

## چشم انداز تغییرات اقلیم به روش ریزمقیاس‌نمایی آماری چندمکانی (مطالعه موردی گیلان)

وستا افزلی<sup>۱\*</sup> - مسعودرضا حسامی کرمانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

### چکیده

به منظور تبدیل خروجی‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌های جهانی به ریزمقیاس، تحت تاثیر متغیرهای محلی مانند دما، به تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی قابل اعتماد نیاز است. روش‌های کلاسیک ریزمقیاس‌نمایی آماری با در نظر گرفتن وابستگی زمانی، مدل را اجرا نموده و به شبیه‌سازی طرح اقلیم آینده می‌پردازند. در این تحقیق با کمک مدل ASD به ریزمقیاس‌نمایی چندمکانی پارامترهای دما و بارش با داده‌های بروز شده‌ی CGCM3.1 با سناریوی A2 برای دو ایستگاه رشت و بندرانزلی به طور همزمان با در نظر گرفتن همبستگی‌های چند مکان پرداخته و سپس برای سه دوره‌ی سی ساله آینده، اقلیم شبیه‌سازی شد. هدف از استفاده این روش، نشان دادن اهمیت مدل‌های چندمکانی و ایجاد زمینه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی عدم قطعیت‌های شبیه‌سازی‌های اقلیم آینده است. به منظور انتخاب متغیرهای غالب برای مدل‌سازی چند مکانی از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد؛ به طوری که متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و دمای سطح در ارتفاع ۲ متری مهم‌ترین متغیرها برای مدل‌های دما و بارش هستند. نتایج به‌طور میانگین افزایش دما و کاهش بارندگی را برای سال‌های آتیشان می‌دهد. در ناحیه مورد مطالعه، میزان کاهش در میانگین بارش مقدار ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی‌متر در روز و کاهش شاخص اقلیمی درصد روزهای مرطوب ۶ تا ۷/۲۵ درصد نسبت به دوره‌ی مبنا (۱۹۶۱-۱۹۹۰) برآورد شده است؛ از طرفی افزایش شاخص میانگین دمای حداکثر، میانگین و حداقل به ترتیب ۳/۱۷، ۲/۵ و ۲/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره مبنا دیده شده است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی‌شونده، پیش‌بینی‌کننده، مدل ASD، مدل‌های اقلیم جهانی

### مقدمه

بررسی اقلیم موجود و طرح اقلیم آینده است. این مدل‌های رایانه‌ای با استفاده از قوانین حاکم بر جو یعنی قانون دوم نیوتن، قانون بقای جرم، قانون بقای انرژی و قانون گازهای ایده‌آل، بین پارامترهای مختلف جوی روابط ریاضی پیدا می‌کنند و اتمسفر را در سه جهت مکانی شبکه‌بندی کرده و در گره‌هایی با فواصل زیاد محاسبات را انجام می‌دهند. خروجی‌های مدل‌های اقلیم جهانی قابل استفاده برای مطالعات محلی و سیاست‌گذاری‌های توسعه و مدیریت منابع آب نیستند، از اینرو لازم است با استفاده از تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی دقت شبیه‌سازی‌ها بالا برده شود (۱۵). با بدست آمدن پارامترهای اقلیم به‌صورت قابل اعتماد، ارتباط آنها با منابع مختلف بررسی می‌شود و با مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های مناسب این اثرات آشکار می‌شوند. مطالعات مربوط به اثرات تغییر اقلیم بر سیستم هیدرولوژیکی و منابع آب به‌طور عمده از طریق تغییرات دما، بارش و تبخیر و تعرق انجام می‌شود؛ که از عوامل مهم در کاهش یا افزایش رواناب و تأمین آب حوضه‌ی آبریز و ... می‌باشند. الگوهای مختلفی به‌منظور پیدا کردن مؤلفه‌های تأثیرگذار در تغییر چرخه‌ی آب وجود دارد که سناریوهای مختلف اقلیم در یک مدل هیدرولوژیکی را

گرم شدن زمین یکی از عوامل تهدید کننده‌ی زندگی ما بر روی کره‌ی زمین تلقی می‌شود و لازم است اثرات آن در دراز مدت بر جنبه‌های مختلف حیات بشر در نظر گرفته شود. یکی از تبعات گرم شدن زمین تغییر اقلیم است. بسیاری از کشورهای واقع در خاورمیانه پدیده‌هایی نظیر افزایش دمای هوا، افت بارش، کاهش پوشش گیاهی و تعدد بیش‌تر طوفان‌های همراه با گرد و غبار را در سال‌های اخیر به شکل کاملاً محسوس مشاهده کرده‌اند. از این‌رو داده‌های اقلیمی ثبت شده در گذشته، قابل اعتماد برای طرح شرایط آینده نیستند.

جهت درک و بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب از مدل‌های گردش جهانی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. نقش اصلی این مدل‌ها

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

\*-نویسنده مسئول: (Email:vesta.afzali@gmail.com)

۲-استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه شهیدباهنر کرمان

پیشنهاد می‌کند.

پیش‌بینی‌کننده و آب هوای ناحیه‌ای، بر روند ریزمقیاس‌نمایی اثر می‌گذارد (۲). دسته سوم، مولدهای تصادفی، رفتارهای آماری متغیرهای اقلیمی محلی، نه نتایج واقعی مشاهده شده، مانند میانگین و واریانس را تکرار می‌کنند. موضوع اصلی کاربرد مولدهای آب و هوای تصادفی در اقلیم آینده، چالش تنظیم پارامترهای واقع‌بینانه‌ی ظاهری و سازگاری داخلی است (۱).

کیم و همکاران (۸) از روش رگرسیونی برای نخستین بار در زمینه اقلیم استفاده کردند و رابطه‌ی خطی میان میانگین ماهانه‌ی دما و بارش و خروجی‌های مدل گردش عمومی جو ارائه نمودند. روش ریزمقیاس‌نمایی آماری بر مبنای رگرسیون علاوه بر داده‌های هواشناسی (متغیر مستقل) به خروجی مدل گردش عمومی جو (متغیر وابسته) نیز احتیاج دارد، تا مدل را کالیبره کند. حسامی و همکاران (۴)، مدل ASD را معرفی کردند که انتخاب متغیرهای غالب را به صورت خودکار و با روش رگرسیون گام به گام و همبستگی جزئی انجام می‌دهد و پس از واسنجی مدل، به تولید سناریو با داده‌های آینده مدل جهانی اقلیم می‌پردازد.

تولید سری‌های مکانی بارش سطحی بین ایستگاه‌های یک ناحیه، در آنالیزهای هیدرولوژیکی، کنترل سیلاب، مدیریت خشکسالی و عرضه آب مورد نیاز است. اکثر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری با وجود محاسبات کم هزینه، با مقیاس محلی و هر نوع خروجی مدل جهانی اقلیم سازگار هستند، اما ریزمقیاس‌نمایی تک مکانی وابستگی مکانی متغیرهای تخمین زده شده را به حساب نمی‌آورد. مطالعات متعددی، روش‌هایی برای مدل‌سازی چندمکانی براساس نوع رویکرد پیشنهاد کرده‌اند، مانند رویکرد تصادفی (۹)، رویکرد مبتنی بر الگوی آب‌وهوا، رویکرد رگرسیونی و یا روش‌های ترکیبی رگرسیونی-تصادفی (۳).

