

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی بهبود دقت تخمین تبخیر - تعرق واقعی اراضی کشاورزی به کمک داده‌گواری با استفاده از مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور و مدل فائو ۵۶

سید حسن طباطبائی^۱، سید مجید میرلطیفی^{۲*}، حسین دهقانی سانج^۳، اشکان شگری^۴^۱-دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی آب-آبیاری و زهکشی گروه مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس^۲*-گروه مهندسی و مدیریت آب دانشگاه تربیت مدرس^۳-موسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی کرج^۴-سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی مشترک المنافع، کانبرا، استرالیا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

چکیده

اثر استفاده از داده‌گواری بر افزایش دقت تخمین تبخیر-تعرق (ET) با استفاده از دو روش فیلتر کالمن همادی (EnKF) و فیلتر ذره (PF) بررسی شد. مشاهدات و مدل مورد استفاده عبارت بودند از تبخیر-تعرق محاسبه شده با استفاده از روش سبال (روش مبتنی بر سنجش از دور) و مقادیر ET که به روش پیشنهادی نشریه فائو ۵۶ برای شرایط غیراستاندارد محاسبه شدند. به منظور ارزیابی کارایی روش‌های مذکور، نتایج به دست آمده از سه رویکرد شامل الف) داده‌گواری به کمک PF، ب) داده‌گواری به کمک EnKF و ج) شبیه‌سازی بدون استفاده از داده‌گواری (OL)، با نتایج یک سامانه داده‌گواری دیگر مقایسه گردید که در آن رطوبت خاک با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به وسیله دستگاه TDR و حل عددی معادله ریچاردز محاسبه شده بود (BL). نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که داده‌گواری با استفاده از روش‌های PF و EnKF توانست متوسط خطای سوگیری را در برآورد رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه به ترتیب ۷ و ۹ درصد حجمی نسبت به OL کاهش دهد. داده‌گواری با PF و EnKF همچنین توانست nRMSE رطوبت خاک را نسبت به OL، به میزان ۸ درصد کاهش دهد؛ بنابراین، به کمک داده‌گواری می‌توان به بهبود تخمین آب مصرفی و ارتقای مدیریت آبیاری دست یافت.

واژه‌های کلیدی: سبال، فیلتر ذره، فیلتر کالمن همادی، مدل‌سازی آب و خاک و گیاه

مقدمه

می‌توان به محاسبه ET براساس اندازه‌گیری رطوبت خاک، استفاده از لایسیمتر، نسبت باون، ادی کوواریانس، سنتیلامتر، جریان ساقه‌ای، و ... اشاره کرد. روش‌هایی که هریک نکات ضعف و قوت خود را دارد (Zhang et al., 2014). همگن نبودن پوشش گیاهی پیرامون نقطه‌ای که در آن ET اندازه‌گیری می‌شود سبب خواهد شد تا نتایج به دست آمده از تعمیم اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای به محدوده‌های وسیع‌تر با خطا روبه‌رو

مواجهه با افزایش روز افزون جمعیت، تغییر اقلیم و کاهش سرانه منابع آب تجدیدپذیر نیازمند درک بهتری از مولفه‌های بیلان آبی و به خصوص تبخیر-تعرق (ET) است (Alavi, 2009). بهبود مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی در زمین‌های کشاورزی و ارتقای بهره‌وری آب نیازمند برآورد دقیق ET است (Deb et al., 2022). در دهه‌های گذشته، روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری یا محاسبه ET توسعه یافته‌اند که از آن میان

در چارچوب روش های داده گزاری^۱ است. داده گزاری دانشی است که اطلاعات حاصل از اندازه گیری ها و نتایج مدل ها را در چارچوبی مشخص ترکیب می کند تا تخمین بهتری از متغیر یا پارامتر مورد بررسی به دست آید (He et al., 2022). در حقیقت، اطلاعات چه از نتایج مدل شبیه سازی به دست آید و چه به صورت مستقیم از اندازه گیری پارامترهای مورد نظر حاصل شود، نشانگر یک متغیر است، ولی فرآیند جمع آوری اطلاعات به روش های مذکور متفاوت است. فرآیند داده گزاری از دو فاز پیش بینی و به روزرسانی تشکیل می شود. در فاز پیش بینی، شبیه سازی مدل به روش مونت کارلو خواهد بود. این فرآیند تا گام زمانی که مشاهدات در دسترس باشد ادامه می یابد، پس از آن در فاز به روزرسانی نتایج مدل و اندازه گیری ها بر اساس سطح اعتمادی که برای هر یک از منابع اطلاعاتی وجود دارد، ترکیب و نتایج جدید حاصل می شود (Holton and Hakim, 2012).

