

## تحلیل عدم قطعیت تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دما تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی)

علی شهیدی<sup>۱\*</sup>، سید محمد تاجبخش<sup>۲</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۳</sup>، حسین خزیمه‌نژاد<sup>۴</sup>، احمد جعفرزاده<sup>۵</sup>

۱ و ۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

۲. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند

۴. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

۵. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۲/۲۷)

### چکیده

در این مطالعه آثار تغییر اقلیم روی متغیرهای اقلیمی بارندگی، کمترین و بیشترین دما بررسی شده است. بررسی روند تغییرات کمترین دما، بیشترین دما و بارندگی به همراه تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل‌های گردش عمومی از جمله اقدامات انجام شده است. به منظور بررسی آثار تغییر اقلیم، از خروجی ۱۵ مدل گردش عمومی تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 استفاده شد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس از مدل LARS-WG استفاده شد. بدین منظور آمار مشاهداتی هفت ایستگاه سینوپتیک موجود در سطح استان طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی به‌عنوان دوره پایه به مدل معرفی شد. پس از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی با انتخاب برترین و سازگارترین مدل‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده برای دما و بارش به صورت سالانه در مدل‌های منتخب تهیه شد. بدین ترتیب مجموعه خروجی مدل‌های اقلیمی برای هر متغیر و به صورت سالانه به‌عنوان ورودی فرمان بوت‌استرپ ایجاد شد و باند عدم قطعیت خروجی مدل‌های اقلیمی در سطح ۹۹ درصد به صورت سالانه ارزیابی شد. نتایج مربوط به دقت مدل‌های گردش عمومی نشان داد بیشتر مدل‌ها توانمندی زیادی در شبیه‌سازی رفتار بارندگی ندارند؛ ولی عملکرد این مدل‌ها در شبیه‌سازی تغییرات کمترین و بیشترین دما بسیار خوب برآورد شد. نتایج تحلیل روند در سطح ایستگاهی و استانی نشان‌دهنده کاهش بارش و افزایش دما خواهد بود. با مقایسه تغییرات دما در آینده نسبت به دوره پایه می‌توان این انتظار را داشت که کمترین و بیشترین دما به ترتیب حدود ۰/۶ درجه کاهش و ۲ درجه افزایش را داشته باشند. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد منابع عدم قطعیت شایان توجهی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های هواشناسی دارند. همچنین با تحلیل این عدم قطعیت‌ها در خصوص بارندگی می‌توان گفت که با گذر زمان، شدت تغییرات بارندگی افزایش می‌یابد. این نتیجه در خصوص کمترین و بیشترین دما نیز صادق است.

**کلیدواژگان:** بارندگی، بوت‌استرپ، من کندال، LARS-WG.

## مقدمه

با دانستن اینکه پدیده تغییر اقلیم در چند دهه اخیر تأثیرات چشم‌گیری بر منابع آب خواهد گذاشت، پیش‌بینی وضعیت اقلیمی و منابع آبی یک سرزمین از ملزومات برنامه‌ریزی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی هر کشوری محسوب می‌شود. بنابراین، توجه به وضعیت اقلیمی و میزان منابع آبی کشور در آینده با در نظر گرفتن نیازهای آبی جوامع امری ضروری است. از آنجا که نخستین تأثیرات تغییر اقلیم روی متغیرهای هواشناسی بارندگی و دما اعمال می‌شود و تغییر در این متغیرها سبب برهم‌زدن نظم بسیاری از رخدادهای هیدرولوژی می‌شود، بررسی دقیق تغییرات آینده این پارامترها و روش‌های شبیه‌سازی آنها امری ضروری به حساب می‌آید. نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فرایند شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، سبب می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سیستم کاسته شود و همچنین می‌تواند نتایج غیرواقعی و غیر کاربردی را به تصمیم‌گیرندگان تحمیل کند. معمولاً خروجی مدل‌های گردش عمومی همراه با عدم قطعیت است [۱]. این عدم قطعیت ناشی از خودکارکرد مدل‌های گردش عمومی، سناریوهای مختلف انتشار و فرایند ریزمقیاس‌نمایی است [۲]. از این‌رو، مطالعات تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل‌های گردش عمومی با هدف بررسی عدم قطعیت این مدل‌ها و روش‌های ریزمقیاس‌گردانی انجام می‌شود. در مطالعاتی نظیر اقدمی‌راد و همکارانش (۲۰۱۶)، لیدل و همکارانش (۲۰۱۶)، دل‌قندی و مؤذن‌زاده (۲۰۱۶) و سیدکابلی (۲۰۱۶) که عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی را بررسی کرده‌اند، روش ریزمقیاس‌گردانی ثابت فرض می‌شود و تحلیل روی مدل‌های مختلف انجام می‌شود [۲-۵]. به‌طور مثال، در مطالعه‌ای فخری و همکارانش (۲۰۱۳) فاصله اطمینان دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی در ایستگاه شهرکرد را ارزیابی کردند. به‌منظور نیل به هدف یادشده از خروجی پنج مدل گردش عمومی تحت سناریوهای A1, A2, B1, B2 استفاده کردند. باند عدم قطعیت توسط فرمان بوت‌استرپ تعیین شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد با افزایش تعداد روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، باند عدم قطعیت در تخمین بارندگی آینده افزایش می‌یابد [۶]. فرزانه و همکارانش (۲۰۱۴) شبیه‌سازی بارندگی چهار مدل گردش عمومی را با آمار مشاهداتی حوضه بهشت‌آباد مقایسه کردند. نتایج مطالعه آنها گویای دقت بیشتر مدل HADCM3 نسبت

