

بررسی مهارت مدل RegCM در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در اقلیم گذشته و دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵، بررسی موردی: ایستگاه مشهد

نوذر قهرمان^{۱*}، ایمان بابائیان^۲ و مینا موسوی^۱

^۱ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران
^۲ پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۳)

چکیده

برآورد تبخیر تعرق یک نیاز بنیادی در اجرای مدل‌های اقلیمی به‌ویژه در بخش محاسبه شارهای سطحی است. در سال‌های اخیر با توسعه مدل‌های اقلیمی جهانی و منطقه‌ای امکان پیش‌بینی‌های بلندمدت اقلیمی و برآورد برای این کمیت در اقلیم آتی بیشتر فراهم شده است. در این پژوهش، توانایی نسخه ۳ مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM در برآورد میزان تبخیر تعرق پتانسیل در اقلیم گذشته یا دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵) و چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵) در ایستگاه مشهد ارزیابی شده است. برای اعمال شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز اجرای مدل RegCM، از خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس EH50M استفاده شد. به علت نبود دسترسی به داده‌های شرایط مرزی سناریوهای گسیل متفاوت، پیش‌بینی مقدار تبخیر تعرق در دوره آینده، با فرض سناریوی گسیل A1B (تأکید این سناریو بر استفاده متعادل از انواع منابع انرژی در دوره‌های آینده است) صورت گرفت. توان تفکیک مکانی مدل برابر با ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. به علت نبود دسترسی به داده‌های واقعی تبخیر تعرق پتانسیل در منطقه، تبخیر تعرق تجربی محاسبه شده به روش پنمن-مانتیت برای صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های مدل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که مدل RegCM بدون اعمال پس‌پردازش، توانایی لازم در برآورد مقدار تبخیر تعرق را نخواهد داشت؛ اما پس از اعمال پس‌پردازش به روش وایزش چندمتغیره، نتایج تا حد مطلوبی به مقدار برآورد شده با معادله پنمن-مانتیت نزدیک شد. براساس یافته‌های این تحقیق، میانگین تبخیر تعرق سالانه در دوره پایه برابر با ۹۲۴ میلی‌متر و در چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵) برابر با ۱۰۷۵ میلی‌متر است که به‌طور متوسط ۱۶/۳۴٪ افزایش را پیش‌بینی می‌کند. به‌طور کلی میانگین تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های آوریل، مه، ژوئن، اوت، سپتامبر و اکتبر نسبت به دوره پایه افزایش و در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئیه، نوامبر و دسامبر کاهش یافته است. در ماه مارس تفاوت ایجاد شده در محدوده خطای مدل‌سازی است. بیشینه تبخیر تعرق در دوره پایه در ماه ژوئیه و در چشم‌انداز آینده در ماه ژوئن اتفاق افتاده است. یافته‌های این تحقیق را می‌توان در برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری و الگوی کشت در منطقه مورد توجه قرار داد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق پتانسیل، ریزمقیاس‌نمایی، مدل RegCM، پس‌پردازش، چشم‌انداز آینده

Evaluation of the RegCM regional model in estimating potential evapotranspiration during the past climate and the period of 2021-2035: Case study of Mashhad

Nozar Ghahreman^{1*}, Iman Babaeian² and Mina Mousavi¹

¹Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

²National Institute of Climatology, Mashhad, Iran

(Received: 25 July 2012, accepted: 25 August 2014)

Summary

An accurate estimation of evapotranspiration is a key issue in running climate models, especially for the calculation of surface fluxes. In recent years, by development of global and regional climate models, long-term predictions of weather parameters affecting evapotranspiration have been done more easily. The ability of the RegCM regional climate model (Version 3) in simulating the potential evapotranspiration over Mashhad in Northeastern Iran was evaluated during the base period of 1961 to 1985 and the future period of 2021-2035. Due to lack of a measured amount of evapotranspiration, the Penman-Montith (P-M) equation was chosen to estimate actual values of ET in the base period. For initialization of the RegCM3 model, boundary conditions from EH50M General Circulation Model (GCM) were used as initial and boundary conditions to feed the RegCM3 regional model. Future predictions of evapotranspiration were done under A1B emission scenario. A horizontal resolution of 50 km was considered for the model. Based on the assumed conditions in running the model, the results showed that the non-post-processed RegCM model outputs cannot be used for the estimation of potential evapotranspiration. However, after post processing using multivariate regression, results were closer to those calculated by P-M equation. Temperature and radiation parameters were considered as independent variables in the multiple regression models to perform post-processing. Our results showed that the mean annual evapotranspiration in the future period (1075 mm) will be increased by 16.34%, compared to the base period (924 mm). On the whole, the average potential evapotranspiration will be increased in April, May, June, August, September and October, while it will be decreased in January, February, July, November and December, compared to the base period. The outcomes of the present study reveal that the maximum evapotranspiration in the future period will be in June, while in the base period the maximum amount of evapotranspiration occurs in July.

Keywords: Potential evapotranspiration, RegCM model, downscaling, post-processing, future period

۱ مقدمه

گوناگون کره زمین با استفاده از این مدل صورت گرفته است. در هر کدام از این تحقیقات، جنبه‌های متفاوتی از فیزیک مدل بررسی شده است. مدیران و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی موردی بارش‌های تابستانه سال ۱۹۹۵ نشان دادند که شبیه‌سازی بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران با استفاده از طرحواره امانوئل، پاسخ بهتری در مقایسه با سایر طرحواره‌های بارش همرفتی دارد. بابائیان و همکاران (۱۳۸۶) حساسیت مدل RegCM را با طرحواره‌های بارش همرفتی طی دو فصل متفاوت بررسی کردند: زمستان ۱۳۷۶ به منزله زمستان نسبتاً خشک و زمستان ۱۳۷۹ در حکم فصل به نسبت پربارش. در بررسی آنها، تفاوت‌های اساسی بین بارش و دمای مدل با داده‌های واقعی و (Climate Research Unit) CRU آشکار شد.

مدل‌های بزرگ‌مقیاس گردش کلی جو، معتبرترین ابزار برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده هستند. برای استفاده کاربردی از خروجی این مدل‌ها نیاز به اجرای فرایند ریزمقیاس‌نمایی است. از دهه ۱۹۸۰ مدل‌های اقلیمی - منطقه‌ای برای عرضه پیش‌بینی‌های فصلی، شناسایی رفتار اقلیم منطقه‌ای، بررسی‌های واسنجی مدل‌ها و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش کلی جو مورد استفاده قرار گرفته است. مدل RegCM یکی از متداول‌ترین مدل‌های منطقه‌ای است که در بررسی‌های اقلیمی و ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی خروجی مدل‌های گردشی کلی جو مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه مدل‌سازی رفتار اقلیم مناطق

در این تحقیق مشخص شد که مدل به‌خوبی از عهده شبیه‌سازی تغییرات مشاهده شده سطح دریای خزر در مقیاس سالانه تا دهه‌ای بر می‌آید و ضریب همبستگی بین تغییرات واقعی ارتفاع سطح دریای خزر با مقادیر مدل شده ۰/۹۱ به‌دست آمد. پال و همکاران (۲۰۰۷) توانمندی مدل اقلیمی RegCM را در شبیه‌سازی بارش و دمای دوره ۱۹۸۷-۲۰۰۰ در دو منطقه هندوستان و امریکای جنوبی (آمازون) مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که به کارگیری طرحواره گرل در منطقه امریکای جنوبی، موجب آریبی منفی بارش به میزان ۱۰ درصد در مقایسه با داده‌های مدل CMAP می‌شود، اما مدل می‌تواند الگوهای بارش این منطقه شامل هسته‌های بارشی بیشینه و کمینه را به‌خوبی مدل‌سازی کند. سناتور و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از خروجی سه مدل RegCM و HIRLAM و COSMO-CLM، مدل آب‌شناختی In-STRHyM را توسعه دادند. نتایج به‌دست آمده آنان نشان داد که با افزایش دما بین ۳/۵ تا ۳/۹ و کاهش بارندگی سالانه به میزان ۹ تا ۲۱٪ مقدار کنونی، مقدار برف سالانه بین ۸۰٪ تا ۹۲٪ کاهش خواهد یافت.

