

پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر عامل فرساینده‌گی باران در سواحل جنوبی خزر

شهلا توانگر^۱، حمیدرضا مرادی^{۲*}، علیرضا مساح بوانی^۳ و محمود آذری^۴

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ^۲ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران و ^۴ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۲

چکیده

اقلیم سیستم پیچیده‌ای است که عمدتاً به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در حال تغییر است و گرمایش جهانی منجر به تشدید تغییرات عوامل اقلیمی از جمله مقدار بارش و شدت وقایع حدی بارش می‌شود. در اثر تغییر اقلیم در آینده انتظار تغییر در میزان و حجم فرسایش خاک وجود دارد که مهمترین عامل اثر افزایش قدرت فرساینده‌گی باران می‌باشد. هدف از این تحقیق تعیین اثر تغییر اقلیم بر عامل فرساینده‌گی باران است. به این منظور از خروجی‌های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوی انتشار A1B استفاده شد و ریزمقیاس سازی با مدل LARS-WG انجام گرفت. سپس با هدف پایش تغییرات عامل فرساینده‌گی در شمال ایران، عامل فرساینده‌گی در سه دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که عامل فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های سنگده، بابل، کورکورسر، انزلی، بهشهر و گرگان در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت و در ایستگاه‌های بابلسر، هشتپر، رشت و در دوره‌های ۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات عامل فرساینده‌گی باران در دوره‌های آتی مورد بررسی در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و کمترین تغییرات آن مربوط به دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ محاسبه شد. همچنین، بیشترین میزان عامل فرساینده‌گی باران شبیه‌سازی شده، ۴۲/۶ مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت در ایستگاه هشتپر و مربوط به دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که عامل فرساینده‌گی در طول قرن اخیر در منطقه شمال کشور در اکثر نقاط افزایشی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس سازی، شمال ایران، گازهای گلخانه‌ای، LARS-WG، HadCM3

مقدمه

هرگونه تغییر در میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین باعث برهم خوردن تعادل بین اجزاء سیستم اقلیم کره زمین می‌شود. اما این که در آینده چه مقدار از این گازها توسط جوامع بشری وارد اتمسفر زمین شده و در نتیجه آن چه وضعیتی برای سیستم اقلیم کره زمین رخ خواهد داد، معین و قطعی نیست. لذا، نتایج به‌صورت کاملاً غیرقطعی و تحت سناریوهای

تغییر اقلیم در اثر افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای اثرات بارزی بر چرخه آبی و منابع آب دارد، به‌گونه‌ای که می‌تواند به‌عنوان تهدیدی بزرگ بر کمیت و کیفیت سامانه‌های آبی در سراسر جهان قلمداد شود. این تهدیدات برای مناطق مختلف زمین متفاوت می‌باشد (Steele-Dunne و همکاران، ۲۰۰۸).

مدل‌های GCM در حال حاضر اطلاعات جزئی بارش مورد نیاز در محاسبه عامل فرساینده به روش ویشمایر و اسمیت و همچنین، اطلاعات ورودی معادلات انرژی رگبار و حداکثر شدت بارش را ارائه نمی‌دهند (McFarlane و همکاران، ۱۹۹۲)، به همین خاطر از ارتباط آماری بین بارندگی ماهانه و سالانه و عامل فرساینده باران در مطالعه تغییر عامل فرساینده با استفاده از خروجی‌های مدل GCM استفاده می‌شود (Renard و Freimund، ۱۹۹۴؛ Nearing، ۲۰۰۱). با همین روش Sauerborn و همکاران (۱۹۹۹) از داده‌های مدل‌های شبیه‌سازی تغییر اقلیم برای بررسی بارش و پارامتر فرساینده باران استفاده کردند. آن‌ها مقدار بارش ماهانه را برای تعیین شاخص فورنیه استخراج و سپس با استفاده از رابطه به دست آمده از مدلسازی بین شاخص فورنیه و عامل فرساینده معادله جهانی خاک، مقدار عامل فرساینده باران را به دست آوردند. نتایج تحقیقات آن‌ها افزایش فرساینده باران در هشت ایستگاه واقع در شمال آلمان را نشان می‌دهد.

در مطالعه دیگر Nearing (۲۰۰۱) از ارتباط بین بارندگی سالانه و ماهانه و عامل فرساینده به منظور برآورد تغییرات بالقوه فاکتور R (عامل فرساینده) از خروجی دو مدل GCM در سراسر ایالت متحده در قرن ۲۱ استفاده کرد. نتایج نشان داد که تغییر عامل فرساینده به طور متوسط بین ۱۶ تا ۵۸ درصد می‌باشد. Sun و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای آن به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر هدررفت خاک و منابع آب در چین پرداختند. نتایج مطالعه دلالت بر افزایش معنی‌دار عامل فرساینده باران در شمال شرقی و جنوب شرقی چین دارد، به طوری که شبیه‌سازی‌ها نشان داد، در طول دوره آماری ۲۰۹۹-۲۰۶۱ دو پارامتر دما و بارش و به تبع آن قدرت فرساینده باران به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بررسی مقدار، شدت و روند عامل فرساینده در منطقه Basilicata در جنوب ایتالیا به منظور مطالعه عواقب ناشی از تغییرات آب و هوایی بر خاک که با مطالعه بر روی پنج ایستگاه و ۵۴۹ واقعه بارندگی در طول پنج سال انجام شد، نشان داد که در نیمی از این ایستگاه‌ها هیچ‌گونه روند آماری

مختلفی ارائه شده است. در سال ۱۹۹۶، هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۱ نوع دیگری از سناریوهای انتشار را با نام SRES^۲ ارائه کرد که در برگرنده طیف وسیعی از تغییرات اقتصادی-اجتماعی می‌باشد. این زیرسناریوها مربوط به یکی از چهار گروه اصلی یعنی A1، A2، B1 و B2 و همچنین زیر گروه A1T، A1F1 و A1B می‌باشند (IPCC، ۱۹۹۶).