به سایر مدل‌هاست [۷]. در بررسی عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی هرچند که هدف اولیه تعیین عملکرد و دقت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی است، ولی در مواردی خروجی چندین مدل گردش عمومی را هم‌زمان با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در نظر می‌گیرند [۸]. به‌طور مثال، پژوهش فرمز چشمه و همکارانش (۲۰۱۴) «بررسی عدم قطعیت مدل شبکه عصبی در ریزمقیاس‌گردانی HadCM3 با استفاده از روش فاصله اطمینان بوت‌استرپ<sup>۱</sup>» است. آنها در پژوهش خود، عدم قطعیت ریزمقیاس‌گردانی شبکه عصبی در ایستگاه‌های شمال غرب کشور را بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میانگین دمای بیشینه در ۱۴ ماه ایستگاه‌های مختلف در محدوده اطمینان واقع شد و شبیه‌سازی دمای کمینه نیز بر اساس این معیار در ۱۸ ماه ایستگاه‌های مختلف در محدوده اطمینان قرار گرفت [۹]. چن و همکارانش (۲۰۱۳) عدم قطعیت شش روش تجربی ریزمقیاس‌نمایی که شامل دو روش تناسبی و چهار روش مبتنی بر اصلاح انحراف<sup>۲</sup> هستند را بررسی کردند. همچنین برای تحلیل بیشتر با استفاده از چهار مدل منطقه‌ای گردش عمومی<sup>۳</sup>، عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی نیز ارزیابی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد تفاوت چندانی بین مدل‌های دینامیکی و تجربی مشاهده نشد، ولی مدل‌های دینامیکی، به مقدار جزئی عدم قطعیت بیشتری نشان دادند [۱۰]. احمد و همکارانش (۲۰۱۳) به‌منظور مقایسه عملکرد روش‌های آماری و اصلاح انحراف ریزمقیاس‌گردانی، از خروجی‌های شش مدل گردش عمومی و چهار مدل منطقه‌ای استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش ریزمقیاس‌نمایی اصلاح انحراف دقت بیشتری دارد [۱۱]. ابراهیم و همکارانش (۲۰۱۳) عدم قطعیت مرتبط با ریزمقیاس‌گردانی مدل‌های LARS-WG<sup>۴</sup> و SDSM<sup>۴</sup> و شبکه عصبی مصنوعی را به‌منظور بررسی آثار تغییر اقلیم در هیدرولوژی رودخانه بلس در اتیوپی بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با تحلیل ترکیب‌های مختلف ورودی به مدل SDSM دامنه تغییرات دبی متوسط سالانه، بین شش درصد افزایش تا هشت درصد کاهش نسبت به مقدار متوسط رخ دهد [۱۲].

1. Bootstrap
2. Bias Correction
3. Regional Circulation Model
4. Statistical Downscaling Method

کیلومترمربع دارد؛ ولی با وجود چنین وسعتی فقط هفت ایستگاه سینوپتیک (۱. بشرویه، ۲. فردوس، ۳. خور بیرجند، ۴. قائن، ۵. بیرجند، ۶. نهبندان و ۷. طبس) در گستره آن قرار دارد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک این استان را نشان می‌دهد. برای انجام پژوهش حاضر از داده‌های بارش، دمای کمینه، بیشینه و تابش خورشیدی به‌صورت روزانه طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی به‌عنوان دوره پایه استفاده شد.

#### بررسی روند داده‌های اقلیمی در دوره پایه

یکی از روش‌های متداول برای تحلیل سری‌های زمانی عناصر اقلیمی، بررسی وجود یا نبود روند در آن با استفاده از آزمون‌های آماری است. اصولاً وجود روند در سری‌های زمانی عناصر اقلیمی، ممکن است ناشی از تغییرات تدریجی طبیعی و تغییر اقلیم یا بر اثر فعالیت‌های انسانی باشد [۱۴]. معمولاً فرایندهای هیدرولوژیکی به‌صورت فرایندهای ایستا در نظر گرفته می‌شوند، هر چند که مدارک زیادی در مورد وجود روندها و تغییرپذیری بلندمدت وجود دارد که ممکن است به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و عوارض طبیعی سامانه‌های اقلیمی باشد [۱۵]. در حالت کلی مهم‌ترین دلیل منطقی برای اثبات وقوع پدیده تغییر اقلیم در دوره گذشته (تاریخی)، وجود روند در تغییرات مؤلفه‌های هواشناسی نسبت به زمان است. در این پژوهش با استفاده از روش ناپارامتری من کدال، رفتار متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان جنوبی بررسی شد.

عموماً در این مطالعات عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و مدل‌های گردش عمومی به‌صورت میانگین چندساله است. همچنین بیشتر مطالعات عدم قطعیت خروجی این مدل‌ها را برای دوره تاریخی (گذشته) بیان می‌کنند. هدف از مطالعه پیش رو تعیین باند عدم قطعیت سازگارترین مدل‌های گردش عمومی در دوره آتی با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است. بررسی منابع ارائه‌شده نشان می‌دهد مطالعات کمی در این خصوص انجام شده است. مطالعه پیش رو در نظر دارد تا تحلیل عدم قطعیت مؤلفه‌های اقلیمی را در سطح ایستگاه‌های سینوپتیک و به‌صورت سالانه ارائه کند.

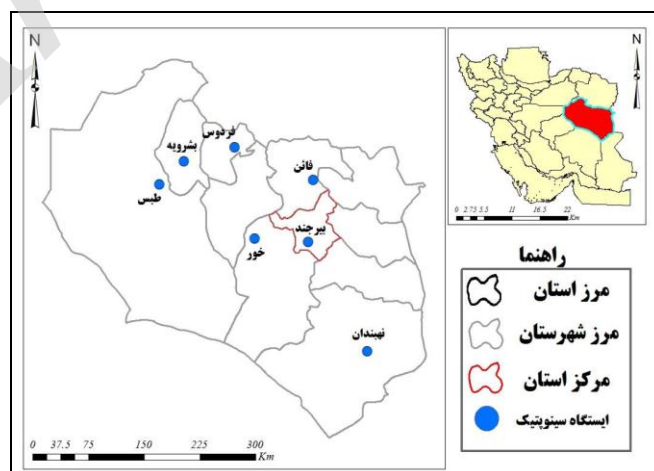
#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مطالعه‌شده

استان خراسان جنوبی به مرکز بیرجند در شرق کشور ایران بین طول‌های جغرافیایی  $46^{\circ} 57'$  تا  $60^{\circ} 57'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $30^{\circ} 35'$  تا  $34^{\circ} 14'$  شمالی قرار گرفته است. این استان روی کمربند آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک کره زمین واقع شده و دوری از دریا و مجاورت با مناطق کویر نمک، لوت و همچنین بادهای فراناحیه‌ای نظیر باد ۱۲۰ روزه سیستان بر خشکی هوا در این منطقه افزوده است. استان خراسان جنوبی چهار حوضه آبریز کویر لوت و مرکزی، خواف و هامون را داراست [۱۳].

