

Numerical Modeling of Potential Evapotranspiration using WRF Regional Model – Urmia Lake Basin Case Study

AMIRHOSSEIN NIKFAL^{1*}, SAVIZ SEHATKASHANI², ABBAS RANJBAR SAADATABADI³, EBRAHIM FATTAHI⁴

1. PhD student, Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

(Received: March. 5, 2018- Revised: May. 16, 2018- Accepted: May. 19, 2018)

ABSTRACT

In this study, by introducing a novel approach and developing the required programs and codes, the standard FAO Penman-Monteith method is applied on the output of WRF (Weather Research and Forecasting) model, and the daily potential evapotranspiration has been calculated for a month of the study period, from 23th June to 23th July of the year 2017. The calculated values have been validated by the measured station data. The results showed that despite of the underestimation of the model outputs for the reference evapotranspiration, WRF model generally had a good performance with rational outputs on the locations of the stations as well as the whole simulation domain. Hence, model WRF could be considered as a precious tool in operational forecasting for agro-meteorological needs. Errors are expected due to various reasons; such as stationary land surface data which are not updated and the effect of spatial resolution in atmospheric simulations of the model. The results of this research could manage the agricultural water consumption by predicting the future values of daily potential evapotranspiration which is important in estimation of crop water requirement

Keywords: Evapotranspiration, FAO Penman-Monteith Equation, Weather numerical prediction; WRF model;

مدل سازی عددی تبخیر تعرق پتانسیل با مدل منطقه‌ای WRF - مطالعه موردی حوضه دریاچه ارومیه

امیرحسین نیک‌فال^{۱*}، ساویز صحت کاشانی^۲، عباس رنجبر سعادت‌آبادی^۳، ابراهیم فتاحی^۴

۱. دانشجوی دکترای هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۲. استادیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۳. استادیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۴. استادیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۲/۲۹)

چکیده

در این پژوهش با معرفی روشی نوین و توسعه کدها و برنامه‌های موردنیاز، معادله استاندارد فائو-پنمن-مونیتیت بر خروجی مدل منطقه‌ای WRF (Weather Research and Forecasting) اعمال و مقادیر روزانه تبخیر تعرق مرجع برای تیرماه ۱۳۹۶ محاسبه شد. مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های دیدبانی ایستگاهی ارزیابی و مشخص شد که صرف نظر از برآورد کم نتایج مدل برای تبخیر تعرق، مدل WRF نتایج منطقی از مقادیر تبخیر تعرق مرجع در نقاط ایستگاهی نشان می‌دهد و از قابلیت کاربردی در پیش‌بینی‌های عملیاتی برای تبخیر تعرق مرجع برخوردار است. وجود خطا به دلایل گوناگون از جمله به‌روز نبودن داده‌های ثابت زمینی و اثر تفکیک مکانی در شبیه‌سازی‌های جوی انجام‌شده توسط مدل قابل انتظار است. نتایج این پژوهش می‌تواند با پیش‌بینی مقادیر آینده تبخیر تعرق روزانه که عامل مهمی در برآورد نیاز آبی است، نقش مؤثری در مدیریت مصرف آب کشاورزی ایفا نماید.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی جوی، مدل WRF، تبخیر تعرق، معادله فائو-پنمن-مونیتیت

مقدمه

شواهد پرشماری در کاهش معنی‌دار منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارد. تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین عوامل این کاهش محسوب می‌شود (Jimenez et al., 2014). همچنین از ابتدای قرن بیستم، به دلایل مختلف از جمله افزایش جمعیت و لزوم تأمین منابع غذایی، تغییر سیاست‌های دولتی و غیره، مناطق وسیعی از تالاب‌های طبیعی با زمین‌های کشاورزی جایگزین شدند. این تبدیل کاربری، باعث کاهش شدید رواناب‌های سطحی و افزایش تبخیر تعرق شده است (Rijsberman and De Silva, 2006). مطالعات متعددی در بررسی تغییر اقلیم به عنوان یکی از عوامل اصلی در افزایش دما و کاهش بارش و در نتیجه کاهش زمین‌های کشاورزی در منطقه ایران و جهان انجام گرفته است (Giorgi and Bi, 2008; Fallah et al., 2017) و بر نقش کمبود منابع آب بر کیفیت آبیاری و در نتیجه توسعه کشاورزی تأکید شده است.

صنایع کشاورزی حجم قابل‌توجهی از کل آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهند و بسیاری از منابع غذایی جهان

توسط مزارع کشاورزی تحت آبیاری تأمین می‌شوند. این احتمال وجود دارد که مصرف‌کنندگان اصلی آب شیرین مانند صنعت، انرژی و کشاورزی، در آینده برای تأمین نیاز آبی خود با یکدیگر رقابت داشته باشند. این شرایط هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک شکل گرفته است. بنابراین کمبود آب یکی از اصلی‌ترین چالش‌هایی است که انسان با آن روبرو است. کمبود آب به دلیل عدم تعادل بین تأمین آب و نیاز آبی رخ می‌دهد. در تعاریف مربوط به آبیاری، تأمین آب عمدتاً از طریق آب باران به عنوان منبع طبیعی و آبیاری به عنوان منبع مصنوعی بوده و نیاز آبی با توجه به ویژگی‌های گیاه تعریف می‌گردد. تبخیر تعرق مرجع (ET_o) یک فراسنج کلیدی در تعیین نیاز آبی گیاه زراعی بوده و می‌تواند به عنوان شاخصی جهت محاسبه نیاز آبی استفاده شود (Allen et al., 1998). تبخیر و تعرق اثرات قابل‌توجهی بر جامعه از نظر اقتصادی و بوم‌شناختی دارد. با در نظر داشتن مسائل اقتصادی، بهبود روش‌های آبیاری و اصلاح برنامه‌ریزی‌های آبیاری مزارع که امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر کمی و کیفی از محصولات کشاورزی را عملی می‌کند، باید در دستور کار قرار گیرد. از نظر بوم‌شناختی، تبخیر و تعرق با نقشی که شکل‌گیری مه دارد، می‌تواند اقلیم محلی و مناطق همجوار را تحت تأثیر قرار دهد.