تبخیر تعرق از مهم‌ترین پارامترهای مورد توجه بخش کشاورزی است که تحت تأثیر متغیرهای گوناگونی نظیر دما، تابش، سرعت باد و مانند آن قرار می‌گیرد. تغییر در هر کدام از این پارامترها، مقدار تبخیر تعرق را نیز تغییر خواهد داد. مسئله پیچیدگی تبخیر تعرق از یک سو و زمان‌بر و پرهزینه بودن کار با مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی از سوی دیگر باعث شده است تا توانمندی این دسته از مدل‌ها برای مدل‌سازی تبخیر تعرق، کمتر مورد بررسی قرار بگیرد. لذا هدف از تحقیق حاضر، بررسی مهارت مدل RegCM در اقلیم گذشته و مدل‌سازی تبخیر تعرق ماهانه با در نظر گرفتن وقوع پدیده تغییر اقلیم تحت سناریوی A1B در دوره آتی، در ایستگاه همدیدی مشهد (معرف دشت مشهد) است.

همچنین مشخص شد که طرحواره گرل در مقایسه با سایر طرحواره‌ها توانمندی خوبی برای شبیه‌سازی بارش در کل کشور دارد. سلطانزاده و همکاران (۱۳۸۶) نشان دادند که با حذف رشته‌کوه زاگرس در مدل RegCM3، میانگین بارش در مناطق مرکزی و شرق ایران افزایش می‌یابد، ولی میزان بارش در کل محدوده شبیه‌سازی شده تقریباً ثابت می‌ماند. ایران‌نژاد و همکاران (۱۳۸۸) نقش روش‌های پارامترسازی همرفت در شبیه‌سازی میدان‌های دما و بارش زمستانی در ایران را با استفاده از مدل منطقه‌ای-اقلیمی RegCM بررسی کردند. شبیه‌سازی آنها برای دوره دسامبر ۱۹۹۸ تا مارس ۱۹۹۹ صورت گرفت. در تحقیق آنها چهار طرحواره آراکاوا-شوبرت، فریچ-چپل، بتس‌میلر و کو-آتس اجرا شده است. شبیه‌سازی‌های حاصل با یکدیگر و با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. نتایج روشن ساخت که شبیه‌سازی‌های دما و بارش با استفاده از طرحواره‌های متفاوت همرفت در دوره تحقیقاتی، شبیه به یکدیگر است و توان مدل RegCM برای میدان دما، بیشتر از بارش است. ونگ و همکاران (۲۰۰۲) بارش‌های سیل‌آسای تابستان سال ۱۹۹۸ چین را با استفاده از مدل RegCM شبیه‌سازی کردند و به مقایسه نتایج آن با داده‌های دیده‌بانی شده پرداختند. بیشترین خطای شبیه‌سازی بارش در سه ماه می، ژوئن و ژوئیه مربوط به ماه می با ۴۴ درصد آریبی مثبت در جنوب چین، ۲۰ درصد در حوضه رودخانه یانگ‌تسه و ۶۴ درصد در شمال چین محاسبه شد. همچنین مدل توانست روندهای دمای بیشینه و کمینه را در سه منطقه پیش‌گفته شبیه‌سازی کند، اما نتایج تا ۲ درجه سلسیوس دارای آریبی منفی (سرد) بود. الگاندی و جورجی (۲۰۰۶)، شبیه‌سازی‌هایی را با استفاده از مدل RegCM برای دوره ۱۹۴۸-۱۹۹۰ به منظور بررسی واکنش سطح دریای خزر به تغییرات اقلیمی عملی ساختند. آنها تغییرات ارتفاع سطح دریای خزر را با استفاده از یک معادله ساده آب‌شناختی پیش‌بینی کردند.

۲ روش تحقیق

ایستگاه تحقیقاتی این تحقیق، مشهد است که تنها ایستگاه برخوردار از بضاعت آماری کافی به منظور این بررسی در حوزه آبریز کشف رود در شمال شرق کشور است که در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۶۳ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۶ شمالی قرار دارد. ارتفاع این ایستگاه ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا است. شهر مشهد به علت موقعیت جغرافیایی خاص، که در منطقه مرزی بین شمال و جنوب خراسان قرار دارد و همچنین تداخل جبهه‌های گوناگون وضع هوا، دارای خصوصیات ویژه اقلیمی است (علیزاده، ۱۳۸۷). به منظور ارزیابی مهارت مدل RegCM در برآورد تبخیر تعرق در این ایستگاه یک دوره ۲۵ ساله (۱۹۶۱-۱۹۸۵) در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روابط حاصل در این دوره، میزان تبخیر تعرق در چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵) پیش‌بینی شد. علاوه بر نتایج حاصل از مدل RegCM، به پارامتر تبخیر تعرق اندازه‌گیری شده در ایستگاه برای واسنجی خروجی‌های مدل نیاز است. روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم (محاسباتی) تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم در واقع بخش کوچک و کنترل‌شده‌ای از مزرعه مجزا، و میزان تبخیر تعرق در یک دوره زمانی، مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. به این بخش کوچک که ارتباط رطوبتی با خاک اطراف ندارد لایسمتر گویند. با توجه به تأثیر عوامل گوناگون در تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع، هزینه‌های زیاد نصب و استفاده از لایسمتر، اندازه‌گیری دقیق این پارامتر به روش مستقیم اگر غیرممکن نباشد، کار بسیار مشکلی است. در روش‌های غیرمستقیم از عوامل گوناگون اقلیمی و گیاهی استفاده می‌شود و از راه ارتباط آنها با تبخیر تعرق و معادلاتی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، میزان تبخیر تعرق گیاه مرجع برآورد می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۳). روش پنمن-

مانیت را که در معادله (۱) آورده شده است، مانیت در ۱۹۸۶ عرضه کرد. استفاده از این روش به این سبب که در برآورد تبخیر تعرق مرجع در شرایط اقلیمی گوناگون نتایج قابل‌قبولی می‌دهد، برای اکثر مناطق دنیا توصیه شده است. معادله این روش عبارت است از:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که ET_0 = تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین (ms^{-1})، $(e_a - e_d)$ = فشار کاستی بخار آب در ارتفاع ۲ متر (KPa) ، Δ = شیب فشار بخار ($KPa^{\circ}C^{-1}$)، G = شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$)، γ = ضریب رطوبتی ($KPa^{\circ}C^{-1}$) است.

داده‌های مورد نیاز برای فرمول پنمن-مانیت عبارت‌اند از متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین، فشار کاستی بخار آب، تابش خالص در سطح پوشش گیاهی، شیب فشار بخار، شار گرما به داخل خاک و ضریب رطوبتی. اغلب این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور قابل دریافت است و در غیر این صورت می‌توان آنها را مطابق روابط پیشنهادی در نشریه ۵۶ فائو محاسبه کرد.

داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل RegCM در این تحقیق، شامل خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس EH5OM برای تعیین شرایط مرزی و اولیه، داده‌های GTOPO مربوط به پستی و بلندی و پوشش سطح زمین و داده‌های مدل بزرگ‌مقیاس EH5RF مربوط به دمای سطح دریا برای دوره اقلیمی پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵) و EHA1B برای دوره آینده است. این داده‌ها از وبگاه مرکز ICTP قابل بارگیری است. با استفاده از این داده‌ها مدل در شبکه 50×50 کیلومتر، گام زمانی ۱۵۰ ثانیه و در نظر گرفتن

پارامترهای پیش گفته به صورت معادله (۲) در نظر گرفته شده است:

$$ET_{pp} = S_1 \times A_1 + S_2 \times A_2 + S_3 \times A_3 \quad (2)$$

که ET_{pp} تبخیر تعرق پس پردازش شده (mm)، S_1 ، S_2 و S_3 به ترتیب ضریب زاویه و ایازش خطی بین تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده با فرمول پنمن - مانیتیت و تبخیر تعرق محاسبه شده با استفاده از خروجی های مدل، میانگین دمای هوا و میانگین تابش خروجی مدل، A_1 خروجی اولیه تبخیر تعرق مدل، A_2 میانگین دمای ماهانه شبیه سازی شده با مدل، A_3 میانگین تابش ماهانه شبیه سازی شده با مدل هستند.