##### انتخاب ایستگاه‌های مناسب

استان خراسان جنوبی مساحتی بیش از ۱۵۰۸۰۰



شکل ۱. ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان جنوبی

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

در روابط یادشده  $X_i$  داده‌های مشاهداتی،  $Y_i$  داده‌های شبیه‌سازی و  $n$  تعداد داده‌ها (معادل ۳۶ ماه) است. شاخص‌های ارزیابی یادشده برای ۳۵ خروجی ریزمقیاس شده محاسبه شد و قوی‌ترین مدل‌ها با رتبه‌دهی به هریک از شاخص‌ها استخراج شد. بدین ترتیب می‌توان دقت هر مدل را تعیین کرد. بعد از تعیین دقیق‌ترین مدل GCMs برای هریک از مؤلفه‌های هواشناسی بارش، کمترین و بیشترین دما در هر ایستگاه این متغیرها با استفاده از پنج مدل برتر در هر ایستگاه تحت سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 در دوره‌های آینده پیش‌بینی شد. جدول ۱ جزئیات کاملی از سناریوهای انتشار تغییر اقلیم را ارائه می‌دهد.

#### عدم قطعیت

همواره ممکن است در شبیه‌سازی همه عوامل رخ دادن یک متغیر در مدل وارد نشود، بنابراین تحلیل با خطا یا عدم قطعیت همراه است. شناخت مقدار خطا و یا عدم قطعیت هر مدل در قضاوت و اطمینان به نتایج ضروری است [۱۹]. ارزیابی آثار تغییر اقلیم شامل شناسایی سه جنبه کلیدی از عدم قطعیت است. نخست؛ عدم قطعیت در زمینه مدل‌های گردش عمومی. دوم؛ عدم قطعیت در اقلیم‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای، شامل عدم قطعیت در روش‌های کوچک مقیاس‌نمایی آماری یا دینامیکی. سوم؛ عدم قطعیت‌های پارامتری و ساختاری در مدل‌های مختلفی که برای ارزیابی آثار استفاده می‌شود [۲۰]. در این تحقیق عدم قطعیت خروجی مدل‌های GCMs با استفاده از فرمان بوت‌استرپ و به‌صورت سالانه تعیین شد.

#### بوت‌استرپ

فرض کنید  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  نمونه‌ای تصادفی از توزیع نامعلوم  $F$  باشند. از طرفی، فرض کنید  $\theta = \theta(x)$

#### ریزمقیاس‌نمایی

مدل‌های GCMs<sup>۱</sup> به‌طور معمول قدرت تفکیک مکانی چند صد کیلومتر دارند. با این حال، به‌منظور ارزیابی درست منطقه‌ای و محلی آثار تغییر اقلیم، محققان به سطح بسیار بالاتری از جزئیات نیاز دارند. از این‌رو، از فرایندی به نام ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود تا اطلاعات اقلیمی از یک مدل اقلیمی بزرگ‌مقیاس به ریزمقیاس انتقال داده شود [۱۶]. در این مطالعه برای ریزمقیاس‌نمایی از مدل LARS-WG بهره گرفته شد.

#### مدل LARS-WG

این مدل در ایستگاه تحقیقاتی لانگ اشتون<sup>۲</sup> توسط میخائیل زمنف<sup>۳</sup> طراحی و توسعه داده شد، LARS-WG مولد تصادفی آب و هوا است که برای شبیه‌سازی آب و هوای یک سایت در هر دو شرایط آب و هوایی حال حاضر و آینده استفاده می‌شود. این مدل رگرسیونی چندمتغیره برای تولید داده‌های آب و هوایی از تکنیک‌های آماری استفاده می‌کند. همچنین به‌دلیل تکرار محاسبات، نیاز کمتر به داده‌های ورودی و سادگی کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. توضیحات بیشتر در خصوص سازوکار این روش در مطالعه جعفرزاده و همکارانش (۲۰۱۶) ارائه شده است [۱۷].

#### ارزیابی دقت مدل‌های GCMs

پس از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی با مقایسه داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک و شبیه‌سازی شده طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۳، دقت هر مدل با شاخص‌های ضریب تبیین<sup>۴</sup>، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> و نش-ساتکلیف<sup>۶</sup> بررسی شد. مطالعات متعددی نظیر دوآن و می (۲۰۱۴) در خصوص بررسی توانمندی مدل‌های گردش عمومی از شاخص‌های زیر استفاده کرده‌اند [۱۸].

داده‌های مشاهداتی در این بازه با داده‌های شبیه‌سازی شده توسط ۳۵ خروجی مدل‌های GCMs با یکدیگر مقایسه شد. روابط ۱-۳ معادله این شاخص‌ها را نمایش می‌دهد.

1. General Circulation Models
2. Long Ashton.
3. Semenov, Mikhail
4. Determination coefficient
5. Root mean square error
6. Nash-suttclif

جدول ۱. جزئیات سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای

B1	A2	A1B	شاخص‌های توسعه جامعه
کم	کم	کم	رشد جمعیت
زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	تولید ناخالص داخلی
کم	زیاد	خیلی زیاد	استفاده از انرژی
زیاد	کم	کم	تغییر کاربری زمین
سریع	سریع	سریع	تغییر تکنولوژی
انرژی پاک	عدم سوخت فسیلی	متعادل	نوع استفاده از انرژی (فسیلی و پاک)

برنامه‌نویسی Matlab2013a استفاده شد. تحلیل عدم قطعیت در دو سطح ایستگاهی و استانی به‌دست آمد. در سطح ایستگاهی عدم قطعیت هر ایستگاه با استفاده از خروجی‌های پنج مدل GCMs انجام شد؛ ولی در سطح استانی مقدار هر مؤلفه با استفاده از درون‌یابی در محیط ArcGIS برای پهنه استان تهیه شد. عدم قطعیت در این حالت نشان‌دهنده بازه تغییرات هر مؤلفه در سطح استان است. همچنین کلیه نقشه‌های تعیین باند عدم قطعیت نیز در همین فضا ایجاد شد. در نهایت و پس از تعیین باند عدم قطعیت، تغییرات آتی متغیرهای اقلیمی تحلیل شد.

### نتایج و بحث

#### بررسی روند مؤلفه‌های اقلیمی

نتایج مربوط به بررسی روند داده‌های اقلیمی به‌صورت ایستگاهی در جدول ۲ ارائه شده است. روندهای معنادار در سطوح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ به‌ترتیب با یک، دو و سه ستاره مشخص شده‌اند.

