to 2040) and 60 years (2011-2060) for monthly rainfall and air temperature variables based on the A1B scenario of the CGCM3T63 model. The results can be divided into three groups: an estimate of the strategic re-sampling parameter, evaluation of the weather generator applicability and finally, the climate change simulation. Results showed that in case of temperature, by selecting a unit value for the shape parameter, the generated series coincide with the observed or historical series. Substituting the values less or more than one resulted in warmer and colder simulated series, respectively. Similarly, for rainfall series the optimum value was 0.9. According to the results, the ability of the WG in simulation of moments of different orders (mean, variance and skewness coefficient) was acceptable and the coefficients were cross validated. The applied GCM showed warmer and drier series for both study periods. The findings of the study revealed that future climate would be simulated accurately and non-significantly different from GCM outputs. In general, the suggested non-parametric approach can be recommended due to the following features: non existence of a default pattern in its structure, the least number of parameters for running, coincidence of the high accuracy in downscaling with the GCM outputs and simplicity. More case studies are recommended for further scrutiny.

**Keywords:** GCMs, re-sampling, KDE, Karkheh basin, downscaling

## ۱ مقدمه

سامانه اقلیم جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند. چون مقیاس مکانی این مدل‌ها جهانی (Global) است، اگر هدف تحقیقات، ارزیابی پاسخ در مقیاس نقطه‌ای یا منطقه‌ای (سطح استانی یا حوضه آبریز) باشد، استفاده از ویژگی‌های این مدل‌ها نیازمند

مدل‌های گردش کلی جو یا GCMs (General Circulation Models)، مدل‌هایی عددی و بیانگر فرایندهای فیزیکی جو و سطح زمین هستند و در حال حاضر ابزارهای ساده‌ای برای شبیه‌سازی پاسخ

همچنین عزیزاده و همکاران (۱۳۸۹) دریافتند در افق پیش‌رو بر اثر افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر تعرق، نیاز آبی الگوی کشت گیاهان در منطقه مورد بررسی آنها تا ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که شبیه‌سازی تغییر اقلیم و اعمال اثر این تغییرات در سری‌های ساختگی برای عرضه پیش‌بینی‌های هواشناسی، آب‌شناختی و زراعی و مدیریت و برنامه‌ریزی، اهمیت بسزایی دارد. مثال‌هایی از این دست که روش‌های ریزمقیاس‌نمایی ابزار آن هستند، فراوان است و هدف نهایی آنها مدیریت صحیح منابع خدادادی و به خدمت بشر در آوردن محیط‌زیست است.

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در دو دسته کلی آماری و فیزیکی طبقه‌بندی می‌شوند. در زمینه ریزمقیاس‌نمایی فیزیکی برای مثال می‌توان به کار بابائیان و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد. آنها سری زمانی بارش ماهانه خروجی یک مدل بزرگ‌مقیاس و یک مدل منطقه‌ای را برای دوره ۱۹۷۶-۱۹۹۰ به روش دینامیکی، ریزمقیاس کردند و این داده‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نوع آماری روش‌های ریزمقیاس‌نمایی را محققان گوناگونی توسعه داده‌اند و در آن از روش‌های متفاوتی شامل رگرسیون خطی چندگانه (کلین، ۱۹۸۳)، تحلیل همبستگی (لندن و همکاران، ۲۰۰۱)، نزدیک‌ترین همسایگی (زریتا و استک، ۱۹۹۹)؛ ققمقامی و همکاران، ۱۳۸۹) و رهیافت‌های شبکه عصبی مصنوعی (کون و همکاران، ۲۰۰۲)؛ کرن و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شده است. ساده‌ترین روش ریزمقیاس کردن، روش تناسبی (Proportional) است که مستقیماً از اطلاعات سلولی که ایستگاه موردنظر در آن قرار گرفته است استفاده می‌کند. کمال و همکاران (۱۳۹۰) دو روش آماری و تناسبی را برای این هدف در چشم‌اندازهای ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ به‌کار گرفتند. روش آماری آنها مبتنی بر برآورد روابط تجربی بین متغیرهای مشاهده‌شده بزرگ-مقیاس و کوچک‌مقیاس محلی و تعمیم این روابط به

به‌کارگیری روش‌های دیگری است که تلفیق آنها با خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس منجر به تولید نتایج واقعی‌تر در مقیاس‌های کوچک‌تر می‌شود. این روش‌ها به طورکل روش‌های ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) نامیده می‌شوند که افق اقلیمی را از سطح GCM به سطح نقطه‌ای یا منطقه‌ای می‌رسانند. توسعه این روش‌ها طی چند سال اخیر بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است و سری‌های زمانی پیش‌بینی‌شده با مدل‌های بزرگ‌مقیاس بیشتر داده خام اولیه محسوب می‌شوند، تا اطلاعاتی که بر مبنای آنها تحلیل‌های علمی در زمینه‌های گوناگون علوم طبیعی عرضه شود.

مبنا بودن بررسی‌های هواشناسی و اقلیم‌شناسی در بسیاری از تحقیقات موجود در حیطه‌های علوم طبیعی مزید بر علت توسعه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی است. باید گفت که به‌طورکلی هر پدیده‌ای که اقلیم عامل تاثیرگذار بر آن باشد، می‌تواند در اثر تغییر اقلیم دستخوش تغییرات شود که البته بسیاری از این پدیده‌ها ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم با حیات بشر و مسائل اقتصادی-اجتماعی دارند. برای مثال، تغییرات اقلیم بر عملکرد گیاهان، طول فصل رشد، دوره رویشی گیاهان، نوع و ترتیب کشت، به‌طور مستقیم تاثیر می‌گذارد. آب‌شناسان برای ارزیابی منابع آبی در دسترس با مصارف گوناگون اعم از شرب، صنعت و کشاورزی و یا برای پایش سیل‌ها و خشکسالی‌های آب‌شناختی در قدم اول نیاز به شبیه‌سازی اقلیم دارند. برای مثال، وسماکت و برن (۱۹۹۷) دریافتند که بزرگی وقایع آب‌شناختی تحت شرایطی که رواناب ذوب برف زودتر اتفاق افتد، با زمان کاهش می‌یابد. سمنوف و همکاران (۲۰۰۹) براساس تحقیقی که روی اثر تغییر اقلیم بر تنش احتمالی گرمایی گیاه در دوران گل‌دهی عملی ساختند به این نتیجه رسیدند که برای منطقه مورد بررسی در آینده باید گیاهان مقاوم به تنش گرمایی در دوران گل‌دهی کشت شود.

جواب را داشته باشد با روش‌های آماری پارامتری میسر نیست. از این رو، روش‌های ناپارامتری به دلیل درج نشدن چنین پیش‌فرض‌هایی، دارای مزیت نسبت به روش‌های پارامتری‌اند.

هدف اصلی از این تحقیق، رساندن تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده از سطح جهانی به سطح منطقه‌ای برای واقعی‌تر کردن این تغییرات برحسب سری‌های زمانی مشاهده شده در ایستگاه‌های منطقه موردنظر است. برای نیل به این هدف، از یک رهیافت ناپارامتری تلفیقی برای ریزمقیاس‌نمایی سری‌های زمانی متغیرهای دمای میانگین ماهانه، دمای بیشینه ماهانه، دمای کمینه ماهانه و مجموع بارندگی ماهانه ساخته شده با GCM و درنهایت شبیه‌سازی اقلیم پیش‌رو در دو چشم‌انداز ۳۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۲۰) و ۵۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۴۰) استفاده شده است. رهیافت ناپارامتری به‌کاررفته متشکل از یک مولد هواشناسی و یک روش برای اعمال تغییرات به نام Strategic Re-sampling (St. Re.) یا بازنمونه‌گیری هدفمند (شریف و برن، ۲۰۰۶) است. مولد هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق، یک روش ناپارامتری مبتنی بر برآوردگر هسته‌ای تابع چگالی (Kernel Density Estimator, KDE) احتمال و پارامتر اصلی و منحصر به فرد آن «عرض نوار» است. در زمینه استفاده از روش KDE در تولید داده می‌توان به کار شارما و انیل (۲۰۰۳) برای تولید داده‌های آب‌شناختی (دبی رودخانه) و شریکانتن و همکاران (۲۰۰۴) و قمقماي و همکاران (۱۳۸۹) برای تولید داده‌های هواشناسی (بارندگی) اشاره کرد. تعبیر ریاضی عرض نوار، عرض بازه‌ای روی محور افقی است که تغییرات تابع در آن ناچیز در نظر گرفته می‌شود. تابع هسته‌ای در این تحقیق تابع نرمال استاندارد در نظر گرفته شده که به‌کارگیری آن متداول‌تر است. کاربرد روش بازنمونه‌گیری هدفمند در تلفیق با روش نزدیک‌ترین همسایه در مقیاس روزانه، نتایج قابل‌قبولی را در بر داشته‌است (قمقماي و همکاران، ۱۳۸۹).