با به دست آمدن ضرایب S_1 ، S_2 و S_3 که ضرایبی برای توصیف ارتباط بین خروجی های مدل و مقدار تبخیر تعرق برآورد شده با فرمول پنمن - مانیتیت هستند، می توان از معادله (۲) برای به دست آوردن تبخیر تعرق پس پردازش شده در چشم انداز آینده تحت وقوع سناریوی تغییر اقلیم AIB استفاده کرد. با این حال از آنجا که مدل های عددی اقلیمی شرایط جغرافیایی واقعی زمین را در ناحیه جغرافیایی منطقه اجرای مدل با جزئیات در نظر نمی گیرند؛ در نتیجه نمی توانند اُفتوخیزهای واقعی متغیرهای هواشناسی کشاورزی، مانند تبخیر تعرق را به خوبی مدل کنند. به منظور رفع این نقیصه در ماه هایی که انحراف معیار سری مدل شده از انحراف معیار دوره مشاهداتی کمتر بود، بر اساس کمترین انحراف معیار دوره مشاهداتی، بر اساس رابطه

(۳)

$$ET_{FRC-IN} = (ET_{FRC} - \overline{ET_{FRC}}) \times (\min STDEVET_{past}) + \overline{ET_{FRC}}$$

افزایش داده شد. در رابطه (۳) ET_{FRC-IN} مقدار تبخیر تعرق پس از تصحیح انحراف معیار برای هر ماه در دوره زمانی آینده، ET_{FRC} مقدار تبخیر تعرق هر ماه در

تعداد نقاط در راستای مداری ۳۰، در راستای نصف النهاری ۲۰ و در راستای قائم ۱۸، اجرا می شود. متغیرهای مورد نیاز برای محاسبه مقدار تبخیر تعرق مدل سازی شده با RegCM، با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم افزار GrADS استخراج شد.

به علت محدودیت هایی مانند تفکیک کم مکانی، لحاظ نشدن نوع پوشش گیاهی و کوهساری واقعی سطح زمین، مدل های عددی در شبیه سازی متغیرهای هواشناسی دارای ضعف هایی هستند که برای غلبه بر آن برون داد مدل مورد پس پردازش آماری قرار می گیرد. روشی که در تحقیق حاضر برای پس پردازش خروجی مدل RegCM از آن استفاده شد، روش و ایازش (رگرسیون) چندمتغیره است. و ایازش چندمتغیره روشی برای ساختن معادله مدل از سری داده های گذشته است. این روش یکی از قوی ترین روش ها برای تبیین ارتباط بین متغیرهای مدل شده و مشاهداتی به شمار می رود. در مرسوم ترین حالت و ایازش، به بررسی رابطه بین یک متغیر وابسته و چند متغیر مستقل پرداخته می شود؛ که در اینجا متغیر وابسته مقدار تبخیر تعرق پس پردازش شده است. متغیرهای مستقل باید آن دسته از متغیرهایی باشند که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته دارند. در تحقیق صالح و همکاران (۱۹۹۴) مشخص شده است که در مناطق خشک و نیمه خشک، دو پارامتر دما و تابش خورشیدی، نقش اساسی را در تبخیر و تعرق ایفا می کنند و سایر عوامل در درجه دوم اهمیت قرار دارند. همچنین شیه و همکاران (۱۹۸۴) نتیجه گرفتند که در برآورد روزانه و ماهانه تبخیر تعرق، دو پارامتر پیش گفته به تنهایی تقریباً همان مقداری را نتیجه می دهند که با استفاده از سایر پارامترها حاصل می شود. بنابراین با توجه به بررسی های صورت گرفته، این دو پارامتر به همراه تبخیر تعرق محاسبه شده با استفاده از خروجی های مدل در حکم متغیرهای مستقل معادله و ایازشی در نظر گرفته شدند. معادله و ایازشی مبتنی بر

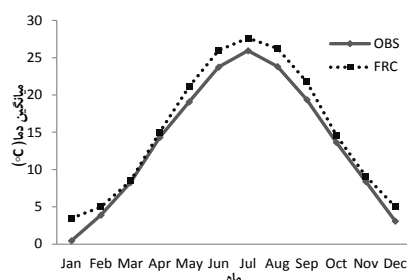
دوره زمانی آینده، \overline{ET}_{FRC} میانگین تبخیرتعرق ماهانه در دوره زمانی آینده، $Min\ STEDEV\ ET_{past}$ کمترین مقدار انحراف معیار تبخیرتعرق ماهانه در دوره مشاهداتی است. لازم به یادآوری است که افزایش انحراف معیار در میانگین داده‌ها هیچ گونه تأثیری نخواهد داشت. با داشتن مقادیر تبخیرتعرق پس‌پردازش شده حاصل از مدل در گذشته و آینده، نتایج تحلیل شد.

۳ نتایج و بحث

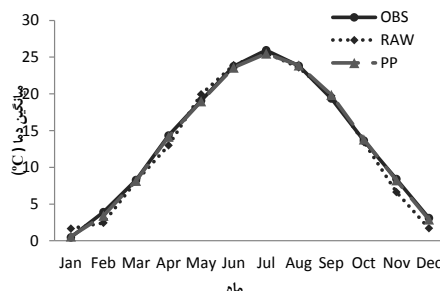
بارش و تبخیرتعرق دو جزء اصلی در چرخه آب هستند و تغییرات آنها در اکثر تحقیقات تغییر اقلیم مدنظر است. همچنین تغییرات دما در آینده عامل مهمی است که بر میزان تبخیرتعرق اثرگذار خواهد بود. در این تحقیق ابتدا روند تغییرات این دو پارامتر و در نهایت روند تغییرات تبخیرتعرق، بررسی شد.

• دما

شکل ۱- الف تغییرات ماهانه دما در دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵)



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) روند تغییرات میانگین ماهانه دما در دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵) - OBS مقدار مشاهده شده دما، RAW خروجی اولیه مدل، PP مقادیر پس‌پردازش شده و ب) روند تغییرات میانگین ماهانه دما در دوره پایه (OBS) و دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ (FRC).

جدول ۱. میانگین ماهانه دما در دوره گذشته (۱۹۶۱-۱۹۸۵) و چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵).