آماره مد نظر باشد که علاقه‌مند به آگاهی از یک سری رفتارهای آن هستیم. ابتدا به اندازه B بار از نمونه اصلی به‌صورت تصادفی و با جای‌گذاری نمونه‌گیری انجام می‌شود. در هر مرتبه از نمونه‌گیری از نمونه اصلی آماره مد نظر محاسبه می‌شود. در گام بعدی به‌منظور تعیین فاصله اطمینان، از انحراف معیار و سطح اطمینان استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن این دو مقدار آماره‌های مد نظر در گام قبلی بر توزیع نرمال برازش داده می‌شود و متناسب با مقدار سطح اطمینان دو حد بالا و پایین آن تعیین می‌شود. در این مطالعه مقادیر شبیه‌سازی‌شده پنج مدل برتر برای هر متغیر و در هر ایستگاه به‌عنوان ورودی فرمان بوت‌استرپ استفاده شد. همچنین خروجی بوت‌استرپ باند عدم قطعیت خروجی این مدل‌ها، در سطح اطمینان ۹۹ درصد خواهد بود. منظور از باند عدم قطعیت ۹۹ درصد این است که اگر متغیر مد نظر در توزیع نرمال برازش داده شود، به احتمال ۹۹ درصد مقادیر این متغیر در بازه ۰/۵ و ۹۹/۵ درصد قرار می‌گیرد. به‌منظور تحلیل عدم قطعیت از کدنویسی در محیط

جدول ۲. مقادیر آزمون من‌کنندال در تحلیل روند سالانه متغیرهای اقلیمی

دوره	ایستگاه	متغیر	آماره $\tau$
۲۰۱۰-۱۹۹۰	بیرجند	بارش (میلی‌متر)	*-۲/۰۸
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۳/۲۳
	بشرویه	بارش (میلی‌متر)	*-۲/۰۸
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۲/۷۵
	فردوس	بارش (میلی‌متر)	*-۲/۱۴
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۳/۱۱
	خور	بارش (میلی‌متر)	-۰/۲۴
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	*۲/۴۵
	نهبندان	بارش (میلی‌متر)	*-۲/۵۱
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۲/۹۹
	قائن	بارش (میلی‌متر)	**۲/۹۳
		دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۳/۵۳
طبس	بارش (میلی‌متر)	-۰/۲۱	
	دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	**۲/۵۷	

به‌طور کلی تغییرات اقلیمی در خصوص بارش و متوسط دمای سالانه در استان به وقوع پیوسته است.

#### بررسی دقت خروجی مدل‌های GCMs

بعد از ریزمقیاس‌نمایی، دقت هریک از این مدل‌ها با آمار مشاهداتی مقایسه شد. خروجی مقایسه شبیه‌سازی خروجی مدل‌های GCMs با آمار مشاهداتی هر ایستگاه تعیین‌کننده مدل‌های منتخب در هر ایستگاه است که این نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی مقادیر شاخص‌های ارزیابی در بارش و دما گویای این مطلب است که دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی مقادیر بارش زیاد نیست؛ ولی این مدل‌ها در خصوص دما شبیه‌سازی‌های به‌مراتب بهتر از بارش دارند. از این‌رو، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مطالعه سمیرمی و همکارانش (۲۰۱۵) و نیز جعفرزاده و همکارانش (۲۰۱۶) کاملاً همسان است.

#### تحلیل عدم قطعیت

تعیین باند عدم قطعیت هریک از مؤلفه‌های اقلیمی در هر ایستگاه سینوپتیک به تفکیک ارائه می‌شود. همچنین باند عدم قطعیت این متغیرها در ایستگاه سینوپتیک بیرجند (مرکز استان) به‌صورت نموداری در شکل ۲ نمایش داده شده است.

#### ایستگاه سینوپتیک بیرجند

با بررسی شکل ۲ روند تغییرات بارندگی نشان می‌دهد با کاهشی نه‌چندان شدید مواجه خواهیم بود. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص می‌شود به‌صورت کلی با گذر زمان شدت تغییرات بارش بیشتر می‌شود. با وقوع چنین حالتی در بارندگی امکان وقوع رخدادهای حدی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول ۲ می‌توان بیان کرد که متوسط دما در کلیه ایستگاه‌های استان در سطح ۰/۰۱ روند صعودی معنادار دارد. این نتیجه با یافته‌های صبوحی و همکارانش (۲۰۱۲)، زارع نیستانک (۲۰۱۴)، حسین‌زاده و طبری (۲۰۱۱) مطابقت دارد [۲۱-۲۳].

به‌دلیل اقلیم خشک استان، روند تغییرات دما به‌صورت افزایشی چندان مناسب به‌نظر نمی‌رسد، چرا که این موضوع با کاهش پوشش گیاهی و افزایش بیابان‌زایی، تبخیر و تعرق، نیاز آبی محصولات و تخلیه منابع آب زیرزمینی همراه خواهد بود. از نظر بارش، همه ایستگاه‌های استان روند نزولی دارند. البته ایستگاه‌های خور و طبس دارای روند کاهشی غیرمعنادار هستند. این نتایج با یافته‌های صبوحی و سلطانی (۲۰۰۹) و سمیرمی و همکارانش (۲۰۱۴) مطابقت دارد [۲۴ و ۲۵]. بعضی از پژوهش‌های انجام‌شده نشان‌دهنده کاهش دماست. اعتمادی و همکارانش (۲۰۱۲) که مطالعه‌ای را در جنوب غرب کشور انجام دادند، اعلام کردند که تغییرات دما در این منطقه به‌صورت نزولی خواهد بود [۲۶].

در میان ایستگاه‌های استان کاهش بیشینه و کمینه بارش سالانه به‌ترتیب مربوط به ایستگاه‌های قائن و نهبندان است. کاهش بارش در باقی ایستگاه‌های استان به‌صورت ایستگاه‌های فردوس، بیرجند، بشرویه، خور و طبس است (جدول ۳). البته کاهش بارش در ایستگاه‌های خور و طبس بسیار کمتر از سایر ایستگاه‌هاست. همچنین ترتیب افزایش دمای سالانه در ایستگاه‌های سینوپتیک استان به‌ترتیب ایستگاه‌های قائن، بیرجند، فردوس، نهبندان، بشرویه، طبس و خور است. در همه ایستگاه‌های سینوپتیک افزایش دما در سطح ۰/۰۵ روند معناداری دارد. در نهایت، می‌توان گفت که

جدول ۳. مشخصات مدل‌های منتخب در ایستگاه‌های سینوپتیک استان

ایستگاه	مدل و سناریوی انتشار		
	بارش	کمترین دما	بیشترین دما
بیرجند	BCM2-B1	NCPCM-A2	CGMR-A1B
بشرویه	HADGEM-A1B	MPEH5-B1	INCM3-A1B
فردوس	CNCM3A1B	GFCM21-A2	IPCM4-A1B
خور	GFCM21-A2	BCM2-A1B	CNCM3-A1B
نهبندان	CSMK3-A1B	CNCM3A2	CSMK3-A1B
قائن	HADGEM-A1B	NCCCSM-A2	MPEH5-A2
طبس	BCM2-B1	MPEH5-A2	GIAOM-A1B

۲۰۷۰ میلادی شاهد روند ثابت با بروز برخی مقادیر حدی هستیم.