چشم‌انداز موردنظر است. عدم قطعیت مربوط به این روش‌ها با استفاده از یک مدل مفهومی رواناب مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

به‌طورکلی روش‌های آماری دارای دو نوع ساختار هستند: پارامتری و ناپارامتری. روش‌های پارامتری در ساختار خود از الگوهای آماری یا تجربی استفاده می‌کنند که همین آنها را با محدودیت مواجه می‌کند. مشهورترین روش ریزمقیاس‌نمای پارامتری مدل LARS-WG است (سمنوف و همکاران، ۱۹۹۷)، که تاکنون از سوی محققان گوناگون داخلی نظیر قهرمان و همکاران (۱۳۸۸)، عزیزاده و همکاران (۱۳۸۹)، مشکوتی و همکاران (۱۳۸۹)، رجبی (۱۳۸۹) مورد استفاده قرار گرفته است. یک عیب این روش، ناتوانی آن در شبیه‌سازی واریانس ماهانه دمای هوا به‌صورت کم‌برآوردی (underestimation) است (قمقماي و همکاران، ۱۳۹۰). ضمن اینکه این نوع روش‌ها به‌علت تبعیت از الگوهای آماری از پیش تعیین شده (برای مثال نرمال، گاما) برای دریافت بهترین جواب باید در هر منطقه مورد ارزیابی قرار بگیرند. در مقابل این ساختار، ساختار ناپارامتری وجود دارد. اصطلاح ناپارامتری بدین معنا است که از همه و یا برخی از داده‌ها در روند روش استفاده می‌شود و نه فقط از یک مشاهده معین که به آن پارامتر می‌گویند و این قاعده در روش‌های پارامتری لحاظ نمی‌شود. برای مثال وقتی از یک روش تصادفی مبتنی بر تابع توزیع نرمال استفاده می‌شود، فقط میانگین و واریانس مشاهده‌شده درحکم نماینده‌ای از داده‌ها برای اجرای روش لازم است. از طرفی دیگر انتخاب بهترین تابع توزیع یا الگوی آماری باید در هر منطقه با آزمون‌های آماری نظیر توان دوم خی بررسی شود، چرا که یک الگو در یک منطقه ممکن است بهترین برازش را داشته باشد و در منطقه‌ی دیگر الزاماً برازش مناسبی نداشته باشد (اشرف‌زاده، ۱۳۸۴). بنابراین طراحی بسته‌ای که لزوماً اجرای آن در هر نقطه یا منطقه بهترین

احتمال هستند. اساس کار شبیه‌ساز داده‌های هواشناسی در این تحقیق، روش برآوردگر هسته‌ای تابع چگالی احتمال داده‌های مشاهده شده است که فقط به علت سادگی و کم پارامتر بودنش می‌تواند مورد توجه باشد. در روش KDE در برآورد تابع چگالی احتمال یک مشاهده معین مانند  $x$  از سایر مقادیر مشاهده شده ( $x_i, i=1, \dots, n$ ) استفاده و سهم هر مشاهده با یک تابع هسته‌ای تعیین می‌شود. پارامتر تاثیرگذار در این تابع عرض نوار است و به لحاظ تعبیر ریاضی پهنایی در محور افقی است که تغییرات تابع در آن پهنای ناچیز است. به صورت ساده اثبات می‌شود که مقدار تابع متغیر  $x$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right), \quad (1)$$

مقدار عددی کمیت  $K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$  برای  $x_i$ های واقع در ناحیه  $h$  (عرض نوار) برابر واحد و برای  $x_i$ های خارج از این ناحیه برابر صفر خواهد بود. در واقع با این تابع، هر کدام از مشاهدات در برآورد مقدار تابع چگالی مشاهده معین مشارکت دارند. شکل‌های گوناگونی از تابع‌های هسته‌ای در منابع متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است که متداول‌ترین نوع آنها تابع هسته‌ای نرمال استاندارد است. به صورت تحلیلی ثابت شده است که نوع تابع هسته‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد روش ندارد (راجاگوپالن و همکاران، ۱۹۹۷؛ دیناردو و توییس، ۲۰۰۱). بر اساس تابع نرمال، مقدار تابع چگالی از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}\right], \quad (2)$$

در این معادله نیز، بخش‌نمایی مقداری بین صفر و یک دارد و میزان مشارکت هر کدام از داده‌های مستقل را در برآورد چگالی  $x$  تعیین می‌کند. به طور قطع مشاهداتی که نزدیک‌تر به مشاهده  $x$  باشند، سهم بیشتری دارند. لذا برای

پارامتر کلیدی روش بازنمونه‌گیری هدفمند، «پارامتر شکل» نام دارد که شکل و گرایش سری‌های جدید را (گرایش به سردتر بودن یا گرم‌تر بودن، پُر باران بودن یا کم‌باران بودن) تعیین می‌کند. با نمونه‌گیری‌های مکرر از سری مشاهده شده، سری‌هایی جدید بر اساس هدف از پیش تعیین شده به دست می‌آید که در حکم ورودی برای اجرای مولد هواشناسی به‌کار گرفته می‌شود. در بخش روش تحقیق، مشخصات ایستگاه‌های به‌کار گرفته شده در حوضه آبریز و روش کار تشریح می‌شود. در بخش سوم نتایج به دست آمده و بحث پیرامون این نتایج عرضه می‌شود.

## ۲ روش تحقیق

### ۱-۲ منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی حوضه آبریز کرخه است که طول دوره آماری مشترک ۲۸ سال (۱۳۵۶-۱۳۸۳) برای ۹ ایستگاه باران‌سنجی انتخاب شد. بازسازی داده‌ها، بررسی کفایت آماری و همگنی داده‌ها با آزمون‌ها و روش‌های مربوط صورت گرفته است. در نهایت سری زمانی متشکل از متغیرهای دما (میانگین، بیشینه و کمینه) و مجموع بارندگی در مقیاس ماهانه برای ورود و استفاده در رهیافت با هدف شبیه‌سازی اقلیم پیش رو در دو چشم‌انداز ۳۰ سال و ۵۰ سال تهیه شد. همچنین برای آگاهی از تغییرات اقلیمی پیش رو از خروجی مدل بزرگ‌مقیاس CGCM3T63 تحت سناریوی A1B (بدبینانه‌ترین سناریو) استفاده شده که از پایگاه CCCSN مقادیر متوسط تغییرات برای منطقه مورد بررسی به دست آمده است. ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۲ مولد هواشناسی

به‌طور کلی روش‌های ناپارامتری مبتنی بر دو روش نزدیک‌ترین همسایگی و برآوردگر هسته‌ای چگالی

برای تولید داده‌ها ابتدا ماتریس مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناسی برای هر ماه از فایل اصلی فراخوانی می‌شود. با توجه به اینکه سری زمانی داده‌های ماهانه ناهمگن و دارای روند هستند، بنابراین مدل به‌طورمجزا بر هر ماه برازش می‌یابد و دارای ۱۲ ماتریس پیش رو است که ستون‌های آن متغیرها و سطرها آن سری زمانی مقادیر ماه معین است:

$$X_{i,j}^k = \begin{bmatrix} x_{1,1}^k & x_{1,2}^k & \dots & x_{1,p}^k \\ x_{2,1}^k & x_{2,2}^k & \dots & x_{2,p}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1}^k & x_{n,2}^k & \dots & x_{n,p}^k \end{bmatrix}, \quad k=1, \dots, 12 \quad (۴)$$