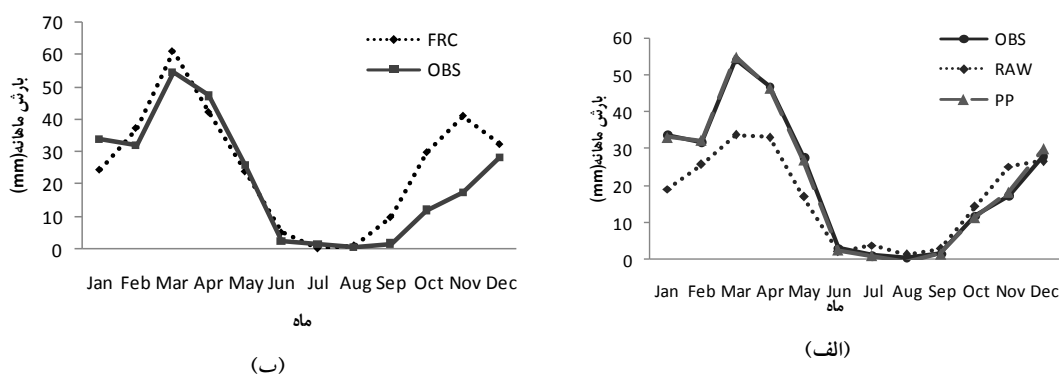
دما (°C)				
چشم‌انداز آینده (۲۰۳۵-۲۰۲۱)	دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵)			ماه
	پس‌پردازش شده	خروجی اولیه مدل	مشاهده شده	
۳/۰۵	۰/۵۹	۱/۶۶	۰/۴۶	ژانویه
۵/۳۹	۳/۴	۲/۴۴	۳/۹	فوریه
۷/۹۲	۸/۱۶	۸/۱۱	۸/۲۷	مارس
۱۴/۶۲	۱۴/۱۶	۱۲/۹۹	۱۴/۳۳	آوریل
۲۰/۱۷	۱۸/۹۹	۱۹/۹۴	۱۹/۰۸	مه
۲۵/۷۱	۲۳/۵۷	۲۳/۹۱	۲۳/۷۵	ژوئن
۲۷/۴۴	۲۵/۴۸	۲۵/۵۹	۲۵/۹۴	ژوئیه
۲۵/۷	۲۳/۸۷	۲۳/۶	۲۳/۸۲	اوت
۲۱/۴۲	۱۹/۸۵	۱۹/۷۴	۱۹/۳۷	سپتامبر
۱۴/۲۸	۱۳/۷۹	۱۳/۴۴	۱۳/۶۴	اکتبر
۹/۳۱	۸/۲۳	۶/۶۳	۸/۴۱	نوامبر
۳/۹۱	۲/۹	۱/۷۱	۳/۰۹	دسامبر
۱۴/۹۱	۱۳/۵۸	۱۳/۳۱	۱۳/۶۷	میانگین

• بارش

پیش‌بینی با دوره پایه معنی‌دار نبوده است. بنابراین تغییرات بارش در ماه‌های پاییز بیشتر از ماه‌های تابستان خواهد بود. بیشترین افزایش در مقدار بارندگی در ماه اکتبر و به میزان ۲۲ میلی‌متر رخ داده است. جدول ۲ مقادیر بارندگی ماهانه را برای دوره پایه و مقادیر پیش‌بینی شده در دوره آینده نشان می‌دهد.

در زمینه تغییرات دما و بارش در اثر وقوع پدیده تغییر اقلیم در تحقیقات گوناگون، نتایج مشابهی به‌دست آمده است. کوچکی و همکاران (۱۳۸۲) میزان بارش را در اکثر ماه‌های سال در مشهد، افزایشی پیش‌بینی کردند که این افزایش در همه ماه‌ها وجود نخواهد داشت. براساس نتایج آنها از میزان بارش در ماه‌های آوریل و مه کاسته و در اوت و سپتامبر بر آن افزوده خواهد شد. این کاهش نزولات در شهر مشهد احتمالاً بر تولید غلات دیم و بر

شکل ۲- الف نشان‌دهنده مقادیر بارندگی مشاهده شده، خروجی اولیه مدل و نتایج پس‌پردازش شده در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۵ است. پس از نزدیک کردن خروجی اولیه مدل به مقادیر مشاهداتی در مرحله پس‌پردازش، پیش‌بینی مدل برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ با رابطه به‌دست آمده در مرحله قبل از تصحیح و نتایج در شکل ۲-ب قابل‌مقایسه با مقادیر واقعی بارندگی در دوره پایه است. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که بارندگی سالانه از ۲۵۸ میلی‌متر به ۲۷۶/۵۵ میلی‌متر افزایش یافته است. الگوی بارش به گونه‌ای تغییر یافته که در ماه‌های ژوئن، اوت، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر میزان بارندگی افزایش یافته است. در ماه‌های آوریل و ژوئیه مقدار بارندگی نسبت به دوره پایه کاهش یافته و در سایر ماه‌ها اختلاف بین دوره



شکل ۲. (الف) روند تغییرات بارش ماهانه در دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵) - OBS مقدار مشاهده شده بارندگی، RAW خروجی اولیه مدل، PP مقادیر پس پردازش شده و (ب) روند تغییرات بارش ماهانه در دوره پایه (OBS) و دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ (FRC).

جدول ۲. میانگین بارش ماهانه در دوره گذشته (۱۹۶۱-۱۹۸۵) و چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵).

بارندگی (mm)				
دوره آینده (۲۰۳۵-۲۰۲۱)	دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵)			
پیش‌بینی	پس پردازش شده	خروجی اولیه مدل	مشاهده شده	ماه
۲۱/۰۴	۳۳/۱۱	۱۹/۱۳	۳۳/۸۰	ژانویه
۳۱/۷۱	۳۲/۲	۲۵/۶۶	۳۱/۹۲	فوریه
۵۵/۶۷	۵۴/۹	۳۳/۷۵	۵۴/۲۵	مارس
۳۲/۰۶	۴۶/۶۱	۳۳/۱۱	۴۷	آوریل
۲۱/۸۶	۲۶/۸۶	۱۶/۸۹	۲۷/۷۸	مه
۵/۱۵	۲/۴	۲/۰۲	۳/۱۱	ژوئن
۰	۰/۹۶	۳/۸۳	۱/۰۸	ژوئیه
۳/۸۵	۰	۱/۳۴	۰/۳۷	اوت
۳/۲۴	۱/۴۸	۲/۷۹	۱/۵۲	سپتامبر
۳۳/۸۷	۱۱/۳۹	۱۴/۳۴	۱۱/۷۹	اکتبر
۳۱/۴۱	۱۸/۳۷	۲۵/۲۴	۱۷/۲۸	نوامبر
۳۵/۶۴	۳۰/۰۳	۲۶/۶	۲۸/۰۵	دسامبر
۲۷۷	۲۵۷	۲۰۵	۲۵۸	مجموع

برای بررسی توزیع مکانی بارش در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۱ صورت گرفت. نتایج حاصل از آن نشان داد که در ایستگاه‌های واقع در مناطق مرکزی، ایستگاه‌های مناطق جنوب و جنوب غرب و ایستگاه‌های شمال شرق

نیاز آبی غلات فاریاب نیز تأثیر خواهد گذاشت. آنها پیش‌بینی کردند که تغییر در الگوی بارش و دما در مشهد می‌تواند موجب طولانی شدن دوره رشد محصولات شود. تحقیق دیگری از سوی ایران‌نژاد و همکاران (۱۳۸۸)

جدول ۳. میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ماهانه در دوره گذشته (۱۹۶۱-۱۹۸۵) و چشم‌انداز آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۵).

تبخیر تعرق پتانسیل (mm)													
ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	مجموع
گذشته	۲۵/۲	۳۲/۸	۵۲/۵	۸۰/۵	۱۱۵/۵	۱۴۱/۹	۱۴۶/۹	۱۲۰/۹	۹۶/۱	۵۳/۴	۳۱	۲۷/۳	۹۲۴
چشم‌انداز آینده	۱۸/۲۱	۳۰/۱	۵۱/۹۷	۱۰۳/۷	۱۴۳/۵	۱۷۱/۴	۱۴۲/۹	۱۸۰	۱۲۰/۸۸	۶۱/۹	۲۷/۸	۲۲/۸	۱۰۷۵

کشور، روند بارش سالانه مثبت است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۴) نیز وجود تغییر دما در دشت مشهد را در حکم نمایه‌ای از تغییر اقلیم در این منطقه مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنان، از روش‌های وایزش بین دمای هوا و زمان وقوع، روش من-کندال و روش لتن‌مایر استفاده شد. نتایج روشن ساخت که در بیشتر ماه‌های سال، روند تغییرات، افزایشی خواهد بود. جهادی طرقي (۱۳۷۸) به‌منظور تعیین روند تغییرات دما و بارش شهر مشهد از داده‌های میانگین دما و بارش ایستگاه‌های مشهد طی دوره آماری ۱۹۵۱-۱۹۹۴ استفاده کرد و نشان داد که عناصر اقلیمی دما و بارش مشهد دارای روندی افزایشی بوده است. به‌این ترتیب نتایج این تحقیق در زمینه دما و بارش با تحقیقات ذکر شده مطابقت دارد.

