

بررسی پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره

مصطفی کریمی^{۱*}

الهه قاسمی^۲

چکیده

در مطالعات ارزیابی پدیده تغییر اقلیم غالباً از خروجی مدل‌های جفت شده اتمسفری- اقیانوسی گردش عمومی جو (AOGCM) بهره گرفته می‌شود که به دلیل بزرگ مقیاس بودن برون داد این مدل‌ها، فرآیند ریزمقیاس‌سازی ضروری است. تاکنون روش‌های متعددی در این زمینه ارائه شده است که هر یک از عملکرد متفاوتی برخوردار می‌باشند. در این مطالعه سعی شده است با رویکردی جدید و با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری از بین چند روش مرسوم در ریزمقیاس‌سازی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، مدل ایده‌آل انتخاب و تغییرات اقلیم در دوره آتی در زیرحوضه آند آذربایجان غربی مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش TOPSIS و با استفاده از شاخص‌های R^2 ، RMSE، MAE، MAD و NSE عملکرد الگوهای SDSM، LARS WG و روش تناسبی در شبیه‌سازی برون‌داد مدل HadCM3 در شبیه‌سازی دما و بارش در دوره پایه مورد رتبه‌بندی قرار گرفته است و در نهایت مدل SDSM به عنوان مدل مناسب‌تر برای ارزیابی چگونگی تغییرات دما و بارش در دوره آینده در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است.

واژگان کلیدی: AOGCM، ریزمقیاس کردن، TOPSIS، آذربایجان غربی.

Email: mostafakarimi.a@ut.ac.ir

۱- استادیار آب و هواشناسی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).

۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران.

مقدمه

در قرن حاضر مطالعات متعددی در زمینه پدیده تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر محیط زیست، زیست‌بوم‌ها، تنوع زیستی، منابع آب سطحی و زیرزمینی صورت گرفته است. در هر یک از این تحقیقات عمده تلاش محققان بر آشکارسازی پدیده تغییر اقلیم از طریق بررسی نوسانات بارش و دما در دوره‌های آینده است که با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو که مهم‌ترین ابزار در زمینه این قبیل مطالعات شناخته شده‌اند، صورت گرفته‌اند. از این مدل‌ها می‌توان، مدل‌هایی نظیر CCCMA-CGCM3، CSIRO-MK3، UKMO-HadCM3، MPI-ECHAM5، IPSLCM4 و UKMO-HadGEM1 را برشمرد. در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تغییر اقلیم غالباً تعدادی از مدل‌های نامبرده شده به‌عنوان سناریوهای اقلیمی به‌کار برده شده‌اند به‌طور نمونه هاف و همکاران (۲۰۰۱)، ود و همکاران نیز (۲۰۰۹) برای آشکارسازی تغییر اقلیم از خروجی مدل‌های AOGCM^۳ استفاده کردند اما آنچه در کاربرد و استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM مطرح است لزوم ریزمقیاسی خروجی این مدل‌ها قبل از استفاده در مطالعات ارزیابی تغییرات اقلیمی است. ریزمقیاس‌نمایی به روش‌های دینامیکی و آماری انجام‌پذیر است. از مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی استفاده می‌شود می‌توان به RegCM3، MM5 و PRECIS اشاره کرد و برخی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری عبارتند از: SDSM، CLIGEN، LARS-WG، USCLIMATE، GEM، MET& Roll و... در هر دو روش دینامیکی و آماری خروجی مدل‌های GCM به‌عنوان ورودی مدل‌های آماری و دینامیکی در نظر گرفته می‌شود و مدل‌های مذکور برای منطقه‌ای کوچک اجراء می‌شوند. مدل‌های دینامیکی منطقه‌ای دارای دقت فضایی مناسبی برای ارزیابی‌های اقلیمی بوده و همچنین فرآیندهای ریزمقیاس جوی و اقلیمی تا حد ممکن در آن‌ها لحاظ می‌شوند. لازم به ذکر است در مدل‌های آماری علاوه بر داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، داده‌های دیدهبانی شده نیز جهت کشف ارتباط آماری بین داده‌های مدل گردش عمومی جو در گذشته و

3- Atmospheric-Ocean General Circulation Model

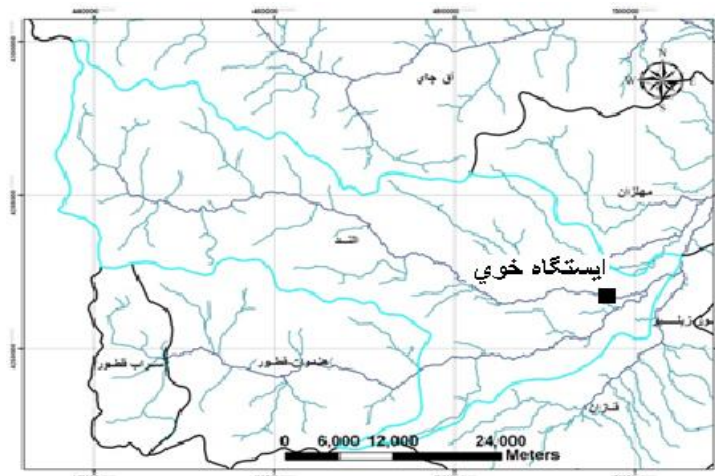
داده‌های دیده‌بانی واقعی مورد نیاز است. در این زمینه می‌توان از مطالعات هاشمی و شمس‌الدین (۲۰۱۰)، پیرمردیان و همکاران (۱۳۹۵)، خورانی و جمالی (۱۳۹۵) نام برد. علی‌رغم اینکه هر یک از مطالعات انجام شده نتایج قابل قبولی را به همراه داشته‌اند ولیکن به موضوعاتی نظیر بهره‌گیری از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب مدل‌ها، سناریوها و یا بحث عدم قطعیت در نتایج حاصل از این مدل‌ها کمتر پرداخته شده است. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه کاربرد تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در حوزه‌های مهندسی عمران و بالاجه مدیریت منابع آب صورت گرفته‌است اما استفاده از این رویکرد در مطالعات پدیده‌های اقلیمی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به مطالعات راجو و کومار (۲۰۱۴)، روشن و همکاران (۲۰۱۲)، کاظمی‌راد و همکاران (۲۰۱۲)، اصغری و همکاران (۲۰۱۳) و خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۸۵) اشاره کرد. رضایی‌زمان و همکاران نیز (۱۳۹۲: ۱۲۴۲) برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده مناسب برای متغیرهای دما و بارش در مدل SDSM از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش TOPSIS استفاده کنند.

