

ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی

ایمان بابائیان^{۱*} - منصوره کوهی^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۲۴

چکیده

مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی و شاخص‌های اقلیمی کشاورزی می‌تواند موجب بهبود و توسعه راهبردهای مدیریتی در ارتباط با نیازهای مهم کشاورزی در دهه‌های آینده و اتخاذ روش‌های سازگاری و کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی گردد. در این پژوهش، اثر گرمایش جهانی بر متغیرهای بارش و دما و شاخص‌های اقلیمی کشاورزی چون طول دوره خشکی، طول دوره رشد و تبخیر-تعرق بالقوه در سه دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ میلادی با استفاده از برون‌داد ریزگردانی شده‌ی دو مدل گردش عمومی NCAR-PCM و GFDL-CM2.1 تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 در سه ایستگاه هواشناسی مشهد، سبزوار و تربت حیدریه بررسی شد. با هدف کاهش عدم قطعیت، از روش میانگین وزنی استفاده شد. ریزگردانی با استفاده از روش آماری همبستگی چند متغیره بر روی میانگین‌های ماهانه تا سالانه برای شاخص‌های اقلیمی کشاورزی و نرم افزار LARS-WG5 برای مدل‌سازی متغیرهای روزانه مورد نیاز در محاسبه تبخیر-تعرق بالقوه انجام شد. نتایج نشان داد در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ طول دوره رشد در دو ایستگاه مشهد و سبزوار افزایش و در تربت حیدریه کاهش می‌یابد اما در هر سه ایستگاه این شاخص در دوره ۲۰۹۹-۲۰۸۰ تا ۱۸/۶ روز افزایش خواهد یافت. تغییرات بارش در دوره‌ها و ایستگاه‌ها، متفاوت ارزیابی شد. سه ایستگاه مشهد، سبزوار و تربت حیدریه به ترتیب تا ۳/۳، ۲/۴ و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش دما را تا پایان قرن حاضر تجربه خواهند کرد. تبخیر-تعرق بالقوه در انتهای دوره نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه به ترتیب تا ۱۳/۴، ۱۴/۲ و ۹/۳ درصد افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، مدل گردش عمومی، طول دوره خشکی، طول دوره رشد، تبخیر-تعرق بالقوه، سناریوی انتشار، عدم قطعیت

مقدمه

و تایید تغییر در متغیرهای اقلیمی طی دهه‌های آینده بوجود آمده است (۱۹).

تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن جو، دما، بارش و رطوبت خاک هر یک بطور جداگانه یا با یکدیگر تولیدات کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. از آنجایی که متغیرهای اقلیمی به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شوند، لذا تغییر در مقدار میانگین و انحراف معیار آن‌ها می‌تواند در میزان تولید و عملکرد محصولات کشاورزی موثر باشد. یک شاخص حساس و قابل دیدبانی از پاسخ گیاه به تغییر اقلیم، تغییرات در دوره‌های فنولوژی (ریخت شناختی) گیاهی است. متاسفانه داده‌های بسیار کمی از اندازه‌گیری‌های فنولوژی گیاهی برای بررسی ارتباط بین گرمایش جهانی دهه‌های اخیر و تغییر در فنولوژی گیاهان (از سراسر جهان) وجود دارد (۳۵). اما مطالعات انجام شده نشان از تغییرات در حال وقوع در دوره‌های فنولوژیکی در گیاهان و جانوران

در قرن بیستم، دمای کره زمین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که بیشترین افزایش بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ این مقدار بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. عمده‌ترین علت افزایش دما در طی ۵۰ سال اخیر ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای بوده است. در بین گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن بیشترین اثر تابشی را دارد و بر موازنه تابشی یا موازنه گرمایی کل زمین تاثیر می‌گذارد (۲۱). لذا در سال‌های اخیر یک توافق جمعی در ارتباط با موضوع گرمایش جهانی

۱ و ۲- دکتری اقلیم‌شناسی و دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، گروه پژوهشی اقلیم‌شناسی کاربردی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور، مشهد
(* نویسنده مسئول: (Email: ibabaeian@yahoo.com)

امر نیز منجر به عدم رسیدگی کامل محصول و در نتیجه کاهش عملکرد آن گردد (۳۲). منزل و همکاران (۲۸) با مطالعه دوره های فنولوژیکی به مدت بیش از چهل سال (۱۹۹۶-۱۹۵۱) در آلمان نتیجه گیری کردند که در دوره یاد شده به طور کلی طول دوره رشد به مقدار ۰/۲ روز بر سال افزایش یافته است، در حالیکه میزان افزایش آن در دوره ۱۹۹۶-۱۹۷۴ تا ۵ روز از دوره ۱۹۷۳-۱۹۵۱ بیشتر است. لیندر هولم و دیگران (۲۵) در منطقه بالتیک فصل رویش قرن بیستم را بر اساس میانگین دمای روزانه در ۴۹ ایستگاه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که به طور میانگین در دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۵۱ فصل رویش در تمام منطقه به مقدار ۷/۴ روز افزایش یافته است. بر اساس این مطالعه بیشترین افزایش در برخی ایستگاه‌های کشور دانمارک به میزان ۲۰ روز بوده است. لابل و بورک (۲۶) نشان دادند که بطور کلی عدم قطعیت در پاسخ عملکرد محصولات کشاورزی به تغییرات اقلیمی عمدتاً به عدم قطعیت در برآورد میزان تغییر در دمای فصل رشد مرتبط است تا بارش. در این رابطه، نتایج حاصل از پژوهشی دیگر نشان داد که از اوایل دهه ۱۹۶۰، افزایش ۴۰ درصدی غلظت دی اکسید کربن در قطب شمال موجب افزایش ۷ روزه در طول دوره رشد این منطقه گردیده است (۲۳). تحلیل داده‌های روزانه ۱۶ ایستگاه همدیدی کشورمان در دوره ۲۰۰۳-۱۹۵۱ نشان می‌دهد که طول دوره رشد در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش یافته است که بیشترین افزایش به مقدار ۲۰ روز در ایستگاه‌های مشهد و کرمانشاه مشاهده گردید (۶). بر اساس نتایج پژوهش اسماعیلی و همکاران طول دوره رشد در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه تحت سناریوی A1 مدل گردش عمومی ECHO-G به ترتیب به میزان ۱۶، ۱۵ و ۱۶ روز افزایش می‌یابد (۱). بابائی کافکی و همکاران (۱۴) با استفاده از داده‌های سنجنده AVHRR و محاسبه شاخص NDVI نشان دادند که در دوره ۱۹۹۹-۱۹۸۲ طول فصل رشد پوشش گیاهی در ایران به میزان ۰/۹۴ روز بر سال افزایش یافته است. آن‌ها دریافتند که آغاز رشد^۲ پوشش گیاهی به میزان ۰/۶۳ روز به جلو و خاتمه^۳ پوشش گیاهی به میزان ۰/۳۲ روز به تاخیر افتاده است. در کل، اثر افزایش دما در مناطق مختلف کره زمین متفاوت بوده، به عنوان مثال در عرض‌های جغرافیایی بالا و نواحی جنب قطبی طول فصل رشد افزایش و شرایط محیطی بهبود خواهد یافت. اما در نواحی مواجه با کمبود آب، تشدید درجه خشکی را به دنبال دارد که یک عامل منفی محسوب می‌شود. همینطور دماهای بیشتر در مناطق کوهستانی امکان رشد بیشتر گیاهان را در ارتفاعات بالاتری که برودت‌های شدید در آنجا عامل بازدارنده است، فراهم خواهد ساخت (۳۳). نصیری و همکاران (۱۲) در پژوهش خود اقدام به

