

استفاده از مدل SIMETAW جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق

پتانسیل (مطالعه موردی: مشهد)

میثم ابراهیم پور^۱، نودر قهرمان^{۲*} و عبدالمجید لیاقت^۳^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد^۲ استادیار و^۳ استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۷/۲۹)

چکیده

مدل‌های متعددی بمنظور شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی با رهیافت‌های گوناگون توسعه یافته‌اند، که دقت آنها در تولید داده‌های هواشناسی یکسان نیست. در این مطالعه از مدل SIMETAW جهت تولید داده‌های هواشناسی روزانه از روی متوسط‌های بلند مدت ماهانه و نیز برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در دوره پایه ۲۰۰۴-۱۹۶۱ و دو سناریوی اقلیمی انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 و B2 از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 برای دو دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۵۰-۲۰۸۰ در ایستگاه مشهد استفاده شد. نتایج مقایسه مقادیر روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در دوره پایه قابلیت مناسب مدل در شبیه‌سازی دمای حداقل ($R^2 = 0/979$)، دمای حداکثر ($R^2 = 0/991$)، دمای نقطه شبنم ($R^2 = 0/789$)، سرعت باد ($R^2 = 0/798$)، بارش ($R^2 = 0/452$) و تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه ($R^2 = 0/991$) را نشان داد. تبخیر-تعرق پتانسیل به طور متوسط در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۵۰-۲۰۸۰ به ترتیب ۵/۳۵ و ۱۰/۴۹ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی A2 و ۳/۵۴ و ۸/۰۸ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی B2 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. در مجموع، این مدل جهت برآورد تبخیر-تعرق، تکمیل خلاءهای آماری داده‌ها و بررسی اثرات تغییر اقلیم قابل توصیه است. برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، مدل بایستی در سایر اقلیم مورد ارزیابی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، تغییر اقلیم، داده روزانه، ریزمقیاس نمایی، مولد داده

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی کاربردهای فراوانی دارند؛ از جمله این کاربردها می‌توان تکمیل و بازسازی خلأهای آماری در ایستگاه‌های فاقد داده‌های باکیفیت، تولید داده‌های درازمدت در شرایط محدودیت دسترسی به آمار درازمدت هواشناسی و حتی شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی در شرایط محتمل اقلیم آینده بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم را نام برد (Ghamghami et al, 2006; 2010). این مدل‌ها، در مطالعات هیدرولوژی، اکولوژی، زراعی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب که در آنها نیاز به سری‌های طولانی مدت متغیرهای هواشناسی به عنوان ورودی مدل می باشد، از اهمیت برخوردار است (Hoogenboom, 2000). هدف از تولید مولدهای وضع هوا، تولید داده‌هایی است که به لحاظ آماری مشابه داده‌های مشاهده شده باشند. این مولدها با استفاده از ویژگی‌های آماری داده‌های تاریخی کوتاه مدت، سری داده‌های مصنوعی بلند مدت تولید می‌کنند (Safeeq and Fares, 2011).

این مدل‌ها در دو دسته اصلی پارامتری و ناپارامتری طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های پارامتری و ناپارامتری برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفت (Nicks and Harp, 1981; Richardson and Wright, 1984; Semenov and Barrow, 1997; Sharif and Safeeq Burn, 2007; Bannayan and Hoogenboom, 2008) and Fares (۲۰۱۱) در ارزیابی مدل پارامتری ClimGen در شبیه‌سازی مقادیر روزانه دما، بارش و سرعت باد در چهار حوضه با اقلیم حاره‌ای نتیجه گرفتند که این مدل در شبیه‌سازی سرعت باد، دمای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه دارای کارایی مناسبی است و در ۷۴٪ موارد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کمتر از 2°C گزارش شد؛ ولی در مورد بارش، نتایج مدل به وضوح دارای کم برآورد مقادیر حدی است. مدل‌های پارامتری و ناپارامتری نزدیک‌ترین همسایه اقلیمی مختلف ایران نیز ارزیابی شده‌اند (Ghahreman et al., 2009; Ghamghami et al., 2010; Bazrafshan et al., 2009) Bazrafshan et al. (2009) دو مدل LARS-WG و ClimGen را از نظر تولید داده‌های روزانه مجموع بارندگی، دمای حداقل و حداکثر هوا و تابش کلی خورشید در ۱۵ نمونه اقلیمی مختلف