به تازگی مطالعات اثرات تغییر اقلیم به صورت چندمکانی در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است؛ ونبین و همکاران (۱۲)، با استفاده از سه مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری چندمکانی برای بارش روزانه در شمال چین، به نام‌های CR-SDSM<sup>۷</sup>، GLIMCLIM<sup>۸</sup> و NHMM<sup>۹</sup> به بررسی میزان حدی بارش و تغییرپذیری سالانه آن پرداخته شد. آن‌ها متغیرهای غالب را از بین ۴۰۰۰ پارامتر پیش‌بینی‌کننده با استفاده از همبستگی جزئی پیرسون<sup>۱۰</sup> انتخاب کردند و مدل‌ها به دلیل ویژگی‌های جوی منطقه برای دو فصل تر و خشک مدل‌سازی شدند. در سال ۲۰۱۴ یک مطالعه سیستماتیک برای تولید داده‌های بارش در

به منظور ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل‌های اقلیم جهانی می‌توان از روش‌های دینامیکی و آماری استفاده کرد. از سوی دیگر ریزمقیاس‌نمایی می‌تواند بصورت تک‌مکانی و یا چندمکانی انجام شود. نادیده گرفتن وابستگی مکانی به سری‌های زمانی آب و هوا در سایت‌های مختلف، باعث حذف وقایع شدید تابستانی و زمستانی در برآورد اقلیم آینده می‌شود، از اینرو در تکنیک ریزمقیاس‌نمایی آماری مهم‌ترین موضوع در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی و زمانی در کل ناحیه است (۷).

از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری می‌توان به روش‌های زیر اشاره کرد: (۱) روش‌های مبتنی بر الگوی آب و هوا<sup>۱</sup>، (۲) روش‌های تصادفی<sup>۲</sup> (۱۱)، (۳) روش‌های رگرسیونی (۱۴ و ۴)، مدل‌های رگرسیونی ارتباط خطی و غیرخطی بین پیش‌بینی‌شونده‌ها<sup>۳</sup> و پیش‌بینی‌کننده‌های<sup>۴</sup> بزرگ مقیاس برقرار می‌کنند. از روش‌های پرکاربرد می‌توان به رگرسیون خطی چندگانه<sup>۵</sup> (۱۰)، تجزیه و تحلیل همبستگی کانونی<sup>۶</sup> و شبکه عصبی مصنوعی اشاره کرد. از اولین مراجع ریزمقیاس‌نمایی رگرسیونی تحقیق ویلدر سال ۱۹۹۰ است که میانگین مکانی دما و بارش محلی مشاهده شده را به میانگین فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ۷۰۰ هکتوپاسکال و سایر پیش‌بینی‌کننده‌ها به صورت رگرسیونی مدل کرد و به تغییرات مکانی و زمانی معنادار در عملکرد مدل نواحی کوهستانی و ساحلی توجه کرد (۱۳). معمولاً روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای مختلف جوی مانند دما، بارش و سرعت باد استفاده می‌شود. جیونگ در سال ۲۰۱۳ استفاده از رگرسیون خطی چندگانه سالانه (یک مدل برای همه ماه‌های سال) را بهتر از ماهانه (یک مدل برای هر ماه) برای ریزمقیاس‌نمایی بارش و دمای کانادا پیشنهاد داد؛ زیرا که این مدل عملکردی به خوبی مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه ماهانه علی‌رغم سادگی ریاضی از خود نشان داد (۶). مدل‌های مبتنی بر الگوی آب و هوا اساساً داده‌ها را در دوره آموزش زمانی که نزدیک‌ترین حالت به شبیه‌سازی را دارند انتخاب می‌کند. به عبارت دیگر مدل تمام رخدادهای آب و هوایی گذشته و محلی اندازه‌گیری شده در یک پایگاه داده را جستجو می‌کند. یکی از معایب این روش آن است که نمی‌تواند خارج از گستره‌ی داده‌های تاریخی برآوردی انجام دهد تا زمانی که یک مقدار اتفاق بیفتد و این رویکرد مبتنی بر چرخه‌ی داده‌های گذشته در ارتباط بین پارامترهای

- 1- Weather pattern approaches
- 2- Stochastic weather generators
- 3- Predictands
- 4- Predictors
- 5- Multiple Linear Regression
- 6- Canonical Correlation Analysis

- 7- Conditional resampling statistical downscaling model
- 8- Generalized linear model for daily climate time series
- 9- Non-homogeneous hidden Markov model
- 10- Pearson partial correlation

۱۵ سال بعدی برای اعتبارسنجی<sup>۶</sup> نحوه عملکرد مدل ASD استفاده شد. قرار دادن تمام متغیرها در مدل رگرسیونی روش مناسبی نیست زیرا که متغیرها به یکدیگر وابسته بوده یا در طول زمان امکان تغییر وجود دارد، استفاده از تمام آنها در مدل، وارد کردن اطلاعات اضافی می‌باشد. کاهش تعداد متغیرها امری رایج برای کاستن خطاهای تصادفی مدل‌های گردش عمومی جو در رابطه با متغیرهای بزرگ مقیاس و متغیر سطحی می‌باشد.

در این تحقیق از داده‌های بارش، دمای حداقل، حداکثر و میانگین ایستگاه‌های سینوپتیک رشت و بندرانزلی (جدول ۱) و داده‌های NCEP و CGCM3.1A2 دو گره نزدیک به ایستگاه‌ها استفاده شده است. برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های درون‌یابی شده‌ی NCEP بصورت چند مکانی برای کالیبراسیون و ارزیابی مدل و از داده‌های GCM برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیم آینده استفاده می‌شود.

### مدل‌سازی آماری چندمکانی پارامترهای هواشناسی با استفاده

#### از ASD

در این مطالعه، مدل‌سازی پارامترهای دما و بارش به صورت چند مکانی با کمک نرم‌افزار ASD صورت گرفته است. شکل ۱ ساختار کلی ASD برای تولید سناریوهای اقلیمی آینده را نشان می‌دهد. مدل توسط داده‌های NCEP به عنوان متغیرهای مستقل و داده‌های هواشناسی به عنوان پارامترهای پیش‌بینی‌شونده، در بازه‌های معین واسنجی و ارزیابی می‌شوند و از داده‌های روزانه ۱۹۷۵-۱۹۶۱ برای واسنجی و از داده‌های روزانه ۱۹۹۰-۱۹۷۶ برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود. متغیرهای غالب به طور خودکار با استفاده از رگرسیون گام به گام انتخاب می‌شود و پس از ارزیابی مدل با شاخص‌های اقلیمی و آماری، سناریوهای ۲۱۰۰-۱۹۶۱ محاسبه می‌گردد. این برآورد برای سه دوره‌ی سی ساله انجام می‌گیرد و با دوره سی ساله ۱۹۹۰-۱۹۶۰ مقایسه می‌شود.

در این تحقیق چهار متغیر دمای حداقل، میانگین، حداکثر، وقوع و میزان بارندگی با استفاده از داده‌های CGCM3.1A2 به صورت چندمکانی مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌شود. وقوع و میزان بارش در دو مرحله با دو معادله زیر مدل می‌شود:

$$O_{i*m} = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j p_{i*m,j} + e_{i*m}$$

$$R_{i*m}^{0.25} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j p_{i*m,j} + e_{i*m}$$

سنگاپور اجرا شد و به مقایسه‌ی روش<sup>۱</sup> GLM-KNN و M-G<sup>۲</sup> پرداخته‌اند که مدل M-G در مدل چندمکانی خوب عمل کرد (۱۷). همچنین در کانادا با استفاده از داده‌های CGCM3.1، مقایسه‌ای بین شاخص‌های اقلیمی بارش آینده با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری چون ANN، رگرسیون خطی چندگانه<sup>۳</sup>، رگرسیون خطی چندگانه و K-nearest neighbors انجام شده است (۱).

در این تحقیق براینخستین بار، ریزمقیاس‌نمایی چند مکانی توسط ASD، با استفاده از داده‌های CGCM3.1A2، در ناحیه‌ای از گیلان انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق چگونگی انجام ریزمقیاس‌نمایی چندمکانی با ASD و نشان دادن اهمیت مدل‌های چندمکانی می‌باشد. همچنین مطالعه منطقه‌ای خاص با مدل‌ها، داده‌ها و سناریوهای متفاوت پیش‌زمینه‌ی مناسبی برای محاسبه‌ی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های اقلیم آینده‌است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده

روش ریزمقیاس‌نمایی آماری بر مبنای رگرسیون علاوه بر داده‌های هواشناسی به عنوان متغیر وابسته به خروجی مدل گردش عمومی جو به عنوان متغیر مستقل نیز احتیاج دارد. مدل گردش عمومی جو CGCM3.1 نسخه‌ای بعد از CGCM2 است. این مدل با همان دقت شبکه‌ی افقی CGCM2 است که با شبکه طیفی T47 اجرا شده است و خروجی‌های شبیه‌سازی شده‌ای در ۳۱ سطح عمود تولید می‌کند. خروجی‌های مدل CGCM3 با دو سناریو A1B و A2 برای آینده موجود است. لازم به ذکر است در این مطالعه از CGCM3.1A2 استفاده می‌شود. مرکز ملی پیش‌بینی محیطی<sup>۴</sup> و مرکز ملی تحقیقات جویبه منظور تولید داده‌های شبکه‌بندی شده جهت برآورده کردن نیاز محققین اقلیم‌شناسی، پروژه‌ای را تحت عنوان تحلیل مجدد آغاز نمودند. تمامی شبکه NCEP/NCAR با شبکه‌ی CGCM3 درون‌یابی شده و برای کالیبراسیون مدل ریزمقیاس‌نمایی قابل استفاده است (۵).

