

## توسعه مدل مولد اقلیم برای حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور

بهنام آبابایی<sup>۱\*</sup>، فرهاد میرزایی<sup>۲</sup> و تیمور سهرابی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۵/۱۳

<sup>۱</sup> فارغ‌التحصیل دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> به ترتیب، دانشیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Behnam.ab@Gmail.com

### چکیده

با توجه به اهمیت حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور در بسیاری از مطالعات حوزه منابع آب و کشاورزی در مقیاس زمانی روزانه، در این مطالعه، یک مدل مولد اقلیم با هدف شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مجاور با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها توسعه یافت. این مدل، برای بازتولید سری وقوع بارش، از یک مدل مارکوف توسعه یافته استفاده می‌کند که می‌تواند با دقت قابل قبول، همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور را بازسازی نماید. برای شبیه‌سازی مقدار بارش در روزهای مرطوب و همچنین شبیه‌سازی سایر متغیرهای هواشناسی، یک الگوریتم ناپارامتری پیشنهاد داده شد. عملکرد این الگوریتم در بازتولید میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای هواشناسی، همبستگی و خودهمبستگی مرتبه یک روزانه و همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، مقادیر استاندارد شده ریشه میانگین مربع خطاها (SAME) و میانگین خطای مطلق (SMAE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این مدل، قادر است با دقت قابل قبول، ویژگی‌های آماری متغیرهای هواشناسی تاریخی ایستگاه‌های مورد مطالعه را شبیه‌سازی نماید. با این حال، برآورد مدل از مقادیر خودهمبستگی مرتبه یک متغیرها در اکثر موارد، نسبت به مقادیر مشاهداتی، کمتر است. ضمناً، با تغییر پارامترهای این مدل، امکان شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم همزمان با حفظ همبستگی بین ایستگاه‌های مجاور فراهم خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ناپارامتری، مدل مولد اقلیم، همبستگی مکانی، مدل مارکوف توسعه یافته

## Developing a Weather Generator Model to Preserve Spatial Correlations between Neighboring Stations

B Ababaei<sup>1\*</sup>, F Mirzaei<sup>2</sup> and T Sohrabi<sup>3</sup>

Received: 16 March 2013 Accepted: 4 August 2014

<sup>1</sup>- Ph.D. Graduate, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Iran

<sup>2,3</sup>-, Assoc. Prof. and Prof., Respectively, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: Behnam.ab@Gmail.com

### Abstract

Considering the importance of preserving spatial correlation between neighboring stations in many of the studies in the fields of agriculture and water resources on a daily time basis, in this research, a weather generator model (WG) was developed to simulate climatic variables in neighboring stations while preserving spatial correlations between these stations. This model uses an extended Markov model to generate precipitation occurrence series which is capable of simulating spatial correlations between neighboring stations with an acceptable performance. In order to simulate precipitation amounts on wet days and other climatic variables, a nonparametric algorithm was proposed. The performance of this algorithm was assessed in relation with the generation of daily mean and standard deviation, daily correlation and lag-1 autocorrelation of climatic variables and also spatial correlation between neighboring stations using Coefficient of Determination ( $R^2$ ), Standardized Root Mean Square Error (SRMSE) and Standardized Mean Absolute Error (SMAE) statistics. The results showed that this model was capable of reproducing statistical properties of historical time series with an acceptable accuracy, while the model underestimated the values of lag-1 autocorrelation coefficients. Moreover, climate change scenarios can be simulated by modifying model parameters while preserving spatial correlations between neighboring stations.

**Keywords:** Extended Markov model, Nonparametric algorithm, Weather generator, Spatial correlation

## مقدمه

مدل‌های مولد اقلیم<sup>۱</sup> معمولاً در طرح‌های مهندسی آب، کشاورزی، اکوسیستم و شبیه‌سازی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا اطلاعات هواشناسی مشاهداتی اغلب از جهت مدت، کامل بودن یا پوشش مکانی دارای نقصان می‌باشند (ویلیکس و ویلیبی ۱۹۹۹). این مدل‌های آماری، می‌توانند اطلاعات مفقود شده را جایگزین کرده و با حفظ مشخصات مهم سری‌های مشاهداتی (مانند متوسط روزانه، واریانس و کوواریانس روزانه، فراوانی‌ها و رویدادهای حدی و ...)، سری‌های زمانی طولانی مدت تولید کنند. شبیه‌سازهای اطلاعات اقلیمی روزانه، معمول‌ترین نوع از کاربرد این نوع مدل‌ها بوده‌اند، زیرا هم اطلاعات روزانه در حد وسیعی در اختیار قرار دارد، و هم مدل‌هایی که از این اطلاعات استفاده کنند فراوان هستند. تا به امروز، اکثر مولدهای اقلیمی، به عنوان عامل اصلی بر بسیاری از فرآیندهای زیست محیطی و نیز، به دلیل پیچیدگی مدل‌های چند متغیره از نظر سازگاری درونی متغیرها، توجه خود را عمدتاً بر فرآیند بارندگی متمرکز کرده‌اند (هاچینسون ۱۹۹۵). با این حال، الگوریتم‌های تکمیلی که دیگر متغیرهای هواشناسی را نیز شبیه‌سازی می‌نمایند بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این مدل‌ها به دو شکل می‌توان نگریست. در حالت اول، این مدل‌ها، برای تغییرات روز به روز<sup>۲</sup> (یا در برخی موارد، در دوره‌های طولانی‌تر) در هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این جنبه، پارامترهای مدل‌های آماری اقلیمی، خلاصه‌ای از جنبه‌های خاصی از اقلیم منطقه می‌باشند. در حالت دوم، زمانیکه این مدل‌ها برای شبیه‌سازی‌های مونته‌کارلو<sup>۳</sup> استفاده می‌شوند (یعنی برای تولید سری‌های هواشناسی)، می‌توان آنها را مدل‌های پیچیده‌ای برای تولید اعداد تصادفی دانست که خروجی‌های آنها، از نظر آماری، مشابه سری‌های مشاهداتی در هر ناحیه می‌باشند. توجه به این مسئله مهم است که مولدهای اقلیم، الگوریتم‌های پیش‌بینی

