

مقایسه تبخیر-تعرق بر آوردی چغندر قند با معادله پنمن-مانتیت بر اساس داده‌های واقعی و محصولات GFS، ECMWF و MeteoBlue در منطقه جوی

سید حسن طباطبائی^۱، سید مجید میرلطیفی^{۲*}، حسین دهقانی سانج^۳ و اشکان شگری^۴

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری تخصصی، و دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی کرج ایران
۴- محقق وزارت هواشناسی استرالیا، ملبورن، استرالیا
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۶

چکیده

در این پژوهش نیاز آبی گیاه چغندر قند بهاره در منطقه جوی با استفاده از پیش‌بینی‌های ۵ روزه مدل‌های هواشناسی ECMWF، GFS و MeteoBlue برآورد و با نیاز آبی محاسبه شده براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی جوی مقایسه شد. بررسی‌ها در چهار سطح ارزیابی دقت مدل‌ها در پیش‌بینی ۱. متغیرهای هواشناسی دخیل در رابطه پنمن-مانتیت، ۲. دو جزء تابشی (ET_0^{Rad}) و همرفتی (ET_0^{Adv}) تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، ۳. ET_0 و ۴. نیاز آبی چغندر قند بهاره پیگیری شد. مدل‌ها ET_0^{Adv} را کمتر و ET_0^{Rad} را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند، به طوری که خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در برآورد ET_0^{Rad} به ترتیب برابر $0/4-$ ، $0/5-$ و $0/2-$ میلی‌متر در روز و برای ET_0^{Adv} به ترتیب برابر $0/4+$ ، $0/5+$ و $0/7+$ میلی‌متر در روز به دست آمد. میانگین خطای مربعات (RMSE) این سه مدل برای ET_0^{Rad} به ترتیب $0/6+$ ، $0/7+$ و $0/7+$ میلی‌متر در روز و برای ET_0^{Adv} به ترتیب برابر $0/7+$ ، $0/7+$ و $0/9+$ میلی‌متر در روز محاسبه شد. رفتار متضاد خطاهای ET_0^{Rad} و ET_0^{Adv} سبب شد تا خطای اریب برآورد ET_0 توسط مدل‌ها به ترتیب برابر $0/3+$ ، $0/3+$ و $0/47+$ میلی‌متر در روز شود. نیاز آبی چغندر قند بهاره در منطقه جوی ۸۴۱ میلی‌متر در سراسر دوره رشد بر اساس روش فائو-پنمن-مانتیت محاسبه شد. مجموع خطای برآورد نیاز آبی روزانه مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در طول دوره رشد به ترتیب برابر ۶۵، ۶۴ و ۱۰۰ میلی‌متر به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده توصیه می‌شود برای پیش‌بینی نیاز آبی گیاه چغندر قند در منطقه جوی از برون‌دادهای مدل ECMWF استفاده شود.

واژه‌های کلیدی

برنامه ریزی آبیاری، تبخیر-تعرق گیاه مرجع، ضریب گیاهی، نیاز آبیاری

مقدمه

رشد اقتصادی، انسجام اجتماعی و ثبات سیاسی تبدیل شده است (FAO, 2007). امروزه بیش از ۲۵ درصد جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که وضعیت تنش شدید آبی دارند (Molinis-Senante

آب، به‌ویژه در کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا، منبعی است حیاتی، محدود و با ارزش. تنش‌های ناشی از کمبود آب به تهدیدی جدی در

روشن است که ضریب‌های K_c و K_s ناظر به مدیریت آبیاری و زراعی است. بنابراین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، نمایانگر کلیه فاکتورهای اتمسفری مؤثر بر آب مصرفی است (Pereira *et al.*, 2015). عموماً در طراحی سامانه‌های آبیاری، ET_0 بر مبنای آمار بلندمدت هواشناسی بیشینه نیاز آبی گیاه در سراسر فصل دوره رشد برای تأمین آب موردنیاز در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو استفاده از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت هواشناسی در محاسبه تبخیر-تعرق مرجع امکان برنامه‌ریزی کارآمدتر آبیاری را فراهم می‌آورد (Gharedaghi *et al.*, 2020).

در سال‌های اخیر، مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی متعددی توسعه یافته‌اند که توانسته‌اند منبعی کارآمد در مدیریت زراعی و مدیریت آبیاری باشند. اثرگذاری مناسب نتایج این مدل‌ها در بخش کشاورزی، در گرو کیفیت مناسب پیش‌بینی آنها از شرایط جوی است (Paparrizos *et al.*, 2020). با این حال، با توجه به عدم قطعیت ذاتی مدل‌ها، باید دقت و صحت خروجی نهایی این دست از مدل‌ها ارزیابی و با مقادیر واقعی مشاهده شده در محدوده مطالعاتی بررسی شود (Ahmadi *et al.*, 2019).

مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی میان‌مدت متغیرهای هواشناسی توسعه یافته‌اند که از جمله می‌توان به سه مدل GFS^2 ، $ECMWF^3$ و $MeteoBlue$ اشاره کرد که به ترتیب توسط مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیط‌زیستی ایالات متحده، مرکز پیش‌بینی‌های هواشناسی میان‌مدت اتحادیه اروپا، و دانشگاه بازل سوئیس توسعه یافته‌اند. در نقاط مختلف جهان در مورد دقت این مدل‌ها در

(*et al.*, 2014) افزون بر بحران آب، تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهان نیز از مهم‌ترین چالش‌ها برای نسل بشر است (Droogers, 2004). مهم‌ترین عوامل تشدید کننده بحران‌های مذکور کمبود منابع آبی و افزایش رقابت بر سر آنهاست (Perry, 2011). مدیریت کارآمد و تبیین استراتژی‌های درست منابع آبی تنها راه کاهش تبعات این مسئله و افزایش بهره‌وری مصرف آب پاسخ‌دهی به مسائلی است که در آینده رخ خواهد داد (Dumont *et al.*, 2013).

برنامه‌ریزی درست مصرف آب، به‌ویژه در حوزه کشاورزی، امری ضروری در نیل به افزایش بهره‌وری مصرف آب است. هدف از آبیاری ایجاد شرایط مساعد رطوبتی برای گیاه است. بنابراین آبیاری باید با تخمین درست از نیاز آبی^۱ گیاه و منطبق بر مراحل رشد اعمال شود. اطلاعات مربوط به تبخیر-تعرق هر گیاه بخش اصلی و ضروری در محاسبه نیاز آبیاری و به تبع آن برنامه‌ریزی مطلوب آبیاری است (Jensen & Allen, 2014). برنامه‌ریزی آبیاری عموماً با روش توصیه‌شده توسط FAO اجرا می‌شود که بر تعیین اجزای رابطه بیلان رطوبتی در محیط ریشه استوار است (Allen *et al.*, 1998) و در آن تبخیر-تعرق گیاه برابر است با:

$$ET_c = K_c K_s ET_0 \quad (1)$$

که در آن،

ET_c = تبخیر-تعرق گیاه ($mm d^{-1}$)؛ K_c = ضریب بدون بعد تابع نوع گیاه و مدیریت آبیاری و زراعی (بدون بعد)؛ ET_0 ؛ تبخیر-تعرق گیاه مرجع و معرف شرایط اتمسفری ($mm d^{-1}$)، و K_s (بدون بعد) ضریب تنش.

2- The Global Forecast System (GFS)

3- The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

۱- در این پژوهش از عبارت "نیاز آبی" به جای "تبخیر-تعرق گیاه در شرایط استاندارد" استفاده شد. بنابراین مباحث مربوط به نیاز آبی در نیاز آبی در نظر گرفته نشده است.

۱۳۹۳ برای ۴۵ ایستگاه باران در مناطق مختلف ایران مشاهده کردند که میانگین جذرمربعات نرمال شده خطای بارش پیش‌بینی شده از ۰/۴۵ تا ۲/۸ و خطای اریب بین ۵۵- تا ۲۵ میلی‌متر در سال، در نقاط مختلف کشور متفاوت است. عزیزیان و رضایی اعتدالی (Azizian & Ramezanietedali, 2020) با مقایسه پیش‌بینی‌های بارش ECMWF، TRIMM و PERSIAN و ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوزه آبریز سفیدرود مشاهده کردند که دقت این مدل‌ها به شدت وابسته به مکان است.

کارایی مدل‌سازی احتمالاتی و داده‌گوری^۱ در گرو وجود درکی مناسب از رفتار احتمالی خطای اجزای مدل‌سازی مانند متغیرهای ورودی و یا پارامترهای مدل‌سازی است. ET_0 یکی از مهم‌ترین ورودی‌های هرگونه مدل‌سازی آب-خاک-گیاه-اتمسفر است.

هدف از این پژوهش بررسی رفتار آماری خطای ET_0 و پیرو آن نیاز آبی پیش‌بینی شده برای گیاه چغندر قند بهاره در دشت جویان استان خراسان رضوی است که در آن از اطلاعات پیش‌بینی هواشناسی ۵ روزه مدل‌های هواشناسی ECMWF، GFS و MeteoBlue استفاده شده است. دلیل انتخاب پیش‌بینی‌های ۵ روزه در این پژوهش، حداکثر زمان فاصله درخواست تا تحویل آب متداول در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. دقت پیش‌بینی این مدل‌ها در چهار سطح ارزیابی شده است: (۱) سه متغیر اصلی هواشناسی دخیل در محاسبه ET_0 شامل دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min}) و سرعت باد بیشینه (U)؛ (۲) بخش مربوط به تابش خورشیدی در رابطه فائو پنمن مانیتیت (ET_0^{Rad})، بخش مربوط به جریان همرفتی

زمینه متغیرهای مختلف هواشناسی پژوهش‌های گسترده‌ای شده است.

