

بررسی تغییرات عملکرد ذرت تحت تأثیر تغییر اقلیم در استان کرمانشاه

فیروز مجرد^{۱*}، لیلا نادری^۲، بهمن فرهادی^۳، مریم حافظ پرست^۴

۱. دکترای اقلیم‌شناسی، دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه*
۲. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد اقلیم‌شناسی کاربردی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۳. دکترای آبیاری و زهکشی، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۴. دکترای منابع آب، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

دریافت: ۹۴/۱۱/۶ پذیرش: ۹۵/۷/۴

چکیده

یکی از رویکردهای مهم در مطالعات آب و هواشناسی بررسی اثر تغییر عناصر اقلیمی بر عملکرد محصولات کشاورزی در عرصه‌های جغرافیایی است. این مطالعه با هدف پیش‌بینی عملکرد محصول ذرت تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در استان کرمانشاه به انجام رسیده است. از مدل CGCM3 تحت سناریوی A1B و روش ریزمقیاس‌نمایی "عامل تغییر"^۲ و نیز مدل کشاورزی WOFOST با بهره‌گیری از آمار روزانه عناصر آب و هوایی چهار ایستگاه استان شامل دماهای حداقل و حداکثر، بارش، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در یک دوره ۲۸ ساله (۱۹۸۲-۲۰۰۹) استفاده شده است. داده‌های پایه (۱۹۸۲-۲۰۰۹) و آینده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) از سایت سناریوها و داده‌های اقلیمی کانادا اخذ و میزان تغییر هر یک از پارامترهای اقلیمی پس از ریزمقیاس‌نمایی بررسی و نتایج وارد مدل شبیه‌سازی کشاورزی WOFOST شد. نتایج تحقیق نشان داد دماهای حداقل و حداکثر ایستگاه‌ها در دوره ۲۸ ساله آتی به ترتیب به طور میانگین ۱/۳ و ۱/۷ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. بارش با وضعیت‌های افزایشی و کاهش روبه‌رو خواهد شد. با وجود افزایش طول دوره رشد ذرت آبی در منطقه به دلیل افزایش دما، مقدار عملکرد پتانسیل محصول در آینده به دلیل کاهش بارندگی در بخش‌هایی از منطقه و نیز کاهش رطوبت نسبی به طور چشمگیری تا میانگین ۲۲٪ کاهش پیدا خواهد کرد. بیشترین کاهش عملکرد متوجه منطقه سرپل ذهاب در ناحیه پست و گرمسیری غرب استان به میزان ۲۸/۷٪ خواهد بود.

واژگان کلیدی: ذرت، تغییر اقلیم، استان کرمانشاه، شبیه‌سازی رشد گیاه، مدل WOFOST

*نویسنده ی مسئول مقاله:

2. Change Factor



۱- مقدمه

تغییر اقلیم در آینده تغییراتی عمدتاً منفی در شرایط تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی در سراسر جهان ایجاد خواهد کرد که می‌تواند برای کشاورزی بحران اقتصادی بیافریند. این پدیده احتمال بازگشت سرمایه را در اثر رواج رخدادهای نامساعد جوی کمتر خواهد کرد (توریانی^۱ و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۹). کاهش بیش از اندازه منابع طبیعی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌روی انسان در قرن ۲۱ است که به همراه پاره‌ای دیگر از عوامل چون رشد فزاینده جمعیت، افزایش آلودگی، توزیع نامتعادل منابع و... در آینده سبب ایجاد یک بحران جهانی خواهد شد (نیکنام‌سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۶: ۸۶). محیط طبیعی با ویژگی‌های متنوع از نظر شرایط آب و هوایی، فیزیوگرافی و منابع آب و خاک امکانات متفاوتی را برای کشت محصولات در نواحی مختلف فراهم کرده است. «از آن‌جا که هر یک از محصولات کشاورزی شرایط اقلیمی خاصی را می‌طلبد و در محدوده معینی امکان رشد و نمو دارند، چنان‌چه آن دسته از محصولاتی که با شرایط موجود منطقه سازگاری دارند، به عنوان الگوی کشت انتخاب شوند، نه تنها امکان برخورداری از بالاترین بهره‌وری و بازدهی را برای زارعان فراهم می‌آورد، بلکه در دراز مدت کمترین آسیب را به منابع کشاورزی آن منطقه وارد می‌کند» (لشکری و رضایی، ۱۳۹۰: ۳۰). تعیین توان بالقوه و تخصیص کاربردهای متناسب با توان سرزمین روشی است که می‌تواند میان توان طبیعی محیط، نیاز جوامع، کاربری‌ها و فعالیت‌های انسان در فضا یک رابطه منطقی و سازگار پایدار به وجود آورد. جمعیت کشور ایران در حال حاضر از ۷۵ میلیون نفر گذشته است و روزبه‌روز به نیاز مواد غذایی آن افزوده می‌شود. برای تأمین این نیاز توجه به محصولات مهم کشاورزی از جمله ذرت از ضروریات است. ذرت (با نام علمی *Zea mays L.*) یکی از سه غله مهم در دنیاست که به لحاظ اهمیت بعد از گندم و برنج و از نظر تولید در رتبه اول قرار دارد. «با توجه به این‌که ذرت گیاهی با عملکرد بالا بوده و دور نمایی مطلوب برای آینده کشاورزی دارد، دانستن فرآیندهای تولیدی این گیاه برای مقابله با تغییرات شرایط اقلیمی ضروری است» (قمری‌اصل و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۲).

۲- چارچوب نظری

بهره‌برداری بهینه از شرایط طبیعی و اقلیمی مناطق مختلف جغرافیایی در جهت مقاصد کشاورزی و تخمین نیازهای کشاورزی جزء اولویت‌های مطالعاتی است و در این مسیر تغییر

1. Torriani

اقلیم و به خصوص گرمایش جهانی نقش مهمی در نگرش‌های آتی به تنظیم فعالیت‌های کشاورزی متناسب با توان محیط بازی می‌کند. «برای شناخت پیامدهای گرمایش جهانی ضروری است تا شرایط آب و هوایی آتی شبیه‌سازی شود. «مدل‌های اتمسفر- اقیانوس گردش عمومی جو»^۱ یا مدل‌های AOGCM معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی هستند. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی که به وسیله روابط ریاضی ارائه می‌شوند، استوار است. تاکنون مدل‌های گردش عمومی مختلفی در مراکز گوناگون تحقیقاتی تدوین و طراحی شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های HadCM3، ECHAM4، ECHO-G و... اشاره کرد. تغییرات گازهای گلخانه‌ای و میزان انتشار این گازها طی دوره‌های آتی از مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها محسوب می‌شوند؛ از این‌رو سناریوهای انتشار که نشان‌دهنده میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و وضعیت آن‌ها تا سال ۲۱۰۰ است به مدل معرفی می‌شوند که بر این اساس داده‌های آینده شبیه‌سازی می‌شوند» (بابائیان و کوهی، ۱۳۹۱:۹۵۵).

یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM، تفکیک مکانی کم آن‌هاست که به لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نیاز در مطالعات مختلف مطابقت ندارد؛ بنابراین از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی^۲ برای رفع این محدودیت استفاده می‌شود. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی عبارت از روش استفاده از سلول اصلی یا روش تناسبی^۳، روش درون‌یابی اطلاعات سلول‌های مجاور، روش‌های آماری^۴ و روش دینامیکی است. در این روش‌ها تلاش می‌شود تا داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از سلول بزرگ‌مقیاس مدل‌های AOGCM به داده‌های ایستگاه مورد بررسی نسبت داده شود (ریزمقیاس‌نمایی مکانی). در این نسبت‌دهی می‌توان با استفاده از روش‌های متفاوت، مقیاس زمانی داده‌های شبیه‌سازی شده را نیز کاهش داد (ریزمقیاس‌نمایی زمانی) (کمال و مساح‌بوانی، ۱۳۹۱:۱۸۰).