#### ایستگاه سینوپتیک خور

این ایستگاه بعد از ایستگاه سینوپتیک طبس کمترین مقادیر بارش و بیشترین دما را دارد. میانگین کمترین دما، بیشترین دما و بارش در دوره پایه به ترتیب ۱۲/۲۴، ۲۶/۱۳ درجه سانتی‌گراد و ۸۷/۸۶ میلی‌متر است. میانگین بارندگی مشاهداتی این ایستگاه طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۳ میلادی نزولی است. این در حالی است که میانگین بارندگی طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی ۱۰۲ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. بررسی کمترین دما نشان‌دهنده سیر نزولی با شیب کم است. میانگین کمترین دمای شبیه‌سازی در بازه ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی ۱۳/۴۲ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با دوره پایه با میانگین ۱۲/۲۴ درجه سانتی‌گراد با افزایش ۹/۶ درصدی همراه است. در خصوص بیشترین دما باید گفت که میانگین بیشترین دمای شبیه‌سازی در بازه ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی ۲۷/۵ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با دوره پایه با میانگین ۲۶/۱۳ درجه سانتی‌گراد با افزایش ۵/۲۴ درصدی همراه است.

#### ایستگاه سینوپتیک نهبندان

روند بارندگی در این ایستگاه نشان می‌دهد میانگین بارندگی شبیه‌سازی شده در بازه ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی به مراتب بیشتر از ایستگاه‌های خور و فردوس است. میانگین بارندگی مشاهداتی در این ایستگاه حد فاصل سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۳ میلادی به صورت نزولی (با شیب تند) و مقدار آن برابر با ۱۲۴/۴ میلی‌متر است؛ ولی میانگین بارندگی طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی ۱۴۸/۵۷ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. در میان کل ایستگاه‌های استان، تغییرات بارندگی فقط در این ایستگاه به صورت افزایشی است. روند کلی تغییرات کمترین دما در هر دو سطح و در هر دو حد به صورت کاهش است. با تحلیل مقادیر شبیه‌سازی شده در سال‌های آتی و مشاهداتی شاهد یک رشد ۴/۵ درصدی در مقدار کمترین دما خواهیم بود. تغییرات کلی بیشترین دما نیز مشابه دمای حداقل است. میانگین دمای شبیه‌سازی شده در کل سال‌ها ۲۷/۳۴ درجه سانتی‌گراد است در حالی که میانگین دمای مشاهداتی در دوره پایه ۲۷/۰۷ درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده افزایش بیشترین دما به میزان ۳/۸۵ درصد است.

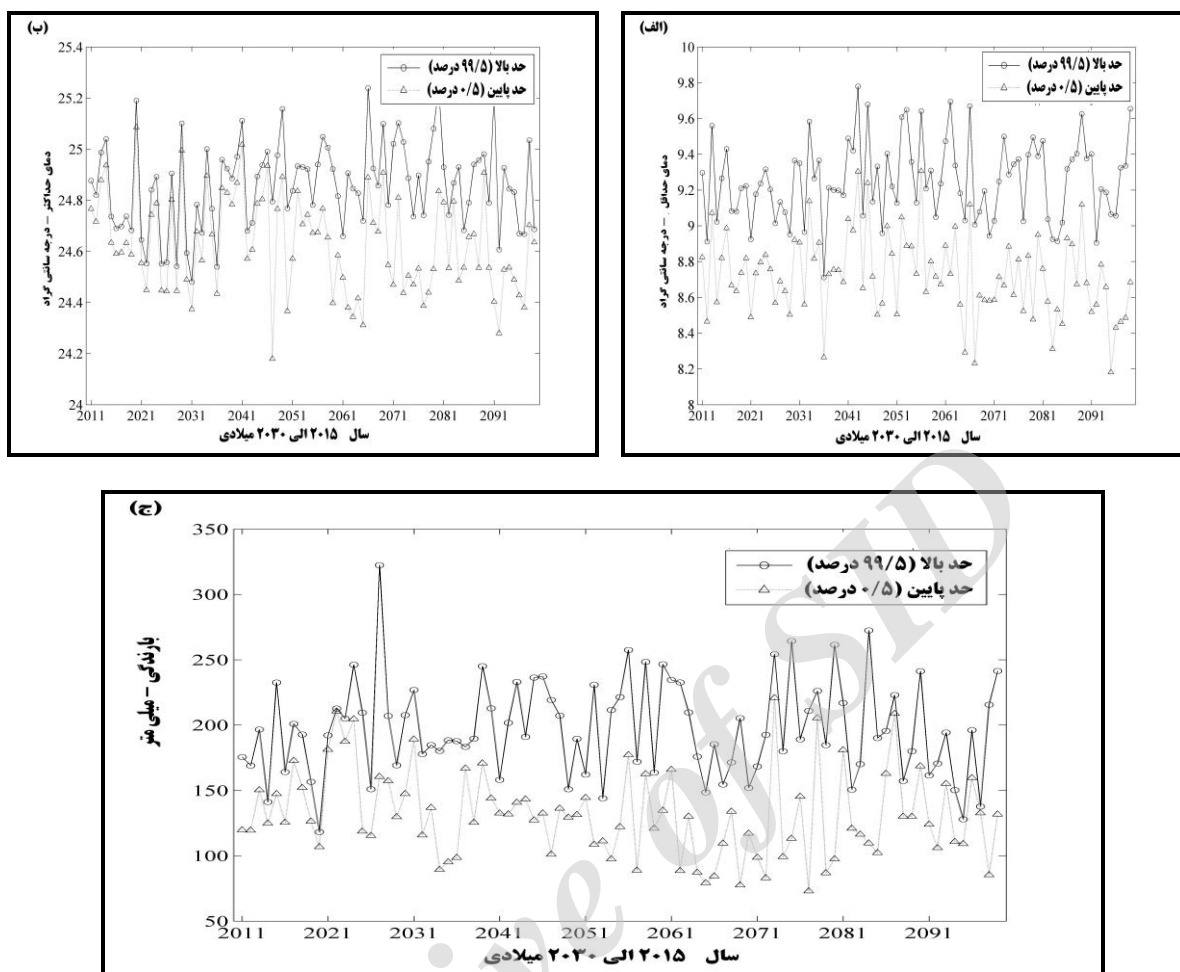
نتایج مطالعه فخری و همکارانش (۲۰۱۳) در این زمینه با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد. میانگین بارندگی در کل این بازه ۱۶۳/۹ میلی‌متر برآورد شده است که در مقایسه با آمار مشاهداتی (۱۴۸/۵ میلی‌متر) بیشتر است. بررسی دما نشان می‌دهد شدت تغییرات آن با گذر زمان افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، فاصله بین حدود بالا و پایین باند عدم قطعیت به صورت افزایشی است.