هواشناسی نیستند. بنابراین، با مدل‌های قطعی هواشناسی<sup>۴</sup>، که با حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان سیالات عمل می‌کنند دارای تفاوت‌های بنیادی می‌باشند. به بیان دیگر، درحالی‌که خروجی مولدهای اقلیم از نظر آماری مشابه سری‌های مشاهداتی هستند، انتظار نمی‌رود که این سری‌ها، در زمان مشخصی در گذشته یا آینده، در سری‌های مشاهداتی، عیناً دیده شوند.

شبیه‌سازی وقوع بارش در مطالعات مختلف به روش‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله روش‌های مورد استفاده مدل‌های زنجیره مارکوف می‌باشند (گابریل و نیومن ۱۹۶۲، آبابایی ۱۳۹۱) که عموماً برای شبیه‌سازی در یک ایستگاه بکار می‌روند (آبابایی و همکاران ۲۰۱۰). سایر مدل‌های شبیه‌سازی وقوع بارش در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (کاواس و دلور ۱۹۷۶، اسمیت و کار ۱۹۸۵). با این حال، در بسیاری از مطالعات، نیاز است تا علاوه بر وقوع و مقدار بارش، متغیرهای اقلیمی دیگری نیز توسط مدل آماری تولید شوند. در این میان و در کنار حفظ همبستگی زمانی در یک سری از متغیرهای هواشناسی (در یک ایستگاه)، حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌های مختلفی نیز به منظور بازسازی سری‌های مصنوعی بطور همزمان در چند ایستگاه (معمولاً در مقیاس روزانه) و برای بازسازی سری متغیرهای مختلف هواشناسی (به ویژه بارش) توسعه یافته‌اند (به عنوان مثال، براس و رودریگوئز ۱۹۷۶، هی و همکاران ۱۹۹۱، باردوسی و پلیت ۱۹۹۲، ویلسون و همکاران ۱۹۹۲، بوگاردی و همکاران ۱۹۹۳، ویلیکس ۱۹۹۸، مهروتا و همکاران ۲۰۰۶).

با توجه به اهمیت حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور در مطالعات منابع آب و کشاورزی در مقیاس روزانه، در این مطالعه، یک الگوریتم ناپارامتری به منظور شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مجاور با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها معرفی شده و در محدوده شبکه آبیاری و

<sup>1</sup> Weather Generator

<sup>2</sup> Day to Day

<sup>3</sup> Monte-Carlo

<sup>4</sup> Deterministic Weather Models

شبییه‌سازی در ایستگاه سد طالقان، محدود به بارندگی و متوسط دما می‌باشد.

زهکشی قزوین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ایستگاه‌های مطالعاتی (جدول ۱) شامل ایستگاه‌های قزوین، تاکستان، مگسال، نیروگاه شهیدرجایی و سد طالقان می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	مختصات (دقیقه-درجه)	ارتفاع (m)	درصد اطلاعات گمشده	
				دوره آماری	بارندگی سایر متغیرها*
قزوین	سینوپتیک	۵۰-۰۳ E و ۳۶-۱۵ N	۱۲۷۹	۱۹۵۹-۲۰۰۸	۰/۳
تاکستان	هواشناسی	۴۹-۳۹ E و ۳۶-۰۳ N	۱۳۲۵	۱۹۶۱-۲۰۰۳	۸۲
تاکستان	سینوپتیک	۴۹-۴۲ E و ۳۶-۰۳ N	۱۲۸۳	۲۰۰۴-۲۰۰۸	۰
نیروگاه شهیدرجایی	هواشناسی	۵۰-۱۵ E و ۳۶-۱۱ N	۱۲۸۵	۱۹۸۴-۲۰۰۷	۳۶
مگسال	هواشناسی	۵۰-۰۷ E و ۳۶-۰۸ N	۱۲۶۵	۱۹۷۶-۱۹۹۹	۸۵
سد طالقان	هواشناسی	۵۰-۳۹ E و ۳۶-۱۱ N	۱۲۱۵	۲۰۰۶-۲۰۱۱	۰

\* درصدی از کل روزهای دوره آماری که مقدار حداقل یکی از متغیرها در آن روزها موجود نیست.

## مواد و روش‌ها

### روش مطالعه

در این مطالعه، یک مدل مولد اقلیم برای شبیه‌سازی سری متغیرهای هواشناسی توسعه می‌یابد. این مدل، برای شبیه‌سازی سری وقوع بارش با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور، از مدل توسعه یافته زنجیره مارکوف استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی سایر متغیرهای هواشناسی، یک الگوریتم ناپارامتری پیشنهاد شده است که علاوه بر حفظ ویژگی‌های آماری در هر ایستگاه هواشناسی، همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها را نیز به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید. در نهایت، عملکرد مدل در ایستگاه‌های مطالعاتی از نقطه نظر شبیه‌سازی ویژگی‌های آماری سری متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های منفرد و نیز از نظر حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### زنجیره مارکوف با حفظ همبستگی مکانی بین دو ایستگاه