روش های داده گزاری متعددی توسعه یافته اند که از آن جمله می توان به فیلتر کالمن همادی^۲ (EnKF) و فیلتر ذره^۳ (PF) اشاره کرد. در زمینه استفاده از این روش ها برای بهبود تخمین ET پژوهش های متعددی شده است. دبی و همکاران (Deb et al., 2022) از فیلتر ذره برای توسعه یک سیستم داده گزاری بین نتایج مدل پریستی تیلور و مشاهدات ET بانک اطلاعاتی SSEBop استفاده کردند. یافته های پژوهش مذکور نشانگر آن بود که داده گزاری به طور مؤثری سبب بهبود دقت نتایج ET شده است و RMSE را از ۱/۱۷ تا ۱/۲۸ میلی متر در روز در حالت شبیه سازی بدون استفاده از روش های داده گزاری (حلقه باز) به ۰/۴۸ تا ۰/۵۰ میلی متر در روز کاهش داد (Deb et al., 2022). هی و همکاران (He et al., 2022) از EnKF برای ترکیب اطلاعات شاخص سطح برگ به دست

شوند (Gebler et al., 2015). به طور کلی، عواملی مانند خطای ذاتی وسایل اندازه گیری، بهره برداری نامناسب از آنها و یکسان نبودن تطابق مقیاس های مکانی و زمانی بین مشاهدات و متغیر مورد مطالعه سبب کاهش دقت نتایج به دست آمده می شود (Hirschi et al., 2011). از اواسط دهه ۹۰ میلادی روش هایی توسعه یافتند تا ET را با استفاده از تصاویر ماهواره ای محاسبه کنند (Jensen and Allen, 2016). از جمله این روش ها می توان به روش سبال (Bastiaanssen et al., 2002) اشاره کرد. منطق روش های مذکور در برقرار کردن رابطه ای بین شار گرمای محسوس و دمای سطح زمین و تعمیم ET اندازه گیری شده از تصاویرهای لحظه ای به ET روزانه استوار است. فرضیات مورد اشاره و تمایز غیردقیق عوارض در سطح زمین به سبب محدودیت قدرت تفکیک مکانی ماهواره ها، از جمله مهم ترین منابع عدم قطعیت در محاسبه ET با این روش هاست (Doherty et al., 2022).

یکی دیگر از روش های محاسبه ET، استفاده از مدل های شبیه سازی تبادلات رطوبتی در لایه توسعه ریشه است. از دهه ۴۰ میلادی، مدل های متعددی برای برآورد ET توسعه یافته اند (Deb et al., 2022). نتایج این مدل ها امکان تعمیم به مقیاس های گسترده تر و در بازه های زمانی متفاوت را نیز دارند (Jensen and Allen, 2016). نتایج مدل ها به دلایل متعددی شامل الف) میزان دقت متغیرهای ورودی مدل، ب) ساده سازی فرایندها، ج) خطا در برآورد پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی مدل ها و د) عدم قطعیت در شرایط اولیه و مرزی شبیه سازی هاست که همواره مقداری خطا دارند (Deb et al., 2022).

یکی از راهکارهای برون رفت از مشکل پیش گفته، استفاده توأم از داده های اندازه گیری شده و نتایج مدلسازی

³ Particle Filter

¹ Data Assimilation

² Ensemble Kalman Filter

از تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ به‌عنوان مشاهدات سیستم داده‌گذاری استفاده شد. به‌منظور ارزیابی دقت سامانه‌های مذکور، توانایی سامانه داده‌گذاری در کاهش واریانس شبیه-سازی رطوبت خاک بررسی شد. نتایج به‌دست آمده با نتایج سامانه داده‌گذاری مقایسه گردید که در آن مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده براساس حل عددی معادله ریچاردز مقادیر رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه با مقادیر رطوبت خاک که در نقاط متعددی در مزارع توسط حسگرهای رطوبت‌سنج TDR اندازه‌گیری شده بودند، ترکیب شده بود (BL)،. نحوه مدل‌سازی و داده‌گذاری حالت BL را طباطبائی و همکاران (Tabatabaai et al., 2024) ارائه داده‌اند.

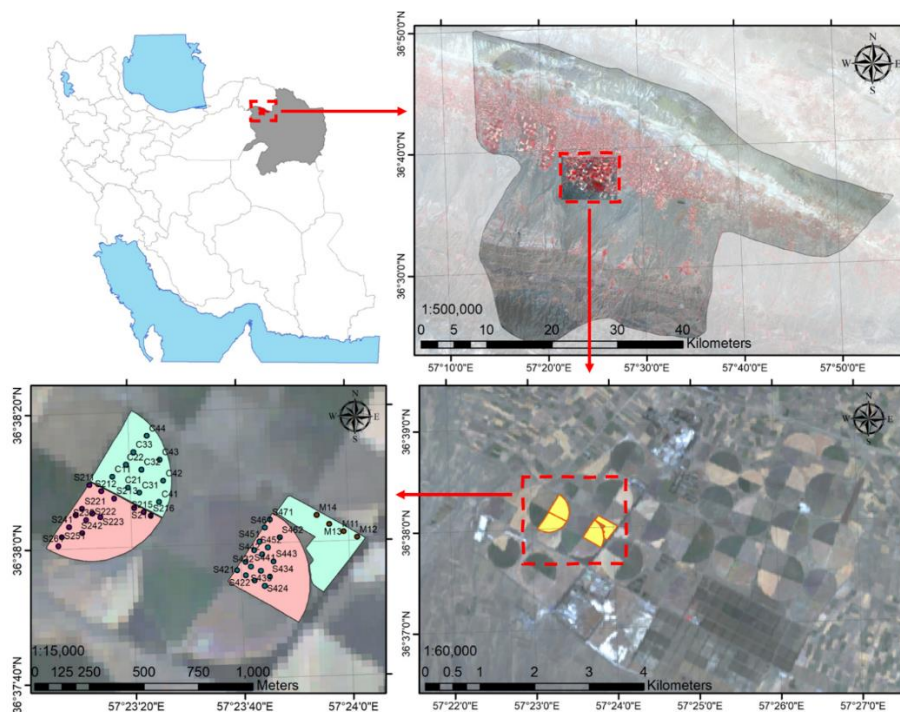
مواد و روش‌ها

جمع‌آوری اطلاعات میدانی

این پژوهش در دو مزرعه با کشت ذرت (M و C) و دو مزرعه با کشت چغندر (S2 و S4) در زمین‌های کشاورزی واحد مطهری یک کشت و صنعت جوین در استان خراسان رضوی به‌اجرا در آمد. مجموعاً ۵۱ لوله دسترسی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از حسگرهای رطوبت‌سنج TDR در مزارع کارگذاری شد (شکل ۱). رطوبت خاک با حسگرهای رطوبت‌سنج مدل PR2 از شرکت Delta-T Device در بازه زمانی خرداد تا آبان اندازه‌گیری شد.