* پست الکترونیک مکاتبه کننده: nghahreman@ut.ac.ir

مدل‌های ریزمقیاس نمایی GCMها می‌تواند ورودی‌های مورد نیاز مدل SIMETAW را فراهم کند و شبیه‌سازی تبخیر-تعرق تحت تاثیر تغییر اقلیم ممکن می‌گردد (Peterson et al., 2006). پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، بعنوان یک تهدید جدی برای بشر در قرن حاضر بحساب می‌آید. گرمایش جهانی شرایط خشکی را در نواحی خشک جهان با افزایش پتانسیل تبخیر-تعرق و افزایش بیابان زدایی تشدید خواهد کرد (Goyal, 2004). این شرایط در ایران نیز پیش‌بینی می‌شود (Soleymani, 2011). Nanadegani et al., 2011، برای مثال در حوضه کشف‌رود میزان تبخیر-تعرق محاسبه شده برای تمامی ماه‌ها و برای تمامی دوره‌های آبی تحت تأثیر افزایش دما، افزایش را نشان می‌دهد (Alizadeh et al., 2010). کارآمدترین و معتبرترین ابزار جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) هستند که توان شبیه‌سازی پارامترهای جوی را با فرضیات موجود در سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (SRES) دارند (IPCC, 2000). از آنجا که خروجی‌های مدل‌های GCM برای استفاده مستقیم در مطالعات منطقه‌ای و مقیاس‌های کوچک در حد ایستگاهی کارایی لازم را ندارند، در این مطالعه از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM (Statistical Downscaling Model) (Wilby et al., 2002) نسخه 4.2 که در سال ۲۰۰۸ توسعه یافته است، و خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 استفاده شد.

اهداف تحقیق حاضر در دو بخش زیر خلاصه می‌شوند:

الف) ارزیابی توان شبیه‌سازی مدل SIMETAW برای متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای نقطه شبنم، بارش و سرعت باد در مقیاس روزانه و تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه در دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۴ در ایستگاه مشهد.

ب) ریزمقیاس نمایی پنج متغیر فوق با استفاده از مدل SDSM و بکارگیری خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 در ایستگاه مشهد و کاربست مجدد مدل SIMETAW برای بدست آوردن تبخیر-تعرق پتانسیل در دو دوره آبی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶/۱۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹/۳۸ درجه شرقی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود از زیر حوضه‌های بزرگ قره‌قوم بوده و در شمال غربی استان خراسان رضوی واقع است. اقلیم منطقه در سیستم دومازن گسترش‌یافته در دسته نیمه خشک- سرد

کشور مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که LARS-WG در تولید داده‌های بارندگی و ClimGen در شبیه‌سازی دماهای حداکثر و حداقل نتایج بهتری بدست می‌آورند. روش‌ها و مدل‌های مذکور در بکارگیری مستقیم خروجی‌های شبیه‌سازی شده بمنظور تخمین پارامترهای ترکیبی دیگر، از جمله تبخیر-تعرق مرجع و نیاز آبی گیاه دارای ضعف هستند.

تبخیر و تبخیر-تعرق بعد از بارش اصلی‌ترین اجزاء چرخه آبشناسی هستند که نیاز آبی گیاه را مشخص می‌کنند. فاکتورهای اصلی که بر تبخیر-تعرق گیاه تاثیر دارند، وابسته به چندین متغیر اقلیمی نظیر دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، بارش و ... هستند. در کشور ایران بیش از ۹۰٪ آب مصرفی را بخش کشاورزی بخود اختصاص می‌دهد؛ در این شرایط، مدیریت صحیح آب مزرعه و استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی لازم است (Panahi et al. 2006). برای تعیین مقدار تبخیر-تعرق گیاهان در مزرعه، محققان و پژوهندگان زیادی روش‌ها و مدل‌های متعددی ارائه کرده‌اند (Majnuni heris, 2007). اما با کمبود داده معتبر و طولانی مدت در برخی ایستگاه‌ها، بکارگیری مدلی که با داده‌های اندک نیاز ما را برآورده نماید و بتواند به کمک برنامه ریزان این بخش بیاید ضروری به نظر می‌رسد. در همین راستا استفاده از مدل SIMETAW (SIMulation of ET of Applied Water) برای برنامه‌ریزی آب کشاورزی در سطح جهان به سرعت در حال گسترش است. این مدل در گروه‌های اقلیم و مدیریت آب در سازمان ملل، سازمان غذا و کشاورزی (FAO) ارائه شده است. این مدل تاکنون در کشورهایی مانند آمریکا (ایالت کالیفرنیا) (Snyder et al., 2004)، چین (Jin-Li, 2009) و مصر (Swelam et al., 2010) ارزیابی شده است.

در کشور مصر، شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، تبخیر-تعرق پتانسیل و نیاز آبیاری گیاه (ET_{aw}) با مدل کامپیوتری SIMETAW در شرایط دلتای رود نیل انجام شد. در این تحقیق پس از واسنجی مدل با داده‌های ثبت شده ۱۰ سال اخیر در دو نقطه از حوضه رود نیل، نیاز آبیاری (ET_{aw}) برای این حوضه مدل شد. نتایج نشان داد که مدل SIMETAW دارای دقت خوبی در شبیه‌سازی داده‌های اولیه لازم برای محاسبه تبخیر-تعرق و هم‌چنین دارای توانایی و دقت بالایی در شبیه‌سازی طولانی مدت تبخیر-تعرق دارد. با در نظر گرفتن تغییرات احتمالی اقلیم در آینده، این مدل می‌تواند برای سیاست‌گذاران بخش آب برای بروز رسانی مقادیر تبخیر-تعرق و ضرایب گیاهی در واکنش به تغییر اقلیم مفید و کارآمد باشد (Swelam et al., 2010). ترکیب مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و

مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت SIMETAW بر اساس ورودی‌هایی که کاربر تعریف می‌کند، یک برنامه‌ریزی آبیاری مناسب را برای گیاه و خاک تعیین می‌کند. این روند می‌تواند برای تعداد زیادی ترکیبات گیاه و خاک با شرایط یکسان از نظر تبخیر-تعرق پتانسیل تکرار شود. مدل تعیین می‌کند چه زمانی و چه میزان آب باید برای شرایط مشخص داده شود. بیلان روزانه آب برای برنامه ریزی آبی دقیق، مفید است؛ زیرا زمان اولین و آخرین آبیاری را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که محتوای رطوبتی خاک در طول دوره زندگی گیاه در شرایط مناسب باشد. داده‌های بارش روزانه شبیه‌سازی شده، مشخصه‌های نگهداشت آب، عمق مؤثر ریشه و تبخیر-تعرق گیاهی برای تخمین بارش مؤثر و تولید برنامه زمان‌بندی آبیاری فرضی استفاده می‌شود. و در نهایت ET_{aw} به عنوان میزان آب مورد نیاز آبیاری برای گیاه در طول دوره زندگی گیاه و در مقیاس روزانه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$ET_{aw} = CET_c - CEr \quad (1)$$

که در این رابطه، CET_c تبخیر-تعرق تجمعی (Cumulative ET_c) گیاه، CEr بارش مؤثر تجمعی (Cumulative Er) قرار گرفته در اختیار گیاه می‌باشد.

شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی

بارش

مشخصه‌ها و الگوهای بارش به شدت متأثر از فصل و منطقه مورد نظر است، بدست آوردن یک الگوی عمومی فصلی که برای تمام مکان‌ها قابل استفاده باشد بسیار دشوار است (Snyder et al., 2004). با علم به این موضوع که الگوهای فراوانی بارش دارای یک چولگی به راست هستند و وقوع یا عدم وقوع بارش در روز قبل بر بارش در روز جاری تأثیرگذار است؛ از یک رهیافت مشترک توزیع احتمالی گاما و مدلسازی زنجیره مارکوف دو حالت درجه اول استفاده می‌شود (Richardson and Wright, 1984). هرچند برای بدست آوردن پارامترهای مدل‌های مذکور به داده‌های روزانه بلندمدت نیاز است، مدل SIMETAW مقادیر متوسط ماهانه بارش و متوسط تعداد روزهای بارانی ثبت شده در هر ماه برای بدست آوردن پارامترهای توزیع گاما و مدل زنجیره مارکوف را مورد استفاده قرار می‌دهد.

سرعت باد

در شبیه‌سازی داده‌های روزانه سرعت باد از فرآیند ساده-تری استفاده می‌شود. در اینجا فقط از تابع توزیع گاما استفاده می‌شود. هرچند توزیع گاما مقادیر حدی باد را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، اما یک تمایل به سمت بیش‌برآورد در مقادیر

قرار می‌گیرد. متوسط دمای حداکثر سالانه ایستگاه $20/9^{\circ}C$ و دمای حداقل سالانه $6/7^{\circ}C$ می‌باشد و متوسط بارش سالانه $256/4$ میلی‌متر می‌باشد.

در این تحقیق از آمار متوسط ماهانه ایستگاه سینوپتیک مشهد (از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۴) که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردیده است برای اجرای مدل SIMETAW استفاده گردید. از داده‌های روزانه دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و بارش این ایستگاه نیز برای مقایسه متغیرهای روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده گردید. از داده‌های روزانه دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ نیز بعنوان دوره پایه ریزمقیاس نمایی در مدل SDSM استفاده شد و داده‌های شبکه‌بندی بزرگ‌مقیاس NCEP برای همین دوره پایه برای طول و عرض مربوط به ایستگاه مشهد ($X=16, Y=20$) بمنظور واسنجی ضرائب مدل رگرسیونی ریزمقیاس نمایی به‌مراه خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 نیز برای منطقه مورد مطالعه از شبکه‌بندی مخصوص مدل HadCM3 ($3.75^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) از اینترنت دریافت گردید.