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های AOGCM برای پیش‌بینی تغییرات عناصر اقلیمی و نیز برآورد عملکرد پتانسیل محصولات کشاورزی در داخل و خارج از کشور توسعه قابل توجهی پیدا کرده است. عمده عناصر مورد استفاده برای پیش‌بینی مقدار محصول در این مطالعات عبارت از بارش، دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی است. برخی از مطالعات فقط تأثیر تغییر اقلیم را بر رشد محصولات کشاورزی بررسی کرده‌اند. برای نمونه سیاری و همکاران (۱۳۹۰:۹۱۲) در حوضه کشف رود تأثیر گرمایش جهانی را بر حداقل و حداکثر دما، الگوی

1. Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM)

2. Downscaling

3. Proportional Downscaling

4. Statistical Downscaling



بارش و تبخیر و تعرق گیاهانی نظیر گندم، ذرت، گوجه‌فرنگی و چغندر قند تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 با دو مدل گردش عمومی جو HadCM3 و CGCM2 و ریزمقیاس‌نمایی آماری ASD در سه دوره زمانی آینده مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که در آینده بارش با مدل‌های مختلف وضعیت‌های متفاوتی خواهد بود، اما دما و تبخیر و تعرق افزایش خواهد یافت. بابائیان و کوهی (۱۳۹۱:۹۵۳) در سه ایستگاه مشهد، سبزوار و تربت حیدریه اثر گرمایش جهانی را بر متغیرهای بارش و دما و شاخص‌های اقلیمی کشاورزی مانند طول دوره خشکی، طول دوره رشد و تبخیر و تعرق بالقوه در سه دوره آینده با استفاده از برونداد ریزمقیاس‌شده دو مدل گردش عمومی جو NCAR-PCM و GFDL-CM2.1 مطالعه کرده، بیان داشتند دما و تبخیر و تعرق در آینده افزایش خواهد یافت. بارش و طول دوره رشد وضعیت‌های متفاوتی خواهد داشت. بلوک‌آذری و همکاران (۱۳۹۱:۲۷۳) تأثیر تغییر اقلیم را بر عملکرد محصول و نیاز آبی محصولات اصلی (یونجه، جو پاییزه، گندم پاییزه و ذرت علوفه‌ای) در منطقه هشتگرد در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی جو بررسی کردند. آنان از خروجی ۹ مدل اقلیمی تحت سناریوی A2 و روش «عامل تغییر»^۱ برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده کردند. نتایج کار ایشان نشان‌دهنده افزایش نیاز آبی و کاهش عملکرد محصولات در سطح منطقه در دوره‌های آبی بود. سلیمانی‌نادرگانی و همکاران (۱۳۹۰:۳۸۹) اثر تغییر اقلیم را بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد کشت گندم دیم در منطقه بهشهر در دوره‌های زمانی آینده با استفاده از داده‌های خروجی مدل CGCM3 از سری مدل‌های AOGCM بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد بارندگی‌ها در فصل پاییز افزایش و در فصول زمستان و بهار کاهش می‌یابد. اشرف و همکاران (۱۳۹۰:۱۱۸۴) جهت پیش‌بینی نیاز آبی چغندر قند در استان خراسان رضوی، مقادیر ماهانه بارش، دما و ساعات آفتابی را با مدل LARS-WG و داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 با سه سناریوی مختلف شبیه‌سازی و بیان کردند که در آینده بارش و دما هر دو افزایش خواهد یافت، ولی نیاز آبی محصول چغندر قند تغییرات متفاوتی خواهد داشت. جانستون^۲ و همکاران (۲۰۱۵:۵۵۵) در ایالات متحده با استفاده از مدل CERES-Maize تغییرات پتانسیل و مصرف آب ذرت را تا سال ۲۰۵۰ تحت سه سناریوی آب و هوایی آینده ناشی از مدل ECHAM5 شبیه‌سازی و سپس نتایج را با دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۰۷) مقایسه کردند. تحت تمام سناریوهای اقلیمی، تعداد روزهای ابریشم‌زایی^۳ و بلوغ ذرت، هم در شرایط آبی و هم شرایط دیم کاهش پیدا کرد. در کل مدل CERES-

1. Change Factor
2. Johnston
3. silking

Maize افزایش محصول را در منطقه مورد بررسی پیش‌بینی کرد، گرچه در برخی از نواحی حکایت از کاهش محصول داشت. از سوی دیگر برخی از محققین به نقش مهم‌تر عوامل دیگری غیر از بارش و دما در رشد محصولات کشاورزی تأکید کرده‌اند. از جمله هولدن و بررتون^۱ (۲۰۰۴: ۱۷۵) در ایرلند با بررسی عوامل اقلیمی و نقش آن در عملکرد گیاهان زراعی، به نقش مؤثر دو عامل طول فصل رشد و آب قابل دسترس به عنوان عوامل اصلی محدودکننده گیاهان گندم، جو، سویا و گوجه‌فرنگی اذعان کردند.

کاربرد مدل‌های گردش عمومی به حیطه‌های دیگر از جمله ارزیابی خشکسالی‌ها و تبعات منفی زیست‌محیطی ناشی از تغییر عناصر اقلیمی نیز تسری پیدا کرده است. در این ارتباط گل‌محمدی و مساح‌بوانی (۱۳۹۰: ۳۱۵) با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی در حوضه قره‌سو استان کرمانشاه پرداختند و بارش حاصل از مدل گردش عمومی جو HadCM3-A2 را به روش آماری ریزمقیاس کرده و به این نتیجه رسیدند که در دوره آبی بارش افزایش و به تبع آن شدت خشکسالی کاهش خواهد یافت. عباسی و همکاران (۱۳۹۱: ۲۰۵) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم در ایران در دوره ۲۰۲۵-۲۱۰۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHAM4 و HadCM3 با ۱۸ سناریوی تغییر اقلیمی مورد تأیید IPCC پرداختند. هر دو مدل در پیش‌بینی میانگین بارش با یکدیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای داشتند. روستایی و همکاران (۱۳۹۱: ۴۲۶) به بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر مقادیر زیست توده گیاه ذرت در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از مدل‌های جفت‌شده جوی-اقیانوسی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده روند نزولی زیست توده در تیمارهای آبیاری کامل و کم آبیاری بود. موناکو^۲ و همکاران (۲۰۱۴: ۸۲) ظرفیت قابل سازگار هیبریدهای ذرت را در یک ناحیه آبیاری در جنوب شرق ایتالیا در دو دوره مرجع (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) ارزیابی کردند. نتیجه مطالعه آنان نشان داد که در دوره آینده تنوع زیستی محصول با توجه به الگوهای کشت سازگار با شرایط خاک می‌تواند به تداوم سیستم تولید فعلی کمک کند.

شاید یکی از کاربردی‌ترین جنبه‌های مدل‌های گردش عمومی، استفاده از خروجی آن‌ها در شبیه‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی با استفاده از مدل‌های کشاورزی باشد. از جمله مطالعات انجام‌یافته در زمینه شبیه‌سازی مقدار محصول با مدل‌های کشاورزی تحت شرایط تغییر اقلیم می‌توان به مطالعه هولزکامپر^۳ و همکاران (۲۰۱۵: ۲۱۹) که تأثیر تغییر اقلیم را بر

1. Holden and Breerton
2. Monaco
3. Holzkämper

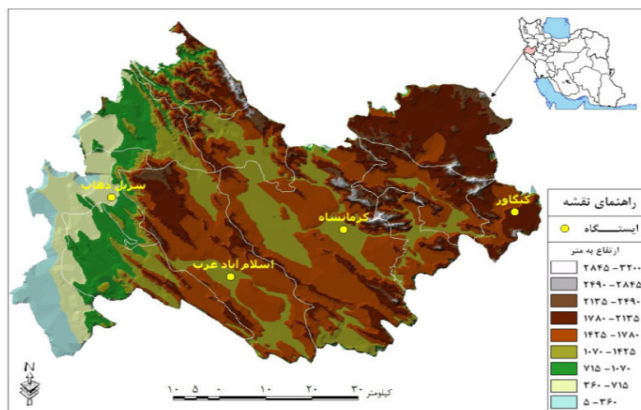


عملکرد پتانسیل محصول ذرت تا افق سال‌های ۲۰۳۶ تا ۲۰۶۵ در سه منطقه آب و هوایی سویس بررسی کردند، و نیز مطالعه کاتالین^۱ و همکاران (۹۷:۲۰۰۹) که سازگاری مدل WOFOST را برای شرایط رومانی بررسی کرده و بیان داشتند که می‌توان از این مدل برای بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر عملکرد محصول استفاده کرد. استفاده از مدل‌های کشاورزی در مناطق مختلف فراخور وضعیت اقلیمی و محیطی آن مناطق به نتایج متفاوتی ختم می‌شود. برای نمونه سنونگ‌هی^۲ و همکاران (۲۷۹:۲۰۱۵) عکس‌العمل عملکرد پتانسیل محصول ذرت را تحت سناریوی تغییر اقلیم در جنوب شرق ایالات متحده با استفاده از مدل محصول APSIM^۳ بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که عملکرد پتانسیل ذرت در دوره آینده تحت رژیم افزایشی دمایی، تغییرات بسیار متفاوت و متنوعی را براساس شرایط آب و هوای محلی تجربه خواهد کرد. در کل اگر در مطالعات از مدل‌های متنوع تغییر اقلیم استفاده شود، نتایج رضایت‌بخش‌تری حاصل خواهد شد. مثلاً وانگ^۴ و همکاران (۱۹:۲۰۱۵) در کمربند ذرت چین عدم قطعیت در شبیه‌سازی فنولوژی ذرت را با شش مدل پُر استفاده SIMCOY، MAIS، Beta، WOFOST، CERES و APSIM مورد تحقیق قرار دادند. نتایج کار آنان نشان داد که هر شش مدل به واسطه کالیبره‌شدن تحت شرایط اقلیمی کنونی می‌تواند به دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی مقدار محصول برسد. مطالعات داخلی اغلب از یک مدل تغییر اقلیم برای شبیه‌سازی‌ها استفاده کرده‌اند که امید است با بهبود دسترسی‌ها به پایگاه‌های اطلاعاتی و تسهیل اخذ اطلاعات از آن‌ها افق‌های نوینی در زمینه استفاده از اطلاعات این پایگاه‌ها در شبیه‌سازی مقدار محصول در آینده به خصوص با مدل‌های جدیدتر گشوده شود. به طور کلی ذرت یک گیاه گرمسیری است که به یخبندان حساس و در دوره رشد خود به درجه حرارت بالا نیازمند است. حداقل درجه حرارت در زمان جوانه‌زدن ذرت ۱۰ درجه است. ذرت جزء نخستین گیاهانی است که به دلیل ارتباط با معاش در مطالعات تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. کوتاه شدن دوره رشد، کاهش تعداد و وزن دانه از جمله پاسخ‌های گیاه به تغییر اقلیم است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد ذرت در استان کرمانشاه در ۲۸ سال آینده با استفاده از مدل گردش عمومی جو CGCM3 و مدل شبیه‌سازی گیاهی WOFOST است.

