

ارزیابی پس‌پردازش برون‌دادهای دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد)

نوذر قهرمان^{۱*}، ایمان بابائیان^۲ و سید محمدرضا طباطبائی^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استادیار، بخش تغییر اقلیم، پژوهشکده ملی اقلیم‌شناسی، مشهد، ایران

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۹/۴، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

تبخیر تعرق پتانسیل پارامتری اساسی در محاسبات نیاز آبی، پژوهش‌های اقلیمی و مدل‌های آب‌شناسی است. هدف از این تحقیق بررسی میزان تغییرات این کمیت براساس سناریوهای جدید واداشت تابشی (RCP) و مدل‌های اقلیمی پس‌پردازش شده طرح CORDEX در ۵۰ سال آتی (۲۰۲۱-۲۰۷۰) در دشت مشهد است. به این منظور، تبخیر تعرق پتانسیل با استفاده از معادله پنمن-مانتیت و داده‌های هواشناسی تاریخی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۱) ایستگاه سینوپتیک مشهد برآورد شده و با خروجی دو مدل اقلیمی منتخب از مجموعه مدل‌های CMIP5 مورد مقایسه قرار گرفته است. به منظور کاهش خطاهای موجود در برآوردهای مدل، عمل پس‌پردازش روی داده‌های برآورد شده صورت گرفت. نتایج حاصل از پس‌پردازش نشان داد که مدل در ماه‌های گرم سال توانایی بهتری در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل نسبت به ماه‌های سرد سال دارد. همچنین مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل در دشت مشهد طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۷۰ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، تهیه و روند آن بررسی شد. براساس نتایج حاصل، بیشترین افزایش مقدار تبخیر تعرق پتانسیل در ماه ژانویه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب با ۱۵/۴٪ و ۱۶/۴٪ افزایش نسبت به دوره پایه و نیز بیشترین مقدار کاهش در ماه اکتبر با ۱۲/۵٪ و ۱۰/۰٪ کاهش نسبت به دوره پایه مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق پتانسیل، تغییر اقلیم، سناریوهای RCP، مشهد.

۱. مقدمه

بازه‌های زمانی کوتاه‌تر بود. مورفی (۱۹۹۹؛ ۲۰۰۰) و هلسترون و همکاران (۲۰۰۱) با مقایسه دو روش ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی، قدرت نسبی هر دو روش را تقریباً برابر تعیین کردند، اما زمان‌بر بودن اجرای مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و نیز هزینه و امکانات خاص اجرای این مدل‌ها باعث شده تا در چند سال اخیر اکثر محققان، رهیافت‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری را برای ارزیابی برون‌داد مدل‌های اقلیمی و نیز روندیابی در تحقیقات گوناگون مورد استفاده قرار دهند. (بابائیان و کوهی ۱۳۹۱، بابائیان و همکاران ۱۳۹۵، آزادی و همکاران ۱۳۸۹، خیراندیش و همکاران، ۱۳۹۲). قربانی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل LARS-WG متغیرهای هواشناسی آینده را تولید و با استفاده از

تبخیر تعرق به‌مثابه یکی از عنصرهای مهم چرخه آب‌شناسی، مولفه مهمی در مدل‌های اقلیمی و عامل اصلی مصرف آب در بخش کشاورزی است و تاکنون مدل‌های بسیاری برای برآورد دقیق آن با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه یافته است. به‌منظور برآورد میزان تغییرات پارامترهای اقلیمی طی قرن آتی، مدل‌های اقلیم جهانی (GCM) با قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت اجرا می‌شود و در نهایت نتایج آنها در اختیار محققان قرار می‌گیرد. چون معمولاً این داده‌ها تفکیک زمانی و مکانی کمی دارند، اولین گام در کاربست خروجی مدل‌های اقلیم جهانی، ریزمقیاس‌نمایی آنها با روش‌های آماری و یا دینامیکی و نیز تلفیقی از هر دو روش به‌منظور تولید داده‌هایی با دقت مکانی بیشتر و در

برای پیش‌یابی بارش و مدل‌های MPI-ESM-MR, CESM1(BGC) مدل‌های ارجح برای کمیت دما پیشنهاد شد. به طرز مشابه در چارچوب طرحی تحت عنوان CORDEX، پهنه‌های خشکی زمین به ۱۳ بخش تقسیم، و خروجی مدل‌های اقلیم جهانی با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه تولید می‌شود. همچنین دقت زمانی خروجی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی مورد استفاده در این طرح، شامل داده‌های سه ساعته، شش ساعته، روزانه و در نهایت داده‌های ماهانه و فصلی است. علاوه بر افزایش دقت مکانی و زمانی در مدل‌ها، تعداد و نوع متغیرهای ورودی و در نتیجه متغیرهای ریزمقیاس‌شده و محاسبه شده نیز افزایش قابل توجهی یافته است (جیورجی و همکاران، ۲۰۰۹؛ تیلور و همکاران، ۲۰۱۲؛ کریس تنسن و همکاران، ۲۰۱۲). از جمله این خروجی‌ها می‌توان به تبخیر تعرق پتانسیل در مقیاس روزانه اشاره کرد.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی توانایی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی طرح CORDEX در برآورد میزان تبخیر تعرق پتانسیل دشت مشهد تحت سناریوهای جدید واداشت تابشی (RCP) است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی در این تحقیق، دشت مشهد واقع در شمال شرق کشور است. در این دشت تنها ایستگاه سینوپتیک با دوره آماری بلندمدت و معتبر ایستگاه هواشناسی مشهد است. مختصات آن ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد ۹۹۹/۲ متر، است. اقلیم آن در سامانه طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن گسترش یافته نیمه‌خشک سرد است.