مهمترین شاخص اقلیمی مورد استفاده در فرسایش، توان و انرژی عامل فرساینده باران بوده که اصطلاحاً فرساینده باران^۳ نامیده می‌شود. مفهوم عبارت فرساینده باران توسط Whichmeier و Smith در سال ۱۹۶۵ به منظور لحاظ کردن تاثیر اقلیم بر فرسایش ارائه شد. تغییرات دما و بارش از راه‌های مختلفی قدرت فرساینده باران را تحت تاثیر قرار خواهد داد، مانند تغییر در حجم و شدت بارش که باعث تغییر در انرژی باران و قدرت جداسازی قطرات باران و به دنبال آن تغییر در قدرت فرساینده باران خواهد شد. نتیجه اثرات تغییرات آب و هوایی بر روی فرسایش خاک، تغییر در قدرت فرساینده باران می‌باشد (Favis و Bordman، ۱۹۹۵؛ Williams و همکاران، ۱۹۹۶؛ Nearing، ۲۰۰۱؛ Pruski و Nearing، ۲۰۰۲). تغییر اقلیم و تغییر الگوی بارش، زمینه را برای تغییر مقادیر عامل فرساینده باران فراهم می‌کند که می‌تواند تاثیر منفی بر محیط زیست داشته باشد (Sauerborn و همکاران، ۱۹۹۹). افزایش عامل فرساینده پیش‌بینی شده در منطقه و در دوره‌های آینده می‌تواند نشان‌دهنده افزایش رواناب و هدررفت خاک منطقه باشد (Zhang، ۲۰۰۷؛ Wu و همکاران، ۲۰۰۸، Zhang و همکاران، ۲۰۱۰). عامل فرساینده باران یک شاخص عددی است که ظرفیت باران را در فرساینده خاک نشان می‌دهد و به طور معمول از معادله جهانی هدررفت خاک^۴ محاسبه می‌شود (Whichmeier و Smith، ۱۹۶۵). عامل فرساینده از مجموع انرژی رگبار و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (EI₃₀) به دست می‌آید.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Special Report on Emission Scenarios

³ Erosivity

⁴ Universal soil loss equation (USLE)

فرساینده‌گی در سری‌های زمانی مختلف پرداختند. در این تحقیق از هفت شاخص مختلف مبتنی بر داده‌های سهل‌الوصول برای مدل‌سازی با عامل فرساینده‌گی Whichmeier و Smith استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که شاخص Roose، از بین شاخص‌های مورد بررسی برای مدل‌سازی با شاخص فرساینده‌گی (R) مناسب می‌باشد. طبق تحقیقات صورت گرفته و با توجه به اهمیت نقش عامل فرساینده‌گی باران در مقدار فرسایش خاک و تغییرپذیری مکانی آن در نقاط مختلف، لازم است که در تدوین استراتژی‌های کلان حفاظت آب و خاک کشور به دور نمای اثر تغییر اقلیم بر فرسایش در ایران نیز پرداخته شود، به همین منظور و با توجه به فقدان مطالعات مرتبط با اثر تغییر اقلیم بر فرسایش خاک در کشور و بالاخص تاثیر آن بر عامل فرساینده‌گی، این تحقیق به اثر تغییر اقلیم بر فرساینده‌گی باران در دوره‌های آتی در شمال ایران به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور پرداخته است.

مواد و روش‌ها

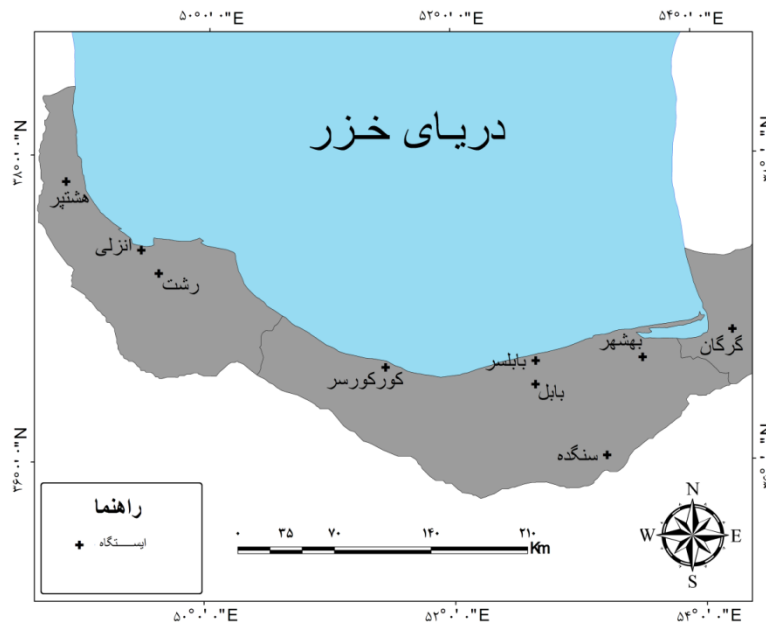
منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد نیاز: منطقه مورد مطالعه دامنه شمالی البرز و حاشیه جنوبی دریای خزر می‌باشد که سه استان گلستان، مازندران و گیلان به‌ترتیب با مساحت حدود ۲۲۰۰۰، ۲۴۰۹۱ و ۱۴۷۱۱ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به اهمیت خاک و هدررفت آن و همچنین پیش‌بینی و پایش درازمدت شرایط آب و هوایی شمال کشور و ارزیابی میزان تغییرات عامل فرساینده‌گی طی سال‌های آینده، این منطقه برای مطالعه انتخاب شد. در مطالعات تغییر اقلیم، نیاز به داده‌های دوره پایه می‌باشد. در این تحقیق به‌منظور هماهنگی در انتخاب دوره پایه در مطالعات مختلف تغییر اقلیم و امکان مقایسه آن‌ها، با در نظر گرفتن حداکثر هم‌پوشانی داده‌ها، و در نظر گرفتن حداکثر هم‌پوشانی داده‌ها و امکان مقایسه با دوره‌های آینده مورد پیش‌بینی (۲۰۹۹-۲۰۸۰، ۲۰۶۵-۲۰۴۵، ۲۰۳۰-۲۰۱۱)، دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۰۰ به‌عنوان دوره پایه انتخاب شد. متغیرهای اقلیمی مورد نیاز در این تحقیق شامل