فرآیند برازش یک مدل زنجیره مارکوف بر سری مشاهداتی وقوع بارش کاملاً شناخته شده است (گرین ۱۹۶۴، کتز ۱۹۷۷، استرن و کو ۱۹۸۴). مدل‌های زنجیره مارکوف بر این فرض استوارند که بین وضعیت‌های (خشک یا مرطوب) مجاور در سری بارش، همبستگی زمانی کوتاه مدت وجود دارد. با این حال، فرض معمول در استفاده از مدل‌های مارکوف مرتبه یک مورد تردید

قرار گرفته است (چین ۱۹۷۷). در برخی مناطق، استفاده از مدل‌های مارکوف مرتبه بالاتر مورد نیاز است تا بتوان ساختار خودهمبستگی موجود در سری وقوع بارش را به خوبی شبیه‌سازی نمود (استرن و کو ۱۹۸۴، ویلکس ۱۹۸۹). با این حال، مدل‌های مارکوف مرتبه بالاتر نیازمند مشخص کردن تعداد بیشتری پارامتر بوده و گاهی منجر به ایجاد ساختاری پیچیده می‌شوند و تعیین مرتبه مناسب مدل مارکوف معمولاً با استفاده از معیار AIC صورت می‌پذیرد (سریکانتان و مک‌ماهون ۲۰۰۱). احتمال انتقال<sup>۱</sup> از وضعیت u به وضعیت v در مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$P_{uv} = P\{X_t = v | X_{t-1} = u\} \quad [1]$$

و برای یک مدل مرتبه دو (رابطه ۲):

$$P_{uvy} = P\{X_t = y | X_{t-1} = v, X_{t-2} = u\} \quad [2]$$

که در آنها، u، v و y دارای مقادیر صفر یا یک می‌باشند. در مدل زنجیره مارکوف توسعه یافته، یک ایستگاه به عنوان ایستگاه مرجع (Y) مورد استفاده قرار گرفته و سری مصنوعی برای ایستگاه‌های مجاور، براساس همبستگی موجود بین اطلاعات ایستگاه دوم

<sup>1</sup> Transition probability

(MX) و یا از اطلاعات تاریخی این ایستگاه استفاده می‌گردد. این ایستگاه، به عنوان ایستگاه مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(۲) اطلاعات هواشناسی تاریخی دو ایستگاه (ایستگاه مرجع و ایستگاه هدف) در یک دوره مشترک استخراج می‌شوند (ماتریس‌های M1 و M2). هریک از ستون‌های این دو ماتریس، اطلاعات روزانه یکی از متغیرهای هواشناسی را در خود جای می‌دهد. لذا، تعداد ردیف‌ها و ستون‌های این دو ماتریس با هم برابر است.

(۳) هریک از سری‌های تاریخی متغیرهای هواشناسی (حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، باد، تابش خورشیدی و بارندگی) با استفاده از مقادیر بلندمدت میانگین و انحراف استاندارد روزانه هر ماه استاندارد می‌شوند (ماتریس‌های S1 و S2). سری‌های متغیرهای شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه مرجع نیز به روش مشابه استاندارد می‌شود (ماتریس SX).

(۴) برای هریک از ماه‌های سال، ماتریس‌های  $L1_m$  و  $L2_m$  برای داده‌های تاریخی دو ایستگاه مرجع و هدف براساس رابطه (۴) تشکیل می‌گردند. در این رابطه،  $X1$  تا  $X6$  متغیرهای استاندارد شده حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی و بارندگی برای روزهای  $t$  و  $t-1$  می‌باشند. در واقع هر سطر این دو ماتریس، از متغیرهای استاندارد شده روز  $t$  و روز  $t-1$  در ماه  $m$  تشکیل شده‌اند.

[۴]

$$L1_m(t) = [X1_{t-1}, X2_{t-1}, \dots, X6_{t-1}, X1_t, X2_t, \dots, X6_t]$$

$$t \in m$$

(۵) برای کلیه روزهای سال، ماتریس  $LX$  براساس اطلاعات ماتریس  $SX$  به شرح رابطه (۴) تشکیل می‌گردد. این ماتریس، اطلاعات روزانه کلیه ماه‌های سال را در خود دارد (به جای تفکیک ماه‌ها مشابه آنچه در بند ۴ انجام شد).

(۶) برای هریک از روزهای موجود در ماتریس  $SX$  (روز  $t$  در ماه  $m$ )، فاصله اقلیدسی بردار مربوط به روز  $t$  در ماتریس  $LX$  از تمامی بردارهای موجود در ماتریس  $L1_m$  محاسبه می‌شود. پیش از محاسبه فواصل،

(X) با ایستگاه مرجع بازتولید می‌شود. مفاهیم مدل مورد بحث، مشابه مفاهیم مدل‌های زنجیره مارکوف مورد استفاده برای شبیه‌سازی وقوع بارش در یک ایستگاه می‌باشد. به عنوان نمونه با فرض مدل مارکوف مرتبه دو در یک ایستگاه و مدل مارکوف مرتبه یک بین دو ایستگاه خواهیم داشت:

[۳]

$$P_{abcde} = P\{X_t = e | X_{t-1} = d, X_{t-2} = c, Y_t = b, Y_{t-1} = a\}$$

در رابطه (۳)، احتمال وقوع وضعیت  $e$  در ایستگاه هدف (ایستگاه دوم) در روز  $t$ ، مشروط به وضعیت بارش در روز قبل و دو روز قبل در همان ایستگاه  $d$  و  $c$ ، وضعیت بارش در همان روز در ایستگاه مرجع  $b$  و وضعیت بارش در روز گذشته در ایستگاه مرجع  $a$  می‌باشد. در این مطالعه، چنین مدلی را با عنوان اختصاری مدل مارکوف مرتبه ۱-۲ می‌خوانیم که در آن، یک مدل مارکوف مرتبه یک برای حفظ همبستگی مکانی سری بارش در بین دو ایستگاه (مدل اول) و یک مدل مارکوف مرتبه دو برای حفظ همبستگی زمانی سری بارش در ایستگاه هدف (مدل دوم) مورد استفاده قرار گرفته است. در صورتیکه در این احتمال ترکیبی، تنها از وضعیت بارش در روز  $t$  در ایستگاه مرجع استفاده شود، مدل مارکوف مرتبه ۰-۱ ایجاد می‌شود ( $X$ ، مرتبه خودهمبستگی می‌باشد).