#### ایستگاه سینوپتیک بشرویه

تغییرات بارندگی در این ایستگاه بسیار زیاد است و در مقایسه با آمار مشاهداتی ایستگاه طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۳ مقدار بارندگی افزایش نشان خواهد داد. میانگین بارندگی مشاهداتی در دوره پایه و شبیه‌سازی شده در بازه ۲۰۱۱-۲۰۹۹ به ترتیب ۸۴/۳۶ و ۱۶۴/۷۹ میلی‌متر است (باید توجه داشت که به‌طور کلی و در همه مدل‌های GCMs مقدار بارندگی در دوره پایه بیشتر از آمار مشاهداتی است که این افزایش در سال‌های آتی نیز وجود دارد). کمترین دما در هر دو باند عدم قطعیت به صورت نزولی با شیب کم است. دامنه تغییرات کمترین دما تقریباً معادل ۱/۳۴ درجه سانتی‌گراد در کل سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی است. میانگین کمترین دما در مقایسه با آمار مشاهداتی افزایش داشته است. میانگین بیشترین دمای شبیه‌سازی شده در کلیه سال‌ها ۲۵/۳۸ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با میانگین بیشترین دما در دوره پایه (۲۴/۶۴ درجه سانتی‌گراد) با افزایش ۳ درصدی همراه است.

#### ایستگاه سینوپتیک فردوس

تمایل بارندگی به سمت مقادیر حدی در سال‌های ابتدایی و انتهایی به مراتب بیشتر از سال‌های میانی است. بارندگی ایستگاه در مقایسه با دوره پایه (۱۲۶/۷۴ میلی‌متر) نشان می‌دهد میانگین بارندگی در آینده (۱۳۹/۵ میلی‌متر) بیشتر از گذشته خواهد بود. در خصوص کمترین دما، این ایستگاه با روندی کاهش روبه‌رو خواهد بود. میانگین کمترین دما طی دوره مشاهداتی ۱۰/۵۶ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با میانگین دمای شبیه‌سازی (۲۰۱۱-۲۰۹۹) کمتر است. بیشترین دما همسان با تغییرات کمترین دما در این ایستگاه در سال‌های ابتدایی با کاهش دما روبه‌رو خواهد بود. در ادامه تغییرات بیشترین دمای حداکثر از سال ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۰ میلادی یک روند افزایشی را خواهیم داشت و از سال ۲۰۴۰ تا



شکل ۲. باند عدم قطعیت کمترین دما (الف)، بیشترین دما (ب) و بارندگی (ج) استان در سطح ۹۹ درصد (سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۹۹)

### ایستگاه سینوپتیک قائن

در میان کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک، بیشترین میزان بارندگی در کنار کمترین دمای شبیه‌سازی شده متعلق به ایستگاه قائن است، با این تفاوت که میانگین بارندگی، کمترین دما و حداکثر شبیه‌سازی شده در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی به ترتیب ۱۸۳/۹۳ میلی‌متر، ۷/۳۷ درجه سانتی‌گراد و ۲۲/۷۲ درجه سانتی‌گراد در سال خواهد بود. روند کلی تغییرات کمترین دما در هر دو سطح و در هر دو حد به صورت نزولی است (البته با بروز دماهایی با مقادیر حدی). همچنین روند کلی تغییرات بیشترین دما در هر دو سطح و در هر دو حد به صورت افزایشی است.

### ایستگاه سینوپتیک طبس

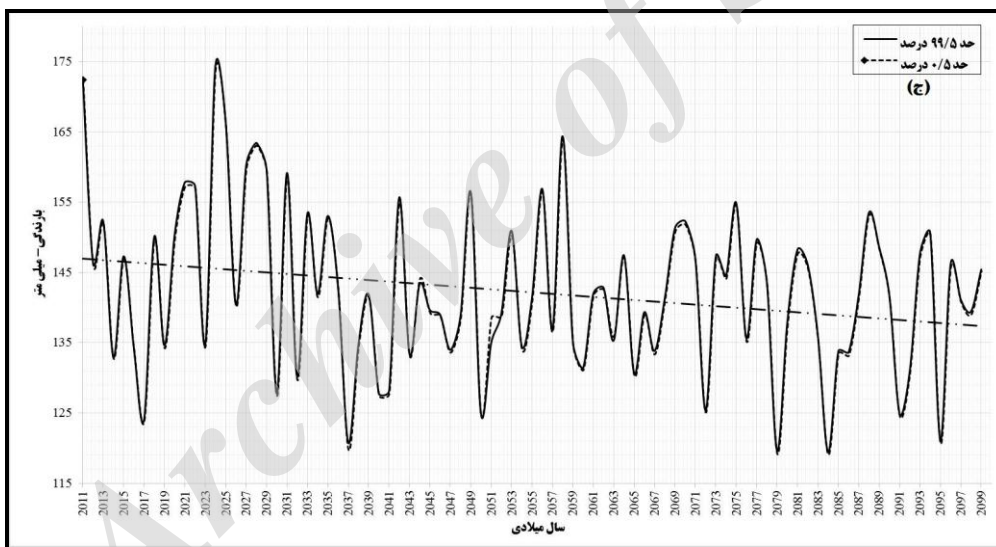
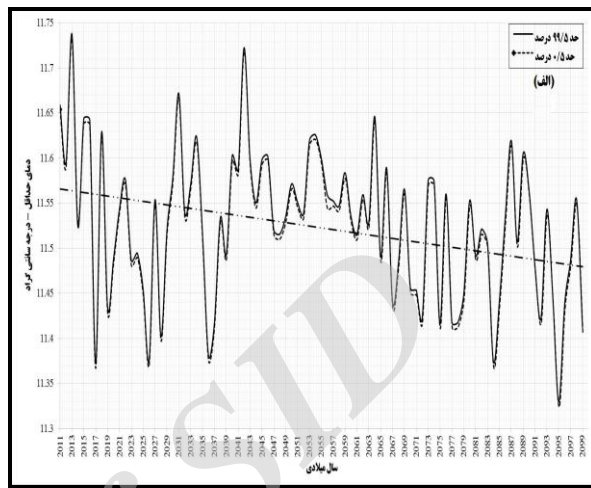
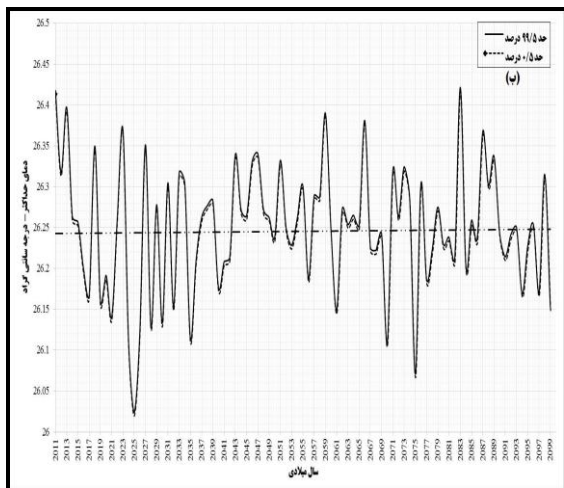
برخلاف ویژگی ایستگاه سینوپتیک قائن، کمترین میزان بارندگی در کنار بیشترین دمای شبیه‌سازی شده متعلق به ایستگاه طبس است. میانگین بارندگی، کمترین دما و

