تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پنجم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸
Volume 5, No. 1, Spring 2009 (IR-WRR)
۴۴-۵۷

بررسی و مقایسه عملکرد دو مدل (ClimGen و LARS-WG) در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در شرایط مختلف اقلیمی ایران

جواد بذرافشان[۱*]، علی خلیلی[۲]، عبدالحسین هورفر[۳]، صدیقه ترابی[۴] و سهراب حجام[۵]

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی تصادفی وضع هوا (مولدهای وضع هوا) در مطالعات مختلفی از قبیل ارزیابی ریسک پدیده‌های حدی اقلیمی و هیدرولوژیک، مدیریت ریسک منابع آب و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انجام این قبیل مطالعات، اغلب نیازمند دسترسی به سری درازمدت داده‌های هواشناسی می‌باشد. با توجه به اینکه در اکثر ایستگاههای هواشناسی، دسترسی به آمار درازمدت وضع هوا (به ویژه، داده‌های روزانه) امکانپذیر نیست، می‌توان از مولدهای وضع هوا برای تطویل سری زمانی عوامل هواشناسی استفاده نمود. هدف از طراحی مولدهای وضع هوا، تولید داده‌هایی است که به لحاظ آماری مشابه داده‌های مشاهده شده باشند. در این مطالعه، دو مدل مشهور، ClimGen و LARS-WG، از نظر تولید داده‌های روزانه مجموع بارندگی، دمای حداقل و حداکثر هوا و تابش کلی خورشید در ۱۵ نمونهٔ اقلیمی مختلف کشور مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، سه مرحله واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی مدل‌ها در ایستگاههای منتخب انجام و کارایی مدل‌ها از نظر شباهت مقادیر تولید شده با مقادیر مشاهده شده با استفاده از شاخص‌های خطا نظیر ریشه میانگین مربعات (RMSE) و ضریب تعیین (CD) ارزیابی گردید. همچنین برای مقایسه برخی مشخصه‌های داده‌های تولید شده و مشاهده شده برای مثال، طول دوره خشک و تر، توزیع فراوانی بارندگی و طول دوره یخبندان و گرمای شدید، از سه آزمون آماری شامل t-استیودنت، F و X^2 استفاده گردید. نتایج بدست آمده در محدوده اقلیمی نشان داد که LARS-WG در تولید داده‌های بارندگی و ClimGen در شبیه‌سازی دماهای حداکثر و حداقل نتایج مناسب‌تری عاید می‌سازد. با این وجود، هر دو مدل، موفقیت چندانی در شبیه‌سازی درازمدت داده‌های تابش خورشید نداشتند.

کلمات کلیدی: مولدهای وضع هوا ، مقایسه مدل ، تنوع اقلیمی ، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۱ اردیبهشت ۱۳۸۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۸

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی آب و خاک، کرج
۲- استاد، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی‌ومنابع‌طبیعی، دانشکده‌مهندسی‌آب وخاک، کرج.
۳- دانشیار، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی آب و خاک، کرج.
۴- دکترای مهندسی عمران، وزارت نیرو، تهران.
۵- دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، دانشکده علوم پایه، تهران.
*- نویسنده مسئول

Comparison of the Performance of ClimGen and LARS-WG Models in Simulating the Weather Factors for Diverse Climates of Iran

J. Bazrafshan [1], A. Khalili[2], A. Hoorfar[3], S. Torabi[4] and S. Hajjam[5]*

Abstract

The stochastic simulation models of weather factors (weather generators) are used in a wide range of studies including risk assessment of climatic and hydrological extreme events, water resources, and agricultural risk management. Such studies often need access to the long-term series of weather data which is not collected continuously in many meteorological stations in Iran. Due to this shortage of data (particularly, the daily data), stochastic weather generators can be used as an alternative for extending data series. These generators are used to produce the synthetic weather data which is statistically similar to the observed data. In this study, the two well-known weather generators, i.e., ClimGen and LARS-WG were evaluated in simulating the weather factors for fifteen climatic zones of the country. The weather factors include the daily total precipitation, the minimum and maximum air temperatures, and the total solar radiation. For this purpose, the process of generating synthetic weather data was divided into three distinct steps including model calibration, model validation, and long-term simulation of weather data. To evaluate the agreement between the observed and the generated data, two indices were used; Root Mean Square Error (RMSE) and Coefficient of Determination (CD). Moreover, the three statistical tests including t-student test, F test and X^2 test were used to compare the various characteristics of the simulated and observed data such as the lengths of wet and dry series, the distribution of precipitation, and the lengths of hot and frost spells. The results showed that LARS-WG tends to match more closely to the observed precipitation data. The ClimGen performed better for the observed maximum and minimum air temperatures. Neither of the two weather generators succeeded in simulating total solar radiation.

Keywords: Weather Generators, Model Comparison, Climatic Diversity, Iran.

1- Ph.D. Candidate, Irrigation and Reclamation Engineering Dept., Tehran University, Karaj, Iran, Email: jbazr@ut.ac.ir
2- Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Dept., Tehran University, Karaj, Iran, Email: akhalili@ut.ac.ir
3- Associate Prof., Irrigation and Reclamation Engineering Dept., Tehran University, Karaj, Iran, Email: hoorfar@ut.ac.ir
4- Ph.D. in Civil Engineering, Ministry of Energy, Tehran, Iran, Email: s_torabi@yahoo.co.uk
5- Associate Prof., Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: shajjam@chamran.ut.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

با توجه به نتایج مطالعات انجام شده توسط محققان، مدل‌های متنوعی به‌منظور تولید داده‌های‌تصادفی متغیرهای اقلیمی‌وهواشناسی در شاخه‌های مختلف مانند سیستم‌های پشتیبان تصمیم[۱] (DSS) کشاورزی و هیدرولوژی به کار برده می‌شود. یک مدل تولید داده‌های تصادفی وضع هوا (مولد وضع هوا[۲])، مدلی رقومی است که توانایی ساخت سری‌های زمانی درازمدت عوامل وضع هوا نظیر بارندگی، دما و تابش خورشید را در مقیاس‌های زمانی معین (عمدتاً روزانه) با ویژگیهای آماری مشخص دارا می‌باشد (Richardson, 1981، Richardson & Wright, 1984، Racsko et al., 1991). از اوایل دهه ۱۹۸۰ تاکنون، مدل‌های مولد داده متعددی در نقاط مختلف جهان توسعه یافته‌اند که برخی از مشهورترین آنها عبارتند از: WGEN (Richardson & Wright, 1984)، SIMMETEO (Geng et al., 1988)، WeatherMan (Pickering et al., 1994) ، LARS-WG (Semenov et al., 1998)، TAMSIM (Jones & Thornthon, 2000)، MARKSIM (McCaskill, 1990)، ClimGen (Stöckle et al., 1999) و Climak (Danuso, 2002). این مدل‌ها عمدتاً در موارد زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند: الف) تکمیل و تطویل داده‌های وضع هوا (در مناطقی که دسترسی به سریهای زمانی بلند مدت آنها امکانپذیر نیست) به منظور ارزیابی ریسک در کاربردهای هیدرولوژی و کشاورزی، ب) شبیه‌سازی وضع هوا در مکانهایی که داده‌های وضع هوا قابل دسترس نیست و پ) تولید داده‌های مورد نیاز سناریوهای تغییر اقلیم در یک مکان معین بر مبنای خروجی مدل‌های گردش عمومی جو[۳] (GCM) به منظور ارزیابی پتانسیل اثر تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی و منابع آبی (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۵).

با توجه به اینکه نتایج حاصل از مولدهای وضع هوا صرفاً در نواحی آزمون از اعتبار لازم برخوردار است، بنابراین کاربرد آن‌ها در دیگر نواحی، مستلزم آزمون و اعتبارسنجی مجدد، متناسب با داده‌های ایستگاههای هواشناسی منطقه می‌باشد. از این حیث، مطالعات زیادی در نواحی مختلف اقلیمی کره زمین به انجام رسیده است. برخی از مطالعات، کارایی یک مدل مولد خاص را در یک منطقه ارزیابی کرده‌اند (Soltani et al., 2000 ، Taulis & Milke, 2005 ، Skiels & Richardson, 1998). در تعدادی از مطالعات، توابع بکار رفته در زیرمدل‌های یک مولد خاص تعدیل گردیده یا با اضافه کردن زیرمدلهایی برای تولید فاکتورهای دیگر وضع هوا (به غیر از فاکتورهای معمول بارندگی، دما و تابش خورشید) به ساختار مدل، مولد معینی گسترش یافته است (Kuchar, 2004، Castellvi et al., 2002، Hayhoe, 2000، Parlang & Katz, 2000). در برخی تحقیقات نیز، دو یا چند مولد هواشناسی برای کاربردهای خاص در یک منطقه با یکدیگر مقایسه شده است (Soltani & Hoogenboom, 2003، Castellvi & Stöckle, 2001، Mavromatis & Hansen, 2001، Wilks, 1999، Semenov et al., 1998، Johnson et al., 1996، Meinke et al., 1995) یا الگوریتم خاصی برای بازسازی خلاءهای آماری مورد استفاده قرار گرفته است (Hajjam et al., 2006).