با توجه به معیار توصیه شده توسط سازمان جهانی هواشناسی دوره سی ساله ۱۹۹۰-۱۹۶۱ به عنوان دوره مرجع در نظر گرفته شد. از داده‌های متعلق به ۱۵ سال اول برای واسنجی<sup>۵</sup> (کالیبراسیون) و از

- 1- Single-site generalized linear model plus K-nearest neighbor
- 2- Multi-site generalized linear model
- 3- Decision trees and Ensembles
- 4- National Center for Environmental Prediction: NCEP
- 5- Calibration

جدول ۱- مشخصات جغرافیای ایستگاه‌ها و اطلاعات آماری داده‌های مورد مطالعه (اداره کل هواشناسی استان گیلان)

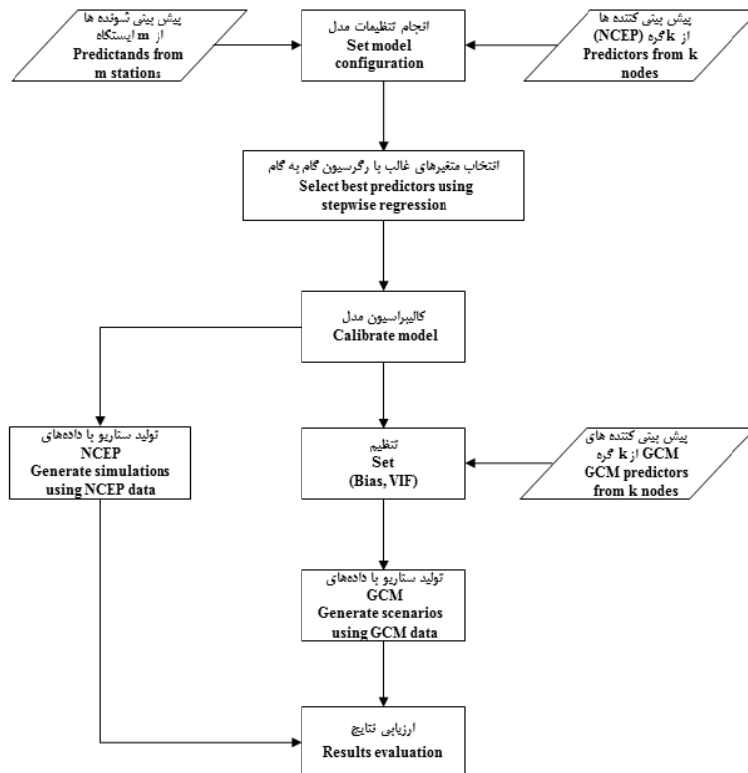
Table 1- Geographic and statistical information of meteorological stations over the study area

سال تاسیس Established Year	ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude (E)	عرض جغرافیایی Latitude (N)	ارتفاع از دریا Altitude (m)	بازه زمانی Period (Year)	داده‌های روزانه ایستگاه Daily Data of Station
1956	رشت Rasht	49°37'	37°19'	-8.6	1961-1990	بارش، دما Precipitation, Temperature
1951	بندر انزلی Bandar Anzali	49°27'	37°29'	-23.6	1961-1990	بارش، دما Precipitation, Temperature

$$T_{i*m} = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j p_{i*m,j} + e_{i*m}$$

بطوری که  $T_{i*m}$  درجه حرارت حداکثر، حداقل یا میانگین،  $p_{i*m,j}$  متغیر غالب زام در ایستگاه  $m$  از  $n$  تعداد متغیرهای غالب انتخاب شده از بین  $K \times 26$  متغیر مستقل،  $\gamma$  پارامتر مدل و  $e_{i*m}$  خطای مدل می‌باشند.

در این معادلات  $O_{i*m}$  وقوع بارش روزانه در ایستگاه  $m$   $R_{i*m}^{0.25}$  میزان بارش روزانه در ایستگاه  $m$ ،  $p_{i*m,j}$  متغیر غالب زام در ایستگاه  $m$ ،  $n$  تعداد متغیرهای غالب انتخاب شده از بین  $K \times 26$  متغیر مستقل (پیش‌بینی‌کننده)،  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای مدل و  $e_{i*m}$  خطای مدل با فرض پیروی از توزیع نرمال و خطای استاندارد است. درجه حرارت نیز در یک مرحله با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:



شکل ۱- ساختار مدل چندمکانی ASD  
Figure 1- Multi-site ASD model architecture

۲۶ متغیر مستقل از مهم‌ترین مراحل انجام کار است. علت آن است که تاثیر متغیرهای غالب روی متغیرهای وابسته در زمان‌های مختلف

نحوه انتخاب متغیرهای غالب در انجام ریزمقیاس‌نمایی آماری انتخاب پارامترهای غالب از بین

کردن اطلاعات اضافی می‌باشد. کاهش تعداد متغیرها امری رایج برای کاستن خطاهای تصادفی مدل‌های گردش عمومی جو در رابطه با متغیرهای بزرگ مقیاس و متغیر سطحی می‌باشد.

متفاوت است و این امر باعث ایجاد فرآیندی پیچیده می‌گردد. قرار دادن تمام متغیرها در مدل رگرسیونی روش مناسبی نیست زیرا که متغیرها به یکدیگر وابسته بوده و استفاده از تمام آنها در مدل، وارد