• تبخیر تعرق پتانسیل

در جدول ۳ نتایج به‌دست آمده در مورد میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ایستگاه مشهد در دوره ۱۹۶۱-۱۹۸۵ به‌صورت برآورد شده با معادله پنمن-مانتیت و میانگین تبخیر تعرق پتانسیل پیش‌بینی شده با استفاده از خروجی‌های پس‌پردازش شده مدل RegCM در دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ مشاهده می‌شود. مطابق این نتایج میانگین تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های آوریل، مه، ژوئن، اوت، سپتامبر و اکتبر نسبت به دوره پایه (۱۹۶۲-۱۹۸۵) افزایش یافته است. همچنین در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئیه، نوامبر و دسامبر مقدار تبخیر تعرق نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. در ماه مه با توجه به مقدار خطای مدل‌سازی نمی‌توان افزایش

یا کاهش در تبخیر تعرق را قابل قبول دانست. بررسی‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد که میانگین تبخیر تعرق سالانه در دوره پایه برابر با ۹۲۴ میلی‌متر و در چشم‌انداز آینده برابر با ۱۰۷۵ میلی‌متر است و به‌طور متوسط ۱۵۱ میلی‌متر یعنی ۱۶/۳۴٪ افزایش یافته است. افزایش تبخیر تعرق مسئله‌ای است که با توجه به روند افزایشی دما در اثر تغییر اقلیم، مورد انتظار است. همان‌گونه که نتایج تحقیقات پیشین نیز گویای رخداد روند افزایشی در متغیرهایی است که به دما وابستگی شدید دارند. از آن‌جمله می‌توان به تحقیق ابراهیم‌پور و همکاران (۱۳۹۱، ۲۰۱۴) اشاره کرد. آنها با استفاده از مدل SIMETAW، تحت وقوع سناریوهای A2 و B2 روی ایستگاه مشهد، به این نتیجه رسیدند که تبخیر تعرق سالانه در این ایستگاه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ افزایش خواهد داشت. همچنین علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی که با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی‌های مدل HadCM3 روی حوضه کشف رود در دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹، ۲۰۷۰-۲۰۹۹ صورت گرفت، نشان دادند که میانگین تبخیر تعرق در اثر افزایش دما و ثابت ماندن میانگین بارش سالانه (تنها با تغییر الگوی بارش فصلی) برای همه ماه‌ها در همه دوره‌ها افزوده خواهد شد. شیرغلامی و همکاران (۱۳۸۴) به بررسی روند تغییرات تبخیر تعرق در ایستگاه‌های همدیدی ایران پرداختند. این بررسی نشان داد که تبخیر تعرق در ایستگاه مشهد روند افزایشی دارد و تغییرات دوره‌های اخیر با متوسط درازمدت در سطح ۵ درصد اختلاف

چشم‌انداز آینده منتقل شود. علت این امر را می‌توان احتمالاً ناشی از افزایش بیشتر دما در این ماه در مقایسه با ماه اوت در دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ نسبت به دوره پایه دانست. وقوع بیشینه تبخیرتغرق در ماه ژوئیه موجب پیدایش تغییر در نیاز آبی گیاهانی می‌شود که دوره رشد خود را تا قبل از رسیدن به ماه‌های گرم سال کامل نکرده‌اند. با توجه به محدودیت منابع آب، با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌باید راهکارهای مناسب مدیریتی در بخش کشاورزی برای سازگاری با چنین پیامدهایی اعمال شود.

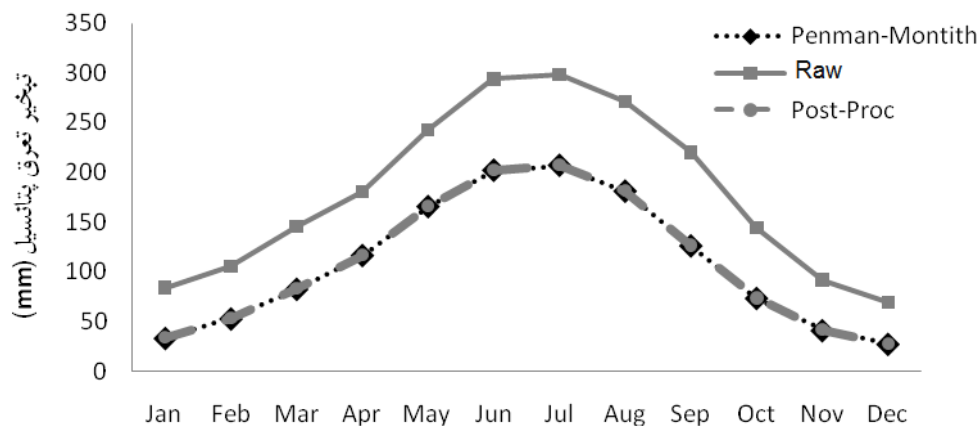
همان‌گونه که عنوان شد، سری شبیه‌سازی شده در دوره آینده نیاز به تصحیح انحراف معیار دارد. در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه مقدار انحراف معیار سری شبیه‌سازی شده در دوره آینده بیشتر از دوره پایه است و این تصحیح صورت نمی‌گیرد. ماه‌های ذکر شده تقریباً دارای بیشترین میانگین دما در طول سال هستند. بنابراین می‌توان بیان داشت که مدل در ماه‌های گرم سال در دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ می‌تواند انحراف معیار مناسبی برای سری شبیه‌سازی شده در پی داشته باشد.

باید توجه داشت که خروجی‌های اولیه مدل RegCM بدون عمل پس‌پردازش قادر به مدل‌سازی صحیح پارامترهای هواشناسی در شرایط این تحقیق نیستند. با بررسی نتایج حاصل از پس‌پردازش می‌توان اذعان داشت که روش به کار رفته در عملیات پس‌پردازش در این حوضه، با توجه به شرایط در نظر گرفته شده، بسیار خوب عمل کرده است. این مطلب در شکل ۳ قابل مشاهده است؛ به‌گونه‌ای که منحنی پس‌پردازش شده مقدار تبخیرتغرق تقریباً روی داده‌های برآورد شده از معادله پنمن-مانتیت منطبق است. در نتیجه با اطمینان بیشتری می‌توان از این روش برای مدل‌سازی تبخیرتغرق در چشم‌انداز آینده استفاده کرد.

شکل ۴ نتایج به‌دست آمده را برای مقدار تبخیرتغرق در دوره‌های مورد بررسی در این تحقیق به‌صورت مجزا نشان می‌دهد.

معنی داری داشته است. هارمسن و همکاران (۲۰۰۸) نیز در بررسی بارش، تبخیرتغرق مرجع، کمبود بارش و کاهش نسبی عملکرد محصول را برای سه مکان در کشور پورتوریکو تحت شرایط تغییر اقلیم برآورد کردند. در آن تحقیق، تبخیرتغرق مرجع با روش پنمن-مانتیت محاسبه شد. نتایج نشان داد که فصل بارش مرطوب‌تر و فصل خشکی، خشک‌تر خواهد شد. آنها همچنین روشن ساختند که تبخیرتغرق نیز در ماه‌های خشک با کاهش بارندگی و افزایش دما افزوده خواهد شد. باگیس و همکاران (۲۰۱۰) شرایط اقلیمی آینده را برای نواحی مرکزی بلژیک بررسی کردند. آنها دو متغیر اصلی یعنی تبخیرتغرق و بارش را بررسی کردند. آنها تبخیرتغرق پتانسیل را با معادله پنمن واسنجی شده برای بلژیک براساس خروجی‌های RCM یک مدل منطقه‌ای از داده‌های پایه (PRUDENCE Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) محاسبه کردند. شبیه‌سازی‌های این مدل وقوع تغییری را در الگوی بارش نشان داد که دارای افزایش در طول تابستان و کاهش در طول زمستان بود. در تحقیق آنها تبخیرتغرق دارای روند منظمی نبود. نتایج آنان حاکی از افزایش تبخیرتغرق در شرایط اقلیمی آینده شرایط خشک‌تر است. بدین ترتیب، آنچه انتظار می‌رود افزایش تبخیرتغرق در شرایط وقوع تغییر اقلیم است. اگرچه نتیجه اکثر مدل‌ها افزایش در میزان تبخیرتغرق سالانه است اما اینکه بعضی از آنها و از جمله تحقیق حاضر نشان‌دهنده کاهش تبخیرتغرق در برخی ماه‌ها هستند، ناشی از تفاوت بین مدل‌های استفاده شده و شرایط حاکم بر معادلات در نظر گرفته شده است.