۳- مواد و روش‌ها

1. Catalin
2. Seung Hee
3. Agricultural Production Systems Simulator
4. Wang

محدوده پژوهش در این تحقیق استان کرمانشاه در غرب کشور است. این استان با مساحت تقریبی ۲۴۸۰۰ کیلومترمربع بین عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ} 36'$ تا $35^{\circ} 15'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $45^{\circ} 24'$ تا $48^{\circ} 30'$ شرقی گسترده شده و از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های لرستان و ایلام، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود (شکل ۱). این استان به دلیل تنوع آب و هوایی و داشتن دشت‌های وسیع و هموار مانند ماهیدشت، قلعه شاهین، دیره، زهاب و حسن‌آباد و نیز منابع آب خوب و خاک متنوع و حاصل‌خیز (غیر از دشت سومار) توانایی بسیار بالایی برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی دارد.



شکل ۱. موقعیت استان کرمانشاه در ایران و ایستگاه‌های منتخب

برای انجام این پژوهش از آمار روزانه عناصر آب و هوایی ایستگاه‌های استان شامل دماهای حداقل و حداکثر، بارش، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در یک دوره ۲۸ ساله (۲۰۰۹-۱۹۸۲) به عنوان دوره مشاهداتی استفاده شده است. این آمار از اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه اخذ شد. بازسازی آماری در حد بسیار محدود و فقط برای چند روز به انجام رسید. به این منظور از معادلات رگرسیونی به شرط معنی‌دار بودن در سطح 0.1 ، وجود همبستگی به میزان حداقل 0.9 بین آمار بارش دو ایستگاه مینا و مورد نظر، نزدیکی ایستگاه مینا به ایستگاه مورد نظر و تشابه توپوگرافی با ایستگاه مورد نظر استفاده شد.

۴- مدل تغییر اقلیم و روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده



در این پژوهش برای بررسی تغییر اقلیم در دوره ۲۰۲۳-۲۰۵۰، از میان مدل‌های AOGCM معرفی شده در چهارمین گزارش ارزیابی کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ (۷:۲۰۰۷)، مدل CGCM3^۲ تحت تأثیر سناریوی انتشار AIB انتخاب شد. سناریوی AIB ترسیم‌کننده جهانی با رشد اقتصادی سریع و جمعیت ۹ میلیارد نفری تا سال ۲۰۵۰ و سپس کاهش تدریجی جمعیت از آن سال به بعد توأم با تأکید متوازن بر تمام منابع انرژی شامل سوخت‌های فسیلی و غیرفسیلی و نیز تعاملات گسترده اجتماعی- فرهنگی در سطح جهان است.^۳ مدل CGCM3 نسخه سوم از سری «مدل‌های جفت‌شده اقلیم جهانی» است که در مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا^۴ توسعه یافته است.^۵ شبکه‌بندی این مدل دارای ابعاد ۳/۷۵×۳/۷۵ درجه طول و عرض جغرافیایی در مقیاس سطحی و ۱/۸۵×۱/۸۵ درجه در مقیاس اقیانوسی است. خروجی مدل CGCM3 برای منطقه مورد مطالعه در دو دوره زمانی پایه (۲۰۰۹-۱۹۸۲) و آینده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) با دقت مکانی ۳/۷۵ در ۳/۷۵ درجه از سایت «سناریوها و داده‌های اقلیمی کانادا»^۶ به آدرس www.cccsn.ec.gc.ca دریافت شد.

روش ریزمقیاس‌نمایی به کار برده شده در این تحقیق روش «عامل تغییر» است که از جمله روش‌های تناسبی ریزمقیاس‌نمایی است. این روش یک رویه تقریباً سراسر برای بازسازی سناریوهای تغییر اقلیم منطقه‌ای است و برای ارزیابی سریع اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویلبای و هریس^۷، ۳:۲۰۰۶). در این روش برای به‌دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی افزوده می‌شود. بر این پایه برای دماهای حداقل و حداکثر از مقادیر «اختلاف» داده‌های پایه و آینده به شرح رابطه (۱) استفاده شد (کمال و مساح‌بوانی، ۱۸۱:۱۳۹۱).

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

که در آن $\bar{T}_{GCM, fut, i}$ میانگین ۲۸ ساله دمای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل CGCM3 در دوره آینده (۲۰۲۳ تا ۲۰۵۰) و $\bar{T}_{GCM, base, i}$ میانگین ۲۸ ساله دمای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره پایه مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۸۲-۲۰۰۹) برای هر ماه که از سایت

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
2. The Third Generation Coupled Global Climate Model (CGCM3)
3. <http://sos.noaa.gov/Datasets/dataset.php?id=205>
4. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCMA)
5. <http://www.ec.gc.ca/ccmac-ccema/default.asp?n=1299529F-1>
6. Canadian Climate Data and Scenarios (CCDS)
7. Wilby and Harris

«سناریوها و داده‌های اقلیمی کانادا» اخذ شده است. برای نمونه در ایستگاه کرمانشاه در ماه ژانویه دمای حداکثر برای دوره پایه ۱/۷ و برای دوره آینده ۳/۴ درجه سانتی‌گراد که تفاضل آن برابر با رقم ۱/۷ است. ارقام تفاضل برای تک‌تک ماه‌ها محاسبه شد. در مرحله بعد چون مقادیر تفاضل به‌دست‌آمده ماهانه بود برای به‌دست‌آوردن مقادیر روزانه دما، ارقام تفاضل فوق با ارقام روزانه اخذشده از سازمان هواشناسی برای همان ماه با استفاده از رابطه (۲) جمع جبری شد.

$$T = T_{obs} + \Delta T_i \quad (2)$$

که در آن T سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما برای دوره آینده، T_{obs} سری زمانی دمای مشاهداتی (در اینجا روزانه) و ΔT_i اختلاف دمای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل CGCM3 بین دوره‌های پایه و آینده است. برای مقادیر بارش و ساعات آفتابی از مقادیر «نسبت» داده‌های پایه و آینده استفاده شد (رابطه ۳).

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_{GCM, fut}}{\bar{P}_{GCM, base}} \quad (3)$$

در آن $\bar{P}_{GCM, fut, i}$ میانگین ۲۸ ساله بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل CGCM3 در دوره آینده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) و $\bar{P}_{GCM, base, i}$ میانگین ۲۸ ساله بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره پایه مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۸۲-۲۰۰۹) برای هر ماه است. برای نمونه در ایستگاه کرمانشاه مقدار بارش برای دوره آینده ۶۱ میلی‌متر و برای دوره پایه ۷۲ میلی‌متر که نسبت بین این دو معادل ۰/۸ است. مانند بالا چون مقادیر نسبت به‌دست‌آمده ماهانه است، برای به‌دست‌آوردن مقادیر روزانه این نسبت در ارقام روزانه اخذشده از سازمان هواشناسی کشور برای همان ماه ضرب شد (رابطه ۴).

$$P = P_{obs} \times \Delta P_i \quad (4)$$

که در آن P سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی بارش برای دوره آینده، P_{obs} سری زمانی بارش مشاهداتی (در اینجا روزانه) و ΔP_i اختلاف بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل CGCM3 بین دوره‌های پایه و آینده است.



برای ارزیابی نزدیکی مقادیر مشاهداتی و برآورد شده پارامترهای آب و هوایی برای دوره پایه- که با روش عامل تغییر ریزمقیاس‌نمایی شده است- از آماره‌های خطای میانگین مطلق^۸ (MAE)، خطای ریشه دوم میانگین مربع^۹ (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد.