علیدوست و همکاران (Alidost *et al.*, 2019) خطای اریب برون‌دادهای دمای هوا در نزدیکی سطح زمین مدل ECMWF و روش‌های اصلاح آن را بررسی و گزارش کردند که هرچند خطای مذکور ۳/۶ درجه سلسیوس مشاهده شده اما با روش‌های کنترل اریب می‌توان این خطا را تا ۴۶ درصد کاهش داد.

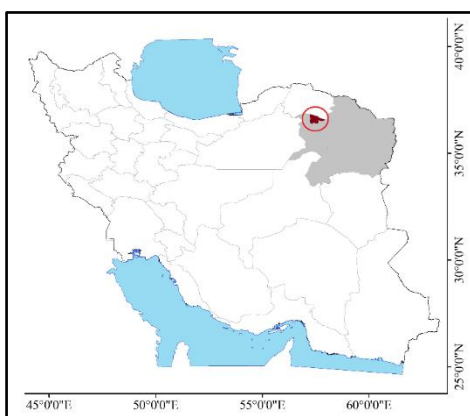
خصوصیات ذاتی این مدل‌ها سبب شده تا دقت خروجی آنها در شرایط آب و هوایی، بازه‌های زمانی و نقاط مختلف دنیا برای متغیرهای مختلف متفاوت باشد. روشن است که ارزش هر یک از متغیرهای هواشناسی که این مدل‌های پیش‌بینی می‌کنند، برحسب استفاده کاربر متفاوت است (Shahi *et al.*, 2009). برای مثال، در باغ‌هایی که با خطر سرمازدگی روبه‌رو هستند، دقت مدل‌ها در پیش‌بینی دمای کمینه و یا برای برنامه‌ریزی سمپاشی و محلول‌پاشی در مزارع سرعت باد فاکتور تأثیرگذاری است. در تابستان، به ویژه در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب، تخمین دقیق شار خالص تابشی در سطح و طی فصول سرد سال تخمین مناسب سرعت باد و نقصان رطوبتی هوا بیشترین تأثیر را بر برآورد مناسب ET_0 دارند (Pereira *et al.*, 2015). از این رو باید توجه کرد که بسته به بازه زمانی دوره رشد گیاه و شرایط اقلیمی محدوده مطالعاتی مدل‌های هواشناسی کارایی متفاوتی داشته باشند. علاوه بر زمان، پراکنندگی جغرافیایی نیز فاکتور بسیار مؤثری بر دقت پیش‌بینی‌های هواشناسی است. رضیئی و ستوده (Raziei & Sotoudeh, 2017) با بررسی دقت پیش‌بینی‌های میان‌مدت بارش ECMWF در بازه زمانی ۱۳۵۸ تا

شهرستان با در نظر گرفتن کشت مجدد، به‌طور متوسط سالانه ۲۷ هزار هکتار زمین زیر کشت محصولات زراعی می‌رود که ۱۰ تا ۱۵ درصد آن چغندر قند است (Deputy of Planning and Economy of the Ministry of Agriculture-Jahad, 2017). در این پژوهش، از اطلاعات ایستگاه هواشناسی کلیماتولوژی جویین با مختصات ۳۶/۶ درجه شمالی و ۵۷/۴ درجه شرقی استفاده شد. شاخص خشکی^۲ این منطقه ۰/۰۵ است که از منظر طبقه‌بندی اقلیمی (Ponce *et al.*, 2000) در زمره مناطق بسیار خشک^۳ به حساب می‌آید.

در رابطه پهن منماتیت (ET_0^{Adv})؛ (۳) تبخیر-تعرق گیاه مرجع ET_0 ؛ و (۴) نیاز آبی گیاه چغندر قند^۱.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعاتی

شهرستان جویین، به مرکزیت شهر نقاب، یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی است. این شهرستان با مساحتی ۱۶۵۶،۰۰۵ کیلومتر مربع، و با ارتفاع متوسط ۱۱۰۰ متر از سطح دریا، در محدوده تقریبی ۳۶/۴۱ تا ۳۶/۸۳ عرض شمالی و ۵۷/۱۲ تا ۵۳/۹۵ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). در این



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان جویین

Figure 1- Geographical location of Joven city

پیش‌بینی‌های هواشناسی سه پایگاه ECMWF، GFS و MeteoBlue استفاده شد (جدول ۱). پیش‌بینی‌های روزانه این مدل‌ها از متغیرهای هواشناسی دما، سرعت باد و ابرناکی برای محدوده مطالعاتی از پایگاه اینترنتی <https://www.windy.com> اخذ گردید. این پایگاه

پایگاه‌های هواشناسی

تبخیر-تعرق گیاهان تحت تأثیر عوامل هواشناسی، گیاهی و ویژگی‌های مدیریتی و محیطی قرار دارد. عوامل هواشناسی مؤثر بر تبخیر-تعرق گیاهان به‌طور عمده عبارت‌اند از تابش آفتاب، دما، رطوبت هوا و سرعت باد. در این پژوهش از

$$2- \text{Aridity Index} = \frac{\text{Precipitation(Annual)}}{\text{Potential Evaporation(Annual)}}$$

3- Hyperarid

۱- روش استاندارد محاسبه نیاز آبی محصولات باغی و زراعی، اندازه‌گیری مستقیم در سطح زمین‌های کشاورزی، روش‌های لایسیمیتری است. در این پژوهش به دلیل دسترسی نداشتن به لایسیمیتر در منطقه مطالعاتی، مبنای ارزیابی، بر مقایسه نیاز آبی مستخرج از رابطه ۱ با ورودی‌های پایگاه‌های هواشناسی و داده‌های هواشناسی برداشت شده در ایستگاه جویین استوار است.

فصل رشد چغندر قند در آن منطقه است. کلیه متغیرهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر-تعرق، ET_0 و نیاز آبی از پیش‌بینی ۵ روزه مدل‌ها محاسبه و با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه هواشناسی مقایسه شد. به سخی دیگر، در روز i ام پیش‌بینی روز $i+5$ اخذ شده و متغیرهای مورد برای روز $i+5$ محاسبه و با متغیرهای محاسبه شده بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در روز $i+5$ در ایستگاه مقایسه می‌شود.

پیش‌بینی‌های هواشناسی را از منابع مختلف، به صورت رایگان در اختیار کاربران می‌گذارد. پیش‌بینی‌های هر سه پایگاه به صورت روزانه در فاصله‌های زمانی سه ساعته ارائه می‌شود. از آنجایی که تمرکز این پژوهش بررسی دقت بروندهای مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی مدل‌های مذکور در برآورد نیاز آبی گیاه چغندر قند بهاره در محدوده جوین است، بازه زمانی مورد بررسی از ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۱۳۹۹ انتخاب شد که

جدول ۱- مشخصات مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی میان‌مدت مورد استفاده در تحقیق

Table 1 - Specifications of medium-range meteorological forecast models used in this research

مدل	مقیاس مکانی*	حداکثر بازه زمانی پیش‌بینی	مرکز توسعه دهنده مدل
**ERA-Interim	۲۸ کیلومتر × ۲۸ کیلومتر	۱۰	The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
MeteoBlue	۳۰ کیلومتر × ۳۰ کیلومتر	۷	University of Basel, Switzerland
GFS	۲۸ کیلومتر × ۲۸ کیلومتر	۱۶	The National Center for Environmental Prediction (NCEP)

* خروجی مدل‌ها با قدرت تفکیک مکانی متفاوتی ارائه می‌شود؛ از این رو ارقام مندرج در جدول مربوط به رزولوشن مورد استفاده در این پژوهش است.

** مدل ERA-Interim مدل توسعه یافته توسط ECMWF است. به دلیل رایج بودن عنوان ECMWF، در این پژوهش از عنوان ECMWF برای مشخص کردن این پیش‌بینی‌ها استفاده شد.