* نویسنده مسئول: anik@ut.ac.ir

برای تخمین تبخیرتعرق مرجع با بالاترین دقت پیشنهاد شده است. از آنجایی که رابطه فائو-پنمن-مونتیت به تعداد زیادی از فراسنج‌های هواشناسی جهت محاسبه تبخیرتعرق مرجع یا تبخیرتعرق پتانسیل نیاز دارد، استفاده از این رابطه در کاربردهای هواشناسی کشاورزی، آبیاری، مدیریت منابع آب و پژوهش‌های مربوطه با چالش روبرو است. این محدودیت به ویژه در بسیاری از کشورهای در حال توسعه که از زیرساخت‌های ضعیف‌تری در پایش فراسنج‌های هواشناسی برخوردارند و در عین حال کشاورزی سهم قابل توجهی از تولید و اشتغال را در این کشورها دارا است، بسیار بیشتر از کشورهای توسعه‌یافته دیده می‌شود.

در این پژوهش برای اولین بار در کشور، از برون‌داد مدل‌های منطقه‌ای و عددی جوی به منظور پیش‌بینی تبخیرتعرق مرجع با روش فائو-پنمن-مونتیت به عنوان روش استاندارد محاسبه تبخیرتعرق مرجع استفاده شده است. استفاده از مدل عددی منطقه‌ای در محاسبه تبخیرتعرق که در بخش بعدی با جزئیات بیشتری تشریح خواهد شد، چندین مزیت را در بر می‌گیرد؛ اولین امتیاز این روش، شبیه‌سازی کاملی از بسیاری از فراسنج‌های دینامیکی-فیزیکی جوی و سایر فراسنج‌های نسبتاً ثابت جغرافیایی است. بنابراین بهره‌برداری از روش فائو-پنمن-مونتیت که اجزای بسیار زیادی را به عنوان ورودی نیاز دارد با استفاده از نتایج خروجی مدل‌های منطقه‌ای جوی کاملاً عملی است. امتیاز دوم این روش در استفاده از داده‌های جهانی هواشناسی و جغرافیایی است که برای تمامی سطح زمین و ترازهای ارتفاعی با دقت نسبتاً یکسان توزیع شده‌اند. مدل‌های منطقه‌ای برای اجرا به داده‌های جهانی هواشناسی مانند داده‌های GFS و یا ECMWF که حاصل اجرای مدل‌های جهانی (Global) هستند، نیاز دارند که از چند منبع مشخص در اینترنت قابل دسترسی می‌باشند. نتایج این مدل‌ها برای کل جو با تفکیک مکانی مختلف مانند یک درجه یا نیم‌درجه در مقیاس طول و عرض جغرافیایی و تفکیک‌های زمانی ۶ ساعته یا ۳ ساعته همه روزه به صورت داده‌های بازتحلیل و یا داده‌های پیش‌بینی آرشیو می‌گردد. امتیاز سوم این روش که برای اولین بار در کشور معرفی می‌شود، پیش‌بینی مقادیر روزانه تبخیرتعرق پتانسیل با استفاده از خروجی مدل عددی میان‌مقیاس WRF است که در حال حاضر پیشرفته‌ترین سامانه مدل‌سازی عددی جوی بوده که همواره در حال توسعه می‌باشد. سامانه مدل‌سازی WRF علاوه بر توسعه نسل بعدی مدل‌های میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا و سیستم‌های گوارد داده‌ها، عامل پیشرفت و افزایش کارایی در سامانه‌های پیش‌بینی میان‌مقیاس و

تبخیر و تبخیرتعرق از متغیرهای اصلی مؤثر بر تعادل آب در طبیعت و تغییرات سطح و حجم آب در دریاچه است. مطالعه تبخیر از سطح آب آزاد و تبخیرتعرق از گیاهان روش مفیدی در مدیریت منابع آب و بودجه آب در طبیعت است. تبخیرتعرق فرآیندی است که توسط آن گیاهان، آبی را که از زمین جذب کرده‌اند از طریق برگ‌ها به صورت بخار آب به جو باز پس می‌دهند. فرآیند تبدیل حالت آب مایع به بخار آب همراه با جذب گرما از جو بوده که منجر به کاهش دمای هوا می‌شود. یک درخت بزرگ می‌تواند تا ۳۷۰ لیتر آب در روز را طی فرآیند تبخیرتعرق به جو وارد سازد. اکثر حجم آب از دست رفته در مناطق خشک و نیمه خشک در جهان به دلیل فرآیند تبخیرتعرق است (Noy-Meir, 1973) که بیش از ۹۵٪ از حجم بودجه آب را در زیست‌بوم‌های نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد (Huxman et al., 2005; Wilcox et al., 2003). حوضه دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های کشور در حدود سه دهه است که با چالش کم‌آبی روبرو می‌باشد. در پژوهش دیگر افت آب‌های زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه در دوره‌ای ۸ ساله (۱۳۸۳-۱۳۹۰ خورشیدی) با استفاده از نتایج هیدروگراف تراز آب زیرزمینی و نقشه‌های هم‌پهنه افت بررسی شده و مشخص شد که در اکثر آبخوان‌ها افت سطح آب وجود داشته است (Delshad et al., 2016). بنابراین اگر میزان مصرف آب و نبود مدیریت درست و بهره‌وری همچنان ادامه یابد، کشور با بحران بی‌آبی مواجه خواهد شد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری در ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف تبخیرتعرق انجام گرفته است (Valipour, 2015; Yang et al., 2015). تخمین مقدار تبخیرتعرق می‌تواند با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم از گیاه مرجع مانند چمن باشد (Doorenbos and Pruitt, 1977) یا با استفاده از داده‌های جوی و از طریق مدل‌های بر پایه دما (Thorntwaite, 1948)، مدل‌های بر پایه تابش (Hargreaves and Samani, 1985)، یا مدل‌های ترکیبی با در نظر گرفتن تعادل انرژی (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) محاسبه گردند. در طرح توسعه پایگاه تأمین اطلاعات هواشناسی مورد نیاز سند ملی الگوی مصرف بهینه آب کشاورزی کشور، داده‌های تبخیرتعرق گیاه مرجع توسط روش‌های مختلف از جمله فائو-پنمن-مونتیت، جنسن-هیز اصلاح‌شده و بلانی-کریدل، با توجه به اقلیم مناطق مختلف با گام زمانی روزانه، ده‌روزه، ماهانه و سالانه برآورد شد (Atmospheric Science and Meteorological Research Center, 2016). روش فائو-پنمن-مونتیت به عنوان روشی استاندارد توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)