آمده از تصویرهای ماهواره‌ای و نتایج یک مدل مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده کردند تا تخمین رطوبت خاک در سه لایه سطحی، میانی و توسعه ریشه را بهبود دهند. نتایج پژوهش مذکور نشانگر آن است که داده‌گذاری می‌تواند شاخص ریشه میانگین مربعات خطای بدون بایاس تخمین ET را در سه حوضه آبریز مختلف نسبت به حالت حلقه باز از ۲۹ تا ۵۰ درصد کاهش دهد (He et al., 2022).

در رشته علوم مهندسی آب، از داده‌گذاری به‌منظور افزایش دقت نتایج مدل‌های هیدرولوژی برای تعیین مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس‌های حوضه‌های آبریز استفاده کرده‌اند. با این همه، امکان استفاده از این روش‌ها برای ارتقای برنامه‌ریزی آبیاری و پیاده‌سازی آبیاری هوشمند نیز فراهم هست. به-عبارت دیگر، از آنجایی که منطق و فرآیند مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق در مدل‌های محاسبه آب در لایه توسعه ریشه نسبتاً یکسان است، اگر از مشاهدات با مقیاس مزرعه‌ای استفاده شود می‌توان با همان منطق داده‌گذاری در مقیاس-های حوضه‌ای، یک سامانه داده‌گذاری در سطح مزارع نیز پیاده‌سازی کرد. در پژوهش حاضر بهبود دقت تخمین رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه با استفاده از مدل برآورد ET در شرایط غیراستاندارد فائو (Allen et al., 1998) به کمک دو روش داده‌گذاری EnKF و PF بررسی شد. از ET محاسبه شده بر اساس روش سبال (Bastiensen et al., 2002) با استفاده



شکل ۱- موقعیت مزارع تحقیقاتی و لوله های دسترسی اندازه گیری رطوبت خاک در مزارع
Figure 1- Locations of farms and access tubes for soil moisture measurement

متغیرها و بر مبنای ماتریس کوواریانس مستخرج از بانک اطلاعاتی مزارع تولید شد. دبی جریان ورودی به هر یک از مزارع با استفاده از کنتورهای نصب شده در ابتدای لوله های اصلی اندازه گیری شد. با استفاده از دبی جریان ورودی و مدت زمان آبیاری، عمق آبیاری در هر یک از مزارع در هر نوبت آبیاری محاسبه گردید. مزارع C، S2 و S4 با استفاده از سیستم دوار مرکزی و مزرعه M با نوار تیپ آبیاری می شدند. به منظور برآورد تلفات تبخیر در آبیاری بارانی، در چند مرحله، ظروف جمع آوری آب در مزارع کارگذاری شد، عمق آب جمع شده در ظروف با عمق محاسبه شده براساس آبدهی دستگاه دوار مرکزی (که از کنتور قرائت شده بود) و مدت زمان آبیاری مقایسه شد. به طور متوسط میزان عمق آب جمع آوری شده در ظرف های نمونه-گیری، معادل ۷۵ درصد عمق کاربردی برآورد شده بر اساس دبی سیستم و مدت زمان آبیاری بود. انحراف معیار حجم آب

بافت خاک ۲۴۳ نمونه خاک جمع آوری شده از مزارع به روش هیدرومتری در آزمایشگاه آبیاری و زهکشی دانشگاه تربیت مدرس تعیین گردید. میزان رطوبت حجمی خاک در آستانه های ظرفیت زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) و رطوبت اشباع خاک (θ_{SAT}) از بانک اطلاعاتی Soil-Water Characteristics (Saxton and Willey, 1986) محاسبه گردید. پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک (α و n) و ضریب هدایت هیدرولیکی (K_{SAT}) با برآورد گردید (Van Genuchten et al., 1991). در فرآیند داده-گواری، پارامترهای خاکشناسی شامل θ_{FC} ، θ_{PWP} ، θ_{SAT} ، α ، n و K_{SAT} به صورت متغیر تصادفی گوسی با میانگین و انحراف محاسبه شده بر اساس نمونه های خاک هر یک از مزارع تولید شدند. با توجه به همبستگی متغیرهای خاکشناسی نسبت به یکدیگر، اعداد تصادفی مذکور با در نظر گرفتن همبستگی

دسترسی کارگذاری و پس از آن در چند نوبت به آبیاری سنگین آن دست‌زده شد. طی زمان پس از آبیاری، با خشک شدن خاک کرت به شکلی هم‌زمان رطوبت خاک با استفاده از دستگاه PR2 و رطوبت وزنی خاک در اعماق لایه توسعه ریشه اندازه‌گیری شد. با تبدیل کردن رطوبت وزنی خاک به رطوبت حجمی و مقایسه مقادیر متناظر رابطه رگرسیونی محاسبه رطوبت خاک بر اساس قرائت‌های دستگاه، برای هر یک از حسگرها متعلق به هر یک از عمق‌ها به دست آمد.