با توجه به آنچه بیان شد در این مطالعه در نظر است با رویکرد استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب الگوی ریزمقیاس‌نمایی مناسب سناریوهای اقلیمی از بین مدل‌های متداول و پرکاربرد در زمینه ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM و LARS WG) و همچنین روش ریزمقیاس‌نمایی تناسبی، مناسب‌ترین الگو برای آشکارسازی پدیده تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه (زیرحوضه‌الند) انتخاب و سپس با استفاده نتایج الگوی انتخابی پدیده تغییر اقلیم در آینده مورد ارزیابی قرار گیرد. به بیان دیگر هدف از این مطالعه بررسی عملکرد الگوهای زیرمقیاس‌نمایی در انتخاب شبیه‌سازی‌های مناسب جهت ارزیابی تغییر اقلیم در آینده می‌باشد. به‌طوری‌که از بین مدل‌ها و یا به‌عبارتی الگوها و روش‌هایی که جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از خروجی مدل‌های AOGCM مطرح هستند مدلی را انتخاب کرد که بتواند همبستگی بهتری با داده‌های مورد بررسی (در اینجا دما و بارندگی) در دوره مشاهداتی داشته باشد و این متغیرها را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده باشد. پس از انتخاب این الگو و پیاده‌سازی آن بر یک یا چند سناریوی اقلیمی (مدل‌های

AOGCM) از سناریوی تغییر اقلیم به‌دست آمده می‌توان برای ارزیابی تغییرات دما و بارش در دوره آتی استفاده کرد.

منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه الوند یکی از زیر حوضه‌های رودخانه قطورچای در شمال استان آذربایجان غربی می‌باشد. در شکل (۱) این حوضه به‌همراه موقعیت ایستگاه همدید خوی نشان داده شده است. سری زمانی مقادیر دما و بارش برای دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) یا به عبارتی دوره پایه برای ایستگاه مورد مطالعه به‌صورت روزانه از سازمان هواشناسی کشور دریافت و مورد کنترل کیفی قرار گرفته است. لازم به ذکر است سری زمانی داده‌های دما و بارش مورد نیاز برای استفاده از روش تناسبی در دوره پایه از پایگاه داده‌های <http://ccds-dscc.ec.gc.ca> استخراج شده است. به‌طوری که سری زمانی مقادیر دما و بارندگی ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های AOGCM در دوره پایه به‌صورت ماهانه از سلولی که منطقه مورد نظر در آن واقع است از آدرس فوق استخراج و میانگین ماهانه دما و بارش آن محاسبه شده است.



شکل (۱) منطقه مورد مطالعه (زیرحوضه الوند)

مواد و روش‌ها

سناریوهای تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار

همان‌طور که پیش‌تر به‌طور خلاصه بیان شد اغلب پیش‌بینی‌های اقلیمی از آینده تا حد زیادی وابسته به غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌باشد و در قالب "سناریوهای انتشار" که پیش‌بینی آتی از غلظت آن‌ها در جو می‌باشند، به‌وسیله مدل‌های AOGCM شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل‌ها قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره طولانی مدت با استفاده از سناریوهای تأیید شده‌ای نظیر A2, B2, A1FI و B1 مدلسازی نمایند (Fowler et al., 2007: 1560; Wilby et al. 1998:2998). در این مطالعه از بین مدل‌های AOGCM مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 که حاکی از انتشار بیش‌تر گازهای گلخانه‌ای به‌دلیل تأکید بر رسوم خانوادگی، رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت اقتصادی می‌باشد، انتخاب شده است.

تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی

مدل LARS WG: این مدل یکی از معروف‌ترین مدل‌ای مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به‌کار می‌رود اولین نسخه آن در بوداپست طی سال ۱۹۹۰ به‌عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمایی آماری ابداع شد.

مدل SDSM: این مدل در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شده است و در آن اقلیم محلی توسط اقلیم بزرگ مقیاس منطقه در فرم $R=F(x)$ بیان می‌شود. که R نشان‌دهنده متغیر اقلیم محلی است که ریز مقیاس شده است. و F یک تابع تعیین مشروط به X است که بر اساس آموزش و اعتبارسنجی داده‌های تاریخی به‌دست می‌آید.

کوچک مقیاس کردن مکانی تناسبی Proportional Downscaling: در این روش، متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج

می‌شود که منطقه مورد مطالعه در آن قرار می‌گیرد (ویلیبی و همکار، ۲۰۰۶، به نقل از آشفته و همکار، ۱۳۸۶: ۳۷).

ساخت سناریوهای تغییر اقلیم

با در دست داشتن شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های گذشته از راه مدل‌های AOGCM می‌توان با محاسبه تغییرات متغیر اقلیمی مورد نظر در دوره‌های آتی نسبت به دوره گذشته، سناریوی تغییر اقلیم آن متغیر را به‌دست آورد. در این حالت برای دما از تفاوت بین دو متغیر و برای بارندگی از نسبت بین آن‌ها استفاده می‌شود (مساح و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۰۳).