روش محاسبه ET_0

روش فائو پنمن مانتیث که در نشریه فائو ۵۶ ارائه شده، به استاندارد نانوشته جهانی^۱ در محاسبه ET_0 تبدیل شده است (Pereira *et al.*, 2015). رابطه پنمن مانتیث تبخیر-تعرق از سطح چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و ضریب زبری آیرودینامیک ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلیبدو ۰/۲۳ را محاسبه می‌کند (Allen *et al.*, 1998). رابطه پنمن مانتیث عبارت است از:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2-f)$$

که در آن؛

ET_0 = تبخیر-تعرق گیاه مرجع ($mm d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa ^\circ C^{-1}$)، R_n شار تابش خالص ($MJ m^{-2} d^{-1}$)؛ G = شار حرارت خاک ($MJ m^{-2} d^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa ^\circ C^{-1}$)؛ T = میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری ($^\circ C$)؛ u_2 = سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m s^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)؛ e_a = فشار بخار واقعی هوا (kPa). یادآوری می‌شود که محاسبات به صورت روزانه بوده است و از این رو G صفر در نظر گرفته شد. در این رابطه، بخش مربوط به $0.408\Delta(R_n - G)$ بیانگر نقش تابش خورشیدی و $\gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)$ مربوط به نقش جریان همرفتی در تبخیر-تعرق است. به عبارت دیگر:

به‌طور فعال در حال تبخیر-تغرق باشد و درگیر تنش رطوبتی نباشد تا جریان همرفتی محلی^۱ رخ ندهد. در چنین شرایطی، T_{min} عموماً به سمت رطوبت هوا در نقطه شب‌نم (T_{dew}) میل می‌کند. با وجود این، در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی این شرایط فراهم نیست. فقدان سطح گسترده پوشش گیاهی پیرامون ایستگاه هواشناسی سبب می‌شود تا نقصان بخار اشباع (VPD) بیش برآورد شود. از این رو لازم است تا رطوبت هوای اعلام شده از ایستگاه برای استفاده در رابطه ۲ برابر رابطه ۴ اصلاح شود (Allen et al., 1998).

$$T_{dew} = T_{min} - K_0 \quad (4)$$

که در آن؛

K_0 = برای مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب صفر و برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ۲ درجه سانتی‌گراد.

از آنجا که $\left\{ VPD = \frac{e_a(T_{max}) + e_a(T_{min})}{2} - e_a(T_{dew}) \right\}$ است، استفاده از این روش سبب می‌شود تا از بیش‌برآورد VPD جلوگیری شود (Allen et al., 1998). با توجه به شرایط منطقه، برای این ایستگاه K_0 برابر ۱ در نظر گرفته شد. در شکل ۲ الف، VPD محاسبه شده با استفاده از رطوبت نسبی هوای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی جوین و VPD محاسبه شده بر اساس دمای کمینه ارائه شده است. بدین ترتیب، VPD در روزهایی اصلاح شد که رطوبت هوا از رطوبت متناظر محاسبه شده با استفاده از رابطه ۴ کمتر گردید. در شکل ۲ ب، ET_0 اصلاح شده و ET_0 بدون اعمال اصلاحات برای ایستگاه کلایماتولوژی جوین در دوره ۱۹۶ روزه، ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۹۹ ارائه شده است.

$$ET_0^{rad} = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2-ب)$$

$$ET_0^{Adv} = \frac{900}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \frac{\gamma}{T + 273} u_2 (e_s - e_a) \quad (2-پ)$$

جزء تابش تابع (ET_0^{rad}) متأثر از موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و ابرناکی هوا است (رابطه ۲-ب). در مقابل جزء همرفتی (ET_0^{Adv}) متأثر از جریان باد، نقصان رطوبتی و دمای هواست (رابطه ۲-پ).

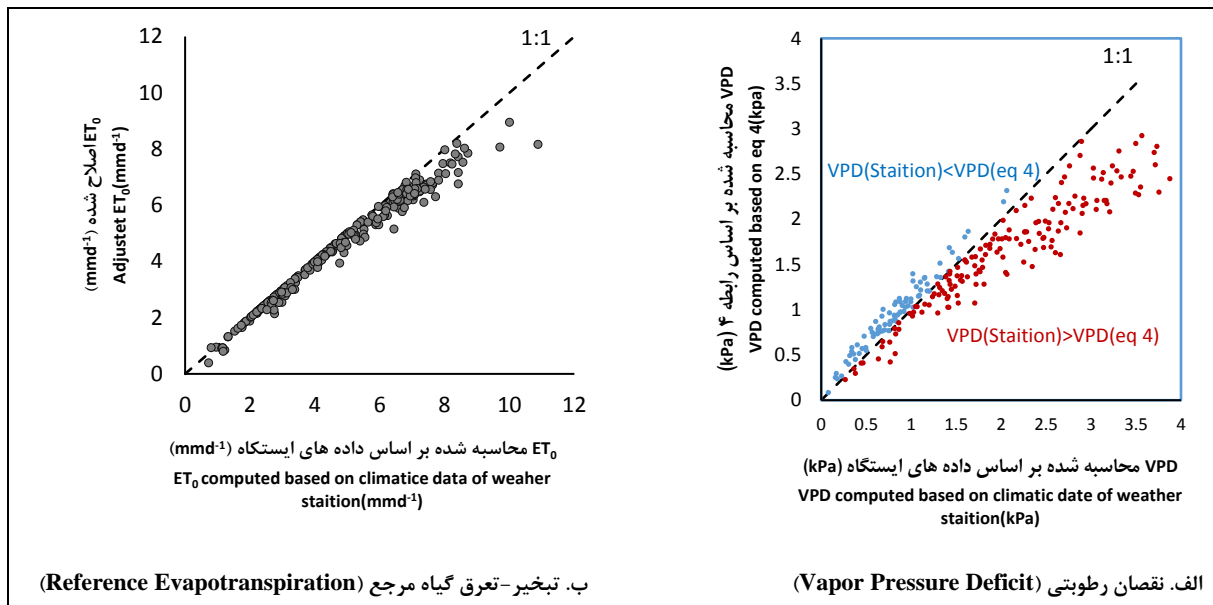
متأسفانه ایستگاه هواشناسی جوین به دستگاه‌های پایرونومتر و آفتاب‌نگار مجهز نبود؛ به همین دلیل ET_0 برای ایستگاه هواشناسی جوین با استفاده روش توصیه‌شده نشریه فائو ۵۶ برای شرایط فقدان بخشی از اطلاعات ورودی محاسبه شد. در این روش شار خالص تابش برابر است با:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \cong \frac{0.77k_{RS}R_a\sqrt{T_{max} - T_{min}} - \sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)}{\quad} \quad (3)$$

که در آن؛

R_a = تابش خورشیدی رسیده به بالای جو $(MJ m^{-2} d^{-1})$ ؛ K_{RS} = ضریب اصلاحی (برای مناطق ساحلی $0.16^\circ C^{-0.5}$ و برای مناطق دور از دریا $0.19^\circ C^{-0.5}$)؛ σ = ثابت استفن بولتزمن $(4.903 \cdot 10^{-9} MJ^\circ K^{-4} m^{-2} d^{-1})$ ؛ T_{max} دمای بیشینه ($^\circ K$)؛ T_{min} دمای کمینه ($^\circ K$)؛ R_s = تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین $(MJ m^{-2} d^{-1})$ ؛ و R_{so} = تابش خورشیدی در آسمان تمیز $(MJ m^{-2} d^{-1})$.

در توسعه روش فائو پنمن-مانتیث فرض بر تبخیر-تغرق از پوشش گیاهی با سطح وسیع است؛ به عبارت دیگر، اطلاعات هواشناسی مورد استفاده باید در شرایطی برداشت شود که پوشش پیرامون آن



شکل ۲- نقصان رطوبتی و تبخیر-تعرق گیاه مرجع محاسبه شده در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ماه ۱۳۹۹ بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی جوین و محاسبه شده بر اساس رابطه ۴

Figure 2 – VPD and ET_0 based on the information of Jovein meteorological station in the period from 18 May to November 2020 and based on Equation 4

گردند. تغییرات $K_{c_{ini}}$ متأثر از تواتر رویدادهای خیس شدگی خاک و توان تبخیر از سطح خاک است.

تغییرات $K_{c_{mid}}$ و $K_{c_{end}}$ متأثر از تغییرات ضریب آیرودینامیکی گیاه است که سرعت باد، خشکی هوا و ارتفاع گیاه در آن اثر گذار است (رابطه ۹):

$$K_{c_{Adj}} = K_{c_T} + 0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (9)$$

که در آنها؛

$K_{c_{Adj}} = K_{c_{mid}}$ عبارت است از $K_{c_{mid}}$ یا $K_{c_{end}}$ اصلاح شده؛ $K_{c_{mid}} = K_{c_T}$ یا $K_{c_{end}}$ توصیه شده در منابع؛ U_2 و RH_{min} = به ترتیب متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری (ms^{-1}) و متوسط رطوبت نسبی روزانه (درصد) در بازه زمانی میانی و یا انتهایی و h ارتفاع گیاه (m) در دوره مربوط.

مدل‌ها بر اساس خطای اریب برآورد متغیرها و جذر مربعات خطا آنها ارزیابی شدند (رابطه‌های ۶ و ۷)

$$Error = X_{Actual\ Observation} - X_{Forecast} \quad (5)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Error_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Error_i)^2} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum (X_{Observation} - \overline{X_{Observation}})(X_{Forecast} - \overline{X_{Forecast}})}{\sqrt{\sum (X_{Observation} - \overline{X_{Observation}})^2 \sum (X_{Forecast} - \overline{X_{Forecast}})^2}} \quad (8)$$

که در آنها؛

$BIAS$ ، $RMSE$ ، r = به ترتیب خطای اریب، جذر مربعات خطا؛ و ضریب همبستگی و $\overline{X_{Observation}}$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده در ایستگاه هواشناسی جوین و پیش‌بینی مدل‌ها و $\overline{X_{Forecast}}$ میانگین آن است.