در این مطالعه، از مدل‌های ClimGen[۴] (Stöckle et al., 1999) و LARS-WG[۵] (Semenov et al., 1998) که بیشترین کاربرد را در مطالعات گوناگون دارند، استفاده گردید. بررسی مراجع موجود نشان می‌دهد که این دو مولد تاکنون در ایران مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفته‌اند. با این حال، Soltani & Hoogenboom (2003) کارایی دو مولد WGEN و SIMMETEO را در پنج ایستگاه هواشناسی ایران مقایسه نموده‌اند. دو مدل مذکور از نظر الگوریتم و روش تولید داده مشابه یکدیگرند، با این تفاوت که WGEN از داده‌های مشاهده شده روزانه و SIMMETEO از داده‌های مشاهده شده ماهانه استفاده می‌کند. مطالعه حاضر با هدف اصلی مقایسه دو مولد ClimGen (توسعه یافته در ایالات متحده آمریکا) و LARS-WG (توسعه یافته در اروپا) در شبکه‌ای با تنوع اقلیمی و تراکم زمانی و مکانی بیشتر انجام شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تشریح مولدهای مورد استفاده

در طبقه‌بندی مولدهای وضع هوا، ClimGen در گروه مدل‌های پارامتری و LARS-WG در زمره مدل‌های نیمه‌پارامتری قرار می‌گیرد. هر دو مدل مذکور قادرند مقادیر روزانه سه عامل هواشناسی بارندگی، دما و تابش خورشید را برای دوره‌های طولانی، شبیه‌سازی کنند. بدین منظور، ابتدا، پارامترهای مورد نیاز آنها براساس تحلیل آماری داده‌های مشاهده شده وضع هوا در مکان مورد نظر، تعیین شده و سپس با استفاده از این پارامترها همراه با یک مدل اعداد تصادفی (به بیان دقیقتر، شبه تصادفی)، اقدام به تولید داده‌های وضع هوا می‌گردد. در ادامه، الگوریتم مدلهای مورد استفاده، به تفکیک بیان می‌شود.

۲-۱-۱- مدل ClimGen

مدل ClimGen (Stöckle et al., 1999)، نسخه تعدیل و ارتقاء یافته مدل WGEN (Richardson & Wright, 1984) است و در

این مقاله از نگارش چهارم که آخرین نسخه آن می‌باشد، استفاده گردید. الگوریتم ClimGen با شبیه‌سازی بارندگی آغاز می‌شود. تولید داده‌های تصادفی بارندگی با توجه به دو فرض اساسی انجام می‌شود: الف) وضعیت بارندگی در روز t صرفاً به وضعیت بارندگی در روز $t-1$ وابسته است، ب) مقدار بارندگی در روزهای بارانی (روزهای با بارندگی بیشتر از صفر میلی‌متر) از تابع توزیع احتمال مناسب تبعیت می‌کند. از فرض نخست چنین استنباط می‌شود که وضعیت بارندگی در یک روز معین، فرایندی از زنجیر مارکوف مرتبه اول است. نتیجهٔ مدل‌سازی مارکوفی وضعیت بارندگی (وقوع یا عدم وقوع) در ماتریس احتمال انتقال زیر خلاصه می‌شود:

$$\underline{P}=[p_{t-1,t}]=\begin{bmatrix} p_{dd} & p_{dw} \\ p_{wd} & p_{ww} \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{matrix} p_{dd}=1-p_{dw} \\ p_{wd}=1-p_{ww} \end{matrix} \qquad (۱)$$

که در آن، $p_{t-1,t}$، احتمال انتقال از یک حالت در روز $t\text{-}1$ به حالت دیگر در روز t و اندیس‌های d و w به ترتیب خشک و تر بودن روز مورد نظر را نشان می‌دهند. برای تعیین وضعیت بارندگی در روز t، ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری مبتنی بر روش تجانس[۶] (McCuen, 2002) ، یک عدد تصادفی (u_t) در بازه (۱ ,۰) تولید می‌شود. سپس، عدد تصادفی تولید شده با یکی از احتمالات انتقال p_{dw} یا p_{ww} (بسته به خشک یا تر بودن روز $t-1$) مقایسه می‌شود. اگر $u_t < p_{dw}$ یا $u_t < p_{ww}$باشد، آنگاه روز t، خشک و در غیر اینصورت، تر خواهد بود. مطابق فرض دوم، مشخص شده است که در نقاط مختلف جهان، توزیع ویبول[۷] برازش مناسبی بر مقادیر بارندگی روزانه دارد که فرم تجمعی آن به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$F_R(r)=1-exp\left[-\left(\frac{r}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \qquad (۲)$$

که در آن، $F_R(r)$ احتمال تجمعی مقدار بارندگی کوچکتر یا مساوی r و α و β پارامترهای توزیع می‌باشند. با استفاده از روش معکوس و تبدیل توزیع متغیر توزیع یکنواخت استاندارد به توزیع ویبول، مقدار بارندگی در روزهای بارانی از معادلهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$r=\beta(-\ln u_t)^{\frac{1}{\alpha}} \qquad (۳)$$

برخلاف بارندگی، که به طور مستقل شبیه‌سازی می‌شود، مدل‌سازی سایر متغیرهای وضع هوا از قبیل دمای حداکثر (T_x)، دمای حداقل (T_n) و تابش خورشید (Rs)، از وضعیت بارندگی در روز مورد نظر تاثیر می‌پذیرد. مدل ClimGen در تولید داده‌های دمای حداقل و حداکثر از روش Richardson (1981) استفاده می‌کند. بر طبق این روش، با فرض ایستایی ضعیف (ایستایی مرتبه دوم) داده‌ها، رابطه بین متغیرهای T_x و T_n به فرم مدل اتو رگرسیو چند متغیره مرتبه نخست بیان می‌شود:

$$z_t(j)=Az_{t\text{-}1}(j)+B\varepsilon_t(j) \qquad (۴)$$

که در آن، $z_t(j)$ ماتریس۱×۲ برای روز t است که درایه‌های آن، باقیمانده‌های استاندارد شده T_x (به ازای $j=1$)، T_n (به ازای $j=2$) ، ε_t ماتریس۱×۲ شامل مولفه‌های تصادفی مستقل است و فرض می‌شود که از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 تبعیت می‌کند. A و B ماتریس‌های ۲×۲ که ضرایب معادله را تشکیل می‌دهند. پس از محاسبه z_t، مقادیر روزانه T_x و T_n از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$X_t(j)=z_t(j)S_t(j)+\overline{X_t}(j) \qquad (۵)$$

که در آن، $X_t(j)$ مقادیر روزانه T_x (به ازای $j=1$)، T_n (به ازای $j=2$) ، $S_t(j)$ و $\overline{X_t}(j)$ به ترتیب، انحراف معیار و میانگین متغیر j برای روز t است. مقادیر $\overline{X_t}(j)$ و $S_t(j)$ بسته به وضعیت تری یا خشکی یک روز معین فرق می‌کنند. شبیه‌سازی تابش کلی خورشید نیز به کمک داده‌های دماهای حداکثر و حداقل تولید شده و با استفاده از معادله پیشنهادی Bristow & Campbell (1984) انجام می‌شود:

$$Rs_t=C[1-exp(-D\times\Delta T)]R_0 \qquad (۶)$$

که در آن، C و D ضرایب تجربی معادله و ΔT دامنه شبانه روزی تغییرات دما (اختلاف بین دمای حداکثر و دمای حداقل) حسب درجه سانتی‌گراد و R_0 تابش خورشید در ماورای آتمسفر، حسب مگاژول بر متر مربع بر روز است. لازم به ذکر است که کلیهٔ پارامترهای مورد نیاز در مدل ClimGen به صورت ماهانه تعیین و برای میانیابی روزانه پارامترهای ماهانه از توابع اسپلاین استفاده می‌شود.

۲-۱-۲- مدل LARS-WG

مدل LARS-WG ابتدا توسط Racsko et al. (1991) ارایه و سپس توسط Semenov et al. (1998) بازنگری و تعدیل گردید. تاکنون نسخه‌های متعددی از LARS-WG ارایه شده است که در این مطالعه، از نگارش چهارم (آخرین نسخه حاضر) این مولد استفاده شده است. LARS-WG برای شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک و تر، بارندگی و تابش روزانه خورشید از توزیع‌های نیمه‌تجربی به فرم کلی

$$Emp=\{a_0,a_i;\ h_i\ ,i=1,...,10\} \qquad (۷)$$

استفاده می‌کند که هیستوگرامی شامل ۱۰ طبقه است و هر یک از طبقات آن در فاصله $[a_{i-1},a_i)$ تعریف می‌شود به طوریکه $a_{i-1}<a_i$، و h_i فراوانی پدیده‌های مشاهده شده در طبقه i ام می‌باشد. برای تولید مقادیر متغیرهای تصادفی وضع هوا با استفاده از

یک توزیع نیمه‌تجربی، ابتدا یکی از طبقات ده‌گانه به تصادف انتخاب می‌شود. سپس، با فرض تبعیت داده‌ها از توزیع یکنواخت در طبقه مورد نظر، یک مقدار در آن فاصله برای متغیر انتخاب می‌شود. توزیع نیمه‌تجربی، انعطاف‌پذیر است زیرا با تغییر فواصل $[a_{i-1}, a_i)$، شکل توزیع فراوانی نیز تغییر می‌کند. فواصل $[a_{i-1}, a_i)$، بر اساس ویژگی‌های مورد انتظار داده‌های وضع هوا انتخاب می‌شوند. در مورد تابش خورشید، این فاصله بین حداکثر و حداقل داده‌ها، به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود اما در مورد طول سری‌های خشک و تر و مقدار بارندگی، اندازه فاصله با افزایش i (شماره طبقه) افزایش می‌یابد. دلیل انعطاف پذیری فواصل در مورد دو متغیر اخیر آن است که معمولاً فراوانی مقادیر کم آنها، بیشتر از فراوانی مقادیر بزرگ آنها است و در صورتی که فواصل به طور یکسان انتخاب شوند، ممکن است بخش اعظم فراوانی‌ها در یک فاصله قرار گیرد و کارایی مدل کاهش یابد.