دارد. نتایج مطالعه ای بر روی ۳۸۵ گونه گیاهی در بریتانیا نشان داد که از دهه ۱۹۸۰ جابجایی قابل ملاحظه ای در تاریخ اولین گلدهی رخ داده است، به طوریکه این تاریخ به طور متوسط ۴/۵ روز زودتر اتفاق افتاده است. این در حالی است که در ۱۵ درصد از گونه‌های مورد بررسی این جابجایی حدود ۱۵ روز بوده است (۱۷). هو و همکاران (۲۰) با مطالعه تاریخ اولین شکوفه‌دهی سه گونه درختی در فصول بهار ۲۰۰۴-۱۹۲۲ در سئول کره جنوبی، دریافتند که تاریخ اولین شکوفه‌دهی برای درختان به میزان ۱/۴ تا ۲/۴ روز بر دهه و برای دیگر گیاهان ۰/۵ روز جلوتر افتاده است. در همین دوره میانگین دما ۲ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. تردیدی نیست که در شرایط تغییر اقلیم، شاخص‌های اقلیم کشاورزی نیز دستخوش تغییر شده که با ارزیابی این شاخص‌ها امکان بررسی واکنش گیاهان زراعی به شرایط اقلیمی آینده میسر خواهد شد (۱۲). نصیری و کوچکی (۱۲) به منظور آنالیز شاخص‌های اقلیمی کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای، ۵۵ شاخص اقلیمی کشاورزی را در شرایط فعلی و سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ محاسبه نمودند. به منظور تعیین شباهت ایستگاه‌های تحت بررسی و گروه‌بندی آنها از روش خوشه‌ای استفاده شد. براساس نتایج این پژوهش، در شرایط اقلیمی فعلی، شهرستان‌های تحت بررسی از نظر تشابه این شاخص‌ها در ۱۰ ناحیه و در شرایط تغییر اقلیم، در سال ۲۰۲۵ در ۸ ناحیه و در سال ۲۰۵۰ در ۷ ناحیه قرار می‌گیرند. لذا تشابه بین مناطق از نظر این شاخص‌ها افزایش و تنوع اقلیمی کشاورزی در مقایسه با شرایط فعلی کاهش خواهد یافت. طول دوره رشد^۱ یکی از شاخص‌های اقلیمی کشاورزی است که تعاریف متفاوتی برای آن ارایه شده است. از آن جمله می‌توان به فاصله بین آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزه (۳۲) و یا تعداد روزهای بدون یخبندان و همچنین به صورت فاصله زمانی بین دوره زمانی با میانگین دمای روزانه بیشتر و کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد با حداقل تداوم ۵ روز اشاره کرد (۱۸). بر اساس تعریف فائو، تعیین طول فصل رشد صرفاً بر اساس دما واقع‌گرایانه نمی‌باشد. زیرا در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک رطوبت عامل اصلی محدود کننده رشد است. لذا در روش فائو طول فصل رشد واقعی با استفاده از میانگین تبخیر-تعرق بالقوه ماهانه تعیین می‌شود. بدین صورت که با رسم منحنی مربوط به ۵۰ درصد تبخیر-تعرق ماهانه، نقاط تلاقی این منحنی با تغییرات بارش، طول فصل رشد را مشخص می‌سازد (۱۳). پیش‌بینی می‌شود طول دوره رشد در دهه‌های آینده، بخصوص در عرض‌های بالاتر، افزایش یابد. با افزایش طول دوره رشد امکان کشت زودتر محصول، رسیدگی کامل آن و بسته به میزان آب قابل دسترس، فرصت کشت چندباره محصول فراهم می‌شود در حالی که کاهش طول دوره رشد می‌تواند موجب تغییر تاریخ کشت شده که این

2- Green Up
3- Dormancy

1- Growing Season Length (GSL)

آنها تا سال ۲۱۰۰ هستند به مدل معرفی می‌گردند که بر این اساس، داده‌های آینده شبیه سازی می‌شوند.

علیرغم افزایش قدرت تفکیک افقی مدل‌های گردش عمومی جو، تاکنون هیچ یک از این مدل‌ها قادر به مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی در مقیاس نقطه ای ایستگاه‌های هواشناسی نبوده‌اند. به همین دلیل از روش‌های مختلف دینامیکی و آماری برای ریزگردانی برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جهت شناخت رفتار جو در مقیاس ریزتر استفاده می‌شود. در روش‌های دینامیکی معادلات حرکت هوا و معادلات ترمودینامیکی در شبکه‌های منظم محاسباتی و از طریق دریافت داده‌های شرایط مرزی از مدل جهانی، توسط مدل منطقه‌ای اقلیمی حل می‌شوند. از مدل‌های منطقه‌ای می‌توان به RegCM¹، WRF²، MM5³ و PRECIS⁴ اشاره کرد. در روش آماری با استفاده از داده‌های مشاهداتی دوره آماری و برون‌داد مدل گردش عمومی در دوره مشابه، یک ارتباط آماری بین رفتار متغیر هواشناسی در ایستگاه هواشناسی با همان متغیر در شبکه مدل گردش عمومی که ایستگاه مذکور را پوشش می‌دهد، تعیین می‌شود. سپس این رفتار آماری به آینده تعمیم داده می‌شود، به نحوی که با اعمال این رفتار به برون‌داد مدل گردش عمومی در دوره آینده، اقلیم ایستگاه مد نظر در مقیاس زمانی (روزانه) و مکانی (محلی) در آینده پیش‌بینی می‌گردد. یکی از مهمترین روش‌های آماری، استفاده از روش تولید داده⁵ می‌باشد. روش‌های تولید داده به دو گروه ریچاردسون و زمف تقسیم می‌شوند. مبنای مدل سازی در روش ریچاردسون، زنجیره مارکف و در زمف، توزیع نیمه تجربی است (۲).

مدل‌های تغییر اقلیم پیش‌بینی می‌کنند که اقلیم‌های مختلف کره زمین و پدیده‌های زیست‌شناختی آن می‌توانند تحت تاثیر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و در پی آن افزایش تدریجی دمای سطحی قرار گیرند. نتایج مربوط به شبیه‌سازی اقلیم آینده بر اساس مدل‌های GISS و GFDL نشان داد که در فصل رشد نخود، میانگین دما در منطقه مورد بررسی به ترتیب ۳/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و تابش و بارندگی به ترتیب ۲- تا ۴ درصد و ۱۵- تا ۴ درصد تغییر پیدا می‌کنند لذا دوره رشد گیاه در اثر افزایش دما ۱۰ تا ۱۳ درصد کاهش می‌یابد (۵). در رابطه با نیاز آبی محصولات کشاورزی، علیزاده و کمالی (۸) اثرات تغییر اقلیم بر افزایش مصرف آب کشاورزی در دشت مشهد را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش دمای هوا به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد نیاز خالص آبیاری با الگو و ترکیب کشت کنونی ۶ درصد نسبت به

مطالعه خصوصیات رشدی گندم در شرایط دو برابر شدن غلظت CO₂ و رشد و تولید ارقام مختلف گندم با کمک مدل SIMTAG با استفاده از داده‌های آب و هوایی UKMO مربوط به شرایط تغییر اقلیم (سال ۱۴۰۰ هجری شمسی) کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش ۲۶ روز در طول دوره رشد گندم در شرایط مشهد خواهد شد. سلطانی و قلی‌پور (۳) رشد، عملکرد و مصرف آب نخود را در شرایط دیم و آبی مراغه (شمال غرب کشور) تحت شرایط تغییر اقلیم آینده مورد بررسی قرار دادند. هر چند بیشتر مطالعات در این زمینه در کشورهای پیشرفته انجام شده است، اما آسیب‌پذیری کشورهای در حال توسعه نسبت به تغییر اقلیم به مراتب از کشورهای پیشرفته بیشتر است زیرا عموماً کشاورزی نقش بزرگی در اقتصاد این گونه کشورها ایفاء می‌کند (۱۹). لذا برآورد اثرات تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف اقتصادی می‌تواند موجب کاهش اثرات و حتی بوجود آوردن برخی فرصت‌های اقتصادی گردد. بر اساس نتایج پژوهش‌های صورت گرفته، تغییر اقلیم برای برخی جوامع و نواحی اقلیمی، مسئله ساز و موجب بروز مشکلات قابل ملاحظه‌ای در تولید محصولات کشاورزی خواهد شد (۱۵ و ۳۶). بنابراین مدل‌سازی و شناخت پیامدهای گرمایش جهانی می‌تواند از دیدگاه مدیریتی و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات و سازگاری با این پدیده، بسیار ارزشمند و اقتصادی باشد (۱۹). در این پژوهش، اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی شامل طول دوره رشد، طول دوره خشکی و تخییر - تعرق مرجع (بالقوه) در مقیاس ایستگاهی در مشهد، سبزار و تربت حیدریه طی سه دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ (به اختصار دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شاخص‌های فوق با استفاده از برون‌داد ریزگردانی شده بارش و دمای دو مدل NCAR-PCM و GFDL- CM2.1 تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 محاسبه شده‌اند.

مدل‌های گردش عمومی جو و ریزگردانی

جهت شناخت پیامدهای گرمایش جهانی ضروری است تا شرایط آبی و هوایی شبیه‌سازی شوند. معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی هستند. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی که بوسیله روابط ریاضی‌ارایه می‌شوند، استوار می‌باشند. تاکنون مدل‌های گردش عمومی مختلفی در مراکز گوناگون تحقیقاتی تدوین و طراحی شده است از آن جمله می‌توان به مدل‌های HadCM3، ECHAM4، ECHO-G و ... اشاره نمود (۴). تغییرات گازهای گلخانه‌ای و میزان انتشار این گازها طی دوره‌های آبی از مهمترین ورودی این مدل‌ها محسوب می‌گردند، از این رو سناریوهای انتشار که نشان‌دهنده‌ی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و وضعیت

- 1- Regional Climate Model
- 2- Weather Research Forecast
- 3- Mesoscale Model ver.5
- 4- Providing REgional Climate for Impact Studies
- 5- Weather Generator

$$STD_{Mod}^{Obs} = \frac{STD_{base}^{Obs}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{MMR}^{GCM} \quad (2)$$

که در آن STD_{base}^{Obs} ، STD_{base}^{GCM} ، STD_{MMR}^{GCM} و STD_{Mod}^{Obs} به ترتیب انحراف معیارهای متغیر هواشناسی دیدبانی شده، برونداد مدل گردش عمومی در دوره دیدبانی، برونداد مدل ریزمقیاس نمایی آماری و انحراف معیار نهایی اصلاح شده می‌باشند (۲).

در مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که این موارد به علت عدم قطعیت‌های موجود در شرایط اولیه، داده‌های مشاهداتی و پارامترهای مدل بوجود می‌آیند و عمدتاً ناشی از این واقعیت می‌باشند که بعضی از فرآیندها در سامانه اقلیم به خوبی شناخته نشده‌اند. روش‌های متفاوتی جهت کاهش این عدم قطعیت‌ها از طرف هیات بین‌الدول تغییر اقلیم ارایه شده است (۲۲). در این پژوهش سعی شده است تا عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل‌های مختلف گردش عمومی به روش وزن دهی به برونداد هرمدل تحت سه سناریوی انتشار کاهش داده شود. بدین منظور، میانگین ماهانه متغیرهای شبیه‌سازی شده توسط مدل در شبکه‌ای که ایستگاه هواشناسی در داخل آن قرار دارد با مقادیر داده‌های مشاهداتی طی دوره پایه، مقایسه و براساس میزان توانمندی مدل در شبیه‌سازی مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناسی ایستگاه هواشناسی، وزن هر یک از مدل‌ها مطابق فرمول ۳ محاسبه می‌شود (به نقل از ۱۱).

$$W_{i,j} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/\Delta F_{i,j})} \quad (3)$$

که در آن F متغیر هواشناسی مورد بررسی، ΔF اختلاف بین متغیر شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف با مقدار مشاهداتی در دوره پایه و W وزن شبیه‌سازی‌های هر مدل گردش عمومی جو تحت سه سناریو در ماه مورد نظر می‌باشد. i و j به ترتیب نشان دهنده ماه و مدل گردش عمومی جو می‌باشد.

در این مطالعه از دیگرام ارزش دهی بریر^۲ نیز که یکی از روش‌های اساسی در سنجش توانمندی مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی پدیده‌های اقلیمی است، استفاده شده است (فرمول ۴). در این روش متغیر V که فقط اعداد ۱ و صفر را در بر می‌گیرد، به معنی وقوع یا عدم وقوع پدیده می‌باشد. همچنین متغیر p پیش‌بینی احتمال وقوع پدیده (مقادیر آن بین صفر و یک) می‌باشد.

وضعیت نرمال افزایش خواهد داشت. همچنین میزان افزایش نیاز آبی به ازای ۴ و ۶ درجه افزایش دما، به ترتیب ۱۱ و ۱۷ درصد خواهد بود. شاه‌کرمی و همکاران (۴) با استفاده از مدل‌های AOGCM گزارش سوم IPCC شامل CCSR، CGCM2، CSIRO-MK2، ECHAM4، GFDL-R30، HadCM3 و NCAR-DOE تحت سناریوی انتشار A2، اثرات ناشی از سناریوهای اقلیمی دما در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ بر نیاز آبی گندم، جو، چغندرقد و سیب زمینی در حوضه زاینده رود بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس سطح زیر کشت اصلی فعلی حجم تقاضای آب برای کشت‌های اصلی به میزان حدوداً ۱۷۳ تا ۲۳۰ میلیون متر مکعب طی دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ افزایش می‌یابد.

داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل هستند که داده‌های مشاهداتی روزانه مربوط به دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش (یا ساعت آفتابی) می‌باشد که در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردیدند. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه آورده شده است.

داده‌های مورد نیاز از مدل‌های گردش عمومی NCAR-PCM و GFDL CM2.1 (به طور خلاصه NCAR و GFDL) اخذ و برونداد هر یک از مدل‌های یادشده تحت سه سناریوی A1B، A2 و B2 با استفاده از نرم افزار LARS-WG5 و روش همبستگی چند متغیره در سه دوره زمانی ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ میلادی ریزگردانی شدند.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از دو روش مدل LARS-WG5 و همبستگی چندگانه برای ریزگردانی برونداد سناریوهای مختلف دو مدل گردش عمومی GFDL و NCAR استفاده شد. فرمول مورد استفاده در همبستگی چندگانه به صورت زیر می‌باشد:

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i X_i + b + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

در فرمول بالا Y متغیر برآوردی می‌باشد که در اینجا می‌تواند طول دوره رشد، دوره خشک، بارش و یا دما باشد. X_i متغیرهای پیش‌بینی کننده (X₁, X₂, X₃, ..., X_n) که در اینجا برونداد مدل‌های GFDL و NCAR تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 می‌باشند. a_i ضرایب همبستگی، b مقدار ثابت و ε_i جمله خطا می‌باشند.

پس از ریزگردانی آماری، با حفظ میانگین داده‌ها در هر یک از سری‌های زمانی، انحراف معیار آن‌ها مطابق فرمول ۲ تا حد داده‌های مشاهداتی افزایش داده می‌شود.

1- General Circulation Model

2- Barrier Score Diagram

جدول ۱- نام، مشخصات جغرافیایی و دوره پایه داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	طول دوره رشد (روز)	میانگین بارش (mm)	میانگین دما (°C)	دوره آماری
مشهد	۵۹° ۳۸'	۳۶° ۱۶'	۹۹۹	۲۱۷/۷	۲۵۵/۷	۱۳/۸	۱۹۶۱-۱۹۹۰
سبزوار	۵۷° ۴۳'	۳۶° ۱۳'	۹۷۷/۶	۲۴۸/۷	۱۸۸/۸	۱۷/۲	۱۹۶۱-۱۹۹۰
ترت حیدریه	۵۹° ۱۳'	۳۵° ۱۶'	۱۴۵۰/۸	۲۱۰/۶	۲۶۴/۶	۱۴/۴	۱۹۶۲-۱۹۹۰

ایستگاه‌های مورد بررسی، از این روش برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان تبخیر-تعرق بالقوه در دوره‌های آتی استفاده شده است. این روش در فرمول ۵ نشان داده شده است. اگرچه در عبارات این معادله تنها دما دیده می‌شود اما رطوبت نسبی در تفاوت دمای بیشینه و کمینه وجود دارد (۷).

$$ET_0 = 0.0135(K_T)R_a(TD)^{0.5}(T + 17.8) \quad (5)$$

$$K_T = 0.00185(TD)^2 - 0.0433(TD) + 0.4023$$

$$TD = T_{max} - T_{min}$$

که در آن ET_0 تبخیر - تعرق بالقوه (mm/day)، T میانگین دمای ماهانه، T_{max} و T_{min} به ترتیب دمای بیشینه و کمینه ماهانه و R_a تابش فرازمینی که بر حسب میلی‌متر آب بوده و بر اساس عرض جغرافیایی برای هر ماه عددی مشخص است.

نتایج و بحث

در جدول ۲ وزن هر یک از مدل-سناریوها در مدل سازی طول دوره رشد، بارش و دما آورده شده است. ملاحظه می‌شود مجموع وزن هر یک از مقادیر متغیرها در سناریوهای گوناگون در هر سطر برابر یک می‌شود.

بر اساس این جدول، ملاحظه می‌شود که وزن مدل گردش عمومی NCAR در مدل سازی طول دوره رشد ایستگاه‌های مشهد و تربت حیدریه بیشتر می‌باشد که در این بین توانمندی سناریوی B1 در مقایسه با سایر سناریوها بیشتر می‌باشد. اما در ایستگاه سبزوار توانمندی مدل GFDL با سناریوی B1 از سایر مدل‌ها و سناریوها بیشتر است. در هر دو مدل گردش عمومی پس از سناریوی B1، نتایج سناریوی A2 به داده‌های دیدبانی هر سه ایستگاه مذکور نزدیک تر است تا سناریوی A1B.

توانمندی مدل ریزگردانی مبتنی بر همبستگی چندگانه از طریق بررسی میزان همبستگی های معنی‌دار آن‌ها در سطح پنج درصد بررسی شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول بهترین سناریوهای مورد استفاده در تدوین مدل رگرسیونی چند گانه (معادله ۱) که دارای بهترین عملکرد از دیدگاه‌های ضریب همبستگی

$$BSS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - v_i)^2 \quad (4)$$

در فرمول بالا i نشان دهنده نمونه و N تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد. در معادله فوق در صورت وقوع پدیده اقلیمی مورد پیش‌بینی یا مدل سازی $v_i=1$ و در صورت عدم وقوع $v_i=0$ خواهد بود. برای یک پیش‌بینی دقیق مقدار BSS مساوی صفر و برای پیش‌بینی‌های کاملاً غلط مقدار آن ۱ می‌باشد. بر این اساس مقادیر نزدیک به صفر نشان دهنده توانمندی بالای مدل سازی می‌باشد (۳۰).

شاخص‌های اقلیمی کشاورزی مورد بررسی

در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی شامل طول دوره رشد، طول دوره خشکی و تبخیر-تعرق بالقوه با استفاده از متغیرهای بارش و دما ریزگردانی می‌شود و برونداد دو مدل گردش عمومی GFDL و NCAR تحت سه سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرند. جهت برآورد طول دوره رشد از روش رابسون (۲۴) استفاده شده است. در این روش مبنای تعیین طول دوره رشد، فاصله بین آخرین یخبندان بهار و اولین یخبندان پاییزه می‌باشد. این دوره برای هر گونه گیاهی اختصاصی بوده و به حداقل درجه حرارت رشد آن (صفر پایه) بستگی خواهد داشت (۱۰).