ضریب گیاهی

ضریب‌های ارائه شده در مراجع علمی برای ضریب گیاهی (K_c) در سه دوره رشد $K_{c_{ini}}$ ، دوره میانی $K_{c_{mid}}$ و دوره انتهایی $K_{c_{end}}$ باید اصلاح

تبخیر-تعرق، دقت خروجی سه مدل GFS، ECMWF و MeteoBlue در پیش‌بینی ۵ روزه متغیرهای T_{min} ، T_{max} و سرعت باد بیشینه بررسی شد (جدول ۲). علاوه بر سه متغیر مذکور متغیرهای دیگری در رابطه پنمن-مانتیت استفاده می‌شوند که در ایستگاه هواشناسی به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شوند. این متغیرها عبارت‌اند از R_{ns} ، R_{nl} ، R_n و ساعات آفتابی.

با استفاده از رابطه‌های توصیه شده نشریه فائو ۵۶ برای شرایط فقدان بخشی از اطلاعات ورودی، مقادیر متغیرهای فوق برای ایستگاه هواشناسی جوین تخمین زده شد و با بروندادهای حاصل از مدل‌ها مقایسه گردید. رطوبت هوا در بروندادهای مدل‌های مورد بررسی وجود نداشت، از این رو نقصان فشار بخار اشباع برای مدل‌های هواشناسی بر حسب فرض رابطه ۴ محاسبه شد.

همچنین، $K_{c_{end}}$ تابع مدیریت آبیاری در مزارع و تاریخ برداشت گیاه است که تازگی یا خشکی گیاه را در زمان برداشت مشخص می‌کند.

نتایج و بحث

برای ارائه پیش‌بینی‌های قابل‌اعتمادتری از متغیرهای آب و هوایی، در سراسر جهان از روش بررسی آماری به عنوان مهمترین روش ارزیابی در بخش کشاورزی و در سایر بخش‌ها استفاده می‌شود در همین زمینه، این پژوهش به بررسی کارایی مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در سه حالت پرداخته است: (۱) داده‌های خام هواشناسی شامل بیشینه دمای روزانه، کمینه دمای روزانه و سرعت باد حداکثر روزانه، (۲) تبخیر-تعرق گیاه مرجع و اجزای آن و (۳) نیاز آبی گیاه چغندر قند در منطقه جوین.

داده‌های خام هواشناسی

با توجه به اهمیت تأثیر متغیرهای هواشناسی بر

جدول ۲ - نتایج مقایسه آماری بین داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی و بروندادهای مدل‌های هواشناسی GFS، ECMWF و

MeteoBlue در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ماه ۱۳۹۹

Table 2 - Results of statistical comparison between station daily data and outputs of GFS, ECMWF and MeteoBlue in the period from 18 May to November 2020

$*R_n (Mjm^{-2}d^{-1})$			$*R_{ns} (Mjm^{-2}d^{-1})$			$*R_{nl} (Mjm^{-2}d^{-1})$			واحد	شاخص
GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue		
-۱/۲۵	-۱/۵۴	-۰/۱۵	-۱/۴۴	-۱/۵۶	۰/۳۵	-۰/۱۸	-۰/۰۲	۰/۵۰	mmd ⁻¹	BIAS
۱/۹۶	۱/۹۰	۲/۰۶	۲/۷۸	۲/۳۸	۳/۱۹	۱/۲۰	-۰/۹۷	۱/۴۲	mmd ⁻¹	RMSE
دمای میانگین (°C)			$T_{min} (°C)$			$T_{max} (°C)$			واحد	شاخص
GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue		
-۰/۰۸	-۱/۰۵	-۰/۶۸	-۲/۸۲	-۳/۷۱	-۲/۲۰	۱/۴۴	۱/۵۹	۲/۰۰	mmd ⁻¹	BIAS
۱/۵۴	۱/۷۹	۱/۶۹	۴/۰۷	۴/۲۷	۳/۱۳	۲/۳۲	۲/۵۰	۲/۹۰	mmd ⁻¹	RMSE
ساعت آفتابی*			$**VPD (kPa)$			Max Windspeed(ms ⁻¹)			واحد	شاخص
GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue	GFS	ECMWF	MeteoBlue		
-۱/۴۱	-۱/۵۴	۰/۳۲	-۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۱۴	۱/۳۳	۱/۷۹	mmd ⁻¹	BIAS
۲/۷۳	۲/۳۷	۰/۱۰	۰/۴۶	۰/۴۴	-۰/۴۹	۳/۲۹	۳/۲۶	۳/۴۴	mmd ⁻¹	RMSE

* این متغیرها به صورت مستقیم در ایستگاه اندازه‌گیری نمی‌گردید. ارقام مندرج در جدول از مقایسه متغیرها با اطلاعات مستخرج از روابط توصیه شده نشریه فائو ۵۶ برای شرایط فقدان بخشی از اطلاعات ورودی است.

** رطوبت هوا در بروندادهای مدل‌های مورد بررسی وجود نداشتند. نقصان فشار بخار اشباع برای مدل‌های هواشناسی بر حسب فرض رابطه ۴ محاسبه شد.

انتظار، خطای اریب مدل GFS منفی شده است. دلیل این امر آن است که روزهایی که این مدل T_{min} را با دقت پایینی پیش‌بینی کرده لزوماً منطبق بر روزهایی نبوده است که مدل موفق به برآورد دقیق T_{max} نگردید. به عبارت دیگر دقت مدل‌ها در برآورد VPD علاوه بر اینکه تابع دقت برآورد T_{min} و T_{max} و به تبع آن $e_a(T_{min})$ و $e_a(T_{max})$ است، به هم‌زمانی رخداد این خطاها نیز بستگی دارد. RMSE برای VPD برای سه مدل GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۵ به دست آمد.

خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در برآورد سرعت باد حداکثر روزانه در محدوده مطالعاتی به ترتیب ۰/۱، ۱/۳ و ۱/۸ متر بر ثانیه به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای اریب مدل GFS بسیار کمتر از خطای اریب دو مدل دیگر است. با این همه RMSE برآورد سرعت باد حداکثر برای سه مدل به ترتیب ۳/۳، ۳/۳ و ۳/۴ متر بر ثانیه محاسبه شد. به عبارت دیگر، هرچند برآیند خطای برآورد سرعت باد روزانه توسط مدل GFS در مجموع دوره رشد گیاه مقدار کمی است اما، اگر برون‌دادهای سرعت باد حداکثر این مدل به صورت روزانه ارزیابی شود، نسبت به دو مدل دیگر دقت بالاتری ندارد.

روشن است که فقدان تجهیزات اندازه‌گیری مستقیم تابش خورشیدی در ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه سبب کاهش دقت محاسبه ET_0 با استفاده از رابطه پنمن مانیتیت می‌گردد. با وجود این فرض‌ها رگریوز و سامانی (Hargreaves & Samani, 1985) در برآورد شار خالص تابشی، ناظر به این حقیقت است که ابرناکی آسمان مانع از افزایش اختلاف دمای شب و روز می‌گردد. این

همان‌طوری که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در پیش‌بینی ۵ روزه از T_{max} در محدوده مطالعاتی به ترتیب ۱/۴، ۱/۶ و ۲/۰ درجه سلسیوس است. RMSE برآورد T_{max} برای سه مدل GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب ۲/۳، ۲/۵ و ۲/۳ محاسبه شد. باید در نظر داشت که در بازه زمانی مورد مطالعه، هر سه مدل T_{max} را کمتر از واقعیت پیش‌بینی کردند.

بررسی خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در پیش‌بینی T_{min} نشانگر آن است که هر سه مدل دمای کمینه روزانه را به ترتیب ۲/۸، ۳/۱ و ۲/۲ سلسیوس بیشتر از شرایط واقعی محاسبه کرده بودند. هرچند در بازه زمانی مورد بررسی گیاهان با خطر سرمازدگی مواجه نیستند اما باید در نظر داشت که بیش‌برآورد T_{min} اعمال سیاست‌های مقابله با سرمازدگی را به تأخیر اندازد و بالطبع خطر سرمازدگی را در گیاهان افزایش دهد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در مناطق کشاورزی، دمای کمینه به نوعی نشانگر رطوبت مطلق هوا و اختلاف دمای کمینه و بیشینه در یک روز بیانگر شدت خشکی آب و هوای منطقه است. بنابراین، با توجه به کم برآورد کردن T_{min} ، انتظار می‌رود تا خطای اریب VPD نیز مثبت شود یا به عبارت دیگر، مدل‌ها رطوبت منطقه را بیش برآورد کنند. هیگدورن و همکاران (Hagedorn et al., 2008) RMSE پیش‌بینی‌های با فاصله زمانی ۵ روزه از دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین توسط دو مدل GFS و ECMWF را به ترتیب برابر ۳/۶ و ۴/۴ درجه سلسیوس محاسبه کردند.