دماهای حداکثر و حداقل روزانه به عنوان فرایندهای استوکاستیک تلقی می‌شوند که میانگین و انحراف معیار آنها به وضعیت تری یا خشکی روز مورد نظر مربوط شده است. مولد LARS-WG در شبیه‌سازی دماهای حداکثر و حداقل از الگوریتمی مشابه مولد ClimGen استفاده می‌کند، با این تفاوت که در اینجا، میانیابی روزانه پارامترهای ماهانه با استفاده از سری فوریه محدود (مرتبه سه) انجام می‌شود.

۲-۲- انتخاب ایستگاهها

در انتخاب ایستگاهها، دو معیار تنوع اقلیمی و کیفیت داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در مرحله نخست مطالعه، آمار روزانه دما، بارندگی و تابش خورشید مربوط به بیش از ۴۰ ایستگاه سینوپتیک، از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. بررسی مقدماتی داده‌ها نشان داد که طول دوره آماری در ایستگاهها، بین ۲ تا ۴۵ سال نوسان می‌کند. در همه ایستگاهها، طولانی‌ترین دوره آماری مربوط به متغیرهای دما و بارندگی است. در تعدادی از ایستگاهها، داده‌های تابش خورشید ثبت نگردیده است و در ایستگاههای واجد داده‌های تابش خورشید، دورهٔ برداشت آمار از سال ۱۹۹۲ آغاز گردیده است. با انجام کنترل‌های خاص (از نظر مقادیر پرت و درصد خلاءهای آماری) بر روی داده‌های ثبت شده در هر یک از ایستگاهها، مشخص شد که به طور کلی، داده‌های تابش خورشید از اطمینان بسیار کمتری نسبت به دیگر داده‌ها برخوردارند. در برخی از ایستگاهها نیز، در مواردی دمای حداقل ثبت شده بیشتر از دمای حداکثر بود. این نوع داده‌ها نیز به عنوان داده‌های اشتباه به مدل‌ها معرفی گردید.

از آنجا که نتایج مقایسه مولدهای وضع هوا، با استفاده آمار درازمدت عوامل هواشناسی اعتبار بیشتری می‌یابد، در این مطالعه از ایستگاههای با بیش از ۳۰ سال آمار و واجد کمترین خلاء آماری استفاده گردید. علاوه بر این، چون بخش اعظم کشور در محدوده اقلیمی خشک و نیمه خشک قرار دارد، بیشتر ایستگاهها از این مناطق اقلیمی انتخاب گردید. با در نظر گرفتن معیارهای فوق، تعداد ۱۵ ایستگاه هواشناسی انتخاب گردید که غالب آنها از نظر متغیرهای دما و بارندگی، دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ و از نظر متغیر تابش خورشید، دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۲ را پوشش می‌دهند. با توجه به اینکه در هواشناسی به طور معمول، برای بازسازی و تکمیل داده‌های مفقود در مقیاس روزانه از مدل‌های تولید داده استفاده می‌شود و داده‌های بازسازی شده ممکن است بر خروجی مدل‌های ClimGen و LARS-WG تاثیر داشته باشند بنابراین، در فرایند آماده‌سازی داده‌ها هیچگونه برآوردی از داده‌های مفقود و اشتباه در ایستگاههای منتخب انجام نشد. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاههای مورد استفاده در این مطالعه، در جدول ۱ آمده است.

۲-۳- ارزیابی خطا و آزمون‌های آماری

بر طبق نظر Semenov & Barrow (2002) در هر فرآیند تولید داده لازم است به ترتیب سه مرحله اساسی شامل واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی داده دنبال شود. برای ارزیابی خطا در هر یک از مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی مدل‌های ClimGen و LARS-WG از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (Fox, 1981) و ضریب تعیین (CD) (Loague & Green, 1991) استفاده گردید. روابط RMSE و CD به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - G_i)^2 \Big/ n} \qquad (۸)$$

$$CD = \sum_{i=1}^{n}\left(G_i - \overline{O}\right)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2 \qquad (۹)$$

که در روابط فوق O و G به ترتیب مقادیر مشاهده شده و تولید شده و n تعداد داده‌ها است. هر چه مقدار RMSE کمتر باشد، داده‌های تولید شده توسط مدل به داده‌های مشاهده شده نزدیکتر است. RMSE حساسیت زیادی به وجود مقادیر حدی در سری داده‌ها نشان می‌دهد زیرا به صورت توان دو اختلافات بیان می‌شود. ضریب تعیین CD با R^2 فرق می‌کند زیرا CD هر عدد بزرگتر از صفر را شامل می‌شود حال آنکه R^2 بین صفر و یک تغییر می‌کند. ضریب تعیین CD در واقع بخشی از واریانس مشاهدات را که توسط مدل‌های شبیه‌سازی توجیه می‌شود، نشان می‌دهد.

جدول ۱ - مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاههای منتخب.

ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	ارتفاع (متر)	بارندگی (میلیمتر)	دمای حداقل (سانتیگراد)	دمای حداکثر (سانتیگراد)	تابش خورشید (مگا ژول بر متر مربع بر روز)	اقلیم
اهواز	۳۱/۳۳	۴۸/۶۷	۲۲/۵	۲۳۴/۹	۱۷/۷	۳۲/۹	۱۹/۱	خشک – گرم
اراک	۳۴/۱۰	۴۹/۷۶	۱۷۰۸/۰	۳۳۷/۵	۷/۰	۲۰/۷	۱۸/۲	نیمه‌خشک – سرد
بندر عباس	۲۷/۲۲	۵۶/۳۶	۹/۸	۱۷۸/۰	۲۱/۷	۳۲/۱	۱۹/۹	فراخشک – گرم
اصفهان	۳۲/۶۷	۵۱/۸۷	۱۵۵۰/۴	۱۱۹/۱	۹/۴	۲۳/۳	۱۹/۴	فراخشک – سرد
قزوین	۳۶/۲۵	۵۰/۰۵	۱۲۷۹/۲	۳۱۹/۶	۶/۹	۲۱/۱	۱۷/۹	نیمه‌خشک – سرد
کرمانشاه	۳۴/۳۲	۴۷/۱۲	۱۳۱۸/۶	۴۶۰/۶	۶/۰	۲۲/۷	۱۸/۰	نیمه‌خشک – سرد
مشهد	۳۶/۲۶	۵۹/۶۳	۹۹۹/۲	۲۵۶/۴	۷/۲	۲۱/۳	۱۷/۷	نیمه‌خشک – سرد
ارومیه	۳۷/۳۶	۴۵/۰۵	۱۳۱۵/۹	۳۳۲/۴	۵/۱	۱۷/۴	۱۷/۳	نیمه‌خشک – سرد
رشت	۳۷/۲	۴۹/۶۵	۳۶/۷	۱۳۵۹/۷	۱۱/۴	۲۰/۰	۱۴/۴	مرطوب – معتدل
سنندج	۳۵/۳۳	۴۷/۰۰	۱۳۷۳/۴	۴۶۱/۲	۵/۶	۲۱/۶	۱۷/۸	نیمه‌خشک – سرد
شهرکرد	۳۲/۲۸	۵۰/۸۵	۲۰۴۸/۹	۳۳۳/۳	۳/۴	۲۰/۲	۱۹/۱	نیمه‌خشک – فراسرد
شیراز	۲۹/۵۵	۵۲/۶۰	۱۴۸۱/۰	۳۲۹/۲	۹/۸	۲۵/۷	۲۰/۲	نیمه‌خشک – معتدل
تبریز	۳۸/۰۸	۴۶/۲۸	۱۳۶۱/۰	۲۷۷/۲	۶/۹	۱۸/۵	۱۷/۱	نیمه‌خشک – سرد
یزد	۳۱/۹	۵۴/۲۸	۱۲۳۷/۲	۵۹/۲	۱۱/۷	۲۶/۶	۱۹/۴	فراخشک – سرد
زنجان	۳۶/۶۸	۴۸/۴۸	۱۶۶۳/۰	۳۰۷/۰	۳/۴	۱۷/۹	۱۷/۴	نیمه‌خشک – فراسرد

در بهترین وضعیت، مقدار CD برابر یک است. توجه به این نکته لازم است که در رابطه (۹) مقادیر تولید شده (G) و مشاهده شده (O) با میانگین مقادیر مشاهده شده ($\overline{O}$) مقایسه می‌شوند.