طول دوره خشکی^۱ بر اساس تعداد روزهایی که میزان بارندگی کمتر از تبخیر-تعرق بالقوه باشد، تعریف شده است. محاسبه تبخیر-تعرق بالقوه نیز با استفاده از روش هارگریوز-سامانی انجام شده است. از روش هارگریوز-سامانی به دلیل نیاز به تعداد پارامترهای کم (بیشینه، کمینه و میانگین دمای ماهانه) برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی گیاهان استفاده شده است (۲۹). علیزاده و کمالی در پژوهش خود همبستگی بالایی بین روش هارگریوز - سامانی و پنمن بدست آوردند. در مقایسه بین چهار روش هارگریوز-سامانی، بلانی کریدل، تابش و پرستلی-تیلور نیز مشخص شده است که معادله پنمن با دو روش بلانی کریدل و هارگریوز-سامانی بیشترین همبستگی را دارا هستند (۱۶). لذا با توجه به محدود بودن داده‌های ریزمقیاس شده در

1- Length of dry season

شد که در دو سطح یک و پنج درصد معنی دار نبوده اما در سطح ده درصد معنی دار می باشد. وضعیت کم و بیش مشابهی نیز در مدل سازی بارش ایستگاه های سبزوار و تربت حیدریه دیده می شود.

بارش و دما

در جدول ۴ تغییرات بارش و دما طی سه دوره مورد بررسی ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ در مقایسه با دوره پایه آورده شده است. مهمترین ویژگی در مدل سازی ها نبود هماهنگی بین مدل سازی بارش تحت مدل-سناریوهای مختلف در دوره های آینده است. در حالیکه در دوره های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۵ در ایستگاه تربت حیدریه و سبزوار افزایش بارش پیش بینی شده است، اما در همین دوره ایستگاه مشهد شاهد کاهش بارش نسبت به دوره پایه خواهد بود؛ اما نتایج مدل سازی در رابطه با کاهش بارش در سومین دوره مدل سازی در سه ایستگاه با هم هماهنگ بوده و در هر سه ایستگاه کاهش می باشد. بیشترین کاهش فصلی بارش به میزان ۱۴/۶ میلی متر در دوره ۲۰۸۵ در ایستگاه مشهد رخ خواهد داد.

با داده های دیدبانی و شاخص BSS بودند، آورده شده است. در تدوین مدل رگرسیونی از سه سناریوی مختلف مدل گردش عمومی استفاده گردید. علاوه بر آن انحراف معیارهای مدل تدوین شده با استفاده از معادله ۲ بهبود پیدا کردند. معادلات حاصل برای هر یک از متغیرهای طول دوره رشد، بارش و دما در ریزگردانی متغیرهای یاد شده برای دوره های آبی با همان ضرایب دوره دیدبانی مورد استفاده قرار گرفتند. ملاحظه می شود که سهم متغیرهای خروجی مدل GFDL در مدل رگرسیونی مورد استفاده در ریزگردانی از مدل NCAR بیشتر بوده و خروجی های مدل مذکور سازگاری بیشتری با رفتار اقلیمی داده های دیدبانی شده ایستگاه های مورد مطالعه دارند. علاوه بر آن بیشترین کمترین توانایی ریزگردانی به ترتیب مربوط به شاخص طول دوره رشد و متغیر بارش بوده است. بیشترین همبستگی معنی دار بین خروجی مدل طراحی شده و داده های دیدبانی، در مدل دمایی ایستگاه های مشهد و سبزوار به ترتیب با ضرایب های همبستگی ۰/۵۹ و ۰/۵۸ مشاهده شد که هر دو در سطح یک درصد معنی دار هستند. کمترین ضرایب های همبستگی نیز بین سری زمانی برون داد مدل ریزگردانی شده دمای ایستگاه تربت حیدریه با ضریب ۰/۱۹ مشاهده

جدول ۲- وزن هر یک از مدل-سناریوها در مدل سازی طول دوره رشد، بارش و دمای ایستگاه های هواشناسی منتخب

ایستگاه	متغیر	مدل GFDL			مدل NCAR		
		B1	A2	A1B	B1	A2	A1B
مشهد	طول دوره رشد (روز)	۰/۱۱۰	۰/۱۱۶	۰/۱۰۲	۰/۲۲۳	۰/۲۲۳	۰/۲۲۳
	بارش (mm)	۰/۱۶۶	۰/۱۷۳	۰/۱۸۰	۰/۱۶۳	۰/۱۶۳	۰/۱۵۶
	دما (°C)	۰/۲۵۵	۰/۲۳۸	۰/۲۴۹	۰/۰۸۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۶
سبزوار	طول دوره رشد (روز)	۰/۱۷۳	۰/۱۷۷	۰/۱۷۹	۰/۱۶۴	۰/۱۶۴	۰/۱۵۱
	بارش (mm)	۰/۱۸۴	۰/۱۸۲	۰/۲۰۰	۰/۱۳۸	۰/۱۳۸	۰/۱۴۸
	دما (°C)	۰/۲۱۸	۰/۲۱۶	۰/۲۱۵	۰/۱۱۷	۰/۱۱۶	۰/۱۱۸
تربت حیدریه	طول دوره رشد (روز)	۰/۰۹۳	۰/۰۷۷	۰/۰۸۳	۰/۲۳۰	۰/۲۳۰	۰/۲۶۷
	بارش (mm)	۰/۱۹۱	۰/۲۱۰	۰/۲۱۴	۰/۱۲۱	۰/۱۲۱	۰/۱۳۰
	دما (°C)	۰/۲۶۴	۰/۲۶۹	۰/۲۵۸	۰/۰۷۰	۰/۰۶۹	۰/۰۷۰

جدول ۳- بهترین سناریوهای مورد استفاده در ریزگردانی به همراه شاخص های آماری مدل شده

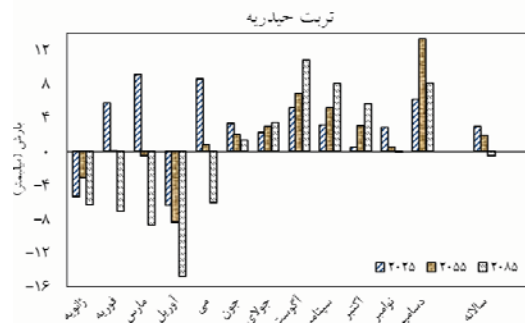
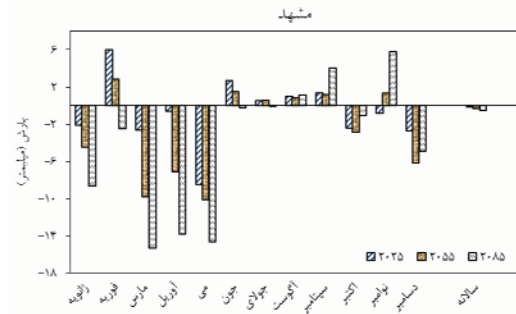
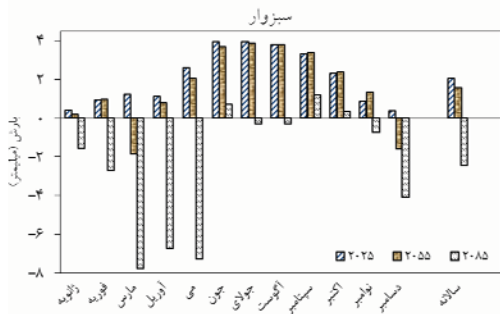
متغیر	ایستگاه	سناریوهای مورد استفاده در مدل سازی رگرسیونی	BSS	ضریب همبستگی	سطح معنی داری
طول دوره رشد	مشهد	GFDL-A1B, GFDL-A2, NCAR-A1B	۰/۳۰۵	۰/۳۰	۰/۰۵
	سبزوار	GFDL-A1B, GFDL-A2, GFDL-B1	۰/۲۶۸	۰/۴۵	۰/۰۱
	تربت حیدریه	GFDL-A1B, GFDL-A2, NCAR-A1B	۰/۲۷۵	۰/۵۰	۰/۰۱
بارش	مشهد	GFDL-A2, NCAR-A1B, NCAR-A2	۰/۴۰۹	۰/۳۶	۰/۰۱
	سبزوار	GFDL-A1B, GFDL-A2, NCAR-A2	۰/۵۷۸	۰/۲۶	۰/۱۰
	تربت حیدریه	GFDL-A1B, GFDL-A2, NCAR-A2	۰/۶۰۳	۰/۲۴	۰/۱۰
دما	مشهد	GFDL-B1, NCAR-A1B, NCAR-B1	۰/۱۳۲	۰/۵۹	۰/۰۱
	سبزوار	GFDL-A1B, NCAR-A1B, NCAR-B1	۰/۲۸۱	۰/۵۸	۰/۰۱
	تربت حیدریه	GFDL-A1B, GFDL-B1, NCAR-B1	۰/۶۳۵	۰/۱۹	۰/۱۰

افزایش دمای پیش‌بینی شده موجب افزایش ناپایداری‌های تابستانه، وقوع بارش‌های سنگین و احتمال افزایش رخداد سیل در منطقه می‌گردد (شکل ۱).