خطای اریب VPD نیز برای سه مدل به ترتیب ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۳ است. مشاهده می‌شود که برخلاف

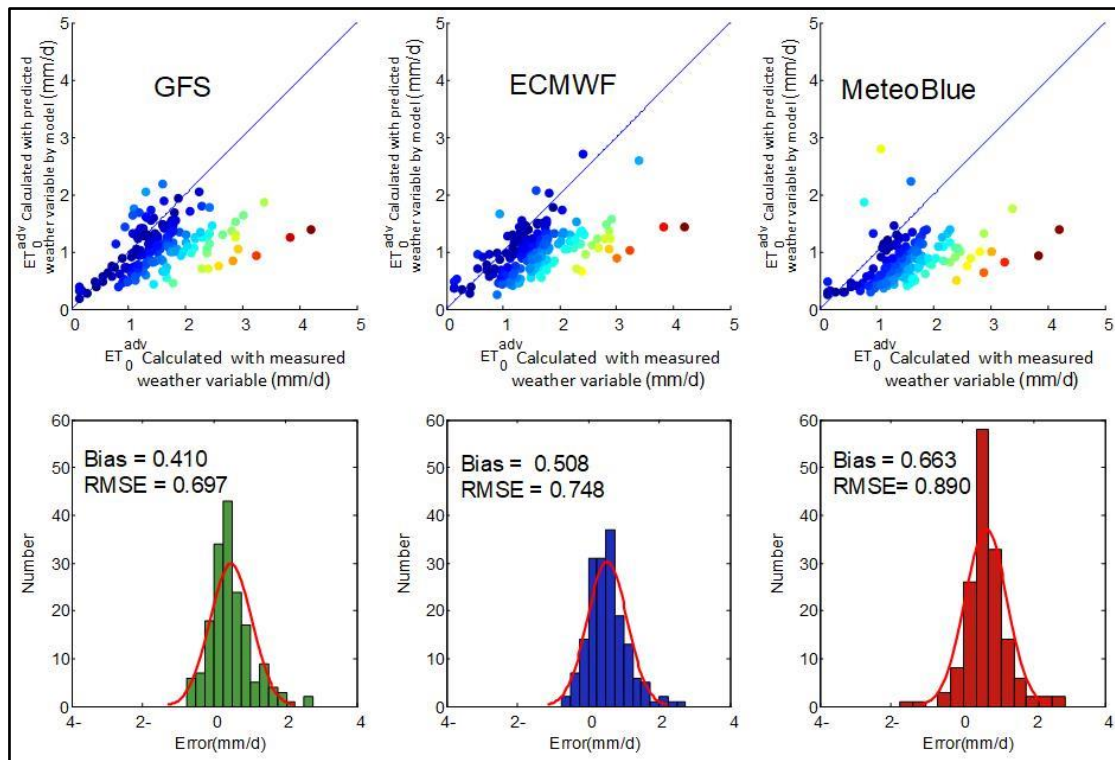
برآورد R_{ns} به ترتیب $-۱/۴۴$ ، $-۱/۵۶$ و $۰/۳۵$ مگاژول بر متر مربع بر روز به دست آمد. از آنجاکه اندازه مطلق خطای اریب R_{ns} بیشتر R_{nl} بوده در نتیجه خطای اریب R_n برای هر سه مدل منفی شده است. یادآوری می شود که $R_n = R_{ns} - R_{nl}$ است.

تبخیر-تعرق گیاه مرجع

ET_0 از دو بخش جزء تابشی (ET_0^{Rad}) و جزء همرفتی (ET_0^{Adv}) تشکیل شده است. در مناطق مرطوب به سبب کم بودن VPD ، ET_0 تقریباً معادل ET_0^{Rad} محاسبه می شود.

در مناطق خشک مانند جویین، علاوه بر جزء تابشی، جزء همرفتی نیز سهم مهمی در ET_0 دارد. ET_0^{Adv} برای سه مدل محاسبه و با ET_0 محاسبه شده بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی جویین مقایسه شد (شکل ۴).

نتیجه‌گیری مبتنی بر انبوه اطلاعات جمع آوری شده در نقاط مختلف دنیاست که آن را به روشی پذیرفته شده و کاربردی تبدیل کرده است. دقت مدل‌های GFS، ECMWF و Meteoblue در پیش‌بینی سه فاکتور R_{nl} ، R_{ns} و R_n که برای منطقه جویین با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده بود، بررسی گردید (جدول ۲). همانطور که مشاهده می‌شود هر سه مدل، شار خالص تابشی را بیش از مقدار محاسبه شده برای ایستگاه جویین برآورد کرده‌اند. چنانچه خطای اریب سه مدل GFS، ECMWF و Meteoblue در برآورد R_n به ترتیب $-۱/۲$ ، $-۱/۵$ و $-۰/۱$ مگاژول بر متر مربع بر روز به دست آمد. با این همه، خطای این مدل‌ها در محاسبه دو جز R_{nl} و R_{ns} یکسان نبوده است. خطای اریب مدل‌ها در برآورد R_{nl} به ترتیب $-۰/۱۸$ ، $-۰/۰۲$ و $۰/۵۰$ و در

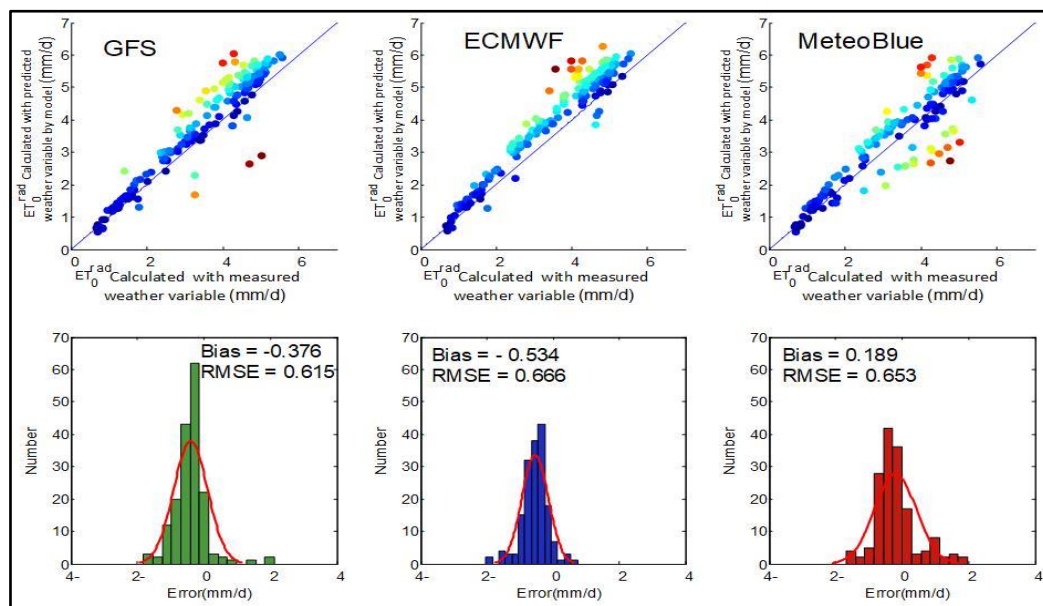


شکل ۴- جزء همرفتی تبخیر-تعرق گیاه مرجع بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی و متغیرهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی جویین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۹۹

Figure 4- Advection term of ET_0 based on meteorological forecasts and climatic data recorded at weather station in the period from 18 May to November 2020

ET_0 محاسبه شده بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی جوین مقایسه شد (شکل ۵). خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در برآورد ET_0^{Rad} به ترتیب برابر -0.4 ، -0.5 و -0.2 میلی‌متر در روز بود. همان‌طور که پیشتر گفته شد این بیش‌برآورد متأثر از بیش‌برآورد R_n توسط مدل‌ها ست (جدول ۲). این نتایج ناظر به بازه زمانی ۱۹۶ روزه از ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان‌ماه ۹۹ است. جذر مربعات خطای برآورد ET_0^{Rad} مدل‌ها برای سه مدل GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب برابر 0.61 ، 0.67 و 0.65 است؛ بنابراین مشابه ET_0^{Adv} در مورد تخمین ET_0^{Rad} ، GFS نسبت به دو مدل دیگر کارایی بهتری دارد. لازم است یادآوری شود که خطای اریب MeteoBlue کمتر از خطای اریب GFS است؛ با وجود این، با تکنیک‌های حذف اریب می‌توان این خطا را کنترل کرد. در حالی که RMSE از جنس نویز است که پیش‌بینی رفتار و کنترل آن بسیار دشوارتر از پیش‌بینی رفتار و کنترل خطای اریب است.

خطای اریب مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue در برآورد ET_0^{Adv} به ترتیب برابر 0.4 ، 0.5 و 0.7 میلی‌متر در روز بود. مهم‌ترین دلیل در کمتر برآورد کردن ET_0^{Adv} مربوط به برآورد کمتر VPD و بیش برآورد T_{mean} در این مدل‌ها نسبت به واقعیت منطقه جوین است. جذر مربعات خطای برآورد ET_0^{Adv} مدل‌ها برای سه مدل GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب برابر 0.75 ، 0.70 و 0.89 است. بدین ترتیب بروندادهای مدل GFS در برآورد ET_0^{Adv} دقیق‌تر از دو مدل دیگر است. نکته قابل توجه دیگر اندرکنش خطاهای متغیرهای خام هواشناسی در خطای ET_0^{Adv} است. همان‌طور که پیشتر مشاهده شد، کارایی مدل MeteoBlue در تخمین T_{min} و به تبع آن رطوبت مطلق هوا بهتر از کارایی دو مدل دیگر بود اما در ET_0^{Adv} این موضوع مشاهده نمی‌شود. فرایند تبخیر-تعرق نیاز به مقدار قابل‌توجهی انرژی دارد. پرتوهای آفتاب منبع اصلی انرژی مورد استفاده در فرایند تبخیر-تعرق است (رابطه ۲-ب). ET_0^{Rad} برای سه مدل محاسبه و با