جدول ۲- لیست متغیرهای NCEP در شبکه CGCM3.1 برای دو گره

Table 2- NCEP variables on CGCM3.1 grid for two nodes

شماره NO.	متغیر NCEP variable	پیش‌بینی کننده Predictor	شماره NO.	متغیر NCEP variable	پیش‌بینی کننده Predictor
1	ncepmslpgl -1. dat	فشار متوسط سطح دریا	27	ncepp8_vgl -1. dat	سرعت نصف‌النهاری ۸۵۰ هکتوپاسکال
2	ncepmslpgl. dat	Mean sea level pressure	28	ncepp8_vgl. dat	850hPa Meridional velocity
3	ncepp500gl -1. dat	ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال	29	ncepp8_zgl -1. dat	ورتیسیته ۸۵۰ هکتوپاسکال
4	ncepp500gl. dat	500hPa Geopotential	30	ncepp8_zgl. dat	850hPa Vorticity
5	ncepp5thgl -1. dat	جهت باد ۵۰۰ هکتوپاسکال	31	ncepprcpgl -1. dat	بارش تجمعی
6	ncepp5thgl. dat	500hPa Wind direction	32	ncepprcpgl. dat	Accumulated precipitation
7	ncepp5zhgl -1. dat	واگرایی ۵۰۰ هکتوپاسکال	33	ncepp_thgl -1. dat	جهت باد ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
8	ncepp5zhgl. dat	500hPa Divergence	34	ncepp_thgl. dat	1000hPa Wind direction
9	ncepp5_fgl -1. dat	سرعت باد ۵۰۰ هکتوپاسکال	35	ncepp_zhgl -1. dat	واگرایی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
10	ncepp5_fgl. dat	500hPa Wind speed	36	ncepp_zhgl. dat	1000hPa Divergence
11	ncepp5_ugl -1. dat	سرعت ناحیه‌ای ۵۰۰ هکتوپاسکال	37	ncepp_fgl -1. dat	سرعت باد ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
12	ncepp5_ugl. dat	500hPa Zonal velocity	38	ncepp_fgl. dat	1000hPa Wind speed
13	ncepp5_vgl -1. dat	سرعت نصف‌النهاری ۵۰۰ هکتوپاسکال	39	ncepp_ugl -1. dat	سرعت ناحیه‌ای ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
14	ncepp5_vgl. dat	500hPa Meridional velocity	40	ncepp_ugl. dat	1000hPa Zonal velocity
15	ncepp5_zgl -1. dat	ورتیسیته ۵۰۰ هکتوپاسکال	41	ncepp_vgl -1. dat	سرعت نصف‌النهاری ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
16	ncepp5_zgl. dat	500hPa Vorticity	42	ncepp_vgl. dat	1000hPa Meridional velocity
17	ncepp850gl -1. dat	ژئوپتانسیل ۸۵۰ هکتوپاسکال	43	ncepp_zgl -1. dat	ورتیسیته ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
18	ncepp850gl. dat	850hPa Geopotential	44	ncepp_zgl. dat	1000hPa Vorticity
19	ncepp8thgl -1. dat	جهت باد ۸۵۰ هکتوپاسکال	45	nceps500gl -1. dat	رطوبت ویژه ۵۰۰ هکتوپاسکال
20	ncepp8thgl. dat	850hPa Wind direction	46	nceps500gl. dat	500hPa Specific humidity
21	ncepp8zhgl -1. dat	واگرایی ۸۵۰ هکتوپاسکال	47	nceps850gl -1. dat	رطوبت ویژه ۸۵۰ هکتوپاسکال
22	ncepp8zhgl. dat	850hPa Divergence	48	nceps850gl. dat	850hPa Specific humidity
23	ncepp8_fgl -1. dat	سرعت باد ۸۵۰ هکتوپاسکال	49	ncepshumgl -1. dat	رطوبت ویژه ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
24	ncepp8_fgl. dat	850hPa Wind speed	50	ncepshumgl. dat	1000hPa Specific humidity
25	ncepp8_ugl -1. dat	سرعت ناحیه‌ای ۸۵۰ هکتوپاسکال	51	nceptempgl -1. dat	دمای سطح در ارتفاع ۲ متری
26	ncepp8_ugl. dat	850hPa Zonal velocity	52	nceptempgl. dat	Screen air temperature (2m)

می‌دهد. پارامترها با شماره سطر فرد مربوط به گره نزدیک و شماره سطر زوج مربوط به گره دورتر در شبکه ایستگاه می‌باشد.

#### ارزیابی مدل

برای ارزیابی نحوه عملکرد مدل می‌توان از شاخص‌های آماری مانند میانگین، صدک نودم، حداکثر، حداقل، انحراف معیار و از شاخص‌های اقلیمی متعددی نظیر درصد روزهای مرطوب برای بارش استفاده کرد. جداول ۳ و ۴ شاخص‌های استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است برای سنجش دقت مدل از ریشه‌ی مربعات خطا استفاده شده است.

برای انتخاب متغیرها می‌توان از روش آماری نظیر همبستگی جزئی و رگرسیون گام به گام استفاده نمود. دو روش کلی برای انجام رگرسیون گام به گام روش‌های پیش‌رو<sup>۱</sup> و پس‌رو<sup>۲</sup> می‌باشند. در این تحقیق برای انتخاب متغیرهای غالب از روش رگرسیون گام به گام پس‌رو استفاده شد. این روش برای انتخاب متغیرهای غالب در مدل‌های رگرسیونی مفید می‌باشد و از آزمون F جزئی<sup>۳</sup> برای اضافه یا حذف متغیر استفاده می‌شود (۱۶ و ۴).

جدول ۲ داده‌های درون‌یابی شده‌ی NCEP را که برای کالیبراسیون و ارزیابی مدل چندمکانی (دوگره) استفاده شده را نشان

- 1- Forward
- 2- Backward
- 3- Partial F-test

جدول ۳- شاخص‌های بارندگی

Table 3- Precipitation indices

شاخص Index	توضیح Definition	واحد Unit	مقیاس Scale
MEAN	میانگین بارش Mean precipitation	(mm/day)	ماهانه (Monthly)
STD	انحراف استاندارد Standard deviation	mm	ماهانه (Monthly)
PERCENTILE	تعداد روزهایی با بارش بزرگ‌تر از صدک نودم 90th percentile of rain day amount	mm	ماهانه (Monthly)
CDD	حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی Maximum number of consecutive dry days	Days	ماهانه (Monthly)
Wet-day	درصد روزهای مرطوب Percentage of wet days	%	ماهانه (Monthly)

جدول ۴- شاخص‌های دما

Table 4- Temperature indices

شاخص Index	توضیح Definition	واحد Unit	مقیاس Scale
MEAN	میانگین دما Mean temperature	°C	ماهانه (Monthly)
STD	انحراف استاندارد Standard deviation	°C	ماهانه (Monthly)
PERCENTILE	صدک نودم 90th percentile of daily temperature	°C	ماهانه (Monthly)
MAX	حداکثر دمای ثبت شده Maximum recorded temperature	°C	ماهانه (Monthly)
MIN	حداقل دمای ثبت شده Minimum recorded temperature	°C	ماهانه (Monthly)

## نتایج و بحث

## کالیبراسیون (۱۹۷۰-۱۹۶۱) و ارزیابی (۱۹۹۰-۱۹۷۱) با داده‌های NCEP

پس از اجرای برنامه برای پارامترهای دما و بارش، متغیرهای غالب به صورت اتوماتیک انتخاب شده؛ در جدول ۵ شماره متغیرهای

انتخاب شده (بر اساس جدول ۲)، در ناحیه مربوط به دو ایستگاه رشت و بندرانزلی به همراه میزان واریانس مدل ( $R^2$ ) به صورت خلاصه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار واریانس مدل چندمکانی برای دما بیشتر از بارش می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالای ASD در مدل‌سازی دماست.

جدول ۵- شماره متغیرهای غالب انتخاب شده (NCEP) در مدل چندمکانی ASD

Table 5- The most commonly used predictor variables (NCEP) in ASD multi-site model

	$R^2$	پارامترهای پیش‌بینی‌کننده انتخابی (Selected predictors)									
دمای حداکثر (Maximum temperature)	0.89	2	17	21	22	39	40	42	48	50	51
دمای میانگین (Mean temperature)	0.922	2	17	27	40	42	43	48	49	50	51
دمای حداقل (Minimum temperature)	0.855	10	11	17	27	39	44	48	49	50	51
بارش (Precipitation)	0.336	15	16	17	26	29	37	39	43	49	52

آماریه برای سنجش دقت مدل از RMSE<sup>۱</sup> استفاده شده است. نتایج

در این قسمت با استفاده از داده‌های NCEP مدل‌های دما و بارش در دو دوره ارزیابی و کالیبراسیون در ناحیه مورد نظر به صورت چند مکانی اجرا شد. برای ارزیابی مقدماتی مدل‌ها از شاخص‌های

1- Root-Mean-Square Error

دما و بارش در جدول ۶ برای دو دوره ارزیابی و کالیبراسیون آمده است. همانطور که مشخص است به طور کلی مقادیر کم RMSE در مدل چند مکانی دما نشان دهنده عملکرد خوب این مدل است. شکل ۲ و ۳ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده شده و نتایج مدل چند مکانی حداکثر دما و بارش در دو دوره کالیبراسیون و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP را نشان می‌دهند.