#### شبیه‌سازی هم‌زمان متغیرها در ایستگاه هدف

به منظور شبیه‌سازی سری متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مطالعاتی و با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور، یک ایستگاه (ایستگاه سینوپتیک قزوین) به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب گردید و سری متغیرهای هواشناسی ایستگاه‌های مجاور (ایستگاه‌های هدف)، با استفاده از الگوریتم زیر و با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه هدف و ایستگاه مرجع تشکیل گردید:

(۱) اطلاعات هواشناسی ایستگاه اول توسط یک مدل مولد اقلیم (آبایی ۱۳۹۱) شبیه‌سازی می‌شود (ماتریس

استاندارد بارندگی بدست آمده از الگوریتم فوق صفر باشد (زیرا لزوماً در یک روز خاص در دو ایستگاه مجاور بارندگی روی نمی‌دهد)، به جای آن، از یک توزیع نیمه تجربی، عددی انتخاب و جایگزین می‌گردد.

قرار گرفتن متغیرهای استاندارد روز  $t$  و  $t-1$  در کنار یکدیگر در ماتریس‌های  $L$  (بند ۴) متضمن شبیه‌سازی درست همبستگی و خودهمبستگی مرتبه یک بین متغیرهای مختلف می‌باشد. از آنجاییکه در ایستگاه مرجع با استفاده از یک مدل مولد اقلیم اقدام به شبیه‌سازی اطلاعات هواشناسی می‌گردد که خودهمبستگی مرتبه یک ماهانه متغیرها را شبیه‌سازی می‌نماید، لذا در ایستگاه هدف نیز این خودهمبستگی با دقت مناسب شبیه‌سازی می‌شود. استخراج ماتریس‌های  $L$  و تعیین بردار  $V2$  به صورت بردار متناظر بردار  $V1$  نیز باعث حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها می‌شود.

#### ارزیابی مدل‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد این مدل در ایستگاه‌های مطالعاتی، ابتدا سری وقوع بارش به طول ۳۰۰ سال با استفاده از مدل مارکوف توسعه یافته و با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه هدف و ایستگاه مرجع (ایستگاه قزوین) شبیه‌سازی گردید. سپس، ماتریس اطلاعات مصنوعی ایستگاه قزوین با استفاده از یک مدل مولد اقلیم برای ۳۰۰ سال تشکیل گردید. در مرحله بعد، با استفاده از مدل مولد اقلیم توسعه یافته در این مطالعه، سری متغیرهای هواشناسی در چهار ایستگاه دیگر تولید شد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی ویژگی‌های آماری سری مشاهداتی، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین  $(R^2)$  (رابطه ۶)، مقدار استاندارد شده ریشه میانگین مربع خطاها (SRMSE) (رابطه ۷) و مقدار استاندارد شده میانگین خطای مطلق (SMAE) (رابطه ۸) استفاده شد:

کلیه متغیرهای مورد استفاده در این محاسبه با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف استاندارد هر متغیر، استاندارد می‌شوند.

(۷) فواصل محاسبه شده در مرحله ۶، از کوچک به بزرگ مرتب شده و  $K$  بردار که حداقل فاصله از بردار مرجع را دارند انتخاب می‌شوند. از بین این  $K$  بردار، یک بردار ( $V1$ ) براساس احتمال  $P$  (رابطه ۵) به عنوان بردار نهایی انتخاب می‌شود:

$$P_k = \frac{1/k^2}{\sum_{k=1}^K 1/k^2} \quad k = 1, \dots, K \quad [5]$$

(۸) پس از تعیین بردار  $V1$  از ماتریس  $L1_m$ ، بردار متناظر آن در ماتریس  $L2_m$  به عنوان بردار نهایی ایستگاه هدف انتخاب می‌شود ( $V2$ ). متغیرهای استاندارد روز  $t$  در ایستگاه هدف، شامل المان‌های  $X1_t$  تا  $X6_t$  در بردار  $V2$  می‌باشند.

(۹) این فرآیند برای کلیه روزهای موجود در ماتریس  $SX$  انجام می‌گیرد.