علاوه بر شاخص‌های ارزیابی خطا که در بالا ذکر گردید، برای مقایسه شباهت مشخصه‌های آماری داده‌های تولید شده توسط دو مدل ClimGen و LARS-WG با داده‌های مشاهده شده تاریخی در هر یک از مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی از سه آزمون آماری شامل آزمون $t-$ استیودنت، آزمون F و آزمون χ^2 استفاده گردید. با استفاده از این آزمون‌ها، شباهت هفده مشخصه آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در هر یک از ایستگاهها در سطح اعتماد ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. این مشخصه‌ها در جدول ۲ آمده است.

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه، از مجموع ۴۵ سال آمار روزانه تاریخی موجود در هر یک از ایستگاهها، ۴۰ سال برای مرحله واسنجی و ۵ سال برای مرحله صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در مورد تابش خورشید به دلیل کوتاه بودن دوره برداشت آمار، ۹ سال برای مرحله واسنجی و ۵ سال برای مرحله صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در مرحله شبیه‌سازی با استفاده از هر یک از مدل‌های تولید داده، ۳۰۰ سال آمار روزانه بارندگی، دمای حداکثر، دمای حداقل و تابش خورشید شبیه‌سازی گردید. به دو دلیل دوره طولانی ۳۰۰ سال برای انجام شبیه‌سازی انتخاب گردید. اول اینکه، مشخصه‌های آماری داده‌های مصنوعی به مشخصه‌های واقعی خود نزدیکتر شود. دیگر اینکه، توان آزمون‌های آماری برای مقایسه داده‌های مصنوعی و داده‌های مشاهده شده افزایش یابد. نتایج ارزیابی خطای مقادیر تولید شده و مشاهده شده و همچنین آزمون‌های آماری مقایسه مشخصه‌های آماری داده‌های تولید شده و مشاهده شده در هر یک از مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی مدلها در محدوده اقلیمی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. به علت تعداد زیاد ایستگاهها، صرفاً حدود پایین و بالای شاخص‌های خطا برای هر یک از متغیرهای هواشناسی ارایه شده است. ذکر این نکته لازم است با توجه به اینکه هدف این مطالعه ارزیابی کارایی مولدها در شبیه‌سازی درازمدت داده‌های وضع هوا است، بحث مفصلی در مورد نقاط ضعف و قوت مدلها در مرحله شبیه‌سازی انجام خواهد شد.

جدول ۲- مشخصه‌های آماری متغیرهای هواشناسی مورد بررسی.

متغیر	مقیاس زمانی	مشخصه آماری		
		متوسط	واریانس	توزیع فراوانی
طول دوره‌های خشک[۲]	فصلی			*[۱]
طول دوره‌های تر[۲]	فصلی			*
بارندگی	روزانه			*
	ماهانه	*	*	
دمای حداقل	روزانه	*	*	
	ماهانه	*	*	
دمای حداکثر	روزانه	*	*	
	ماهانه	*	*	
تابش خورشید	روزانه	*	*	
	ماهانه	*	*	
طول دوره یخبندان[۲]	فصلی			*
طول دوره گرمای شدید[۲]	فصلی			*

(۱) : علامت * مشخصه آماری مورد بررسی برای متغیر درج شده در همان ردیف را نشان می‌دهد.

(۲) : طول دوره‌های خشک و تر از روی متغیر بارندگی و طول دوره یخبندان و گرمای شدید از روی متغیرهای دمای حداقل و حداکثر بدست آمده‌اند و بنابراین جزو متغیرهای اصلی محسوب نمی‌شوند.

۳-۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های مورد بررسی

بررسی و مقایسه عملکرد دو مدل ClimGen و LARS-WG در مرحله واسنجی از نظر متغیر بارندگی (طبق جدول ۳) نشان می‌دهد که مدل LARS-WG در تولید مقادیر روزانه بارندگی در محدوده اقلیمی موفقیت بیشتری داشته است. حد بالای RMSE در مورد هر دو مدل مربوط به ایستگاه رشت و حد پایین مربوط به ایستگاه یزد می‌باشد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که مدل LARS-WG تنها در ایستگاه رشت خطای زیادی گزارش نموده است اما در مورد ClimGen مقدار RMSE محاسبه شده در چندین ایستگاه به حد بالای RMSE یعنی ۱۶/۱۳ میلی‌متر نزدیک می‌باشد. به هر حال، حد پایین RMSE در مورد مدل LARS-WG معادل ۱/۶ میلی‌متر است که بسیار کمتر از حد پایین RMSE محاسبه شده برای مدل ClimGen است. مقایسه ضریب تعیین (CD) بدست آمده برای هر دو مولد نیز برتری مدل LARS-WG را تایید می‌کند. آزمون آماری مشخصه‌های بارندگی (جدول ۴) نیز موید برتری مدل LARS-WG است اگر چه بیش از ۳۰ درصد آزمون‌های آماری انجام شده در محدوده مورد بررسی شباهت واریانس بارندگی را در سطح اعتماد ۵ درصد تایید نکردند.

در مورد مدل‌سازی دمای حداقل و حداکثر در مرحله واسنجی، تفاوت چندانی از نظر مقدار RMSE وCD بین داده‌های تولید شده و مشاهده شده توسط هر دو مدل وجود نداشت (جدول ۳). تحلیل آماری مشخصه‌های دمای حداکثر و حداقل نشان داد که مدل ClimGen کارایی بهتری در شبیه‌سازی میانگین ماهانه و روزانه و واریانس ماهانه دماهای حداقل و حداکثر دارد. در عوض، درصد آزمون‌های آماری رد شده در شبیه‌سازی واریانس روزانه دمای حداقل و حداکثر توسط LARS-WG کمتر از ClimGen است. همچنین، مدل ClimGen توانایی بیشتری در مدلسازی دوره‌های گرما و سرما دارد.

مطابق جدول ۳، در مرحله واسنجی، مدل‌سازی تابش خورشید با استفاده مدل ClimGen خطای بیشتری نسبت به LARS-WG تولید می‌کند به طوریکه بیشترین خطای مدل‌سازی مربوط به ایستگاه کرمانشاه با مقداری معادل ۲/۱۷ مگاژول بر متر مربع بر روز می‌باشد. خطای مدل LARS-WG در ایستگاه مذکور معادل ۰/۶ مگاژول بر متر مربع بر روز است. مقایسه مقادیر CD نیز نشان می‌دهد که LARS-WG کارایی بهتری در نمایش تغییرات داده‌های مشاهده شده دارد. مقایسه درصد آزمون‌های آماری رد شده در سطح اعتماد ۵ درصد برای چهار مشخصه تابش خورشید (جدول ۴) نشان می‌دهد که کارایی ClimGen در شبیه‌سازی میانگین ماهانه و روزانه و واریانس ماهانه بیشتر است اما در مورد شبیه‌سازی واریانس روزانه، مدل LARS-WG بهتر عمل می‌کند.

جدول ۳ : حدود بالا و پایین مقادیر شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (CD) در مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی دو مدل ClimGen و LARS-WG در محدوده اقلیمی.

مدل	شاخص خطا	بارندگی	دمای حداقل	دمای حداکثر	تابش خورشید
		الف. مرحله واسنجی			
ClimGen	RMSE	۶/۱۸ – ۱۶/۱۳	۰/۱۲ – ۰/۷۰	۰/۱۵ –۱/۱۳	۰/۲۳ – ۲/۱۷
	CD	۱/۰۶ – ۱۳/۵۶	۰/۷۰ – ۱/۰۴	۰/۹۳ – ۱/۱۳	۰/۸۰ – ۱/۰۸
LARS-WG	RMSE	۱/۶۰ – ۱۵/۴	۰/۱۶ – ۰/۴۰	۰/۲۰ – ۰/۴۰	۰/۳۵ – ۰/۸۰
	CD	۰/۷۹ – ۱/۲۶	۰/۹۵ – ۱/۰۳	۰/۹۵ – ۱/۰۲	۰/۸۸ – ۱/۰۱
		ب. مرحله صحت‌سنجی			
ClimGen	RMSE	۱۰/۰۵ – ۲۸/۳۹	۰/۷۷ – ۳/۱۹	۰/۹۴ – ۴/۴۴	۰/۷۴ – ۲/۹
	CD	۰/۸۰ – ۸/۶۳	۱/۰۱ – ۱/۳۲	۰/۹۲ – ۱/۳۸	۰/۸۷ – ۱/۸۵
LARS-WG	RMSE	۴/۵ – ۴۹/۹	۰/۶ – ۳/۵	۰/۹ – ۵/۰	۰/۵ – ۲/۷۵
	CD	۰/۳۷ – ۲/۷۹	۰/۹۹ – ۱/۴۱	۰/۹۴ – ۱/۲۴	۰/۸۹ – ۱/۷۱
		پ. مرحله شبیه‌سازی			
ClimGen	RMSE	۷/۱ – ۱۰/۷	۰/۰۶ – ۰/۹	۰/۰۷ – ۱/۲	۰/۲۶ – ۰/۹
	CD	۰/۹۹ – ۶/۵۵	۰/۹۳ – ۱/۰۳	۰/۹۲ – ۱/۰۱	۰/۹۲ – ۱/۰۹
LARS-WG	RMSE	۱/۵ – ۶/۵	۰/۱ – ۰/۴	۰/۱ – ۰/۴	۰/۴ – ۰/۹
	CD	۰/۸۷ – ۱/۳۵	۰/۹۷ – ۱/۰۱	۰/۹۶ – ۰/۹۹	۰/۹۴ – ۱/۰۳

جدول ۴: نتایج آزمون‌های آماری مقایسه مشخصه‌های داده‌های مشاهده شده و تولید شده در ایستگاههای هواشناسی منتخب توسط مدل‌هایClimGen و LARS-WG. اعداد داخل جدول، درصد آزمونهای رد شده در سطح اعتماد ۵ درصد را نشان می‌دهند.