$p$  نیز تعداد متغیرهای هواشناسی است. مقدار عرض نوار نیز به روش پیش گفته، در هر ماه محاسبه می‌شود. روند شبیه‌سازی در ادامه آمده است: ابتدا به‌طور تصادفی یکی از هسته‌های نرمال استاندارد انتخاب می‌شود و میانگین آن هسته نرمال که یکی از سطرها ماتریس فوق است

برآورد چگالی هر کدام از مشاهدات، یک تابع هسته‌ای نرمال استاندارد به مرکزیت مشاهده معین و با واریانس واحد روی داده‌ها مستقر می‌شود. به عبارت دیگر  $n$  تابع هسته‌ای نرمال روی  $n$  مشاهده مستقل برای تعیین منحنی چگالی احتمال قرار می‌گیرد. همچنین تعیین مقدار مناسب  $h$  اهمیت زیادی دارد. مقادیر زیاد عرض نوار باعث همواری بیش‌ازحد واقع و انتخاب مقدار کوچک برای آن باعث برآورد ناهموار به‌همراه واریانس زیاد می‌شود. روش‌های متعددی برای برآورد عرض نوار بهینه یا مرجع وجود دارد، که از جمله می‌توان به روش اعتبارسنجی متقابل حداکثر درست‌نمایی یا به شیوه به حداقل رساندن معیارهای اریبی، میانگین توان دوم خطا و میانگین جمع بسته توان دوم خطا اشاره کرد. همچنین سیلورمن (۱۹۸۶) رابطه‌ای تحلیلی برای برآورد عرض نوار بهینه عرضه کرد:

$$h = 1.06n^{-1/5}, \quad (۳)$$

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه.

کد ایستگاه	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (درجه - دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه - دقیقه)	نرمال بارندگی (میلی متر)	نرمال دمای میانگین (درجه سلسیوس)	نرمال دمای بیشینه (درجه سلسیوس)	نرمال دمای کمینه (درجه سلسیوس)
۲۱-۰۰۷	پریسو	۱۰۰۰	۳۳ - ۴۵	۰۹ - ۳۶	۶۵۵	۱۳	۲۰/۳	۵/۶
۲۱-۱۲۷	پلچهر	۱۲۷۵	۲۵ - ۴۷	۲۰ - ۳۴	۴۰۵	۱۴/۳	۲۳/۲	۵/۵
۲۱-۱۲۹	ماهیدشت	۱۳۶۰	۴۹ - ۴۶	۱۶ - ۳۶	۳۴۲	۱۲/۸	۲۲/۱	۳/۸
۲۱-۱۳۳	دوآب مرگ	۱۳۱۰	۴۷ - ۴۶	۳۳ - ۳۴	۴۶۶	۱۴	۲۲	۵/۹
۲۱-۱۴۴	سد دز	۵۲۵	۲۷ - ۴۸	۳۳ - ۳۲	۴۹۳	۲۴/۴	۲۹/۵	۱۹/۴
۲۱-۱۹۳	عبدالخان	۴۰	۲۳ - ۴۸	۵۰ - ۳۱	۲۲۵	۲۴/۵	۳۳/۲	۱۵/۷
۲۱-۱۹۹	حمیدیه	۲۲	۲۵ - ۴۸	۲۹ - ۳۱	۲۳۴	۲۴/۴	۲۳/۲	۱۵/۸
۲۱-۲۹۳	تنگ پنج بختیاری	۳۴۰	۴۶ - ۴۸	۵۶ - ۳۲	۱۲۰۷	۲۴/۴	۲۹/۸	۱۹
۲۱-۳۹۳	چشمه‌روانسر	۱۳۴۳	۳۹ - ۴۶	۴۲ - ۳۴	۵۱۹	۱۳/۶	۲۱/۲	۶
متوسط حوضه	-	-	-	-	۵۰۶	۱۸/۴	۲۶/۱	۱۰/۷

گفته می‌شود. هدف در اینجا، ساخت سری داده‌هایی است که ویژگی‌هایی از آن برجسته‌تر جلوه داده شود. برای مثال روزها و یا ماه‌های گرم‌تر تکرار شوند، بدین معنا که نرمال درازمدت دمایی بیشتر یا کمتر شود. به‌همین ترتیب می‌توان این موضوع را برای روزهای پُر باران و کم‌باران نیز بیان کرد. واژه هدفمند نیز به این دلیل به کار رفته است که حاصلِ باز نمونه‌گیری از سری مشاهده شده، تولید سری‌هایی براساس ویژگی‌های مدنظرِ کاربر است. با توجه به کارایی مولد KDE در شبیه‌سازی مناسب نرمال درازمدت اقلیمی و انطباق معنی‌دار آن با نرمال تاریخی (در بخش نتایج به آن پرداخته می‌شود)، میزان تغییرات اعمال‌شده در سری مشاهده شده از طریق روش باز نمونه‌گیری هدفمند، می‌تواند با اجرای مولد پیش‌گفته، به سری شبیه‌سازی شده داده‌های هواشناسی انتقال یابد و منجر به ساخت سری‌هایی مصنوعی با اعمال تغییر اقلیم شود.

عملکرد روش در ادامه می‌آید: فرض می‌شود در سری مشاهده شده،  $M_i^l$  مقدار متغیر ماه  $l$ ام در سال  $n$ ام است ( $i=1, \dots, n$  و  $l=1, \dots, 12$ ). برای محاسبه میانگین دوره‌ای در طول سری آماری از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{M}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i^l, \quad (6)$$

که  $\bar{M}_l$  میانگین دوره  $l$ ام طی  $n$  سال آمار مشاهده شده است. میزان انحراف مقدار هر دوره از میانگین آن دوره رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_l^i = M_l^i - \bar{M}_l, \quad (7)$$

بنابراین سری مشتمل بر  $L \times n$  ( $L=12$ ) تعداد مقدار انحراف از میانگین (اعداد مثبت و منفی) در دسترس است. مثلاً در مورد دما، هرچه این انحراف‌ها بزرگ‌تر (مثبت‌تر) باشند به معنای گرم‌تر بودن دوره‌های مربوط

در حکم بردار پایه در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در انتخاب یکی از هسته‌های نرمال، احتمال انتخاب هر بردار معادل  $1/n$  است و سپس با محاسبه احتمال تجمعی و مقایسه با عدد تصادفی بین صفر و یک، یکی از هسته‌های نرمال برای ادامه شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سپس از رابطه زیر، بردار جدید به دست می‌آید:

(5)

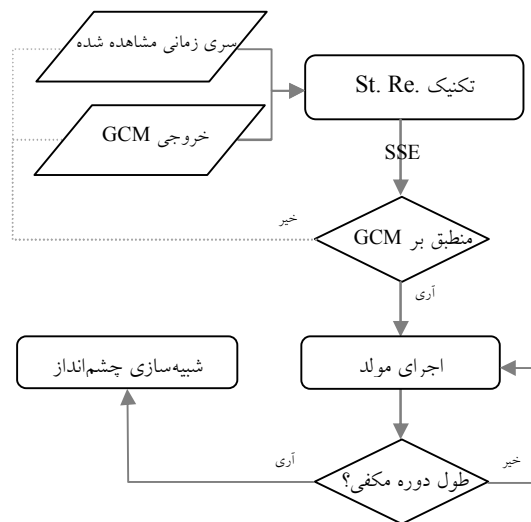
$$\begin{bmatrix} z_{m,1}^k & z_{m,2}^k & \dots & z_{m,p}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,1}^k & x_{i,2}^k & \dots & x_{i,p}^k \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} \sigma_1^k & \sigma_2^k & \dots & \sigma_p^k \end{bmatrix} w_l,$$

در این رابطه  $\sigma$  انحراف معیار داده‌ها،  $z$  بردار شبیه‌سازی شده،  $m$  شماره سطر در ماتریس شبیه‌سازی شده است که مقدار نهایی آن به‌طور دلخواه از سوی کاربر تعریف می‌شود.  $i$  شاخص سطری است که به صورت تصادفی انتخاب شده است.  $w_l$  نیز متغیر تصادفی که:  $-\infty < w_l < +\infty$  و از تابع توزیع نرمال استاندارد به دست می‌آید. پس از شبیه‌سازی بردار مدنظر، روند پیش‌گفته تا شبیه‌سازی طول آماری دلخواه ادامه می‌یابد. همان‌طور که گفته شد، تنها پارامتر قابل محاسبه در روند شبیه‌سازی فوق، پارامتر عرض نوار است که در این تحقیق با روش سیلورمن (۱۹۸۶) برآورد شد.