۵- مدل WOFOST^{۱۰}

در دهه‌های اخیر مدل‌های بسیاری جهت شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب و خاک توسط پژوهشگران امور کشاورزی و به ویژه محققین دانشگاه واگنینگن هلند توسعه داده شده که یکی از آن‌ها مدل WOFOST است (بافکار و همکاران، ۱۳۹۰:۸۰۰). مدل WOFOST یک مدل شبیه‌سازی گیاهی است که برای تجزیه و تحلیل کمی رشد و تولید گیاهان زراعی یک ساله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل فاکتورهای اکولوژیکی با فرض فعالیت‌های بهینه مدیریتی به کار گرفته می‌شود (بوگارد و همکاران^{۱۱}، ۱۹۹۸:۱۶۷). مدل قادر است رشد گیاه را در سه حالت پتانسیل، شرایط کمبود آب و نیز کمبود مواد مغذی شبیه‌سازی کند (وان ایترسام و رابینگه^{۱۲}، ۱۹۹۷:۱۹۹). این مدل یک مدل دینامیکی است که رشد گیاه را در گام‌های زمانی یک‌روزه شبیه‌سازی می‌کند و برای شبیه‌سازی رشد گیاهان به سه فایل ورودی شامل فایل گیاهی، فایل هواشناسی و فایل خاک به شرح زیر نیاز دارد.

الف- فایل گیاهی: این فایل یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدل شبیه‌سازی رشد گیاه WOFOST است. در مطالعه کنونی مدل با استفاده از فایل گیاهی ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ که توسط بافکار و همکاران (۱۳۹۰:۷۹۹) در منطقه ماهیدشت کرمانشاه واسنجی شده بود، اجرا شد. برای این کار نخست مقادیر مجموع درجه حرارت روزانه (برحسب درجه-روز) از مرحله جوانه‌زنی تا گلدهی (Tsum1) و از گلدهی تا رسیدن کامل (Tsum2) که از آزمایش‌های مزرعه‌ای در مزرعه تحقیقاتی پردیس دانشکده کشاورزی کرمانشاه به‌دست آمده بود محاسبه و در فایل گیاهی جایگزین و سپس مدل اجرا شد. صحت‌سنجی این فایل توسط احمدپور (۱۳۹۲:۱) به انجام رسیده است.

8. Mean Absolute Error
9. Root Mean Square Error
10. World Food Studies
11. Boogaard
12. Van Ittersum and Rabbinge

ب- فایل هواشناسی: برای تهیه فایل هواشناسی هر ایستگاه از داده‌های تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی، دماهای حداقل و حداکثر روزانه ($^{\circ}\text{C}$)، فشار بخار صبحگاهی (kPa)، سرعت باد متوسط در ارتفاع دو متری (ms^{-1}) و بارندگی (mm) هر ایستگاه استفاده و به این منظور از آمار مربوط به دوره مشاهداتی (۲۰۰۹-۱۹۸۲) استفاده شد. سپس میانگین این دوره ۲۸ ساله محاسبه و به عنوان یک فایل مبنا به مدل معرفی شد. برای هر کدام از ۲۸ سال آینده (۲۰۲۳-۲۰۵۰) نیز فایل‌های جداگانه‌ای بر مبنای خروجی‌های ریزمقیاس‌شده عناصر اقلیمی طبق مدل CGCM3 تهیه و به مدل گیاهی وارد شد.

ج- فایل خاک: این فایل با استفاده از پارامترهای فیزیکی بافت خاک در ایستگاه‌های منطقه شامل ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی (PWP)، رطوبت اشباع، مقدار آب در دسترس (TAP) و هدایت هیدرولیکی اشباع تهیه شد. اهمیت فایل خاک نسبت به دو فایل دیگر کمتر است، زیرا مطالعه حاضر بر پتانسیل تولید ذرت آبی است و با فرض محصول کمبودی از نظر آب ندارد و هر زمان که نیاز به آبیاری باشد، آب در دسترس محصول قرار خواهد گرفت. مشخص کردن نوع خاک در مدل بیشتر به دلیل معرفی ظرفیت نگهداری آب است. برای دریافت رایگان مدل WOFOST و کسب اطلاعات بیشتر در مورد آن به وبسایت اینترنتی گروه «دانشگاه واگنینگن»^{۱۳} و مؤسسه‌های تحقیقاتی همکار^{۱۴} مراجعه شود.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- دمای میانگین حداقل

نتایج پیش‌بینی دمای میانگین حداقل سالانه توسط سناریوی A1B مدل CGCM3 در جدول ۱ مشاهده می‌شود. براساس ارقام این جدول در ۲۸ سال آینده به طور میانگین دمای حداقل ایستگاه‌ها ۱/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. بیشترین و کمترین افزایش به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های کرمانشاه به میزان ۱/۹ درجه سانتی‌گراد و سرپل ذهاب به میزان ۰/۴ درجه سانتی‌گراد است، همچنین کمترین و بیشترین افزایش سالانه حداقل دما نیز در طی دوره مورد مطالعه در تمام ایستگاه‌ها برآورد شد. برای نمونه در ایستگاه کرمانشاه در سال‌های مختلف دوره آبی میزان افزایش از ۰/۸ تا ۳/۱ درجه سانتی‌گراد در نوسان خواهد بود. به دلیل حجم زیاد خروجی‌ها از ارائه نتایج تغییرات سالانه پرهیز شده است.

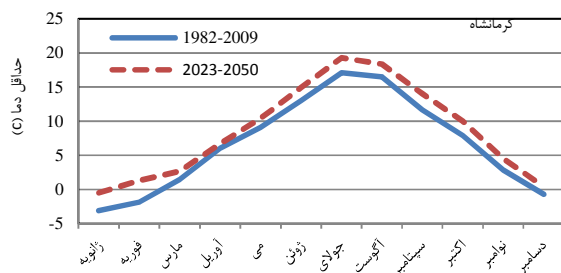
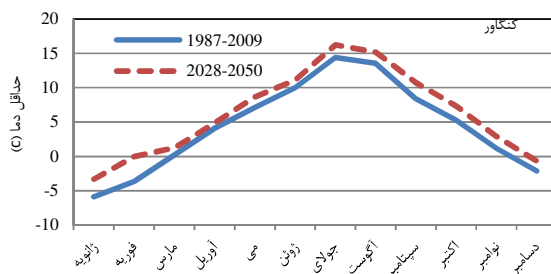
13. Wageningen UR

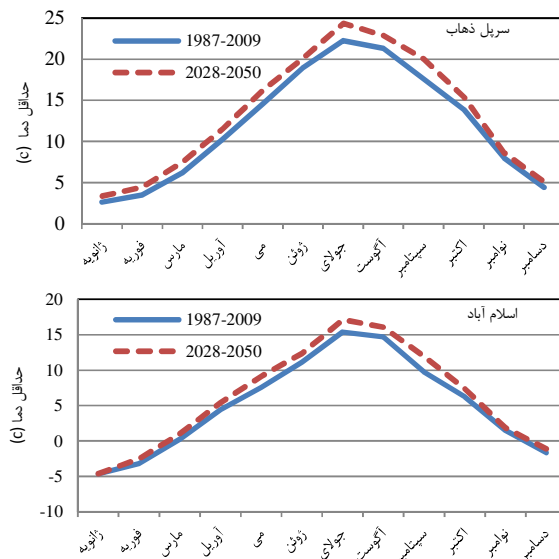
14. <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST/Downloads.htm>

جدول ۱. متوسط تغییر دمای میانگین حداقل سالانه در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی CGCM3 مدل A1B

ایستگاه	دمای حداقل پیش‌بینی شده (°C)	دمای حداقل مشاهداتی (°C)	افزایش یا کاهش (°C)
سرپل ذهاب	۱۰/۹	۱۰/۵	+۰/۴
اسلام‌آباد غرب	۶/۲	۵/۱	+۱/۱
کرمانشاه	۸/۵	۶/۶	+۱/۹
کنگاور	۶/۲	۴/۴	+۱/۸
میانگین			+۱/۳

نتایج پیش‌بینی ماهانه دمای حداقل و مقایسه آن با دمای مشاهداتی دوره پایه در نمودارهای شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این شکل دماهای حداقل ماهانه در دوره آتی در تمام ایستگاه‌ها افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش متعلق به ماه‌های دوره گرم سال است؛ در حالی که ماه‌های دوره سرد افزایش کمتری خواهد داشت.