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad (1)$$

$$\Delta P_i = (\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}}) \quad (2)$$

در روابط فوق ΔT_i به‌ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما برای میانگین دراز مدت ۳۰ ساله برای هر ماه (۱۲ ≤ i ≤ ۱) $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (در اینجا (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، $\bar{T}_{GCM, base, i}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) برای هر ماه می‌باشد. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

هم‌چنین برای ریز مقیاس کردن زمانی داده‌ها از روش عامل تغییر^۴ استفاده می‌شود. در این روش برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) افزوده می‌شود (ویلیبی و همکار، ۲۰۰۶، به نقل از آشفته و همکار، ۱۳۸۶: ۳۷):

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (3)$$

4- Change factor

$$P = P_{obs} + \Delta P \quad (۴)$$

در رابطه (۳) T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰)، T سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما در دوره آتی (۲۰۱۰-۲۰۳۹) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم ریزمقیاس شده می‌باشد. در رابطه (۴) برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

تصمیم‌گیری چندمعیاره

تصمیم‌گیری چندمعیاره^۵ شامل یک‌سری از تکنیک‌ها از جمله جمع وزن‌دهی یا تحلیل‌های همگرایی است که اجازه می‌دهد، طیفی از معیارهای وابسته به یک مبحث امتیازدهی و سپس به‌وسیله کارشناسان و گروه‌های ذی‌نفع رتبه‌بندی شوند تصمیم‌گیری چند معیاره بر یک فرآیند دادن ارزش به گزینه‌هایی که به‌وسیله چندمعیار ارزیابی شده‌اند، دلالت دارد (هیگز، ۲۰۰۶ به نقل از سپهر ۱۳۹۱: ۳۴). تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به دو طبقه وسیع زیر تقسیم شود: تصمیم‌گیری چندشاخصه^۶ و تصمیم‌گیری چندهدفه^۷. اگر مسأله مورد ارزیابی، یک مجموعه محدود از گزینه‌ها به‌منظور انتخاب بهترین آن‌ها بر اساس وزن‌های مربوط به ویژگی‌های آن گزینه‌ها باشد، این مسأله یک تصمیم‌گیری چندشاخصه است. تصمیم‌گیری چندهدفه به انتخاب بهترین گزینه‌ها بر مبنای یک‌سری اهداف کم و بیش ناسازگار سروکار دارد. مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه به‌منظور طراحی به‌کار گرفته می‌شوند، در حالی که مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه به‌منظور انتخاب گزینه برتر استفاده می‌گردند. روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه زیادی به‌منظور ارزیابی اوزان برای شاخص‌های موجود در یک تصمیم و انتخاب گزینه برتر توسعه یافته‌اند، که از این میان می‌توان به روش‌هایی نظیر روش آنتروپی^۸ روش کم‌ترین مجزورات وزین شده^۹ و

5- MCDM

6- Multi-attribute

7- Multi-object

8- Entropy Method

9- Least Weighted Square

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^{۱۰} اشاره کرد. در یک تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌توان از روش‌هایی مانند روش دلفی برای گزینش معیارهای مناسب برای تصمیم‌گیری استفاده کرد و از روش‌هایی مانند AHP یا TOPSIS^{۱۱} برای وزندهی به این معیارها و نهایتاً تعیین درجه اهمیت گزینه‌های مورد تصمیم‌گیری در مسأله مورد نظر بهره برد. به‌طور کلی روش تصمیم‌گیری چند اخصه به دو گروه روش‌هایی که مبتنی بر رتبه‌بندی گزینه‌ها است و به روش‌های رتبه‌بندی^{۱۲} شناخته می‌شوند مانند AHP، TOPSIS و روش‌هایی که لزوماً به رتبه‌بندی گزینه‌ها منتهی نمی‌شود و بر اساس روابط رتبه-برتری است و به روش‌های غیررتبه‌ای یا نارتبه‌ای^{۱۳} معروفند و از آن جمله می‌توان به انواع روش‌های الکترا و پراموسه اشاره نمود. اما مسأله قابل تأمل عدم اطمینان در الویت‌بندی شاخص‌ها و معیارها و تردید در تصمیم‌گیری‌ها است. در چنین شرایطی می‌توان از تئوری فازی، بهره جست این روش این امکان را فراهم می‌کند تا با انتخاب و طبقه‌بندی شاخص‌ها در شرایطی که با اطلاعات مبهم و غیردقیق روبرو هستیم، همراه با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری به راه‌حل بهینه دست یابیم (سپهر، ۱۳۹۱: ۳۵).

روش تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS

روش TOPSIS یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه MADM می‌باشد که در آن با استفاده از معیارها و گزینه‌ها و با ارزیابی و نمره‌دهی به هر معیار، گزینه برتر انتخاب خواهد شد (عباد اردستانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۷): در این روش m عامل یا گزینه به‌وسیله فرد یا افراد تصمیم‌گیرنده با توجه به n معیار یا شاخص رتبه‌بندی می‌شود این تکنیک بر این مفهوم بنا شده که هر عامل یا گزینه انتخابی باید کم‌ترین فاصله را با جواب ایده‌آل مثبت و بیش‌ترین فاصله را با جواب ایده‌آل منفی داشته باشد. از مزایای روش TOPSIS می‌توان به دخالت روش‌های کمی و کیفی به‌صورت توأمان، تغییر داده‌ها و

10- AHP : Analytical Hierarchy Process

11-Technique For Order Preferences By Similarity To Ideal

12- Ranking Methods

13- Outranking Methods

اطلاعات ورودی به سیستم، افزایشی یا کاهشی بودن مطلوبیت شاخص‌ها و مطلوب بودن و سرعت بالایی عملکرد سیستم اشاره کرد. اولویت‌بندی در این سیستم با منطق شباهت به جواب ایده‌آل انجام می‌شود. بر این اساس گزینه انتخابی کوتاه‌ترین فاصله را با جواب ایده‌آل و دورترین فاصله با بدترین جواب را دارد. بدین منظور ابتدا مساله تصمیم‌گیری با توجه به شاخص‌ها و گزینه‌های مرتبط به صورت یک ماتریس تصمیم‌گیری مطابق با شکل ذیل بیان می‌گردد.

$$D = \begin{pmatrix} 1 & X_1 & * & X_j & * & X_n \\ A_1 & X_{11} & * & X_{1j} & * & X_{1n} \\ * & * & * & * & * & * \\ A_i & X_{i1} & * & X_{ij} & * & X_{in} \\ * & * & * & * & * & * \\ A_m & X_{m1} & * & X_{mj} & * & X_{mn} \end{pmatrix}$$