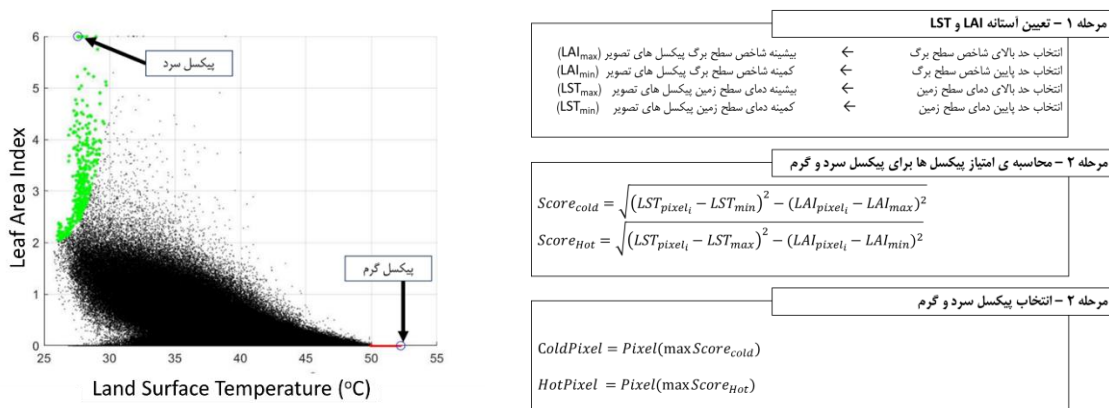
سبال

روش توازن سطح انرژی زمین (SEBAL) که در سال ۲۰۰۵ باستین سن و همکاران (Bastiensen et al., 2005) آن را معرفی کردند با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای و داده‌های زمینی مانند تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و سرعت باد، ET_0 را محاسبه می‌کند. ET_0 و سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری، بر اساس داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی جوبین محاسبه شد. این ایستگاه در فاصله کمتر از یک کیلومتر از مزارع واقع شده است ET_0 به روش پنمن-مانتیث محاسبه شد. تصویرهای ماهواره لندست ۸ در بازه زمانی اردیبهشت تا آبان ۱۳۹۹ و نقشه رقوم ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری برای محدوده مطالعاتی از سامانه گوگل ارت انجین گرفته شد. با ماهواره لندست ۸، فاصله زمانی معمول عکس‌برداری از یک منطقه ۱۶ روزه است. مزارع مورد مطالعه در مرز ردیف تصویرهای ۱۳۴-۳۵ و ۱۳۵-۳۵ بودند، از این رو فاصله تصویربرداری از مزارع ۸ روزه است. برای کلیه مراحل محاسبه تبخیر-تعرق از روش سبال از جمله انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در محیط برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. مراحل انتخاب پیکسل سرد و گرم در شکل ۲ ارائه شده است. لازم است یادآوری شود که این دو شرط برای انتخاب پیکسل سرد و گرم اعمال شد: الف) فاصله پیکسل از

اندازه‌گیری شده در ظرف‌ها در نوبت‌های مختلف اندازه‌گیری به‌طور متوسط ۳۷ درصد متوسط حجم آب جمع شده در ظرف‌ها بود؛ بدین ترتیب عمق متغیر آبیاری در مزارع S2، S4 و C برای استفاده در مدلسازی در فاز پیش‌بینی سیستم داده-گواری به صورت یک متغیر تصادفی گوسی با متوسط ۷۵ درصد عمق ناخالص آبیاری محاسبه شده بر اساس ارقام کنتور و مدت زمان آبیاری و انحراف معیار ۳۷ درصد متوسط عمق خالص تولید شد. سیستم آبیاری در مزرعه M به صورت نوار تیپ بود، از این رو، از تلفات تبخیر در مزرعه M صرف‌نظر شد. یکنواختی آبیاری در مزرعه M نیز با استفاده از ظرف‌های جمع‌آوری آب در مزرعه اندازه‌گیری شد. انحراف معیار حجم آب اندازه‌گیری شده در ظرف‌ها در نوبت‌های مختلف اندازه‌گیری به‌طور متوسط ۴۵ درصد متوسط حجم آب جمع شده در ظروف بود، از این رو، عمق آبیاری ورودی در مرحله مدلسازی سیستم داده‌گواری برای مزرعه M به صورت متغیر تصادفی گوسی با متوسط عمق آبیاری محاسبه شده بر اساس ارقام کنتور و مدت زمان آبیاری و انحراف معیار ۴۵ درصد متوسط عمق خالص آبیاری تولید شد.

از مقادیر رطوبت خاک که با استفاده از حسگرهای رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شدند، به عنوان مشاهدات در BL استفاده شدند. حسگرهای رطوبت‌سنج دستگاه مورد اشاره رطوبت خاک را در عمق‌های ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۹۵ سانتی‌متری از سطح لوله دسترسی اندازه‌گیری می‌کنند. پنجاه و یک لوله دسترسی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزارع کارگذاری شد. با توجه به اینکه تهیه لوله‌های دسترسی از شرکت سازنده به تعداد مورد نیاز مقدور نبود، از لوله‌هایی از جنس PVC، به جای لوله‌های تولید شده توسط شرکت سازنده، استفاده گردید. به منظور استخراج معادلات کالیبراسیون لوله‌های PVC یک کرت جداگانه با ابعاد 10×10 مترمربع در نظر گرفته شد. در این کرت، لوله‌های

ایستگاه هواشناسی بیشتر از ۵ کیلومتر نباشد، ب) دمای پیکسل سرد کمتر از ۱۰ درجه سانتی گراد نباشد.