وجود ندارد، در حالی که در مابقی ۱۴ ایستگاه روند افزایشی و ۱۲ ایستگاه روند کاهش را در فرساینده‌گی باران فصلی و سالانه نشان دادند. در تحقیقی دیگر در چین Zhang و همکاران (۲۰۱۰) عامل فرساینده‌گی را با استفاده از داده‌های مدل‌های GCM و CLIGEN محاسبه کردند. بدین منظور از مقدار بارندگی سالانه، شش مدل اقلیمی و سه سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای مختلف استفاده نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها افزایش مقدار عامل فرساینده‌گی باران در اواسط قرن ۲۱ و همچنین افزایش میزان فرساینده‌گی باران در بخش شمالی چین را نسبت به بخش جنوبی آن نشان داد.

دستیابی به رابطه مناسب برای تعیین عامل فرساینده‌گی باران با استفاده از داده‌های اقلیمی موجود نیز در تحقیقات مختلف مورد توجه واقع شده است، به‌طوری که در تحقیق Lo و همکاران (۱۹۸۵) برای تعیین شاخص مناسب به‌منظور مدل‌سازی با شاخص فرساینده‌گی Whichmeier و Smith از داده‌های ۹۹ ایستگاه در منطقه Hawaii استفاده کردند که نتایج مطالعه آن‌ها منجر به یافتن معادله خطی بین بارندگی روزانه (P) و شاخص فرساینده‌گی (R) با ضریب تبیین ۰/۸۹ شدند. در تحقیق Behzadfar و همکاران (۲۰۰۶)، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی فرساینده‌گی و تعیین رابطه بین خصوصیات مختلف بارندگی و فرساینده‌گی باران در مقاطع زمانی ماهیانه، فصلی و سالیانه به کمک آنالیز رگرسیونی بررسی شد. نتایج تحلیل رگرسیونی موید ارتباط بالای فرساینده‌گی با مقدار و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران بود. در نهایت مدل فرساینده‌گی بارش بر اساس میانگین مقادیر باران برای منطقه محاسبه شد. Heo و Lee (۲۰۱۱) نیز هشت متغیر بارندگی در ۳۳ ایستگاه را طی دوره ۲۰ ساله در کره جنوبی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که عامل R بر اساس بارش سالانه برای پیش‌بینی بلندمدت مناسب می‌باشد. در تحقیق مشابه Bonilla و Vidal (۲۰۱۱) مقدار R را با استفاده از روش تجربی و بر اساس بارش سالانه محاسبه و عامل فرساینده‌گی را محاسبه کردند. در این مطالعه میزان فرساینده‌گی باران با کارایی ۰/۸۸ پیش‌بینی شد. همچنین Sadeghi و Tavangar (۲۰۱۵) به توسعه مدل‌های ایستگاهی تخمین عامل

سری زمانی ۳۰ ساله از داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش می‌باشد، همچنین، آمار و اطلاعات مورد نیاز جهت محاسبه عامل فرساینده، شامل رگبارهای ثبت شده به وسیله باران نگارهای مستقر در ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه می‌باشد.

جهت تهیه اطلاعات مربوط به عامل فرساینده، با مراجعه به اطلس منابع آب ایران و راهنمای همراه فهرست ایستگاه‌های سینوپتیک استخراج و داده‌های بارندگی با گام زمانی ۱۰ دقیقه مورد نیاز از سازمان هواشناسی دریافت شد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال کشور

تعیین شاخص فرسایش بارندگی (R): عامل R یا شاخص فرساینده باران در معادله جهانی فرسایش خاک به انرژی جنبشی باران بستگی دارد و با حداکثر شدت باران‌های ۳۰ دقیقه‌ای همبستگی نزدیک نشان می‌دهد. انرژی جنبشی در این معادله با رابطه (۱) ارائه می‌شود.

$$KE = 210.3 + 89.7 \text{Log} I \quad (1)$$

که در آن، KE انرژی جنبشی باران (ژول بر متر مربع در سانتی‌متر باران در هر گام زمانی) و I شدت بارندگی (سانتی‌متر بر ساعت برای گام‌های زمانی) می‌باشد (Smith و Wishmeier، ۱۹۶۵). در نهایت برای تعیین عامل فرساینده باران (R) از طریق رابطه (۲) استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n EI_{30}}{100} \quad (2)$$

که در آن، R عامل فرساینده باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت)، $\sum_{i=1}^n E$ مجموع انرژی جنبشی رگبار (از گام زمانی یک تا n)، I_{30} حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای پیوسته (سانتی‌متر بر ساعت) می‌باشد.

برای انتخاب بهترین رابطه رگرسیونی برای مدل-سازی با شاخص فرساینده KE و R از خطای نسبی (RE)^۱ مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و ضریب کارایی (CE)^۳ طبق رابطه‌های (۳) تا (۵) استفاده شد.

$$RE = \left| \frac{y_o - y_e}{y_o} \right| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_e)^2}{n}} \quad (4)$$

¹ Relative Error

² Root Mean Square Error

³ Coefficient of Efficiency

و^۲ (Site Analysis)، صحت‌سنجی مدل (QTest)^۳ و تولید داده‌های هواشناسی^۴ انجام شده است. در مرحله اول داده‌های هواشناسی مشاهده شده برای تعیین مشخصه‌های آماری تحلیل شد. در مرحله دوم، توانایی مدل برای شبیه‌سازی اقلیم در ایستگاه منتخب تعیین شد و در مرحله آخر دمای کمینه، بیشینه، بارش و تابش برای آینده شبیه‌سازی شد (Semenov و Barrow, ۲۰۰۲). سپس مدل LARS-WG برای ایستگاه‌های مورد مطالعه واسنجی و اجرا شد.