در این ماتریس A_m ها گزینه مورد بررسی در اینجا یکی از الگوهای ریزمقیاس‌نمائی می‌باشند که در مورد آن‌ها انتخاب یا رتبه‌بندی صورت می‌گیرد. X_n ها نیز شاخص‌های چندگانه (مثلاً MAE، RMSE، MAD، NSE و R) هستند. مقدار A_{mn} مقدار عددی به‌دست آمده از گزینه m ام و شاخص n ام می‌باشد.

$$\begin{aligned} A1 &= \text{روش تناسبی} & X1 &= \text{MAE (Mean Absolute Error)} \\ A2 &= \text{LARS} & X2 &= \text{RMSE (Root Mean Square Error)} \\ A3 &= \text{SDSM} & X3 &= \text{MAD (Mean Absolute Deviation)} \\ & & X4 &= \text{NSE (Nash- Sutcliffe efficiency)} \\ & & X5 &= \text{R2 (Correlation coefficient)} \end{aligned}$$

پس از استخراج ماتریس برای هر یک از الگوهای ریزمقیاس‌نمائی اولین گام نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم‌گیری است که سعی می‌شود مقیاس‌های موجود در ماتریس تصمیم را بدون مقیاس نماید. به این ترتیب که هر کدام از مقادیر بر اندازه بردار مربوط به همان شاخص تقسیم می‌شود. در نتیجه هر درایه r_{ij} از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}}$$

دومین گام وزن دادن به ماتریس نرمالایزه شده می باشد. چون ماتریس تصمیم در واقع پارامتری است و لازم است کمی شود، به این منظور تصمیم گیرنده برای هر شاخص وزنی را معین می کند. مجموعه وزن‌ها (w) در ماتریس نرمالایز شده (R) ضرب می شود.

$$W = (w_1 \text{ و } w_2 \text{ و } \dots \text{ و } w_j \text{ و } \dots \text{ و } w_n)$$

$$V = \sum_{j=1}^n w_j = 1$$

$$\begin{bmatrix} v_{i1} & v_{i2} & * & v_{ij} & * & v_{in} \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ v_{i1} & v_{i2} & * & v_{ij} & * & v_{in} \\ * & * & * & * & * & * \\ v_{m1} & v_{m2} & * & v_{mj} & * & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 v_{i1} & w_2 v_{i2} & * & w_j v_{ij} & * & w_n v_{in} \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ w_1 v_{i1} & w_2 v_{i2} & * & w_j v_{ij} & * & w_n v_{in} \\ * & * & * & * & * & * \\ w_1 v_{m1} & w_2 v_{m2} & * & w_j v_{mj} & * & w_n v_{mn} \end{bmatrix}$$

گام سوم: تعیین راه حل ایده آل و راه حل ایده آل منفی می باشد.

از نظر کارایی، معیارهای عملکرد در انتخاب الگو متفاوت عمل می نمایند. به عنوان مثال هر چه میزان RMSE کمتر و مقدار R بیش تر باشد، توانایی مدل در شبیه سازی دوره پایه بالا بوده است. بدین ترتیب شاخص هایی که کاهش آن ها در عملکرد مدل موثر است به عنوان شاخص مثبت و شاخص هایی که افزایش آن ها در عملکرد مدل موثر است، به عنوان شاخص منفی در نظر گرفته می شوند. دو گزینه مجازی A^* و A^- را به صورت های زیر تعریف می کنیم:

$$A^* = \{(\max_i v_{ij} | j \in J) \text{ و } (\min_i v_{ij} | j \in J') = 1 \text{ و } 2 \text{ و } \dots \text{ و } m\} = \{V_1^* \text{ و } V_2^* \text{ و } \dots \text{ و } V_j^* \text{ و } \dots \text{ و } V_n^*\} \text{ (گزینه ایده آل مثبت)}$$

$$A^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in J) \text{ و } (\max_i v_{ij} | j \in J') = 1 \text{ و } 2 \text{ و } \dots \text{ و } m\} = \{V_1^- \text{ و } V_2^- \text{ و } \dots \text{ و } V_j^- \text{ و } \dots \text{ و } V_n^-\} \text{ (گزینه ایده آل منفی)}$$

$$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\} \rightarrow \text{شاخص های مثبت}$$

$$J' = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\} \rightarrow \text{شاخص های منفی}$$

در اینجا A^* و A^- به ترتیب معرف حداکثرترین و حداقل‌ترین میزان شاخص‌های مثبت و منفی می‌باشد.

گام چهارم: به دست آوردن اندازه فاصله‌ها است فاصله بین هر گزینه n بعدی را از روش اقلیدسی می‌سنجیم. یعنی فاصله گزینه i را از گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی می‌یابیم.

$$i=1,2,3,\dots,m S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \text{و} \quad i=1,2,3,\dots,m S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

گام پنجم: محاسبه نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل است این معیار از طریق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$C_{i+} = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}} \quad 0 < C_{i+} < 1$$

ملاحظه می‌شود اگر: $A_i = A^*$ آنگاه $C_{i+} = 1$ و اگر $A_i = A^-$ آنگاه $C_{i+} = 0$

مشخص است که هر چه فاصله گزینه A_i از راه‌حل ایده‌آل کم‌تر باشد نزدیکی نسبی به ۱ نزدیک‌تر خواهد بود.

گام ششم: رتبه‌بندی گزینه‌ها است. نهایتاً گزینه‌ها را بر اساس ترتیب نزولی رتبه‌بندی می‌کنیم. و در نهایت به کمک تکنیک تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS مدل‌ها به ترتیب اولویتی که از این روش به دست می‌آید، رتبه‌بندی می‌شوند.