شکل ۲- روند انتخاب و یک پیکسل سرد و گرم

Figure 2- Selection procedure of a cold pixel and hot pixel

گیاهی تابع نوع گیاه و دوره رشد آن است. امکان استخراج دوره رشد و نوع پوشش گیاهی پیکسل سرد در تمامی تصاویر وجود نداشت. برای محاسبه K_c^{Cold} از رابطه ۲ استفاده شد که نتزر و همکاران (Netzer et al., 2009) ارائه داده اند. در رابطه گفته شده، ضریب گیاهی به عنوان تابعی از شاخص سطح برگ محاسبه می شود. مقدار $1/3$ نیز به عنوان حد بالای K_c گیاهان زراعی در نظر گرفته شد (Allen et al., 2005).

بنا بر فرض اولیه روش سبال، پیکسل سرد مکانی است که به تازگی آبیاری شده است و گیاه در آن مکان بدون تنش رطوبتی در حال تبخیر- تعرق در حد پتانسیل است؛ بدین ترتیب ET پیکسل سرد را می توان بر اساس ضریب گیاهی و ET_0 محاسبه کرد.

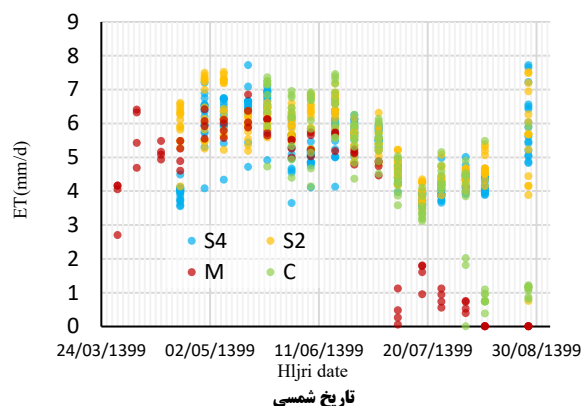
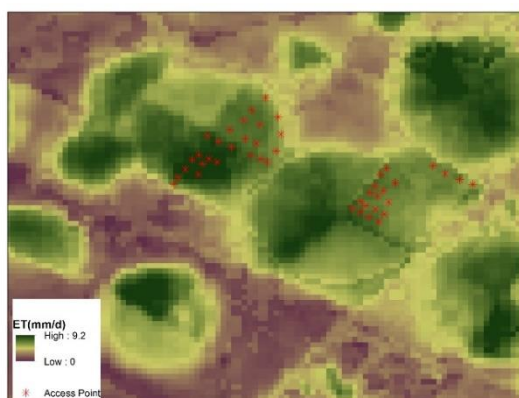
$$ET^{Cold} = K_c^{Cold} \times ET_0 \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه بالا، ET^{Cold} و K_c^{Cold} به ترتیب تبخیر- تعرق (میلی متر) و ضریب گیاهی پیکسل سرد هستند. ضریب

$$K_c^{Cold} = \min\{1.3, -0.0283(LAI^{Cold})^2 + 0.3547 \times LAI^{Cold} + 0.0775\} \quad \text{رابطه ۲}$$

سری زمانی ET از تصویرهای گفته شده برای تمامی نقاط استخراج شد (شکل ۳).

بدین ترتیب، نقشه ET زمین ها در فاصله های زمانی ۸ روزه و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در ۳۰ متر تولید گردید.



شکل ۳- نقشه تبخیر- تعرق مزارع و سری زمانی تبخیر- تعرق محاسبه شده به روش سبال

Figure 3- Map and Time series of ET computed by SEBAL algorithm

از برون داده‌های پیش‌بینی هواشناسی با فاصله ۵ روز مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان جوی (ECMWF) (Hersbach et al., 2020) به روش پنمن-مانتیت و انحراف معیار ۰/۶ میلی‌متر در روز محاسبه شد. انحراف معیار مورد اشاره از تحلیل رفتار آماری ET_0 محاسبه شده بر اساس برون داده‌های ECMWF و ET_0 محاسبه شده بر اساس اطلاعات هواشناسی ایستگاه جوبین به دست آمد که نتایج این ارزیابی را طباطبایی و همکاران (Tabatabaie et al., 2024) ارائه داده اند.

در روش آبیاری بارانی، افزون بر تعرق از پوشش گیاهی و تبخیر از سطح خاک، بخشی از آب نیز به صورت باران گیرش گیاهی^۴ (CI) از دسترس خارج می‌شود. از آنجایی که بخشی از مزارع مورد مطالعه به روش بارانی سیستم دوار مرکزی آبیاری می‌شدند، مؤلفه CI در نظر گرفته شد (رابطه ۴):

$$ET = (K_s \times K_{cb} + K_e)ET_0 + CI \quad \text{رابطه ۴}$$

ضریب ذاتی گیاه (K_{cb})

K_{cb} علاوه بر دوره رشد و گونه گیاهی، تابع عوامل دیگری مانند ضریب زبری آیرودینامیک گیاه، رقم گیاه، تراکم کشت و ... نیز هست و یکی از عوامل مهم عدم قطعیت در مدل‌های برنامه‌ریزی آبیاری است. بدین منظور K_{cb} به صورت متغیر