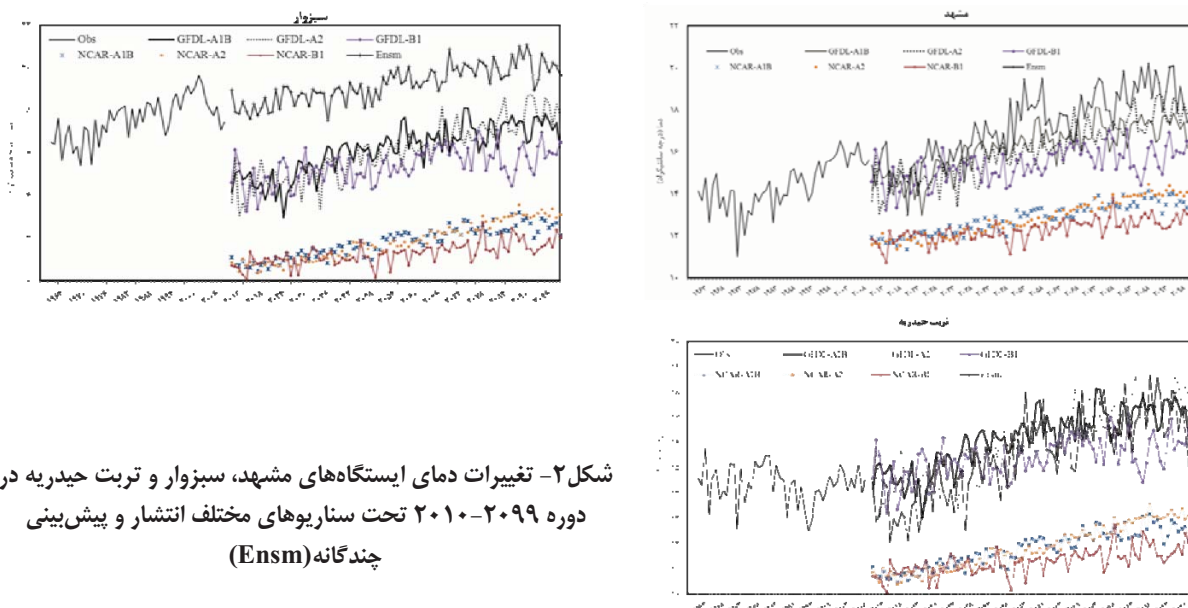
بیشترین افزایش فصلی بارش در ایستگاه تربت حیدریه با ۵/۱ میلی‌متر در دوره سوم مدل‌سازی رخ می‌دهد. نکته مهمی که در ارتباط با بارش فصلی قابل ذکر است افزایش بارش در تمام ایستگاه‌ها و دوره‌ها در فصل تابستان می‌باشد. این وضعیت اقلیمی همراه با

جدول ۴- تغییرات بارش^۱ (میلی‌متر) و دما (درجه سانتیگراد) در سه دوره ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ بر اساس مدل‌ها و سناریوهای مختلف

ایستگاه دوره	متغیر	مشهد			سبزوار			تربت حیدریه		
		۲۰۲۵	۲۰۵۵	۲۰۸۵	۲۰۲۵	۲۰۵۵	۲۰۸۵	۲۰۲۵	۲۰۵۵	۲۰۸۵
بهار	بارش	-۳/۹	-۹/۰	-۱۴/۶	+۱/۶	+۰/۳	-۷/۳	+۳/۷	-۲/۷	-۹/۹
	دما	۱/۰	۲/۳	۳/۶	۰/۵	۱/۶	۲/۴	۱/۵	۲/۹	۳/۷
تابستان	بارش	+۱/۴	+۱/۰	+۰/۳	+۰/۹	+۳/۸	+۰/۱	+۳/۶	+۴/۰	+۵/۱
	دما	۱/۰	۲/۳	۳/۹	-۰/۸	۱/۸	۲/۷	۳/۶	۴/۸	۵/۸
پاییز	بارش	-۰/۶	-۰/۱	+۳/۰	+۲/۱	+۲/۴	+۰/۳	+۲/۱	+۲/۹	+۴/۵
	دما	۱/۰	۲/۲	۳/۶	۰/۵	۱/۵	۲/۴	۰/۵	۱/۶	۲/۴
زمستان	بارش	+۰/۴	-۲/۶	-۵/۳	+۰/۶	-۰/۱	-۲/۸	+۲/۲	+۳/۴	-۱/۸
	دما	۱/۰	۱/۷	۲/۶	-۰/۹	۱/۵	۲/۱	۱/۷	۲/۳	۳/۱
میانگین سالانه	بارش	-۰/۷	-۲/۷	-۴/۲	+۱/۲	+۱/۶	-۲/۴	+۲/۹	+۱/۹	-۰/۵
	دما	۱/۰	۲/۱	۳/۳	۰/۷	۱/۶	۲/۴	۱/۷	۲/۸	۳/۶



شکل ۱- تغییرات بارش میانگین ماهانه و سالانه سه دوره ۲۰۲۵، ۲۰۸۵ و ۲۰۵۵ نسبت به دوره پایه



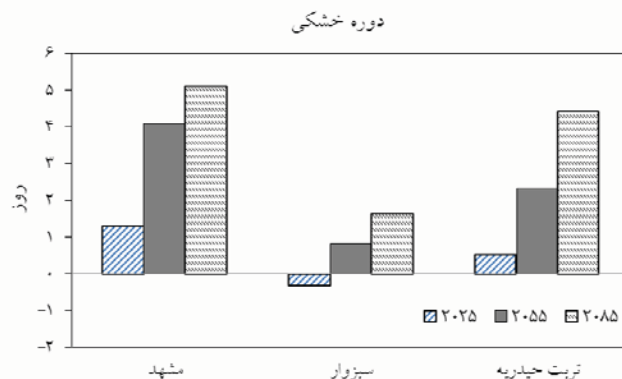
شکل ۲- تغییرات دمای ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار و پیش‌بینی چنگدانه (Ensm)

کمتر از تبخیر- تعرق بالقوه باشد، محاسبه می‌شود (۱۰). در این تحقیق میانگین تعداد روزهای خشک در سه دوره ۳۰ ساله آتی محاسبه و با مقادیر دوره آماری مقایسه گردید. در شکل ۳ تغییرات دوره خشکی در دوره‌های آینده نسبت به دوره مشاهداتی بر اساس میزان افزایش تعداد روزهای خشک ملاحظه می‌شود. بیشترین افزایش تعداد دوره خشکی در ایستگاه مشهد به تعداد ۵/۱ روز در دوره ۲۰۸۵ محاسبه گردید. در همین مدت، دوره خشکی در تربت حیدریه و سبزوار به ترتیب به تعداد ۴/۴ و ۱/۶ روز افزایش یافته است. تعداد روزهای دوره خشک به استثنای ایستگاه سبزوار در دوره ۲۰۲۵ که ۰/۳ روز کمتر شده است، در سایر ایستگاه‌ها و دوره‌ها افزایش یافته است. به طور کلی بیشترین مقدار در افزایش تعداد روزهای دوره خشک در مشهد و کمترین آن در ایستگاه سبزوار خواهد بود.

بر اساس شکل ۲ کمترین افزایش دمای سالانه در دهه ۲۰۲۵ و بیشترین افزایش در دهه ۲۰۸۵ رخ می‌دهد. میزان افزایش دما در انتهای قرن حاضر در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه به ترتیب بین ۳/۳، ۲/۴، و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. در طی این مدت بیشترین افزایش دما در تمامی ایستگاه‌ها در فصل تابستان رخ می‌دهد که بیشترین افزایش تابستانه دما در دوره ۲۰۸۵ ایستگاه تربت حیدریه به میزان ۵/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین کمترین افزایش دمای فصلی در بین تمامی ایستگاه‌ها در پاییز مدل‌سازی شده است.

طول دوره خشکی

طول دوره خشکی بر اساس تعداد روزهایی که میزان بارندگی



شکل ۳- تغییرات در تعداد روزهای دوره خشک ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در سه دوره ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵

طول دوره رشد

نمودار دوره رشد در طی دوره دیدبانی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ نیز آورده شده است. برای هر دوره پیش بینی، شش نمودار مختلف در یک شکل ترسیم شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مدل‌سازی‌های مدل گردش عمومی GFDL دارای آریبی نسبتاً زیادی در مقایسه با مدل NCAR بوده و دارای خطای بیشتری است. هر چند خطای مدل گردش عمومی GFDL نسبت به NCAR بیشتر است، اما توانمندی آن در آشکارسازی رفتار سری زمانی طول دوره رشد در تمامی ایستگاه‌ها و دوره‌ها نسبت به مدل NCAR بیشتر بوده و سهم بیشتری در متغیرهای مدل ریزگردانی دارد. دایره‌های توپر نتایج حاصل از اعمال روش ریزگردانی آماری چند متغیره می‌باشد. در شکل‌های مذکور میانگین طول دوره رشد شبیه سازی شده توسط سناریوهای مختلف نیز نشان داده شده است.

تبخیر- تعرق بالقوه

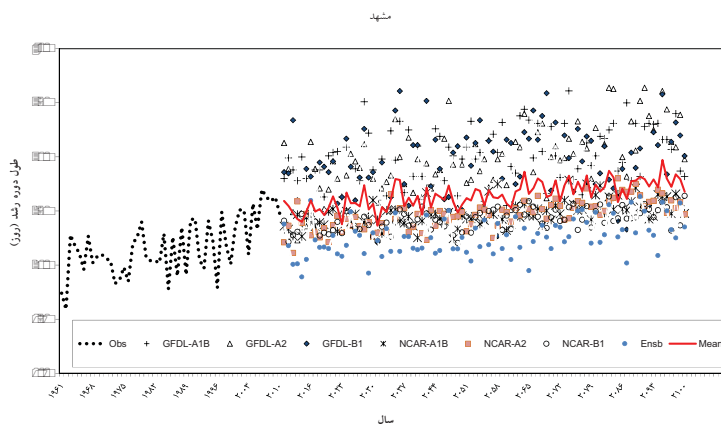
برای برآورد پتانسیل نیاز آبی، تبخیر- تعرق بالقوه در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه به روش هارگریوز- سامانی (معادله ۵) محاسبه گردید. برای این منظور از مدل مولد داده‌های هواشناسی LARS-WG5 برای ریزگردانی داده‌های دمایی کمینه و بیشینه روزانه استفاده شد. در شکل ۷ به ترتیب میزان افزایش میانگین تبخیر- تعرق ماهانه ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه بر حسب درصد تغییرات نسبت به دوره دیدبانی مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، میانگین سالانه افزایش تبخیر- تعرق بالقوه ایستگاه مشهد در دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۶، ۹/۹ و ۱۳/۴ درصد می‌باشد.