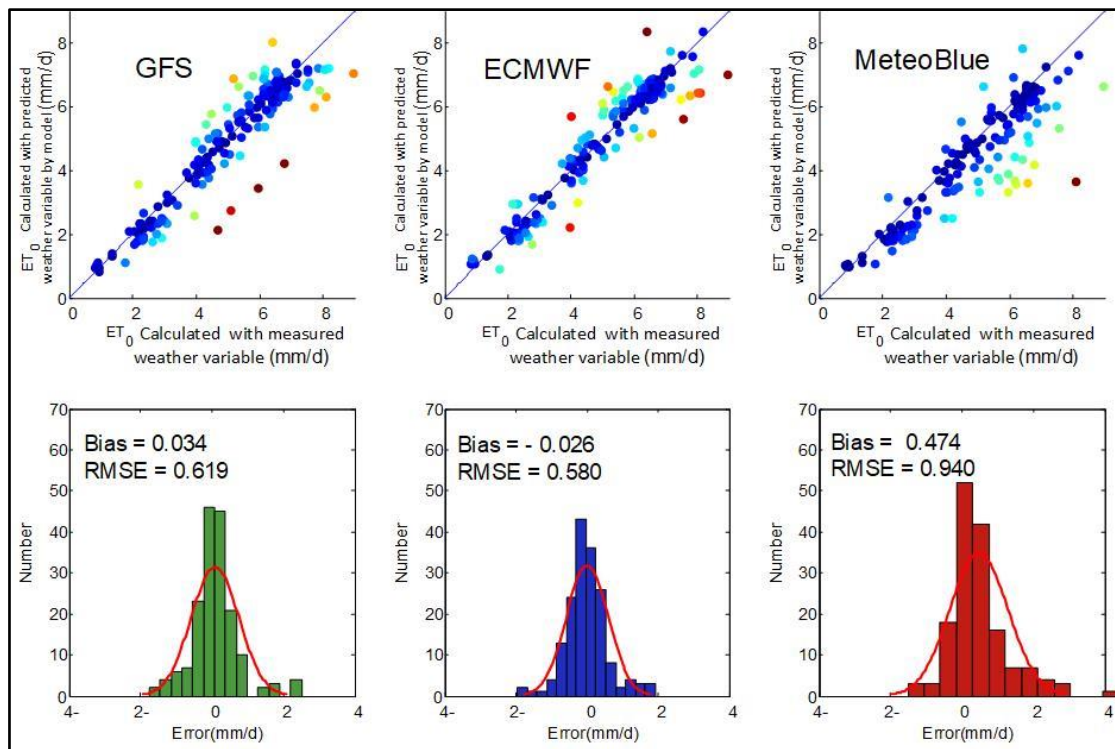


شکل ۵- جزء تابشی تبخیر-تعرق گیاه مرجع بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی و متغیرهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی جوین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۹۹

Figure 5- Radiation term of ET_0 based on meteorological forecasts and climatic data recorded at weather station in the period from 18 May to November 2020

پس از اعمال اصلاحات لازم بر داده‌های رطوبت‌هوا بر اساس رابطه ۴، ET_0 ایستگاه هواشناسی جوین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان‌ماه ۹۹، که مطابق دوره رشد گیاه چغندرقد است، محاسبه و با ET_0 محاسبه شده بر اساس برون داده‌های مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی GFS، ECMWF و MeteoBlue مقایسه گردید (شکل ۶). در بازه زمانی مذکور، ET_0^{Adv} به طور متوسط ۳۱ درصد از ET_0 در منطقه جوین را شامل گردید، این نسبت با نتایج مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب ۲۱، ۲۲ و ۲۵ درصد به دست آمد.

پس از اعمال اصلاحات لازم بر داده‌های رطوبت‌هوا بر اساس رابطه ۴، ET_0 ایستگاه هواشناسی جوین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان‌ماه ۹۹، که مطابق دوره رشد گیاه چغندرقد است، محاسبه و با ET_0 محاسبه شده بر اساس برون داده‌های مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی



شکل ۶- تبخیر-تعرق گیاه مرجع بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی و متغیرهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی جوین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۹۹

Figure 6- ET_0 based on meteorological forecasts and climatic data recorded at weather station in the period from 18 May to November 2020

مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب برابر ۰/۶۲، ۰/۵۸ و ۰/۹۴ میلی‌متر در روز و خطای اریب ET_0 مدل‌های GFS، ECMWF و MeteoBlue به ترتیب برابر ۰/۰۳، -۰/۰۳ و ۰/۴۷ میلی‌متر در روز به دست آمد. به عبارت دیگر، دقت برآورد ET_0 بیش از آنکه در گرو تخمین بهتر هر یک از اجزای

پیشتر مشاهده شد که دو جزء همرفتی و تابشی محاسبه شده توسط داده‌های GFS نسبت به دو مدل ECMWF و MeteoBlue دقت بالاتری دارند؛ با این همه، RMSE و خطای اریب ET_0 محاسبه شده توسط مدل ECMWF، نسبت به GFS، کمتر است. جذر مربعات خطای برآورد ET_0

نیاز آبی گیاه چغندر قند

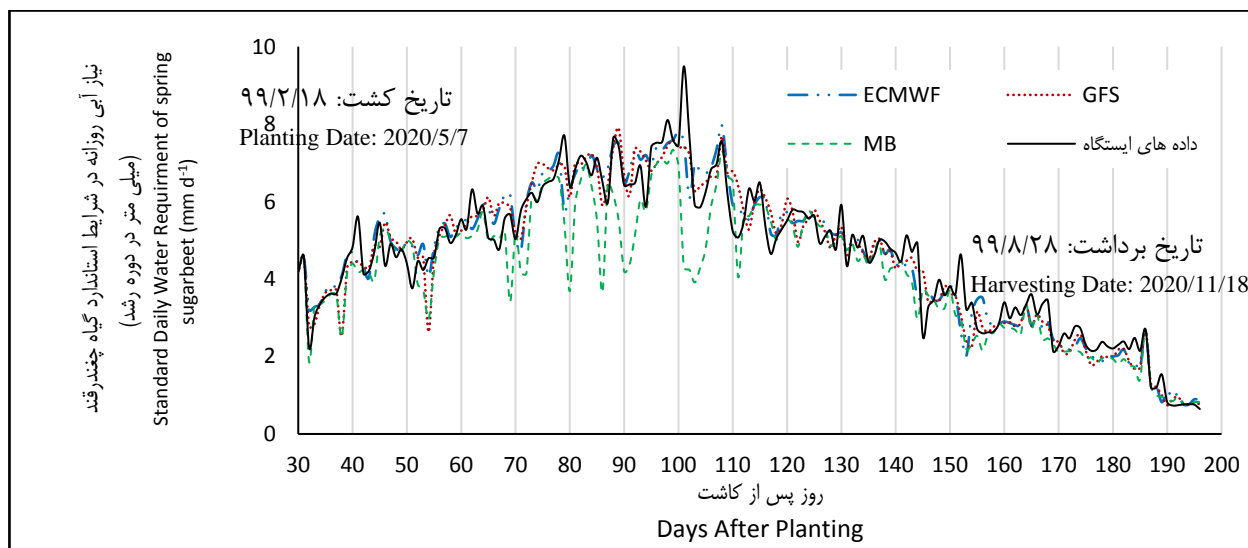
تبخیر-تعرق گیاهان زراعی به دلیل متفاوت بودن صفات فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و آیرودینامیکی، و سایر شرایط آنها با چمن فرضی استفاده شده در توسعه رابطه پنمن-مانتیت با ET_0 یکسان نیست. بنابراین، به دلیل تفاوت‌های موجود در گیاهان زراعی، ضریب گیاهی هر گیاه مختص به خود آن گیاه است (Mirlatifi, 2003). $K_{c_{ini}}$ تابع تواتر رویدادهای خیس‌شدگی و بافت خاک است. بافت خاک محدوده مطالعاتی لوم تا لوم شنی است و روش آبیاری متداول در کشت چغندر قند نیز آبیاری تیپ و آبیاری سنتریپوت با دور آبیاری کمتر از ۴ روز است. متوسط ET_0 در ابتدای دوره رشد^۱ برابر ۵/۹ میلی‌متر در روز است. بنابراین $K_{c_{ini}}$ گیاه چغندر قند در شرایط متداول کشت در منطقه جوین برابر ۰/۵۶ است (شکل ۳).

همچنین، با استفاده از رابطه ۴ و لحاظ کردن متوسط رطوبت نسبی روزانه، متوسط سرعت باد روزانه و ارتفاع گیاه در دوره میانی و انتهایی رشد، $K_{c_{mid}}$ و $K_{c_{end}}$ به ترتیب برابر ۱/۱۷۶ و ۰/۶۷۶ محاسبه شد. یادآوری می‌شود مقادیر $K_{c_{mid}}$ و $K_{c_{end}}$ در نشریه فائو ۵۶ به ترتیب برابر ۱/۲۰ و ۰/۷۰ ارائه شده است.

تبخیر-تعرق روزانه گیاه چغندر قند بهاره در شرایط استاندارد - نیاز آبی - برای منطقه جوین با استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی جوین و داده‌های مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی GFS, ECMWF و MeteoBlue با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (شکل ۷).

تابشی (ET_0^{Rad}) و همرفتی (ET_0^{Adv}) رابطه ET_0 باشد. متأثر از اثر کاهشی خطای برآورد این اجزا بر همدیگر است.