مدل	دوره تر/ خشک	بارندگی				دمای حداقل				دمای حداکثر				دوره گرما/ سرما	تابش خورشید			
		توزیع روزانه	ماهانه			ماهانه		روزانه		ماهانه		روزانه			ماهانه		روزانه	
			M*	V*		M	V	M	V	M	V	M	V		M	V	M	V
		الف. مرحله واسنجی																
ClimGen	۲۷/۵	۴۵/۶	۸/۹	۳۴/۴		۲/۸	۳۶/۱	۲۹/۴	۵۰/۶	۲/۸	۲۸/۹	۳۰/۰	۴۸/۹	۱۴/۲	۱۷/۲	۳۷/۸	۴۹/۴	۶۷/۸
LARS-WG	۰/۸	۳/۹	۳/۹	۳۱/۷		۶/۱	۴۸/۹	۳۵/۰	۲۷/۲	۳/۳	۳۵/۶	۳۸/۳	۲۴/۴	۵۸/۳	۲۲/۸	۴۱/۱	۵۵/۰	۴۸/۹
		ب. مرحله صحت‌سنجی																
ClimGen	۲۰/۰	۲۲/۲	۲۰/۰	۳۷/۸		۲۹/۴	۴۲/۷	۵۱/۷	۴۱/۱	۲۸/۹	۱۰/۶	۷۷/۲	۳۵/۰	۵۰/۰	۲۱/۳	۳۵/۰	۶۰/۶	۶۲/۱
LARS-WG	۲/۵	۹/۸	۶/۷	۳۳/۴		۴۰/۶	۵۲/۲	۵۲/۲	۵۳/۹	۳۱/۱	۲۰/۶	۶۷/۲	۵۱/۷	۷۵/۵	۱۵/۰	۲۲/۲	۵۲/۸	۴۹/۲
		پ. مرحله شبیه‌سازی																
ClimGen	۶۰/۰	۷۵/۰	۱۰/۰	۴۹/۴		۷/۲	۶۷/۸	۱۶/۱	۶۵/۰	۲/۲	۵۰/۰	۸/۳	۶۶/۷	۳۲/۵	۴۰/۶	۷۴/۴	۷۵/۶	۹۷/۸
LARS-WG	۵/۸	۳/۳	۳/۹	۳۷/۲		۱۰/۰	۷۰/۰	۴۰/۶	۴۰/۰	۶/۷	۵۷/۲	۳۷/۲	۲۲/۸	۲۷/۵	۵۷/۸	۲۷/۲	۸۱/۱	۶۴/۴

* : M و V به ترتیب میانگین و واریانس داده‌ها را نشان می‌دهند.

مقایسه خطای مدل‌ها در مرحله صحت‌سنجی با خطای آنها در مرحله واسنجی نشان داد اگرچه تراز خطاها در مرحله صحت‌سنجی بالاتر از مرحله واسنجی است اما نتایج بدست آمده از نظر کارایی مدل‌ها مشابه است. LARS-WG کارایی مناسبی در تولید داده‌های بارندگی و ClimGen کارایی بیشتری در تولید داده‌های دما دارد. در مورد داده‌های تابش خورشید نیز نتایج LARS-WG بهتر از ClimGen بود. عمده‌ترین دلیل افزایش تراز خطا در مرحله صحت‌سنجی کوتاه بودن طول دوره تولید داده است زیرا کوتاه بودن

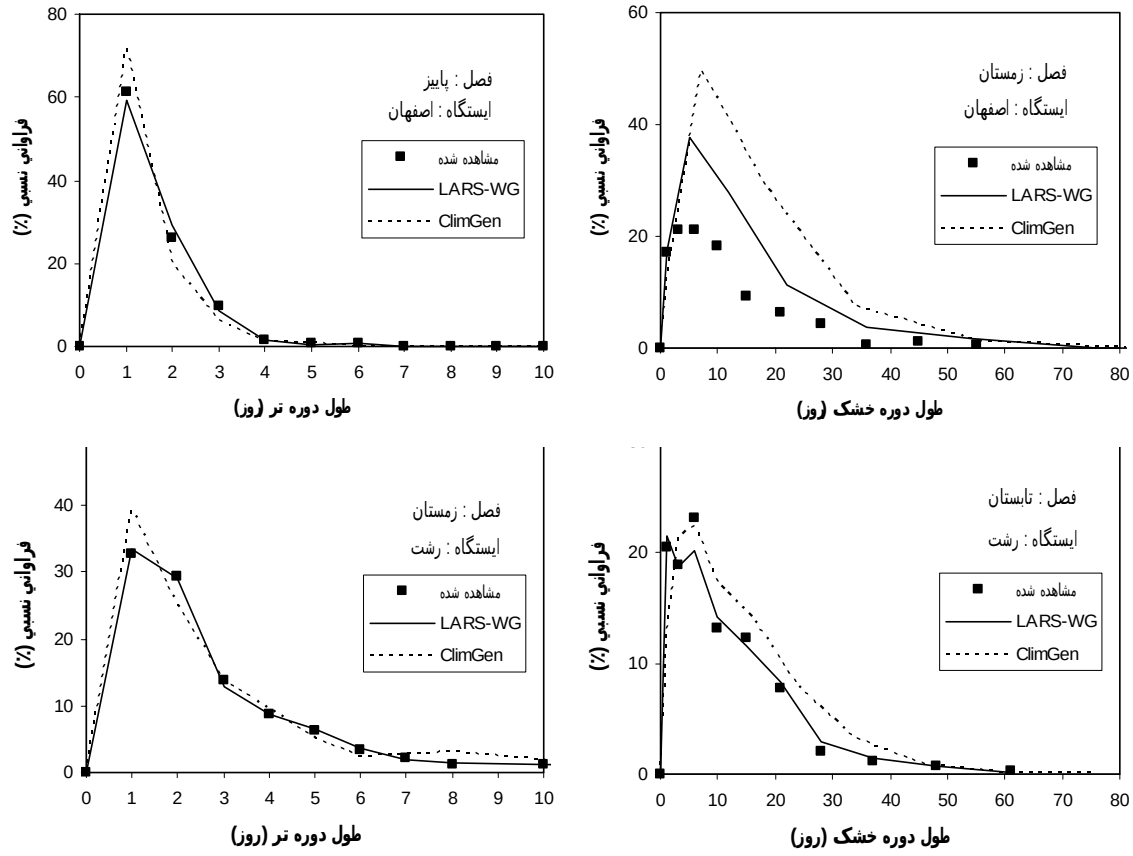
طول دوره اولاً، توان آزمون‌های آماری را در مقایسه مشخصه‌های آماری داده‌های تولید شده و مشاهده شده کاهش می‌دهد و ثانیاً به خاطر خصلت تصادفی بودن ساختار مدل‌های تولید داده، امکان دستیابی به مشخصه‌های واقعی سری مصنوعی کمتر می‌شود. در هر حال، نتایج بدست آمده در مرحله صحت‌سنجی (به استثنای متغیر تابش خورشید) تقریباً موید یافته‌های مرحله واسنجی است.

۳-۲- شبیه‌سازی داده‌ها

۳-۲-۱- طول دوره‌های خشک و تر

شبیه‌سازی مناسب طول دوره‌های خشک و تر می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی دقیق ریسک تداوم دوره‌های خشک و تر، به ویژه در فصول ذخیره و بهره‌برداری از منابع آب ایفا می‌کند. مدل ClimGen برای شبیه‌سازی دوره‌های خشک و تر از مدل زنجیر مارکوف مرتبه نخست و مدل LARS-WG از توزیع‌های نیمه‌تجربی استفاده می‌کند. مقایسه نتایج منعکس‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که توانایی مدل زنجیر مارکوف در تصویر دوره‌های خشک و تر در تمام ایستگاهها بسیار کمتر از توزیع‌های نیمه تجربی است. با این وجود، مدل زنجیر مارکوف در اقلیم‌های فراخشک (بندر عباس، اصفهان و یزد) برازش مناسبتری نسبت به اقلیم نیمه خشک داشته است. به طورکلی، در فرایند شبیه‌سازی دوره‌های خشک و تر در محدوده مورد مطالعه، ۶۰ درصد آزمونها (برای مدل ClimGen) و کمتر از ۶ درصد آزمونها (برای مدل LARS-WG) در سطح اعتماد ۵ درصد پذیرفته نشد.