در جدول ۵ طول دوره رشد در سه ایستگاه مشهد، سبزوار و تربت حیدریه با دو مدل گردش عمومی GFDL و NCAR تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 آورده شده است. در دو ایستگاه مشهد و سبزوار طول دوره رشد در هر سه دوره و سه سناریو نسبت به دوره پایه بیشتر شده است. در ایستگاه تربت حیدریه طول دوره رشد در دو دوره اول شبیه‌سازی (۲۰۲۵ و ۲۰۵۵) نسبت به دوره پایه کاهش یافته است، اما در دوره ۲۰۸۵، همانند دو ایستگاه دیگر، دوره رشد افزایش را نشان می‌دهد. علت کاهش طول دوره رشد در تربت حیدریه در دوره‌های اولیه قرن ۲۱ می‌تواند به دلایل گوناگونی باشد. اول اینکه طول دوره رشد به طور مطلق تابعی از میانگین دما که مقدار آن برای قرن حاضر افزایشی پیش بینی شده است، نیست و به دو مقدار کم و بیش حدی یعنی دمایی آستانه صفر وابسته است که لزوماً بین رفتارهای حدی دما و میانگین آن ارتباط قوی نمی‌تواند وجود داشته باشد. دوم اینکه اقلیم ایستگاه تربت حیدریه با دو ایستگاه دیگر تفاوت‌های زیادی دارد. ضمن این که رفتار دهه ای طول دوره رشد در سه دوره آبی وجود روند افزایشی را تایید می‌کند. بیشترین افزایش در دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ به ترتیب به میزان ۳/۵، ۹/۵ و ۱۸/۷ روز در ایستگاه‌های سبزوار، تربت حیدریه و مشهد می‌باشد. کمترین افزایش طول دوره رشد در انتهای قرن حاضر در ایستگاه تربت حیدریه با ۸/۹ روز رخ می‌دهد. با کمی اغماض می‌توان گفت افزایش طول دوره رشد در دوره دوم ایستگاه سبزوار با میزان افزایش در دوره سوم ایستگاه تربت حیدریه برابر است. به طور کلی افزایش طول دوره رشد در مشهد بیشترین مقدار را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی دارد.

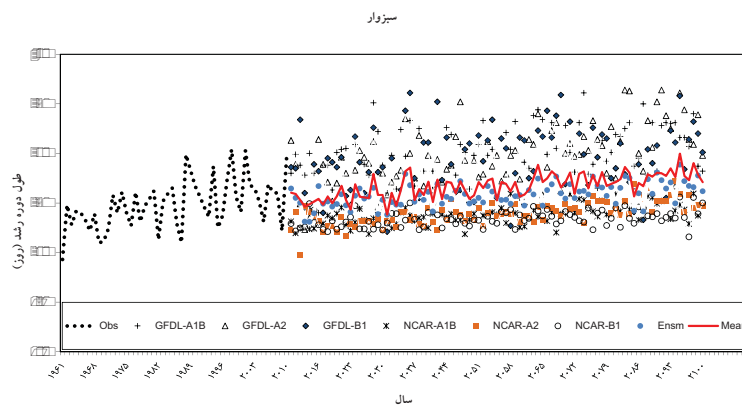
در شکل‌های ۴ تا ۶ تغییرات زمانی طول دوره رشد در سه ایستگاه مورد مطالعه نشان داده شده است. در هر یک از شکل‌های یاد شده،

جدول ۵- مدل‌سازی طول دوره رشد بر حسب روز توسط مدل‌های GFDL و NCAR تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 در دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ و مقایسه آن با دوره پایه

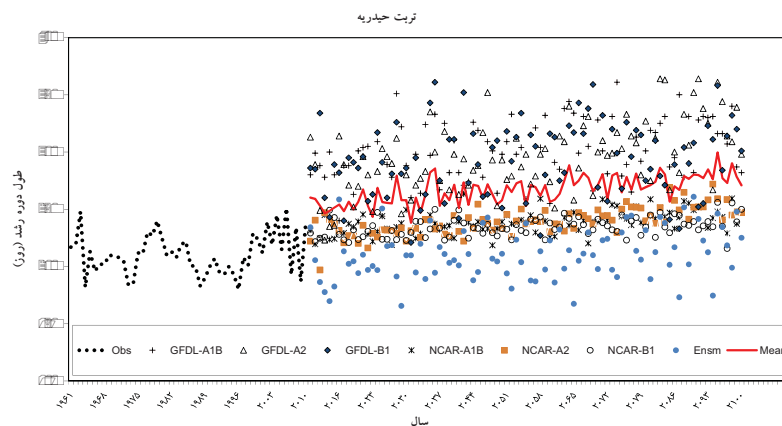
تغییرات	نتیجه ریزمقیاس	مدل NCAR			مدل GFDL			دوره	ایستگاه
		B1	A2	A1B	B1	A2	A1B		
۲/۱	۲۱۹/۸	۲۳۶/۲	۲۳۶/۷	۲۴۰/۸	۲۸۴/۱	۲۷۸/۶	۲۹۰/۳	۲۰۲۵	مشهد
۵/۷	۲۲۳/۴	۲۴۲/۷	۲۴۵/۰	۲۴۵/۳	۲۹۹/۸	۲۹۱/۹	۳۰۱/۸	۲۰۵۵	
۱۸/۷	۲۳۶/۴	۲۴۷/۵	۲۵۹/۲	۲۵۷/۱	۲۹۴/۵	۳۱۶/۸	۳۱۱/۴	۲۰۸۵	
۳/۵	۲۵۲/۲	۲۳۰/۴	۲۲۹/۹	۲۳۳/۰	۲۸۴/۱	۲۷۸/۶	۲۹۰/۳	۲۰۲۵	سبزوار
۹/۵	۲۵۸/۲	۲۳۴/۹	۲۳۸/۸	۲۳۳/۰	۲۹۹/۸	۲۹۱/۹	۳۰۱/۸	۲۰۵۵	
۱۶/۲	۲۶۴/۹	۲۳۷/۳	۲۵۰/۱	۲۴۵/۸	۲۹۴/۵	۳۱۶/۸	۳۱۱/۴	۲۰۸۵	
-۵/۱	۲۰۵/۶	۲۳۰/۴	۲۲۹/۸	۲۳۳/۰	۲۸۴/۱	۲۷۸/۶	۲۹۰/۳	۲۰۲۵	تربت حیدریه
-۲/۸	۲۰۷/۹	۲۳۴/۹	۲۳۸/۸	۲۳۷/۱	۲۹۹/۸	۲۹۱/۹	۳۰۱/۸	۲۰۵۵	
۸/۹	۲۱۹/۶	۲۳۷/۳	۲۵۰/۱	۲۴۵/۸	۲۹۴/۵	۳۱۶/۸	۳۱۱/۴	۲۰۸۵	



شکل ۴- تغییرات طول دوره رشد ایستگاه مشهد در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ تحت سناریوهای مختلف و دوره دیدبانی (۲۰۱۰-۱۹۶۱). دایره‌های کوچک توپر، پیش بینی ریزگردانی شده را نشان می دهد.



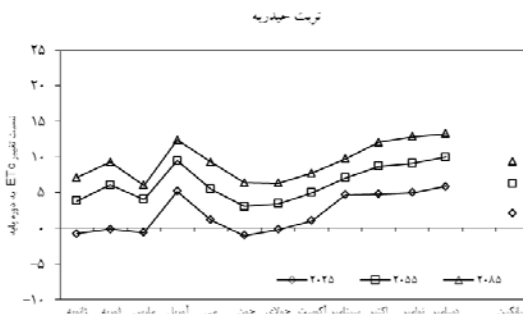
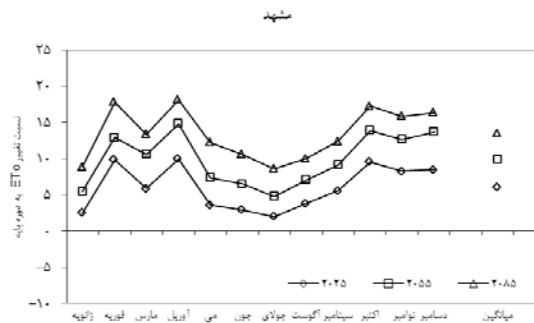
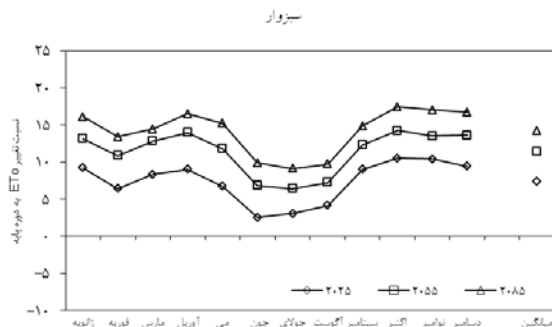
شکل ۵- تغییرات طول دوره رشد ایستگاه سبزوار در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ تحت سناریوهای مختلف و دوره دیدبانی (۲۰۱۰-۱۹۶۱). دایره‌های کوچک توپر، پیش بینی ریزگردانی شده را نشان می دهد.