مدل SIMETAW

مدل SIMETAW v.1.0 با همکاری دانشگاه دیویس کالیفرنیا (UCD) و بخش منابع آب ایالت کالیفرنیا (DWR) در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این برنامه به هدف کمک به برنامه‌ریزان بخش آب برای تخمین دقیق میزان آب مصرفی برای تولید محصول در یک منطقه دارای حداقل داده، طراحی و تهیه شده است. SIMETAW می‌تواند با داده‌های واقعی روزانه یا با داده‌های روزانه تولید شده بوسیله بخش مولد داده درون برنامه اجرا شود. زیربرنامه مولد داده می‌تواند در بررسی اثرات احتمالی تغییر اقلیم در آینده بر روی متغیرهای اقلیمی و بخصوص نیاز آبی بکار گرفته شود. مدل قادر است به هر تعداد سری زمانی تصادفی با طول مشخص شده توسط کاربر داده روزانه تولید کند. سپس این داده‌ها در محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه به روش پنمن-مانتیت اصلاح شده (Allen et al., 1999) بکار گرفته می‌شوند و ضرائب گیاهی موجود در مدل برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاهی استفاده می‌شوند و در این مورد نیز مقادیر روزانه تولید می‌شود. در صورتی که فقط داده‌های دما در دست باشد، با تعریف کاربر، مدل از روش هارگریوز - سامانی برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. مشخصات گیاه و خاک (از جمله نگهداری آب، عمق ریشه، نوع گیاه و ...) نیز در یک بخش مجزا به مدل معرفی و در قالب خاصی ذخیره می‌شوند که برای محاسبات تبخیر-تعرق واقعی بکار گرفته می‌شوند. این ویژگی‌ها به‌مراه تبخیر-تعرق محاسبه شده در قسمت قبل برای تخمین بیلان روزانه آب در خاک

متغیرهای بزرگمقیاس NCEP و GCM مشابه است). در تحقیق حاضر از داده‌های مدل گردش عمومی جو معروف HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 استفاده شد.

مراحل کار با مدل SDSM را می‌توان بترتیب در قسمت‌های زیر خلاصه نمود:

- کنترل کیفیت، بررسی آماری و تبدیل داده‌ها
- انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده صحیح
- واسنجی مدل رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌ای و NCEP
- تولید مجدد داده‌های تاریخی بمنظور ارزیابی مدل واسنجی شده

- آنالیز داده‌ها

- تولید سناریوهای اقلیمی

متوسط ماهانه خروجی‌های اقلیمی ریزمقیاس شده در دو دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ بعنوان ورودی‌های مدل SIMETAW قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از تبخیر-تعرق محاسبه شده در دو دوره آتی با دوره پایه مقایسه گردید و تغییرات آن نشان داده شد.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهده شده

به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی داده‌های روزانه دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و بارش بوسیله مدل SIMETAW با مقادیر مشاهده شده روزانه از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق (d) که از روابط زیر بدست می‌آیند، استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - o_{avg}| + |o_i - o_{avg}|)^2} \quad (4)$$

که در این روابط، N تعداد کل داده‌ها، p_i و o_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده میانگین مقادیر مشاهده شده هستند. برای هر یک از متغیرها نیز متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در کنار هم ترسیم شد. در مورد متغیر تبخیر-تعرق پتانسیل نیز بررسی‌ها به صورت ماهانه انجام شد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی مقادیر روزانه متغیرهای هواشناسی

بمنظور ارزیابی توان شبیه‌سازی مدل SIMETAW سری زمانی تصادفی ۳۰ ساله داده شبیه‌سازی شده به‌طور روزانه میانگین‌گیری شد و در مقابل متوسط روزانه دوره تاریخی ۲۰۰۴-۱۹۶۱ ترسیم گردید. مقادیر مشاهده شده بعنوان متغیر

تولیدی سرعت باد مورد استفاده برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل وجود دارد. برای رفع این مشکل، یک حد فوقانی برای مقادیر شبیه‌سازی شده سرعت باد در نظر گرفته می‌شود.

دما، تابش خورشیدی و رطوبت

داده‌های دما، تابش و رطوبت اصولاً از توزیع سری فوریه پیروی می‌کنند. بنابراین مدل رفتار این متغیرها را به شکل زیر بیان می‌نماید:

$$X_{ki} = \mu_{ki} (1 + \delta_{ki} C_{ki}) \quad (2)$$

که در این رابطه، $k=1$ بیانگر دمای حداکثر، $k=2$ بیانگر دمای حداقل و $k=3$ تابش را نشان می‌دهد. μ_{ki} میانگین روزانه تخمین زده شده، C_{ki} ضریب تغییرات روزانه تخمین زده شده برای i امین روز، $i=1, 2, \dots, 365$ و برای k امین متغیر از بین متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش می‌باشد. تعداد سال‌های شبیه‌سازی توسط کاربر تعیین می‌شود، که در این مطالعه ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. سپس متوسط روزانه داده‌های شبیه‌سازی شده محاسبه و با متوسط روزانه داده‌های مدت مشاهده‌ای از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۴ مقایسه شد.

مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM

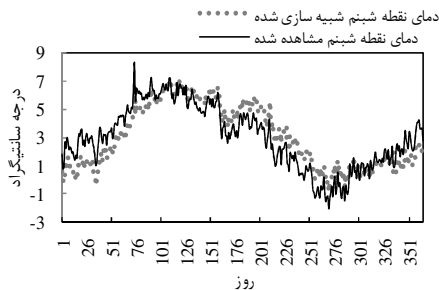
Wilby et al. (2002) اولین مدل رایانه‌ای را برای انجام کاهش مقیاس خروجی‌های مدل گردش عمومی جو با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره به نام SDSM ارائه کردند. این مدل از روش‌های آماری رگرسیونی و تصادفی به منظور عملیات ریزمقیاس نمودن استفاده می‌کند. برتری این مدل نسبت به مولد داده‌های هواشناسی این است که مدل خروجی‌های مدل GCM را به طور مستقیم در فرایند تولید سناریوی اقلیمی به کار می‌بندد. در طبقه‌بندی مدل‌های ریز مقیاس نمایی، SDSM بعنوان یکی از موثرین مدل‌های ترکیبی که شامل روش‌های مولد تصادفی داده‌های هواشناسی و روش‌های تابع تبدیل و رگرسیون می‌باشد، شناخته شده است. این مدل براساس سری داده‌های روزانه محلی و داده‌های بزرگمقیاس بازتحلیل شده NCEP (National Center for Environmental Prediction) تنظیم و واسنجی (Calibration) می‌شود و پس از آن با استفاده از متغیرهای بزرگمقیاس جوی مدل‌های گردش عمومی، داده‌های هواشناسی محلی برای دوره پایه و آینده شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای کوچک-مقیاس محلی و متغیرهای بزرگ-مقیاس جوی از داده‌های مستقل مشاهده‌ای استفاده می‌کند. اساس کار این مدل برقراری رابطه رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه و داده‌های NCEP و تعمیم این رابطه برای داده‌های GCM در کل بازه شبیه‌سازی (۲۰۹۹-۱۹۶۱) و تولید داده بر اساس GCM در مقیاس مکانی در حد ایستگاه می‌باشد (شبکه‌بندی و نوع

مربوط به این متغیرها نیز بخوبی دیده می‌شود؛ هر چه مقادیر ضریب زاویه به یک نزدیک‌تر باشد حاکی از نزدیکی بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده دارد. در شبیه‌سازی سرعت باد روزانه، از آنجایی که فقط از توزیع گاما با یک حد بالا برای جلوگیری از تولید مقادیر پرت استفاده می‌شود، مدل نوسانات شدید روزانه را نمی‌تواند بخوبی مدل کند، هرچند رژیم تغییرات سالانه بخوبی شبیه‌سازی شده است؛ در واقع مقادیر شبیه‌سازی شده در حد متوسط مقادیر مشاهده شده نوسان دارند (شکل ۴). ضعیف‌ترین شبیه‌سازی مربوط به متغیر بارش روزانه است ($R^2 = 0/452$). در همه مدل‌های شبیه‌سازی، مدل کردن بارش دشوارترین مرحله به حساب می‌آید (Swelam, 2010). از طرفی عدم وجود بارش چشمگیر در زمان طولانی از سال در ایستگاه مورد مطالعه نیز فرایند شبیه‌سازی را دشوارتر می‌کند. با این حال در دوره با بارش بیشتر، مدل با دقت بیشتری عمل می‌کند (شکل ۵).

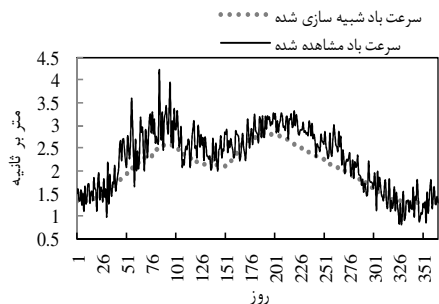
وابسته و مقادیر شبیه‌سازی شده بعنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. همانطور که از نتایج ارائه شده در جدول (۱) مشخص می‌شود، مطابق انتظار، مدل در شبیه‌سازی دمای حداکثر دارای بالاترین ضریب تبیین و شاخص توافق بترتیب ۰/۹۹۷۷ و ۰/۹۹۹۱ می‌باشد که مقادیری نزدیک به یک هستند و از طرفی، شیب خط رگرسیون نیز که مقداری نزدیک به یک را داراست (۰/۹۹۴) نتایج مناسبی را نشان می‌دهند. نمودار رژیم تغییرات دمای حداکثر مشاهده شده نشان می‌دهد که این متغیر قانونمندی بیشتری نسبت به سایر متغیرها دارد و تغییرات از یک روز به روز دیگر دارای نوسان کمتری است که منتج به بهترین شبیه‌سازی‌ها شده است (شکل ۲). در کل، مدل در شبیه‌سازی متغیرهای دمایی قدرت بالایی دارد؛ توضیحات ذکر شده برای دمای حداکثر، برای دمای حداقل و با دقت کمتری برای دمای نقطه شبنم نیز صادق است (شکل‌های ۱ و ۳). این امر از ضریب زاویه‌های بدست آمده از معادلات رگرسیونی

جدول ۱- معادلات رگرسیون و آماره‌های مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده

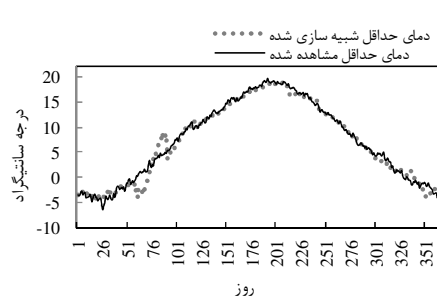
متغیر وابسته Y	متغیر مستقل X	معادله رگرسیون	ضریب تبیین R ²	RMSE	d
دمای حداقل مشاهده شده	دمای حداقل شبیه‌سازی شده	$y = 0/985x + 0/223$	۰/۹۷۹	۱/۱۲۱	۰/۹۹۴۷
دمای حداکثر مشاهده شده	دمای حداکثر شبیه‌سازی شده	$y = 0/994x + 0/272$	۰/۹۹۱	۰/۹۲۵۹	۰/۹۹۷۷
دمای نقطه شبنم مشاهده شده	دمای نقطه شبنم شبیه‌سازی شده	$y = 0/909x + 0/245$	۰/۷۸۹	۱/۰۴۳۶	۰/۹۴۱۶
سرعت باد مشاهده شده	سرعت باد شبیه‌سازی شده	$y = 1/226x - 0/209$	۰/۷۹۸	۰/۴۳۲	۰/۸۸۰۶
بارش مشاهده شده	بارش شبیه‌سازی شده	$y = 0/602x + 0/275$	۰/۴۵۲	۰/۶۱۷۵	۰/۸۰۹۸



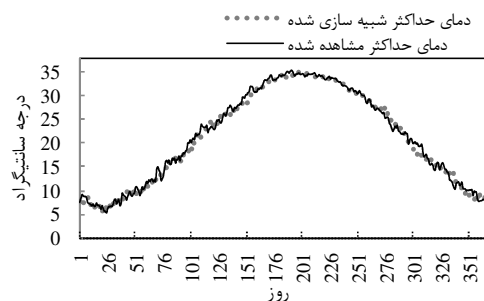
شکل ۳- مقایسه دمای نقطه شبنم روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SIMETAW



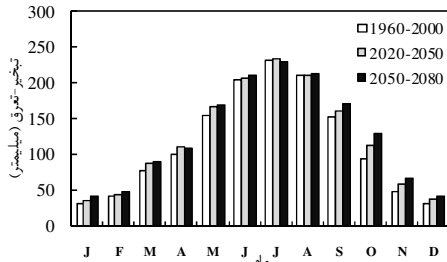
شکل ۴- مقایسه سرعت باد روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SIMETAW



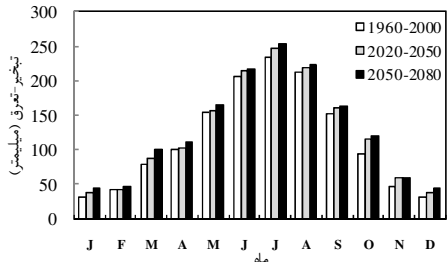
شکل ۱- مقایسه دمای حداقل روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SIMETAW



شکل ۲- مقایسه دمای حداکثر روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SIMETAW

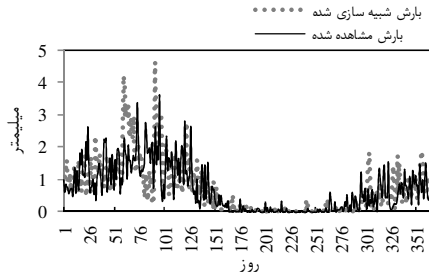


شکل ۷- تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه در ایستگاه مشهد تحت سناریوی A2 از مدل HadCM3 در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۶۰ و دو دوره آتی



شکل ۸- تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه در ایستگاه مشهد تحت سناریوی B2 از مدل HadCM3 در دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۶۰ و دو دوره آتی تغییرات تبخیر-تعرق تحت تاثیر تغییر اقلیم