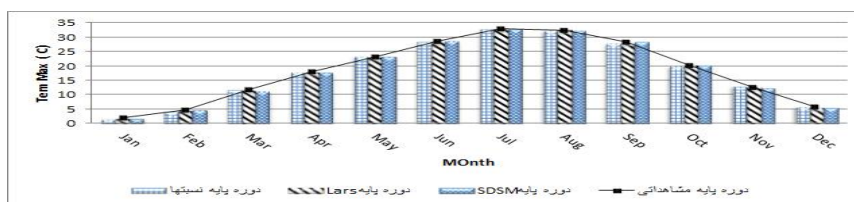
لازم به توضیح است همان‌گونه که خوش اخلاق و همکاران (۱۳۸۵) در مطالعه خود با عنوان رویکردی از روش TOPSIS در تعیین رتبه‌بندی خشکسالی ادغان داشته‌اند این روش برای الویت‌بندی و رتبه‌بندی در زمینه اقتصادی، اجتماعی و نظامی است و ایشان سعی داشته‌اند از این روش در زمینه مهندسی اقتصادی و رتبه‌بندی خشکسالی استفاده کنند که به نتایج قابل قبولی رسیده‌اند که در مطالعات روشنی و همکاران (۲۰۱۲) و کاظمی‌راد و همکاران (۲۰۱۲) نیز به تأیید رسیده است. هم‌چنین رضایی زمان و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از این روش به انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مناسب (predictors) که مرحله‌ای حساس در شبیه‌سازی در مدل SDSM است پرداخته‌اند که نتایج قابل قبولی داشته است از

این‌روی با توجه به حساسیت انتخاب الگوی کوچک مقیاس نمایی در تحلیل نتایج حاصل از برون‌داد مدل‌های AOGCM در پژوهش حاضر به این مهم پرداخته شده است تا رویکردی جدید در مطالعات تغییر اقلیم مدنظر قرار گیرد.

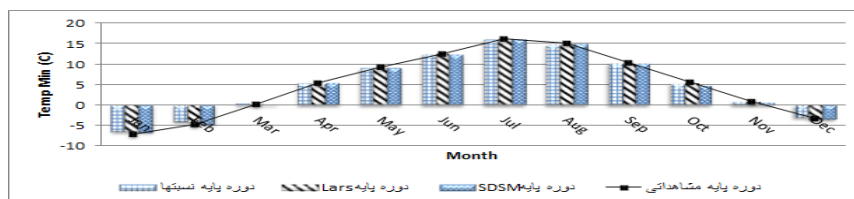
یافته‌ها و بحث

ارزیابی و انتخاب الگوی ریزمقیاس‌نمایی

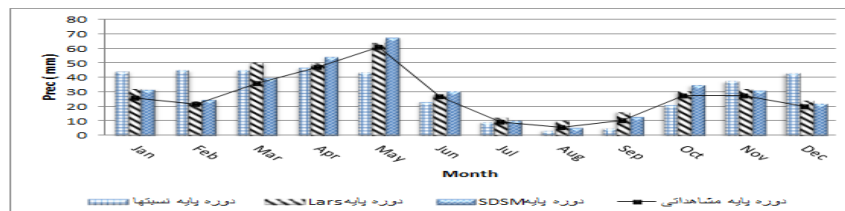
در ابتدا به‌منظور صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی الگوهای Lars، SDSM و روش زیرمقیاس‌نمایی تناسبی پارامترهای متوسط دمای حداقل و حداکثر ماهانه و بارش خروجی از این الگوها برای دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ با داده‌های مشاهداتی همین دوره در ایستگاه سینوپتیک خوی به‌صورت گرافیکی مقایسه شده که در ذیل ارائه شده است.



شکل (۲) مقایسه گرافیکی مقادیر مدل شده سه الگوی مورد بررسی و دیدبانی شده میانگین دمای حداکثر ماهانه در ایستگاه سینوپتیک خوی در دوره پایه



شکل (۳) مقایسه گرافیکی مقادیر مدل شده سه الگوی مورد بررسی و دیدبانی شده میانگین دمای حداقل ماهانه در ایستگاه سینوپتیک خوی در دوره پایه



شکل (۴) مقایسه گرافیکی مقادیر مدل شده سه الگوی مورد بررسی و دیدبانی شده میانگین دمای بارش ماهانه در ایستگاه سینوپتیک خوی در دوره پایه

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر میانگین درجه حرارت حداکثر و حداقل ماهانه در همه ماه‌های سال با دقت خوبی مدل شده است اما مقادیر بارش دارای نوساناتی در الگوهای مورد بررسی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به دوره پایه است به‌طوری‌که الگوی Lars شبیه‌سازی نزدیکتری در ماه‌های فوریه، آوریل، می و اکتبر با داده‌های مشاهداتی داشته است. الگوی SDSM در اکثر ماه‌های سال میزان بارش نسبت به داده‌های مشاهداتی را بیش‌تر شبیه‌سازی کرده است اما میزان متوسط بارش دراز مدتی که توسط این الگوی پیش‌بینی شده است نسبت به الگوی Lars به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر است. در خصوص نتایج حاصل از روش نسبت‌ها نیز در فاصله ماه‌های جون تا اکتبر میزان متوسط بارش ماهانه نسبت به دوره مشاهداتی کمتر و در سایر ماه‌های سال بیش‌تر شبیه‌سازی شده است اما بررسی ضریب همبستگی بین داده‌های بارش شبیه‌سازی شده و دوره پایه حاکی از توانایی هر سه الگو در شبیه‌سازی بارش منطقه مورد مطالعه می‌باشد (جدول ۱) نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های عملکرد هر یک از الگوها در جدول (۱) ارائه شده است. لذا پس تأیید توانایی هر سه الگو برای ارزیابی اقلیم آینده با توجه به مشاهدات گرافیکی و شاخص‌های عملکرد هر یک از آن‌ها به‌منظور انتخاب بهترین الگو با رویکرد TOPSIS وزن هر یک از شاخص‌های R^2 , RMSE, MAE, MSE برای هریک از الگوها محاسبه شد، که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. پس از آن با توجه به شرحی که در بخش روش‌ها به تفصیل توصیح داده شده است مقدار C_i برای هریک از الگوها ریزمقیاس نمایی محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۳) قابل دستیابی است. لذا همان

گونه که قابل مشاهده است بر این اساس الگوی SDSM برای هر سه متغیر مورد بررسی یعنی دمای حداقل و حداکثر و بارش به‌عنوان مدل ارجح برای شبیه‌سازی اقلیم آینده معرفی شده است.