(۱۰) در آخرین مرحله، متغیرهای استاندارد شده بدست آمده از این روش، در اختیار یک مدل مولد اقلیم (آبایی ۱۳۹۱) قرار گرفته و سری نهایی متغیرهای هواشناسی در ایستگاه هدف حاصل می‌گردد. این مدل، از روشی مشابه مدل مولد اقلیم LARS-WG برای انتخاب مقادیر استاندارد شده متغیرهای هواشناسی استفاده می‌کند (سمنوف و بارو ۲۰۰۲، آبایی و همکاران ۱۳۸۹). به این ترتیب که به جای استفاده از توزیع نرمال که در مدل‌های مشابه WGEN (ریچاردسون و رایت ۱۹۸۴) استفاده می‌شود، از یک توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند. این متغیرهای استاندارد، با استفاده از یک مدل خودهمبستگی مرتبه یک با چهار متغیر، به متغیرهای استاندارد با همبستگی مشخص تبدیل می‌شوند. سپس، با استفاده از مقادیر بلندمدت متوسط و انحراف استاندارد روزانه هر یک از ماه‌های سال، این مقادیر (بطور جداگانه برای روزهای مرطوب و خشک)، به متغیرهای غیراستاندارد تبدیل می‌شوند. در صورتیکه برای یک روز مرطوب در ایستگاه هدف مقدار متغیر

<sup>1</sup> Coefficient of Determination

<sup>2</sup> Standardized Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Standardized Mean Absolute Error

ماهانه، به دلیل خطای زیاد مدل در شبیه‌سازی سری وقوع بارش می‌باشد.

شکل ۳ عملکرد مدل در شبیه‌سازی میانگین‌های روزانه حداقل (Tmin) و حداکثر (Tmax) دما، شکل ۴ شبیه‌سازی متوسط روزانه رطوبت نسبی (RH)، شکل ۵ شبیه‌سازی متوسط روزانه سرعت باد (Wind) و شکل ۶ شبیه‌سازی متوسط روزانه تابش خورشیدی (Rad) را برای همه ماه‌های سال نمایش می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، عملکرد مدل در شبیه‌سازی متوسط‌های روزانه این متغیرهای هواشناسی در سطح بسیار بالایی قرار دارد. جدول ۳ شاخص‌های عملکرد مدل برای شبیه‌سازی متوسط‌های روزانه متغیرهای هواشناسی (غیر از بارش) را نشان می‌دهد. حداکثر خطا (SRMSE) مربوط به شبیه‌سازی متوسط روزانه سرعت باد و حداقل خطا مربوط به متغیر حداکثر دما می‌باشد. بهترین عملکرد مدل مربوط به ایستگاه تاکستان است.

جدول ۴ و شکل ۷ شاخص‌های عملکرد مدل برای شبیه‌سازی انحراف استاندارد روزانه متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های هدف را نشان می‌دهد. به دلیل خطای مدل مارکوف توسعه یافته در شبیه‌سازی سری وقوع بارش، بیشترین خطا در شبیه‌سازی انحراف استاندارد روزانه و ماهانه بارش دیده می‌شود (به ویژه، در ایستگاه سد طالقان). در ارتباط با سایر متغیرها، خطای مدل در اکثر موارد کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. خطای ۲۵٪ در شبیه‌سازی انحراف استاندارد روزانه متغیر رطوبت نسبی در ایستگاه مگسال نیز به دلیل وجود تعداد قابل توجه داده‌های مفقوده در اطلاعات تاریخی این ایستگاه می‌باشد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [6]$$

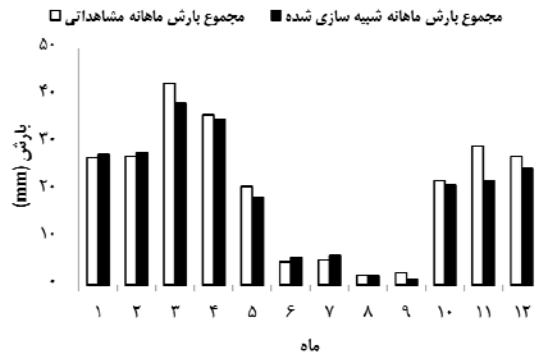
$$SRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{1}{\bar{O}} \quad [7]$$

$$SMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \times \frac{1}{\bar{O}} \quad [8]$$

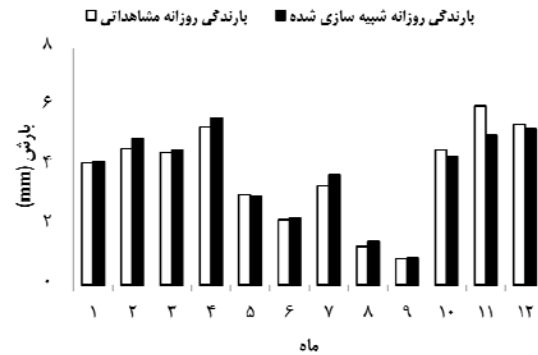
در این روابط،  $O$  و  $P$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی و مصنوعی،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهداتی و مصنوعی،  $n$  تعداد داده در هر یک از سری‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی ویژگی‌های آماری سری مشاهداتی شکل ۱ میانگین روزانه بارش در روزهای مرطوب (Pr) و شکل ۲ میانگین مجموع بارش ماهانه (Pr-Sum) در ایستگاه تاکستان برای دو سری مشاهداتی و مصنوعی را نشان می‌دهد. عملکرد مدل در شبیه‌سازی متوسط روزانه بارش بهتر از عملکرد آن در شبیه‌سازی مجموع بارش ماهانه بوده است. دلیل امر، خطای مدل در شبیه‌سازی سری وقوع بارش و برآورد احتمال وقوع روز مرطوب (Pw) می‌باشد. جدول ۲، مقادیر شاخص‌های عملکرد مدل برای ایستگاه‌های تاکستان (TK)، مگسال (MG)، نیروگاه شهیدرجایی (NR) و سد طالقان (TL) را نشان می‌دهد. بهترین عملکرد مربوط به ایستگاه تاکستان و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به ایستگاه سد طالقان می‌باشد. عمده خطای مشاهده شده در شبیه‌سازی مجموع بارش



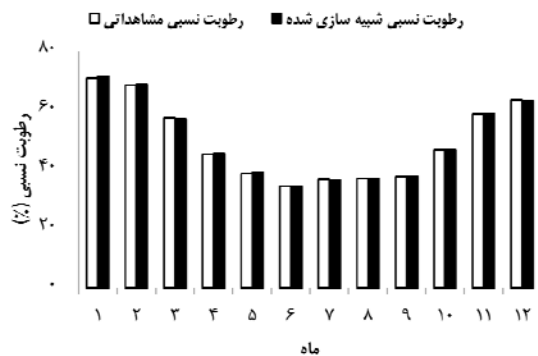
شکل ۲- میانگین مجموع بارش ماهانه (تاکستان).