داده‌های مشاهده‌ای تاریخی این تحقیق مربوط به دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۰۵ شامل مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در

مدل آب و هوا محصول SSM، میزان تغییرات نیاز آبی سویا در منطقه گرگان را بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق ۱۰٪ افزایش در تبخیر تعرق گیاه سویا را برای دوره ۱۳۹۲ - ۱۴۲۱ نسبت به دوره پایه ۱۳۶۴ - ۱۳۹۱ نشان داد. در تحقیق ابراهیم‌پور و همکاران (۲۰۱۴) که روی ۴ ایستگاه مشهد، تبریز، بو شهر و زاهدان صورت گرفت، سه عنصر اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارندگی خروجی مدل HadCM3 تحت دوسناریوی A2 و B2 از مجموع I سناریوهای SRES در دو بازه زمانی ۳۰ ساله، برای شرایط اقلیمی آینده، با مدل SDSM ریزمقیاس‌شده. نتایج حاصل از این ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل SIMETAW به منظور بررسی میزان تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش ۵/۳۵ و ۱۰/۴۹ میلی‌متر در ماه به ترتیب برای دوره‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۵۰ و ۲۰۵۰ - ۲۰۸۰ تحت سناریوی A2 و ۳/۵۴ و ۸/۰۸ میلی‌متر در ماه، تحت سناریوی B2 نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱ - ۱۹۹۴ بود. علاوه بر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری، قهرمان و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی RegCM، توانایی این مدل را در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۳۵ برای دشت مشهد بررسی کردند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، میزان تبخیر تعرق پتانسیل ۱۶/۳۴٪ در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۳۵ نسبت به دوره ۱۹۶۱ - ۱۹۸۵ افزایش خواهد یافت.

در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، موسوم به AR5 در مقایسه با گزارش‌های قبلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، مبنای تقسیم‌بندی سناریوها، میزان واداشت تابشی است. در تحقیق قهرمان و همکاران (۲۰۱۵) عدم قطعیت مجموعه‌ای از گروه مدل‌های CMIP5 که در گزارش پنجم مورد استناد بوده است در پیش‌یابی بارش و دمای ایران تا پایان قرن ۲۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های MPI-CESM1.1(m), MPI-ESM-MR, PI-ESM-LR BCC به ترتیب بهترین مدل‌ها

روزانه است و مقدار تبخیر تعرق پتانسیل برحسب کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه برآورد شده است. تفکیک مکانی مورد استفاده برای داده‌های تاریخی برآورد شده ۰/۲۲ درجه در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه این اندازه سلولی فقط بخش کوچکی از سطح دشت مشهد را پوشش می‌دهد، داده‌های برآورد شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم با قدرت تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه انتخاب شد. پس از تعیین سلول‌های مورد نظر در هر مجموعه داده، داده‌های مربوط به سال‌های مورد استخراج fvvsd استخراج و در نهایت نتایج بررسی و تحلیل شد.

به منظور مقایسه، در بخش اول سه سری داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سری اول داده‌ها مربوط به داده‌های تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه شده با توجه به داده‌های هواشناسی برداشت شده در سطح ایستگاه سینوپتیک مشهد است. مقادیر تبخیر تعرق این بخش با استفاده از مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی، براساس معادله پنمن-مانتیت محاسبه، و تحت عنوان مقادیر تبخیر تعرق مشاهده شده (obs) ثبت شده‌اند. سری دوم داده‌ها مربوط به داده‌های تبخیر تعرق حاصل از خروجی مدل ریزمقیاس‌نمایی است. داده‌های خروجی مدل در ابعاد ۰/۲ درجه و تفکیک زمانی آنها نیز روزانه است. با توجه به اینکه مبنای مقایسه‌ها در تحقیق حاضر، مقادیر ماهانه است، با میانگین‌گیری از مقادیر روزانه، مقدار تبخیر تعرق ماهانه برای هر یک از ماه‌های میلادی محاسبه شد. این دسته از داده تحت عنوان داده‌های تاریخی برآورد شده (hist) نام‌گذاری شدند. با توجه به اینکه معمولاً خروجی مدل‌ها با مقادیر مشاهده شده معمولاً دارای اختلاف است، دسته سوم داده‌ها مربوط به داده‌های پس پردازش شده (pp) است. به منظور اعمال پس پردازش روی داده‌ها از رابطه زیر استفاده شد (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸).

$$ET_{pp} = ET_{hist} + (ET_{obs} - \overline{ET_{obs}}) \times \left(\frac{\overline{ET_{hist}}}{\overline{ET_{obs}}} + (\overline{ET_{obs}} - \overline{ET_{hist}}) \right) \quad (2)$$

مقیاس ماهانه، از پژوهش‌کننده اقلیم‌شناسی دریافت شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT، مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل (ET_0) به روش پنمن-مانتیت (معادله ۱) محاسبه شد:

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

که در آن، ET_0 تبخیر تعرق پتانسیل برحسب میلی‌متر بر روز، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، $e_s - e_d$ اختلاف فشار بخار آب در ارتفاع ۲ متری نسبت به حالت اشباع برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس، G شار گرمایی به داخل خاک برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز، و در نهایت γ ضریب رطوبتی برحسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

۲.۲. مدل‌های اقلیمی

مدل‌های اقلیمی استفاده شده در این تحقیق به‌طور کلی در دو دسته مدل‌های اقلیم جهانی و مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی یا همان مدل‌های اقلیم منطقه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق از دسته اول این مدل‌ها، مدل NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M از مجموعه مدل‌های اقلیمی CMIP5 با ابعاد سلولی ۲/۵ درجه طول جغرافیایی در ۲ درجه عرض جغرافیایی به‌منزله مدل اقلیم جهانی استفاده شده است.