شکل ۶- تغییرات طول دوره رشد ایستگاه تربت حیدریه در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ تحت سناریوهای مختلف و دوره دیدبانی (۲۰۱۰-۱۹۶۱). دایره‌های کوچک توپر، پیش بینی ریزگردانی شده را نشان می دهد.

تعرق در فصل تابستان (نسبت به دوره پایه) محاسبه گردید. همانطور که در شکل دیده می‌شود میزان افزایش تبخیر- تعرق در ایستگاه مشهد از اواخر بهار تا اوایل پاییز نرخ رشد کمتری در مقایسه با سایر فصول دارد.

بیشترین افزایش ماهانه تبخیر- تعرق در سه دوره مورد مطالعه در ماه آوریل رخ داده است که مقادیر آن به ترتیب ۹/۹، ۱۴/۸ و ۱۸/۱ درصد می‌باشد. به طور کلی در ایستگاه مشهد تبخیر- تعرق در فصول بهار و پاییز از سایر فصول بیشتر است. کمترین میزان افزایش تبخیر-



شکل ۷- تغییرات تبخیر- تعرق بالقوه در دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ نسبت به مقادیر دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) سه ایستگاه مشهد، تربت حیدریه و سبزوار

دوره خشکی، طول دوره رشد و تبخیر- تعرق بالقوه محاسبه شدند. دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و دوره مدل‌سازی آینده ۲۰۹۹-۲۰۱۰ با سه بازه زمانی سی ساله ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ در نظر گرفته شدند. توانمندی مدل‌سازی با استفاده از دیاگرام ارزش‌دهی بریر، همبستگی و ضرایب وزنی نشان دادند که در بین مدل‌ها و سناریوهای مختلف مورد استفاده در این تحقیق، مدل GFDL با سناریوی AIB هماهنگی بیشتری با داده‌های دیدبانی دارد و از توانمندی بیشتری برخوردار است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که بطور کلی میانگین دما در سه ایستگاه مورد مطالعه بین ۲/۴ تا ۳/۶ درجه سانتی‌گراد تا انتهای قرن حاضر افزایش خواهد یافت. با توجه به مطالعات انجام شده در سطح جهان، اکثر مدل‌های اقلیمی برای نیمکره شمالی افزایش دما را تایید می‌کنند. نتایج حاصل از پژوهش‌های صورت گرفته توسط هیات بین‌الدول تغییر اقلیم نیز برای سال ۲۰۶۰ افزایش دما را حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و برای سال ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۵ درجه سانتی‌گراد را پیش‌بینی نموده‌اند. نتایج پژوهش ساندرز (۳۴) نیز تایید می‌کند که بر خلاف دما، تغییرات بارش در مدل‌ها، سناریوها و دوره‌های مختلف متفاوت است. به عبارتی تغییر در الگوی بارش یکی از بارزترین پدیده‌های تغییر اقلیم است و میزان این تغییرات بسته عرض‌های جغرافیایی مختلف متفاوت خواهد بود. بر اساس پیش‌بینی مدل‌های مختلف افزایش بارش در تمامی عرض‌ها، به جز عرض‌های میانی دیده خواهد شد. در این عرض‌ها با افزایش دما میزان تبخیر افزایش یافته و در نتیجه کاهش رطوبت خاک برای اکثر این مناطق رخ خواهد داد (۲۷).

این وضعیت با پیش‌بینی افزایش بارندگی تابستانه هماهنگی دارد. در ایستگاه سبزوار بیشترین افزایش تبخیر- تعرق در دهه‌های آینده برای فصل پاییز پیش‌بینی شده است. میانگین افزایش تبخیر- تعرق در دوره ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) به ترتیب ۱۴/۲، ۱۱/۴ و ۷/۴ درصد خواهد بود؛ این در حالی است که در دوره ۲۰۸۵ تبخیر- تعرق میانگین تا ۱۷/۵ درصد در فصل پاییز افزایش خواهد یافت. در ایستگاه تربت حیدریه میانگین افزایش تبخیر- تعرق در مقایسه با دو ایستگاه دیگر کمتر بوده، به نحوی که میزان افزایش آن در سه دوره مورد مطالعه به ترتیب ۹/۳، ۶/۳ و ۲/۱ درصد خواهد بود. بنابراین می‌توان گفت نیاز آبی بالقوه ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در انتهای قرن حاضر در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ به ترتیب ۱۳/۴، ۱۴/۲ و ۹/۳ درصد افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

با توجه به تاثیرگذاری متغیرهای اقلیمی بر رشد و تولید گیاهان زراعی، در این تحقیق اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی سه ایستگاه مشهد، سبزوار و تربت حیدریه با استفاده از پروتکل مدل‌های گردش عمومی NCAR و GFDL تحت سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی با توجه به ارتباط شاخص‌های اقلیمی کشاورزی به بارش و دما، در ابتدا مقادیر بارش و دمای سه ایستگاه مذکور با به کارگیری روش‌های ریزگردانی مدل‌سازی گردیدند، سپس شاخص‌های اقلیمی کشاورزی شامل طول

ایستگاه سبزوار و کمترین آن در ایستگاه مشهد می‌باشد. نکته حائز اهمیت کاهش تبخیر- تعرق بالقوه فصلی ایستگاه تربت حیدریه در بهار و انتهای فصل زمستان طی اولین دوره شبیه‌سازی (۲۰۲۵) می‌باشد، اما در این ایستگاه در دو دوره بعدی تبخیر- تعرق بالقوه ۶ و ۹ درصد افزایش یافته است. در سه ایستگاه مورد بررسی بیشترین افزایش نیاز آبی بالقوه در فصول پاییز، بهار و زمستان خواهد بود که این امر در مورد نیاز آبی محصولاتی چون کلزا، پنبه، چغندر قند، گندم، جو و ... تاثیر گذار خواهد بود. علیرزاده (۹) نیز با استفاده از ریزمقیاس گردانی آماری برون داد مدل HadCM3 توسط مدل ASD^۱ در حوضه کشف رود با استفاده از داده های دما و بارش ایستگاه مشهد، تبخیر - تعرق گیاهان الگوی کشت این حوضه را محاسبه و برای دوره های مختلف مورد مقایسه قرار داد. نتایج پژوهش نامبرده نشان داد که میزان تبخیر- تعرق برای تمامی ماه ها و دوره ها تحت تاثیر دما افزایش خواهد یافت بطوریکه با افزایش دمای هوا به میزان ۱، ۲ و ۴ درجه سانتی گراد، نیاز آبی الگوی کشت گیاهان در این دشت به میزان ۶، ۱۰ و ۱۶ درصد افزایش خواهد یافت که نتایج تحقیق حاضر را تایید می کند.

به طور کلی یافته های این تحقیق نشان می دهد که نیاز آبی بالقوه در ایستگاه های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در انتهای دوره مورد بررسی به ترتیب به میزان ۱۳/۴، ۱۴/۲ و ۹/۳ درصد افزایش می یابد که لزوم برنامه ریزی برای مدیریت صحیح منابع آبی، اصلاح الگوی کشت و روش های آبیاری نوین برای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم را ایجاب می نماید.

یافته های این پژوهش نیز هماهنگ با نتایج اغلب مطالعات دیگر نشان می دهد که همه مدل ها با کاهش میانگین سالانه بارش در هر سه ایستگاه مذکور در ۳۰ سال آخر قرن حاضر هماهنگی دارند. علیرغم سهم اندک بارش های تابستانه در بارش سالانه سه ایستگاه یادشده، تمامی مدل ها افزایش بارش های تابستانه را در هر سه دوره تایید می کنند. این وضعیت اقلیمی احتمال وقوع بارش های سنگین تابستانه را افزایش خواهد داد. علاوه بر آن میانگین رطوبت نیز در این فصل افزایش می یابد. در همین راستا رجب (۳۱) نیز در نتایج خود نشان داد که مقدار بارش در استان خراسان نسبت به شرایط فعلی ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش خواهد یافت. تحقیق حاضر نشان می دهد که در دوره ها و ایستگاه های مورد بررسی، طول دوره خشکی افزایش می یابد که بیشترین افزایش در ایستگاه مشهد به تعداد ۵/۱ روز در دوره ۲۰۸۵ خواهد بود. در همین مدت، دوره خشکی در تربت حیدریه و سبزوار به ترتیب به تعداد ۴/۴ و ۱/۶ روز افزایش می یابد. طول دوره رشد نیز به استثنای دوره های اول و دوم ایستگاه تربت حیدریه، در تمامی دوره ها و ایستگاه ها افزایش می یابد که بیشترین افزایش در مشهد به تعداد ۱۸/۷ روز در دوره سوم (۲۰۸۵) رخ خواهد داد. در تمامی ایستگاه ها بیشترین افزایش طول دوره رشد در دوره سوم شبیه سازی خواهد بود. رجب (۳۱) نیز در تحقیق خود در منطقه خاورمیانه به افزایش دما حدود ۲/۵ تا ۲/۷۵ درجه سانتی گراد و افزایش طول دوره رشد گیاهان اشاره می کند. شبیه سازی تبخیر- تعرق بالقوه در سه ایستگاه مذکور نشان می دهد که مجموع تبخیر- تعرق سالانه بین ۳ درصد در دوره ۲۰۲۵ و تا ۱۳/۵ درصد در دوره ۲۰۸۵ افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش تبخیر- تعرق در