نتایج و بحث

اولین گام در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عناصر مختلف، سنجش توانایی مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی اقلیم ایستگاه مورد بررسی می‌باشد. برای این منظور ۳۰ سال داده‌های شبیه‌سازی شده دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش به‌وسیله پارامترهای به‌دست آمده در طی واسنجی مدل تولید شد، سپس مشخصه‌های آماری داده‌های هواشناسی (داده بارندگی، حداکثر و حداقل دما) مشاهده‌ای و بازسازی شده برای تعیین وجود اختلاف معنی‌دار از طریق انجام آزمون کای-اسکوئر تحلیل شد. به‌عنوان نمونه، نتایج آزمون کای-اسکوئر مربوط به مقایسه توزیع‌های احتمال متغیرهای بارندگی برای ایستگاه انزلی در جدول ۱ ارائه شده است. محدوده قابل قبول p-value بین صفر تا یک می‌باشد.

از آنجایی‌که همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر p-value همگی در سطح معنی‌داری یک درصد قابل قبول بوده و نتایج مربوط به واسنجی مدل LARS-WG برای ایستگاه انزلی قابل قبول است. این رویکرد برای سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز بررسی و نتایج برای آن‌ها هم قابل قبول بوده است.

تعیین رابطه بین بارش سالانه و شاخص R: بر اساس مطالعات انجام شده (Zhang و همکاران، ۲۰۱۰؛ Nearing, ۲۰۰۱) در بررسی اثر تغییر اقلیم بر عامل فرسایندگی از داده‌های بارندگی سالانه استفاده شده است، به همین منظور، برای ایجاد یک رابطه

$$CE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_0 - y_e)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)^2} \quad (5)$$

که در آن، y_0 مقدار مشاهداتی، y_e میانگین مقدار مشاهداتی، y_e مقدار تخمینی، RE خطای نسبی، $RMSE$ مجذور میانگین مربعات خطا، CE ضریب کارایی می‌باشد.

مقادیر عامل فرسایندگی R به روش Whichmeier و Smith در مقیاس سالانه با مقادیر بارش سالانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار SPSS19 (روش رگرسیون) بررسی و روابط با آماره‌های ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. از رابطه‌های به‌دست آمده به‌منظور استخراج عامل فرسایندگی در دوره‌های آتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شد.

سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی: در این تحقیق از خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوی انتشار A1B مربوط به چهارمین گزارش ارزیابی (AR4) IPCC استفاده شده است. علت استفاده از تنها یک سناریو در تحقیق حاضر برای سادگی انجام تجزیه و تحلیل‌های نتایج خروجی بوده و نیز به‌دلیل مقبولیت سناریوی انتشار A1B در اکثر مطالعات از این سناریو استفاده شد (Steele-Dunne و همکاران، ۲۰۰۸؛ Serpa و همکاران، ۲۰۱۵؛ Herrera-Pantoja و Hiscock, ۲۰۱۵).

با توجه به قدرت تفکیک مکانی کم مدل‌های GCM در این تحقیق با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری ارایه شده در مدل LARS-WG و داده‌های HadCM3 استفاده شد. در مدل LARS-WG از مولد آب و هوای تصادفی^۱ برای ایجاد سناریوهای اقلیمی ایستگاه استفاده می‌شود. بعد از واسنجی پارامترهای ایستگاه به‌وسیله داده‌های آب و هوای مشاهداتی در آن ایستگاه، توانایی شبیه‌سازی سری‌های زمانی آب و هوایی روزانه وجود دارد. LARS-WG، سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند. تولید سناریوهای اقلیم روزانه به‌وسیله مدل LARS-WG در سه گام شامل واسنجی مدل

² Calibration

³ Validation

⁴ Generator

¹ Stochastic Weather Generation

رگرسیون بین داده‌های بارش سالانه و شاخص R در هر ایستگاه، ابتدا مقادیر شاخص R را بر اساس داده‌های پایه (داده‌های مشاهداتی بارندگی) محاسبه شد (جدول ۲)، سپس با توجه به مقادیر بارش سالانه

هر ایستگاه و مقادیر شاخص R مربوطه، رابطه رگرسیونی مناسب انتخاب شد. مقادیر عامل فرساینده بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۳ محاسبه شد.

جدول ۱- نتایج آزمون کای-اسکور برای توزیع‌های احتمال داده‌های بارندگی مشاهده شده و بازسازی شده در ایستگاه انزلی به‌وسیله مدل

ماه	p-value	مقدار کای اسکور
ژانویه	۱/۰۰۰	۰/۰۳۶
فوریه	۰/۹۹۸	۰/۰۷۵
مارس	۰/۹۹۸	۰/۰۷۸
آوریل	۱/۰۰۰	۰/۰۲۷
می	۱/۰۰۰	۰/۰۴۳
ژوئیه	۱/۰۰۰	۰/۰۵۵
جولای	۰/۹۹۸	۰/۰۴۳
اوت	۰/۹۹۹	۰/۰۴۲
سپتامبر	۰/۹۹۸	۰/۰۴۸
اکتبر	۰/۹۹۸	۰/۰۴۶
نوامبر	۰/۹۹۹	۰/۰۷
دسامبر	۱/۰۰۰	۰/۰۳۵

جدول ۲- مقادیر عامل فرساینده بر اساس باران سالانه ($Mj\ mm\ ha^{-1}h^{-1}$) در دوره پایه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