گردید. فواصل بین نقاط شبکه در مدل WRF قابلیت تغییر از کمتر یک تا چند ده کیلومتر را دارد. در این مدل، معادلات دینامیکی حاکم بر جو، فرایندهای فیزیکی و میکروفیزیک ابر در محاسبات مربوط به شبیه‌سازی رفتار جو در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی جوی در این پژوهش برای ۳۰ روز از ۲۳ ژوئن تا ۲۳ ژوئیه ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های آنالیز (Global Forecast System) برای تعیین شرایط اولیه و مرزی مدل منطقه‌ای WRF انجام گرفت. جزئیات بیشتری از تنظیمات مدل WRF و طرح‌واره‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی پارامترهای فیزیکی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. برخی طرح‌واره‌های مدل WRF

طرح‌واره	رهیافت
میکروفیزیک	New Thompson <i>et al.</i>
تابش موج بلند	RRTMG
تابش موج کوتاه	RRTMG shortwave
لایه سطحی	Eta similarity
سطح زمین	Noah Land Surface Model
لایه مرزی جوی	Mellor-Yamada-Janjic
کومولوس	Tiedtke

تاریخ شبیه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شد که تیرماه ۱۳۹۶ را به عنوان دوره مطالعه پوشش دهد. از دو دامنه شبیه‌سازی تودرتو در فرآیند اجرای مدل WRF استفاده شد، به گونه‌ای که فواصل بین نقاط شبکه به مقدار ۱۲ و ۴ کیلومتر به ترتیب در حوضه شبیه‌سازی اول (اصلی) و دوم (لانه گذاری شده) انتخاب گردید. دامنه لانه گذاری شده با تفکیک مکانی بالاتر به گونه‌ای انتخاب شده است که حوضه آبریز دریاچه ارومیه و بخش‌هایی از اطراف آن را دربر بگیرد. امتیاز مدل WRF به عنوان یک مدل کامل جوی، در نظر گرفتن اکثر یادداشت‌های مؤثر و حل عددی معادلات حاکم بر جو است. بنابراین نتایج به صورت منطقه‌ای و برای تمام نقاط شبکه در حوضه شبیه‌سازی به دست می‌آید. منابع خطا در مدل‌های فیزیکی بسیار گسترده‌تر از مدل‌های آماری است. در مدل‌های فیزیکی مانند WRF، تفکیک زمانی و مکانی (Model spatial and temporal resolution) در گسسته‌سازی و حل عددی معادلات حاکم بر جو می‌تواند اثر قابل‌توجهی در نتایج داشته باشد. در بسیاری از پژوهش‌ها و برای استفاده از مدل WRF در سایر کاربردهای محیطی مانند آلودگی هوا، این مدل به عنوان یک مدل ایده‌آل از جو فرض می‌گردد.

همچنین درک چگونگی عملکرد این مدل‌ها است. وجود تعداد قابل‌توجهی از زیر برنامه‌ها در مدل عددی هواشناسی WRF بستر مناسبی را جهت تحقیقات و شبیه‌سازی‌های جوی و اقیانوسی توسط این مدل ایجاد کرده است. استفاده از این مدل، بخش وسیعی از تحقیقات علمی از شبیه‌سازی حالات ایده‌آلی تا پیش‌بینی‌های کاربردی را دربر می‌گیرد.

یکی از اجزای اصلی موجود در مدل پیش‌بینی عددی وضع هوای WRF، بخش مربوط به فیزیک مدل است که به پارامترسازی فرآیندهای فیزیکی جوی در مقیاس شبکه‌ای اختصاص دارد. بخش فیزیک در مدل WRF جدا از بخش دینامیک می‌باشد. زیر روال‌هایی به منظور آماده‌سازی و تعدیل متغیرهای فیزیکی در مدل تعبیه شده‌اند که عبارتند از اختصاص متغیرهای فیزیکی موردنیاز از قبیل دما، فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی، ضخامت لایه و سایر متغیرها و فرایند گسسته‌سازی این متغیرها در نقاط شبکه. هسته فیزیکی، فراسنج‌هایی از قبیل دمای پتانسیلی و میدان رطوبت را محاسبه می‌کند. سایر فرآیندهای جوی از قبیل فرایندهای میکروفیزیک مرتبط با تشکیل بخار آب، تشکیل ابر و بارش است. رهیافت‌های گوناگونی جهت سنجش فرایندهای میکروفیزیک وجود دارد که بسته به نوع رهیافت، تعداد متغیرهای ورودی و ساختار آن تغییر می‌کند. در مدل WRF تشکیل ابرهای کومه‌ای با تحلیل حرکات همرفتی بالاسو و حرکات پایین‌سو و شار انتقال بخار آب در راستای عمودی مدل‌سازی می‌گردد. آغازگری فرآیند همرفت با در نظر داشتن نیمرخ رطوبتی و حرارتی در لایه‌های جوی از دیگر قابلیت‌های بخش میکروفیزیک مدل است. رهیافت‌های لایه مرزی نیز مسئول محاسبه ضرایب اصطکاک نسبت به سرعت و سایر ضرایبی می‌باشد که در تعیین میزان شار رطوبتی و حرارتی مؤثر است. رهیافت مربوط به مدل لایه سطحی، از اطلاعات سایر قسمت‌های فیزیکی استفاده می‌کند و از طریق آن، مقدار شار رطوبت و گرما را در نقاط مختلف خشکی، دریا و سطوح یخی برآورد می‌کند. رهیافت تابشی مختلفی در مدل WRF برای طول موج بلند و کوتاه وجود دارند که وظیفه بررسی گرمایش جوی را از طریق محاسبه شار تابشی بر عهده دارد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای شبیه‌سازی مقادیر پارامترهای جوی مورد نیاز در مدل‌سازی تبخیر/تعرق مرجع با مقیاس زمانی روزانه از نسخه ۳.۹ مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی و تحقیقاتی WRF (Weather Research and Forecasting) استفاده