منابع

- ۱- اسماعیلی ر، حبیبی نوخندان م، و فلاح قاله‌ری غ. ۱۳۸۹. ارزیابی تغییرات طول دوره رشد و یخبندان ناشی از نوسانات اقلیمی - مطالعه موردی: خراسان رضوی، پژوهش های جغرافیای طبیعی ۷۳:۸۲-۶۹.
- ۲- بابائیان ا، نجفی نیک ز، زابل عباسی ف، حبیبی نوخندان م، ادب ح. و ملبوسی ش. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده های گردش عمومی جو ECHO-G، جغرافیا و توسعه ۱۶:۱۵۲-۱۳۵.
- ۳- سلطانی ا. و قلی پور م. ۱۳۸۵. شبیه سازی اثر تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد و مصرف آب نخود، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۷۹(۲):۶۹-۱۳.
- ۴- شاه کرمی ن، مرید س، مساح بوانی ع. و فهیمی ه. ۱۳۸۷. تاثیر عدم قطعیت مدل های AOGCM بر ریسک تغییر در نیاز آبی محصولات کشاورزی در اثر پدیده تغییر اقلیم در شبکه های آبیاری زاینده رود، مجله آبیاری و زهکشی ایران ۲(۲): ۱-۱۰.
- ۵- شریفی ح، زند ا. و کمالی غ. ۱۳۸۰. شبیه سازی رشد، فنولوژی و تولید ارقام گندم در اثر تغییر اقلیم در شرایط مشهد، بیابان، (۶) ۲: ۱۸۰-۱۶۹.
- ۶- صداقت کردار ع. و رحیم زاده ف. ۱۳۸۶. تغییرات طول دوره رشد گیاهی در نیمه دوم قرن بیستم در کشور، پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی ۷۵: ۱۹۳-۱۸۲.
- ۷- علیرزاده ا. ۱۳۷۸. رابطه آب و خاک و گیاه، انتشارات دانشگاه امام رضا(ع)، ۳۵۵ صفحه.

- ۸- عزیززاده ا. و کمالی غ. ۱۳۸۱. اثرات تغییر اقلیم بر مصرف آب کشاورزی در دشت مشهد، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی ۶۶-۶۵: ۱۱۳۵۲-۱۱۳۶۴.
- ۹- عزیززاده ا.، سیاری ن.، حسامی کرمانی م.، بنایان اول م. و فریدحسینی ع. ۱۳۸۹. بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیمی بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشف رود)، آب و خاک ۴(۲۴): ۸۳۵-۸۱۵.
- ۱۰- کوچکی ع. و نصیری محلاتی م. ۱۳۷۰. اکولوژی گیاهان زراعی: روابط گیاهان و محیط، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.
- ۱۱- مساح بوانی ع. و فهیمی ه. ۱۳۸۷. تاثیر عدم قطعیت مدل های AOGCM بر ریسک تغییر در نیاز آبی محصولات کشاورزی در اثر پدیده تغییر اقلیم در شبکه های آبیاری زاینده رود، مجله آبیاری و زهکشی ایران (۲) ۲: ۱۰-۱.
- ۱۲- نصیری محلاتی م. و کوچکی ع. ۱۳۸۵. آنالیز شاخص‌های آگروکلیماتیک ایران در شرایط تغییر اقلیم، پژوهش های زراعی ایران، (۱) ۴: ۱۸۲-۱۶۹.
- ۱۳- نصیری محلاتی م. و کوچکی ع. ۱۳۸۴. اثر تغییر اقلیم بر شاخص های آگروکلیماتیک مناطق کشت گندم دیم در ایران، مجله پژوهش های زراعی ایران، (۳) ۲: ۳۰۳-۲۹۱.
- 14- Babaei Kafki S., Mataji A., and Hashemi S.A. 2009. Monitoring Growing Season Length of Deciduous Broad Leaf Forest Derived From Satellite Data in Iran, *American Journal of Environmental Sciences*, 5:647-652.
- 15- Challinor A.J., Wheeler T.R., Craufurd P.Q., Ferro C.A.T., and Stephenson D.B. 2007. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures, *Agr. Ecosyst. Environ.* 119: 190–204.
- 16- Espasafor M., Lorite I.J., Gavilan P., and Berengena J. 2011. An Analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain, *Agricultural water Management*, 98:1045-1061.
- 17- Fitter A.H., and Fitter R.S.R. 2002. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, Vol. 296: 1689-1691.
- 18- Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Heylock M., Klein Tank A.M.G., and Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century. *Climate research*, Vol. 19: 193-212.
- 19- Guiteras R. 2007. The impact of climate change on Indian agriculture, Job market paper-Draft, Department of Economics, MIT, 52p.
- 20- Ho C.H., Lee E.J., Lee I., and Kim W. 2006. Earlier spring in Seoul, Korea, *International Journal of Climatology*, Vol. 22:1727-1738.
- 21- IPCC. 2007. Climate Change, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- 22- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. Meeting Report IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections, National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA. 115 p.
- 23- Keeling C.D., Chin J.F.S., and Whorf T.P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements, *Nature*, Vol. 382, 146-149.
- 24- Laux P., Jackel G., Tingem R.M., and Kunstmann H. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon-A method to improve attainable crop yield planting date adaptation, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.150:1258-1271.
- 25- Linderholm H.W. 2006. Growing season changes in the last century, *Agriculture and Forest Meteorology*, Vol. 137: 1-14.
- 26- Lobel D.B., and Burke M.B. 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation, *Environmental Research Letter*, Vol.3:1-8.
- 27- Meehl G.A., Gent P., Arblaster J.M., Otto-Bliesner Brady E., and Craig A. 2000. Factors that affect amplitude of El Nino in global climate models, *Climate Dynamics* 17(7):515-526.
- 28- Menzel A., Estrella N., and Fabian P. 2001. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global change biology*, Vol. 7, pp657-666.
- 29- Moonen A.C., Ercoli L., Mariotti M., and Masoni A. 2002. Climate Change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years, *Agricultural and Forest Meteo.*, 11:13-27.
- 30- Palmer T.N., Brankovic C., and Richardson D.S. 2000. A probability and decision model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integration, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 126: 2013-2033.
- 31- Rajab R. 2000. Climate change and Water resources management in the arid region, Institute of Hydrology-NCAR,

- Wallingford, Oxon, UK.
- 32- Robeson S.M. 2002. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change*, Vol 52: 219-238.
 - 33- Rotter R., and Geijn S.C. 1999. Climate change effects on plant growth and crop yield, *Journal of climate change*, Vol. 43: 651-681.
 - 34- Saunders M.A. 1998. *Global Warning: the view in 1998*. Baneld Grieg Hazard Research Center Report, University College London.
 - 35- Sparks T.H., Croxton P.J., Collinson N., and Taylor P.W. 2005. Examples of phenological change, past and present, in UK farming. *Annual Applied Biology*, Vol. 146: 531-537.
 - 36- Tingem M., Rivington M., Azam Ali S.N., and Colls J.J. 2008. Climate variability and maize production in Cameroon: simulating the effects of extreme dry and wet years, *Singapore Journal of Tropical Geography*. Vol. 29: 357-370.

Agroclimatic Indices Assessment over Some Selected Weather Stations of Khorasan Razavi Province Under Climate Change Scenarios

I. Babaeian^{1*} - M. Kouhi²

Received: 13-8-2011

Accepted: 13-5-2012

Abstract

Study of the climate change impacts on agricultural products and agro-climatic variables can improve the management strategies regarding to the agricultural demands in future decades and climate change mitigations in agriculture sector as well. Impacts of climate change on agro-climatic variables of Mashhad, Sabzevar and Torbat-e-heydariyeh including precipitation, temperature, Length of dry season, growing period and potential evapotranspiration under IPCC A1B, A2 and B1 emission scenarios has been studied using NCAR-PCM and GFDL-CM2.1 in the periods of 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099. Uncertainty of each models are investigated. Statistical downscaling has been done using two different methods of multiple regressions for monthly to yearly time scales and stochastic weather generator of LARS-WG 5 for producing daily data. We used daily data for calculating daily potential evapotranspiration by using Hargrivi-Samani method. Results show that mean amount of growing period has been increased by 18.6 days in the period of 2070-2099 in all three stations. Growing period is increased both in 2010-2039 and 2040-2069 in Mashhad and Sabzevar, but it has decreased in Torbat-e- Heydariyeh in the same period. Precipitation change has no significant change in future decades in the stations under study, but mean annual precipitation of Mashhad, Sabzevar and Torbat-e- Heydariyeh will be decreased by 5.0, 2.8 and 2.6 mm per year in the period of 2070-2099. Results also indicated that mean amount of evapotranspiration in Mashhad, Sabzevar and Torbat-e- Heydariyeh will be decreased by 13.5%, 16.5% and 14% in 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, respectively.

Keywords: Climate change, General circulation models, Length of dry season, Growing period, Potential evapotranspiration, Emission scenarios, Uncertainty

1,2- PhD of Climatology and MSc Student of Agrometeorology, Ferdowsi University of Mashhad, Applied Climatology Division, Climatological Research Institute
(*-Corresponding Author Email: ibabaeian@yahoo.com)