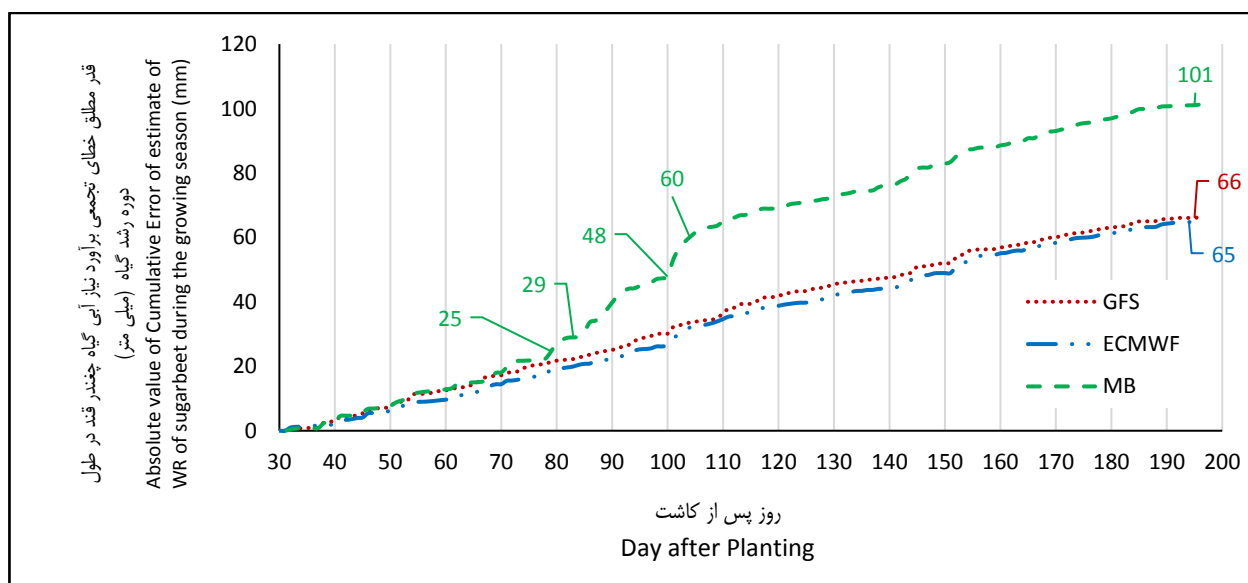
نتیجه قابل توجه در این پژوهش، اندرکنش خطای دو ترم ET_0^{Adv} و ET_0^{Rad} است. همانطور که پیشتر مشاهده شد هر سه مدل در تخمین ET_0^{Adv} و ET_0^{Rad} به ترتیب کم برآورد و بیش برآورد داشتند. رفتار متضاد این دو شاخص سبب شده تا اثر یکدیگر را خنثی کنند و بنابراین مقدار مطلق خطای اریب ET_0 نسبت به دو جزء ET_0^{Adv} و ET_0^{Rad} کمتر باشد. با وجود این مشاهده می‌شود که جذر مربعات خطا که مبین نویز و رفتار تصادفی منابع خطا است، در هر سه مدل کنترل نشده است. به عبارت دیگر، هر چند خطای اریب در محاسبه ET_0 نسبت به ET_0^{Adv} و ET_0^{Rad} کمتر است اما نتوانسته خطای نویز را کاهش دهد. ضریب همبستگی (r) تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) برای مدل‌های GFS, ECMWF و Meteoblue به ترتیب برابر ۰/۹۶، ۰/۹۶ و ۰/۹۰ محاسبه شد. یکی از هدف‌های مدیران شبکه‌های آبیاری آن است که بتوانند حسب تقاضا آب را به آب‌بران تحویل بدهند که مستلزم داشتن پیش‌بینی مناسبی از نیاز آبی مزارع است. r نزدیک به ۱ و خطای اریب نزدیک به صفر نتایج پژوهش نشانگر آن است که ET_0 پیش‌بینی شده با محصولات این مدل‌ها می‌تواند به مدیریت سامانه‌های آبیاری کمک کند. قره‌داغی (Gharedaghi, 2020) RMSE و همبستگی ET_0 را برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته مدل ECMWF در ایستگاه هواشناسی کرج به ترتیب ۰/۹۳۵ و ۰/۷۸۱ میلی‌متر در روز محاسبه کرده است.



شکل ۷- نیاز آبی روزانه چغندر قند بهاره در منطقه جوین در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان ۱۳۹۹

Figure 7- Daily water requirement of spring sugar beet in Jovein region in 18 May to 28 November 2020

نیاز آبی گیاه چغندر قند بهاره محاسبه شده بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی جوین برابر ۸۶۶ میلی‌متر به دست آمد. نیاز خالص آبیاری چغندر قند برای دشت جوین- سلطان آباد در سند ملی نیاز آبیاری ۹۹۰ میلی‌متر ذکر شده است. نیاز آبی برآورد شده در دوره رشد توسط مدل‌های ECMWF، GFS و Meteoblue به ترتیب برابر ۷۸۸، ۸۶۶ و ۸۶۰ میلی‌متر به دست آمد. مجموع قدرمطلق خطای نیاز آبی روزانه مدل‌های GFS، ECMWF و Meteoblue به ترتیب ۶۶، ۶۵ و ۱۰۱ میلی‌متر در دوره رشد است (شکل ۸).



شکل ۸. خطای تجمعی در برآورد نیاز آبی روزانه چغندر قند مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی در منطقه جوین در سال ۱۳۹۹

Figure 8. Cumulative error in estimating daily water requirement of sugar beet using the products of meteorological forecasting models in Jovein region in 2020

خراسان رضوی اجرا شد. دلیل انتخاب پیش‌بینی‌های ۵ روزه در این پژوهش، حداکثر زمان فاصله درخواست تا تحویل آب متداول در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است.

نتایج پژوهش نشانگر آن است که هر سه مدل ET_0^{Rad} را بیشتر و ET_0^{Adv} را کمتر از مقدار محاسبه شده بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی، برآورد می‌کنند. این امر سبب شد تا خطای اریب ET_0 که برابر است با مجموع دو متغیر مذکور، برای هر سه مدل به نحو چشم‌گیری کاهش یابد. خطای اریب مدل‌های GFS ، $ECMWF$ و $Meteoblue$ در بازه زمانی ۱۸ اردیبهشت تا ۲۸ آبان‌ماه ۹۹ به ترتیب برابر $0/03$ ، $-0/03$ و $0/47$ میلی‌متر در روز به دست آمد. جذر مربعات خطای برآورد ET_0 مدل‌های مورد اشاره به ترتیب برابر $0/62$ ، $0/58$ و $0/94$ میلی‌متر در روز به دست آمد.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دقت برآورد ET_0 بیش از آنکه وابسته به تخمین دقیق‌تر هر یک از اجزای تابشی (ET_0^{Rad}) و همرفتی (ET_0^{Adv}) تشکیل دهنده معادله ET_0 باشد، متأثر از اثر کاهشی خطای برآورد این اجزا بر یکدیگر است. ضریب همبستگی (r) به دست آمده از مقایسه ET_0 محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی جوین و پیش‌بینی شده توسط هر سه مدل، بیشتر از $0/9$ است. r نزدیک به ۱ و خطای اریب نزدیک به صفر نتایج به دست آمده در این پژوهش، نشانگر آن است که ET_0 پیش‌بینی شده با محصولات این مدل‌ها، به خصوص $ECMWF$ و GFS که در منطقه جوین دقت بالایی دارند، می‌تواند در راستای پیش‌بینی آب مورد نیاز در سامانه‌های آبیاری کمک کند.

نکته قابل توجه در بررسی خطای برآورد نیاز آبی روزانه توسط مدل‌ها، بازه زمانی ۱۰۰ تا ۱۰۵ روز پس از کاشت -هفته انتهایی مرداد ماه- است؛ در شکل ۸ دیده می‌شود که در تاریخ مذکور منحنی خطای تجمعی مدل $Meteoblue$ جهش قابل‌توجهی پیدا کرده است. دلیل این امر آن است که این مدل در روز ۲۵ مرداد که معادل ۱۰۱ روز پس از کاشت است، ساعات آفتابی واقعی را ۲۰ درصد ساعت آفتابی ممکن پیش‌بینی کرده بود که در عمل این اتفاق رخ نداد. دو مدل دیگر در این تاریخ این نسبت را بیش از ۹۰ درصد پیش‌بینی کرده بودند. در جدول ۲ دیده می‌شود $RMSE$ سه مدل $ECMWF$ ، GFS و $Meteoblue$ در پیش‌بینی ساعات آفتابی به ترتیب برابر $2/73$ ، $2/37$ و $3/10$ است. در نتیجه توصیه می‌گردد برای پیش‌بینی نیاز آبی چغندر قند در منطقه جوین از محصولات $ECMWF$ استفاده شود، زیرا مدل مذکور به سبب تخمین دقیق‌تر ساعت آفتابی نسبت به دو مدل دیگر در زمینه برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در منطقه جوین کارایی بالاتری دارد.