با توجه به اینکه مدل زنجیر مارکوف برای شبیه‌سازی دوره‌های خشک و تر از متوسط احتمالات انتقال در یک ماه معین استفاده می‌کند، بنابراین توزیع طول دوره‌های خشک و تر را از نوع هندسی فرض می‌کند، که این توزیع (از نقطه نظر آزمون χ^2) در تخمین شکل واقعی توزیع طول دوره‌های خشک و تر واجد دقت کافی نمی‌باشد (شکل ۱). با توجه به شکل ۱ ملاحظه می‌شود که طول دوره‌های خشک و تر شبیه‌سازی شده توسط مدل ClimGen در برخی از مواقع، کمتر و در برخی دیگر، بیشتر از مقادیر مشاهده شده می‌باشد.



شکل ۱- توزیعهای فراوانی نسبی طول دوره‌های خشک و تر حاصل از داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط دو مولد ClimGenو LARS-WG در برخی از اقلیم‌های مورد بررسی.

به عنوان نمونه، در ایستگاه اصفهان، طول دوره‌های خشک در فصل زمستان، بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌شود و یا طول دوره‌های تر بیش از ۲ روز در فصل پاییز، کمتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌شود. چنین نتایج در مورد ایستگاه رشت با اقلیم مرطوب نیز کمابیش وجود دارد، به طوریکه طول دوره خشک کمتر از ۲ روز در تابستان، کمتر از مقدار مشاهده شده و طول دوره تر کمتر از ۲ روز در زمستان، بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌شود. این در حالی است که نتایج LARS-WG تطابق مناسبتری با داده‌های مشاهده شده دارد.

۳-۲-۲- بارندگی

امروزه در هیدرولوژی برای ساخت داده‌های مصنوعی بارندگی بویژه در مقیاس سالانه به وفور از روش‌های استوکاستیک نظیر مدل اتورگرسیو استفاده می‌شود. استفاده از این روشها در مقیاس روزانه عملی نیست زیرا در بعد روزانه لازم است ابتدا، وضعیت بارندگی از نظر وقوع یا عدم وقوع در یک روز معین مشخص شود. سپس در صورت وقوع بارندگی، مقدار آن از روی توزیع احتمال معین تولید شود. مدلهای وضع هوا می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های اتورگرسیو باشند، زیرا اولاً، توزیع وضعیت بارندگی در طول سال را در نظر می‌گیرند و ثانیاً با تولید بارندگی در مقیاس روزانه می‌توان هر مقیاس زمانی دیگر و هر نوع بارش (مثلاً حداکثر بارندگی‌های فصلی یا سالانه) را از روی آن تحلیل نمود، که مدلهای اتورگرسیو از انجام آن عاجزند.

مدل ClimGen برای تولید مقادیر بارندگی از توزیع نظری ویبول و مدل LARS-WG از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند. برای مقایسه مقادیر بارندگی روزانه تولید شده توسط مولدها با بارندگی‌های مشاهده شده در ایستگاههای منتخب، سه مشخصه آماری آنها شامل الف) توزیع فراوانی بارندگی روزانه در هر یک از ماههای سال، ب) متوسط ماهانه بارندگی و پ) واریانس ماهانه بارندگی مورد بررسی قرار گرفت. درصد آزمونهای آماری رد شده در سطح ۵ درصد در جدول ۴ نشان داده شده است. از نظر مشخصه توزیع فراوانی مقادیر روزانه بارندگی، نتایج شبیه‌سازی داده‌ها با استفاده از مدل ClimGen در ۷۵ درصد موارد و با استفاده از مولد LARS-WG در کمتر از ۴ درصد موارد در سطح معنی‌داری ۵ درصد پذیرفته نشد. از نظر شبیه‌سازی میانگین و واریانس ماهانه نیز کارایی مدل LARS-WG بهتر از ClimGen بود زیرا درصد آزمونهای رد شده در استفاده از مدل ClimGen بزرگتر از مدل LARS-WG می‌باشد. همچنین، مطابق جدول ۳، مقایسه مقادیر RMSE و ضریب تعیین (CD) مدلها در مرحله شبیه‌سازی نیز یافته فوق را تایید می‌کند، زیرا حد بالای RMSE مدل LARS-WG از حد پایین RMSE مدل ClimGen کمتر است. با توجه به درصد آزمون‌های رد شده و خطای شبیه‌سازی می‌توان دریافت که LARS-WG در تولید بارندگی‌های روزانه در همه ایستگاهها برتری مشخصی بر ClimGen دارد. به عنوان نمونه، توزیع فراوانی نسبی بارندگی روزانه دو ایستگاه اصفهان و رشت در ماه ژانویه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که در هر دو اقلیم مرطوب (رشت) و خشک (اصفهان)، مدل ClimGen مقدار بارندگی روزانه را بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد کرده است. این در حالی است که نتایج مدل LARS-WG انطباق بسیار مناسبی بر داده‌های مشاهده شده داشته است. به نظر می‌رسد که ضعف نتایج بدست آمده از مدل ClimGen به علت ضعف مدل زنجیر مارکوف مرتبه نخست در شبیه‌سازی دوره‌های تر باشد، زیرا طبق بررسیهای انجام شده بر روی توزیعهای احتمال قابل برازش بر داده‌های روزانه بارندگی مشخص گردید که توزیع ویبول تقریباً در تمام ایستگاهها برازش مناسبی بر داده‌ها دارد (شکل ۳). در مورد متوسط و واریانس مقادیر بارندگی، هر دو مدل، متوسط ماهانه بارندگی را به خوبی شبیه‌سازی نمودند اما کارایی ضعیفی در شبیه‌سازی واریانس ماهانه داشتند. علت این امر آن است که همبستگی بین مقادیر متوالی بارندگی روزانه در ساختار هر دو مدل تولید داده در نظر گرفته نمی‌شود و هر دو مدل در تولید مقادیر متوالی بارندگی روزانه، بسیار تصادفی عمل می‌کنند (Semenov et al., 1998).

۳-۲-۳- دمای حداکثر و حداقل

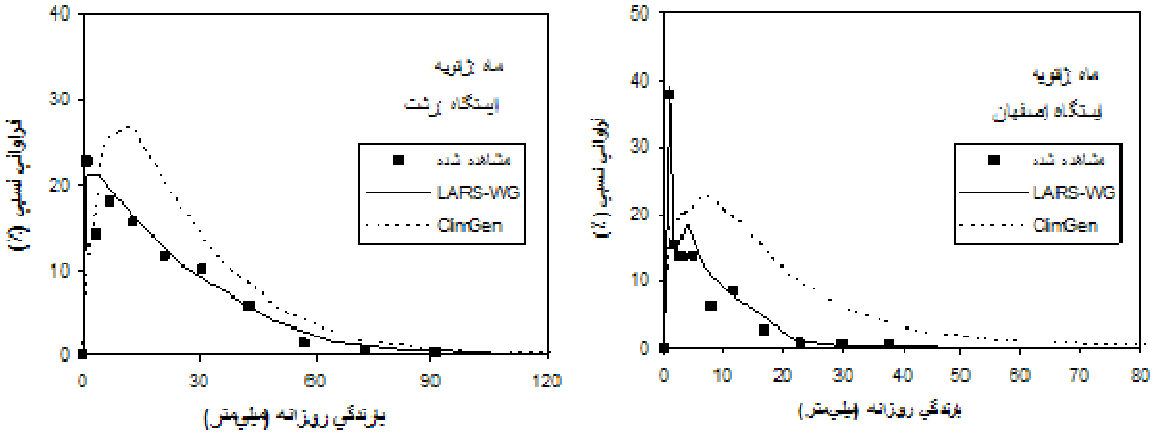
داده‌های مصنوعی تولید شده توسط مولدهای وضع هوا ممکن است در مدلهای بیلان آب خاک یا مدلهای ذوب برف مورد استفاده قرار گیرد. در این مدلها متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و همچنین شدت تابش خورشید نقش عمده‌ای در پیش‌بینی مولفه تبخیر- تعرق معادله بیلان یا رواناب ذوب برف دارند.