ساختار مدل

در مدل محاسبه محاسبه ET در شرایط غیراستاندارد فائو ۵۶ (Allen et al., 1998)، ET از دو لایه رخ می‌دهد یکی لایه سطحی خاک و دیگری لایه توسعه ریشه. در این پژوهش، از سطح خاک تا عمق ۷ سانتی‌متری به عنوان لایه سطحی خاک و از عمق ۷ سانتی‌متری تا ۱۰۰ سانتی‌متری خاک به عنوان لایه توسعه ریشه در نظر گرفته شد. تبخیر و تعرق بر اساس شرایط رطوبتی در لایه سطحی و لایه توسعه ریشه محاسبه شد. پس از آن با توجه به رطوبت خاک در دو لایه مذکور در گام قبلی، رطوبت دو لایه در گام بعدی محاسبه گردید (رابطه ۳):

$$ET = (K_s \times K_{cb} + K_e)ET_0 \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه بالا، ET تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر در روز)، K_{cb} ضریب مربوط به نوع و دوره رشد گیاه (بدون بعد)، K_e ضریب مربوط به تبخیر از سطح خاک (بدون بعد) و K_s ضریب تنش وارد شده به گیاه (بدون بعد) است. به عبارت دیگر، K_s بیانگر نسبت تعرق واقعی گیاه نسبت به شرایطی است که تعرق در شرایط استاندارد رشد گیاه رخ می‌دهد. ET_0 به صورت متغیر تصادفی گوسی با متوسط ET_0 محاسبه شده با استفاده

⁴ Canopy Interception

تصادفی گوسی با میانگین K_{cb} گیاه که آلن و همکاران (Allen et al., 1998) و جنسن (et al., 1998) ارائه داده‌اند و بر اساس روش فائو ۵۶ بر مبنای رطوبت هوا، ارتفاع گیاه و سرعت باد اصلاح شد. انحراف معیار به‌دست آمده بر اساس ارقام مختلف ارائه شده در مراجع

جدول ۱ - متوسط و انحراف معیار K_{cb} در مزارع

Table 1 - Average and Standard Deviation of K_{cb} in farms

$K_{cb_{end}}$		$K_{cb_{mid}}$		$K_{cb_{int}}$		مزرعه
متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	Farms
Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation	
0.841	0.0602	1.144	0.0272	0.866	0.0602	C
0.631	0.0688	1.106	0.0282	0.638	0.0688	M
0.972	0.0895	1.151	0.0272	0.680	0.0895	S2
0.975	0.0866	1.152	0.0273	0.680	0.0866	S4

متوسط $17/5$ و 8 میلی‌متر در ده سانتی‌متر خاک و انحراف معیار به ترتیب 2 و $1/6$ میلی‌متر در ده سانتی‌متر خاک تولید شد. مقادیر مورد اشاره برای REW و TEW از نشریه فائو ۵۶ استخراج شده است (Allen et al., 1998).

ضریب تعرق ($K_{cb} \times K_s$)

در شرایطی که تنش‌های محیطی به گیاه وارد نشود، عامل محدود کننده تعرق انرژی در دسترس است؛ از این رو اولین قدم برای محاسبه ضریب تعرق ($K_{cb} \times K_s$)، محاسبه کران بالای ضریب تبخیر- تعرق ($K_{c_{max}}$) است. ضریب مورد اشاره در بازه $1/0.5$ تا $1/4$ متغیر است، با این همه، در اکثر مراجع ضریب $1/2$ تا $1/3$ برای آن پیشنهاد شده است (Allen et al., 2005). $K_{c_{max}}$ به صورت متغیر تصادفی گوسی با میانگین $1/3$ و انحراف معیار $0/0.8$ تولید شد. انحراف معیار $0/0.8$ بر اساس انحراف معیار سه عدد $1/2$ ، $1/3$ و $1/4$ به دست آمد. شرط بیشتر از $1/0.5$ و کمتر $1/4$ بر متغیرهای تولید شده اعمال گردید. کران بالای K_{cb} بر اساس حاصل تفاضل $K_{c_{max}}$ از CI و K_e محاسبه شد (رابطه ۵):

ضریب تبخیر (K_e)

K_e بیانگر مؤلفه تبخیر از سطح خاکی است که به دلیل بارندگی یا آبیاری خیس شده است. به مرور و با خشک شدن خاک، K_e کاهش می‌یابد. برای برآورد تبخیر از سطح خاک از روش دو مرحله‌ای برت و همکاران (Burt et al., 2005) استفاده شد (شکل ۵-الف). در این مدل، فرض می‌شود که شار تبخیر در شرایط غیرماندگار است و از دو مرحله تشکیل می‌شود. در مرحله اول، تبخیر از سطح خاک مرطوب متأثر از میزان انرژی موجود و عوامل اتمسفری اقلیمی است^۵ (REW). مرحله دوم تبخیر از زمانی شروع می‌شود که رطوبت خاک به حدی کاهش یابد که تبخیر نسبت به مرحله اول کاهش یابد. میزان رطوبت خاک در این مرحله را حد آستانه تبخیر گویند. در این مرحله، شدت تبخیر متأثر از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و سهولت انتقال آب از لایه‌های زیرین، که در مقایسه با خاک سطحی مرطوب‌تر است، به لایه‌های فوقانی متفاوت است. مجموع آب قابل تبخیر از لایه سطحی^۶ (TEW) و REW به صورت متغیر تصادفی گوسی به ترتیب با

⁶ Total Evaporable Water

⁵ Readily Evaporable Water

ارزیابی بهبود دقت تخمین تبخیر- تعرق واقعی اراضی کشاورزی به کمک داده‌گذاری با...