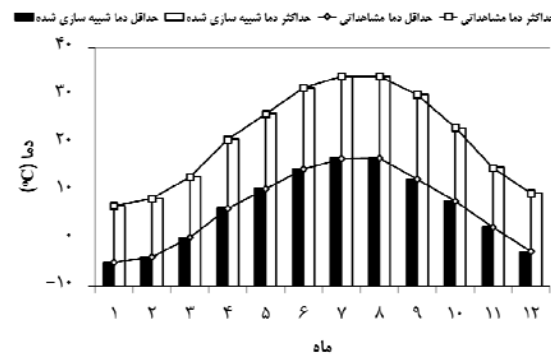
شکل ۱- میانگین روزانه بارش در روزهای مرطوب (تاکستان).

جدول ۲- شاخص‌های عملکرد مدل در ایستگاه‌های مختلف برای شبیه‌سازی متوسط روزانه و ماهانه بارش.

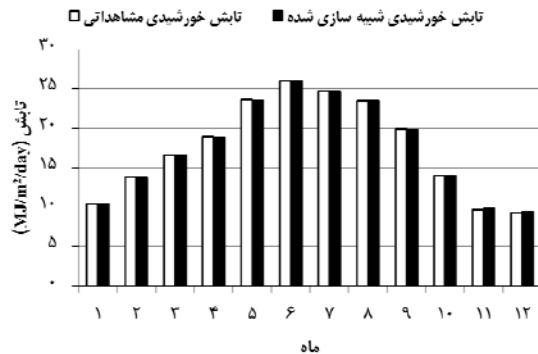
R <sup>2</sup>				SMAE				SRMSE				متغیر / ایستگاه
TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	
۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۹	Pr
۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۴۲	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۱۳	Pr-Sum



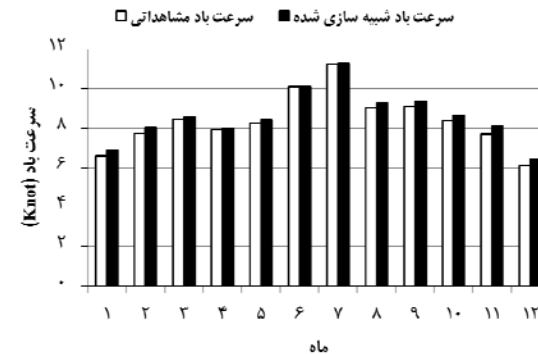
شکل ۴- میانگین روزانه رطوبت نسبی (تاکستان).



شکل ۳- میانگین روزانه حداقل و حداکثر دما (تاکستان).



شکل ۶- میانگین روزانه تابش خورشیدی (تاکستان).



شکل ۵- میانگین روزانه سرعت باد (تاکستان)

(۱ گره ≈ ۰/۵۱۴۴ متر در ثانیه).

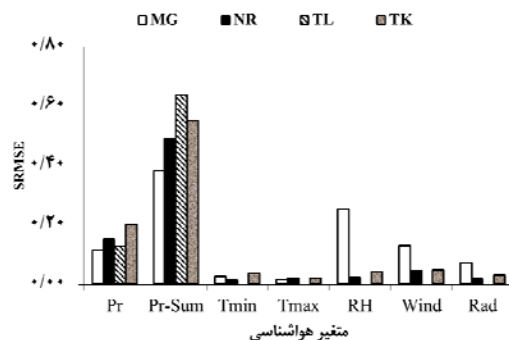


جدول ۳- شاخص‌های عملکرد مدل در ایستگاه‌های مختلف برای شبیه‌سازی متوسط روزانه متغیرهای هواشناسی.

R <sup>2</sup>				SMAE				SRMSE				متغیر / ایستگاه
TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	---	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	---	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	Tmin
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	---	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	---	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	Tmax
---	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	---	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	---	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶	RH
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	---	۰/۰۳۸	۰/۰۴۰	۰/۰۲۴	---	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳	۰/۰۲۹	Wind
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	---	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	---	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	Rad
۱/۰۰	---	---	---	۰/۰۱۶	---	---	---	۰/۰۱۹	---	---	---	Tav

جدول ۴- شاخص‌های عملکرد مدل در ایستگاه‌های مختلف برای شبیه‌سازی انحراف استاندارد متغیرهای هواشناسی.

R <sup>2</sup>				SMAE				SRMSE				متغیر / ایستگاه
TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	TL	NR	MG	TK	
۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۲۰	Pr
۰/۷۰	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۷۴	۰/۴۹	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵۵	Pr-Sum
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۸	---	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	---	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴	Tmin
---	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹	---	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	---	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	Tmax
---	۰/۹۹	۰/۷۱	۰/۹۹	---	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۴	---	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۰۴	RH
---	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۹۸	---	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۴	---	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۵	Wind
---	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	---	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	---	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳	Rad
۰/۹۸	---	---	---	۰/۰۶	---	---	---	۰/۰۷	---	---	---	Tav



شکل ۷- شاخص SRMSE در شبیه‌سازی انحراف استاندارد سری مشاهداتی.