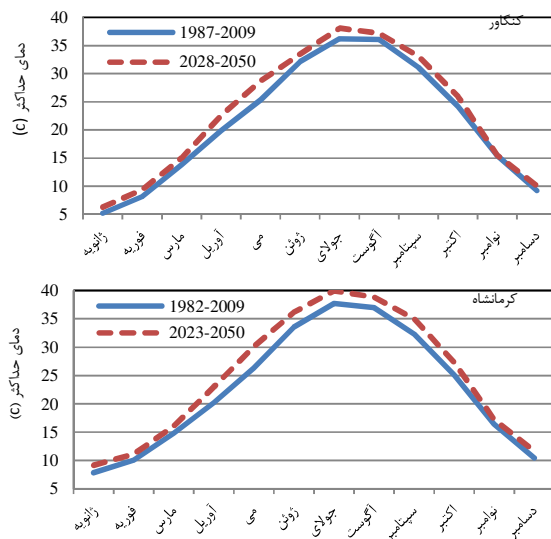
شکل ۲. مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دمای میانگین حداقل ماهانه در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B مدل CGCM3

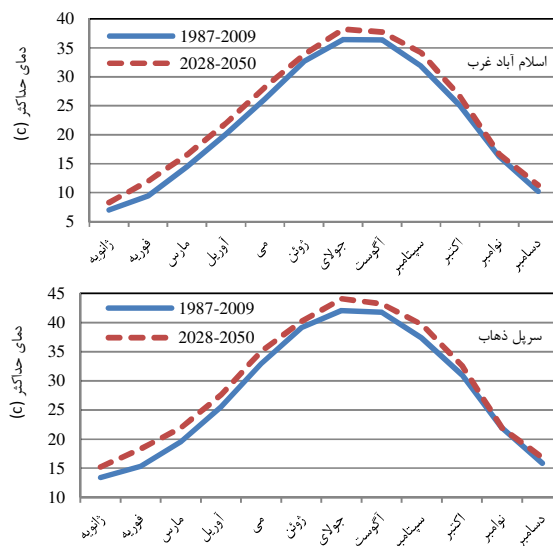
۲-۶- دمای میانگین حداکثر

هر چهار ایستگاه مانند دماهای حداقل در سال‌های آتی شاهد افزایش دما به میزان میانگین $1/7$ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه خواهد بود. کمترین و بیشترین افزایش به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب به میزان $1/5$ درجه سانتی‌گراد و کرمانشاه به میزان 2 درجه سانتی‌گراد است (جدول ۲). از این نظر اختلاف افزایش دمای حداکثر بین ایستگاه‌ها کمتر از دماهای حداقل است (جدول ۱). در این‌جا نیز در دوره آتی میانگین دمای حداکثر ماهانه همه ایستگاه‌ها در تمام ماه‌ها افزایش خواهد یافت و این افزایش در ماه‌های دوره گرم مانند دماهای حداقل بیشتر خواهد بود (شکل ۳).

جدول ۲ متوسط تغییر دمای میانگین حداکثر سالانه در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی CGCM3 مدل A1B

نام ایستگاه	دمای حداکثر پیش‌بینی شده (°C)	دمای حداکثر مشاهداتی (°C)	افزایش یا کاهش (°C)
سرپل ذهاب	۲۹/۷	۲۸	+۱/۷
اسلام‌آباد غرب	۲۳/۷	۲۲/۲	+۱/۵
کرمانشاه	۲۴/۷	۲۲/۷	+۲
کنگاور	۲۳	۲۱/۴	+۱/۶
میانگین			+۱/۷





شکل ۳. مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دمای میانگین حداکثر ماهانه در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B مدل CGCM3

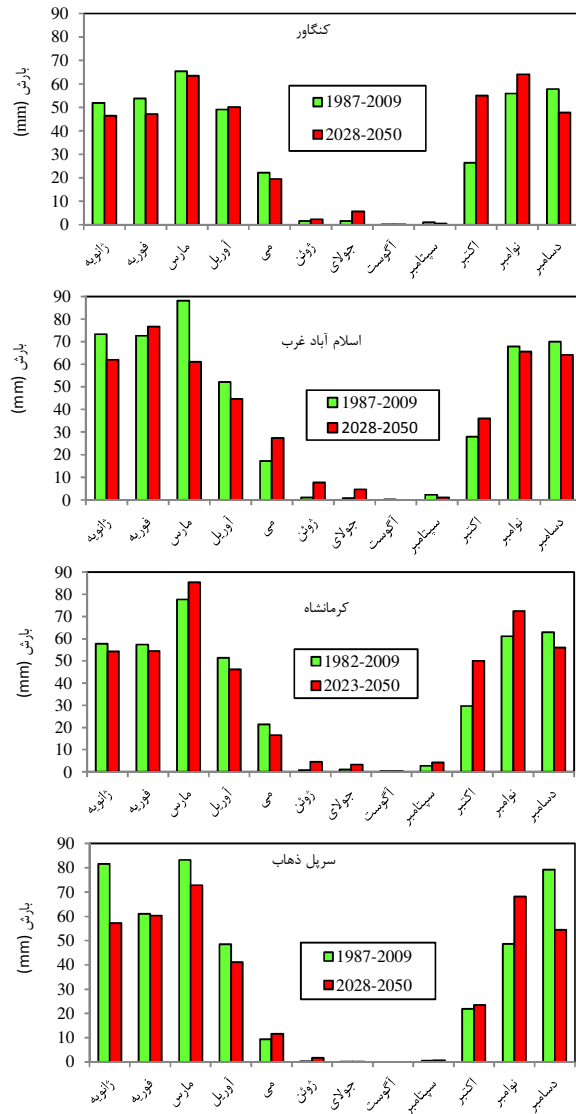
۳-۶- بارش

بارش سالانه ایستگاه‌های کرمانشاه و کنگاور در دوره آینده به ترتیب به میزان ۴٪ و ۵٪ افزایش خواهد داشت (جدول ۳)، بیشترین درصد افزایش مربوط به فصل تابستان است (شکل ۴)، اما اثر چندانی بر متوسط بارش بلندمدت به دلیل کم‌بودن مقدار افزایش نخواهد داشت. در کل ماه‌های دوره سرد سال شامل ماه‌های مارس، اکتبر و نوامبر در مقایسه با سایر ماه‌ها افزایش بارش بیشتری را تجربه خواهد کرد. در مقابل، دو ایستگاه غربی منطقه یعنی سرپل ذهاب و اسلام‌آباد غرب در آینده شاهد کاهش بارش به ترتیب به میزان ۵٪ و ۱۰٪ خواهند بود که در ماه‌های مختلف سال وضعیت‌های متفاوت افزایشی یا کاهشی مورد انتظار است (شکل ۴).



جدول ۳ مقایسه میانگین بارش‌های سالانه مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B با مدل CGCM3

نام ایستگاه	پیش‌بینی شده (م)	مشاهداتی (م)	افزایش یا کاهش (م م)	درصد
سرپل ذهاب	۳۹۱/۷	۴۳۵/۱	-۴۳/۴	-/۱۰
اسلام‌آباد غرب	۴۵۱	۴۷۳/۲	-۲۲/۲	-/۵
کرمانشاه	۴۴۷/۷	۴۲۴/۵	+۲۳/۲	/۵
کنگاور	۴۰۲/۶	۳۸۷/۵	+۱۵/۱	/۴



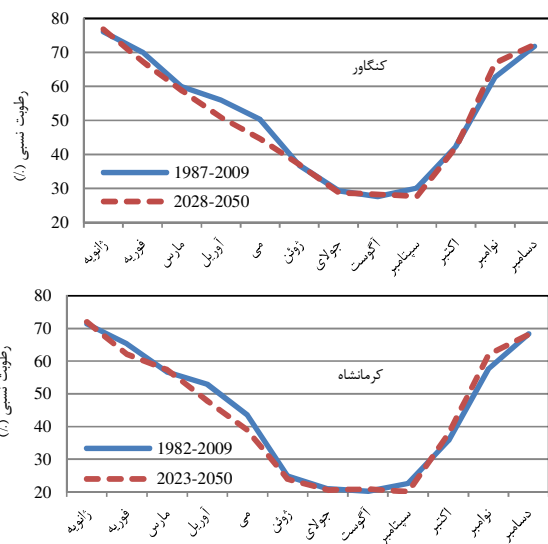
شکل ۴. مقایسه بارش‌های ماهانه مشاهداتی و برآوردشده در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B با مدل CGCM3

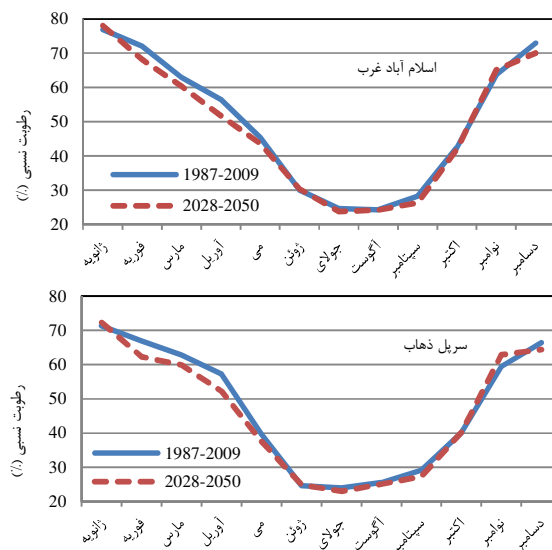
۴-۶- رطوبت نسبی

در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آبی رطوبت نسبی سالانه به طور میانگین ۱/۳٪ کاهش خواهد یافت. میزان این کاهش از ۰/۷٪ در ایستگاه کرمانشاه تا ۲/۳٪ در ایستگاه سرپل ذهاب متغیر است (جدول ۴)، اما در بررسی ماهانه بعضی از ماه‌ها حتی روند افزایشی رطوبت را نیز نشان می‌دهند (شکل ۵).