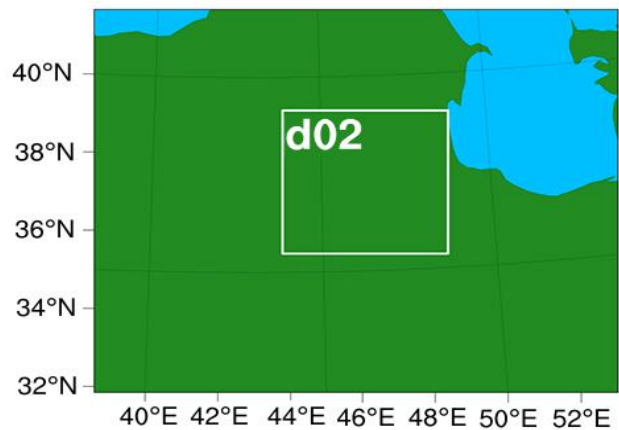
نقشه پهنه‌بندی تبخیر تعرق حاصل از خروجی مدل WRF به صورت روزانه برای ۳۱ روز از دوره شبیه‌سازی تولید شد. مقادیر پارامترها حاصل از خروجی مدل WRF بوده و در هر گام زمانی متغیر است. مقدار پارامترها از خروجی مدل قابل استخراج است، ولی هدف این مقاله بیش از آنکه بررسی جزء به جزء متغیرهای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع باشد، محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از متغیرهای مربوطه طبق رابطه فائو-پنمن-مونیتیت است. بنابراین به مقادیر این متغیرها اشاره نشده و بر روی نتیجه اصلی که مقدار تبخیر تعرق مرجع است تمرکز شده است. در صورت مشخص کردن مقادیر هریک از متغیرهای مؤثر بر تبخیر تعرق، نیاز است تا در هر گام زمانی و برای هر یک از نقاط ایستگاهی، این مقادیر استخراج گردد که باعث طولانی شدن متن مقاله شده، در حالی که نتایج نهایی مقادیر تبخیر تعرق مرجع از محاسبه همین متغیرها به دست آمده است. در پژوهش‌های بعدی در صورتی که ارزیابی دقت مقادیر هر یک از متغیرهای رابطه فائو-پنمن-مونیتیت نیز مورد نظر باشد، مقادیر این متغیرها (مانند سرعت باد ۲ متری و تابش خالص رسیده به سطح) به طور مجزا از خروجی مدل استخراج و با داده‌های دیدبانی ایستگاهی مقایسه می‌گردد. در این پژوهش متغیرهای هواشناسی و سایر پارامترها مانند تابش، در هر یک از نقاط شبکه از حوضه شبیه‌سازی و برای هر گام زمانی با استفاده از گسسته‌سازی عددی معادلات حاکم بر جو شبیه‌سازی می‌گردد. ماژول‌ها و طرح‌واره‌های مختلفی برای هر یک از فرآیندهای مرتبط با هواشناسی در مدل WRF قابل استفاده است که در جدول (۱) به آن اشاره شده است.

نتایج و بحث

در شکل‌های (۲-ا) و (۲-ب) نقشه عوارض طبیعی و پوشش گیاهی در حوضه دوم شبیه‌سازی حاصل از مدل WRF نمایش داده شده است. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی جهت مقایسه داده‌های تبخیر با مقادیر حاصل از خروجی مدل نیز در این دو شکل قرار داده شده است. در شکل (۲-ب) که نمایش‌دهنده پوشش گیاهی حوضه شبیه‌سازی است، موقعیت تقریبی دریاچه ارومیه با رنگ آبی پررنگ، به مفهوم بدون پوشش گیاهی قابل شناسایی است.

شکل (۳) پهنه‌بندی مقادیر تبخیر تعرق مرجع حاصل از خروجی مدل WRF را برحسب واحد میلی‌متر بر روز و با فواصل زمانی ۵ روزه در حوضه شبیه‌سازی لانه گذاری شده نشان می‌دهد. موقعیت دریاچه ارومیه در این شکل قابل مشاهده است. با دقت در شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد که مقادیر

WPS Domain Configuration



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه‌های شبیه‌سازی اصلی و لانه گذاری شده در مدل WRF (d02)

مقدار تبخیر تعرق مرجع می‌تواند از داده‌های هواشناسی محاسبه گردد. سطح مرجع به سطح چمن سبز، شاداب و با ارتفاع یکپارچه (۰/۱۲ متر) اطلاق می‌شود که سطح زمین را کاملاً زیر سایه خود قرار می‌دهد. بین روش‌های مختلف محاسبه تبخیر تعرق مرجع، روش فائو-پنمن-مونیتیت به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر تعرق، از طرف سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) معرفی شده است. روش فائو-پنمن-مونیتیت به داده‌های ورودی تابش، دما و رطوبت هوا و سرعت باد نیاز دارد. پارامترها و متغیرهای روش فائو-پنمن-مونیتیت برای برآورد تبخیر تعرق روزانه در رابطه ۱ آورده شده است.

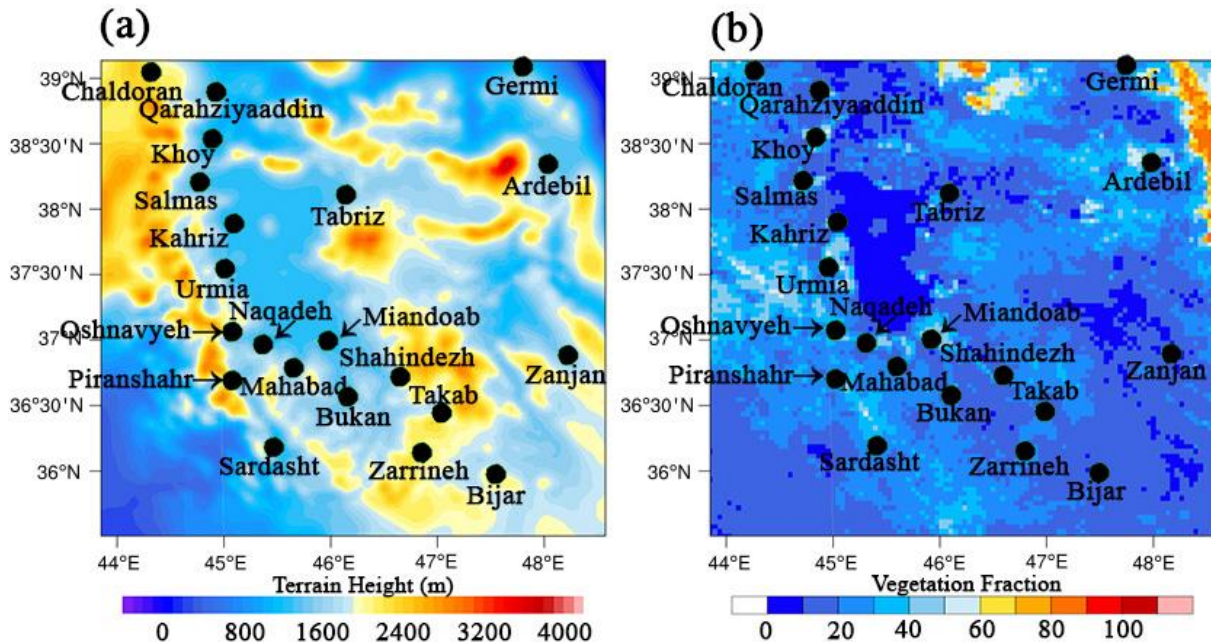
$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