پس از این مرحله، داده‌های مدل اقلیم جهانی منتخب از مرکز هواشناسی و آب‌شناسی سوئد (SMHI) که طی طرح CORDEX ریزمقیاس‌شده بود، تهیه شد. این داده‌ها در سه دسته داده‌های تاریخی برآورد شده برای دوره پایه یعنی سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۰۵، و نیز داده‌های تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده برای قرن بیست و یکم تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۵۰ ساله ۲۰۲۱-۲۰۷۰ تهیه شد. تفکیک زمانی همه داده‌ها

که در آن، هریک از مقادیر ET_{pp} ، ET_{obs} ، و ET_{hist} به ترتیب مربوط به تبخیر تعرق پس پردازش شده، تبخیر تعرق مشاهده شده، و تبخیر تعرق تاریخی برآورد شده مدل، و نیز مقادیر \overline{ET}_{hist} و \overline{ET}_{obs} مربوط به میانگین سالانه تبخیر تعرق تاریخی برآورد شده مدل و میانگین سالانه داده‌های تبخیر تعرق مشاهده شده هستند.

رابطه (۲) از سه قسمت اصلی تشکیل شده است؛ قسمت اول مربوط به داده‌های برآورد شده تاریخی است، قسمت دوم مربوط به تصحیح ضریب زاویه است که در آن پس از محاسبه میزان اختلاف مقادیر مشاهده شده از میانگین آنها، این میزان اختلاف به نسبت میانگین‌ها وزن‌دهی می‌شود و تصحیح ضریب زاویه برای هر نقطه به دست می‌آید، و در نهایت قسمت سوم مربوط به تصحیح عرض از مبدأ است.

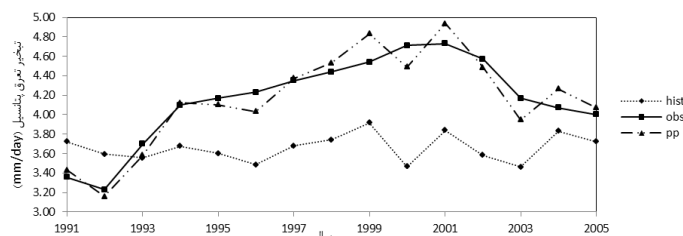
۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از این پژوهش در دو بخش عرضه شده

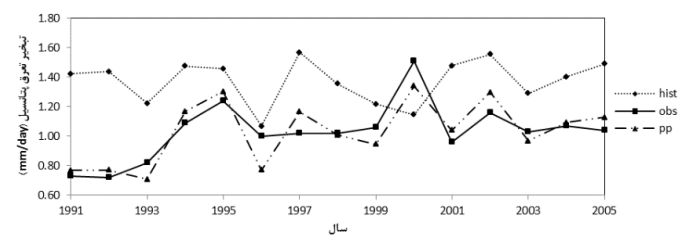
است. در بخش اول با تحلیل داده‌های پس پردازش شده حاصل از خروجی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی، توانایی این مدل‌ها در برآورد میزان تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره پایه بررسی می‌شود. پس از این مرحله، با استفاده از خروجی‌های مدل میزان تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نتایج حاصل از این بخش در شکل‌های ۱ تا ۳ برای یک ماه سرد و مرطوب، یک ماه گرم و کم‌باران و همچنین در وضعیت سالانه نشان داده شده است.

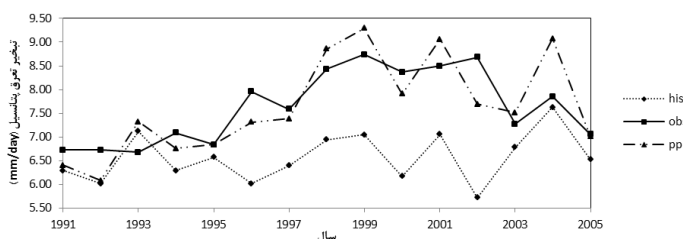
به منظور مقایسه مقادیر تبخیر تعرق قبل (ET_{hist}) و بعد از پس پردازش (ET_{pp}) با مقادیر مشاهداتی (ET_{obs})، مقادیر $N-S$ ، $RMSE$ ، درصد صحت، ضریب همبستگی (r) و P -Value آزمون مقایسه میانگین t در سطح معنی‌داری ۵٪ محاسبه شد که نتایج در جدول ۱ عرضه شده است.