هر دو مدل ClimGen و LARS-WG برای تولید دمای حداقل و حداکثر از تکنیک مشابهی استفاده می‌کنند. تنها اختلاف این دو مولد در روش میانیابی روزانه مقادیر ماهانه است. مولد LARS-WG از مدل سری فوریه مرتبه سه، اما ClimGen از توابع اسپلاین[۸] برای میانیابی روزانه مقادیر ماهانه استفاده می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی میانگین‌ها و واریانس‌های روزانه و ماهانه دماهای حداقل و حداکثر، توسط دو مولد مذکور، در جدول۴ ارایه شده است. با توجه به جدول مذکور ملاحظه می‌شود که مدل ClimGen از نظر شبیه‌سازی میانگین‌های روزانه و ماهانه دماهای حداقل و حداکثر در همه ایستگاهها به استثنای مشهد، موفقیت بیشتری نسبت به

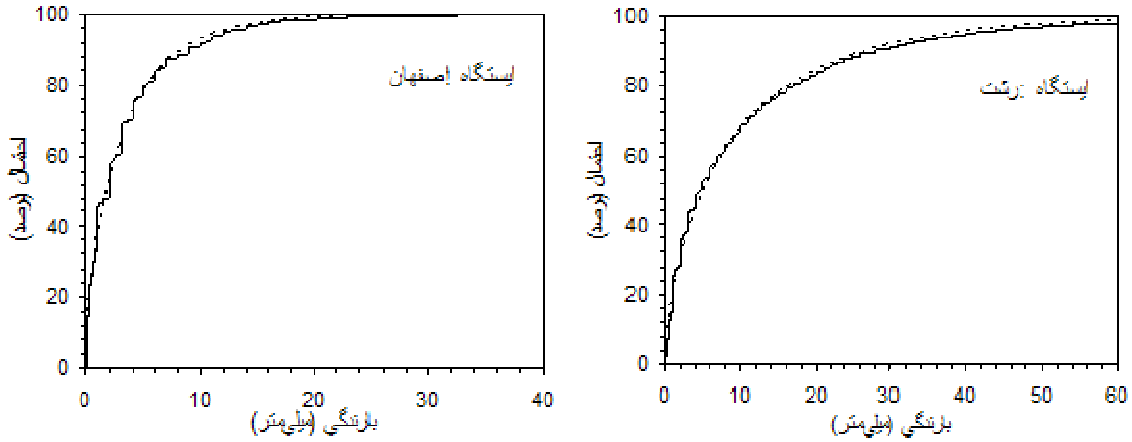
LARS-WG داشته است. این وضعیت به طور نمونه برای دو ایستگاه مشهد و اصفهان در شکل ۴ نشان داده شده است. چون تکنیک شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر در هر دو مولد یکسان است، بنابراین دلیل این امر را می‌توان در برتری روش میانیابی مورد استفاده در ClimGen (اسپلاین) نسبت به روش مورد استفاده در LARS-WG (سری فوریه) دانست. در مورد واریانس‌های روزانه دماهای حداقل و حداکثر و واریانس ماهانه دمای حداکثر شبیه‌سازی شده با استفاده از هر دو مولد، نتایج خوبی عاید نگردید، اما شبیه‌سازی واریانس روزانه دمای حداکثر با استفاده از LARS-WG رضایت‌بخش‌تر از ClimGen بود.

۳-۲-۴- طول دوره‌های یخبندان و گرما

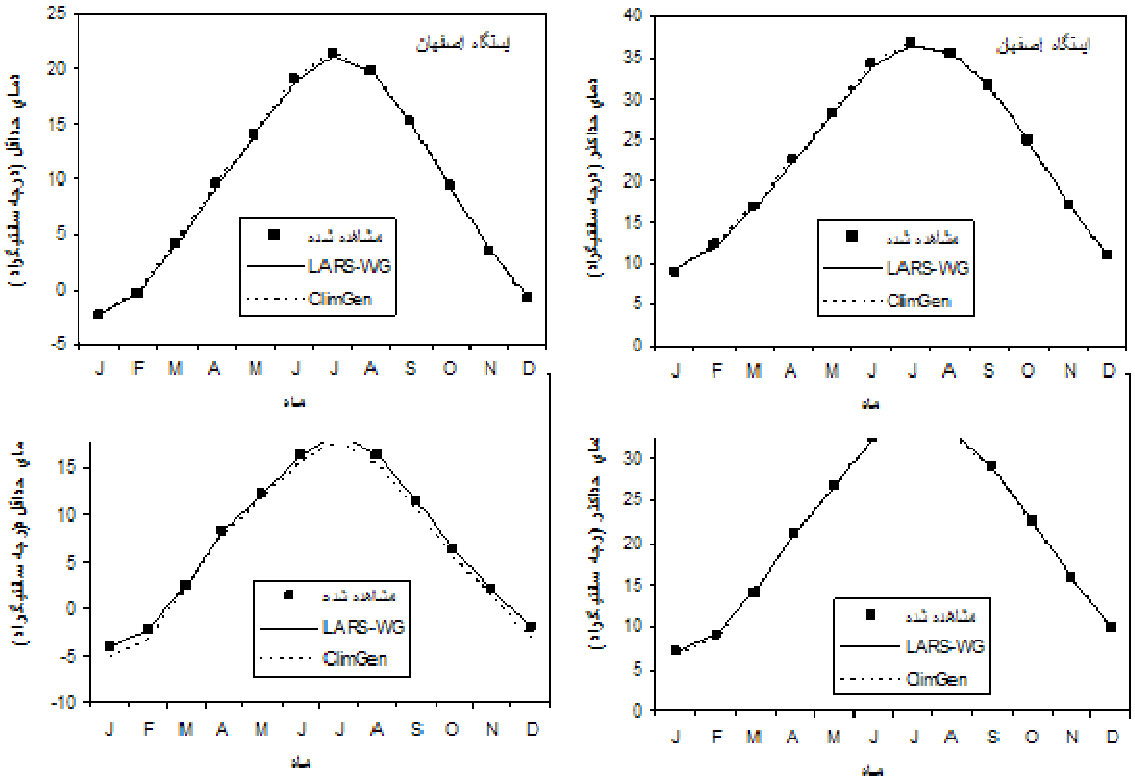
خروجی مولدهای وضع هوا ممکن است به منظور پیش‌بینی عملکرد محصول، در مدل‌های شبیه سازی رشد نمو محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مواردی از نوع فوق، پارامترهایی نظیر توالی‌های دوره‌های یخبندان (دوره‌هایی که دمای حداقل در طی آنها کمتر از صفر درجه سانتیگراد باشد) و گرمای شدید (دوره‌هایی که دمای حداکثر در طی آنها بیش از ۳۰ درجه سانتیگراد باشد) بسیار مهم است. به هر حال، در دوره‌های گرمای شدید، نیاز آبی محصول به میزان زیادی افزایش یافته و در صورتیکه این دوره‌ها با خشکسالی نیز عجین شوند، تخصیص آب به بخش کشاورزی به میزان زیادی کاهش خواهد یافت.



شکل ۲ - مقایسه توزیع فراوانی نسبی بارندگی روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط دو مولد ClimGen و LARS-WG در برخی از ایستگاههای منتخب.



شکل ۳ - برازش توزیع تجمعی ویبول (خط منقطع) بر توزیع تجربی (خط پیوسته و مضرس) بارندگی روزانه در ایستگاههای نمونه.

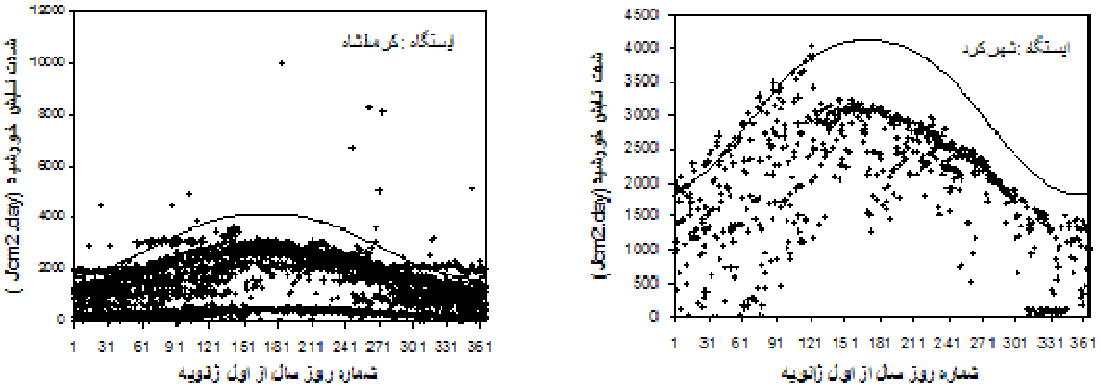


شکل ۴ - مقایسه میانگین ماهانه دماهای حداقل و حداکثر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط دو مولد ClimGen و LARS-WG در برخی از ایستگاههای مورد بررسی.

در این مطالعه، توزیع فراوانی فصلی دوره‌های یخبندان و گرما در سری‌های شبیه‌سازی شده توسط مولدها و سری‌های مشاهده شده، با استفاده از آزمون χ^2 مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج در جدول ۴ ارایه شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده برای دو مولد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ClimGen در مراحل واسنجی و صحت سنجی و مدل LARS-WG در مرحله شبیه‌سازی کارایی مناسبی دارد.