نشان دهنده دقت نسبتاً خوب مدل می‌باشد و مقادیر محاسبه شده در دوره کالیبراسیون نسبت به دوره ارزیابی از دقت بالاتری برخوردار هستند، که این موضوع در RMSE بیشتر پارامترها مشهود است. در مدل‌سازی دما، بیشترین مقدار RMSE مربوط به شاخص ماکزیمم در مدل دمای حداکثر به میزان ۳/۹۲ درجه سانتیگراد و کمترین مقدار RMSE مربوط به میانگین مدل دمای میانگین به میزان ۰/۰۰۶۴۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نتایج بدست آمده از مدل

جدول ۶- نتایج مدل‌های چند مکانی دما و بارش در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP

Table 6- Results of multi-site precipitation and temperature models during calibration and validation using NCEP data

پارامتر Parameter	شاخص Index	RMSE	
		کالیبراسیون Calibration	ارزیابی Validation
Maximum temperature دمای حداکثر	MEAN (°C)	0.00665	1.45
	STD (°C)	0.0145	0.303
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	0.706	1.56
	MAX (°C)	3.92	3.42
	MIN (°C)	3.06	2.69
Mean temperature دمای میانگین	MEAN (°C)	0.000648	0.483
	STD (°C)	0.00786	0.189
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	0.37	0.496
	MAX (°C)	1.8	3.51
	MIN (°C)	1.64	1.41
Minimum temperature دمای حداقل	MEAN (°C)	0.00654	0.964
	STD (°C)	0.013	0.473
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	0.483	0.475
	MAX (°C)	1.59	2.43
	MIN (°C)	2.82	1.73
Precipitation بارش	MEAN (mm)	0.244	2.34
	STD (mm)	1.38	3.9
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (mm)	1.97	8.06
	Wet-day (%)	0.897	9.09
	CDD (days)	1.76	2.13

کالیبراسیون به میزان ۰/۰۰۴۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین مقدار RMSE در مدل‌سازی بارش مربوط به درصد روزهای مرطوب در دوره‌ی ارزیابی به میزان ۱۰/۶ درصد می‌باشد. کمترین مقدار RMSE مربوط به شاخص میانگین در دوره کالیبراسیون به میزان ۰/۸۵۷ میلی‌متر در روز می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود شاخص‌های آماری RMSE کمتری نسبت به شاخص‌های اقلیمی دارند که این نشان دهنده عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی مقدار بارندگی نسبت به وقوع آن است.

#### طرح پارامترهای بارش و دما برای آینده

در این تحقیق پس از کالیبراسیون و ارزیابی مدل‌های چند مکانی دما و بارش، پارامترهای مربوطه برای سه دوره‌ی سی ساله در آینده برآورد و با دوره سی ساله ۱۹۶۰-۱۹۶۱ مقایسه شد. از آنجایی که برای هر یک از پارامترها صد سناریو ایجاد شده، برای بررسی و

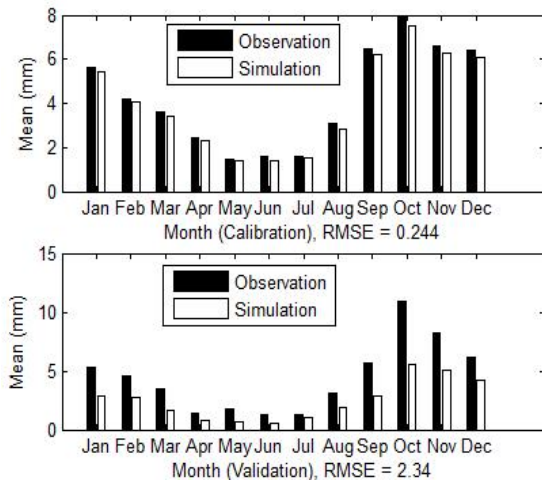
#### ارزیابی مدل با استفاده از داده‌های CGCM3.1A2

پس از ارزیابی‌های صورت گرفته با داده‌های NCEP، عملکرد داده‌های CGCM3.1 در دو دوره کالیبراسیون و ارزیابی بررسی شده‌اند. جدول ۷ خلاصه‌ای از اختلاف بین مقادیر مشاهده و خروجی مدل‌های دمای حداکثر، میانگین، حداقل و بارش را در ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده با استفاده از داده‌های GCM نسبت به داده‌های NCEP دقت کمتری دارند و به طور کلی مقادیر محاسبه شده در دوره کالیبراسیون نسبت به دوره ارزیابی دقت بیشتری دارند. بیشترین مقدار RMSE در مدل‌سازی دما مربوط به شاخص مینیمم و صدک نودم مقادیر مشاهده شده و نتایج مدل چند مکانی دمای حداقل در دوره ارزیابی به میزان ۵/۴۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

کمترین مقدار RMSE در مدل‌سازی دما مربوط به میانگین مقادیر مشاهده شده و نتایج مدل چند مکانی دمای حداکثر در دوره

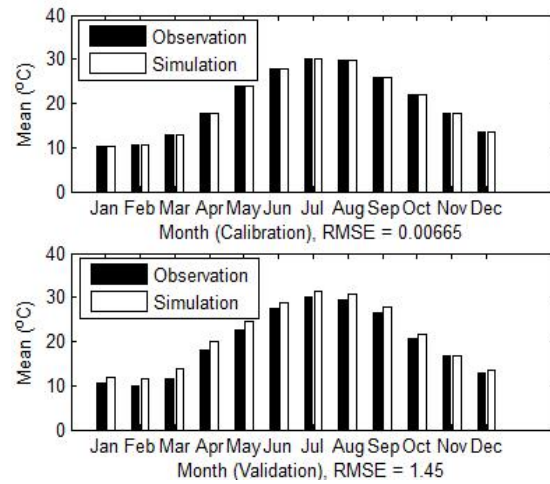
نزدیک‌تر به زمان حال قابل اعتمادتر از دوره‌های بعدی می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی از میانگین این صد دوره استفاده شد. لازم به ذکر است در طرح و شبیه‌سازی‌های انجام شده نتایج مربوط به دوره‌های



شکل ۳- نمودار مدل میانگین بارش در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با NCEP

Figure 3- Bar plots of mean for precipitation model using NCEP data on calibration and validation



شکل ۲- نمودار مدل میانگین حداکثر دما در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با NCEP

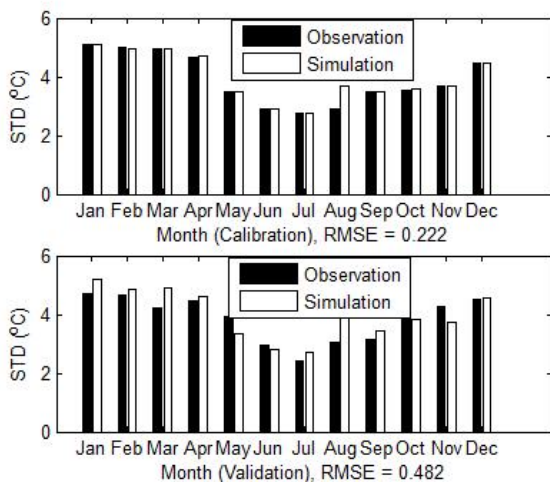
Figure 2. Bar plots of mean for maximum temperature model using NCEP data over calibration and validation periods

جدول ۷- نتایج مدل چندمکانی دما و بارش در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با استفاده از داده‌های GCM

Table 7- Results of multi-site precipitation and temperature models during calibration and validation period using GCM

پارامتر Parameter	شاخص Index	RMSE	
		کالیبراسیون Calibration	ارزیابی Validation
Maximum temperature دمای حداکثر	MEAN (°C)	0.00417	0.959
	STD (°C)	0.222	0.482
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	0.747	1.46
	MAX (°C)	3.71	2.52
	MIN (°C)	3.81	3.2
Mean temperature دمای میانگین	MEAN (°C)	0.0048	0.808
	STD (°C)	0.706	0.826
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	0.948	1.41
	MAX (°C)	2.85	2.91
	MIN (°C)	2.14	2.47
Minimum temperature دمای حداقل	MEAN (°C)	0.00522	1.16
	STD (°C)	1.18	1.59
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (°C)	4.3	5.46
	MAX (°C)	2.55	2.6
	MIN (°C)	4.3	5.46
Precipitation بارش	MEAN (mm)	0.838	1.39
	STD (mm)	1.06	1.29
	90 <sup>th</sup> PERCENTILE (mm)	9.5	8.43
	Wet-day (%)	10.4	10.6
	CDD (days)	2.38	3.51





شکل ۵- نمودار انحراف معیار مدل حداکثر دما در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با داده‌های GCM