## ۳-۲ شبیه‌ساز تغییرات اقلیمی

کار اصلی روش باز نمونه‌گیری هدفمند، ریزمقیاس کردن تغییرات اقلیمی است و ورودی آن عبارت است از سری زمانی مشاهداتی و خروجی مدل بزرگ‌مقیاس. با توجه به ماهیت نیمه‌تصادفی آن، به تنهایی نمی‌تواند برای شبیه‌سازی منطقه‌ای تغییر اقلیم به کار برده شود و به‌طور حتم باید در کنار آن یک مولد هواشناسی اجرا شود. در این روش نمونه‌هایی هدفمند و تصادفی از سری مشاهدات گرفته می‌شود که مبنای ادامه روند کارند. واژه باز نمونه‌گیری، به نمونه‌گیری مکرر از یک جامعه آماری

می‌کند. خروجی این روش درحکم ورودی مولد هواشناسی در نظر گرفته می‌شود و به این ترتیب، تغییرات اقلیمی اعمال شده بر سری مشاهده شده با توجه به ساختار مولد هواشناسی، به سری شبیه‌سازی شده انتقال می‌یابد. شکل ۱ نمای کلی روند شبیه‌سازی و به عبارتی ریزمقیاس‌نمایی تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار گردش روش ریزمقیاس‌نما.

### ۳ نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت کار صورت گرفته، نتایج به دست آمده در سه زیربخش نتایج حاصل از اجرای روش بازنمونه‌گیری هدفمند، کارایی‌سنجی مولد هواشناسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات اقلیم قرار دارد. پس از جمع‌آوری اطلاعات لازم از وزارت نیرو و اجرای آزمون‌های مربوط، فایل داده‌های هواشناسی با فرمت خاص برنامه آماده ورود به روش شده‌است (کُد برنامه در محیط فترن نوشته شده‌است). نتایج آورده شده در این تحقیق نتایج حاصل از اجرای رهیافت برای سری زمانی متوسط حوضه است که براساس نتایج حاصل از هر ایستگاه به‌طور مجزا، قابل تعمیم است.

است و برعکس. نکته‌ای که در انتخاب طول دوره باید در نظر گرفته شود، همگنی مقادیر درون آن است. ادامه روند کار شامل بازنمونه‌گیری از این انحراف‌ها به‌طور هدفمند است. انحراف‌های یک دوره برای رتبه‌دهی، صعودی یا نزولی می‌شوند. برای مثال در ماه ژانویه، انحراف‌های این ماه به ترتیب از ژانویه‌های سردتر به سمت ژانویه‌های گرم‌تر مرتب می‌شوند به طوری که گرم‌ترین ژانویه، بیشترین رتبه را به خود اختصاص می‌دهد. سپس با استفاده از یک تابع تصادفی ساده، برای یک دوره معین در یک سال معین، تعیین می‌شود که کدام رتبه باید به آن تعلق گیرد:

$$I_w^i = INT \left[ n \times \left( 1 - r^{S_w^i} \right) \right] + 1, \quad (8)$$

$I_w^i$  مقداری صحیح بین ۱ تا  $n$  است. فرض می‌شود برای  $n$  سال مشاهده شده سری جدیدی با برجسته شدن بعضی ویژگی‌ها و با طول  $n$  می‌خواهد ساخته شود. برای هر دوره پس از رتبه‌دهی به مقادیر و مرتب کردن آنها، مقدار به دست آمده از تابع فوق از سری قدیمی بازگردانده می‌شود و به مثابه مقدار جدید دوره معین در سال  $i$  به حساب می‌آید. در رابطه فوق  $r$  عددی تصادفی بین صفر و یک است که با ایفای نقش خود، ماهیت این تابع را تصادفی می‌کند.

پارامتر  $S_w^i$  که در منابع، درحکم پارامتر شکل از آن یاد شده است، نقشی کلیدی در این تابع ایفا می‌کند. مقدار این پارامتر و یا جهت تغییرات آن نشان‌دهنده تمایل دوره جدید به گرم‌تر شدن و یا سردتر شدن و یا پربارانی و کم بارانی است. تعیین مناسب مقدار پارامتر شکل برای رسیدن به هدف موردنظر در سری جدید اهمیت زیادی دارد. با توجه به دو بُعدی بودن پارامتر شکل، مقدار آن می‌تواند برای هر دوره در هر سال متفاوت باشد که این موضوع به تولید سناریوهایی با تابستان‌های گرم‌تر و سایر فصول بدون تغییر و یا زمستان‌های کم باران‌تر کمک



## ۱-۳ برآورد پارامتر شکل

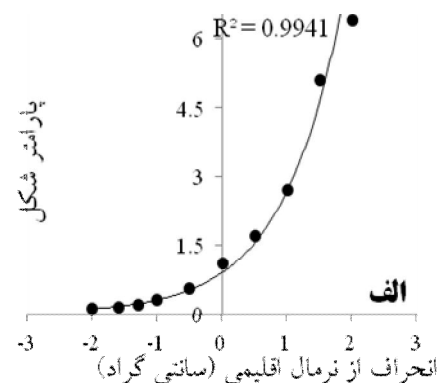
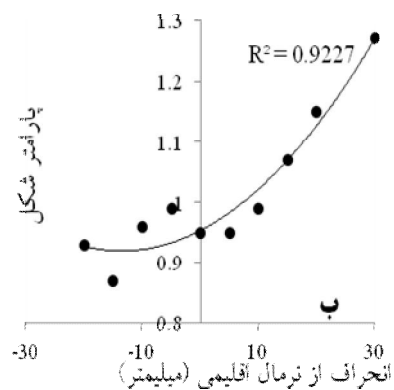
اجرای روش بازنمونه‌گیری هدفمند برای متغیرهای دما و بارندگی نتایج گوناگونی به‌دست می‌دهد. برآورد پارامتر شکل برای متغیر بارندگی با عدم قطعیت و نوسان‌های بیشتری نسبت به دما همراه است. در مورد ویژگی‌های متفاوت دمای هوا، نتایج تا حدودی یکسان است و البته در جزئیات تفاوت‌هایی وجود دارد. به‌طورکلی مقدار انحراف از نرمال درازمدت اقلیمی در مقدار مبنای پارامتر معادل یک در مورد دما و ۰/۹۵ در مورد بارندگی، تقریباً معادل صفر است. اگر مرتب‌سازی داده‌ها صعودی باشد، جای‌گذاری مقادیر کمتر پارامتر شکل نسبت به سطح مبنا منجر به بازگرداندن سری‌های سردتر و کم‌باران‌تر و جای‌گذاری مقادیر بیشتر آن منجر به بازگرداندن سری‌های گرم‌تر و پرباران‌تر می‌شود. در نمودارهای شکل ۲ این نتایج در مورد دمای میانگین (الف) و بارندگی (ب) آورده شده‌است. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که برای دسترسی به نرمال اقلیمی بزرگ‌تر از نرمال تاریخی (هم برای دما و هم برای بارندگی)، باید مقادیر بزرگ‌تر از پارامتر شکل اتخاذ کرد و برعکس.