جدول (۱) شاخص عملکرد الگوهای مختلف ریزمقیاس نمایی بر متغیر بارش و دما

گزینه	معیار الگو	R	RMSE	MAE	MAD	NSE
بارش	روش نسبت‌ها	۷۴/۶۱	۱۳/۰۶	۰/۸۳	۴/۴۵	۰/۲۷
	Lars-WG	۸۹/۵۸	۵/۹۷	۰/۴۳	۵/۱۰	۰/۸۵
	SDSM	۹۰/۹۷	۴/۸۷	۰/۳۶	۴/۲۹	۰/۹۰
دمای بیشینه	روش نسبت‌ها	۹۰/۳۶	۲/۴۶	۰/۳۰	۳/۶۶	۰/۸۱
	Lars-WG	۹۱/۲۹	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۱
	SDSM	۹۱/۲۹	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۰۳۲	۱
دمای کمینه	روش نسبت‌ها	۹۰/۳۶	۳/۸۹	۰/۳۰	۳/۶۶	۰/۸۱
	Lars-WG	۹۱/۲۶	۰/۳۱	۰/۰۲	۰/۱۴	۱
	SDSM	۹۱/۲۵	۰/۲۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۱

جدول (۲) وزندهی شاخص‌های عملکرد برای هر یک از متغیرهای اقلیمی

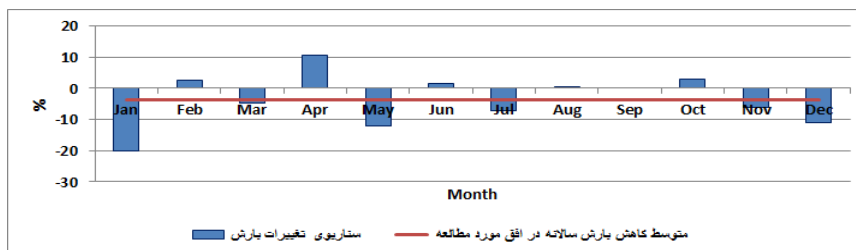
معیار	R	RMSE	MAE	MAD	NSE
بارش	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۲۳
دمای بیشینه	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۰۷
دمای کمینه	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۰۸

جدول (۳) مقدار Ci برای هر الگو و انتخاب جواب ارجح

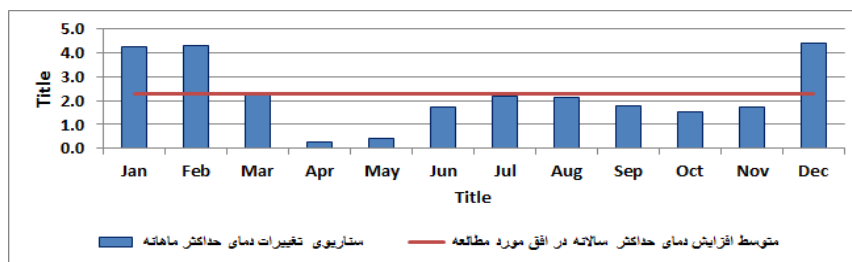
گزینه	دمای بیشینه	دمای کمینه	بارش	متغیر اقلیمی
روش نسبت‌ها	۰/۳۹۹	۰/۳۹۸	۰/۰۶۵	روش نسبت‌ها
Lars WG	۰/۹۶۶	۰/۹۶۶	۰/۸۵۵	Lars WG
SDSM	۱	۱	۱	SDSM

سناریوهای تغییرات دما و بارش در افق ۲۰۴۰-۲۰۱۱

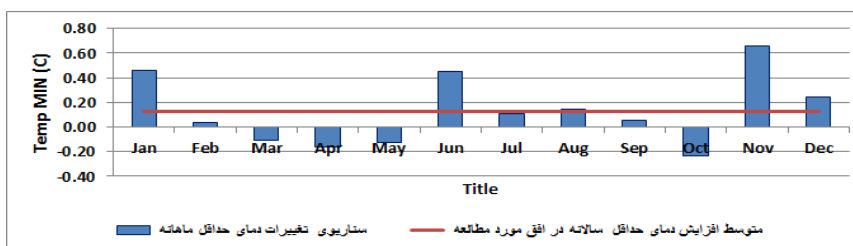
پس از انتخاب الگوی ارجح، داده مقادیر بارش، دمای حداکثر و حداقل با استفاده از برون داد مدل HadCM3 سناریوی A2 و الگوی SDSM برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ شبیه‌سازی شد. در شکل‌های (۵) الی (۷) سناریوهای تغییرات بارش و دما در افق ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه ارائه شده است همان‌گونه که مشاهده می‌گردد بیش‌ترین سناریوی کاهش بارش در ماه ژانویه خواهد بود و صرف‌نظر از ماه‌های گرم سال (اگوست و سپتامبر) متوسط کاهش بارش سالانه در افق مورد مطالعه نزدیک به ۴ درصد خواهد بود. سناریوی ماهانه تغییرات دمای حداکثر متوسط ماهانه (شکل ۶) نشان می‌دهد حداکثر دمای ماهانه در ماه‌های سرد سال افزایش یافته است و متوسط افزایش دمای حداکثر سالانه در افق مورد مطالعه در حدود ۲/۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. بررسی متوسط دمای حداقل در افق مورد مطالعه نشان می‌دهد به مانند حداکثر دمای ماهانه بیش‌ترین تغییرات در ماه‌های سرد قابل مشاهده است و متوسط حداقل دمای ماهانه در این ماه‌ها کاهش یافته که حاکی از گرم شدن درجه حرارت در این ماه‌ها نسبت به دوره پایه می‌باشد. متوسط تغییرات دمای حداقل سالانه ۱۳/۰+ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است.