شکل ۱. مقادیر میانگین سالانه ET_{pp} ، ET_{obs} ، ET_{hist} برای دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵)



شکل ۲. مقادیر ET_{pp} ، ET_{obs} ، ET_{hist} برای دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵) در ماه ژانویه



شکل ۳. مقادیر ET_{pp} ، ET_{obs} ، ET_{hist} برای دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵) در ماه ژوئن

جدول ۱. مقادیر RMSE، N-S، درصد صحت، ضریب همبستگی و مقادیر p-value آزمون t در سطح ۵٪ ET_{hist}، ET_{pp} در مقایسه با مقادیر ET_{obs}

ماه / سال	RMSE		N-S		صحت (%)		rr		p-value (t)
	PP	Hist	PP	Hist	PP	Hist	PP	Hist	
ژانویه	۰/۱۱	۰/۴۳	۰/۶۶	-۴/۱۲	۹۰	۷۳	۰/۸۴	-۰/۱۶	۰/۰۰۰۱*
فوریه	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۸۶	-۰/۰۵	۹۰	۶۷	۰/۹۵	۰/۱۳	۰/۴۱
مارس	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۰۱	۸۷	۷۰	۰/۸۹	۰/۳۳	۰/۳۷
آوریل	۰/۵۲	۰/۸۲	۰/۳۵	-۰/۶۱	۸۷	۸۳	۰/۸۲	۰/۱۷	۰/۰۳۸*
می	۰/۵۴	۱/۲۰	۰/۷۴	-۰/۲۶	۸۷	۷۳	۰/۹۳	۰/۳۴	۰/۰۱۶*
ژوئن	۰/۵۸	۱/۳۷	۰/۳۹	-۲/۳۷	۸۷	۶۷	۰/۸۱	۰/۰۸	۰/۰۰۰۲*
ژوئیه	۰/۴۵	۱/۲۸	۰/۴۶	-۳/۳۰	۹۰	۹۰	۰/۸۳	۰/۱۲	۰/۰۰۰۲*
اوت	۰/۳۲	۱/۳۵	۰/۸۳	-۱/۹۶	۱۰۰	۹۰	۰/۹۲	-/۰۱	۰/۰۰۰۱*
سپتامبر	۰/۲۵	۱/۳۵	۰/۷۴	-۶/۶۷	۹۳	۹۳	۰/۸۶	-۰/۳۵	۰/۰۰۰۱*
اکتبر	۰/۳۳	۱/۱۵	۰/۷۰	-۲/۷۱	۸۳	۶۰	۰/۸۵	-۰/۲۵	۰/۰۰۰۱*
نوامبر	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۳۷	-۰/۸۶	۸۳	۶۷	۰/۸۰	۰/۰۴	۰/۰۳*
دسامبر	۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۳۴	-۱/۳۰	۷۷	۶۳	۰/۷۵	-۰/۰۹	۰/۰۷۳
سالانه	۰/۱۵	۰/۶۶	۰/۸۷	-۱/۳۵	۹۳	۸۳	۰/۹۵	۰/۱۲	۰/۰۰۰۴*

اعمال پس پردازش منفی بوده است، اما با اعمال پس پردازش به ۰/۸۷ رسیده است که بسیار مطلوب است. این روش همچنین توانسته است آفت و خیز تبخیر تعرق را نسبت به مقادیر دیدبانی حفظ کند، طوری که همبستگی بین مقادیر پس پردازش شده با مقادیر دیدبانی ۰/۹۵ است. با بررسی مقادیر p-value به دست آمده از آزمون مقایسه میانگین t نیز مشخص می‌شود که مقادیر برآورد شده با مدل برای سه ماه فوریه، مارس و دسامبر در سطح ۵٪ معنی‌دار نیستند اما در باقی ماه‌های سال مقادیر میانگین معنی‌دار هستند و در اینجا نیز نتیجه قسمت قبل، در ارتباط با توانایی قابل قبول مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی در تولید داده‌های ماه‌های گرم سال، بار دیگر تأیید می‌شود.

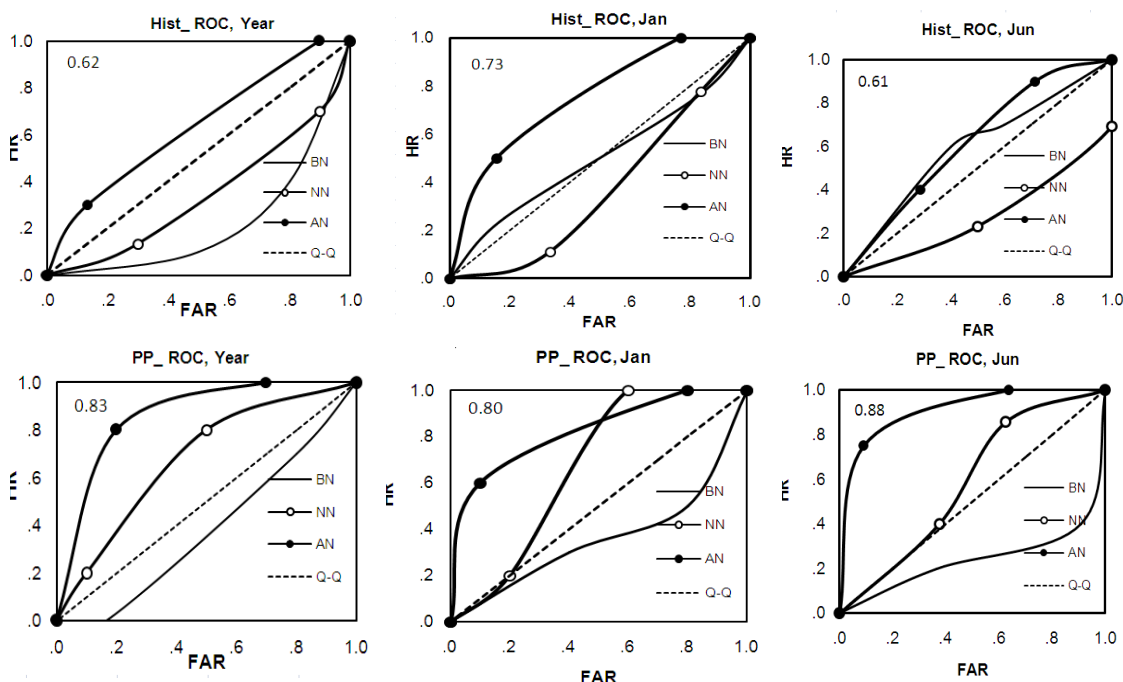
مطابق دستورعمل سازمان جهانی هواشناسی، یکی دیگر از روش‌های راستی‌آزمایی پیش‌بینی‌های فصلی، استفاده از جدول توافقی است. (WMO، ۲۰۰۲) با استفاده از جدول توافقی می‌توان امتیاز مهارتی (ROC)، نمایه‌های پیش‌بینی صحیح و پیش‌بینی نادرست را برای هر طبقه از پیش‌بینی‌ها محاسبه کرد. مساحت زیر خم ROC به منزله یکی از نمایه‌های ارزیابی پیش‌بینی است