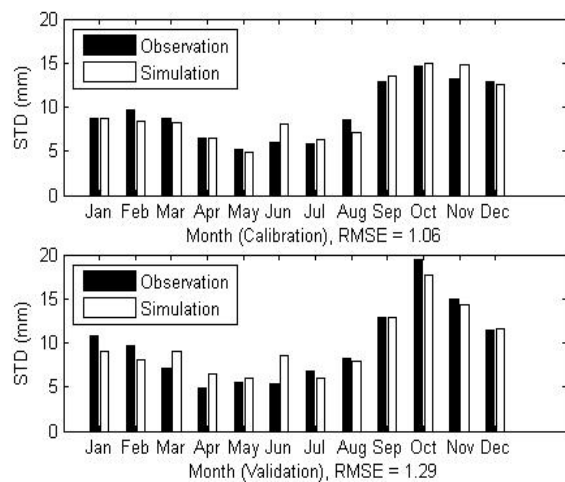
Figure 5- Bar plots of STD for maximum temperature model using GCM data on calibration and validation

ماهانه دمای حداکثر و میانگین، پارامتر میانگین تغییرات ماهانه دمای حداقل نیز دارای روندی منظم و صعودی است. بدان معنا که در میانگین تغییرات ماهانه دمای حداقل در هر سه دوره آینده نسبت به دوره مینا و نسبت به یکدیگر افزایش منظمی مشاهده می‌شود.

نتایج مربوط به برآورد شاخص‌های بارش برای سه دوره سی ساله در آینده نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ در دو ایستگاه رشت و بندرانزلی با استفاده از مدل چند مکانی ساخته شده و به همراه خروجی‌های مدل چرخش عمومی CGCM3.1A2 در جدول ۸ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج، در مورد شاخص میانگین بارش برای هر سه دوره نسبت به دوره مینا روند کاهشی مشاهده شد که بیشترین کاهش مربوط به دوره دوم سی ساله آینده (۲۰۴۱-۲۰۷۰) می‌باشد. تغییر در شاخص درصد روزهای مرطوب دارای روند کاهشی نسبتاً شدید است. این کاهش در دوره سوم سی ساله آینده به میزان حدود ۷ درصد نسبت به دوره پایه می‌رسد. همچنین شاخص حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی در دوره‌های آینده نسبت به دوره مینا کم خواهد شد و در دوره اول سی ساله آینده (۲۰۱۱-۲۰۴۰) بیشترین نزول دیده می‌شود. به طور کلی نتایج این مدل روند کاهشی سه شاخص مهم بارش را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد.

نتایج مربوط به برآورد پارامترهای دما برای سه دوره سی ساله در آینده نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ در دو ایستگاه رشت و بندرانزلی با استفاده از مدل چند مکانی ساخته شده و به همراه خروجی‌های مدل چرخش عمومی CGCM3.1A2 در جدول ۹ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار انحراف معیار مدل بارش در دوره کالیبراسیون و ارزیابی با داده‌های GCM

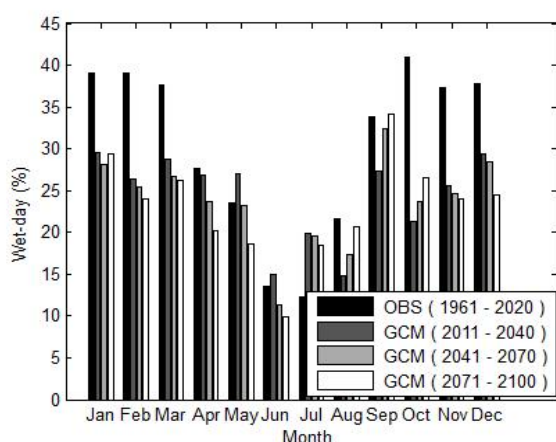
Figure 4- Bar plots of STD for precipitation model using GCM data over calibration and validation

شکل‌های ۶ تا ۸ تغییرات ماهانه شاخص‌های بارش و شکل‌های ۹ تا ۱۱ تغییرات ماهانه دما از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی نسبت به دوره‌های سی ساله ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ در ایستگاه‌های رشت و انزلی به صورت چندمکانی نشان می‌دهند. روند تغییرات ماهانه میانگین بارش نسبت به دوره پایه در ماه‌های ژانویه تا اپریل به صورت کاهشی و از اپریل تا سپتامبر افزایشی و پس از آن دوباره روندی کاهشی را نشان می‌دهد. مقایسه سه دوره نسبت به یکدیگر نشان دهنده روند منظمی نیست. روند رو به کاهش شاخص درصد روزهای مرطوب، تقریباً در همه‌ی ماه‌ها جز جولای، مشاهده می‌شود. این روند در مقایسه سه دوره نسبت به یکدیگر در کلیه ماه‌ها به جز آگوست، سپتامبر و اکتبر نیز کاهشی است. همچنین در شکل ۸ مشخص است که حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی در دوره‌ی سی ساله اول در ۶ ماه مختلف سال روند کاهشی دارد؛ که در ماه جولای این کاهش به حداکثر میزان خود می‌رسد. دوره‌های سی ساله بعد در مقایسه با دوره پایه در ۵ ماه مختلف دارای روندی افزایشی در میزان حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی می‌باشد. به طور کلی در مقایسه ماهانه سه دوره سی ساله نسبت به یکدیگر روند مشخصی دیده نمی‌شود. تغییرات ماهانه میانگین دمای حداکثر در مدل ساخته شده در همه‌ی ماه‌ها و برای هر سه دوره آینده نسبت به دوره مینا روند افزایشی مشاهده می‌شود. همچنین روند در سه دوره سی ساله آینده نسبت به یکدیگر هم به طور واضح صعودی است. باید توجه داشت که در همه‌ی ماه‌ها و برای هر سه دوره آینده نسبت به دوره مینا و همچنین سه دوره نسبت به یکدیگر روند افزایشی در میانگین تغییرات ماهانه دمای میانگین مدل مشاهده می‌شود. همچنین تغییرات

### نتیجه‌گیری کلی

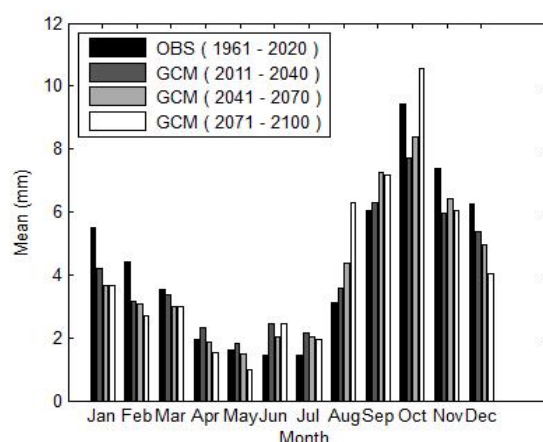
برای آشکارسازی اثرات دگرگونی اقلیم ابتدا با در نظر گرفتن شرایط مختلف در آینده نظیر رشد اقتصادی، آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای سناریوهایی تعیین می‌شود؛ سپس با استفاده از قوانین حاکم بر جو مدل‌های پیچیده جهانی اقلیم تشکیل شده و توسط ابر رایانه‌ها پارامترهای مختلف جوی را در سه جهت و در فواصل مختلف محاسبه می‌شوند تا خروجی‌های بزرگ مقیاس مدل‌های جهانی اقلیم بدست آید.

بر اساس نتایج نهایی مدل چندمکانی در شبیه‌سازی پارامترهای دمای حداکثر، میانگین و حداقل، روند صعودی در هر سه دوره‌ی آینده نسبت به دوره مینا دیده می‌شود. در پارامتر دمای حداکثر بیشترین افزایش مربوط به دوره‌ی سوم شبیه‌سازی به میزان ۳/۱۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره‌ی مینا است. همچنین در پارامترهای دمای میانگین و حداقل نیز بیشترین افزایش مربوط به دوره‌ی سوم شبیه‌سازی شده آینده به میزان ۲/۵ و ۲/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. روند افزایشی دما در طرح‌های آینده بسیار نگران‌کننده است و باید مورد توجه قرار گیرند.