ET_o تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)
 R_n تابش خالص بر سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)
 G چگالی شار گرمایی خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)
 u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)
 e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)
 e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)
 $e_s - e_a$ کمبود اشباع فشار بخار آب (کیلو پاسکال)
 Δ شیب منحنی بخار آب اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)

γ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)
 به منظور محاسبه تبخیر تعرق مرجع، با آماده‌سازی کدها و برنامه‌های موردنیاز، رابطه فائو-پنمن-مونیتیت در مقادیر متغیرهای هواشناسی حاصل از خروجی مدل WRF اعمال گردید و مقادیر تبخیر تعرق مرجع در مقیاس روزانه برای چندین نقطه دارای ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه شدند. همچنین

حوضه دریاچه ارومیه به دلیل ارتفاع پایین و پوشش گیاهی فقیر، به وضوح دیده می‌شود که تبخیرتعرق مرجع نسبت به سایر مناطق حوضه شبیه‌سازی مقادیر بالاتری نشان می‌دهد.

تبخیرتعرق روزانه عموماً دارای تطابق منطقی (برازش منفی) با عوارض طبیعی زمین هستند. به این صورت که عموماً در مناطق مرتفع، خروجی مدل برای تبخیرتعرق مرجع مقادیر کمتری را نسبت به مناطق پست‌تر نشان می‌دهد. در منطقه جنوب غربی



شکل ۲. نقشه‌های عرضه‌نگاری (a) و پوشش گیاهی (b) در حوضه شبیه‌سازی لانه گذاری شده در مدل WRF به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی در دوره زمانی ۲۳ ژوئن تا ۲۳ ژوئیه ۲۰۱۷ (تیرماه ۱۳۹۶)

در طول ماه تیر تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد. اما برای سایر مناطق با اقلیم مرطوب‌تر با نزدیک شدن به اواخر تیرماه، خشکی به صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش در خشکی اثر بالاتری نسبت به کاهش نور خورشید برای این مناطق نشان می‌دهد که باعث می‌شود مقادیر تبخیرتعرق روزانه با نزدیک شدن به اواخر تیرماه افزایش نسبی نشان دهد.

در شکل (۴)، مقدار میانگین ماهانه تبخیر پتانسیل برحسب وات بر مترمربع حاصل از مدل جهانی داده‌گواری زمین با نام GLDAS (Rodell et al., 2004) با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در مقیاس طول و عرض جغرافیایی برای ماه ژوئیه ۲۰۱۷ نشان داده شده است. مدل GLDAS از داده‌های کاربری اراضی، پهنه‌های آبی، ساختار خاک و توپوگرافی و بر پایه داده‌های سنجنده‌های MODIS^۱ و AVHRR^۲، فراسنج‌های مرتبط با سطح زمین را مانند تبخیر و رطوبت خاک، شبیه‌سازی می‌کند. با ارزیابی کلی شکل (۴) با خروجی مدل از تبخیرتعرق مرجع در شکل (۳)، می‌توان به این نتیجه رسید که توافق خوبی بین

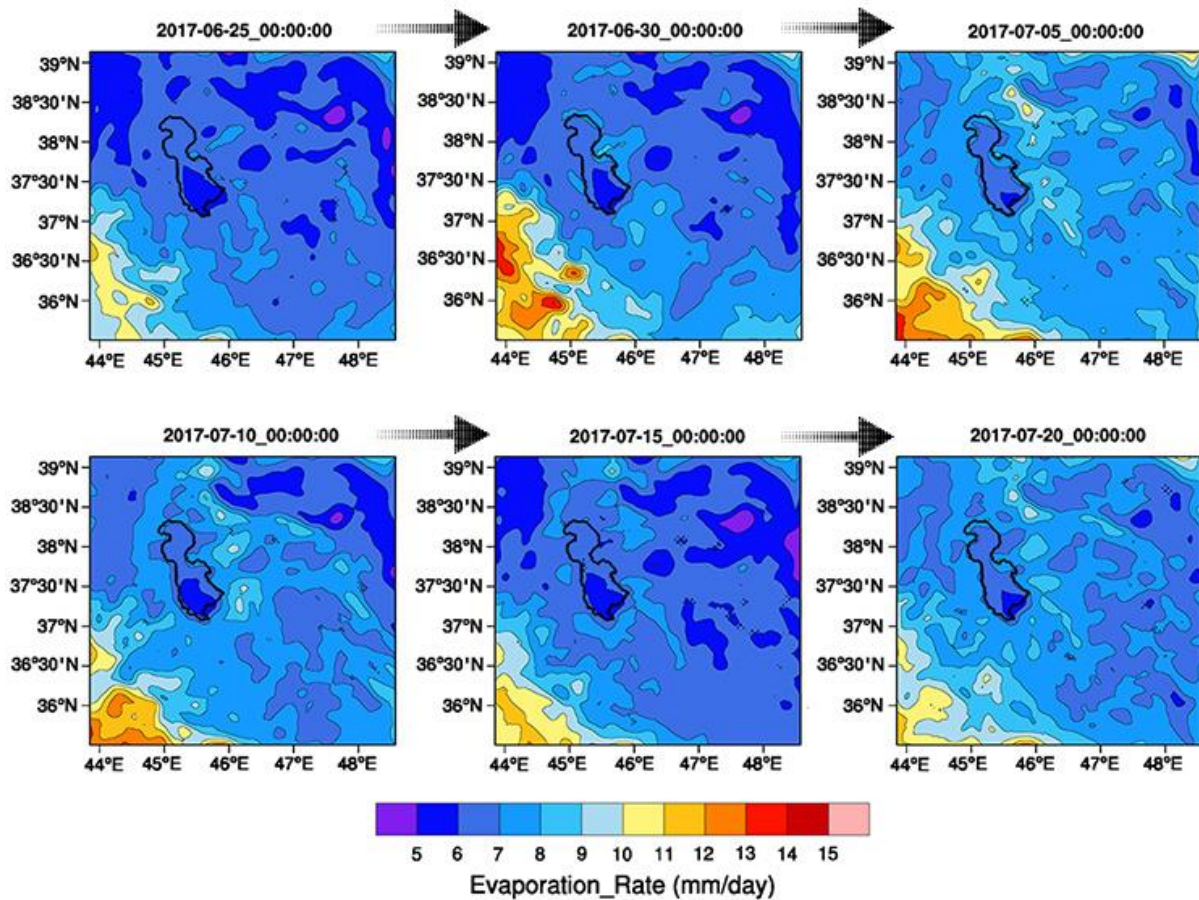
به طور کلی الگوی مقادیر تبخیرتعرق مرجع در شکل (۳) نسبتاً پیچیده است. دلیل این پیچیدگی را می‌توان علاوه بر الگوهای جوی، به ساختار غیریکنواخت سطح زمین از نظر پوشش گیاهی و عرضه‌نگاری (شکل ۲) مرتبط دانست. از آنجایی که پارامترهای بسیار زیادی در محاسبه تبخیرتعرق با استفاده از معادله فائو-پنمن-مونتیت داخل می‌شوند، وجود یک الگوی غیریکنواخت در پهنه‌بندی مقادیر تبخیرتعرق قابل انتظار است. حتی بر روی دریاچه ارومیه که دارای سطح یکنواخت است نیز این ساختار نسبتاً غیر یکنواخت است که نشان‌دهنده اثر عوامل جوی در تغییرات قابل توجه تبخیرتعرق مرجع است. با در نظر گرفتن کل حوضه شبیه‌سازی در شکل (۳)، این نکته حائز اهمیت است که مقادیر تبخیرتعرق به استثنای منطقه جنوب غربی حوضه شبیه‌سازی، افزایش نسبی نشان داده است. در حالی که منطقه جنوب غربی حوضه شبیه‌سازی دارای روند نسبی کاهشی بوده است. این پدیده به این صورت قابل توجیه است که نور خورشید به عنوان عاملی اصلی در مقدار تبخیرتعرق با پیش‌روی تابستان کاهش می‌یابد که باعث کاهش تبخیرتعرق در جنوب غرب حوضه شبیه‌سازی می‌گردد. این در حالی که این منطقه به عنوان یک منطقه گرم و خشک از نظر مقدار خشکی

1. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
2. Advanced Very High Resolution Radiometer

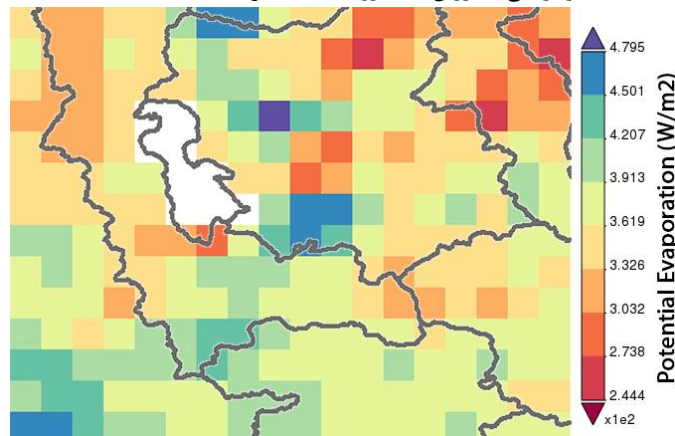
محاسبه تبخیر تعرق مرجع حاصل از اجرای مدل WRF برحسب گیاه چمن تنظیم شده است. این در حالی است که داده‌های دیدبانی شده حاصل از ایستگاه‌های شکل (۲) برای مقادیر تبخیر برحسب اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر تهیه شده است. بنابراین این انتظار وجود دارد که داده‌های حاصل از تشت تبخیر نسبت به تبخیر تعرق مرجع، دقیقاً یکسان نباشد که در شکل (۵) به آن خواهیم پرداخت.

مدل‌های WRF و GLDAS در برآورد تبخیر پتانسیل برای منطقه مورد مطالعه وجود دارد. در شکل (۴) مناطق شرق دریاچه ارومیه و جنوب غرب حوضه شبیه‌سازی دارای بالاترین تبخیر متوسط ماهانه و منطقه شمال شرقی حوضه مورد مطالعه دارای کمترین مقدار تبخیر برحسب وات بر مترمربع است. این الگو کم و بیش با الگوی تصاویر خروجی مدل در شکل (۳) تطابق دارد.

فراسنج‌های مربوط به معادله فائو-پنمن-مونیتیت در



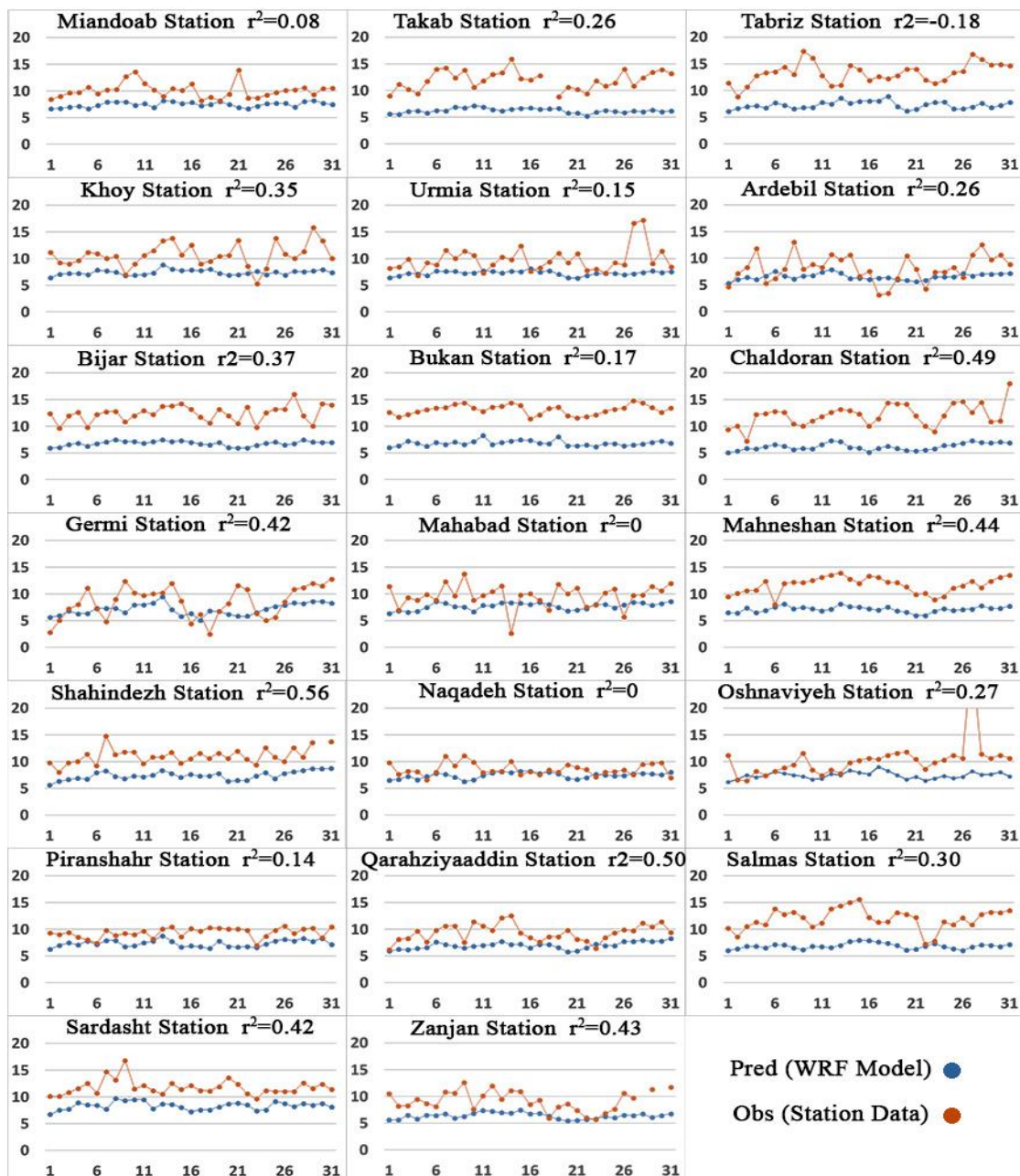
شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی مقادیر تبخیر تعرق مرجع روزانه با فواصل زمانی ۵ روزه در حوضه شبیه‌سازی لانه گذاری شده حاصل از خروجی مدل WRF در طول بازه زمانی ۲۳ ژوئن تا ۲۳ ژوئیه ۲۰۱۷ (تیرماه ۱۳۹۶)



شکل ۴. میانگین ماهانه تبخیر پتانسیل برحسب وات بر مترمربع حاصل از خروجی مدل GLDAS برای ماه ژوئیه ۲۰۱۷

پیرانشهر همپوشانی مناسبی بین داده‌های مدل و دیدبانی نشان می‌دهند. تعداد ده ایستگاه، یا به عبارت دیگر نتایج مربوط به نیمی از مقایسات انجام شده در شکل (۵) با همبستگی ضعیف (کمتر از ۰,۳) بین سری زمانی تغییرات تبخیرتقرق حاصل از خروجی مدل با داده‌های ایستگاهی و نیم دیگر با همبستگی متوسط (بین ۰,۳ تا ۰,۷) مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج خروجی مدل WRF برای مقادیر تبخیرتقرق مرجع در شکل (۵)، دلایل زیر را می‌توان به عنوان اصلی‌ترین عوامل بروز خطا در نتایج دانست.

در شکل (۵) ارزیابی خروجی مدل WRF از مقادیر روزانه تبخیرتقرق مرجع با مقایسه با داده‌های دیدبانی شده در ۲۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی در نمودارهای مجزا در حوضه شبیه‌سازی نشان داده شده است. با نگاه کلی به نمودارهای شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد که نتایج مدل برای تبخیرتقرق مرجع در بسیاری از موارد دارای کم‌برآورد بوده است. ایستگاه‌های تکاب، تبریز، بوکان، چالدران، ماهنشان و سلماس، با حدود ۵ میلی‌متر اختلاف بین مقادیر مدل‌سازی شده و دیدبانی شده در تبخیرتقرق روزانه، بیشترین مقادیر خطا را نشان می‌دهند. در حالی که ایستگاه‌های اردبیل، گرمی، مهاباد، نقده و



شکل ۵. مقایسه داده‌های مدل‌سازی تبخیرتقرق حاصل از خروجی مدل WRF (رنگ آبی) با داده‌های دیدبانی شده ایستگاهی (رنگ قرمز) در طول دوره شبیه‌سازی، از ۲۳ ژوئن تا ۲۳ ژوئیه (تیرماه ۱۳۹۶)

تبخیر تعرق روزانه را برآورد نمود که با توجه به قابلیت مدل WRF در تولید خروجی شبیه سازی های جوی با فاصله زمانی دلخواه، می تواند به عنوان روش دقیق تری در محاسبه مقادیر روزانه تبخیر تعرق مرجع استفاده گردد. از آنجایی که تبخیر تعرق در ارتباط مستقیم با فرآیندهای ترمودینامیکی جو است، مقایسه طرحواره های مختلف فیزیک جو می تواند نتایج متفاوتی تولید کند که به صورت پژوهش جداگانه در مطالعات آینده در نظر گرفته خواهند شد.

مدل WRF یک مدل فیزیکی از رفتار جو زمین بوده و بنابراین این پژوهش جزو پژوهش های آماری دسته بندی نمی گردد. تمامی محاسبات انجام گرفته به کمک حل عددی معادلات حاکم بر جو (مانند معادله پیوستگی و ترمودینامیکی) می باشد و استفاده از روش های آماری تنها در محاسبه (پارامتر سازی) فرآیندهای ریزمقیاس، مانند مدل سازی تلاطم در جو که امکان حل عددی مستقیم را ندارند به کار می رود. در کارهای بعدی که تعداد مطالعات موردی، حوضه شبیه سازی و تعداد موارد مقایسه خروجی مدل با مشاهدات گسترش خواهد یافت، از معیارهای آماری بیشتری در ارزیابی نتایج استفاده خواهد شد. مدل WRF می تواند با استفاده از داده های پیش بینی GFS برای چند روز آینده اجرا گردد و مقادیر تبخیر تعرق مرجع را برای مناطق مختلف به صورت حوضه های شبیه سازی جداگانه و با در نظر گرفتن استان های دارای قابلیت کشاورزی محاسبه نماید. پیش بینی تبخیر تعرق می تواند نقش به سزایی در مدیریت مصرف آب کشاورزی ایفا نماید. علاوه بر این، سایر قابلیت های مدل WRF، مانند پیش بینی یخبندان، پیش بینی درجه روز و پیش بینی سایر متغیرهای مورد نیاز هواشناسی کشاورزی می تواند در سامانه های عملیاتی پیش بینی هواشناسی کشاورزی گنجانده شده و گام مهمی در تأمین نیازهای بخش هواشناسی کشاورزی برداشته شود.