حداکثر شبیه‌سازی شده طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۹۹ میلادی به ترتیب ۸۱/۶ میلی‌متر، ۱۶/۵۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۹/۵ درجه سانتی‌گراد در سال خواهد بود. روند کلی بارندگی به صورت نزولی با شیب بسیار ملایم است. در کل سال‌ها مقادیر شبیه‌سازی بارندگی بسیار به هم نزدیک بوده و از این نظر ایستگاه سینوپتیک طبس منحصر به فرد است. روند کلی تغییرات کمترین دما در هر دو سطح و در هر دو حد نزولی است. میانگین کمترین دما در دهه‌های اول تا چهارم به ترتیب ۱۶/۶۶، ۱۶/۵۵، ۱۶/۵۶ و ۱۶/۵۷ درجه سانتی‌گراد است. همچنین روند کلی تغییرات بیشترین دما در هر دو سطح و در هر دو حد افزایشی خواهد بود. میانگین بیشترین دما در دهه‌های اول تا چهارم نیز به ترتیب ۲۹/۵، ۲۹/۴۷، ۲۹/۴۷ و ۲۹/۵۲ درجه سانتی‌گراد است.



استان برای بهترین مدل گردش عمومی خیلی زیاد نیست. همچنین روند تغییرات این مؤلفه‌ها همانند تغییرات در سطح ایستگاه‌های استان است.

شکل ۳ روند تغییرات و باند عدم قطعیت بارندگی، کمترین و بیشترین دما را برای برترین GCMs و در سطح استان خراسان جنوبی نشان می‌دهد. همان طور که این شکل نشان می‌دهد تغییرات مؤلفه‌های مد نظر در سطح



شکل ۳. روند تغییرات به همراه باند عدم قطعیت کمترین دما (الف)؛ بیشترین دما (ب) و بارندگی (ج) استان در سطح ۹۹ درصد (سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۹۹)

این نظر نتایج مطالعه پیش رو با نتایج مطالعه ابرازی (۲۰۱۴) یکسان است. همچنین وقوع مقادیر حدی که بروز خشک‌سالی و سیلاب را به همراه خواهد داشت به‌وضوح در تغییرات باند عدم قطعیت مشاهده شد [۲۷].  
بررسی تغییرات بیشترین دما در سطح ایستگاه‌های سینوپتیک استان نشان می‌دهد در حالت کلی روند تغییرات صعودی خواهد بود که از این نظر با نتایج مطالعه ترکزاد (۲۰۱۱) مشابهت دارد [۲۸]. نتایج مطالعه آنها در خصوص

تحلیل عدم قطعیت در سطح ایستگاهی نشان داد با اینکه مقدار بارش در دوره آتی بیشتر از دوره پایه است؛ روند آن در همه ایستگاه‌های استان به‌صورت کاهشی است (به‌جز ایستگاه نهبندان). مقدار شبیه‌سازی‌شده بارندگی حتی در دوره پایه و در بهترین مدل‌های GCMs بیشتر از داده‌های مشاهداتی بود. ایستگاه‌های سینوپتیک قائن و طبس به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان بارندگی شبیه‌سازی‌شده در استان را در آینده خواهند داشت. از

## منابع

- [1]. Mani A, Tsai FT. Ensemble Averaging Methods for Quantifying Uncertainty Sources in Modeling Climate Change Impact on Runoff Projection. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2016 Dec 1:04016067..
- [2]. Eghdamirad S, Johnson F, Woldemeskel F, Sharma A. Quantifying the sources of uncertainty in upper air climate variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016 Apr 27;121(8):3859-74.
- [3]. Leedale J, Tompkins AM, Caminade C, Jones AE, Nikulin G, Morse AP. Projecting malaria hazard from climate change in eastern Africa using large ensembles to estimate uncertainty. *Geospatial health*. 2016 Mar 31;11(1s).
- [4]. Delghandi M, Moazenzadeh R. Assessment of temporal and special variation of Iran's rainfall and temperature under climate change conditions. By considering of uncertainty of AOGCM and emission scenarios. *Iranian journal of ECO HYDROLOGY*. 2016 Dec 16;3(3). 321-331. [Persian]
- [5]. Kaboli H. Uncertainty of daily maximum rainfall emission scenarios of greenhouse gases on 2040. (case study:Razavi Khorasan province). *Iranian journal of ECO HYDROLOGY*. 2016 Feb 25;2(4). 455-465. [Persian]
- [6]. Fakhri M, Farzaneh MR, Eslamian S, Khordadi MJ. Confidence interval assessment to estimate dry and wet spells under climate change in Shahrekord Station, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2012 Aug 7;18(7):911-8.
- [7]. Farzaneh MR, Eslamian S, Samadi SZ, Akbarpour A. An appropriate general circulation model (GCM) to investigate climate change impact. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 2012 Jan 1;2(1):34-47.
- [8]. Etemadi H, Samadi S, Sharifikia M. Simulation of the Future Climatic Changes in Jask Area and Its Impact on Hara Forests. *Geography and develop*. 2014 Jul 28;13(41). 87-104. [persian]
- [9]. Ghermezcheshmeh B, Rasuli A, Rezaei-Banafsheh M, Massah A, Khorshidoost A. Uncertainty analyzing of Neural Network in downscaling of HadCM3 data with bootstrap confidence interval method. 2014 Aug 2;7(3). 306-316. [Persian]
- [10]. Chen J, Brissette FP, Chaumont D, Braun M. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*. 2013 Feb 4;479:200-14.