این نمودارها با یک بار آزمون روش به‌دست آمده است. مقمقامی و همکاران (۱۳۸۹) روشن ساختند که نمودارهای حاصل از آزمون‌های مکرر روش، انطباق

خوبی با هم دارند. اما در عمل برای برآورد پارامتر شکل متناسب با خروجی مدل بزرگ‌مقیاس باید از روش‌های آماری برآورد پارامتر مدل مانند روش کمترین مربعات خطا استفاده کرد که منجر به برآورد دقیق پارامتر با کمترین خطا می‌شود.

## ۲-۳ کارایی سنجی مولد هواشناسی

مولد هواشناسی مبتنی بر روش ناپارامتری برآوردگر هسته‌ای تابع چگالی احتمال، داده‌های ماهانه و به‌لحاظ آماری مشابه با سری زمانی مشاهده‌شده تولید می‌کند. به‌طور قطع برای افزایش کارکرد رهیافت ریزمقیاس‌نمایی، باید مولد هواشناسی دارای کارایی مناسب که همان تولید سری مصنوعی و تصادفی از متغیر موردنظر است، باشد. با توجه به اینکه به‌خصوص در مورد سری زمانی بارندگی، حافظه تاریخی بلندمدت است، به‌عبارتی وقایع حدی در سری طولانی‌مدت اتفاق می‌افتد، برای آزمون مولد ۱۰۰ سال در ابتدا تولید، و نتایج حاصل از مقایسه دو سری ۲۸ سال و ۱۰۰ سال در این بخش آورده شده است. دلیل آن این است که یکی از مزایای یک مولد هواشناسی کارا، توانایی آن در شبیه‌سازی وقایع حدی است. برای بررسی میزان شباهت آماری بین سری تاریخی و سری ساختگی آزمون‌های متعددی وجود دارد که در اینجا از



شکل ۲. نمودارهای تغییرات انحراف از نرمال اقلیمی با پارامتر شکل، دمای میانگین (الف) مجموع بارندگی (ب).

جدول ۲. مقادیر P حاصل از آزمون‌های T و F به ترتیب برای میانگین و واریانس ماهانه، متوسط حوضه.

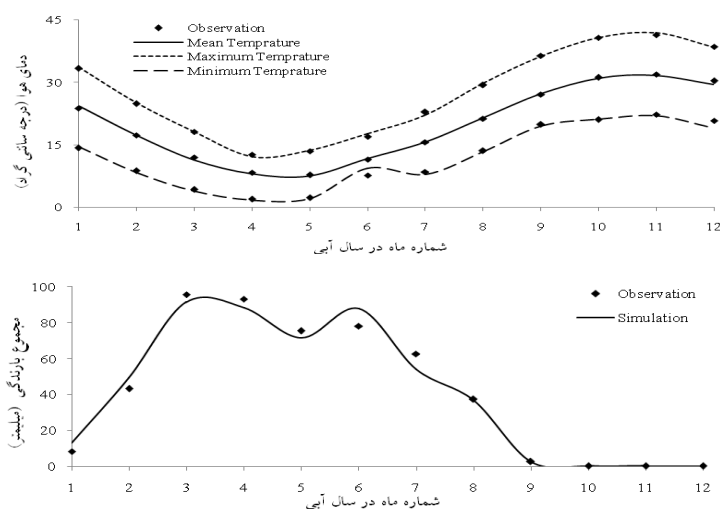
مرداد		اردیبهشت		بهمن		آبان		ماه شمسی
واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	مقادیر P متغیر
۰/۳۷	۰/۷۹۴	۰/۲۹۲	۰/۴۰۸	۰/۱۱۳	۰/۴۴۳	۰/۹۹	۰/۹۶۲	دمای میانگین
۰/۴۰۴	۰/۹۷۶	۰/۴۰۴	۰/۳۹۹	۰/۲	۰/۷۷۳	۰/۳۹۷	۰/۹۹۳	دمای بیشینه
۰/۲۵۳	۰/۵۹۴	۰/۲۶۸	۰/۷۰۵	۰/۱۲۵	۰/۳۲۱	۰/۹۶۷	۰/۹۱۶	دمای کمینه
۰/۶۷۹	۰/۸۱۸	۰/۴۰۱	۰/۵۶۱	۰/۲۴۲	۰/۴۳۷	۰/۵۹۴	۰/۶۳	بارندگی

۳ نمودار انطباق میانگین‌های ماهانه مشاهده می‌شود که در این نمودارها خطوط، بیانگر سری‌های شبیه‌سازی شده و نقاط در هر سطح بیانگر سری‌های مشاهده شده متغیر موردنظر هستند.

مشابه چنین نمودارهایی برای واریانس‌های ماهانه نیز در شکل ۴ آورده شده است. آنچه که در کل براساس آزمون‌ها و نمودارهای انطباق می‌توان استخراج کرد، کارایی مناسب مولد در شبیه‌سازی و یا برگرداندن پارامترهای ماهانه است که این مهم در تحقیقات مرتبط با بررسی میزان کارایی مولدهای هواشناسی اعم از پارامتری و یا ناپارامتری همواره حائز اهمیت و موردتوجه بوده

آزمون T و F به ترتیب برای میانگین و واریانس‌های ماهانه استفاده شده است. همچنین از نمودارهای آماری برای مقایسه چشمی پارامترهای متعدد استفاده شده است. آزمون‌های آماری نشان دادند که تقریباً در همه ایستگاه‌ها و همه ماه‌های سال، اختلاف بین پارامترها معنی‌دار نیست که این مطلب به روشنی در جدول شماره ۲ براساس مقادیر P-value به دست آمده در سطح اعتماد ۰/۹۵ آورده شده است.

در این جدول، برای ۴ ماه منتخب از فصل مقادیر P آورده شده است که نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن اختلاف‌های میانگین و واریانس‌های ماهانه است. در شکل

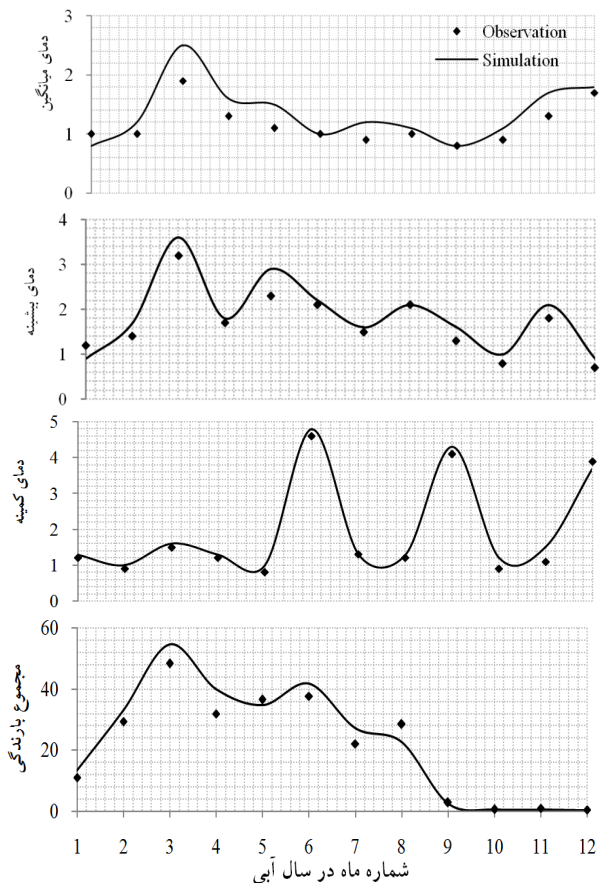


شکل ۳. نمودارهای انطباق پارامترهای میانگین ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، متوسط حوضه آبریز.