انزلی	بابل	بابلسر	بهشهر	هشتپر	رشت	سنگده	کورکورسر	گرگان
۷/۵۷	۳/۱۰	۸/۹۰	۳/۰۸	۰/۹۸	۱۰/۳۸	۵/۶۹	۱۱/۰۴	۸/۷۱
۱۹/۵۴	۳/۹۳	۵/۴۰	۴/۵۰	۲/۱۰۰	۱۲/۰۰	۲۵/۶۰	۱۶/۳۷	۵/۴۴
۹/۵۰	۲/۴۸	۳/۸۰	۲/۵۱	۲/۱۱	۱۱	۵/۶۳	۱۳/۲۳	۶/۳۱
۱۶/۲۱	۶/۷۸	۵/۲۲	۳/۳۱	۶/۰۳	۱۳/۴۸	۹/۹۶	۱۶/۱۸	*
۳/۱۶	۰/۰۵	۴/۳۰	۰/۵۱	۲۲/۰۰	۱۱/۰۱	۲/۸۳	۱۷/۵۹	*
۱۸/۶۶	۹/۷۸	۷/۴۳	۴/۰۵	۲۹/۰۰	۱۱/۹۴	۳/۲۰	۱۵/۰۷	*
۱۲/۴۸	۴/۵	۷/۰۲	۱۰	۲۸/۰۰	۱۴/۰۰	۱۲/۹۸	۳/۹۵	*
۲/۰۹	۳/۲	۵/۲۰	۱/۱۶	۱۱/۰۰	۱۲/۰۰	۵/۳۳	۱۲/۹۱	*
۱۶/۱۸	۲/۵۰	۹/۷۴	۲/۴۰	۹/۰۹	۱۱/۲۳	۲/۰۱	۱/۶۳	*
۳/۲۱	۰/۲۶	۴/۲۰	۱/۶۷	۴/۴۰	۱۱/۰۰	۳/۲۶	۷/۴۱	*
۸/۰۰	۹/۸	۱/۴۹	۲	۳۹/۴۵	۱۴/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۱۳	*
۶/۳۴	۳/۰۳	۴/۷۲	۱/۴۷	۲۵/۶۹	۱۶/۰۰	۶/۲۳	۴/۶۶	*
۶/۶۰	۰/۹	۶/۲۸	۲	۱۶/۶۹	۱۳/۲۰	۳/۶۵	۵/۹۷	۶/۹۲
۵/۴۵	۶/۳۹	۳/۰۷	۱/۸۰	۱/۰۹	۱۱/۰۰	۴/۴۹	۲/۰۸	۹/۷۹
۸/۴۰	۰/۷۶	۴/۷۳	۲/۸۱	۱۹/۸۰	۱۲/۶۵	۷/۴۴	۱۳/۸۳	۱۰/۶۸
۱۲/۰۴	۴/۹	۶/۷۸	۸/۹۹	۲۲/۰۰	۱۴/۰۰	۲/۹۸	۲۳/۷۴	۳/۴۶
۷/۰۶	۱۰/۲۹	۳/۹۷	۲/۵۴	۹/۰۰	۴/۳۹	۵/۸۱	۱۶/۳۲	۳/۵۴
۸/۷۷	۶/۷	۴/۹۴	۸/۹۲	۲/۸۰	۸/۰۱	۰/۴۴	۲/۳۱	۴/۰۸
۱۶/۷۰	۳/۶۱	۱۵/۰۵	۱۲/۱۰	۱۵/۰۰	۲۱/۷۵	۲/۰۲	۱/۳۵	۶/۱۴
۸/۶۷	۱/۰۴	۴/۸۸	۲/۲۷	۲/۲۷	۱۴/۰۰	۷/۸۷	۱۱/۸۰	۵/۸۰

* بدون داده

خطا پایین‌تر تعیین شد (Sadeghi و Tavangar، ۲۰۱۵). بر اساس ضرایب عملکرد رابطه‌ها را می‌توان برای دوره‌های آبی محاسبه کرد.

مناسب‌ترین روابط رگرسیونی بین بارندگی سالانه ایستگاه‌ها و عامل فرساینده‌گی معادله جهانی فرسایش خاک باتوجه به ضریب تبیین بالاتر و آماره‌های ارزیابی خطای نسبی، ضریب کارایی و مجذور میانگین مربعات

جدول ۳- استخراج روابط بین بارندگی سالانه و عامل فرساینده‌گی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	رابطه	سطح معنی داری	ضریب تبیین	خطای نسبی	ضریب کارایی	مجذور میانگین مربعات خطا
انزلی	$R=0.005P^{1.15}$	۰/۰۰۱	۰/۶۷	۴۶/۱۳	۰/۶۴	۲/۹۷
بابل	$R=0.01P-6.09$	۰	۰/۷۰	۷۸/۳۰	-۰/۰۱	۴/۴۸
بابلسر	$R=0.01P-5.77$	۰	۰/۷۷	۳۶/۳۹	-۰/۲۴	۲/۷۹
بهشهر	$R=0.02P-10.83$	۰/۰۰۲	۰/۷۱	۷۷/۷۰	۰/۲۰	۵/۹۶
هشتپر	$R=7.84 \times 10^{-18} P^{5.90}$	۰/۰۰۱	۰/۵۲	۵۱/۱۰	-۰/۶۵	۷/۳۶
رشت	$R=0.009P+0.36$	۰	۰/۶۹	۶۱/۱۳	۰/۱۹	۶/۳۷
سنگده	$R=0.02P-12.3$	۰/۰۰۴	۰/۷۱	۲۵/۸۸	۰/۶۶	۱/۴۱
کورکورسر	$R=0.02P+0.34$	۰	۰/۸۰	۲۴/۷۵	۰/۸۵	۲/۱۴
گرگان	$R=3.67P^{2.2}$	۰/۰۵	۰/۶۳	۴۶/۹۹	۰/۲۸	۱/۸۸

در روابط ارائه شده R عامل فرساینده‌گی باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت) و P میزان بارندگی سالانه (میلی‌متر) است.