همان‌طور که در جدول ۱ مشخص شده است، مدل برای ماه‌های گرم سال (فوریه - اوت) توانایی به نسبت بهتری در برآورد میزان تبخیر تعرق پتانسیل در مقایسه با ماه‌های سرد سال (سپتامبر - ژانویه) دارد. کمترین خطای RMSE در ماه‌های سرد رخ داده است، طوری که کمترین مقدار آن در ماه ژانویه به مقدار ۰/۱۱ میلی متر است. این نتیجه در تحقیقات مورفی (۱۹۹۹؛ ۲۰۰۰) و هلسترون و همکاران (۲۰۰۱) نیز به همین صورت برای مدل‌های دینامیکی بیان شده است. این محققان در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری توانایی بهتری در برآورد متغیرهای هواشناسی در ماه‌های سرد سال دارند. در این بین بهترین میزان برآورد مربوط به دو ماه فوریه و اوت است و توانایی مدل در برآورد میزان تبخیر تعرق پتانسیل برای ماه دسامبر به کمترین حد خود رسیده است. مدل در برآورد مقادیر سالانه تبخیر تعرق دقت مناسبی داشته است. اعمال پس پردازش روی داده‌های تاریخی، توانسته است به مقدار بسیار زیادی کارایی مدل در شبیه‌سازی تبخیر تعرق را افزایش دهد. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، در حالی که نمایه ناش - ساتکلایف قبل از

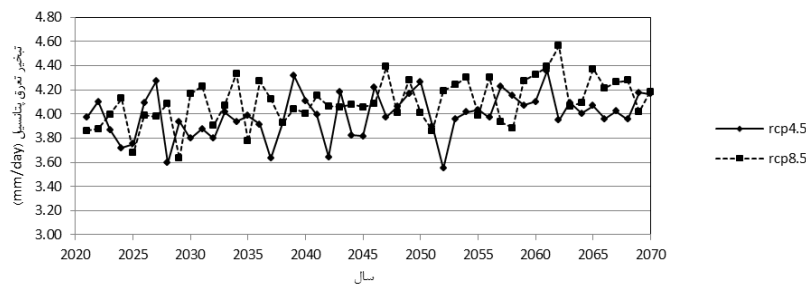
نزدیک ۱ باشد، مدل دارای کارایی مناسبی است. در شکل ۴، خم ROC برای دو ماه نمونه ژانویه و ژوئن به همراه خم سالانه نشان داده شده است. در شکل پیش گفته، روی هر یک از نمودارها بیشترین امتیاز مهارتی درج شده است. ملاحظه می شود که امتیاز مهارتی پس از اعمال پس پردازش آماری بهبود قابل ملاحظه ای یافته است. بیشترین امتیاز مهارتی برای حالتی است که پیش بینی در طبقه بیش از نرمال باشد و کمترین امتیاز مهارتی برای هنگامی است که تبخیر تعرق کمتر از نرمال پیش بینی شده باشد.

در قسمت دوم تحقیق، به منظور بررسی میزان تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در دشت مشهد، خروجی مدل های ریزمقیاس نمایی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تهیه و تغییرات این پارامتر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۷۰ بررسی شد. به منظور رعایت دستورعمل مجله حاضر و پرهیز از عرضه نمودارهای متعدد، صرفاً نمودارهای مربوط به تغییرات سالانه و دو ماه سرد و گرم ژانویه و ژوئن در شکل های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

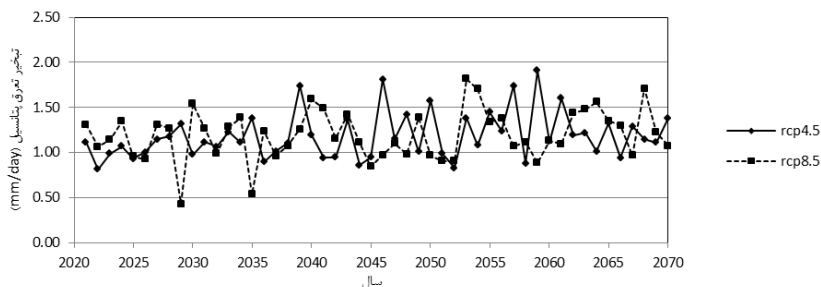
که هرچه به عدد ۱ نزدیک تر باشد به معنی توانایی بیشتر پیش بینی ها است. در شکل خم ROC، خط یک به یک به قطری با مقدار $ROC = 0.5$ برای حالتی است که پیش بینی مدل با پیش بینی احتمالاتی دوره آماری برابر است. در حالتی $ROC < 0.5$ آن گاه پیش بینی مدل قابل قبول نیست؛ اما در حالتی که $ROC > 0.5$ پیش بینی های مدل با مقادیر دیدبانی شده هماهنگ و قابل قبول است. در خم های ROC محور قائم پیش بینی های درست و محور افقی پیش بینی های نادرست را نشان می دهد (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۵). برای هر یک از مقادیر تبخیر تعرق قبل و بعد از پس پردازش آماری، جدول های توافقی تهیه شد و خم های ROC همه ماه ها و نیز خم های سالانه رسم شد. همچنین امتیاز مهارتی (ROC) که می تواند جزئیات دقیق تری از پیش بینی ها را به دست دهد، برای سه گروه از پیش بینی های کمتر از نرمال، نرمال و بیش از نرمال محاسبه شد. امتیاز مهارتی کمتر از ۰/۵ قابل قبول نیست؛ در حالتی که مقدار امتیاز مهارتی ۰/۵ باشد، مقادیر نرمال بلندمدت، جایگزین خوبی برای پیش بینی هستند؛ اما هنگامیکه امتیاز مهارتی