حاصل شد، اما در مورد منحنی‌های با چاولگی زیاد، کم‌برآوردی مشاهده شده است که می‌تواند کاربری آن را در این موارد محدود کند. برای مثال برای متوسط حوضه قابلیت شبیه‌سازی ضرایب چاولگی کوچک مناسب ارزیابی شد، اما برای ماه‌های مهر و اسفند که ضرایب چاولگی تاریخی بزرگ هستند، قدرمطلق ضرایب شبیه‌سازی شده، کوچک‌تر از مشاهده شده است. به‌هرحال تمایل منحنی‌ها (چاولگی به راست و یا چپ) نیز با مولد هواشناسی به درستی شبیه‌سازی شده است.

باتوجه به چندمتغیره بودن مولد هواشناسی (به این معنا که به‌جای یک متغیر، برداری از متغیرها درحکم ورودی محسوب می‌شوند)، انتظار می‌رود که ضرایب همبستگی معنی‌دار بین متغیرها در سری جدید بازسازی شوند که از مزایای یک مولد خوب محسوب می‌شود. ضرایب همبستگی بین متغیر دما با بارندگی اغلب از معنی‌داری خاصی برخوردار نیست، چرا که بارندگی یک متغیر بسیار تصادفی است. اما بین ویژگی‌های متفاوت دمای هوا این ضرایب معنی‌دار و مثبت هستند. اگر هر متغیر به‌تنهایی وارد مدل شود، برای یک زمان مشخص ممکن است متغیر اولیه (مرکزیت تابع هسته‌ای) و یا عدد تصادفی تولیدشده گرایش یکسانی در هربار اجرای مولد نداشته باشد و چه‌بسا ممکن است منطق بزرگ‌تر بودن دمای بیشینه از میانگین و دمای میانگین از کمینه زیرسؤال برود که این توانایی آن را محدود می‌سازد. اما زمانی که بردار متغیرها مدنظر قرار گیرد، اعمال تابع (۵) بر بردار داده‌های هواشناسی منجر به حفظ ضرایب همبستگی بین آنها می‌شود که نمودارهای شکل ۵ مبین چنین نتایجی هستند. ضرایب همبستگی، به‌خصوص بین مقادیر حدی (بیشینه و کمینه) با میانگین ماهانه دمای هوا معنی‌دار و منطبق بر خط نیمساز است. حفظ ضرایب همبستگی در سری شبیه‌سازی شده به معنای حفظ روند موجود درون مقادیر متغیرهای دمای هوا است و بر این منطق استوار است که هرگونه

است. برخی از مولدهای پارامتری که در قالب بسته‌های نرم‌افزاری عرضه شده‌اند نظیر مولد LARS-WG در مورد دمای هوا قادر به حفظ پارامترهای ماهانه میانگین هستند، اما هنگام اجرای این مولدها در برآورد واریانس با کم‌برآوردی این شاخص پراکندگی مواجه می‌شوند و نتیجه آن تولید سری‌های زمانی با دامنه تغییرات معنی‌داری کوتاه‌تر از سری مشاهده شده است (قمقامی و همکاران، ۱۳۹۰). به‌هرصورت مولد هواشناسی موردبحث قادر به شبیه‌سازی مناسب گشتاورهای مرتبه اول و دوم سری زمانی تاریخی است که منجر به برتری آن می‌شود.



شکل ۴. نمودارهای انطباق واریانسهای ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده، متوسط حوضه آبریز.

در مورد گشتاور مرتبه سوم (ضریب چاولگی (skew)) نیز در منحنی‌های چاوله کمتر نتایجی مشابه مراتب پایین‌تر

قسمت نتایج حاصل از اجرای تلفیقی دو روش آورده شده است.

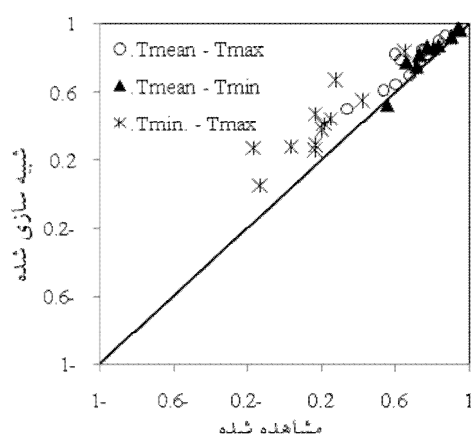
به طور کلی مدل بزرگ مقیاس به کاررفته حالت افزایشی را برای متغیرهای دما و کاهشی را برای بارندگی در هر دو افق پیش‌بینی کرده است که در افق ۵۰ سال این وضعیت شدیدتر است. براین اساس، سری‌های گرم‌تر برای دمای هوا و کم‌باران‌تر برای بارندگی شبیه‌سازی شده است. در جدول شماره ۳ برای دو افق موردنظر خروجی مدل بزرگ مقیاس (مقدار قابل انتظار)، پارامتر شکل و اسنجی شده، نرمال درازمدت خروجی روش بازنمونه‌گیری هدفمند و در نهایت نرمال درازمدت سری تصادفی شبیه‌سازی شده به ترتیب از راست به چپ آورده شده است. این نتایج نشان‌دهنده دقت و کارایی زیاد رهیافت مورد بحث است.

علاوه بر این توزیع این تغییرات در عرض سال از دیگر ویژگی‌های این رهیافت است که در نمودار جعبه‌ای شکل ۶ برای متغیرهای دمای میانگین هوا و مجموع بارندگی ماهانه در چشم‌انداز ۳۰ ساله برای متوسط حوضه آورده شده است. از این نمودار برای بررسی میزان تطابق

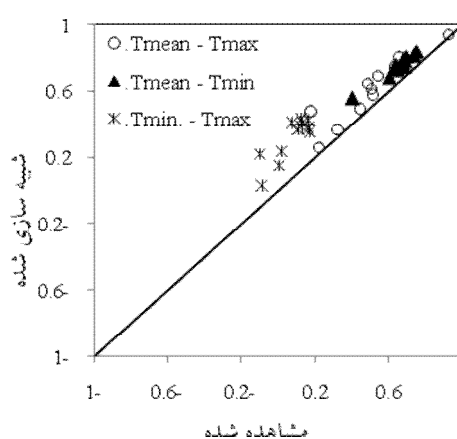
افزایش و یا کاهش در وقایع حدی دمایی منجر به افزایش و یا کاهش در مقادیر میانگین‌ها می‌شود که منطبق بر واقعیت سری‌های زمانی مشاهده شده است. به هر صورت این ویژگی مولد هواشناسی آن را از مولدهای تک‌متغیره متمایز می‌سازد و نتایج آن قابل قبول‌تر است. همچنین در سری‌های درازمدت‌تر احتمال وقوع پدیده‌های حدی بیشتر است که چنین ویژگی‌ای در سری شبیه‌سازی شده با مولد هواشناسی به چشم می‌خورد.

### ۳-۳ شبیه‌سازی چشم‌اندازهای اقلیمی

مهم‌ترین هدف از اجرای این روش‌ها، شبیه‌سازی چشم‌اندازهای اقلیمی ۳۰ (۱۳۹۱-۱۴۲۰) و ۵۰ (۱۳۹۱-۱۴۴۰) سال است که برای این منظور ابتدا انحراف‌ها از نرمال اقلیمی (اختلاف نرمال افق پیش رو نسبت به نرمال تاریخی) از خروجی مدل بزرگ مقیاس CGCM3T63 تحت سناریوی A1B استخراج و براساس آن پارامتر شکل در روش بازنمونه‌گیری هدفمند به روش کمترین مربعات خطا برآورد شد. سپس سری زمانی به دست آمده از روش بازنمونه‌گیری هدفمند، درحکم ورودی مولد هواشناسی، سری تصادفی از افق پیش‌رو تولید می‌کند که در این



(ب)



(الف)

شکل ۵. نمودارهای تطابق ضرایب همبستگی مقاطع ویژگی‌های دمای هوا برای ۱۲ ماه سال و ایستگاههای منتخب ۰۰۷ (الف) و ۱۴۴ (ب).

جدول ۳. شبیه‌سازی اقلیم طی دو افق چشم‌انداز ۳۰ و ۵۰ ساله.