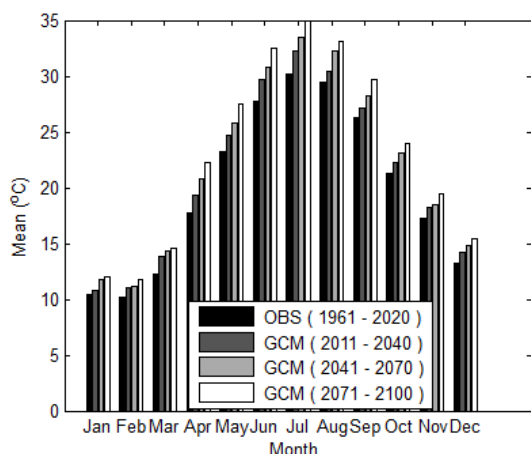
شکل ۷- تغییرات ماهانه شاخص درصد روزهای مرطوب در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 7- Bar plots of wet-day index for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors



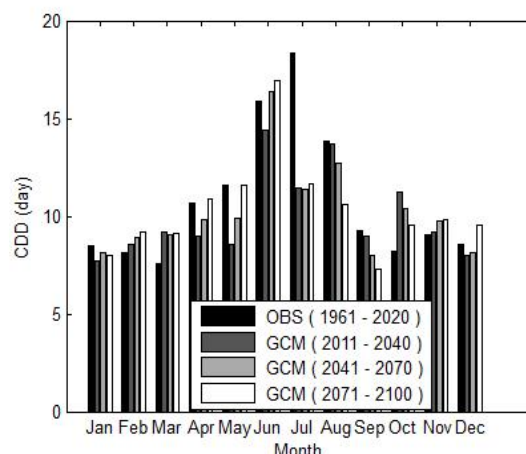
شکل ۶- تغییرات ماهانه میانگین بارش در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 6- Bar plots of mean for precipitation for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors



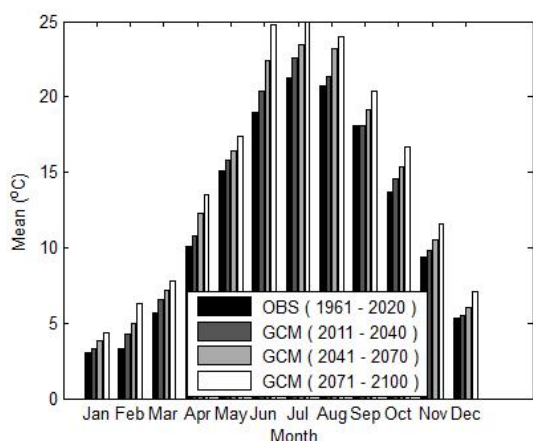
شکل ۹- تغییرات ماهانه میانگین دمای حداکثر در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 9- Bar plots of mean for maximum temperature for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors



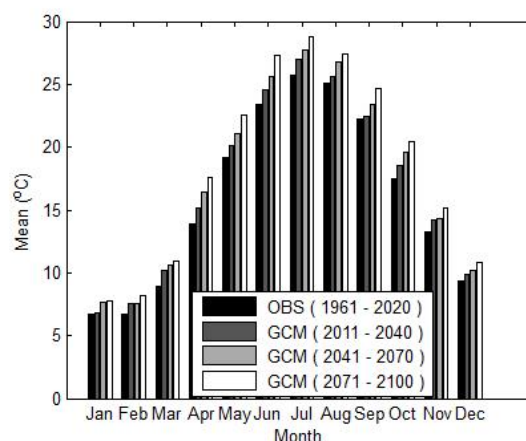
شکل ۸- تغییرات ماهانه شاخص حداکثر تعداد روزهای خشک متوالی در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 8- Bar plots of CDD index for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors



شکل ۱۱- تغییرات میانگین ماهانه دمای حداقل در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 11- Bar plots of mean for minimum temperature for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors



شکل ۱۰- تغییرات میانگین ماهانه دمای میانگین در مدل چندمکانی ساخته شده با داده‌های CGCM3.1A2

Figure 10- Bar plots of mean for mean temperature for monthly multi-site model using CGCM3.1A2 predictors

جدول ۸- نتایج نهایی مدل چندمکانی در شبیه‌سازی شاخص‌های بارش

Table 8- Prediction of multi-site models for precipitation indices

شاخص Index	میزان تغییر شاخص‌ها برای دوره‌های آینده نسبت به دوره مرجع The rate of indices for future periods compared to the based period	دوره‌های اقلیم آینده Future Periods
MEAN	کاهش به میزان ۰/۳۹ میلی‌متر در روز (Reduction of 0.29 mm per day)	2011-2041
	کاهش به میزان ۰/۳۰ میلی‌متر در روز (Reduction of 0.30 mm per day)	2041-2070
	کاهش به میزان ۰/۱۵ میلی‌متر در روز (Reduction of 0.15 mm per day)	2071-2100
Wet-day	کاهش به میزان ۶ درصد (Reduction of 6 percent)	2011-2041
	کاهش به میزان ۶/۵ درصد (Reduction of 6.5 mm percent)	2041-2070
	کاهش به میزان ۷/۲۵ درصد (Reduction of 7.25 mm percent)	2071-2100
CDD	کاهش به میزان ۰/۸ روز (Reduction of 0.8 day)	2011-2041
	کاهش به میزان ۰/۶ روز (Reduction of 0.6 day)	2041-2070
	کاهش به میزان ۰/۴۵ روز (Reduction of 0.45 day)	2071-2100

جدول ۹- نتایج نهایی مدل چندمکانی در شبیه‌سازی پارامترهای دما

Table 9- Prediction of multi-site models for mean temperature indices

پارامتر Parameter	میزان تغییر شاخص میانگین برای دوره‌های آینده نسبت به دوره مرجع The rate of mean temperature for future periods compared to the based period	دوره‌های اقلیم آینده Future Periods
دما حداکثر °C Maximum temperature	افزایش به میزان ۱/۲۲ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 1.22 °C)	2011-2041
	افزایش به میزان ۲/۱۴ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 2.14 °C)	2041-2070
	افزایش به میزان ۳/۱۷ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 3.17 °C)	2071-2100
دما میانگین °C Mean temperature	افزایش به میزان ۰/۸۵ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 0.85 °C)	2011-2041
	افزایش به میزان ۱/۶ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 1.6 °C)	2041-2070
	افزایش به میزان ۲/۵ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 2.5 °C)	2071-2100
دما حداقل °C Minimum temperature	افزایش به میزان ۰/۷۶ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 0.76 °C)	2011-2041
	افزایش به میزان ۱/۶ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 1.6 °C)	2041-2070
	افزایش به میزان ۲/۸ درجه سانتیگراد (Increase in the amount of 2.8 °C)	2071-2100

از آنجایی که این خروجی‌ها قابل استفاده در ابعاد محلی نیستند؛ با تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی این پارامترهای جوی را به پارامترهای

دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ نسبت به دوره مینا برآورد شد.

روش ارائه شده داده‌های چند ایستگاه را به خروجی‌های مدل‌های اقلیم جهانی در چند گره به طور همزمان مرتبط کرده است. از آنجایی که در این مطالعه از داده‌های دو ایستگاه رشت و بندرانزلی و دو گره از شبکه CGCM3 استفاده شده است؛ استفاده از ایستگاه‌ها و گره‌های بیشتر در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین محدودیت‌های روش ریزمقیاس‌نمایی (ASD)، خطی بودن مدل می‌باشد و پارامترهای پیچیده‌ی بارش و دما بصورت خطی مدل‌سازی شده است. لازم است بر روی این ناحیه خاص با مدل‌های غیرخطی مختلف و سناریوهای دیگر مدل‌سازی صورت گیرد و روش‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه شوند و عدم قطعیت‌ها مورد بررسی قرار گیرند.