جدول ۴ مقایسه میانگین سالانه رطوبت نسبی مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B با مدل CGCM3

نام ایستگاه	پیش‌بینی‌شده (%)	مشاهداتی (%)	افزایش یا کاهش (%)
سرپل ذهاب	۴۵	۴۷/۳	-۲/۳
اسلام‌آباد غرب	۴۸/۷	۵۰	-۱/۳
کرمانشاه	۴۴/۳	۴۵	-۰/۷
کنگاور	۵۰/۱	۵۱/۱	-۱
میانگین			-۱/۳





شکل ۵ مقایسه رطوبت نسبی ماهانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی AIB با مدل CGCM3

۶-۵- میانگین ساعات آفتابی

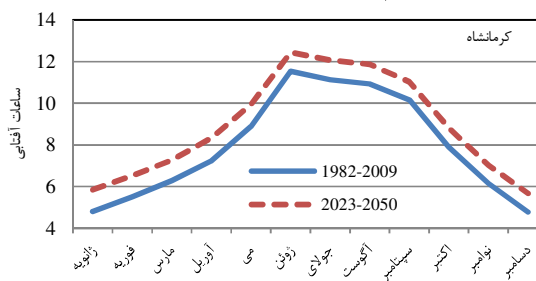
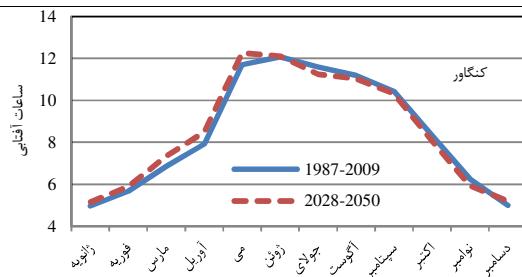
تعداد ساعات آفتابی کمترین نوسان و تغییر را در آینده نسبت به سایر پارامترها خواهد داشت، به گونه‌ای که در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب و سرپل ذهاب تعداد ساعات آفتابی نسبت به دوره پایه هیچ تغییری نخواهد کرد. این در حالی است که ایستگاه کرمانشاه در آینده شاهد ۱٪ افزایش در تعداد ساعات آفتابی خواهد بود و این افزایش در تمام ماه‌ها رخ خواهد داد (جدول ۵)، در سه ایستگاه دیگر در ماه‌های مختلف، هم وضعیت افزایشی و هم کاهش‌ی ساعات آفتابی مورد انتظار است (شکل ۶).

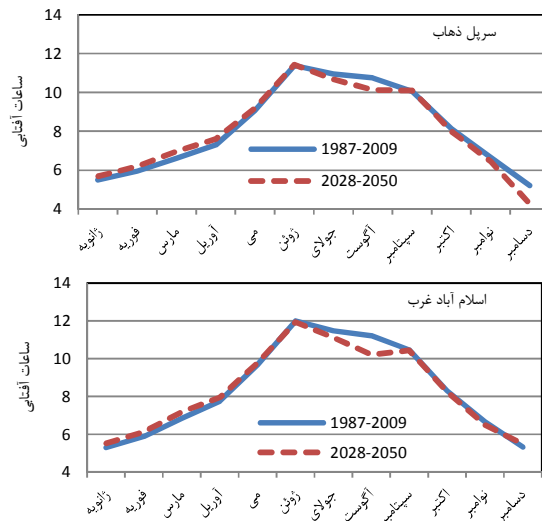
مقایسه ارقام پیش‌بینی بارندگی ایستگاه‌ها (جدول ۳) و ساعات آفتابی آن‌ها (جدول ۵) گویای این نکته است که در ایستگاه‌های کرمانشاه و کنگاور که شاهد افزایش بارندگی در آینده خواهیم بود، افزایش ساعات آفتابی رخ خواهد داد، و در دو ایستگاه دیگر که شاهد کاهش بارندگی در آینده خواهیم بود، تغییری در تعداد ساعات آفتابی رخ نخواهد داد. در بدو امر ممکن است چنین رخدادی متناقض به نظر برسد. مقدار بارندگی پیش از آن که تابع تعداد ساعات آفتابی باشد تابع وضعیت ابرناکی است که مطالعه آن جزء اهداف پژوهش حاضر نیست.



جدول ۵. مقایسه میانگین سالانه ساعات آفتابی مشاهداتی و پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی CGCM3 با مدل A1B

نام ایستگاه	پیش‌بینی شده (ساعت)	مشاهداتی (ساعت)	افزایش یا کاهش (ساعت)
سرپل ذهاب	۸/۱	۸/۱	۰/۰
اسلام‌آباد غرب	۸/۴	۸/۴	۰/۰
کرمانشاه	۸/۹	۷/۹	۱
کنگاور	۸/۶	۸/۵	۰/۱





شکل ۶. مقایسه تعداد ساعات آفتابی مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده ماهانه در ایستگاه‌های منطقه تحت سناریوی A1B با مدل CGCM3

شاخص‌های خطاسنجی بین داده‌های مشاهداتی پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌ها و داده‌های برآوردشده مدل CGCM3 برای دوره پایه تحت سناریوی A1B نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن برآوردهاست. جدول ۶ نمونه‌ای از این شاخص‌ها را برای ایستگاه کرمانشاه نشان می‌دهد. از طریق این شاخص‌ها نزدیکی داده‌های مشاهداتی عناصر اقلیمی در ایستگاه‌ها و داده‌های برآوردشده توسط مدل تغییر اقلیم برای دوره پایه قابل بررسی است.

جدول ۶. شاخص‌های خطاسنجی بین داده‌های مشاهداتی پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌ها و داده‌های برآوردشده توسط مدل CGCM3 برای دوره پایه تحت سناریوی A1B در ایستگاه کرمانشاه

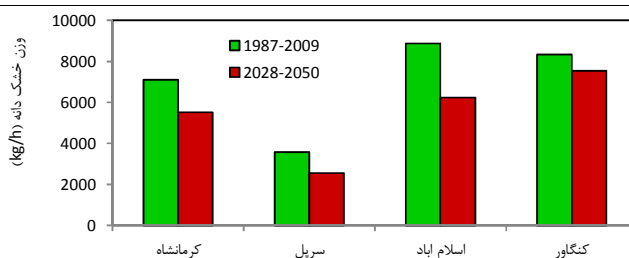
پارامتر	R ²	RMSE	MAE
دمای حداقل	۰/۹۹	۲	۱/۹
دمای حداکثر	۰/۹۹	۲/۲	۲
بارش	۰/۹۲	۷/۸	۵/۸
رطوبت نسبی	۰/۹۸	۲/۷	۲/۱
ساعات آفتابی	۰/۹۹	۱	۱

۷- عملکرد اندام ذخیره (وزن خشک دانه)

با وارد کردن خروجی‌های مدل CGCM3 و نیز سایر اطلاعات مورد نیاز به مدل شبیه‌سازی گیاهی WOFOST مقدار عملکرد محصول در ایستگاه‌ها برآورد شد. خروجی‌های مدل حاکی از کاهش عملکرد دانه محصول ذرت در تمام ایستگاه‌ها در دوره آینده به میزان متوسط ۲۲٪ است. بیشترین و کمترین کاهش عملکرد به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سرپل ذهاب ۲۸/۷٪ و ۹/۴٪ است (جدول ۷، شکل ۷). بر این اساس تأثیر گرمای هوا بر عملکرد پتانسیل محصول در شرایط اقلیمی آینده در نواحی گرم و خشک غرب منطقه بسیار تأثیرگذارتر از مناطق معتدل شرقی خواهد بود. افزایش دما گرچه سبب طولانی‌تر شدن دوره رشد خواهد شد، اما سبب خواهد شد گیاه در مدت زمان کمتری مراحل رشد فنولوژیک خود را پشت سر گذارد و همین امر سبب کاهش محصول و عملکرد آن، در نتیجه به هم خوردن توازن مراحل رشد فنولوژیک خواهد شد. این مسأله در مورد گیاهان حساس به گرما مشهودتر که ذرت نیز جز این گیاهان است.