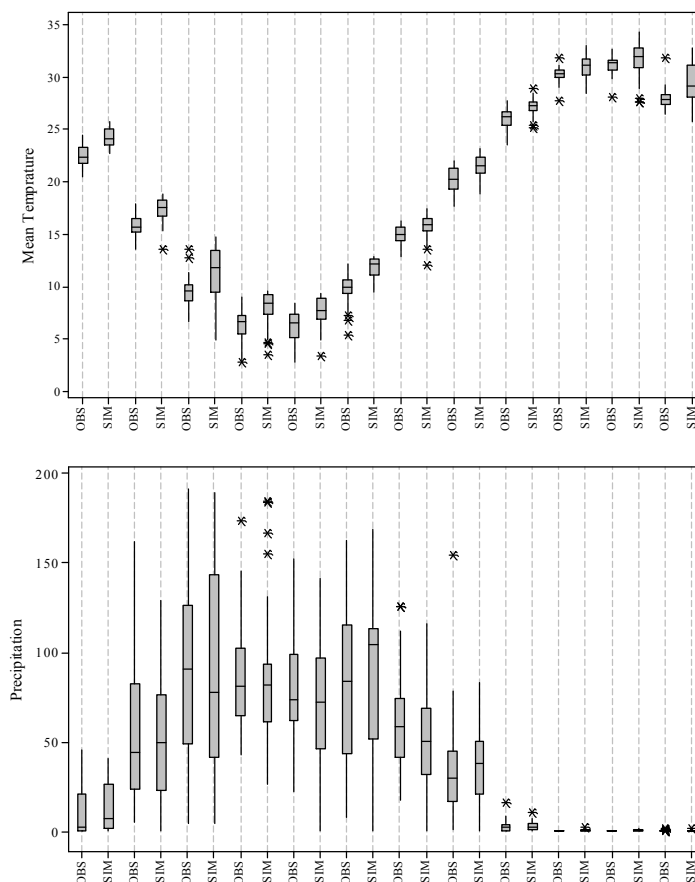
چشم‌انداز	متغیر اقلیمی	نرمال اقلیمی	خروجی GCM	$S_w$	خروجی St. Re.	خروجی مولد
(۱۳۹۱-۱۴۲۰)	بارندگی (mm)	۵۰۶	۴۹۷/۱	۱/۰۷	۴۹۷	۴۹۶
	دمای میانگین (°C)	۱۸/۴	۱۹/۸	۵/۵۵	۱۹/۸	۱۹/۷
	دمای بیشینه (°C)	۲۶/۱	۲۷/۴	۲/۷۵	۲۷/۳	۲۷/۵
	دمای کمینه (°C)	۱۰/۷	۱۲	۲/۴۵	۱۲	۱۱/۹
(۱۳۹۱-۱۴۴۰)	بارندگی (mm)	۵۰۶	۴۹۳/۷	۰/۹۳	۴۹۳/۸	۴۹۲/۳
	دمای میانگین (°C)	۱۸/۴	۲۰/۳	۶/۸۵	۲۰/۱	۲۰/۱
	دمای بیشینه (°C)	۲۶/۱	۲۷/۹	۴/۴۵	۲۷/۸	۲۷/۸
	دمای کمینه (°C)	۱۰/۷	۱۲/۵	۳/۸	۱۲/۵	۱۲/۶

داده‌ها با یک اُفت همراه است که بی‌شک ناشی از عوامل موثر بر تغییرات آب و هوا است.

### ۳-۴ جمع‌بندی

در این تحقیق، عملکرد یک رهیافت ناپارامتری در ریزمقیاس‌نمایی سری زمانی خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس مورد ارزیابی قرار گرفته است. این رهیافت از خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس در حکم ملاکی از میزان تغییرات اقلیمی پیش‌رو استفاده کرده و این تغییرات را در سری شبیه‌سازی شده برای یک منطقه معین سرشکن می‌کند، به طوری که این تغییرات در عرض سال و طول دوره‌ی آماری توزیع مناسبی خواهند داشت. شبیه‌سازی مناسب بردار داده‌های هواشناسی با حفظ آماره‌های اقلیمی نظیر گشتاورهای مراتب متفاوت، همبستگی‌های متقاطع و وقایع حدی در سری‌های درازمدت از مزایای مولد هواشناسی و اعمال مناسب و به‌نسبت دقیق تغییرات بر سری زمانی چشم‌انداز از مزایای اصلی روش بازنمونه‌گیری هدفمند است. مزیت برتر این رهیافت ناپارامتری بودن آن است، بدین معنا که در ساختار آن از

چارک‌ها و حدود اطمینان و نحوه پراکنش داده‌ها استفاده می‌شود. در هر کدام از این نمودارها ۲۴ جعبه وجود دارد که به صورت جفتی برای ۱۲ ماه سال آبی (از مهر تا شهریور) در کنار هم قرار گرفته‌اند. در هر جفت، جعبه اول متعلق به داده‌های تاریخی و جعبه دوم متعلق به افق ۳۰ ساله است. با توجه به ویژگی مدل بزرگ‌مقیاسی که رهیافت ریزمقیاس‌نما براساس آن اجرا شده است، این ویژگی‌ها به‌خصوص در نمودار مربوط به دمای هوا مشهود است. دامنه داده‌های شبیه‌سازی شده در مقادیر بالاتر از دامنه داده‌های تاریخی قرار دارند که این خاصیت در عرض سال به چشم می‌خورد و نه فقط برای یک ماه و یا یک دوره مشخص، و این نشان‌دهنده شبیه‌سازی سری‌های گرم‌تر برای افق پیش‌رو است. در مورد بارندگی این خصلت به وضوح دمای هوا به چشم نمی‌خورد. در نمودار شکل ۷ همچنین سری زمانی مجموع بارندگی ماهانه با تلفیق دو سری تاریخی (۱۳۵۶-۱۳۸۴) و افق چشم‌انداز ۵۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۴۰) آورده شده است که شیب منفی در این سری زمانی مبین روند به‌نسبت کاهشی در طول زمان است و مشاهده می‌شود که با وجود خصلت تصادفی (stochastic) بودن داده‌ها، روند

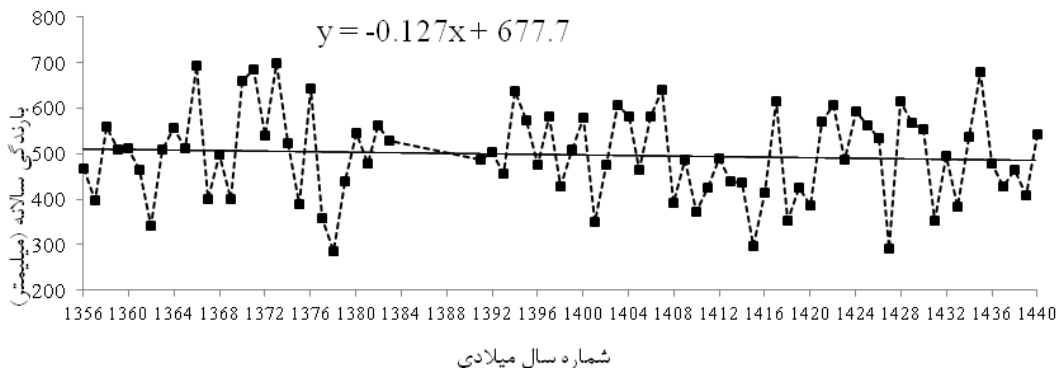


شکل ۶. نمودارهای جعبه‌ای مقادیر میانگین دمای هوا و بارندگی برای ۱۲ ماه سال آبی - مهر تا شهریور (محور افقی)، متوسط حوضه آبریز.