بیشترین دما نشان‌دهنده مقداری افزایش در این متغیر است به‌طوری که با نزدیک‌شدن به سال ۲۰۹۹ این افزایش پررنگ‌تر می‌شود. نتایج مطالعه هادی‌زاده (۲۰۱۱) نیز دلالت بر افزایش بیشترین دما در آینده دارد. نتایج مطالعه آنها گویای افزایش ۲ درصدی بیشترین دما در آینده خواهد بود [۲۹]. نتایج مطالعه بیدختی (۲۰۱۴) نیز بیان‌کننده افزایش دما در دوره آینده میانی و دور نسبت به دوره پایه است. برخلاف تغییرات بیشترین دما، تغییرات کمترین دما نزولی است. روند صعودی بیشترین دما در کنار کاهش کمترین دما تأییدکننده این مطلب است که در حالت کلی دما به سمت مقادیر حدی تمایل پیدا خواهد کرد [۳۰]. در زمینه کمترین دما نیز نتایج همسو با نتایج مطالعه ترکزاد (۲۰۱۱) است. تحلیل آنها در خصوص کمترین دما گویای کاهش این پارامتر در دوره آینده نزدیک و افزایش آن برای دو دوره بعدی است.

## نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر درصدد بررسی تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی استان خراسان جنوبی در دوره گذشته و سال‌های آتی بود. همچنین کلیه شبیه‌سازی‌ها به‌صورت سالانه و در سطح ایستگاهی انجام شد که به این مقوله در کمتر مطالعه‌ای توجه شده است. با استناد به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که متوسط دمای دوره پایه (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰) در کلیه ایستگاه‌های استان در سطح ۰/۰۱ روند صعودی معنادار دارد. درباره بارش، همه ایستگاه‌های استان روند نزولی دارند. البته ایستگاه‌های خور و طبس روند کاهشی غیرمعنادار دارند. همچنین نتایج بررسی تغییرات مؤلفه‌های کمترین دما، بیشترین دما و بارش از طریق شبیه‌سازی آنها در آینده، مقایسه با مقادیر دوره پایه و تعیین باند عدم قطعیت نشان‌دهنده کاهش بارش و کمترین دما در کنار افزایش بیشترین دما برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان است.

## تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت علمی، مالی و معنوی کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان جنوبی در قالب طرح پژوهشی با کد ۱۲۷۹۴۹-۷۶۲۲ انجام شده است. از این‌رو، نویسندگان به‌منظور تأمین هزینه‌های مالی از این شرکت کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- [11]. Ahmed KF, Wang G, Silander J, Wilson AM, Allen JM, Horton R, Anyah R. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the US northeast. *Global and Planetary Change*. 2013 Jan 31;100:320-32.
- [12]. Ebrahim GY, Jonoski A, van Griensven A, Di Baldassarre G. Downscaling technique uncertainty in assessing hydrological impact of climate change in the Upper Beles River Basin, Ethiopia. *Hydrology Research*. 2013 Apr 1;44(2):377-98.
- [13]. Jafarzadeh A, Khozaymehnejad H, Khashei A, and Bazi J. Zoning impact of climate change on rainfall patterns (Case study: South Khorasan province). *Congressional water harvesting and watershed management*. University of Birjand. 2012. [Persian]
- [14]. Brooks CE, Carruthers N. *Handbook of statistical methods in meteorology*. Handbook of statistical methods in meteorology.. 1953.
- [15]. Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*. 2002 Mar 1;259(1):254-71.
- [16]. Semenov MA, Barrow EM, Lars-Wg A. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version. 2002 Aug;3.
- [17]. Jafarzadeh A, Khashei-siuki A, Shahidi A. Assessment two methods of statistical downscaling LARS-WG and SDSM in estimates of climate parameters variation (Case study: Birjand plain). *Journal of water and soil conservation*. 2016 July 19;23(4). [Persian]
- [18]. Duan K, Mei Y. A comparison study of three statistical downscaling methods and their model-averaging ensemble for precipitation downscaling in China. *Theoretical and applied climatology*. 2014 May 1;116(3-4):707-19.
- [19]. Wilby RL, Tomlinson OJ, Dawson CW. Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*. 2003 Apr 10;23(3):183-94.
- [20]. Efron B, Tibshirani RJ. *An introduction to the bootstrap* New York. NY: Chapman and Hall. 1993.
- [21]. Saboohi R, Soltani S, Khodaghohi M. Trend analysis of temperature parameters in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2012 Aug 1;109(3-4):529-47.
- [22]. Zarenistanak M, Dhorde AG, Kripalani RH. Temperature analysis over southwest Iran: trends and projections. *Theoretical and applied climatology*. 2014 Apr 1;116(1-2):103-17.
- [23]. Tabari, H. & P. H. Talaee (2011) Recent trends of mean maximum and minimum air temperatures in the western half of Iran. *Meteorology and atmospheric physics*, 111, 121.
- [24]. Saboohi R, Soltani S. Trend analysis of climatic factors in great cities of Iran. *JWSS-Isfahan University of Technology*. 2009 Jan 15;12(46):303-21.
- [25]. Semiromi S, Moradi H, Khodaghohi M. Predicted changes in some of climate variables using downscale model LARS-WG and output of HADCM3 model under different scenarios. *Watershed Engineering and Management*. 2014 Aug 16;7(2). 145-156. [Persian]
- [26]. Etemadi H, Samadi SZ, Sharifikia M. Statistical downscaling of climatic variables in Shadegan Wetland Iran. *Earth Sci Clim Chang*. 2012;1:508.
- [27]. Ebrazi A. Redownscaling rainfall and its rule in flood frequency analysis influenced climate change (case study: southern Khorasan). [master's thesis]. University of Birjand. 2013. [Persian]
- [28]. Torkzad H. Uncertainty analysis in assessment of climate change impact on estimating the future climate parameters (case study of South Khorasan province). [master's thesis]. University of Birjand. 2011. [Persian]
- [29]. Hadizadeh M. Forecasting and frequency analysis of drought under effect of climate change in southern Khorasan [master's thesis]. University of Birjand. 2011. [Persian]
- [30]. Bidokhti Z. Assessment of spatial uncertainty in irrigation methods adaptation to climate change. [master's thesis]. University of Birjand. 2013. [Persian]