سایر بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر در اقلیم آینده موجب می‌شود که بیشینه تبخیرتغرق از ماه اوت در دوره پایه به ماه ژوئیه در



شکل ۳. میانگین تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۸۵) در سه حالت: برآورد شده با استفاده از معادله پنمن-مانتیت (Penman-Montith) با استفاده از داده‌های مشاهداتی، محاسبه شده با استفاده از خروجی‌های مدل RegCM قبل از پس‌پردازش (Raw)، نتایج پس‌پردازش شده (Post-Proc) در دوره ۱۹۶۱-۱۹۸۵.

۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

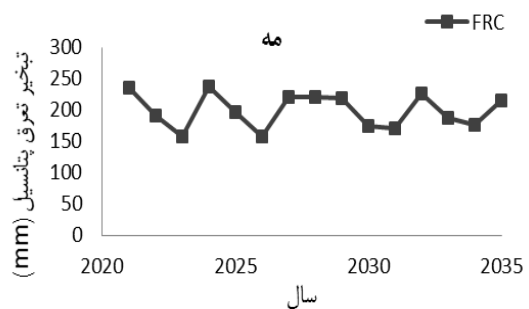
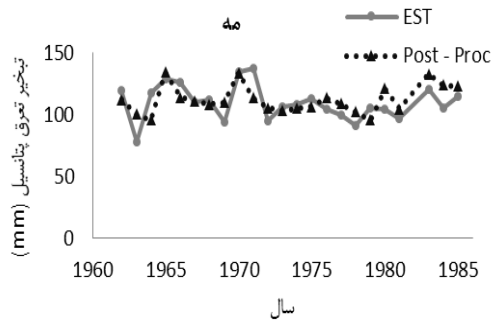
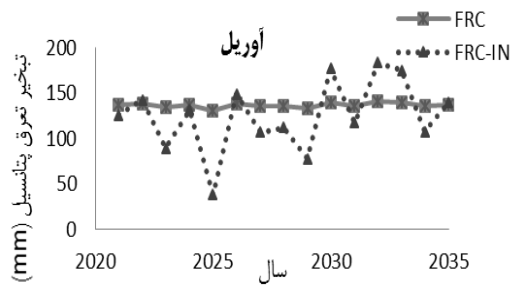
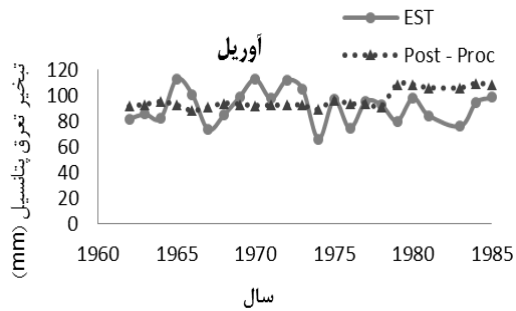
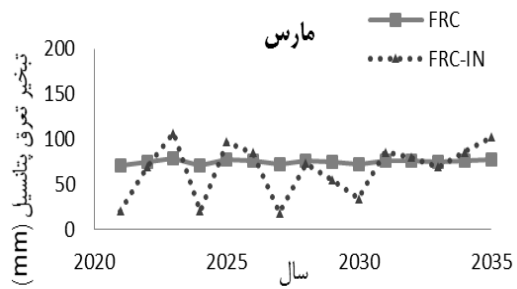
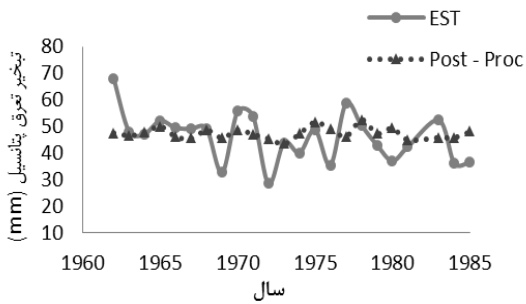
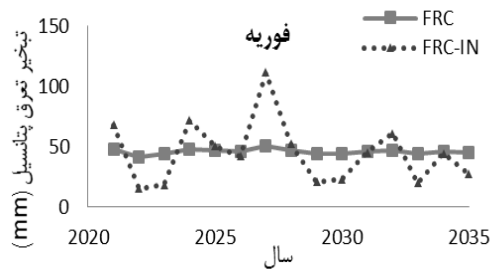
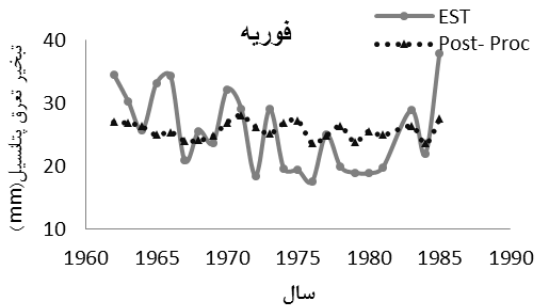
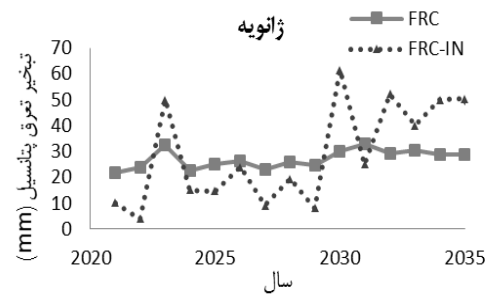
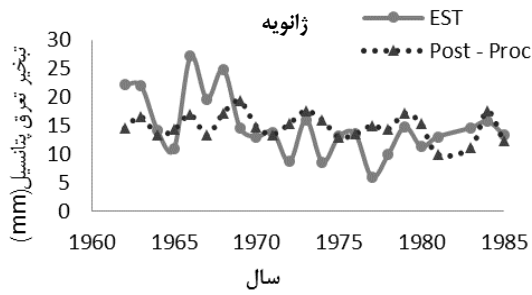
رسید. اما روند تغییرات آن در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی ماه‌ها کاهش‌ی خواهد بود. این مسئله به الگوی بارندگی و دمای آن ماه بستگی خواهد داشت. افزایش در تبخیر تعرق (نیاز آبی) گیاهان نیازمند مدیریت صحیح منابع آب در آینده خواهد بود. در کشاورزی دیم تغییر در میزان تبخیر تعرق تأثیر بسیار مهمی بر رشد، توسعه و عملکرد گیاه با اصلاح زمان، مدت و شدت دوره‌های تنش خشکی دارد. در کشاورزی آبی تغییر در تبخیر تعرق به‌طور مستقیم تعیین‌کننده میزان آب موردنیاز برای رشد گیاهان است (روزنبرگ و همکاران، ۱۹۸۹). در نهایت باید بیان داشت که اکثر مدل‌های اقلیمی، افزایش در میزان تبخیر تعرق گیاه را ناشی از افزایش دما می‌دانند.