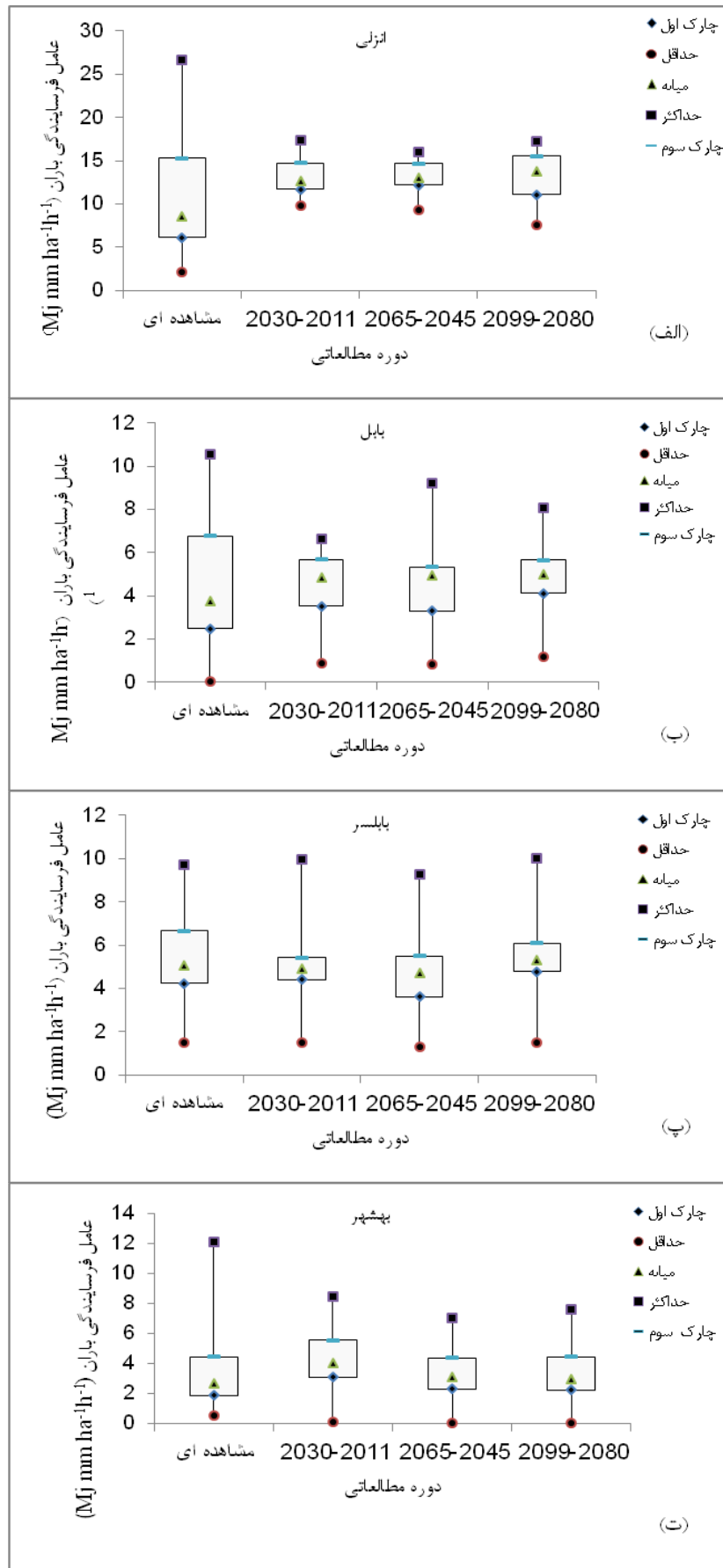
۰/۵ تا ۳۹/۴ (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت) در دوره‌های گذشته متغیر بوده که بیشترین آن مربوط به ایستگاه هشتپر در سال ۱۹۹۱ و کمترین آن مربوط به ایستگاه بابل در سال ۱۹۸۵ می‌باشد.

روابط رگرسیونی بین بارندگی سالانه ایستگاه‌ها و عامل فرساینده‌گی معادله جهانی فرسایش خاک با توجه به ضریب تبیین بالاتر و آماره‌های ارزیابی نشان داد که بارندگی سالانه می‌تواند شاخصی مناسب به‌منظور مدل‌سازی با عامل فرساینده‌گی باشد، که با نتایج Lo و همکاران (۱۹۸۵)، Vidal و Bonilla (۲۰۱۱)، Lee و Heo (۲۰۱۱)، Tombus و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر استفاده از داده‌های بارندگی سالانه در تخمین عامل فرساینده‌گی معادله جهانی فرسایش خاک مطابقت دارد. همچنین، با تحقیق Sadeghi و Tavangar (۲۰۱۵) مبتنی بر استفاده از داده‌های سهل‌الوصول به‌منظور برآورد عامل فرساینده‌گی هم‌خوانی دارد. لذا، می‌توان از این روابط برای تعیین عامل فرساینده‌گی در دوره‌های آینده و با استفاده از خروجی‌های مدل GCM استفاده کرد.