۳-۲-۵- تابش خورشید

نتایج حاصل از ارزیابی خطا و آزمون‌های آماری برای مقایسه میانگین و واریانس مقادیر روزانه و ماهانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط دو مولد ClimGen و LARS-WG به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. با توجه جدول ۳ ملاحظه که شاخص RMSE در مورد هر دو مولد در محدوده اقلیمی، کمتر از ۰/۹ مگاژول بر متر مربع بر روز است و ضریب تعیین هر دو مولد نزدیک یک است. با این حال، مقایسه درصد آزمونهای آماری رد شده در محدوده اقلیمی توسط هر دو مدل (جدول ۴) نشان می‌دهد که هر دو مولد موفقیت چندانی در شبیه‌سازی مشخصه‌های میانگین و واریانس روزانه نداشته‌اند. در مقیاس ماهانه نیز ClimGen از نظر شبیه‌سازی میانگین و LARS-WG از نظر شبیه‌سازی واریانس موفق‌تر عمل نموده‌اند. در این مطالعه، به طور متوسط، ۷۲ درصد آزمونها در فرآیند شبیه‌سازی تابش خورشید با استفاده از ClimGen و ۵۷ درصد آزمونها در فرآیند شبیه‌سازی تابش خورشید با استفاده از LARS-WG در سطح معنی‌داری ۵ درصد رد شدند. این در حالی است که در مطالعات Semenov et al. (1998) به طور متوسط، ۴۴ درصد آزمون‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد رد شدند. به نظر می‌رسد که عدم دستیابی به نتایج مناسب شبیه‌سازی در مورد تابش خورشید، ممکن است بیشتر به دلیل کیفیت نامطلوب داده‌های ثبت شده در ایستگاهها باشد (شکل ۵). البته به این نکته نیز می‌توان اشاره نمود که طول دوره برداشت آمار تابش خورشید در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی کوتاه‌تر بوده است و ممکن است با هدف شبیه‌سازی درازمدت تابش خورشید، استفاده از ۹ سال آمار برای واسنجی مدلهای تولید داده کافی نباشد.



شکل ۵ - توزیع روزانه مقادیر تابش ثبت شده در ایستگاههای نمونه (خط توپر، تابش در ماورای آتمسفر را نشان می‌دهد).

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی دو مولد وضع هوا، ClimGen (مبتنی بر توزیعهای نظری احتمال) و LARS-WG (مبتنی بر توزیعهای نیمه تجربی)، از نظر شبیه‌سازی مقادیر روزانه چهار عامل هواشناسی شامل مجموع بارندگی روزانه، دمای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و مجموع تابش روزانه خورشید در اقلیم‌های مختلف ایران ارزیابی گردید. برای مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مولدها با داده‌های مشاهده شده، از شاخص‌های خطا و آزمون‌های آماری مختلف استفاده شد. ابتدا، واسنجی و صحت‌سنجی هر دو مدل مذکور به انجام رسید و سپس، کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی یک دوره طولانی ۳۰۰ ساله مورد مقایسه قرار گرفت. اگرچه تراز خطاها در مرحله صحت‌سنجی بالاتر از واسنجی بود (بدلیل کوتاه بودن طول دوره آماری در مرحله صحت‌سنجی) اما نتایج کلی در هر دو مرحله مذکور مشابه بود به طوریکه LARS-WG کارایی مناسبی در تولید داده‌های بارندگی و ClimGen کارایی بیشتری در تولید داده‌های دما دارد. در مورد داده‌های تابش خورشید نیز نتایج LARS-WG بهتر از ClimGen بود. بررسیها در مرحله شبیه‌سازی درازمدت داده‌ها (۳۰۰ سال) نشان داد که در مورد داده‌های بارندگی، مولد LARS-WG و برای شبیه‌سازی دمای هوا، ClimGen نتایج رضایت‌بخش‌تری را عاید می‌سازد. متقابلاً، نتایج هر دو مولد در شبیه‌سازی تابش روزانه خورشید چندان رضایت بخش نبود. از نتایج مهم دیگر مطالعه این بود که هر دو مولد در شبیه‌سازی واریانس متغیرهای هواشناسی در مقایسه با دیگر مشخصه‌ها، کارایی ضعیفی داشتند که در تحقیقات Semenov et al. (1998) و Soltani & Hoogenboom (2003) نیز بدان اشاره شده است. همچنین مشخص شد که شبیه‌سازی واریانس متغیرها در مقیاس ماهانه مناسب‌تر از مقیاس روزانه است اما رضایت‌بخش نمی‌باشد. با توجه به اینکه از یک طرف، هر دو مدل از روش اتورگرسیو مرتبه نخست برای تولید دمای حداقل و حداکثر استفاده می‌کنند و تنها تفاوت آنها در میانیابی روزانه مقادیر ماهانه است (مدل LARS-WG از سری فوریه مرتبه سه و مدل ClimGen از تکنیک اسپلاین استفاده می‌کند) و از طرف دیگر، با توجه به بهتر بودن نتایج مدل ClimGen نسبت به LARS-WG در شبیه‌سازی دما، پیشنهاد می‌شود به منظور بهبود مولد LARS-WG از نظر شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر، از تکنیک اسپلاین به جای سری فوریه محدود برای میانیابی روزانه مقادیر ماهانه استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Decision Support Systems
2- Weather Generators
3- General Circulation Models
4- Climatic Data Generator
5- Long Ashton Research Station-Weather Generator
6- Congruential Method
7- Weibull Distribution
8- Spline

۵- مراجع

بابائیان، ا. و نجفی نیک، ز. (۱۳۸۵)، "بررسی تغییر اقلیم شمال شرق ایران در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی". *همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا*، ۲۹ آذر ۱۳۸۵، تهران، صص ۱۱۷-۱۲۵.

Bristow, K.L. and Campbell, G.S. (1984), "On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature", *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, pp.159-166.

McCaskill, M. R. (1990), *TAMSIM-A program for preparing meteorological records for weather driven models,* Trop. Agron. Tech. Memo. No. 65, CSIRO, Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane.

McCuen, R. H. (2002), *Modeling hydrologic change: statistical methods*, Lewis Publishers, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 433p.

Meinke, H., Carberry, P.S., McCaskill, M. R., Hills, M. A. and McLeod, I. (1995), "Evaluation of radiation and temperature data generators in the Australian tropics and sub-tropics using crop simulation models", *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, pp. 295-316.

Parlang, M.B. and Katz, R.W. (2000), "An extended version of the Richardson Model for simulating daily weather variables", *Journal of Applied Meteorology*, 29, pp. 610-622.

Pickering, N.B., Hansen, J.W., Jones, J.W., Wells, C.M., Chan, V.K. and Godwin, D.C. (1994), "WeatherMan: A utility for managing and creating daily weather data", *Agronomy Journal*, 86, pp. 332-337.

Racsko, P., Szeidl, L. and Semenov M. (1991), "A serial approach to local stochastic weather models", *Ecological Modelling*, 57, pp. 27-41.

Richardson, C.W. (1981), "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation", *Water Resources Research*, 17, pp. 182-190.

Richardson, C.W. and Wright, D.A. (1984), *WGEN: a model for generating daily weather variables*, Report, United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-8. 83p.

Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (1998), "Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates", *Climate Research*, 10, pp. 95-107.

Skiles, J.W. and Richardson, C.W. (1998), "A stochastic weather generation model for Alaska", *Ecological Modelling*, 110, pp. 211-232.

Soltani, A. and Hoogenboom, G. (2003), "A statistical comparison of the stochastic weather generators WGEN and SIMMETEO", *Climate Research*, 24, pp. 215-230.

Soltani, A., Latifi, N. and Nasiri, M. (2000), "Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations", *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, pp. 1-12.

Castellvi, F. and Stöckle, C.O. (2001), "Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation", *Transactions of the ASAE*, 44(6), pp. 1683-1687.

Castellvi, F., Stöckle, C.O., Mormeneo, I., and Villar J.M. (2002), " Testing the performance of different processes to generate temperature and solar radiation: A case study at Lleida (Northeast Spain)", *Transactions of the ASAE*, 45(3), pp. 571-580.

Danuso, F. (2002), "Climak: a stochastic model for weather data generation", *Italian Journal of Agronomy*, 6(1), pp. 57-71.

Fox, D.G. (1981), "Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance", *Bulletin of American Meteorological Society*, 62, pp. 599-609.

Geng, S., Auburn, J.S., Brandstetter, E., and Li, B. (1988), *A program to simulate meteorological variables: documentation for SIMMETEO*, Agronomy Progress Rep 204, Department of Agronomy and Range Science, University of California, Davis, CA.

Hajjam, S., Yusefi, N. and Irannejad, P. (2006), "A blended model for estimating of missing precipitation data (Tehran-Mehrabad station)", *BIABAN (Desert Journal)*, 11(2), pp. 49-55.

Hayhoe, H. N. (2000), "Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates", *Climate Research*, 14, pp. 75-87.

Johnson, G. L., Hanson, C. L., Hardegree, S. P. and Ballard, E. B. (1996), "Stochastic weather simulation: overview and analysis of two commonly used models", *Journal of Applied Meteorology*, 35, pp. 1878-1896.

Jones, P. G. and Thornton, P.K. (2000), "MarkSim: Software to generate daily weather data for Latin America and Africa", *Agronomy Journal*, 92, pp. 445-453.

Kuchar, L. (2004), "Using WGENK to generate synthetic daily weather data for modeling of agricultural processes", *Mathematics and Computers in Simulation*, 65, pp. 69-75.

Loague, K. and Green, R.E. (1991), "Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application", *Journal of Contamination Hydrology*, 7, pp. 51-73.

Mavromatis, T. and Hansen, J.W. (2001), "Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators", *Agricultural and Forest Meteorology*, 109, pp. 283-296.

Wilks, D.S. (1999), "Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models", *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, pp. 153-169.

Stöckle, C.O., Campbell, G.S. and Nelson, R. (1999), *ClimGen manual,* Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, 28p.

Taulis, M.E. and Milke, M.W. (2005), "Estimation of WGEN weather generation parameters in arid climates", *Ecological Modelling*, 184, pp. 177-191.