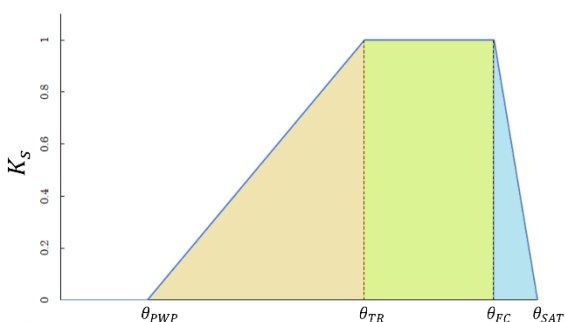
$$(K_{cb})_{max} = \min \left(K_{cbAdj}, K_{cmax} - K_e - \frac{CI}{ET_0} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

۲. در شرایطی که رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه کمتر از θ_{FC} و بیشتر از حد آستانه کاهش تعرق (θ_{TR}) باشد: K_s برابر یک است.

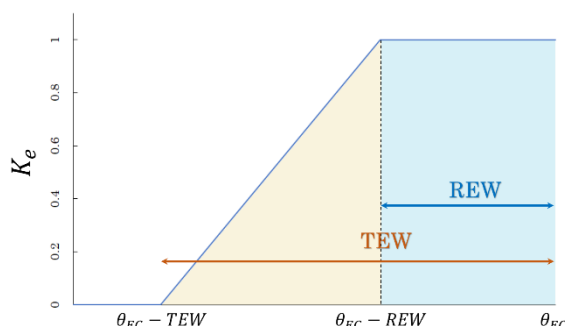
۳. در شرایطی که رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه کمتر از θ_{TR} باشد: فرض می‌شود که K_s در θ_{TR} برابر یک است. با کاهش رطوبت خاک، K_s کاهش می‌یابد تا در θ_{PWP} برابر صفر شود.

در مدل فائو ۵۶، K_s در سه حالت محاسبه می‌شود (شکل ۴):

۱. در شرایطی که رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه بیش از ظرفیت زراعی (θ_{FC}) است: فرض می‌شود که K_s در رطوبت اشباع (θ_{SAT}) برابر صفر است. با کاهش رطوبت خاک از θ_{SAT} ، K_s افزایش می‌یابد تا در θ_{FC} برابر یک شود.



ب - ضریب تنش
b- Stress coefficient



الف - ضریب تبخیر
a- Evaporation coefficient

شکل ۴- تغییرات ضرایب K_s و K_e در برابر تغییرات رطوبت خاک

Figure 5- variations of K_s and K_e as functional of soil moisture content

آب در پوشش است، مقدار آن ثابت می‌ماند. پژوهشگران مدل- های متعددی برای برآورد حد بالای باران‌گیرش گیاهی (CI_{max}) توسعه داده‌اند. از آن جمله می‌توان به مدل‌های بریسون و همکاران (Brisson et al., 1998) و فن هوبنینگن- هونن و همکاران (Von Hoyningen Huene et al., 1981) اشاره کرد (Kozak et al., 2007). در این پژوهش از روش پیشنهادی (Brisson et al., 1998) برای برآورد CI_{max} استفاده شد (جدول ۲).

باران‌گیرش گیاهی (CI)

باران‌گیرش گیاهی (CI) عبارت است از مقدار آبی که در اثر آبیاری بارانی یا باران روی تاج و برگ گیاه باقی می‌ماند و پیش از آنکه به زمین برسد تبخیر می‌شود. عوامل بسیار زیادی بر CI مؤثر است که از آن جمله می‌توان به اندازه برگ، خصوصیات برگ، زاویه برگ‌ها و ساقه‌ها اشاره کرد (Kozak et al., 2007). CI به مقدار حجم آب ورودی به پوشش گیاه وابسته است و با افزایش عمق آبیاری افزایش می‌یابد. با رسیدن به حد آستانه‌ای که معرف حداکثر ظرفیت نگهداری

جدول ۲- مدل های محاسبه حد بالای باران گیرش گیاهی (Kozak et al., 2007)

Table 2-models for calculating the upper limit of Canopy Interception (Kozak et al., 2007)

گیاهان Crops	فرمول Formula	شماره رابطه formula number	مدل Model
گندم و ذرت	$CI_{max} = 0.2LAI$	رابطه ۶	Brisson et al., 1998
گندم زمستانه	$CI_{max} = 0.935 + 0.498LAI - 0.00575LAI^2$	رابطه ۷	Von Hoyningen-Huene et al, 1981

خاک در لایه توسعه ریشه به دست آمد. از آنجا که رطوبت خاک سطحی و رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه به عنوان شرایط اولیه گام بعدی شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت، از این رو داده گواری به جای اینکه بر متغیر ET اعمال گردد، بر رطوبت خاک اعمال شد. بدین منظور ابتدا ET به دست آمده از روش سبال با استفاده از مدل شکل ۴-ب به رطوبت خاک معادل تبدیل و سپس در داده گواری مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که در شکل مذکور مشاهده می شود، مدل ارائه شده در شکل ۴-ب از نوع تابع یک به یک نیست و در شرایطی که ET به دست آمده از سبال برابر ET در شرایط استاندارد باشد، رطوبت خاک هر مقداری در حد فاصل θ_{FC} و θ_{TR} را می تواند به خود اختصاص دهد. در چنین شرایطی اگر همواره رطوبت خاک برابر θ_{FC} یا θ_{TR} در نظر گرفته شود، احتمال وجود خطای اریب افزایش می یابد. برای حل این چالش در شرایطی که ET به دست آمده از سبال برابر شرایط استاندارد باشد، رطوبت خاک مشاهده شده به صورت متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین θ_{TR} تا θ_{FC} محاسبه شد.