شکل (۵) سناریوی تغییرات بارش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (برحسب درصد)

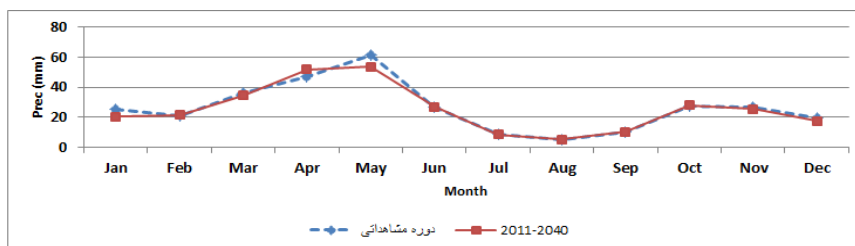


شکل (۶) سناریوی تغییرات دمای حداقل در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ (بر حسب سانتی‌گراد)

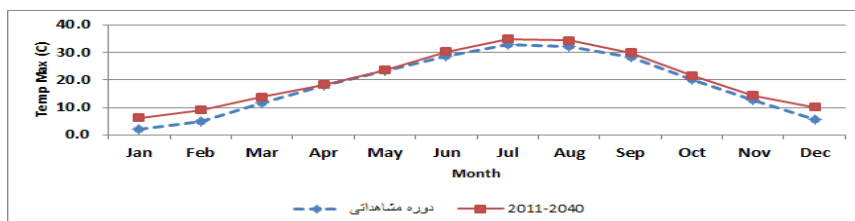


شکل (۷) سناریوی تغییرات دمای حداکثر در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ (بر حسب سانتی‌گراد)

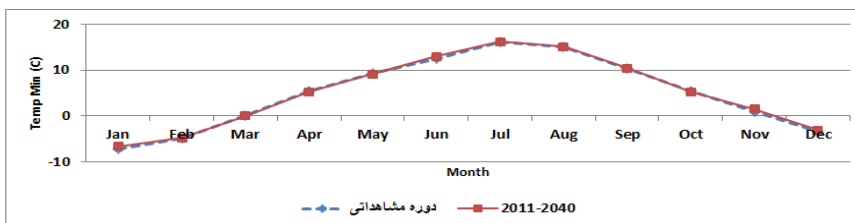
در شکل‌های (۸) الی (۱۰) تغییرات متغیرهای دما و بارش در دوره پایه و افق مورد مطالعه نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد میانگین دمای حداکثر ماهانه در تمامی ماه‌های سال نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. همچنین دمای حداقل ماهانه نیز نسبت دوره پایه در برخی ماه‌ها بدون تغییر و یا اندکی افزایش داشته که میزان آن نسبت به افزایش میانگین دمای حداکثر ماهانه کمتر است. در خصوص تغییرات بارش، بیش‌ترین افزایش بارش در ماه آوریل نسبت به دوره پایه مشاهده می‌گردد.



شکل (۸) مقایسه نتایج دوره شبیه سازی میانگین ماهانه بارندگی ایستگاه مورد مطالعه تحت سناریوی A2 در دوره آتی و دوره پایه (برحسب میلی‌متر)



شکل (۹) مقایسه نتایج دوره شبیه سازی میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه مورد مطالعه تحت سناریوی A2 در دوره آتی و دوره پایه (بر حسب درجه سانتی‌گراد)



شکل (۱۰) مقایسه نتایج دوره شبیه سازی میانگین دمای حداقل ماهانه ایستگاه مورد مطالعه تحت سناریوی A2 در دوره آتی و دوره پایه (بر حسب درجه سانتی‌گراد)

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه عرضه رویکردی جدید در انتخاب مدل مناسب ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های AOGCM با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمنظوره و روش TOPSIS است بدین منظور در ابتدا مقادیر دما و بارش دوره پایه با استفاده از مدل‌های LARS و

SDSM ریزمقیاس شدند و برای استفاده از روش تناسبی با توجه به موقعیت ایستگاه همدید در منطقه مورد مطالعه اطلاعات دما و بارش از سلول مورد نظر استخراج شد. سپس با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، میانگین خطای انحراف از معیار و... عملکرد هر یک از روش‌ها در شبیه‌سازی داده‌های دوره پایه نسب به دوره مشاهداتی محاسبه گردید و بر این اساس با استفاده از تکنیک آنتروپی هر یک از شاخص‌های عملکرد برای هر یک از متغیرهای میانگین ماهانه دمای بیشینه، میانگین ماهانه دمای کمینه و میانگین ماهانه بارش وزندهی شدند. سپس با استفاده از تکنیک TOPSIS و وزندهی هر یک از شاخص‌ها (عملکردها) برای هر گزینه (روش ریزمقیاس‌سازی) ماتریس بی‌مقیاس موزن تهیه شده، سپس شاخص‌های R و NSE به عنوان شاخص مثبت و مابقی شاخص‌ها به عنوان منفی در نظر گرفته شدند با تعیین مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین جواب در هر ستون و تعیین فاصله هر یک از گزینه‌ها (روش‌های ریزمقیاس‌نمایی) از مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین جواب در نهایت مدل SDSM به عنوان جواب ارجح مشخص شد. و با استفاده از مدل این چگونگی تغییرات اقلیم در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با استفاده از مدل HadCM3 و سناریوی A2 مورد ارزیابی قرار گرفت. که نتایج حاکی از افزایش میانگین دمای حداکثر ماهانه و تغییرات اندک میانگین دمای حداقل ماهانه نسبت به دوره پایه می باشد که در مطالعات رضایی و زمان و همکاران (۱۳۹۲) نیز قابل مشاهده است. تغییرات بارش در ماه‌های ژانویه و می نسبت به دوره پایه در مقایسه با سایر ماه‌ها کاهش قابل‌ملاحظه‌تری داشته و در ماه آوریل نسبت به ماه‌هایی که با افزایش بارش مواجه‌اند، به نسبت افزایش بیش از یک تا دو میلی‌متری داشته است.

منابع

- آشفته، پریسا سادات و علیرضا مساح بوانی (۱۳۸۶)، «تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی سیلاب در دوره های آتی (مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی)»، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب (بهمن ماه ۱۳۸۶)، صص ۴۸-۳۱.
- پیرمردیان، حسین؛ هادی‌نیا و افشین اشرف‌زاده (۱۳۹۵)، «پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه، تابش و بارش در ایستگاه سینوپتیک رشت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم»، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۰، شماره ۵۵، بهار ۱۳۹۵، صص ۴۴-۲۹.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ محمدی، حسین و غلامرضا روشن (۱۳۸۵)، «رویکردی از روش Topsis در پهنه‌بندی خشکسالی چند ایستگاه استان خوزستان»، نشریه علوم جغرافیایی، جلد پنجم، شماره ۶ و ۷، پاییز و زمستان ۱۳۸۴-بهار و تابستان ۱۳۸۵، صص ۱۲۷-۱۰۵.
- خورانی، اسداله و زهرا جمالی (۱۳۹۵)، «اثر تغییر اقلیم بر شدت و مدت خشکسالی در ایستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک (بندرعباس و شهرکرد) تحت مدل HADCM3»، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۰، شماره ۵۷، پاییز ۱۳۹۵، صص ۱۱۵-۱۳۱.
- دلاور، مجید (۱۳۸۴)، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، صص ۱۰۶-۱.
- سپهر، عادل؛ اختصاصی، محمدرضا و سیدعلی المدرسی (۱۳۹۱)، «ایجاد سامانه شاخص‌های بیابان‌زایی بر اساس DPSIR»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، پیاپی ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱، صص ۵۰-۳۳.
- رضایی زمان، مصطفی؛ مرید، سعید و مجید دلاور (۱۳۹۲)، «ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوضه سیمینه رود»، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۷، شماره ۶ بهمن - اسفند ۱۳۹۲، صص ۱۲۴۷-۱۲۵۹.
- عباد اردستانی، مهشید؛ کیانی‌راد، علی و امیر محمدی‌نژاد (۱۳۹۲)، «مدیریت بهینه تامین آب با رویکرد توسعه پایدار (مطالعه موردی حوضه آبریز پلدشت آذربایجان غربی)»، اولین همایش چالش‌های منابع آب و کشاورزی، انجمن آبیاری، زهکشی ایران، اصفهان، بهمن ماه ۱۳۹۲، صص ۱-۱۸.

- علیرضا، مساح بوانی؛ مرید، سعید و محسن محمدزاده (۱۳۸۹)، «مقایسه روش‌های کوچک مقیاس کردن مدل‌های AOGCM در بررسی تغییر اقلیم»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۶، شماره ۴، ۱۳۸۹، صص ۹۹-۱۱۰.

- Asgari Saraskanroud, S, Jalali Onsrودي T. and Zeinali B. (2013), "The variability analysis of stats tourism cities locating in the Uremia lake basin", *Journal of Regional Planning* 2013, Vol.3, No.11, 2013.
- Diaz-Nieto and Wilby. (2005), "A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames", United Kingdom, DOI:10.1007/s10584-005-1157-6.
- Fowler H.J, Blenkinsop S. and Tebaldib C, (2007), "Review Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling", *Int. J. Climate*, 27: 1547-1578.
- Ghosh, S., and Mujumdar P.P, (2008), "Statistical downscaling of GCM simulations to stream flow using relevance vector machine", *Adv. Water Resours*, 31, 132-146, doi:10.1016/j.advwatres.2007.07.005.
- Hashemi, M., Shamseldin, A. and Bruce W.M. (2010), "Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed", *Stoch Environ Res Risk Assess* (2011) 25:475-484.
- Higgs, G. (2006), "Integrating multicriteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation", *Journal of Waste Management & Research*, Vol 24, PP. 105-117.
- Huth, R., Prague, J.K., Republic, C, and Dubrovsky, M. (2001), "Time Structure of Observed", GCM-Simulated, Downscaled, and Stochastically Generated Daily Temperature Series, *Huthetal*: 4047-4056.
- Hwang C.L. and Yoon K.P. (1995), "*Multiple attribute decision making: an introduction*", London, Sage Publication.

- IPCC, (2007), “**Climate Change**”, Cambridge University Press, New York.
- Kazemi, Rad. L, Ghamgosar, M. and Haghyghy, M. (2012), “Multicriteria Decision Making Based on TOPSIS Method in Drought Zoning: A Case Study of Gilan Province”, **World Applied Programming Journal**, Vol (2), No (2), February 2012, 81-87.
- Maurer, E.P. (2007), “Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada”, California under two emissions scenarios, **Climatic Change**, 82, 309–325, doi:10.1007/s10584-006-9180-9.
- Roshan, G, Mirkatouli G and Shakoore A (2012), “A new approach to technique for order-preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method for determining and ranking drought: A case study of Shiraz station”, **International Journal of the Physical Sciences**, Vol. 7(23), pp. 2994-3008, 15 June, 2012
- Srinivasa Raju, K. and D. Nagesh Kumar (2014), “Ranking general circulation models for India using TOPSIS”, **Journal of Water and Climate Change**, in press, 2014.
- Ward, P., and Lasage, R. (2009), “Downscaled climate change data from the HADCM3 and ECHAM5 models on precipitation and temperature for Ethiopia and Kenya”, **Report W-09/05**, June 16, 2009.
- Wilby, R.L and Harris, I. (2006), “A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames”, UK, **Water Resources Research** 42: doi 10.1029/2005WR004065.
- Wilby R.L., Wigley T.M.L., Conway D., Jones, P.D., Hewitson B.C., Main J. and Wilks D. S. (1998), “Statistical downscaling of General Circulation Model output: A comparison of methods”, **Water Resources Res**, 34, 2995–3008.
- Yoon, K.P.; Hwang, C.L. (1995), “**Multiple Attribute Decision Making: An Introduction**”; Sage Publications: Thousand Oaks, CA, USA.