شبیه‌سازی نماید. هرچند عملکرد آن نسبت به عملکرد مدل در ایستگاه مرجع ضعیف‌تر و برآورد آن نسبت به مقادیر مشاهداتی بطور متوسط، دست‌پایین است.

ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی همبستگی و خودهمبستگی مرتبه یک روزانه

شکل ۸ عملکرد مدل در شبیه‌سازی خودهمبستگی مرتبه یک بین همه متغیرها و در همه ماه‌ها در ایستگاه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. اولین شکل مربوط به عملکرد مدلی می‌باشد که بطور مستقل در ایستگاه قزوین مورد استفاده قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی توانسته است خودهمبستگی مرتبه یک در ایستگاه‌های هدف را با دقت قابل قبول

### ارزیابی عملکرد مدل در حفظ همبستگی مکانی

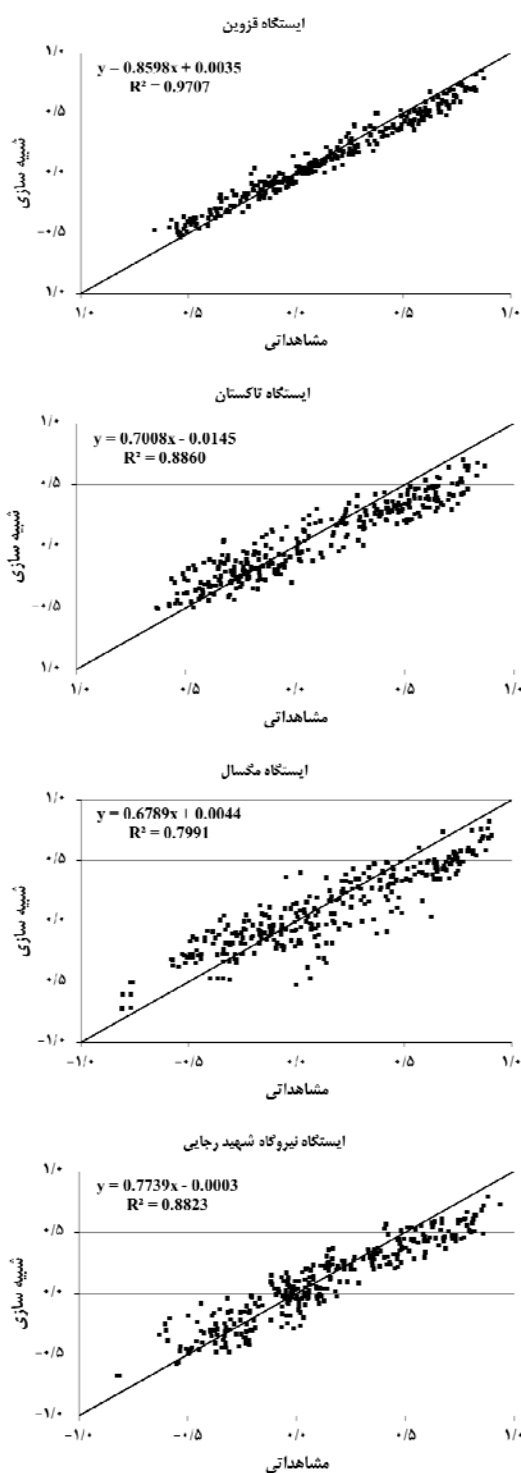
جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب، میانگین و ضریب تغییرات ضرائب همبستگی متغیرهای هواشناسی را در مقیاس ماهانه بین ایستگاه‌های مجاور نشان می‌دهند. مشاهده می‌گردد که مدل پیشنهادی توانسته است با دقت بسیار مناسب، مقادیر ماهانه ضرائب همبستگی بین ایستگاه‌های مجاور را شبیه‌سازی نماید. بهترین نتایج مربوط به شبیه‌سازی بین ایستگاه مرجع و ایستگاه‌های هدف می‌باشد و خطای مدل بین دو ایستگاه هدف، بیشتر است. بطور کلی، نتایج مدل حاکی از برآورد دست‌پایین مقادیر همبستگی مکانی (به میزان جزئی) نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌باشد. ضعیف‌ترین نتایج مدل نیز در شبیه‌سازی همبستگی مکانی بین ایستگاه سد طالقان و ایستگاه‌های مجاور مشاهده می‌گردد.

### جدول ۷ و

جدول ۸ به ترتیب میانگین و ضریب تغییرات ضرائب همبستگی متغیرهای هواشناسی را در مقیاس سالانه بین ایستگاه‌های مجاور نشان می‌دهند. همبستگی مکانی ایستگاه‌ها در مقیاس سالانه تا حدودی با دقت بیشتری نسبت به مقیاس ماهانه شبیه‌سازی شده است. خطای بیشتر مدل در ایستگاه طالقان به دلیل خطای بیشتر مدل زنجیره مارکوف توسعه‌یافته در شبیه‌سازی سری وقوع بارش و دوره آماری کوتاه این ایستگاه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، یک مدل مولد اقلیم با هدف شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مجاور با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها توسعه یافت. این مدل، برای شبیه‌سازی سری وقوع بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه، از یک مدل مارکوف توسعه یافته استفاده می‌کند که می‌تواند با دقتی مناسب، همبستگی مکانی (خطی) سری وقوع بارش در ایستگاه‌های مجاور را بازتولید نماید.



شکل ۸- ضریب خودهمبستگی مرتبه یک بین همه متغیرها در همه ماه‌ها.

جدول ۵- میانگین ضرائب همبستگی کلیه متغیرها بین ایستگاه‌های مجاور در همه ماه‌های سال.