فاز پیش بینی در هر دو روش EnKF و PF به صورت مدلسازی به صورت مونت کارلو انجام گردید. تفاوت دو روش داده گواری مذکور مربوط به فاز به روز رسانی است. در EnKF فرض می شود که فضای احتمالاتی نتایج گوسی استوار از این رو در مرحله به روز رسانی ابتدا بهره کالمن (KK) بر اساس واریانس مشاهدات (σ_0^2) محاسبه و نتایج هر یک از اعضای جمعیت بر اساس رابطه ۱۲ اصلاح می شود (Kutz, 2013):

LAI مورد استفاده برای محاسبه CI با استفاده از شاخص سطح برگ مستخرج از تصویرهای ماهواره سنتینل ۲ محاسبه شد. برای استخراج شاخص سطح برگ از تصویرهای ماهواره سنتینل ۲ و مدل پیشنهادی (Boegh et al., 2002) استفاده شد (رابطه ۸ و ۹):

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR-RED}{(NIR+6 \times RED-7.5 \times BLUE+1)} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$LAI = 3.618 \times EVI - 0.118 \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه های بالا، EVI شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته، NIR بازتابش باند فرورسرخ نزدیک، RED بازتابش باند قرمز و BLUE بازتابش باند آبی است. تصویرهای ماهواره سنتینل ۲ در محدوده مطالعاتی از سامانه گوگل ارث انجین گرفته شد. بدین ترتیب CI_{max} در هر رویداد خیس شدگی به صورت متغیر تصادفی گوسی با متوسط $0/2LAI$ (بر اساس رابطه ۶) محاسبه شده بر اساس تصویرهای ماهواره ای و واریانس $0/126$ تولید شد. واریانس $0/126$ بر اساس تحلیل پراکندگی LAI به دست آمده از مزارع تعیین شد.

ساختار داده گواری

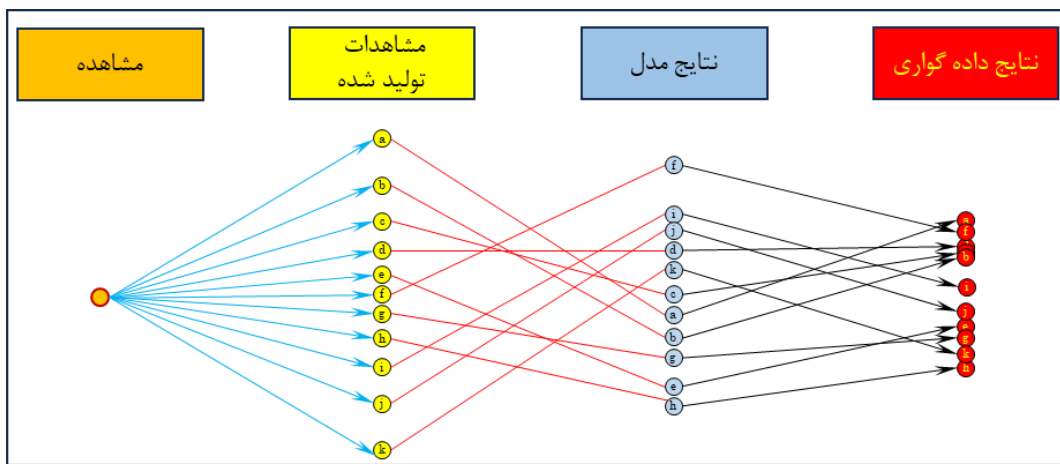
اساس روش های داده گواری بر ترکیب اطلاعات هم جنسی از پدیده مورد بررسی است که با مکانیسم های متفاوتی به دست می آید. ET محاسبه شده بر اساس روش سبال به عنوان مشاهدات استفاده گردید. در مدل محاسبه ET فائو ۵۶، ابتدا تبخیر و تعرق بر اساس رطوبت خاک در گام زمانی پیشین محاسبه می شود، پس از آن رطوبت خاک سطحی و رطوبت

روش EnKF به ازای هر عضو یک متغیر تصادفی گوسی با میانگین مشاهده ثبت می‌گردد و انحراف معیار دقت مشاهده تولید و از آنها برای به‌روزرسانی استفاده می‌شود. یکی از مزایای این اقدام کاهش آسیب‌پذیری سیستم نسبت به مشاهداتی است که در گام خاص خطای زیادی دارند و استفاده از آنها می‌تواند منجر به انحراف در نتایج گردد (شکل ۵).

$$K_k = \sigma_m^2 / (\sigma_m^2 + \sigma_0^2) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$x^+ = x^- + K_k(y - Hx^-) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در رابطه‌های بالا، σ_m^2 واریانس نتایج مدلسازی، H ماتریس نگاشت مدل و مشاهدات، x^- نتایج مدل قبل از به‌روزرسانی، x^+ نتایج مدل پس از به‌روزرسانی و y مشاهدات است. تخمین حاصل از فرآیند داده‌گواری در انتهای هر روز، شرایط اولیه مرحله بعدی شبیه‌سازی را معین می‌سازد. در



شکل ