

Using Forecasts of WRF Regional Model to Improve the Accuracy of Reference Evapotranspiration Estimation

MOHAMMAD HASSAN GHARAHDAĞHI¹, MEHDI HOMAEI^{1*}, SEYED MAJID MIRLATIFI¹, ALI AKBAR NOROOZI²

1. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

(Received: July. 28, 2019- Revised: Aug. 29, 2019- Accepted: Sep. 11, 2019)

ABSTRACT

An accurate estimation of reference evapotranspiration is crucial for optimal irrigation scheduling and management. Also, achieving accurate medium range forecasts of effective parameters in estimating reference evapotranspiration is a key component for dynamic irrigation scheduling. This study was aimed to investigate the effect of using Weather Research and Forecasting Model (WRF) regional forecasts to increase the accuracy of reference evapotranspiration estimation. Consequently, the precision and accuracy of the model, and the outcome of forecasts performance at 24, 48, 72, 96, and 120-hours were evaluated to estimate the reference evapotranspiration. For this purpose, the output of the model for four stations including Qazvin, Esmail-Abad, Karaj and Hashtgerd were extracted for a period of three months (May-July, 2018) with a 10-days average of the base period. The weather data of 2018 at these stations with the corresponding ones were compared afterwards. The results indicated that the 10-days reference evapotranspiration (average of all stations) in the study period, according to the base period were -20.9, -8.12 and 7.83 percent, respectively. These variations reflects the deviation of the reference evapotranspiration value in the study period in comparison with the base period, indicating the need for using medium-range forecasting in order to correct reference evapotranspiration estimates. The range of determination coefficient (R^2) of model output was obtained to be between 0.813 and 0.921. Due to the statistics, the model output for all stations and the lead-time forecasting periods of 24, 48, 72, 96 and 120 hours can be evaluated with high accuracy and its application would enhance the accuracy of reference evapotranspiration estimates. According to the results, not only in terms of time coordination, but also in terms of quantity, there was a high similarity between the estimated values of evapotranspiration derived from its post-statistical output of the (WRF) with calculated values.

Keywords: Reference Evapotranspiration, Irrigation scheduling, Medium-Range Weather Forecasts, WRF Regional Model.

استفاده از پیش‌بینی‌های مدل منطقه‌ای WRF برای افزایش دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع

محمدحسن قره‌داغی^۱، مهدی همایی^{۱*}، سیدمجید میرلطیفی^۱، علی‌اکبر نوروزی^۲

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۲۰)

چکیده

برآورد با دقت مناسب تبخیر- تعرق مرجع برای مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه آبیاری ضروری است. همچنین، دستیابی به پیش‌بینی‌های میان‌مدت دقیق پارامترهای مؤثر در برآورد تبخیر- تعرق مرجع عنصری کلیدی برای برنامه‌ریزی پویای آبیاری است. این پژوهش با هدف بررسی اثر استفاده از پیش‌بینی‌های مدل منطقه‌ای WRF برای افزایش دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع انجام گردید. از این رو دقت و صحت برونداد و در نتیجه کارایی پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته مدل برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع ارزیابی شد. به همین منظور خروجی مدل برای چهار ایستگاه قزوین، اسماعیل‌آباد، کرج و هشتگرد در یک دوره سه ماهه (می تا ژوئیه سال ۲۰۱۸ میلادی) استخراج و با میانگین ده روزه دوره‌ی پایه و داده‌های هواشناسی سال ۲۰۱۸ در ایستگاه‌های متناظر مقایسه شد. نتایج نشان داد که نرخ تغییرات تبخیر- تعرق مرجع ده روزه (میانگین تمامی ایستگاه‌ها) در دوره‌ی مورد مطالعه نسبت دوره‌ی پایه به ترتیب ۲۰/۹-، ۸/۱۲- و ۷/۸۳ درصد است. این درصد نرخ تغییرات نشان‌دهنده انحراف مقدار تبخیر- تعرق مرجع در دوره‌ی مورد مطالعه نسبت به دوره‌ی پایه است و بیانگر لزوم استفاده از پیش‌بینی‌های میان‌مدت در برآورد صحیح تبخیر- تعرق مرجع است. دامنه‌ی تغییرات ضریب تعیین (R^2) برونداد مدل بین ۰/۸۱۳ تا ۰/۹۲۱ به دست آمد. با توجه به آماره‌های مورد بررسی، برونداد مدل برای همه‌ی ایستگاه‌ها و طول دوره‌های پیش‌بینی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته با دقت زیاد و مناسب ارزیابی شده و استفاده از آن موجب افزایش دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع می‌گردد. یافته‌ها نشان داد که نه تنها از نظر هماهنگی زمانی، بلکه به لحاظ مقدار نیز همانندی بسیار زیادی بین مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق مرجع حاصل از پس‌پردازش آماره‌ی برونداد مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی آب و هوا (WRF) با مقادیر محاسبه شده تبخیر- تعرق مرجع توسط داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متناظر در نقاط مورد مطالعه وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق مرجع، برنامه‌ریزی آبیاری، پیش‌بینی‌های میان‌مدت هواشناسی، مدل منطقه‌ای WRF

مقدمه

مصارف آب می‌تواند در افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش خطرات ناشی از کمبود منابع آب نقش تأثیرگذاری را ایفا نماید. در سامانه‌های آبیاری، بهبود فرآیندهای مصارف واقعی منابع آبی و دستیابی به افزایش تولید به ازای واحد مصرفی امری مهم و ضروری است. در طراحی سامانه‌های آبیاری به شیوه معمول فعلی، بیشینه نیاز آبی گیاه در طول فصل دوره رشد برای تأمین آب موردنیاز در نظر گرفته می‌شود و در تمامی فصل زراعی، برنامه‌ریزی آبیاری^۱ یکسانی اعمال می‌شود. تبخیر- تعرق مرجع^۲ (ET_0) شاخصی مهم در تعیین نیاز آبی بخش کشاورزی است و با توجه به ارتباط پیچیده بین خصوصیات توپوگرافی و ماهیت اقلیم، متغیر در مکان است. برآورد دقیق تبخیر- تعرق برای برنامه‌ریزی

بیش از ۷۵ درصد مساحت کشور ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. آب آبیاری، مهم‌ترین نهاده و عامل محدودکننده در توسعه پایدار بخش کشاورزی است. در مناطقی که با محدودیت منابع آب مواجه هستند بهترین راهبرد برای کاهش زیان‌های ناشی از کمبود آب، مدیریت تقاضا است. در ایران شاهد دوره‌های متناوب خشک به لحاظ ماهیت و طبیعت اقلیم و تنوع آن هستیم. علاوه بر این به دلیل تغییر در الگوهای اقلیمی خطر وقوع دوره‌های طولانی خشک افزایش یافته است. تولید محصولات کشاورزی از نظر کمی و کیفی شدیداً تحت تأثیر شرایط جوی هر منطقه قرار دارند، بنابراین بهبود و ارتقا پایش منابع و

* نویسنده مسئول: mhomae@modares.ac.ir

بر روش های برآورد صحیح تبخیر- تعرق از اولویت های تحقیقاتی برنامه ریزی آبیاری می باشند. به منظور دستیابی به مدیریت مطلوب منابع آب و بهبود عملکرد سامانه های آبیاری، لازم است برنامه ریزی به هنگام آبیاری^۳ مورد توجه قرار گیرد. برای انجام برنامه ریزی به شیوه به هنگام، پیش بینی روزانه تبخیر- تعرق مرجع مورد نیاز است (Ballesteros *et al.*, 2016). بیش تر پژوهش ها با تمرکز بر داده های هواشناسی (شرایط آب و هوایی) در زمان دوره ی رشد گیاه با تأکید بر نقش الگوهای بزرگ مقیاس^۴ در تولید محصولات کشاورزی منتشر شده اند در حالی که از تأثیرات استفاده از پیش بینی های کوتاه مدت هواشناسی^۵ در تصمیم های مدیریتی چشم پوشی شده است (Baigorria *et al.*, 2008). اگرچه استفاده از پیش بینی های فصلی هواشناسی^۶ برای تصمیم گیری های کشاورزی (انتخاب نوع محصول و سایر تصمیم ها) امیدبخش است، اما استفاده از پیش بینی های کوتاه مدت هواشناسی قابل اعتمادتر است و مزایای قابل توجهی برای بهره برداران به ارمغان می آورد (Crane *et al.*, 2010). به منظور بهبود برنامه ریزی آبیاری، ارتباط با یک سرویس پیش-بینی با قابلیت پیش بینی ۳ تا ۱۰ روز آینده از اهمیت بالایی برخوردار است (Rinaldi and He, 2014). بر مبنای مطالعات انجام شده، پژوهشگران مدیریت آبیاری بر مبنای داده های به هنگام هواشناسی را به عنوان راه حل جدید پیشنهاد نمودند (Xu *et al.*, 2012). با توجه به داده های اندازه گیری شده هواشناسی، استفاده از داده های پیش بینی شده هواشناسی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع، نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. طبق نتایج به دست آمده، برنامه ریزی روزانه بر مبنای روش فائو پنمن-مانتیت بهترین نتایج را نشان می دهد (Lorite *et al.*, 2015). بارش و تبخیر- تعرق مرجع مهم ترین متغیرهای مدیریت آب در کشاورزی و فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند. تبیین مناسب روند تبخیر- تعرق مرجع و تغییرات آن ها در زمان، از ضروریات انجام مطالعات در زمینه های هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی است. پیش بینی صحیح روند تبخیر- تعرق مرجع، نقشی مهم و تعیین کننده را در برنامه ریزی آبیاری و طراحی سامانه های زراعی ایفا می نماید. خطا در پیش بینی زمان تابش آفتاب، سرعت باد، حداکثر دما و حداقل دما به ترتیب بیش ترین تأثیر را بر خطای پیش بینی ETo می گذارند (Yang *et al.*, 2016). داده های پیش بینی شده، پیش از ترکیب با داده های مشاهده ای را داده ها یا

آبیاری و ارزیابی بهره وری مصرف آب به ویژه در نواحی نیمه خشک بسیار مهم و ضروری است (Leib *et al.*, 2012). در شرایط حاضر، مدیریت و برنامه ریزی آبیاری بر اساس برآورد نیاز آبی بر مبنای آمار بلندمدت هواشناسی است. بدیهی است که شرایط واقعی همواره با متوسط آمار بلندمدت متفاوت است و از این رو نیاز آبی برآورد شده با نیاز آبی در شرایط واقعی اختلاف خواهد داشت. یکی از عوامل مهم در ایجاد این اختلاف بروز نوسانات اقلیمی است. برنامه ریزی آبیاری فرآیندی است که طی آن در مورد زمان و مقدار آبیاری تصمیم گیری می شود (Pereira, 1999). برنامه ریزی آبیاری، اصلی مهم در بهبود کارایی مصرف آب است. برنامه ریزی نامناسب آبیاری می تواند موجب کم آبیاری و وارد آمدن تنش به گیاه و به تبع آن کاهش محصول و یا آبیاری بیش از اندازه شود که آن نیز سبب استفاده نامناسب از آب، انرژی، نهاده های کشاورزی، آلودگی منابع آب و فرسایش خاک خواهد شد (Annandale *et al.*, 2011). چرخه های طبیعی اقلیمی بیانگر دوره های خشک بحرانی می باشند. بهبود و افزایش راندمان استفاده از منابع آبی برای جلوگیری از کمبود و ایجاد بحران لازم و ضروری است. پایش تبخیر- تعرق^۱ نقش مهمی در مدل سازی منطقه ای و فرامنطقه ای چرخه های اقلیمی و هیدرولوژیکی و همچنین ارزیابی تنش های زیست محیطی بر اکوسیستم های طبیعی و کشاورزی ایفا می کند (Kustas and Norman, 1996). مطالعات انجام شده در بخش های مختلف جهان نشان می دهد که تلاش ها برای بهبود برآورد تبخیر- تعرق مرجع نقشی مهم و اساسی در دستیابی به صرفه جویی بیشتر و افزایش کارایی مصرف آب در اراضی تحت آبیاری دارد (Bucks *et al.*, 1988). در برنامه ریزی تقویمی مقادیر حدی هواشناسی به حساب نمی آید که ممکن است باعث ایجاد اشکال در سال های مختلف گردد. هیچ یک از روش های سنتی نمی تواند اطلاعات لازم برای تعیین میزان آب مورد نیاز آبیاری را تأمین نماید (Hunsaker *et al.*, 2015). مطالعات اخیر نشان می دهد تغییر اقلیم با افزایش دما، تبخیر و طول مدت و شدت دوره های خشک بر روی نیاز آبی گیاهان در مناطق مدیترانه ای اثرگذار بوده است (Fader *et al.*, 2015). در اثر این پدیده مقدار، توزیع زمانی و نوع بارش در یک منطقه دستخوش تغییر قرار می گیرد و منجر به مصرف نادرست آب، کاهش تولید و درآمد در بخش کشاورزی و در پی این دو موجب کاهش بهره وری آب و رضایتمندی بهره برداران می گردد. تمرکز

برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع، داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و تابش خورشیدی مورد نیاز است. در این پژوهش داده‌های هواشناسی موردنیاز به صورت سه ساعته (در ساعت‌های ۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱) برای ایستگاه‌های قزوین و کرج (دوره ۳۱ ساله، ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸) و ایستگاه‌های اسماعیل‌آباد (اقبالیه) و هشتگرد (دوره ۱۱ ساله، ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸) از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید (در جدول-۱، برخی ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه آورده شده است). قبل از استفاده از داده‌های هواشناسی، کیفیت داده‌ها با استفاده از روش کنترل کیفیت توصیه‌شده توسط Allen et al., 1998 بررسی و کنترل گردید. سپس به منظور آماده‌سازی و استفاده از داده‌ها، در ابتدا از داده‌های هواشناسی سه ساعته هر شبانه‌روز برای پارامترهای دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم و سرعت باد میانگین‌گیری شده و مقدار روزانه پارامتر موردنظر محاسبه شد. سپس با استفاده از مقادیر روزانه پارامترها، مقدار تبخیر- تعرق مرجع روزانه به دست آمد. لازم به ذکر است به منظور هم-زمانی و هم‌پوشانی کامل داده‌های هواشناسی با برون‌داد مدل، ساعت 1200 UTC (ساعت هماهنگ جهانی) به عنوان مبنای تبدیل داده‌های سه ساعته به روزانه در نظر گرفته شد. در ادامه به منظور محاسبه تبخیر- تعرق ده روزه از داده‌های هواشناسی روزانه به صورت ده روزه میانگین‌گیری و از روی داده‌های هواشناسی مربوط به هر دهه، مقدار تبخیر- تعرق مرجع ده روزه محاسبه گردید.

اطلاعات زمینه‌ای می‌نامند (Dee et al., 2011). اطلاعات هواشناسی عمومی یک منبع داده‌ای باز است که می‌تواند برای پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع در آینده نزدیک مورد استفاده قرار گیرد. برآورد تقاضای آبیاری مستلزم برآورد تبخیر- تعرق مرجع است که یک الگوریتم پیچیده فیزیکی است و پارامترهای مختلف آب و هوا را در بر می‌گیرد. اکثر مطالعات گزارش‌شده بر روی پیش‌بینی روز به روز نیاز آبیاری با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای حاصل از ایستگاه هواشناسی متمرکز بودند (Traore et al., 2017). در سال‌های اخیر مدل میان مقیاس پیش‌بینی و تحقیقاتی آب و هوا (WRF) معرفی شده است (Skamarock et al., 2008). این مدل، نسل بعد از سیستم میان مقیاس پیش-بینی عددی وضع هوا است که هم پیش‌بینی عملیاتی و هم نیازهای تحقیقاتی را برآورده می‌کند. با توجه به بررسی منابع موجود، پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع امکان برنامه‌ریزی صحیح آبیاری را فراهم می‌آورد. از آنجا که اساس برنامه‌ریزی آبیاری، مقدار تبخیر- تعرق گیاهان است، برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان به واقعی شدن برنامه‌ریزی آبیاری با توجه به نوسانات اقلیمی و در نتیجه تغییرات نیاز آبی گیاهان طی فصول مختلف دوره‌ی کشت ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش، ارزیابی دقت مدل منطقه‌ای WRF برای پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع با طول دوره‌های پیش‌بینی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته به منظور افزایش دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع بود.

مواد و روش‌ها

داده‌های هواشناسی

جدول ۱- برخی ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شرایط اقلیمی*
اسماعیل‌آباد (اقبالیه)	۹۹۳۵۵	۳۶/۲۵	۴۹/۸۹۹	۱۲۴۹	نیمه‌خشک
قزوین	۴۰۷۳۱	۳۶/۳۱۹	۵۰/۰۲	۱۲۷۹/۱	نیمه‌خشک
کرج	۴۰۷۵۲	۳۵/۸۰۷	۵۰/۹۵۴	۱۲۹۲/۹	نیمه‌خشک
هشتگرد	۹۹۳۹۶	۳۶/۰۰۷	۵۰/۷۴۷	۱۶۱۲/۹	نیمه‌خشک

* شرایط اقلیمی، بر اساس شاخص خشکی برگرفته از نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق گیاه مرجع (روش پیشنهادی پنمن- مانیتب فائو) تعیین شد.

مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی آب و هوا (WRF)

معادلات دیفرانسیلی وابسته به مقادیر اولیه و مرزی بوده و با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شوند. مدل پیشرفته WRF (اطلاعات اینترنتی در دسترس - <https://www.mmm.ucar.edu/weather>)

مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا شامل معادلات دیفرانسیلی هستند که قوانین فیزیکی و دینامیکی نیوار را توصیف می‌کنند. این

مورد مطالعه را نشان می دهد. خطاهای موجود در مدل های هواشناسی را می توان به دو نوع خطاهای سامانمند و غیر سامانمند دسته بندی کرد. از منابع خطاهای سامانمند می توان به پارامترسازی نامناسب فرایندهای فیزیکی مانند همرفت و تابش و یا اختلاف در داده های توپوگرافی مدل از قبیل ارتفاع و کاربری سطح زمین و واقعیت اشاره کرد. خطاهای غیر سامانمند بیش تر از خطای موجود در شرایط اولیه مدل ناشی می شود. پیش بینی های حاصل از برون داد خام مدل شامل خطاهای سامانمند بوده که این خطاها در پیش بینی ها باقی مانده و باعث به وجود آمدن آریبی^۴ در توزیع کلی پیش بینی می شوند. برای داشتن یک پیش بینی خوب و قابل استفاده، اجرای الگوریتم های مربوط به پس پردازش آماری، برای رفع این خطا امری اجتناب ناپذیر است (Toth et al., 2003). به منظور کاهش خطا در پیش بینی پارامترها توسط مدل، از تصحیح های آریبی^۵ با روش تطبیق تابع توزیع تجمعی^۶ بر روی خروجی مدل استفاده شد (معادله ۱). میانگین تابع چگالی احتمال لاگ نرمال، میانگین وزنی حاصل از مدل پیش بینی است که آریبی خطای آن ها حذف شده و واریانس آن یک ترکیب خطی از واریانس مدل پیش بینی است.

$$P_{WRF,adj} = \frac{(P_{WRF} - \bar{P}_{WRF})}{stdevP_{WRF}} \times stdevP_{IRIMO} + \bar{P}_{IRIMO} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، $P_{WRF,adj}$ پارامتر اصلاح شده مدل، P_{WRF} برون داد مدل برای پارامتر مورد نظر، \bar{P}_{WRF} میانگین برون داد مدل برای کل دوره، \bar{P}_{IRIMO} میانگین مقدار پارامتر مورد نظر در ایستگاه هواشناسی متناظر برای کل دوره و $stdevP_{WRF}$ و $stdevP_{IRIMO}$ به ترتیب انحراف معیار برون داد مدل و داده های هواشناسی ایستگاه متناظر می باشند.

تبخیر - تعرق مرجع

تغییرات روزانه تبخیر - تعرق مرجع به دلیل تغییرات در پارامترهای هواشناسی اتفاق می افتد و با توجه به مکان^۷ و زمان^۸ تغییر می نماید. پوشش ابر و وقایع حدی در دما، رطوبت و سرعت باد بر تغییرات مکانی ET_0 اثر گذارند. تبخیر - تعرق مرجع مولفه ای کلیدی در مدل سازی گیاهی است و برای محاسبه آن داده های کامل و دقیق هواشناسی مورد نیاز است (Allen et al., 1998). تبخیر - تعرق مرجع، اصلی ترین پارامتر در تعیین مناسب و بهینه نیاز آبی و مدیریت منابع آبی است (Cruz-Blanco et al.,)

research-and-forecasting-model) سامانه ای با قابلیت های فراوان است که می توان با استفاده از آن وضعیت های مختلف نیوار را شبیه سازی نمود. مدل WRF مدلی غیرهیدروستاتیک با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا می باشد که شبکه بندی افقی آن شبکه C- Arakawa^۱ است. در این مدل از طرحواره های انتگرال گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ - کوتا^۲ و طرحواره های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می شود (Xie et al., 2010). این مدل از گام های زمانی کوچک برای مدل های اکوستیک و امواج گرانشی استفاده می نماید. با توجه به توسعه سامانه مدل منطقه ای WRF در سال های اخیر و رایج شدن استفاده از آن در پیش بینی های نیواری، راستی آزمایی برون داد این مدل به عنوان پیش نیاز استفاده از آن در برآورد تبخیر - تعرق مرجع ضروری است. منظور از فرآیند راستی آزمایی، ارزیابی کیفی پیش بینی های هواشناسی است که در آن نتایج فرآیند پیش بینی با دیدبانی های متناظر با آن مقایسه می شود. در این پژوهش مدل میان مقیاس WRF نسخه 3.9.1 با دو دامنه با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر (دامنه بزرگ) و ۹ کیلومتر (دامنه کوچک تر یا داخلی) برای یک دوره ۹۲ روزه از ابتدای می تا انتهای ژوئیه ۲۰۱۸ اجرا شد. در اجرای مدل از داده های GFS^۳ با قدرت تفکیک مکانی $5^\circ \times 5^\circ$ به عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده شد. طرحواره های استفاده شده در شبیه سازی پارامترهای فیزیکی در جدول (۲) نشان داده شده است. زمان اجرای مدل از ساعت 1200 UTC (ساعت هماهنگ جهانی) هر روز تا ۱۲۰ ساعت بعد از آن است. برون داد مدل برای پارامترهای دما، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و تابش خورشیدی برای چهار ایستگاه قزوین، اسماعیل آباد، کرج و هشتگرد در یک دوره سه ماهه (می تا ژوئیه سال ۲۰۱۸ میلادی - ۹۲ روز) استخراج گردید. از آن جا که برون داد مدل برای پیش بینی پارامترهای یاد شده به صورت ساعتی است برای محاسبه هر یک از طول دوره های پیش بینی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته همانند روش تبدیل داده های هواشناسی ساعتی به روزانه از مقدار پارامترها میانگین گیری شد. ایستگاه های قزوین و کرج به عنوان ایستگاه های اصلی و ایستگاه های اسماعیل آباد و هشتگرد به دلیل نزدیکی به آن ها به منظور سنجش قدرت تفکیک مکانی مدل WRF انتخاب شدند. شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی ایستگاه های

6Cumulative Distribution Function (CDF) Matching

7Location

8Date

1 Arakawa C-grid

2 Runge-Kutta

3 Global Forecast System (GFS)

4Bias

5Bias Correction

شیب منحنی فشار بخار $(kPa^{\circ}C^{-1})$ ، تابش خالص R_n ، ضریب ثابت سایکرومتری $(kPa^{\circ}C^{-1})$ ، میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری $(^{\circ}C)$ ، u_2 میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع دو متری (ms^{-1}) ، e_s فشار بخار اشباع در ارتفاع دو متری (kPa) ، e_a فشار بخار واقعی در ارتفاع دو متری (kPa) و $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار (kPa) است. در محاسبات روزانه تبخیر- تعرق مرجع به دلیل ناچیز بودن شار گرمایی روزانه خاک زیر سطح گیاه مرجع، مقدار پارامتر G معادل صفر در نظر گرفته می شود (Allen et al., 1998).

تبخیر- تعرق توسط عوامل فیزیکی مانند متغیرهای هواشناسی، خصوصیات خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه مانند نوع گیاه و زیست توده کنترل می گردد. با تعیین پارامترهای گیاهی استاندارد و انجام آبیاری مناسب، برای تعیین ET_o استاندارد، تنها داده های هواشناسی مورد نیاز است. به طور کلی، خصوصیات پارامترهای تبخیر- تعرق مزرعه به صورت یک رابطه خطی به ET_o نسبت داده می شود. این رابطه نشان دهنده ی کنترل عوامل محیطی مانند تابش خورشیدی، سرعت باد، دما و رطوبت هوا بر روی ET_o است. این عوامل با تأمین انرژی مورد نیاز تبخیر و یا افزایش راندمان انتقال بخار آب از روی سطح تبخیر شونده بر روی تبخیر- تعرق تأثیر می گذارند. معادله پنمن - مانتیث بر اساس توازن انرژی روی یک سطح مرطوب پوشیده از گیاه چمن ارائه گردیده است. این معادله به عنوان معتبرترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع توسط کارشناسان فائو معرفی شده است. فرم کلی این معادله به صورت زیر است (Allen et al., 1998):

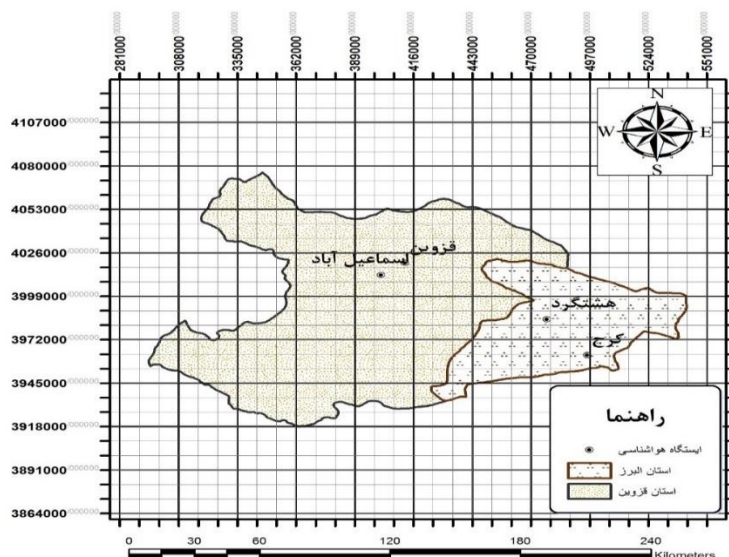
$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

که در آن، ET_o تبخیر-تعرق مرجع $(mm.day^{-1})$ ، Δ

(رابطه ۲)

جدول ۲- برخی طرح واره های انتخاب شده برای فیزیک مدل

طرح واره	رهیافت
خرد فیزیک	Lin et al., 1983
تابش موج بلند	RRTM
تابش موج کوتاه	Dudhia
همرفت	Kain-Fritsch
لایه مرزی	Mellor-Yamada-Janjic
لایه سطحی	Monin-Obukhov
سطح زمین	Unified Noah



شکل ۱- موقعیت ایستگاه های مورد استفاده، استان های البرز و قزوین، ایران.
یاخته های بزرگ نشان دهنده ی دامنه ی بزرگ (۲۷ کیلومتر) و یاخته های کوچک نشان دهنده ی دامنه ی داخلی (۹ کیلومتر)

ضریب رگرسیون (b_0)، آماره‌ی دیگری است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است (۷):

$$b_0 = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

ضریب رگرسیون، از رگرسیون خطی متمایل به داده‌های مشاهداتی به‌دست‌آمده و ثابت همگرایی کلی بین مقادیر مدل و مقادیر مشاهده‌ای است. امتیاز بریر یک نمایه راستی آزمایی برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی و همدادی است که در واقع میانگین مربعات خطای پیش‌بینی است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود (۸):

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در تمامی آماره‌های یادشده (روابط ۳ تا ۸)، O_i ، P_i ، \bar{O} و N به‌ترتیب پیش‌بینی مدل، دیدبانی متناظر برای روز i ام، میانگین مقادیر دیدبانی و تعداد جفت داده‌ی دیدبانی-پیش‌بینی است.

نتایج و بحث

در این پژوهش دقت برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از مدل WRF ارزیابی شد. در برنامه‌ریزی آبیاری تقویمی به شیوه‌ی معمول، برای محاسبه ET_0 از میانگین ده روزه دوره‌ی آماره پایه^۴ استفاده می‌شود. به منظور نمایش تفاوت تبخیر-تعرق مرجع با مقدار محاسبه‌شده توسط میانگین ده روزه دوره‌ی پایه، درصد نرخ تغییرات تبخیر-تعرق مرجع طی دوره‌ی مورد مطالعه (می تا ژوئیه ۲۰۱۸) نسبت به مقدار ET_0 ده روزه در دوره‌ی پایه (۲۰۱۷-۱۹۸۸) (ایستگاه‌های قزوین و کرج) و (۲۰۱۷-۲۰۰۸) (ایستگاه‌های اسماعیل‌آباد و هشتگرد) در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که درصد نرخ تغییرات ET_0 به شرح زیر محاسبه شد:

$$\text{Change Rate \%} = \frac{ET_0(\text{Decade-2018}) - ET_0(\text{Decade-baseline})}{ET_0(\text{Decade-baseline})} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن $ET_0(\text{Decade-2018})$ مقدار متوسط تبخیر-تعرق مرجع ده روزه در دوره‌ی مورد مطالعه و $ET_0(\text{Decade-baseline})$ مقدار متوسط تبخیر-تعرق مرجع ده روزه در دوره‌ی پایه است. بر پایه نتایج به‌دست‌آمده، نرخ تغییرات ET_0 ده روزه (میانگین تمامی ایستگاه‌ها) در ماه‌های می، ژوئن و ژوئیه سال ۲۰۱۸ نسبت دوره‌ی پایه به ترتیب ۲۰/۹-، ۸/۱۲- و ۷/۸۳ درصد است. به بیان دیگر، مقدار میانگین تبخیر-تعرق مرجع در ماه‌های می و ژوئن سال ۲۰۱۸ کم‌تر از حد نرمال دوره‌ی پایه و در ماه ژوئیه بیش از حد نرمال دوره‌ی پایه بوده است. این درصد نرخ تغییرات ET_0 نشان‌دهنده‌ی انحراف مقدار

آماره‌های مربوط به ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل WRF در برآورد تبخیر-تعرق با طول دوره‌های پیش‌بینی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، کارایی مدل (EF)، آریبی (BIAS)، ضریب رگرسیون (b_0)^۱ و امتیاز بریر^۲ (BS) استفاده شد. این آماره‌ها بیش‌ترین کاربرد را در تجزیه و تحلیل‌های مقایسه‌ای دارند و از آن‌ها برای مقایسه پیش‌بینی‌های یک مدل در برابر داده‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود (Moriassi et al., 2007). ضریب تعیین (R^2)، یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر x و y است که به‌صورت بی‌بعد نشان داده می‌شود و ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی^۳ دارد و در واقع توان دوم آن است. یکی دیگر از آماره‌هایی که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های یک مدل در برابر مشاهده‌ها از آن استفاده می‌شود ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) است (۳):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

از آن‌جا که مقدار RMSE به دامنه‌ی تغییرات داده‌ها وابسته است، نمی‌توان گفت چه مقدار از این شاخص نشان‌دهنده‌ی کیفیت مدل است، همچنین نمی‌توان مقدار به‌دست آمده از دو مقایسه‌ی متفاوت را با یکدیگر مقایسه نمود. به همین منظور برای رفع این مشکل در این تحقیق از شاخص دیگری با نام ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز استفاده شده است (۴):

$$nRMSE = 100 \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

کارایی مدل (EF) نیز یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین آماره‌ها در مقایسه‌ی مدل با مقادیر مشاهده‌ای است (۵):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

کارایی مدل به‌صورت بی‌بعد نشان داده می‌شود و مقدار آن بین منفی بی‌نهایت و مثبت یک است. مقدار منفی این شاخص نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار کم مدل در پیش‌بینی مقادیر مشاهده‌ای است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد راوی دقت بسیار زیاد مدل خواهد بود. آریبی (BIAS) آماره‌ای برای تشخیص بیش‌برآورد یا کم‌برآوردی مدل است (۶):

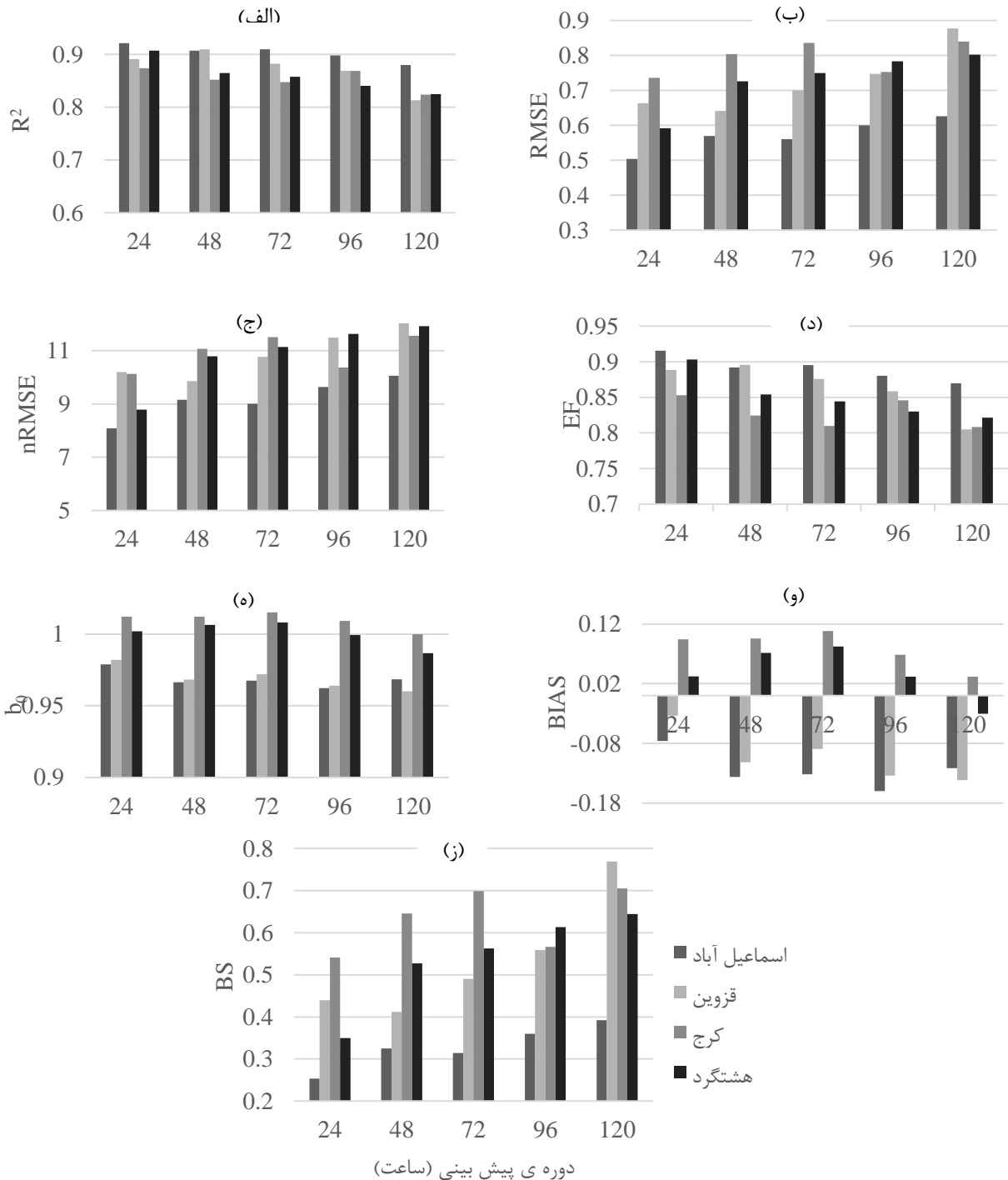
$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (\text{رابطه ۶})$$

مدل خواهد داشت (Raziei and Pereira, 2013). مقدار زیاد (دست کم ۰/۸۱) آماره کارایی مدل در تمامی طول دوره‌های پیش‌بینی و همه‌ی ایستگاه‌های مورد مطالعه مؤید ارتباطی خوب بین تبخیر- تعرق مرجع حاصل از مدل WRF با مقدار تبخیر- تعرق مرجع مشاهده‌ای است (شکل ۲-۵). آماره‌ی آریبی میانگین تمایل مدل در بیش‌برآورد کردن^۱ و یا کم‌برآورد کردن^۲ مقادیر مشاهده‌ای نشان را می‌دهد. مقدار آریبی برابر با صفر نشان‌دهنده‌ی آن است که مدل به‌خوبی توانسته مقادیر مشاهده‌ای را پیش‌بینی کند. همچنین مقادیر مثبت و منفی به‌ترتیب مبین بیش- برآورد کردن و یا کم‌برآورد کردن مدل است. با توجه به شکل (۲-۲) و) که مقدار آریبی محاسبه شده بین تبخیر- تعرق مشاهده‌ای و تبخیر- تعرق حاصل از مدل WRF را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که آریبی در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی بین ۰/۱۶- و ۰/۱۱+ است. این امر نشان‌دهنده انحراف اندک تبخیر- تعرق حاصل از برون‌داد مدل و داده‌های هواشناسی است. با توجه به آماره‌ی آریبی، برون‌داد مدل برای ایستگاه‌های اسماعیل‌آباد و قزوین در تمامی دوره‌های پیش‌بینی دارای کم‌برآورد و برای ایستگاه‌های کرج و هشتگرد دارای بیش‌برآورد می‌باشد. شکل (۲-۵) مقدار آماره‌ی ضریب رگرسیون (b_0) محاسبه شده بین تبخیر- تعرق مشاهده‌ای و تبخیر- تعرق حاصل از مدل WRF را نشان می‌دهد. مقادیر بیش‌تر و کم‌تر از یک برای این آماره به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی بیش‌برآورد و کم‌برآورد کردن مدل می‌باشد (Paredes et al., 2018). با توجه به این آماره، مدل در همه‌ی طول دوره‌های پیش‌بینی در ایستگاه‌های اسماعیل‌آباد و قزوین کم‌برآورد و در ایستگاه‌های کرج و هشتگرد بیش‌برآورد داشته و این بیانگر تطابق نتایج آماره‌های آریبی و ضریب رگرسیون است. در شکل (۲-۳) آماره‌ی امتیاز بریر برای راستی آزمایی پیش‌بینی- پیش‌بینی کامل برابر صفر خواهد بود (Young, 2010). در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، با افزایش طول دوره‌ی پیش‌بینی‌ها مقدار این آماره افزایش یافته است. این مطلب بیان‌گر این نکته است که با فاصله گرفتن از شرط مرزی اولیه (افزایش طول دوره‌ی پیش‌بینی) دقت مدل رفته‌رفته کاهش می‌یابد. ایستگاه‌های اسماعیل‌آباد، قزوین، هشتگرد و کرج به ترتیب با میانگین امتیاز بریر ۰/۳۲۹، ۰/۵۳۴، ۰/۵۳۹ و ۰/۶۳۱، حائز بهترین امتیاز در پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع بودند. یکی از دلایل به‌وجود آمدن اختلاف در امتیاز بریر تفاوت کاربری اراضی در اطراف ایستگاه‌های مورد مطالعه است. به‌همین منظور لازم است داده‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی به‌روز در قسمت پیش‌پردازش مدل WRF مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۳) روند تغییرات

تبخیر- تعرق مرجع در دوره‌ی مورد مطالعه نسبت به دوره‌ی پایه بوده و بیانگر لزوم استفاده از پیش‌بینی‌های میان مدت در برآورد صحیح تبخیر- تعرق مرجع است. مقادیر مقایسه‌ی آماری بین برآورد تبخیر- تعرق مرجع حاصل از داده‌های مشاهده‌ای (داده‌های هواشناسی) و پس‌پردازش آماری برون‌داد مدل WRF در جدول (۴) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که ضریب تعیین محاسبه شده برای تمامی ایستگاه‌ها و همه‌ی طول دوره‌های پیش‌بینی بزرگ‌تر از ۰/۸۱ است. بیش‌ترین مقدار آن مربوط به ایستگاه اسماعیل‌آباد با طول دوره‌ی پیش‌بینی ۲۴ ساعته و کم‌ترین مقدار آن متعلق به ایستگاه قزوین با طول دوره‌ی پیش‌بینی ۱۲۰ ساعته است. هر چه مقدار ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیک‌تر باشد، ارتباط قوی‌تری میان دو متغیر وجود دارد. به عبارت دیگر مدل WRF دست کم بیش از ۸۱ درصد واریانس تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده توسط داده‌های هواشناسی را توصیف می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها با افزایش طول دوره‌ی پیش‌بینی ضریب تعیین مدل کاهش می‌یابد، اما در پایین‌ترین مقدار آن (طول دوره‌ی پیش‌بینی ۱۲۰ ساعته) نیز بیان‌گر ارتباط بسیار خوب تبخیر- تعرق مرجع حاصل از مدل با مقدار تبخیر- تعرق مرجع مشاهده‌ای است (شکل ۲-الف). آماره‌ی ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، واریانس خطای مدل را در پیش‌بینی مقادیر واقعی نشان می‌دهد. بنابراین هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد مدل خطای کم‌تری در پیش‌بینی مقادیر مشاهده‌ای خواهد داشت. مقدار آماره‌ی nRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل، ۲۰-۱۰ درصد مناسب بودن مدل، ۳۰-۲۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه‌ی ضعف مدل در پیش‌بینی است. با توجه به محدوده آماره‌های RMSE و nRMSE، دقت مدل برای طول دوره‌ی پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته‌ی همه‌ی ایستگاه‌ها و طول دوره‌ی پیش‌بینی ۹۶ و ۱۲۰ ساعته‌ی ایستگاه اسماعیل‌آباد بسیار بالا بوده است. همچنین دقت مدل در طول دوره‌های پیش‌بینی ۹۶ و ۱۲۰ ساعته‌ی ایستگاه‌های قزوین، کرج و هشتگرد در محدوده‌ی مناسبی ارزیابی شد (شکل ۲-ب و ج). آماره‌ی کارایی مدل (EF) در واقع بزرگی نسبی واریانس باقی‌مانده‌ها را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی (۵) این آماره از تقسیم میانگین مربع خطای مدل بر واریانس داده‌های مشاهده‌ای به‌دست می‌آید. بنابراین، اگر واریانس باقی‌مانده‌ها برابر با واریانس داده‌های مشاهده‌ای باشد، مقدار کارایی مدل برابر با یک خواهد بود. در مقابل، وقتی که مقدار آن به سمت صفر یا منفی گرایش پیدا کند، میانگین مشاهدات پیش‌بینی بهتری از

پایه و در ماه ژوئیه بیش تر از میانگین ده روزه دوره ی پایه است. به طور کلی در تمامی ایستگاه ها و طول دوره های پیش بینی نه تنها از نظر هماهنگی زمانی، بلکه به لحاظ مقدار نیز همانندی بسیار زیادی بین مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق مرجع حاصل از پس پردازش آماری برون داد مدل WRF با مقادیر محاسبه شده تبخیر- تعرق مرجع توسط داده های ایستگاه های هواشناسی متناظر در ایستگاه های مورد مطالعه وجود دارد.

تبخیر- تعرق مرجع حاصل از میانگین ده روزه دوره ی پایه، داده های هواشناسی سال ۲۰۱۸ و پیش بینی های تبخیر- تعرق مرجع با طول دوره ی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته مدل WRF به تفکیک برای ایستگاه های اسماعیل آباد، قزوین، کرج و هشتگرد در طول دوره ی مطالعه (۹۲ روز) نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقدار تبخیر- تعرق مرجع دوره ی مورد مطالعه در ماه های می و ژوئن در همه ی ایستگاه ها کم تر از میانگین ده روزه دوره ی



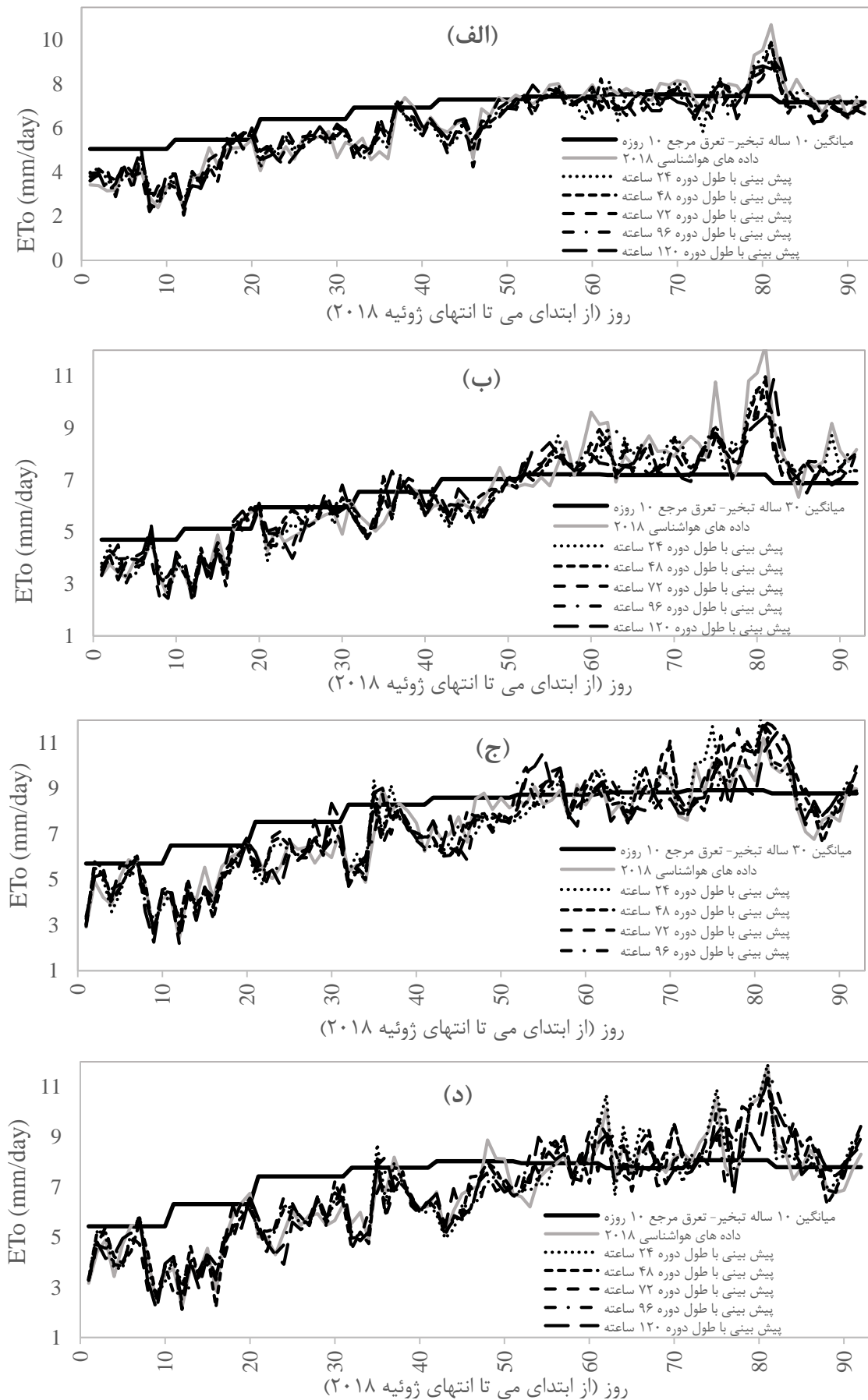
شکل ۲- مقایسه تبخیر- تعرق مرجع حاصل از داده های هواشناسی و برون داد مدل WRF در ایستگاه های همدیدی منتخب با استفاده از نمایه های آماری. (الف) ضریب تعیین، (ب) ریشه دوم میانگین مربعات خطا، (ج) ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده، (د) راندمان یا کارایی مدل، (ه) آریبی، (و) ضریب رگرسیون و (ز) امتیاز بریر.

جدول ۳- درصد نرخ تغییرات تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده داده های هواشناسی سال ۲۰۱۸ نسبت به دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷ برای ایستگاه های قزوین و کرج و دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۷ برای ایستگاه های اسماعیل آباد (اقبالیه) و هشتگرد

ایستگاه	می			ژوئن			ژوئیه		
	دهه اول	دهه دوم	دهه اول	دهه اول	دهه دوم	دهه سوم	دهه اول	دهه دوم	دهه سوم
اسماعیل آباد (اقبالیه)	-۳۳/۳۶	-۲۰/۲	-۲۰/۵۹	-۱۵/۷۱	-۱۱/۶۱	۱/۰۲	۲/۹۳	۹/۴۸	۳/۱۳
قزوین	-۲۳/۸۵	-۱۵/۱۲	-۱۲/۷۱	-۹/۶	-۹/۴۴	۷/۶۷	۱۲/۷۱	۲۸/۶۵	۱۴/۶۴
کرج	-۲۲/۳	-۲۴/۳۵	-۱۹/۴۶	-۱۵/۶	-۹/۶۲	-۲/۰۳	-۲/۳۸	۷/۳	-۳/۹۱
هشتگرد	-۲۳/۵۸	-۲۹/۳۵	-۲۶/۱۷	-۱۶/۳۲	-۱۲/۱۹	-۳/۹۶	۶/۹۲	۱۴/۸۵	-۰/۳۵

جدول ۴- نتایج مقایسه آماری بین تبخیر- تعرق حاصل از داده های هواشناسی و برون داد مدل WRF

ایستگاه	دوره پیش بینی (ساعت)	شاخص های آماری						
		R ² (%)	(mm.d ⁻¹)RMSE	nRMSE(%)	(-)EF	(-)BIAS	(-)b ₀	(-)BS
اسماعیل آباد (اقبالیه)	۲۴	۰/۹۲۱	۰/۵۰۴	۸/۰۸۸	۰/۹۱۶	-۰/۰۷۶	۰/۹۷۹	۰/۲۵۴
	۴۸	۰/۹۰۷	۰/۵۷۰	۹/۱۵۵	۰/۸۹۲	-۰/۱۳۶	۰/۹۶۷	۰/۳۲۵
	۷۲	۰/۹۱۰	۰/۵۶۱	۹/۰۰۶	۰/۸۹۶	-۰/۱۳۲	۰/۹۶۸	۰/۳۱۴
	۹۶	۰/۸۹۸	۰/۶۰۰	۹/۶۴۰	۰/۸۸۰	-۰/۱۶۰	۰/۹۶۲	۰/۳۶۰
	۱۲۰	۰/۸۸۰	۰/۶۲۶	۱۰/۰۵۷	۰/۸۷۰	-۰/۱۲۱	۰/۹۶۸	۰/۳۹۲
قزوین	۲۴	۰/۸۹۱	۰/۶۶۳	۱۰/۱۹۵	۰/۸۸۹	-۰/۰۳۳	۰/۹۸۲	۰/۴۴۰
	۴۸	۰/۹۰۹	۰/۶۴۱	۹/۸۶۲	۰/۸۹۶	-۰/۱۱۲	۰/۹۶۸	۰/۴۱۲
	۷۲	۰/۸۸۲	۰/۷۰۰	۱۰/۷۶۵	۰/۸۷۶	-۰/۰۸۹	۰/۹۷۲	۰/۴۹۰
	۹۶	۰/۸۶۹	۰/۷۴۸	۱۱/۴۹۲	۰/۸۵۸	-۰/۱۳۴	۰/۹۶۴	۰/۵۵۹
	۱۲۰	۰/۸۱۳	۰/۸۷۷	۱۳/۴۸۴	۰/۸۰۵	-۰/۱۴۱	۰/۹۶۰	۰/۷۶۹
کرج	۲۴	۰/۸۷۴	۰/۷۳۶	۱۰/۱۳۲	۰/۸۵۳	۰/۰۹۴	۱/۰۱۲	۰/۵۴۱
	۴۸	۰/۸۵۲	۰/۸۰۴	۱۱/۰۶۸	۰/۸۲۴	۰/۰۹۶	۱/۰۱۲	۰/۶۴۶
	۷۲	۰/۸۴۸	۰/۸۳۶	۱۱/۵۱۳	۰/۸۱۰	۰/۱۰۸	۱/۰۱۵	۰/۶۹۹
	۹۶	۰/۸۶۹	۰/۷۵۳	۱۰/۳۶۶	۰/۸۴۶	۰/۰۶۹	۱/۰۰۹	۰/۵۶۶
	۱۲۰	۰/۸۲۴	۰/۸۴۰	۱۱/۵۶۴	۰/۸۰۸	۰/۰۳۲	۱/۰۰۰	۰/۷۰۵
هشتگرد	۲۴	۰/۹۰۷	۰/۵۹۲	۸/۷۸۶	۰/۹۰۳	۰/۰۳۲	۱/۰۰۲	۰/۳۵۰
	۴۸	۰/۸۶۵	۰/۷۲۶	۱۰/۷۸۵	۰/۸۵۴	۰/۰۷۲	۱/۰۰۷	۰/۵۲۷
	۷۲	۰/۸۵۸	۰/۷۵۰	۱۱/۱۳۸	۰/۸۴۴	۰/۰۸۲	۱/۰۰۸	۰/۵۶۲
	۹۶	۰/۸۴۰	۰/۷۸۳	۱۱/۶۳۴	۰/۸۳۰	۰/۰۳۲	۰/۹۹۹	۰/۶۱۳
	۱۲۰	۰/۸۲۵	۰/۸۰۳	۱۱/۹۲۲	۰/۸۲۲	-۰/۰۳۰	۰/۹۸۷	۰/۶۴۴



شکل ۳- روند تغییرات تبخیر- تعرق مرجع حاصل از داده‌های هواشناسی (IRIMO) و پیش‌بینی‌های (۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته) مدل (WRF) در ایستگاه‌های (الف) اسماعیل‌آباد، (ب) قزوین، (ج) کرج و (د) هشتگرد.