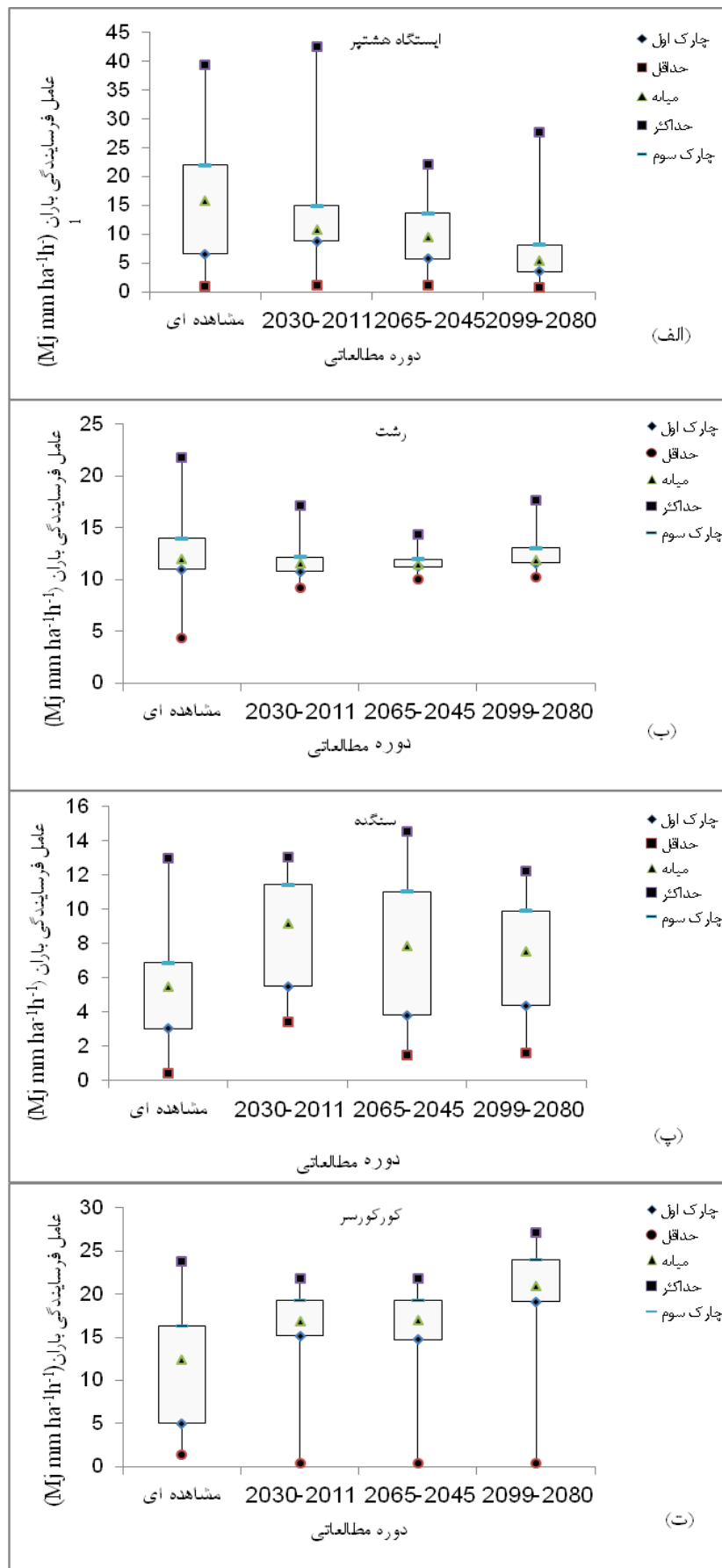
شبیه‌سازی مقدار شاخص فرساینده‌گی باران در دوره‌های آبی: نتایج حاصل از تغییرات سالانه عامل فرساینده‌گی باران در دوره مشاهداتی و دوره‌های آبی بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B در ایستگاه‌های مختلف در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۲ تا ۴ عامل فرساینده‌گی در طول قرن اخیر در منطقه شمال کشور در ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبت به دوره پایه تغییراتی خواهد داشت. تغییر عامل فرساینده‌گی در ایستگاه‌های سنگده، بابل، کورکورسر، انزلی، بهشهر و دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ ایستگاه گرگان بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B معنی‌دار و افزایشی است و در ایستگاه‌های بابلسر، هشتپر، رشت و گرگان در دوره‌های آینده مورد بررسی (دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۹۹ و ۲۰۶۵-۲۰۴۵) کاهش می‌یابد.

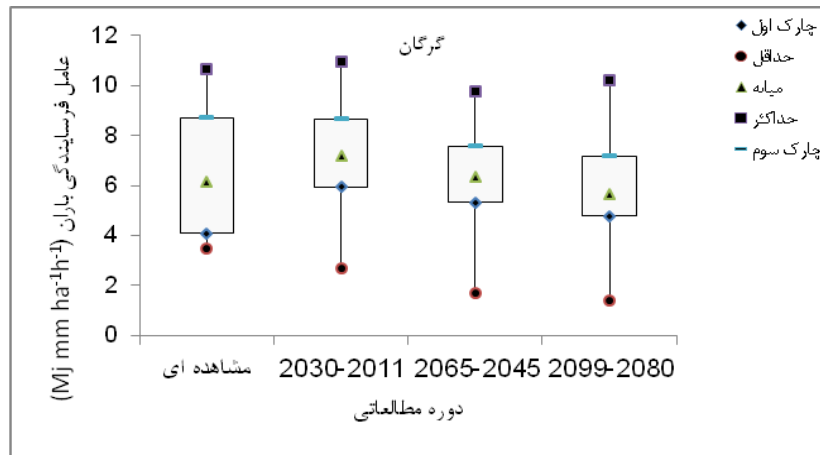
نتایج نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی منطقه شمال کشور در قرن ۲۱ متفاوت با شرایط فعلی خواهد بود. دامنه تغییرات عامل فرساینده‌گی بین



شکل ۲- تغییرات سالانه عامل فرساینده‌گی باران در دوره‌های مشاهده‌ای و دوره‌های آبی بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B در ایستگاه‌های مختلف



شکل ۳- تغییرات سالانه عامل فرساینده‌ی باران در دوره‌های مشاهده‌ای و دوره‌های آتی بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B در ایستگاه‌های مختلف



شکل ۴- تغییرات سالانه عامل فرساینده گی باران در دوره مشاهداتی و دوره‌های آبی بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B در ایستگاه گرگان

۲۰۱۵ مبنی بر تغییر عامل فرساینده گی هم‌خوانی دارد.

عامل فرساینده گی ممکن است بیشتر از آن چه که مورد پیش‌بینی قرار گرفته است، دچار تغییر شود. به علت این که مجموعه متغیرهای اساسی و غیرخطی که در پدیده تغییر اقلیم ظاهر می‌شوند، در ریزمقیاس نمایی به صراحت گنجانده نشده‌اند و پارامترهایی که برای ریزمقیاس‌سازی آماری به منظور پیش‌بینی بارش در آینده به کار می‌رود (Sauerborn و همکاران، ۱۹۹۹)، همچنین، روابط رگرسیونی استفاده شده در سناریوهای بارش به طور کلی به عدم قطعیت منجر می‌شود که می‌توان به عنوان یک توصیه به منظور بهبود وضعیت فرساینده گی در منطقه در نظر گرفت (Nearing، ۲۰۰۱). نتایج نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی منطقه شمال کشور در قرن ۲۱ متفاوت با شرایط فعلی خواهد بود که با نتایج صورت گرفته توسط Babaian و همکاران (۲۰۱۰)، Kamal و Massah Bavani (۲۰۱۰) و Ashraf و همکاران (۲۰۱۱) در سایر مناطق کشور هم‌خوانی دارد.