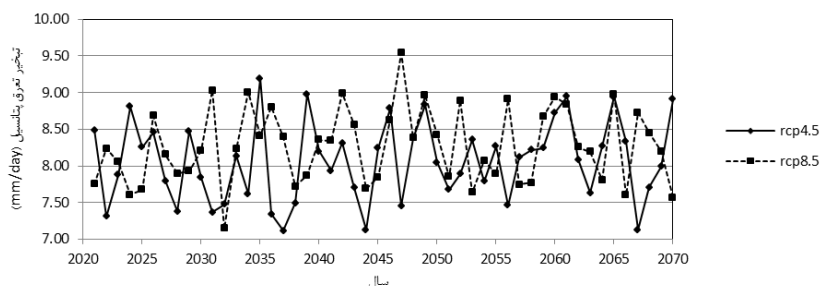
شکل ۴. خم ROC برای ماه ژانویه (سرد و مرطوب)، ژوئن (گرم و خشک) و سالانه. بالا: بدون اعمال پس پردازش و پایین: پس از اعمال پس پردازش. بیشترین امتیاز مهارتی روی نمودارها درج شده است.



شکل ۵. تغییرات میانگین سالانه تبخیر تعرق پتانسیل در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5



شکل ۶. تغییرات میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ماه ژانویه در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5



شکل ۷. تغییرات میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ماه ژوئیه در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

تعرق پتانسیل برآورد شده تحت سناریوی RCP8.5 بیش از مقدار تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوی RCP4.5 است. برخلاف این روند کلی، میزان تبخیر تعرق برآورد شده با مدل برای ماه سپتامبر تحت سناریوی RCP4.5 بیشتر از مقدار تبخیر تعرق پتانسیل برای همین ماه تحت سناریوی RCP8.5 است. همچنین نمودار اختلاف مقادیر برآورد شده تحت هر یک از دو سناریو به صورت تک‌قله‌ای بوده و قله آن در ماه‌های گرم سال است؛ بدین معنا که اختلاف برآورد این پارامتر تحت هر یک از دو سناریو در ماه‌های گرم سال به اوج خود رسیده است، در حالی که در ماه‌های سرد سال، برآوردهای حاصل شده تحت هر یک از دو سناریو اختلاف زیادی با

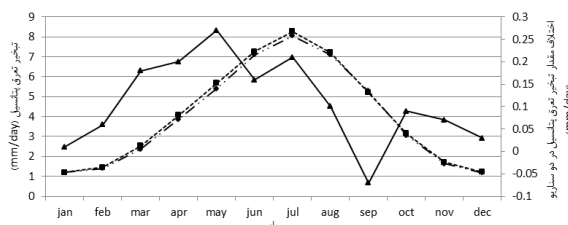
همان‌طور که در نمودارهای فوق مشخص شده است، در بیشتر نقاط، میزان تبخیر تعرق برآورد شده تحت سناریوی RCP8.5 بیش از مقدار تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده تحت سناریوی RCP4.5 است. به‌منظور نمایش بهتر این موضوع، مقادیر میانگین تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده برای هر یک از ماه‌های سال در دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ تحت هر یک از دو سناریوی تغییر اقلیمی محاسبه و در نمودار ۲۷ مقادیر میانگین تبخیر تعرق پتانسیل داده شده است. علاوه بر نمایش این دو خم، اختلاف مقدار برآورد شده تحت هر یک از سناریوها نیز محاسبه و به نام خم diff نشان داده شده است. همان‌طور که این خم نشان می‌دهد، مقدار تبخیر

یکدیگر ندارند.

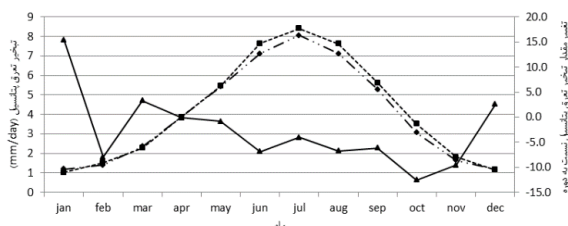
بیشترین مقدار کاهش تبخیر تعرق پتانسیل نیز در هر دو سناریو در ماه اکتبر رخ می‌دهد که مقدار آن در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، ۱۲/۵٪ و ۱۰/۰٪- است. علاوه بر این توضیحات در هر دو سناریو، ماه‌های سرد سال، نسبت به دوره پایه، معمولاً دچار افزایش میزان تبخیر تعرق پتانسیل می‌شوند اما همان‌طور که نشان داده شده است، میزان تغییرات این پارامتر نسبت به دوره پایه در ماه‌های گرم سال کاهشی است و کمتر شدن تبخیر تعرق پتانسیل نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. این موضوع به این صورت قابل توجیه است که با افزایش دما در طول سال، دمای ماه‌های سرد نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های سرد سال می‌شود؛ حال آنکه از طرف مقابل با افزایش دما در ماه‌های سرد سال و نیز کاهش میزان بارندگی در طول سال، توان بالقوه محیط در تبخیر تعرق پتانسیل کاهش می‌یابد، لذا شاهد کاهش میزان تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های گرم سال خواهیم بود.