هواشناسی همانند بارش و دما در منطقه خاص مرتبط و در نهایت اقلیم در آینده طرح می‌شوند. در این تحقیق برای نخستین بار، با کمک کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، در کنار ASD، با استفاده از داده‌های CGCM3.1A2، ریزمقیاس‌نمایی آماری چندمکانی برای ناحیه‌ای از ایران (رشت و بندرانزلی) انجام شد و اثرات اقلیم، پس از کالیبراسیون و ارزیابی مدل، با در نظر گرفتن همبستگی‌های چند مکان، بطور همزمان برای ۱۰۰ سال آینده آشکار شد. بر اساس نتایج بدست آمده در ناحیه مورد مطالعه، بیشترین میزان کاهش در میانگین بارش به مقدار ۰/۳ میلی‌متر در روز و کاهش شاخص‌های اقلیمی مانند درصد روزهای مرطوب ۷/۲۵ درصد نسبت به دوره‌ی مینا (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و بیشترین افزایش در شاخص میانگین دمای حداکثر، میانگین و حداقل به ترتیب ۳/۱۷، ۲/۵ و ۲/۸ درجه سانتی‌گراد در

## منابع

- Gaitan C.F., Hsieh W.W., and Cannon A.J., 2014. Comparison of statistically downscaled precipitation in terms of future climate indices and daily variability for southern Ontario and Quebec, Canada. *Climate Dynamics*, 43:3201-3217.
- Gangopadhyay S., Clark M., Rajagopalan B. 2005. Statistical downscaling using K-nearest neighbors. *Water Resources Research*, 41:W0202:1-23.
- Harpham C. and Wilby R.L. 2005. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. *Journal of Hydrology*, 312:235-255.
- Hessami M., Gachon P., Quard, T.B.M.J., and St-Hilaire A. 2008. Automated regression-based Statistical Downscaling tool. *Environmental Modeling and Software*, 23(6):813-834.
- IPCC. 2007. IPCC Fourth Assessment Report, Cambridge University Press.
- Jeong D.I., St-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J., and Gachon. P., 2013. Projection of future daily precipitation series and extreme events by using a multi-site statistical downscaling model over the great Montréal area, Québec, Canada. *Hydrology Research*, 44.1:147-168.
- Khalili M., Nguyen V. and Gachon P., 2013. A statistical approach to multi-site multivariate downscaling of daily extreme temperature series. *International Journal of Climatology*, 33:15-32.
- Kim J.W., Change J.T., Baker N.L., Wilks D.S., and Gates W.L. 1984. The statistical problem of climate inversion: determination of the relationship between local and large-scale climate. *Monthly Weather Review*, 112:2069-77.
- Mehrotra R., Sharma A., Nagesh Kumar D., and Reshmidevi T.V., 2013. Assessing future rainfall projections using multiple GCMs and a multi-site stochastic downscaling model. *Journal of Hydrology*, 488:84-100.
- Murphy J. 1999. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, 12:2256-2284.
- Richardson C. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*, 17:182-190.
- Liu W., Fu G., Liu C., and Charles S.P., 2012. A comparison of three multi-site statistical downscaling models for daily rainfall in the North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3):585-600.
- Wigley T.M.L., Jones P.D., Briffa K.R., and Smith G. 1990. Obtaining sub-grid-scale information from coarser resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research*, 95:1943-1953.
- Wilby R.L., Hay L.E., and Leavesley G.H., 1999. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology*, 225:67-91.
- Wilby R.L., Dawson C.W., and Barrow E.M., 2002. SDSM A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environment Model Software*, 17(2):145-57.
- World Meteorological Organization (WMO). 1988. General Meteorological Standards and Recommended Practices, Technical Regulations Basic documents, WMO: 49.
- Lu Y., and Qin X.S., 2014. Multisite rainfall downscaling and disaggregation in tropical urban area. *Journal of Hydrology*, 509: 55-65.

## Projection of Climate Change Based on Multi-Site Statistical Downscaling over Gilan area, Iran

V. Afzali<sup>1\*</sup> - M. R. Hessami Kermani<sup>2</sup>

Received: 05-07-2015

Accepted: 14-03-2016

**Introduction:** The phenomenon of climate change and its consequences is a familiar topic which is associated with natural disasters such as, flooding, hurricane, drought that cause water crisis and irreparable damages. Studying this phenomenon is a serious warning regarding the earth's weather change for a long period of time.

**Materials and Methods:** In order to understand and survey the impacts of climate change on water resources, Global Circulation Models, GCMs, are used; their main role is analyzing the current climate and projecting the future climate. Climate change scenarios developing from GCMs are the initial source of information to estimate plausible future climate. For transforming coarse resolution outputs of the GCMs into finer resolutions influenced by local variables, there is a need for reliable downscaling techniques in order to analyze climate changes in a region. The classical statistical methods run the model and generate the future climate just with considering the time variable. Multi-site daily rainfall and temperature time series are the primary inputs in most hydrological analyses such as rainfall-runoff modeling. Water resource management is directly influenced by the spatial and temporal variation of rainfall and temperature. Therefore, spatial-temporal modeling of daily rainfall or temperature including climate change effects is required for sustainable planning of water resources.

**Results and Discussion:** For the first time, in this study by ASD model (Automated regression-based Statistical Downscaling tool) developed by M. Hessami et al., multi-site downscaling of temperature and precipitation was done with CGCM3.1A2 outputs and two synoptic stations (Rasht and Bandar Anzali) simultaneously by considering the correlations of multiple sites. The model can process conditionally on the occurrence of precipitation or unconditionally for temperature. Hence, the modeling of daily precipitation involves two steps: one step, precipitation occurrence and the other step precipitation amounts and the modeling of daily temperature is performed in one step. The choice of predictor variables is one of the most influential steps in the development of statistical downscaling scheme because the decision largely determines the character of the downscaling results. It is essential to remember that predictors relevant to the local predict and should be adequately reproduced by the host climate model at the spatial scales used to condition the downscaled response. To test this approach over the current period and to compare the results with observed data, temperature and precipitation, from 2 stations, model is evaluated and calibrated by using NCEP (National Center for Environmental Prediction) reanalysis data before the use of GCMs as input variables. Then climate was predicted for three periods which each period consist of thirty years in the future, 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100. ASD reduces the problem of predictor selection and it is capable of performing all steps of statistical downscaling automatically. In order to select dominant predictors in multi-site modeling backward stepwise regression method was used; so that some predictors like 850 hPa geopotential, 850 hPa specific humidity, 1000 hPa specific humidity, screen air temperature (2m) were the most important variables for temperature models, and 850 hPa geopotential, 1000 hPa zonal velocity, 1000 hpa specific humidity, and screen air temperature (2m) played a main role in temperature modeling. For downscaling of precipitation, the amount of explained variance ( $R^2$ ) is 0.336 for NCEP data and it is 0.89, 0.922 and 0.855 for maximum, mean and minimum temperature, respectively. The results underlined certain limitations to downscale the precipitation regime and its strength compared to downscale the temperature regime. To evaluate the performance of the multi-site statistical downscaling approach, several climatic and statistical indices were developed. For instance, based on daily total precipitation, two precipitation indices was used including percentage of wet days, maximum number of consecutive dry days. The results showed the increase of the average temperature and precipitation decreases for future mainly. In this case study, the decrease of  $0.30 \text{ mm day}^{-1}$  in the average rainfall on the second period of

1-Water Engineering MSc Student, Graduate University of Advanced Technology, Kerman  
(\*-Corresponding Author Email: vesta.afzali@gmail.com)

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, ShahidBahonar University of Kerman

future, 2041-2070, and the reduction of 7.25% on the 3rd period, 2071-2100, in climate index of the percentage of wet days was predicted, compared to the based period. However, the results illustrated an increase in the mean of maximum, mean, and minimum temperature, 3.17, 2.5 and 2.8 °C, for the 3rd period of future from 2071 to 2100, respectively.

**Conclusion:** The aim of applying this new method is to demonstrate the importance of multi-site models and developing a suitable context to calculate the uncertainty of climate predictions. Further works are needed to evaluate in depth the fundamental assumption of multi-site statistical downscaling, i.e. the stability of the relationships between predictors and predictand and in altered climate and test their plausibility and consistency.

**Keywords:** ASD model, General Circulation Models, Predictand, Predictor