عامل فرساینده گی در ایستگاه‌های سنگده، بابل، کورکورسر، انزلی، بهشهر و دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ ایستگاه گرگان بر اساس مدل HadCM3 و سناریوی A1B افزایشی است که با نتایج تحقیقات Sauerborn Pruski و همکاران (۱۹۹۹)، Sun و همکاران (۲۰۰۲)، Nearing و همکاران (۲۰۰۲)، Nearing و همکاران (۲۰۰۵) و Zhang و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر افزایش عامل فرساینده گی مطابقت دارد.

این تاثیر به دنبال تغییر در شدت و انرژی رگبار در منطقه مورد مطالعه بوده و با افزایش مقادیر فرساینده گی در طول دوره‌های آینده در منطقه شمال کشور همراه خواهد بود. بر خلاف ایستگاه‌های ذکر شده در بالا، تغییرات عامل فرساینده گی در ایستگاه‌های بابلسر، هشتپر، رشت و گرگان (دوره ۲۰۹۹-۲۰۸۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۵) در دوره‌های آینده مورد بررسی کاهش یافته است که با توجه به نتایج تحقیقات مشابه مبنی بر تغییرات متنوع مکانی عامل فرساینده گی و همچنین، تغییر عامل فرساینده گی در مناطق مختلف جغرافیایی (Nearing، ۲۰۰۱) دور از انتظار نیست و با تحقیق Sadeghi و Hazbavi در سال

منابع مورد استفاده

- Ashraf, B., M. Musa baygi, GH.A. Kamali and K. Davari. 2011. Prediction of water requirement of sugar beet during 2011-2030 using simulated weather data with LARS-WG downscaling model. *Journal of Water and Soil*, 25: 1184-1196 (in Persian).
- Babaian, I. and Z. Najafinik. 2010. Analysis of climate change in the Razavi Khorasan during 2010-39 using downscaling GCM model output. *Geography and Regional Development*, 8: 1-19 (in Persian).
- Bonilla, C.A. and K.L. Vidal. 2011. Rainfall erosivity in central Chile. *Journal of Hydrology*, 410: 126-133.

4. Behzadfar, M., H.R. Sadeghi and H.R. Moradi. 2006. Modeling rainfall erosivity factor for single showers, a case study in Khuzestan Province, Iran. *International Journal of Humanities*, 12: 41-49 (in Persian).
5. Favis, D. and J. Boardman. 1995. Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a Modelling study on the UK South downs. *Catena*, 25: 365-387.
6. Herrera-Pantoja, M. and K.M. Hiscock. 2015. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environmental Science and Policy*, 54: 81-89.
7. IPCC. 1996. *The science of climate change*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 125 pages.
8. Lee, J.H. and J.H. Heo. 2011. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409: 30-48.
9. Kamal, A.R. and A.R. Massah Bavani. 2010. Climate change and variability impact in Basin's runoff with interference of tow hydrology models uncertainty. *Journal of Water and Soil*, 24: 920-931 (in Persian).
10. Lo, A., S.A. EI-Swaify, E.W. Dangler and L. Shinshiro. 1985. Effectiveness of EI₃₀ as an erosivity index in Hawaii. *Soil Conservation Society of American*, Ankeny, Iowa, 384-392.
11. McFarlane, N.A., G.J. Boer, J.P. Blanchet and M. Lazare. 1992. The Canadian climate centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate. *Journal of Climate*, 5: 1013-1044.
12. Nearing, M.A. 2001. Potential changes in rainfall erosivity in the U.S with climate change during the 21st century. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56: 229-232.
13. Nearing, M.A., V. Jetten, C. Baffaut, O. Cerdan, A. Couturier, M. Hernandez and K. Van Oost. 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61: 131-154.
14. Pruski, F.F. and M.A. Nearing. 2002. Runoff and soil-loss responses to change in precipitation: a computer simulation study. *Journal of Soil Water Conservation*, 57: 7-16.
15. Renard, K.G. and J.R. Freimund. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 287-306.
16. Sadeghi, S.H.R. and S. Tavangar. 2015. Development of stationnal models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Natural Hazard*, 77: 429-443.
17. Sauerborn, P., A. Klein, J. Botschek and A. Skowronek. 1999. Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models-methods and scenarios for a humid region. *Geoderma*, 93: 269-276.
18. Semenov, M.A. and E.M. Barrow. 2002. LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version 3.0.
19. Serpa, D., J.P. Nunes, J. Sampaio, R. Jacinto, S. Veiga, J.C. Lima, M. Moreira, J. Corte-Real, J.J. Keizer and N. Abrantes. 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 538: 64-77.
20. Steele-Dunne, S., P. Lynch, R. McGrath, T. Semmler, S. Wang, J. Hanafin and P. Nolan. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology*, 356: 28-45.
21. Sun, G.E., S.G. McNulty, J. Moore, C. Bunch and J. Ni. 2002. Potential impacts of climate change on rainfall erosivity and water availability in China in the next 100 years. *Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization*. Beijing, China, 244-250.
22. Tombus, F.E., M. Yuksel, M. Sahin, I.M. Ozulu and M. Cosar. 2012. Assessment of soil erosion based on the method USLE, Corum province example, FIG working week, knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. Rom. Italy.
23. Williams, J., M. Nearing, A. Nicks, E. Skidmore, C. Valentin, K. King and R. Savabi. 1996. Using soil erosion models for global change studies. *Journal of Soil and Water conservation*, 51: 381-385.
24. Whichmeier, W.H. and D.D. Smith. 1965. *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning* USDA, science and education administration, Agricultural Research, Agriculture Handbook No. 537, 58 pages.
25. Wu, Y., Q. Zheng, Y. Zhang, B. Liu, H. Cheng and Y. Wang. 2008. Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China. *Geomorphology*, 101: 683-691.
26. Zhang, X.C. 2007. A comparison of explicit and implicit spatial downscaling of GCM output for soil erosion and crop production assessments. *Climatic Change*, 84: 337-363.
27. Zhang, Y.G., M.A. Nearing, X.C. Zhang, Y. Xie and H. Wei. 2010. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. *Journal of hydrology*, 384: 97-106.