نتیجه‌گیری

مدیریت برحسب تقاضای سیستم‌های آبیاری مستلزم پیش‌بینی مناسب از نیاز آبی گیاهان است. بی‌دقتی متغیرهای هواشناسی در محاسبه ET_0 به طور مؤثری عدم قطعیت برآورد نیاز آبی را افزایش می‌دهد. این پژوهش به منظور بررسی دقت برآورد نیاز آبی چغندر قند بهاره با استفاده از پیش‌بینی داده‌های هواشناسی ۵ روزه مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی میان مدت GFS ، $ECMWF$ و $MeteoBlue$ در منطقه جوین واقع در استان

مراجع

- Ahmadi, M., DadashiRoodbari., & Ahmadi, H., (2019). Temporal-spatial analysis of the height of the Iranian border layer based on the output of the European Medium Term Forecast Center (ECMWF) database. *Quarterly Journal of Geography and Development*, 54, 163-184(in Persian)
- Alidoost, F., Stein, A., Su, Z., & Sharifi, A. (2021). Multivariate copula quantile mapping for bias correction of reanalysis air temperature data. *Journal of Spatial Science*, 66(2), 299-315.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. &Smith, M., (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), p. D05109.
- Azizian, A., & Ramezani Etedali., H (2019). Spatiotemporal Assessment of Reanalysis and Remotely-Sensed Precipitation Datasets. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 163-177(in Persian)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.
- Deputy of Planning and Economy of the Ministry of Agriculture-Jahad. (2017) Agricultural Statistics Volume One: Crop Products (2016-2011). Deputy of Planning and Economics of Information and Communication Technology Center.(in Persian)
- Droogers, P., (2004). Adaptation to climate change to enhance food security and preserve environmental quality: example for southern Sri Lanka. *Agricultural water management*, 66(1), 15-33.
- Dumont, A., Mayor, B. & López-Gunn, E., (2013). Is the rebound effect or Jevons paradox a useful concept for better management of water resources? Insights from the irrigation modernisation process in Spain. *Aquatic procedia*, 1, 64-76.
- FAO., (2007). Climate Change Adaptation Water Sector NENA,

- Gharedaghi, M.H. , Homae, M., Mirlatifi, S.M., Noroozi, A.A. (2020). Using Forecasts of WRF Regional Model to Improve the Accuracy of Reference Evapotranspiration Estimation, *Iranian Soil and Water Research*, 51(1), 165-177. (in Persian)
- Gharedaghi, M.H. (2020). Improving water productivity in field scale using real-time weather and satellite data (PhD thesis), Tarbiat Modares University, Iran. (in Persian)
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hagedorn, R., Hamill, T. M., & Whitaker, J. S. (2008). Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. Part I: Two-meter temperatures. *Monthly Weather Review*, 136(7), 2608-2619.
- Jensen, M.E. & Allen, R.G. eds., (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers.
- Mirlatifi, M. (2003). Chapter One: Water Required by Plants. Farshi, A., Kheirabi, J., Siadat, H., Mirlatifi, M., Darbandi, S., Salamat, A., Entesari, M., Sadat Miraii, M. arm water management, Iran, National Irrigation and Drainage Committee of Iran. (in Persian)
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., Mocholí-Arce, M. & Sala-Garrido, R., (2014). A management and optimisation model for water supply planning in water deficit areas. *Journal of hydrology*, 515, 139-146.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20.
- Perry, C., (2011). Accounting for water use: Terminology and implications for saving water and increasing production. *Agricultural Water Management*, 98(12), 1840-1846
- Ponce, V. M., Pandey, R. P., & Ercan, S. (2000). Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 222-224.
- Raziei, T., & Sotoudeh, F., (2017). Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different climates of Iran. *Earth and Space Physics*, 43(1), 133-147 (in Persian)

- Shahi, A., Atan, R. B., & SULAIMAN, N. (2009). An effective Fuzzy C-Mean and type-2 fuzzy logic for weather forecasting. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 5(5), 550-561.
- Paparrizos, S., Smolenaars, W., Gbangou, T., Slobbe, E. V., & Ludwig, F. (2020). Verification of weather and seasonal forecast information concerning the peri-urban farmers' needs in the lower ganges delta in bangladesh. *Atmosphere*, 11(10), 1041.

Comparison of Computed Sugar Beet Evapotranspiration by the Penman-Monteith Equation Using Measured Climatological Parameters and Predicted Products of GFS, ECMWF and GFS Meteorological Forecasting Models in the Jovein Region

S. H. Tabatabaai, S. M. Mirlatifi*, H. Dehghanisanij, A. Shokri

* Corresponding Author: Associate professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: mirlat_m@modares.ac.ir
Received: 23 February 2021, Accepted: 27 June 2021

Introduction

Irrigation should be applied in accordance with an accurate estimate of the crop water requirement and the crop growth stages (Jensen and Allen, 2014). In recent years, several meteorological forecasting models (MFM) have been developed which are capable of forecasting weather data. Such data could be used to calculate and predict crop water requirements during the next few days. The performance of irrigation canals and water delivery systems can be significantly improved if future short-term demands based on the predicted crop water requirement are available. The appropriate performance of these models in the agricultural sector depends on the quality of their predictions of various weather variables. The aim of this study is to evaluate the accuracy of the predicted spring sugar beet water requirement in the Jovien region when 5-day forecasted meteorological variables by ECMWF, GFS, and MeteoBlue MFM were used as the climatological parameters in the Penman-Monteith equation. The prediction accuracy of these models was evaluated under four categories, 1. Inclusion of the three main meteorological variables involved in calculating reference evapotranspiration (ET_0), including maximum air temperature (T_{max}) and minimum air temperature (T_{min}), and maximum wind speed, 2. Inclusion of radiation term (ET_0^{Rad}) and advection term (ET_0^{Adv}) of the Penman-Monteith equation, 3. Inclusion of ET_0 and water requirement of spring sugar beet.

Methodology

Meteorological forecasts for ECMWF, GFS, and MeteoBlue databases were obtained from <https://www.windy.com>. The meteorological variables presented by these models and used in this research were temperature, wind speed, and the degree of cloudiness. The study period was selected from May to December of 2020.

ET_0 was calculated using the FAO-Penman-Monteith method presented in the FAO 56 (Allen et al., 1998). The first part of the FAO-Penman-Monteith $\left(\frac{0.408\Delta(R_n-G)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}\right)$ represents the contribution of the energy terms to the process of evapotranspiration and the second term $\left(\frac{\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}\right)$ signifies the importance of advective forces. Meteorological data obtained from the Jovein weather station was checked to take into consideration the possibility of non-standard surface cover surrounding the weather station in accordance with the method recommended in Annex 6 of FAO 56. Crop coefficients in early, developing, middle, and ending growth periods were also calculated based on the method recommended by the FAO 56.

Results and Discussion

The GFS model had the best performance in estimating T_{max} with the lowest Bias and RMSE errors of 1.4 and 2.3 degrees Celsius, respectively. Also, MeteoBlue with Bias and RMSE values of -2.2 and 1/3, respectively, had the best performance in estimating T_{min} . All three models underestimated the air temperature. The bias error of GFS, ECMWF, and MeteoBlue models in

predicting the maximum daily wind speed in the Jovein region were 0.1, 1.3, and 1.8 m/s, respectively, and their RMSE Respectively 3.3, 3.3, and 3.4 m/s.

Since the GFS model estimated T_{mean} and consequently vapor pressure deficit (VPD) with a higher degree of accuracy as compared with the other model, the advective term (ET_0^{Adv}) computed using data estimated by the GFS model was more accurate than that of the other models. The bias and RMSE errors of this model in estimating the mentioned variable were 0.4 and 0.7 mm per day, respectively. All the other three models underestimated ET_0^{Adv} .

The bias error of GFS, ECMWF, and MeteoBlue models in estimating ET_0^{Rad} were -0.4, -0.5, and -0.2 mm/day, respectively, and their RMSE were 0.61, 0.67, and 0.65 mm per day, respectively.

When the overestimated ET_0^{Rad} and underestimated ET_0^{Adv} terms were summed up to calculate ET_0 according to the FAO-Penman-Monteith method, the bias error of the outcome (ET_0) was significantly reduced for all the models. The bias error of the ET_0 for the GFS, ECMWF, and Meteoblue models were 0.03, -0.03, and 0.47 mm/day, respectively. Their RMSE values were 0.62, 0.58 and 0.94 mm/day, respectively.

$K_{c_{\text{ini}}}$ of sugar beet for Jovein region with 4-day wetting intervals and light soil texture with an average ET_0 of 5.9 mm/day was 0.56, and $K_{c_{\text{mid}}}$ and $K_{c_{\text{end}}}$ were also calculated as 1.176 and 0.676, respectively. The seasonal water requirement of spring sugar beet for the Jovein region was 866 mm. The seasonal water requirements calculated using the outputs of GFS, ECMWF, and Meteoblue were 860, 866, and 788, respectively. However, the cumulative error of these models were 66, 65, and 101 mm, respectively, during the growing season.

Conclusion

A notable result in this study is the interaction of the ET_0^{Adv} and ET_0^{Rad} terms, which canceled out each other over and under estimations—all the three models underestimated and overestimated ET_0^{Adv} and ET_0^{Rad} terms, respectively. Thus the absolute value of the oblique error of the computed ET_0 was less than that of the ET_0^{Adv} and ET_0^{Rad} terms. However, the RMSE of ET_0 , which indicates the noise and random behavior of the error sources, was not reduced.

Keywords: Irrigation Management: Reference Crop Evapotranspiration: Crop Coefficient: Irrigation Requirement