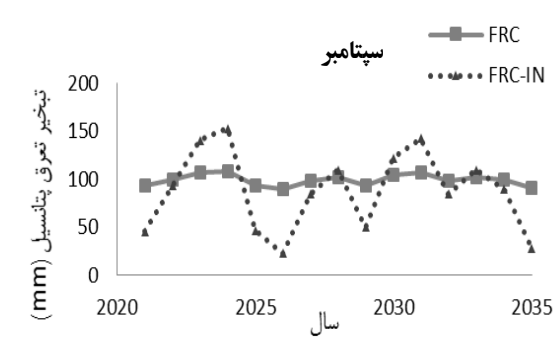
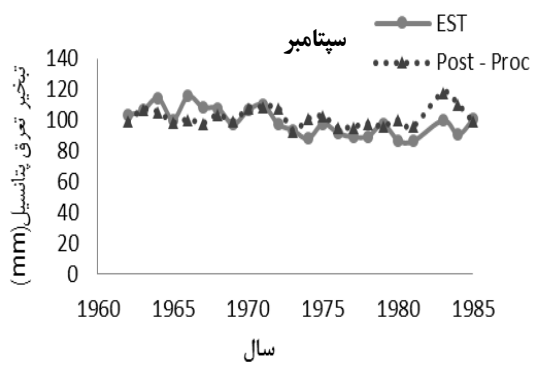
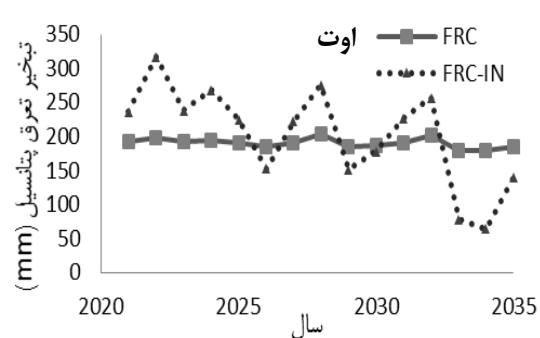
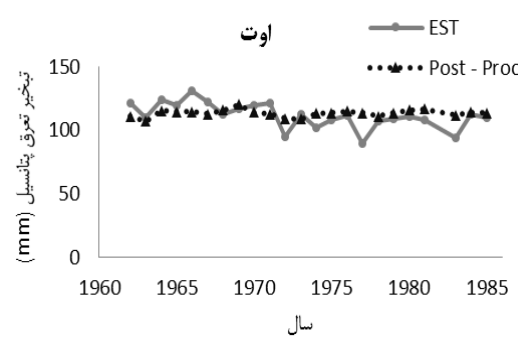
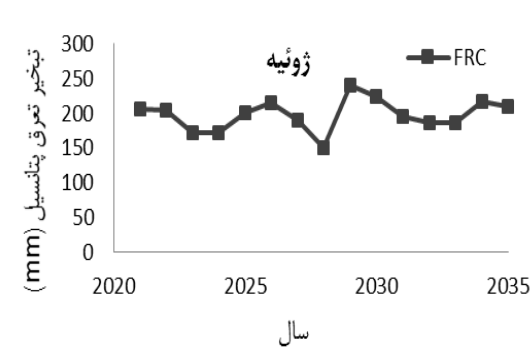
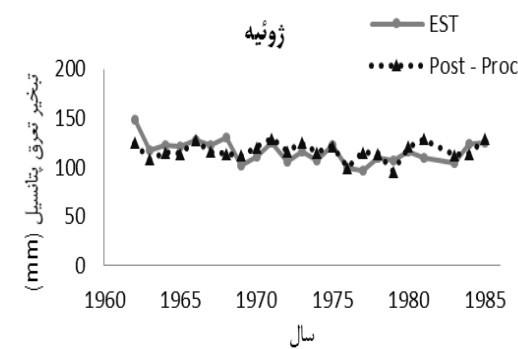
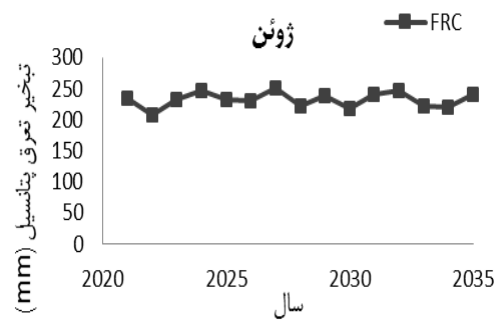
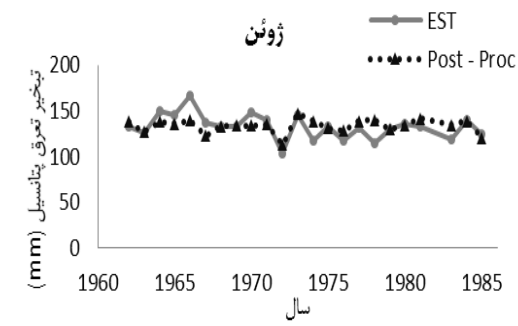
تشکر و قدردانی

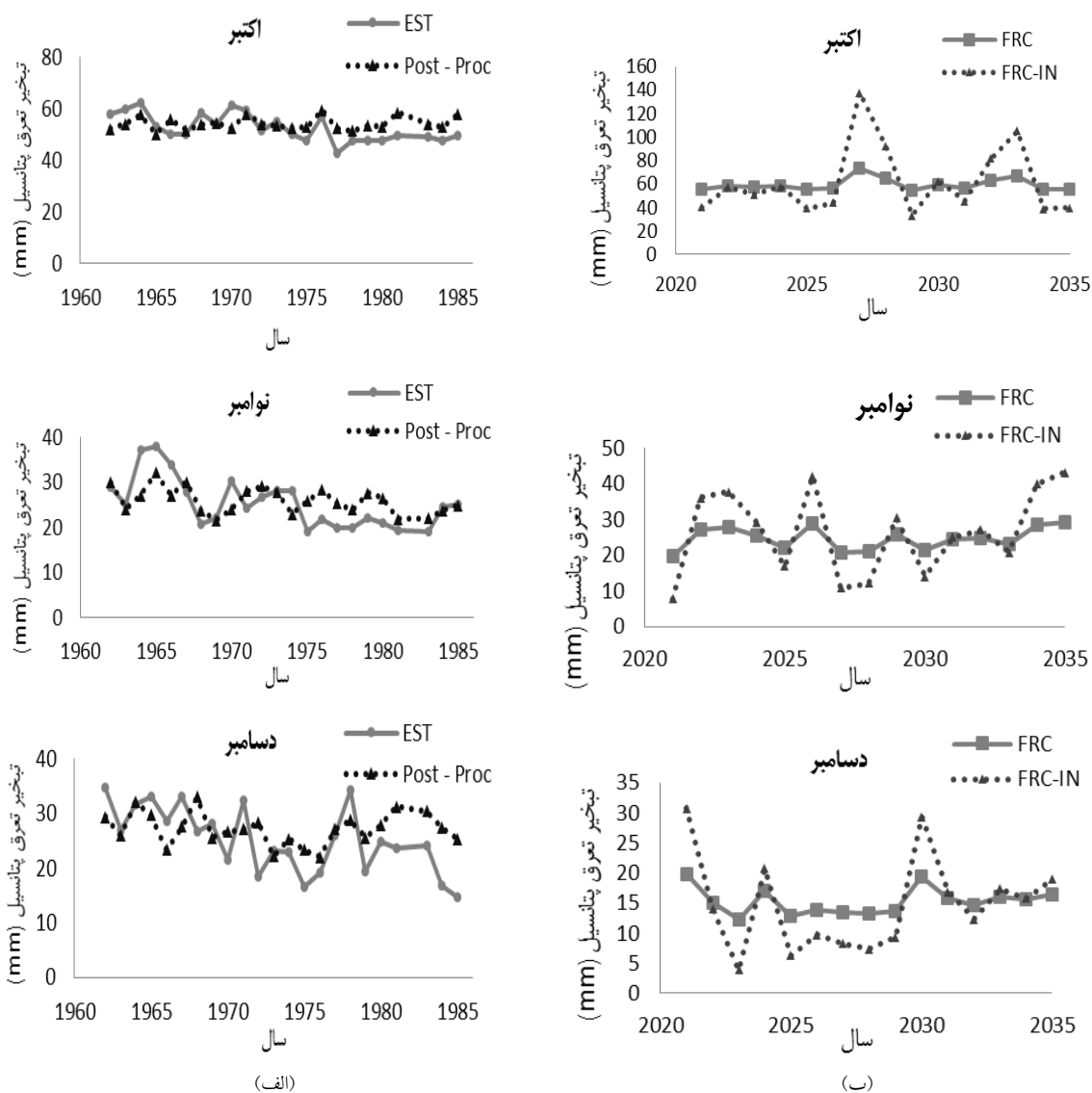
این تحقیق با بهره‌مندی از امکانات و همکاری مستمر پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد صورت گرفت. نویسندگان مقاله بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولان محترم این پژوهشکده اعلام می‌دارند.

افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای در سال‌های آینده منجر به پیدایش تغییراتی در پارامترهای اقلیمی خواهد شد. از جمله این پارامترها، دما و بارش است. تغییر در الگوی بارش و دما می‌تواند بر مقدار تبخیر تعرق گیاه تأثیرگذار باشد. در این پژوهش با استفاده از مدل دینامیکی RegCM به ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل EH50M پرداخته شد. براساس نتایج حاصل، میانگین دما در اکثر ماه‌های سال (همه ماه‌ها به‌جز ماه مارس) نسبت به اقلیم گذشته افزایش خواهد یافت. این افزایش در ماه‌های گرم سال مشهودتر خواهد بود. بررسی روند تغییرات بارش به‌طور کلی نشان‌دهنده افزایش بارندگی در ماه‌های گرم و کاهش بارندگی در ماه‌های سرد سال نسبت به دوره پایه در نظر گرفته شده در این تحقیق بود. بیشترین افزایش بارندگی در ماه اوت رخ داده است. میزان این افزایش برابر با ۴/۱ میلی‌متر است. میانگین مجموع بارش سالانه از ۲۵۸ میلی‌متر در دوره ۱۹۶۱-۱۹۸۵ به ۲۷۷ میلی‌متر در دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ افزایش خواهد یافت.

مقدار تبخیر تعرق سالانه در چشم‌انداز آینده از ۹۲۴ میلی‌متر در دوره پایه به ۱۰۷۵ میلی‌متر در سال خواهد







شکل ۴. روند تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های متفاوت سال. (الف) تبخیر تعرق برآورد شده با معادله پنمن-مانتیت (EST) و مقادیر پس‌پردازش شده در دوره اقلیمی ۱۹۶۲-۱۹۸۵ (Post-Proc) و (ب) مقدار پیش‌بینی شده برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ بدون تصحیح انحراف معیار (FRC) و با تصحیح انحراف معیار (FRC-INF).

۳۵۶-۳۴۹، (۴)۴۳

منابع

ابراهیمی، ح.، علیزاده، ا.، و جوانمرد، س. ۱۳۸۴. بررسی وجود تغییر دما در دشت مشهد به عنوان نمایه تغییر اقلیم در منطقه: مجله تحقیقات جغرافیایی، ۱۰(۱)، ۵-۱۸.

ابراهیم پور، م.، قهرمان، ن.، لیاقت، ع. م. ۱۳۹۱. استفاده از مدل SIMETAW جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: مشهد): مجله تحقیقات آب و خاک ایران،

- کوچکی، ع. و نصیری محلاتی، م.، ۱۳۸۷، تاثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری: پژوهش‌های زراعی ایران، ۶(۱)، ۱۵۳-۱۳۹.
- مدیریان، ر.، کریمیان، م. و بابائیان، ا.، ۱۳۸۴، شبیه‌سازی بارش‌های مونسونی جنوب شرق ایران با استفاده از مدل اقلیمی RegCM: مقاله‌نامه همایش پیش‌بینی وضع هوا، تهران.
- Baguis, P., Roulin, E., Willems, P., and Ntegeka, V., 2010, Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium: Theoretical Applied Climatology. **99**, 273-286.
- Ebrahimipour, M., Ghahreman N., and Orang, M., 2014, Assessment of climate change impacts on reference evapotranspiration and simulation of daily weather data using SIMETAW: Journal of Irrigation and Drainage Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000669.
- Elguindi, N., Giorgi, F., 2006, Simulating multi-decadal variability of Caspian sea level changes using regional climate model outputs: Climate Dynamics, **26**, 167-181.
- Harmesen, E., Miller, N. L., Schlegel, N. J., and Gonzalez, J. E., 2009, Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico: Agricultural Water Management, **96**, 1085-1095
- Pal, J., Giorgi, F., Bi, X., Elguindi, N., Salmon, F., Gao, X., Rauscher, S. A., Francisco, R., Zakeyn, A., Winter, J., Ashfagh, M., Syed, F. S., Bell, J., Diffenbaugh, J. K., Konare, A., Martinez, D., Rocha, R. P., Sloan, L., and Steiner, A., 2007, Regional climate modeling for the developing world, the ICTP and RegCNET: Bull. Am. Meteo. soc., 1396-1409.
- Salih, A. M. A., and Sendil, U., 1984, Evapotranspiration under extremely arid climates: J. Irrig. Drain. **110**, 3, 289-303.
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., Kunatmann, H., 2011. Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy: Journal of Hydrology, **399**, 70-92.
- Shih, S. F., 1984, Data requirement for evapotranspiration estimation: J. Irrig. and Drain Eng. ASCE, **110**(3), 263-274.
- ایران‌نژاد، پ.، کتیرایی بروجردی، پ. و حجام، س.، ۱۳۸۸، توزیع مکانی روند بارش سالانه در ایران در دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۰: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۴): ۷۹-۹۴.
- بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، و حبیبی نوخندان، م.، ۱۳۸۶، شبیه‌سازی بارش ماه‌های سرد سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ با استفاده از مدل منطقه‌ای اقلیمی RegCM3: جغرافیا و توسعه، ۱۰، ۷۲-۵۵.
- جهادی طرقي، م.، ۱۳۷۸، تعیین تغییرات دما و بارش شهر مشهد طی دوره آماری ۱۹۹۴-۱۹۵۱: فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۵۴، ۱۶۵-۱۵۱.
- سلطان‌نژاده، ا.، احمدی گیوی، ف. و ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۸۶، بررسی سه‌ماهه تأثیر رشته‌کوه‌های زاگرس بر جریان‌های میان‌مقیاس منطقه شرق زاگرس با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM: فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۱)، ۵۰-۳۱.
- شیرغلامی، ه. و قهرمان، ب.، ۱۳۸۴، بررسی روند تغییرات دمای متوسط سالانه در ایران: علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۹(۱)، ۲۳-۹.
- عباسی، ف.، ملبوسی، ش.، بابائیان، ا.، اثمري، م. و برهانی، ر.، ۱۳۸۹، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G: آب و خاک، ۲۴(۲)، ۲۳۴-۲۱۸.
- علیزاده، ا.، ۱۳۸۳، رابطه آب و خاک و گیاه: چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- علیزاده، ا.، سیاری، ن.، حسامی، ک.، بنایان اول، م. و فرید حسینی، ع.، ۱۳۸۹، بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه رودخانه کشف رود): آب و خاک، ۲۶(۴): ۸۳۵-۸۱۵.

resolved regional climate model and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China, Part 1: Model description and verification of simulation: *J. Climate*, **19**, 1721-1738.

Rosenberg, N. J., McKinney M. S., and Martin, P., 1989, Evapotranspiration in a greenhouse-warmed world: A Review and Simulation. *Agric for Meteorol*, **47**, 303-320.

Wang, Y., Sen, O. L., Wang, B., 2002, A highly