ایستگاه	TK		MG		NR		TL	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی
GH	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۵۹
TK	---	---	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۶۹	۰/۵۵

جدول ۶- ضریب تغییرات ضرائب همبستگی کلیه متغیرها بین ایستگاه‌های مجاور در همه ماه‌های سال.

ایستگاه	TK		MG		NR		TL	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی
GH	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۴۲
TK	---	---	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۴۶

جدول ۷- میانگین ضرائب همبستگی کلیه متغیرها بین ایستگاه‌های مجاور در طول سال.

ایستگاه	TK		MG		NR		TL	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی
GH	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۷۵	۰/۶۳
TK	---	---	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۷۹	۰/۵۸

جدول ۸- ضریب تغییرات ضرائب همبستگی کلیه متغیرها بین ایستگاه‌های مجاور در طول سال.

ایستگاه	TK		MG		NR		TL	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی
GH	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۳۹
TK	---	---	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۲۳	۰/۴۵

متغیرهای هواشناسی با کمترین خطا توسط مدل شبیه‌سازی شدند. با این حال، برآورد مدل از مقادیر خودهمبستگی مرتبه یک متغیرها در اکثر موارد، نسبت به مقادیر مشاهداتی، دست‌پایین است. این مدل، با توجه به دقت مناسب در شبیه‌سازی شاخص‌های عمده متغیرهای هواشناسی تاریخی، ابزار مناسبی برای مطالعات تغییر اقلیم محسوب می‌گردد. به نحوی که با تغییر پارامترهای مدل، امکان شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم، هم‌زمان با حفظ همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور وجود دارد.

برای شبیه‌سازی مقدار بارش در روزهای مرطوب و همچنین شبیه‌سازی سایر متغیرهای هواشناسی، یک الگوریتم ناپارامتری توسعه داده شد. عملکرد این الگوریتم در شبیه‌سازی میانگین و انحراف استاندارد متغیرهای هواشناسی، همبستگی و خودهمبستگی مرتبه یک روزانه و همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های مجاور با استفاده از شاخص‌های آماری مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این مدل، قادر است با دقت قابل قبول، ویژگی‌های آماری متغیرهای هواشناسی تاریخی ایستگاه‌های مورد مطالعه را شبیه‌سازی نماید. مقادیر میانگین و انحراف استاندارد

#### منابع مورد استفاده

آبایی ب، ۱۳۹۱. توسعه و کاربرد سامانه پشتیبان برنامه‌ریزی برای ارزیابی راهکارهای مدیریت منابع آب و خاک جهت سازگاری با تغییر اقلیم. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، ۳۲۷ صفحه.

آبابایی ب، سهرابی ت، میرزایی ف، وردی نژاد و ر، کریمی ب، ۱۳۸۹. اثر تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم و تحلیل ریسک ناشی از آن (مطالعه موردی: منطقه روددشت اصفهان). دانش کشاورزی، جلد ۱، شماره ۲۰، صفحه‌های ۱۳۵ تا ۱۵۰.

- Ababaei B, Sohrabi TM, Mirzaei F and Karimi B, 2010. Evaluation of a stochastic weather generator in different climates. *Computer and Information Science* 3: 217-229.
- Bardossy A and Plate EJ, 1992. Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resources Research* 28: 1247-59.
- Bogardi I, Matyasovszky I, Bardossy A and Duckstein L, 1993. Application of a space-time stochastic model for daily precipitation using atmospheric circulation patterns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 98(D9): 16653-16667.
- Bras R and Rodriguez-Iturbe I, 1976. Rainfall generation: a nonstationary time varying multi-dimensional model. *Water Resources Research* 12: 450-456.
- Chin EH, 1977. Modelling daily precipitation process with Markov chain. *Water Resources Research* 13: 949-956.
- Gabriel KR and 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.
- Green JR, 1964. A model for rainfall occurrence. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)* 26(2): 345-353.
- Hay LE, McCabe GJ, Wolock DM and Ayers MA, 1991. Simulation of precipitation by weather type analysis. *Water Resources Research* 27(4): 493-501.
- Hutchinson MF, 1995. Stochastic space-time models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology* (73): 237-264.
- Katz RW, 1977. Precipitation as a chaindependent process. *Journal of Applied Meteorology* 16: 671-76.
- Kavvas ML, Delleur JW, 1976. A point stochastic model for continental droughts. *Hydrological Sciences Bulletin* 21(3): 407-417.
- Mehrotra R, Srikanthan R and Sharma A, 2006. A comparison of three stochastic multi-site precipitation occurrence generators. *Journal of Hydrology* 331: 280-292.
- Richardson CW and Wright DA, 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture Agricultural Research Service ARS-8, National Technical Information Service, 83p.
- Semenov MA and Barrow EM, 2002. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual Ver 3.0, 27p.
- Smith JA and Karr AF, 1985. Parameter estimation for a model of space-time rainfall. *Water Resources Research* 21: 1251-1257.
- Srikanthan R and McMahon TA, 2001. Stochastic generation of annual monthly and daily climate data: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 5(4): 653-670.
- Stern RD and Coe R, 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of the Royal Statistical Society Series A* 147: 1-34.
- Wilks DS and Wilby RL, 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography* 23(3): 329-357.
- Wilks DS, 1989. Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation. *Monthly Weather Review* 25: 1429-1439.
- Wilks DS, 1998. Multisite generalizations of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology* 210: 178-91.
- Wilson LL, Lettenmaier DP and Skillingstad E, 1992. A hierarchical stochastic model of large-scale atmospheric circulation patterns and multiple station daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97(D3): 2791-2809.