به منظور بررسی میزان تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در دوره آینده (۲۰۲۱ - ۲۰۷۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵) دو شکل ۸ و ۹ رسم شده است. در هر یک از این دو شکل سه نمودار دیده می‌شود که یک نمودار مربوط به مقادیر مشاهده شده در دوره پایه (obs)، نمودار دوم مربوط به مقادیر میانگین تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده در دوره آینده تحت هر یک از دو سناریو تغییر اقلیمی (rcp8.5 و rcp4.5)، و در نهایت نمودار سوم مربوط به نسبت تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در دوره آینده به دوره پایه برحسب درصد (dif4.5 و dif8.5) است.

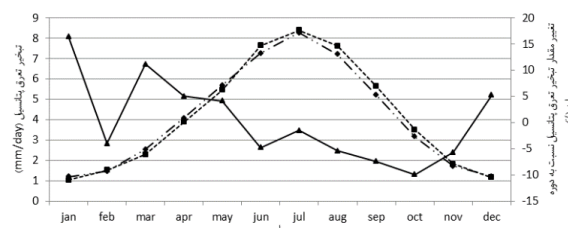
با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹، بیشترین میزان افزایش تبخیر تعرق پتانسیل نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو در ماه ژانویه رخ می‌دهد که مقدار تغییرات آن تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۵/۴٪ و ۱۶/۴٪ است. همچنین



شکل ۸. میانگین ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۷۰ در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و اختلاف مقادیر برآورد شده سناریوها



شکل ۹. میانگین ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل مشاهده شده (obs) و برآورد شده تحت سناریوی RCP4.5 (rcp4.5) و اختلاف این دو مقدار با یکدیگر (dif4.5)



شکل ۱۰. میانگین ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل مشاهده شده (obs) و برآورد شده تحت سناریوی RCP8.5 (rcp8.5) و اختلاف این دو مقدار با یکدیگر (dif8.5)

۴. نتیجه گیری

مدل مورد استفاده در تحقیق حاضر مدل دینامیکی مرکز هواشناسی و آب‌شناسی سوئد (SMHI) است. خروجی‌های ریزمقیاس شده این مدل برای دشت مشهد در دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵) در ماه‌های گرم سال بیشترین هماهنگی را با داده‌های واقعی دارد. به منظور بررسی همبستگی مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده، پس از تهیه داده‌های خروجی از مدل ریزمقیاس‌نمایی با تفکیک مکانی ۰/۲۲ درجه و تفکیک زمانی روزانه، مقادیر میانگین ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه و پس از اعمال پس پردازش، مقادیر پس پردازش شده با مقادیر مشاهده شده مقایسه شد. نتایج حاصل از این قسمت نشان‌دهنده ۹۳ و ۹۲٪ همبستگی بین این دو مقدار به ترتیب در ماه‌های فوریه، مه و اوت بود. از طرف مقابل، کمترین همبستگی در ماه دسامبر با ضریب همبستگی ۷۵٪ مشاهده شد. همچنین پس از اجرای آزمون مقایسه میانگین t بار دیگر نتیجه قبل در ارتباط با توانایی قابل قبول مدل در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل ماه‌های گرم سال تأیید شد. نتایج قسمت دوم تحقیق که مربوط به بررسی میزان تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در دوره آینده (۲۰۲۱ - ۲۰۷۰) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱ - ۲۰۰۵) بود، بیانگر افزایش تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های سرد سال نسبت به دوره پایه و کاهش تبخیر تعرق پتانسیل در ماه‌های گرم سال نسبت به دوره پایه بود. میزان افزایش تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوی RCP8.5 بیش از سناریوی RCP4.5 و میزان کاهش این پارامتر در ماه‌های گرم سال تحت سناریوی RCP4.5 بیش از مقدار کاهش آن تحت سناریوی RCP8.5 به دست آمد؛ به گونه‌ای که مقدار تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در ماه ژانویه، تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۵/۴٪ و ۱۶/۴٪ افزایش و در ماه اکتبر ۱۲/۵٪ - و ۱۰/۰٪ - کاهش نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از طرح پژوهشی شماره ۷۳۱۴۸۱۶۰/۰۱/۰۳ دانشگاه تهران می‌باشد که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

آزادی، م.، شیرغلامی، م. و حجام، س.، ۱۳۸۹، پس پردازش برون داد مدل WRF برای بارندگی در ایران، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران. بابائیان، ا. و کوهی، م.، ۱۳۹۱، ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۴)، ۹۶۷-۹۵۳.

بابائیان، ا.، نجفی نیک، ز.، زابل عباسی، ف.، حبیبی نوخندان، م.، ادب، ح. و ملبوسی، ش.، ۱۳۸۸، ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، م. جغرافیا و توسعه، ۱۶، ۱۳۵-۱۵۲.

بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر. و بیاتانی، ف.، ۱۳۹۵، کارایی روش‌های پس پردازش آماری در بهبود پیش‌بینی بارش ماهانه مدل MRI-CGCM3 در خراسان رضوی. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۲(۲): ۸۳-۹۲

خیراندیش، م.، قهرمان، ن. و بذرافشان، ج.، ۱۳۹۲، بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر طول فصل رشد در چشم‌انداز ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ در چند نمونه اقلیمی ایران، تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۴(۲)، ۱۵۰-۱۴۳.

قربانی، ق.، ذاکری نیا، م. و هزارجریبی، الف.، ۱۳۹۲، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی سویا در منطقه گرگان، هواشناسی کشاورزی، ۲(۱)، ۶۰-۷۲.

قهرمان، ن.، بابائیان، ا. و موسوی، م.، ۱۳۹۳، بررسی مهارت مدل RegCM در برآورد تبخیر تعرق پتانسیل

موردی: ایستگاه مشهد، م. ژئوفیزیک ایران، ۸(۴):
۴۹-۶۴.

در اقلیم گذشته و دوره ۲۰۲۱ - ۲۰۳۵، بررسی

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper, 56, FAO, Rome, 300(9).
- Christensen, O. B., Gutowski, B., Nikulin, G. and Legutke, S., 2012, CORDEX Archive Design. version 26/1/2012.
- Ebrahimpour, 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, 04013012 .
- Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G. R., 2009, Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175-183.
- Ghahreman, N., Babaeian, I. and Tabatabaei, M. R., 2015, Investigation of uncertainty in the IPCC AR5 precipitation and temperature projections over Iran under RCP scenarios, *Proc. Common future under climate Change Conference*, 7-10 July, 2015.Paris.
- Hellstrom, C., Chen, D., Achberger, C. and Raisanen, J., 2001, Comparison of climate change scenarios for Sweden based on statistical and dynamical downscaling of monthly precipitation, *Climate Research*, 19(1), 45-55.
- Murphy, J., 1999, An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, 12(8), 2256-2284.
- Murphy, J., 2000, Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques, *International Journal of Climatology*, 20(5), 489-501.
- Taylor, K. E., Ronald J. S. and Gerald A. M., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498. doi:<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- WMO, 2002, *Manual on the GDPS, Vol.1, Standardised Verification System(SVS) for Long-Range Forecasts(LRF)*, 24pp.(Available at: <http://clima1.cptec.inpe.br/gpc/pdf/svs.pdf>)

Evaluation the post processed outputs of dynamic models in estimation potential evapotranspiration changes under RCP scenarios (Case Study: Mashhad plain)

Ghahreman, N.^{1*}, Babaeian, I.² and Tabatabaei, M.³

1. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Climate Change Group, Climatological Research Institute, Mashhad, Iran

3. Ph.D. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 25 Nov 2015, Accepted: 14 Jun 2016)

Summary

As a direct consequence of warmer temperatures, the hydrologic cycle will undergo significant impact with accompanying changes in the rates of precipitation and evaporation. Climate change will cause changes in climate variable such as precipitation, temperature, sunshine hours, wind speed and etc. So as a result of climate variable change, the related variable such as potential evapotranspiration will change too. As the soft computing skills increased in recent decades, more number of climate models has been developed for weather and climate predictions which have significantly improved the quality and quantity of projections. This notable increase in number of climate models has enabled the scientists to estimate a wide range of main climate variables such as precipitation and temperature in fine temporal and spatial resolutions. Although the uncertainty in model outputs still remains a main challenge. Upon the release of new scenarios based on radiative forcing which are known as Representative Concentration Pathway scenarios (RCP scenarios), by Intergovernmental panel on climate change (IPCC) in fifth assessment report (AR5), a new set of 42 global climate models (GCMs) have been proposed for future climate projections. Apart from increased number of available models, three main sources of uncertainty including: measurement error, variability, and model structure, that have been explained and studied in AR5. The aim of the current study is to investigate of changes of potential evapotranspiration (ET) over Mashhad plain, Northeast of Iran in future period 2021-2070 under two RCP scenarios i.e. RCP4.5 and RCP8.5. The main synoptic station in the region is Mashhad Station located at 59° 38'E, 36° 18'N, with elevation of 990 m. above M.S.L. The required meteorological data including maximum and minimum temperature, sunshine hours, wind speed for period of 1991 to 2005 were obtained from Iran Meteorological Organization for ET calculation using FAO Penman-Monteith (hereafter, FAO-PM) equation. Besides, the downscaled historical data of potential evapotranspiration provided by Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) have been retrieved for the baseline period of 1991-2005. Then these historical estimated data were compared with those estimated using FAO-PM equation. The historical ET values were post-processed using a statistical proposed method for more accuracy. By completion of this part, the accuracy of historical dataset provided by SMHI was confirmed and used for further comparisons. In the second section the ET variations for future period of 2021 to 2070 under two RCP scenarios of 4.5 and 8.5 was studied. The results showed better estimation of ET during warm months. Statistical comparisons using T-test revealed significant differences between historical and estimated values of ET in months of February, March and December. The correlation coefficient between post processed and observed data showed similar results as in T-test. Since the historical dataset of potential evapotranspiration provided by SMHI was acceptable, it was used for the analysis during future period (2021-2070) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios compared to baseline observed data. The result of this part showed that the highest increase of potential evapotranspiration would be for January by 15.4% and 16.4% under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios respectively and October would experience lowest decrease by -12.5% and -10.0% decrease, respectively. In general ET increase will be more under RCP 8.5 scenario comparing to RCP 4.5

Keywords: Potential evapotranspiration, Climate change, RCP scenarios, Mashhad.