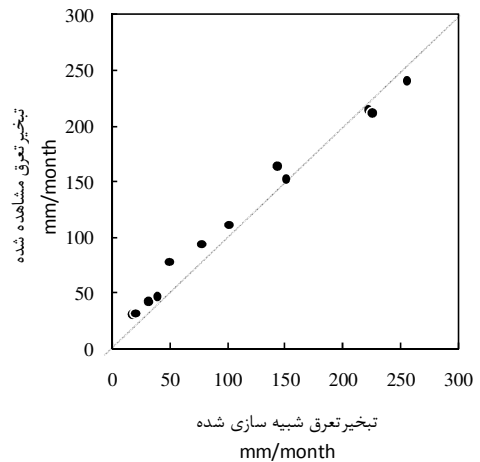
متوسط ماهانه متغیرهای ریزمقیاس شده در دو دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ بعنوان ورودی به مدل SIMETAW معرفی شد. بمنظور ریزمقیاس نمایی متغیرهای هواشناسی مدل SDSM که یکی از پرکاربردترین مدل‌های ریزمقیاس نمایی آماری است، بکار گرفته شد. خروجی‌های مدل HadCM3 تحت دو سناریوهای A2 و B2 و داده‌های NCEP بمنظور واسنجی معادله رگرسیونی درون مدل ریزمقیاس نمایی بعنوان بخشی از ورودی‌های SDSM به مدل داده شدند و خروجی‌های این مرحله مجدداً بعنوان ورودی SIMETAW برای محاسبه تبخیر-تعرق در دوره های آتی در نظر گرفته شدند. نتایج این فرایند حاکی از آن است که در طول سال، به طور کل دلیل افزایش نیاز تبخیر-تعرقی جو، تبخیر-تعرق پتانسیل افزایش می‌یابد؛ هر چند در موارد محدودی افزایش در یک ماه بسیار ناچیز و یا حتی به میزان اندکی همراه با کاهش است. این افزایش کلی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریوهای A2 و B2 بترتیب ۵/۳۵ و ۳/۵۴ میلیمتر در ماه و در دوره ۲۰۵۰-۲۰۸۰ به طور متوسط تحت سناریوهای A2 و B2 بترتیب ۱۰/۴۹ و ۸/۰۸ میلیمتر در ماه، نسبت به دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۶۰ پیش-بینی می‌شود. هر چه به سمت انتهای قرن پیش می‌رویم توان تبخیری جو بالا می‌رود. نتایج نشان دادند سناریوی A2 مقادیر افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل را بیشتر از سناریوی B2 تخمین می‌زند (شکل‌های ۷ و ۸). در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ بیشترین



شکل ۵- مقایسه بارش روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SIMETAW

ارزیابی تبخیر-تعرق پتانسیل شبیه‌سازی شده

در شکل (۶) دیاگرام پراکنش مقادیر مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل شده نشان داده شده است. مدل SIMETAW برای بدست آوردن مقادیر تبخیر-تعرق روزانه شبیه‌سازی شده که در این قسمت استفاده شده است، از متغیرهای روزانه شبیه‌سازی شده در قسمت قبل استفاده می‌کند. از آنجا که مدل برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل از معادله پنمن-مانتیت اصلاح شده استفاده می‌کند، برای بدست آوردن مقادیر مشاهده شده نیز از همین روش استفاده شد. از طرفی، بدلیل اینکه همه اجزاء معادله پنمن-مانتیت در ایستگاه برای دوره بلندمدت ثبت نشده است و برای بدست آوردن همه عناصر معادله باید از روابط تجربی استفاده کرد، در این حالت از متوسط ماهانه داده‌های هواشناسی مشاهده شده استفاده گردید و برای پارامترهای تخمینی متوسط ماهانه در نظر گرفته شد و تبخیر-تعرق پتانسیل در مقیاس ماهانه محاسبه شد. معادله رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به صورت $y = 1/155x - 0/746$ و ضریب تبیین برابر ۰/۹۹۱ است. پراکنش مناسب نقاط حول خط ۱:۱ نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه است.



شکل ۶- ارزیابی شبیه‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل توسط مدل SIMETAW

نیز به کمک مدیران و برنامه‌ریزان بخش آب برای آینده کشور بیاید.

تبخیر-تعرق پتانسیل بعنوان یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین پارامترهای هواشناسی در دوره های آتی، متأثر از تغییر اقلیم، افزایش خواهد داشت. این افزایش در همه ماه‌های سال یکنواخت نبوده و بسته به چگونگی تغییرات سایر پارامترهای هواشناسی در برخی ماه‌های سال افزایش بیشتری خواهد داشت. در این تحقیق بیشترین افزایش‌ها مربوط به ماه‌های انتهایی سال میلادی می‌باشد، به این معنا که در فصل پاییز روند افزایشی تبخیر-تعرق سرعت بیشتری در سال‌های آتی خواهد داشت.

سپاسگزاری

این تحقیق با مشاوره دکتر مرتضی اورنگ محقق ارشد بخش آب و خاک دپارتمان منابع آب ایالت کالیفرنیا و عضو تیم توسعه مدل SIMETAW انجام شد. نگارندگان مقاله بدین وسیله از راهنمایی‌های ارزنده ایشان تشکر می‌نمایند.

REFERENCES

- Alizadeh, A., Sayari, N., Hesami Kermani, M. R., Bannayan Aval, M. and Farid Hossaini, A. (2010). Assessment of Climate Change Potential Impacts on Agricultural Water Use and Water Resources of Kashaf rood basin. *Journal of Water and Soil*, 24(4), 815-835. (In Farsi)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1999). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome.
- Babaeian, I. and NajafiNik, Z. (2006). Future climate change projection over North-East of Iran during 2010-2039. In: *Proceedings of Congress on Numerical Weather Prediction*, 20-Dec., Tehran, pp. 125-117. (In Farsi)
- Bannayan, M. and Hoogenboom, G. (2008). Predicting realizations of daily weather data for climate forecasts using the non-parametric nearest-neighbour re-sampling technique, *International Journal of Climatology*, 28: 1357-1368.
- Bazrafshan, J., Khalili, A., Torabi, S., Hajjam, S. and Hoorfar, A. (2009). Evaluation and compression of ClimGen and LARS-WG models for simulating weather variables in Iran's various climate conditions. *Journal of Water Resources Research*. 13(5), 44-57. (In Farsi)
- Ghahreman, N., Fallah, A. and Bazrafshan, J. (2009). Evaluation of LARS-WG and ClimGen weather generators for producing temperature and precipitation data. In: *Proceedings of 4th National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management*, 4-5 Dec., Shahid Bahonar University of Kerman. (In Farsi)
- Goyal, R. K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration

میزان افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل تحت سناریوهای A2 و B2 بترتیب ۲۰/۱۷ و ۱۵/۶۷ میلیمتر و در ماه اکتبر پیش‌بینی می‌شود. همین مقادیر برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۸۰ تحت سناریوهای A2 و B2 بترتیب ۲۳/۵۹ و ۱۸/۴۵ میلیمتر در ماه بدست آمده. نتایج بدست آمده با نتایج سایر تحقیقات همخوانی خوبی دارد. در مطالعه‌ای مشابه در ایستگاه مشهد، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل بدست آمده با استفاده از فرمول فائو-پنمن-مانتیت در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ در تمامی ماه‌ها نسبت به دوره پایه روند افزایشی داشته‌اند (Shahnaghi, 2011).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق حاکی از دقت بالای مدل SIMETAW در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی و در ادامه تبخیر-تعرق با حداقل داده‌های مورد نیاز می‌باشد. مدل در شبیه‌سازی متغیرهای بارندگی، سرعت باد و دمای نقطه شبنم دارای دقت کمتری نسبت به دمای حداقل و حداکثر دارد؛ در صورت ارزیابی جامع‌تر و در اقلیم‌های متنوع کشور، این مدل می‌تواند در ایران

to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). *Journal of Agricultural Water Management*. 69: 1-11.

Hoogenboom, G. (2000). The Georgia automated environmental monitoring network. In: *Preprints 24th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. American Meteorological Society: Boston, Massachusetts; 24-25.

IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2000). Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: *Nakicenovic N, Swart R (eds) Cambridge University Press*, Cambridge, 599 pp.

Jin-li, Sh., Li-gang, W., Jian-jun, Q., Tian-zhi, R. (2009). Test and preliminary application of the SIMETAW model in northwest of Liaoning. *Journal scientia agricultural Sinica*, 42(10), 3726-3733.

Majnuni heris, A., Zand parsia, Sh., Sepaskhah, A. and Kamgar haghghi, A. A., (2007). Evaluation of MSM model for predicting maze evapotranspiration and comparison of its results with FAO 56 methods. *Journal of Agriculture and Environment Resources Science*. (In Farsi)

Nicks, A. D. and Harp, J. F. (1980). Stochastic generation of temperature and solar radiation data. *Journal of Hydrology*, 48(1-2), 1-7.

Panahi, M., Aghdayi, M. and Rezaee, M. A. (2006). Determination of sugar beet standard evapotranspiration by lysimeter method in Kabotar-Abad, Esfahan. *Journal of Sugar Beet*, 22(1), 25-37. (In Farsi)

Peterson, R. M., Snyder, R. L., Morteza, N. Orang. and

- Hongbing Yin P.E. (2006). *Progress on Incorporating Climate Change into Management of California's Water Resources* (Chapter 7: Climate Change Impacts on Evapotranspiration), Technical Memorandum Report, Department of Water Resources, pp. 295-329.
- Richardson, C. W. and Wright, D. A. (1984). WGEN: A model for generating daily weather variables. ARS-8, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, D.C.
- Safeeq, M. Fares, A. (2011). Accuracy evaluation of ClimGen weather generator and daily to hourly disaggregation methods in tropical conditions. *Journal of Theoretical Applied Climatology*, 106:321-341
- Semenov, M. A. and Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Journal of Climate Change*, 35(4), 397-414.
- Shahnaghi, N. (2011). The evaluation of climate effects on potential crop water requirements (case study: Gilan plain and Mashhad plain). M. Sc. Thesis, University of Tehran, College of Agriculture and Natural Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering. (In Farsi)
- Sharif, M., Burn, D.H. (2007). Improved K-nearest neighbor weather generating model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 42-51.
- Snyder, R. L., Morteza, N. Orang, Shu Geng, Scott Matyac, J. and Sara S. (2004). Simulation of evapotranspiration of applied water, *The California water plan*, Volume 4- Reference Guide.
- Soleymani Nanadegani, M., Parsinejad, M., Araghinejad, Sh. and Massah Bavani, A. (2011). Study on Climate Change Effect on Net Irrigation Requirement and Yield for Rainfed Wheat (Case Study: Behshahr). *Journal of Water and Soil*, 25(2), 389-397. (In Farsi)
- Swelam, A., Snyder, R. L., Morteza, N. Orang. (2010). Modeling evapotranspiration of Applied Water in Egypt Delta: Calibrating SIMETA model under Nile Delta conditions, The center for special studies and program (CSSP), from: www.waterplan.water.ca.gov.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M. (2002). SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modeling Software*, 17, 145-157.