جدول ۷ مقایسه عملکرد دانه خشک گیاه ذرت در دوره‌های گذشته و آینده در ایستگاه‌ها توسط سناریوی تغییر اقلیم با مدل WOFOST

نام ایستگاه	دوره آینده (کیلوگرم در هکتار)		دوره گذشته		افزایش یا کاهش درصد
	هکتار	(کیلوگرم در هکتار)	کیلوگرم در هکتار	افزایش یا کاهش	
کرمانشاه	۵۵۲۱	۷۱۰۵	۱۵۸۴	-۲۲/۳	
سرپل	۲۵۵۵	۳۵۸۱	۱۰۲۶	-۲۸/۷	
اسلام‌آباد	۶۲۲۹	۸۸۷۷	۲۴۴۸	-۲۷/۶	
کنگاور	۷۵۴۴	۸۳۲۷	۷۸۳	-۹/۴	
میانگین			۱۴۶۰/۳	-۲۲	



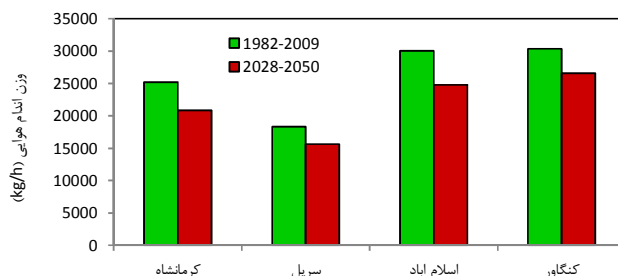
شکل ۷. مقایسه عملکرد دانه خشک ذرت در دوره‌های گذشته و آینده در ایستگاه‌ها توسط سناریوی تغییر اقلیم با مدل WOFOST

۸- عملکرد بیولوژیک (وزن خشک کل اندام هوایی)

وزن اندام گیاهی و عملکرد بیولوژیک ذرت که با وارد کردن خروجی‌های مدل CGCM3 به مدل WOFOST به دست آمد، نشان داد که در ایستگاه اسلام‌آباد غرب بیشترین کاهش عملکرد محصول طی ۲۳ سال آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم رخ خواهد داد؛ به گونه‌ای که مقدار عملکرد به طور چشمگیری تا حد ۱۷/۵٪ معادل ۵۲۵۶ کیلوگرم در هکتار تنزل خواهد یافت (جدول ۸، شکل ۸)، همچنین میانگین کاهش عملکرد در ایستگاه‌ها ۱۵/۵٪ خواهد بود.

جدول ۸. مقایسه وزن اندام هوایی گیاه ذرت در دوره‌های گذشته و آینده توسط سناریوی تغییر اقلیم در ایستگاه‌ها با مدل WOFOST

نام ایستگاه	دوره آینده (کیلوگرم)		دوره گذشته (کیلوگرم)		افزایش یا کاهش درصد
	در هکتار)	در هکتار)	در هکتار)	کیلوگرم در هکتار	
سرپل ذهاب	۱۵۶۱۲	۱۸۳۱۵	۲۷۰۳	-۱۴/۸	
اسلام‌آباد غرب	۲۴۸۰۳	۳۰۰۵۹	۵۲۵۶	-۱۷/۵	
کرمانشاه	۲۰۸۴۴	۲۵۱۸۷	۴۳۴۳	-۱۷/۲	
کنگاور	۲۶۶۱۵	۳۰۳۴۴	۳۷۲۹	-۱۲/۳	
میانگین				-۱۵/۵	



شکل ۸. مقایسه عملکرد بیولوژیک ذرت در دوره‌های گذشته و آینده در ایستگاه‌ها توسط سناریوی تغییر اقلیم با مدل WOFOST

۹- نتیجه‌گیری

تلفیق نتایج حاصل از مدل‌های تغییر اقلیم با مدل‌های کشاورزی در زمینه شبیه‌سازی مقدار محصول می‌تواند قابلیت‌های مناطق مختلف جغرافیایی را در آینده برای توسعه فعالیت‌های زراعی نمایان سازد. استان کرمانشاه با داشتن منابع آب و خاک مناسب یکی از استان‌های بسیار مستعد برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی است. چنان‌چه قابلیت‌های کنونی آب و هوایی و محیطی استان با وضعیت عناصر آب و هوایی در آینده تلفیق شود، تصویر مناسبی از ظرفیت



استان برای فعالیتهای کشاورزی ترسیم خواهد شد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی مقدار محصول ذرت استان کرمانشاه در دوره آینده از مدل CGCM3 با روش ریزمقیاس‌نمایی Change Factor تحت سناریوی A1B و مدل شبیه‌سازی رشد گیاه WOFOST استفاده شده است.

نتایج تحقیق نشان داد که تحت سناریوی اقلیمی A1B دماهای حداقل و حداکثر در تمام ایستگاه‌های منطقه در دوره آتی (۲۰۲۳-۲۰۵۰) افزایش خواهد یافت که تأیید نتایج اغلب مطالعات پیشین مانند اشرف و همکاران (۱۳۹۰:۱۱۸۴)، کمال و مساح‌پوانی (۱۳۹۱:۱۸۳) و عباسی و همکاران (۲۰۵:۱۳۹۱)، تنها میزان افزایش دما در مطالعات مختلف با هم متفاوت است. برخلاف دهه‌های اخیر که بیشترین افزایش متوجه دماهای حداقل بوده است (مسعودیان، ۱۳۸۴:۳۲) براساس نتایج تحقیق حاضر این افزایش در دوره آتی بیشتر متوجه دماهای حداکثر خواهد بود. کاهش رطوبت نسبی در آینده به دلیل افزایش دما (جدول ۱ و ۲) و کاهش بارندگی در منطقه (جدول ۳)، امری مورد انتظار است که در تمام ایستگاه‌ها به خصوص ایستگاه‌های غربی به وقوع خواهد پیوست. گرچه افزایش دما سبب طولانی‌تر شدن دوره رشد خواهد شد، اما سبب می‌شود گیاه در مدت زمان کمتری مراحل رشد فنولوژیک خود را پشت سر گذارد و همین امر سبب کاهش محصول و عملکرد آن در نتیجه به هم خوردن توازن مراحل رشد فنولوژیک خواهد شد. این مسأله در مورد گیاهان حساس به گرما مشهودتر و ذرت نیز جز این گیاهان است. بدین ترتیب با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از مدل WOFOST، عملکرد پتانسیل محصول شامل وزن دانه خشک و عملکرد بیولوژیک ذرت آبی در ایستگاه‌ها به شدت تحت تأثیر افزایش دما و سپس کاهش بارش و رطوبت نسبی قرار خواهد گرفت و مقدار محصول در آینده تا میانگین ۲۲٪ کاهش پیدا خواهد کرد. این کاهش برای مناطقی چون سرپل ذهاب که در اقلیم گرم و خشک غرب منطقه قرار دارد و در آینده کاهش بارش بیشتری را تجربه خواهد کرد، چشمگیرتر خواهد بود. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج دیگر مدل‌ها و سناریوهای انتشار می‌تواند تأثیر تغییر اقلیم را بر عملکرد محصول ذرت در منطقه بهتر نمایان سازد.

۱۰- قدردانی

نگارندگان مقاله از راهنمایی‌های ارزنده ایمان بابائیان در زمینه مدل‌های تغییر اقلیم صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

۱۱- منابع

- احمدپور، عبدالرضا، ۱۳۹۲، «پیش‌بینی عملکرد ذرت دانه‌ای تحت تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری با استفاده از مدل آکوگراپ و ووفوست در منطقه کرمانشاه»، *پایان‌نامه کارشناسی/ارشد، استاد راهنما: بهمن فرهادی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه.*
- اشرف، بتول، محمد موسوی‌بایگی، غلامعلی کمالی و کامران داوری، ۱۳۹۰، «پیش‌بینی نیاز آبی چغندرقد در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ با استفاده از داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل ریزمقیاس‌کننده LARS-WG»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، شماره ۵، صص ۱۱۹۶-۱۱۸۴.
- بابائیان، ایمان و منصوره کوهی، ۱۳۹۱، «ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۶، شماره ۴، صص ۹۶۷-۹۵۳.
- بافکار، علیجان، سعید برومندنسب، مجید بهزاد، بهمن فرهادی بانسوله، «پیش‌بینی پتانسیل تولید ذرت دانه‌ای رقم 704C در منطقه ماهیدشت کرمانشاه با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد محصول WOFOST»، *علوم گیاهان زارعی ایران*، دوره ۴۲، شماره ۴، صص ۸۰۸-۷۹۹.
- بلوک‌آذری، سارا، علیرضا مساح بوانی، محمود مشعل و بهزاد آزادگان، ۱۳۹۱، «بررسی تغییرات عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی دشت هشتگرد تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی با رویکرد AEZ/GIS»، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، شماره ۴، جلد ۶، صص ۲۸۶-۲۷۳.
- روستایی، مریم، تیمور سهرابی، علیرضا مساح بوانی و محمد صادق احدی، ۱۳۹۱، «ارزیابی ریسک عملکرد زیست توده گیاه ذرت تحت تأثیر تغییر اقلیم»، *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، جلد ۲۶، شماره ۴، صص ۴۳۸-۴۲۵.
- سلیمانی ننادگانی، مجید، مسعود پارسی‌نژاد، شهاب عراقی‌نژاد و علیرضا مساح بوانی، ۱۳۹۰، «تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد گندم دیم»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، شماره ۲، صص ۳۹۷-۳۸۹.
- سیاری، نسرين، امین علیزاده، محمد بنایان اول، علیرضا فریدحسینی و مسعودرضا حسامی کرمانی، ۱۳۹۰، «مقایسه دو مدل گردش عمومی جو (HadCM3, CGCM2) در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی و نیاز آبی گیاهان تحت تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه کشف‌رود)»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، شماره ۴، صص ۹۲۵-۹۱۲.
- عباسی، فاطمه، ایمان بابائیان، شراره ملبوسی، مرتضی اثمیری و لیلی گلی مختاری، ۱۳۹۱، «ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از



- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو». فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۷، شماره ۱، صص ۲۳۰-۲۰۵.
- قمری اصل، محسن، بهرام اندرزیان، عبدالمهدی بخشنده، محمدحسین قرینه و قدرت‌اله فتحی، ۱۳۹۰، «شبیه‌سازی اثرات تنش خشکی و نیتروژن بر عملکرد، کارایی مصرف آب و نیتروژن ذرت با استفاده از مدل شبیه‌سازی CERES-Maize»، *فیزیولوژی گیاهان زراعی*، دوره ۳، شماره ۱، صص ۲۱-۳۱.
- کمال، علیرضا و علیرضا مساح بوانی، ۱۳۹۱، «مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در تأثیر بر رواناب حوضه در دوره آتی»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۸، شماره ۳، صص ۱۷۵-۱۸۸.
- گل‌محمدی، مریم و علیرضا مساح‌بوانی، ۱۳۹۰، «بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم»، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، شماره ۲، صص ۳۱۵-۳۲۶.
- لشکری، حسن و علی رضایی، ۱۳۹۰، «مکان‌یابی نواحی مستعد کشت کلزا در منطقه سرپل زهاب»، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، دوره ۴۳، شماره ۷۸، صص ۴۸-۲۹.
- مسعودیان، سید ابوالفضل، ۱۳۸۴، «بررسی روند دمای ایران در نیم‌سده گذشته»، *پژوهش‌های جغرافیایی*، دوره ۳۷، شماره ۵۴، صص ۴۵-۲۹.
- نیکنام سلیمانی، مهدی پوره‌اشمی، داود درگاهی و جهانگیر محمدی، ۱۳۸۶، «طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی با توجه به فاکتورهای فیزیوگرافی در جنگل‌های بلوط باباکوسه علیا استان کرمانشاه»، *همایش منطقه‌ای یافته‌های کشاورزی و منابع طبیعی غرب کشور*، سنندج.
- Ahmadvpour, A. R., 2013, "Corn Yield Forecasting under Different Irrigation Managements by using WOFOST and AquaCrop Models in the Kermanshah Region", *MSc thesis*, Supervisor: B. Farhadi, Dept. of Water Engineering, Razi University of Kermanshah. [In Persian]
- Ashraf, B., Mousavi Baygi, M., Kamali, GH. A., Davari, K., 2012, "Prediction of Water Requirement of Sugar Beet During 2011-2030 by using Simulated Weather Data with Lars-Wg Downscaling Model", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, Vol. 25, No. 5, pp. 1184-1196. [in Persian]
- Babaeian, I., Kouhi, M., 2012, "Agroclimatic Indices Assessment over some Selected Weather Stations of Khorasan Razavi Province under Climate Change Scenarios", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, Vol. 26, No. 4, pp. 953-967. [in Persian]
- Bafkar, A., Boroumandnasab, S., Behzadm M., Farhadi Bansouleh, B., 2012, "Estimation of Potential Yield of Grain Maize in Mahidasht, Kermanshah Using WOFOST, a Crop Growth Simulation Model",

- Iranian Journal of Field Crop Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 799-808. [in Persian]
- Bolouk Azari, S., Massah Bavani, A. R., Mashal, M., Azadegan, B., 2013, "Assessment of Changes in Yield and Agricultural Water Productivity of Hashtgerd Plain Affected by Climate Change in the Future Periods using Aez/Gis Approach", *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, Vol. 6, No. 4, pp. 273-286. [in Persian]
 - Rootaei. M., Sohrabi, T., Massah Bavani, A., Ahadi, M. S., 2012, "Risk Evaluation of Biomass Yield of Corn Affected by Climate Change", *Journal of Water Research in Agriculture*, Vol. 26, No. 4, pp.425-438. [in Persian]
 - Soleymani Nanadegani, M., Parsinejad, M., Araghinejad, Sh., Massah Bavani, A., 2011, "Study on Climate Change Effect on Net Irrigation Requirement and Yield for Rainfed Wheat (Case Study: Behshahr)", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, Vol. 25, No. 2, pp. 389-397. [in Persian]
 - Sayyari, N., Alizadeh, A., Bannayan Avval, M., Farid Hoseyni, A., Hosami Kermani, M. R., 2011, "Comparison of Two General Circulation Models (HadCM3, CGCM2) in Predicting Climatic Parameters and Water Requirements of Plants Under Climate Change (Case Study: Kashafrood Basin)", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, Vol. 25, No. 4, pp. 912-925. [in Persian]
 - Abbasi, F., Babaeian, I., Malboosi, Sh., Asmari, M., Mokhtari, L.G., 2012, "Climate Change Assessment Over Iran During Future Decades, Using Statistical Downscaling of Echo-G Model", *Geographical Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 205-230. [in Persian]
 - Ghamari, M., Andarzian, B., Bakhshandeh, A. M., Gharineh, M. H., Fathi, GH., 2012, "Simulating Effects of Drought and Nitrogen Stress on Yield, Water and Nitrogen Use Efficiency of Corn Using CERES-Maize Simulating Model", *Crop Physiology Journal*, Vol. 3, No. 11, pp. 21-31. [in Persian]
 - Kamal, A., Massah Bavani, A., 2012, "Comparison of Future Uncertainty of AOGCM-TAR and AOGCM-AR4 Models in the Projection of Basin Runoff", *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 38, No. 3, pp. 175-188. [in Persian]
 - Golmohammadi, M., Massah Bavani, A., 2011, "The Perusal of Climate Change Impact on Drought Intensity and Duration", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, Vol. 25, No. 2, pp. 315-326. [in Persian]

- Lashkari, H., Rezaei, A., 2012, "Site Selection of Potential Cultivation of Canola in Sarpole Zahab District", *Physical Geography Research*, Vol. 43, No. 78, pp. 29-48. [in Persian]
- Masoudian, S. A. F., 2006, "Temperature Trends in Iran during the Last Half Century", *Quarterly Geographical Research*, Vol. 37, No. 54, pp. 29-45. [in Persian]
- Soleymani, N., Poorhashemi, M., Dargahi, D., Mohammadi, D., 2007, "Classification of Forest Types with Regard to the Physiographic Factors in Oak Forests of Baba Kuseh-Ye Olya, Kermanshah Province", *Regional Conference on Agriculture and Natural Resources Findings in the West of Iran*, Sanandaj. [in Persian]
- Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Roetter, R. P. Cabrera, J. M. C. A., Van Laar, H. H., 1998, "WOFOST 7.1, User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5", *Technical Document 52*, DLO Winand Staring Centre, Wageningen (Netherlands).
- Catalin, L., Bettina, B., Fabio, M., Daniela Anca, L., 2009, "Adaptation of WOFOST Model from CGMS to Romanian Conditions". *Journal of Plant Development*, No. 16, pp. 97- 102.
- Holden, N. M., Brereton, A. J., 2004, "Definition of Agroclimatic Regions in Ireland Using Hydro-thermal and Crop Yield Data", *Agricultural and Forest Methodology*, Vol. 122, No. 3, pp. 175-191.
- Holzkämper, A., Calanca, P., Honti, M., Fuhrer, J., 2015, "Projecting Climate Change Impacts on Grain Maize Based on Three Different Crop Model Approaches", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 214-215, pp. 219-230.
- IPCC, 2007, "Climate Change 2007: Synthesis Report", *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Johnston, R. Z., Sandefur, H. N., Bandekar, P., Matlock, M. D., Haggard, B. E., Thoma, G., 2015, "Predicting Changes in Yield and Water Use in the Production of Corn in the United States Under Climate Change Scenarios", *Ecological Engineering*, Vol. 82, pp. 555-565.
- Monaco, E., Bonfante, A., Alfieria, S. M., Basile, A., Menenti, M., De Lorenzi, F., 2014, "Climate Change, Effective Water Use for Irrigation and Adaptability of Maize: A Case Study in Southern Italy", *Biosystems Engineering*, Vol. 128, pp. 82-99.

- Seung Hee, K., Kim, J., Walko, R., Myoung, B., Stack, D., Kafatos, M., 2015, "Climate Change Impacts on Maize-yield Potential in the Southwestern United States", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 29, pp. 279 – 280.
- Torriani, D. S., Calanca, P., Schmid, S., Beniston, M., Fuhrer, J., 2007, "Potential Effects of Changes in Mean Climate and Climate Variability on the yield of winter and Spring Crops in Switzerland", *Climate Research*, Vol. 34, pp. 59-69.
- Van Ittersum, M. K., Rabbinge, R., 1997, "Concepts in Production Ecology for Analysis and Quantification of Agricultural Input-Output Combinations", *Field Crops Research*, Vol. 52, No. 3, pp. 197-208.
- Wang, N., Wang, J., Wang, E., Yu, Q., Shi, Y., He, D., 2015, "Predicting Changes in Yield and Water Use in the Production of Corn in the United States under Climate Change Scenarios", *European Journal of Agronomy*, Vol. 71, pp. 19-33.
- Wilby R. L., Harris, I., 2006, "A Framework for Assessing Uncertainties in Climate Change Impacts: Low-Flow Scenarios for the River Thames, UK", *Water Resources Research*, Vol. 42, pp. 1-10.