می‌تواند با ماه یا فصل براساس نظر کاربر تغییر کند که در این صورت یک پارامتر دو بُعدی می‌شود و با نوع متغیر و نوع ماه یا فصل تغییر می‌کند. بر این اساس می‌توان اختلافات از نرمال اقلیمی را به جای اینکه همانند کار صورت گرفته در این تحقیق در مقیاس سالانه محاسبه کرد، در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر برآورد کرد که به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

اما در کنار مزایا، این رهیافت دارای معایبی نیز هست که رفع آنها به منظور توسعه بهتر مدل‌های شبیه‌سازی اقلیم لازم است. اول اینکه با توجه به هدفمند بودن نمونه‌گیری‌ها در روش هم‌سوساز اقلیمی انتظار می‌رود، شبیه‌سازی واریانس‌ها دچار کم‌برآوردی شود که این کم‌برآوردی با توجه به ویژگی مولد ناپارامتری به سری

توزیع‌های پیش‌فرض نظیر تابع‌های گوناگون آماری استفاده نمی‌شود. این عامل باعث می‌شود که برای استفاده از آن برخلاف روش‌های پارامتری که ممکن است از منطقه‌ای به منطقه دیگر کاربری نداشته باشند، نیازی به اجرای آزمون‌های نیکویی برازش نباشد. همچنین کم‌پارامتر بودن این روش نسبت به روش‌های موجود از دیگر مزایای آن است. برای مثال مولد LARS-WG در توزیع تجربی هموارساز داده‌های بارندگی دارای ۲۱ پارامتر است که در مقایسه با روش مورد بحث تعداد پارامترهای لازم برای برآورد زیاد و برخلاف آن روش کار در این رهیافت به نسبت ساده و فاقد پیچیدگی ریاضی است. همچنین اجرای این روش برای دوره زمانی خاص (برای مثال فصل رشد) میسر است چراکه پارامتر شکل



شکل ۷. سری زمانی مجموع بارندگی (۱۳۵۶-۱۴۴۰) به استثنای سال‌های ۱۳۸۴ الی ۱۳۹۰، شیب منفی نشان‌دهنده روند کاهشی بارش طی دوره اقلیمی می‌باشد.

بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. و ملیوسی، ش.، ۱۳۹۰، بررسی توانمندی مدل اقلیمی PRECIS در شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای ایران: نشریه پژوهش‌های اقلیمی ایران، ۴۳(۷۷)، ۱۲۵-۱۴۰.

رجبی، ا.، ۱۳۸۹، مدل‌سازی اقلیم کرمانشاه با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG: دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب.

علیزاده، ا.، سیاری، ن.، حسامی کرمانی، م.، بنایان اول، م. و فرید، ح.، ۱۳۸۹، بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب کشاورزی مطالعه مورد: حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود: نشریه آب و خاک، ۲۴(۴)، ۸۱۵-۸۳۵.

قمقامی، م. و بذرافشان، ج.، ۱۳۸۹، ارزیابی عملکرد یک رهیافت ناپارامتری در شبیه‌سازی داده‌های بارندگی ماهانه در چند ایستگاه قدیمی ایران: چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، موسسه ژئوفیزیک، ۳۲-۳۵.

قمقامی، م.، عراقی‌نژاد، ش. و قهرمان، ن.، ۱۳۸۹، کاربرد یک رهیافت ناپارامتری در شبیه‌سازی داده‌های روزانه دما و بارندگی هم‌سو با تغییرات اقلیم: نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال اول، ۳ و ۴، ۷۵-۹۴.

شبیه‌سازی شده انتقال می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه روش St. Re. بر هر متغیر مجزا اجرا می‌شود، قابلیت حفظ همبستگی‌های متقاطع در سری جدید کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر درست است که مولد هواشناسی یک مولد چندمتغیره با قابلیت حفظ همبستگی‌های متقاطع است، ولی روش هم‌سوساز دارای چنین قابلیت نیست که البته می‌توان تابع (۸) را به جای اجرا بر هر متغیر به‌طور مجزا، هم‌زمان بر بردار متغیرها اعمال کرد. در این تحقیق برای برآورد عرض باند بهینه تابع چگالی از روش سیلورمن (۱۹۸۶) استفاده شده است که این پارامتر به‌طور مستقیم از روی بُعد تابع چگالی و طول مجموعه به‌دست می‌آید. در بعضی از پژوهش‌ها از روش‌های دیگری استفاده می‌شود، مانند روش حداکثر درست‌نمایی و کمترین مربعات خطا که نیاز به محاسبات بیشتر دارند و البته دقیق‌ترند و منجر به برآورد بهتری از پارامترهای تابع چگالی ناپارامتری می‌شوند.

#### منابع

اشرف زاده، ا.، ۱۳۸۴، شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه با استفاده از روش‌های ناپارامتری، رساله دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

- Hewitson, B., 1996, Climate downscaling: techniques and application: *Climate Research* **7**, 85-95.
- Klein, W. H., 1983, Objective specification of monthly mean surface temperature from mean 700 mb heights in winter: *Monthly Weather Review*, **113**, 277-290.
- Landman, W. A., Mason, S. J., Tyson, P. D., and Tennant, W. J., 2001, Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow: *J. Hydrology*, **252**, 221-236.
- Rajagopalan, B., Lall, U., and Tarboton, D. G., 1997, Evaluation of kernel density estimation methods for daily precipitation re-sampling: *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **11**, 523-547.
- Semenov, M. A., and Barrow, E. M., 1997, Use of stochastic weather generator in the development of climate change scenarios: *Climatology*, **35**, 397-414.
- Semenov, M. A., 2009, Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *J. R. Soc. Interface*, **6**, 343-350.
- Sharif, M., and Burn, D. H., 2006, Simulating climate change scenarios using an improved k nearest neighbor model, *J. Hydrology*, **325**, 179-196.
- Sharma, A., O'neil, R., 2002, A nonparametric approach for representing inter-annual dependence in monthly stream-flow": *Water Res. Res.*, **138**(7), 5-1:5-10.
- Silverman, B. W., 1986, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, New York.
- Srikanthan, R., Sharma, A., McMahon, and T. A., 2004, Stochastic generation of monthly rainfall data using a nonparametric approach, Technical report 02/8, CRC for Catchment Hydrology, Monash University, Clayton, 40p.
- Zorita, E., and Von Storch, H., 1999, The analog method as a simple statistical downscaling: comparison with more complicated methods: *J. Climate* **12**, 2474-2489.
- Westmacott, J. R. and Burn, D. H., 1997, Climate change effects on the hydrological regime within the Churchill- Nelson river Basin: *J. Hydrology*, **202**, 263-279.
- قمقماقی، م.، قهرمان، ن. و عراقی نژاد، ش.، ۱۳۹۰، ارزیابی عملکرد رهیافت توسعه یافته نزدیک ترین همسایه در شبیه سازی داده های هواشناسی روزانه: نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۲(۱)، ۴۵-۵۴.
- قهرمان، ن.، فلاح، ا. و بذرافشان، ج.، ۱۳۸۸، ارزیابی مولدهای هواشناسی LARS-WG و ClimGen در تولید داده های دما و بارش: چهارمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان.
- کمال، ع.، مساح بوانی، ع. و نجفی، م.، ۱۳۹۰، مقایسه روش های کوچک مقیاس کردن تناسبی و آماری در تاثیر بر رواناب حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم: دومین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران.
- مشکوتی، ا.، کردجزی، م. و بابائیان، ا.، ۱۳۸۹، بررسی و ارزیابی مدل لارس در شبیه سازی داده های هواشناسی استان گلستان در دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۳ میلادی: نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶(۱۹)، ۸۱-۹۶.
- Cannon, A. J., and Whitfield, P. H., 2002, Downscaling recent stream-flow conditions in British Columbia, Canada using ensemble neural network models: *J. Hydrology*, **259**, 136-151.
- CCCSN >> GCM/RCM Monthly Data Download >> GCM/RCM Monthly Data Download.
- Crane, R. G., and Hewitson, B. C., 1998, Doubled CO2 precipitation changes for the Susquehanna basin: downscaling from the general circulation model: *International J. Climatology*, **18**, 65-76.
- Dinardo, J., and Tobis, L., 2001, Nonparametric density and regression estimation: *J. Econ. Perspect.*, **15**(4), 11-28.