مدل عددی و مدل آماری هر کدام توانمندی های ویژه خود را دارند. برای مثال در مواردی که استفاده از مدل عددی به دلیل حجم محاسبات بالا عملاً امکان پذیر نمی باشد، مدل آماری می تواند بسیار ارزشمند بوده و عملکرد بالایی در برآورد نتایج نشان دهد. هر چند با پیشرفت فناوری و افزایش سرعت پردازش محاسبات کامپیوتری این امید می رود که در آینده دور یا نزدیک با وارد سازی پارامترهای جوی کوچک مقیاس (مانند تلاطم هوا) در فرآیند مدل سازی عددی، شبیه سازی های عددی جوی به حالت ایده آل (با خطای ناچیز) و رفتار واقعی جو نزدیک تر شده و استفاده از مدل های آماری محدودتر گردد.

داده های مربوط به عارضه نگاری و پوشش گیاهی که به عنوان داده های ثابت جغرافیایی در بخش پیش پردازش مدل WRF وارد می شوند، بعضاً اختلاف نسبتاً قابل ملاحظه ای با منطقه مورد مطالعه دارند و برای حصول نتایج دقیق تر به به روزآوری نیاز دارند. این شرایط برای پهنه های آبی مانند دریاچه ارومیه که اثر بسیار بالایی بر مقادیر تبخیر تعرق دارد، حتی شدیدتر است. به ویژه با توجه به این موضوع که در یک دهه اخیر روند خشک شدن دریاچه ارومیه تشدید شده است. در استخراج داده های حاصل از خروجی مدل WRF، به این صورت عمل شده است که نزدیک ترین نقطه شبکه به مختصات جغرافیایی ایستگاه مورد نظر شناسایی شده و داده های آن نقطه جهت محاسبه تبخیر تعرق استخراج شده است. با توجه به اینکه تفکیک مکانی حوضه شبیه سازی دوم برابر با چهار کیلومتر است، ممکن است تا دو کیلومتر بین مختصات واقعی ایستگاه و مختصات نقطه شبکه اختلاف وجود داشته باشد که برای فراسنج تبخیر تعرق که به متغیرهای بسیار زیادی وابسته است، می تواند عامل ایجاد خطا در محاسبات گردد. همچنین، مقایسه نتایج مدل فیزیکی WRF با مدل های آماری می تواند جالب توجه باشد ولی در اکثر مقالاتی که از مدل WRF یا سایر مدل های عددی مانند MM5 در پژوهش های هواشناسی محض استفاده شده، مقایسه نتایج مدل با نتایج هم نوع (خروجی مدل عددی) صورت گرفته است. در پژوهش های محیطی معمولاً مدل های مختلف با ماهیت یکسان (فقط عددی، یا فقط آماری) با یکدیگر مقایسه می گردند.

نتیجه گیری کلی

نتایج مدل عددی WRF در شبیه سازی مقادیر روزانه تبخیر تعرق مرجع نشان داد که این مدل از قابلیت کاربردی در پیش بینی تبخیر تعرق مرجع به صورت منطقه ای برخوردار است. با وجودی که ارزیابی نتایج به طور کلی نشان دهنده کم برآورد مقادیر تبخیر تعرق در شبیه سازی های مدل نسبت به داده های دیدبانی است، اما این مسئله می تواند با افزایش تفکیک مکانی و بهبود داده های ثابت زمینی مانند عارضه نگاری، پوشش گیاهی و جنس خاک بهبود یابد. همچنین اثر مناطق شهری بر متغیرهای خرد اقلیمی مانند باد و رطوبت، از دیگر منابع خطا در برونداد مدل برای تبخیر تعرق مرجع است. نکته دیگر در نحوه محاسبه تبخیر تعرق مرجع است که طبق روش پیشنهادی سازمان فائو با در نظر گرفتن داده های روزانه انجام گرفت. روش دیگری نیز وجود داشته که می توان با استفاده از داده های ساعتی، مقادیر

REFERENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *In* *FAO* (p. 300). <http://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), (2016), Design and development of meteorological database required by the national document of optimum type of agricultural water consumption (In Farsi)
- Delshad, Sh., Zeinalzadeh, K., Hesari, B., (2016), Investigation of underground water loss in the Urmia Lake basin, *Second national conference on the development and advancement of agricultural engineering and soil science of Iran* (In Farsi)
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 24. FAO, Rome
- Fallah, B., Sodoudi, S., Russo, E., Kirchner, I., & Cubasch, U. (2017). Towards modeling the regional rainfall changes over Iran due to the climate forcing of the past 6000 years. *Quaternary International*, 429, 119–128. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.061>
- Giorgi, F., and Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 90–104. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Hargreaves, G. H., and Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Ambient Air Temperature. *In* *American Society of Agricultural Engineering Meeting, Chicago*, 1985 (Vol. 24, p. paper 85----2517). <http://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Huxman, T. E., Wilcox, B. P., Breshears, D. D., Scott, R. L., Snyder, K. A., Small, E. E., ... Jackson, R. B. (2005). Ecohydrological implications of woody plant encroachment. *In* *Ecology* (Vol. 86, pp. 308–319). <http://doi.org/10.1890/03-0583>
- Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S., (2014). Freshwater resources, in: *Field, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Cambridge University Press, Cambridge*
- Noy-Meir, I. (1973). Desert Ecosystems: Environment and Producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 25–51. <http://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>
- Rijsberman, F. and De Silva, S. (2006). Sustainable agriculture and wetlands. *In* *Wetlands and natural resource management* (pp. 33-52). *Springer Berlin Heidelberg*.
- Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll (2004). *The Global Land Data Assimilation System, Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3): 381-394, 2004.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <http://doi.org/10.2307/210739>
- Valipour, M. (2015). Welcome Log in Register View Cart Comparative Evaluation of Radiation Based Methods for Estimation of Potential Evapotranspiration. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)HE.1943?5584.0001066](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)HE.1943?5584.0001066)
- Wilcox, B. P., Seyfried, M. S., & Breshears, D. D. (2003). The water balance on rangelands. *In* *Encyclopaedia of Water Science* (pp. 791–794). <http://doi.org/10.1081/E-EWS>
- Yang, Y., Long, D., Guan, H., Liang, W., Simmons, C., & Batelaan, O. (2015). Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: Revisit of model physics. *Water Resources Research*, 51(5), 3145–3165. <http://doi.org/10.1002/2014WR015619>