نتیجه‌گیری کلی

برونداد مدل بین ۰/۸۱۳ تا ۰/۹۲۱ بوده که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار آن به ترتیب متعلق به ایستگاه قزوین با طول دوره‌ی پیش‌بینی ۱۲۰ ساعته و ایستگاه اسماعیل‌آباد با طول دوره‌ی پیش‌بینی ۲۴ ساعته است. با توجه به آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، کارایی مدل (EF)، آریبی (BIAS)، ضریب رگرسیون (b_0) و امتیاز بریر (BS)، برونداد مدل برای تمامی ایستگاه‌ها و طول دوره‌های پیش‌بینی ۱۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته با دقت بالا و مناسب ارزیابی گردید. یافته‌ها نشان داد که نه تنها از نظر هماهنگی زمانی، بلکه به لحاظ مقدار نیز همانندی بسیار زیادی بین مقادیر برآورد شده تبخیر-تعرق مرجع حاصل از پس‌پردازش آماری برونداد مدل WRF با مقادیر محاسبه‌شده تبخیر-تعرق مرجع توسط داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متناظر در نقاط مورد مطالعه وجود دارد. با توجه به دقت تفکیک مکانی مناسب (۹ کیلومتر) و به روز برونداد مدل می‌توان با اطمینان از خروجی مدل به منظور افزایش دقت برآورد تبخیر-تعرق مرجع استفاده نمود.

برآورد با دقت مناسب تبخیر-تعرق مرجع امری ضروری در مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه آبیاری است. پیش‌بینی‌های میان‌مدت، به دلیل در نظر گرفتن نوسانات اقلیمی به‌ویژه در سال‌هایی که انحراف بیش‌تری از میانگین دوره آماری پایه‌ی مبنای برآورد تبخیر-تعرق مرجع دارند حائز اهمیت فراوانی است. بر پایه نتایج به دست آمده، نرخ تغییرات ET_0 ده روزه (میانگین تمامی ایستگاه‌ها) در ماه‌های می، ژوئن و ژوئیه سال ۲۰۱۸ نسبت دوره‌ی پایه به ترتیب ۲۰/۹-، ۸/۱۲- و ۷/۸۳ درصد است. این درصد نرخ تغییرات ET_0 نشان‌دهنده‌ی انحراف مقدار تبخیر-تعرق مرجع در دوره‌ی مورد مطالعه نسبت به دوره‌ی پایه بوده و بیانگر لزوم استفاده از پیش‌بینی‌های میان‌مدت در برآورد صحیح تبخیر-تعرق مرجع است. در پژوهش حاضر، دقت مدل WRF در پیش‌بینی میان‌مدت پارامترهای مؤثر در برآورد تبخیر-تعرق مرجع (شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و تابش خورشیدی) ارزیابی شد. دامنه تغییرات ضریب تعیین

REFERENCES

- Annandale, J. G., Stirzaker, R. J., Singels, A., Van der Laan, M. and Laker, M. (2011). Irrigation scheduling research: South African experiences and future prospects. *Water SA*. 37 (5):751 - 763.
- 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 No. 56. Rome, Italy, 300 p.
- Baigorria, G. A., Hansen, J. W., Ward, N., Jones, J. W. and O'Brien, J. J. (2008). Assessing predictability of cotton yields in the southeastern United States based on regional atmospheric circulation and surface temperatures. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 47: 76-91, doi: 10.1175/2007jamc1523.1
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Moreno, M. A. (2016). FORETO: new software for reference evapotranspiration forecasting. *J. Arid Environ.* 124 (1), 128-141.
- Bucks, D. A., Allen, R. G., Roth, R. L. and Gardner, B. R. (1988). Short staple cotton under micro and level-basin irrigation methods. *Irrig. Sci.* 9, 161-176.
- Crane, T. A., Roncoli, C., Paz, J., Breuer, N., Broad, K., Ingram, K. T. and Hoogenboom G. (2010). Forecast skill and farmers' skills: Seasonal climate forecasts and agricultural risk management in the southeastern United States. *Weather Climate and Society*. 2: 44-59, doi: 10.1175/2010wcas1075.1.
- Cruz-Blanco, M., Gavilán, P., Santos, C. and Lorite, I. J. (2014). Assessment of reference evapotranspiration using remote sensing and forecasting tools under semi-arid conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 33, 280-289. doi:10.1016/j.jag.2014.06.008
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, ACM., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., H'olm, E. V., Isaksen, L., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Th'epaut, J. N. and Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis, configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Fader, M., Shi, S., von Bloh, W., Bondeau, A. and Cramer, W. (2015). Mediterranean irrigation under climate change: More efficient irrigation needed to compensate increases in irrigation water requirements. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 12, 8459-8504.
- Hunsaker, D. J., French, A. N., Waller, P. M., Bautista, E., Thorp, K. R., Bronson, K. F. and Andrade-Sanchez, P. (2015). Comparison of traditional and ET-based irrigation scheduling of surface-irrigated cotton in the arid southwestern USA. *Agricultural Water Management*. 159, 209-224. doi:10.1016/j.agwat.2015.06.016
- Kustas, W. P. and Norman, J. M. (1996). Use of remote

- sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*. 41:4, 495-516, DOI: 10.1080/02626669609491522.
- Moriasi, D. N., Arnold, M. W., Van Liew, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3), 885-900.
- Leib, B., Sassenrath, G. and Schmidt, A. M. (2012). Irrigation scheduling tools. p. 32-37 In C. Perry, and E. Barnes, (eds.). *Cotton Irrigation Management for Humid Regions*. Cotton, Incorporated, Cary, NC.
- Lin, Y. L., Farley, R. D. and Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.* 22, pp. 1065-1092.
- Lorite, I.J., Ramírez-Cuesta, J.M., Cruz-Blanco, M. and Santos, C. (2015). Using weather forecast data for irrigation scheduling under semi-arid conditions. *Irrig. Sci.* 33 (6), 411-427. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-015-0478-0>.
- Paredes, P., Martins, D., Pereira, L.S., Cadima, J. and Pires, C. (2018). Accuracy of daily estimation of grass reference evapotranspiration using ERAInterim reanalysis products with assessment of alternative bias correction schemes. *Agricultural Water Management*. 210, 340-353.
- Pereira, L. S. (1999). Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agricultural Water Management*. 40 (2-3), 153-169.
- Raziei, T. and Pereira, S. L. 2013, Spatial variability analysis of reference evapotranspiration in Iran utilizing fine resolution gridded datasets. *Agricultural Water Management*. 126, 104-118.
- Rinaldi, M. and He, Z. (2014). Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*. Volume 123.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W. and Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*
- Toth, Z., Talagrand, O., Candille, G. and Zhu Y., (2003). Probability and ensemble .Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. Jolliffe I. T. and Stephenson, D. B. *Wiley*. 137-163.
- Traore, S., Luo, Y. and Fipps, G. (2017). Gene-Expression Programming for Short-Term Forecasting of Daily Reference Evapotranspiration Using Public Weather Forecast Information. *Water Resources Management*. 31(15), 4891-4908. doi:10.1007/s11269-017-1784-5
- Xie, L., Liu, B., Liu, H. and Guan, C. (2010). NUMERICAL SIMULATION OF TROPICAL CYCLONE INTENSITY USING AN AIR-SEA-WAVE COUPLED PREDICTION SYSTEM. *Volume 18: Ocean Science (OS)*. 19-43. doi:10.1142/9789812838148_0002
- Xu, J. Z., Peng, S. Z., Yang, S. H., Luo, Y. F. and Wang, Y. J. (2012). Predicting daily reference evapotranspiration in a humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data. *J Agric Sci Tech*. 14:1331-1342.
- Yang, Y., Cui, Y., Lu, Y., Lyu, X., Traore, S., Khane, S. and Wang, W. (2016). Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the penman-Monteith model and public weather forecasts. *Agricultural Water Management*. 177:329-339.
- Young, R.M.B. (2010). Decomposition of the Brier score for weighted forecast-verification pairs. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 136(650): 1364-1370.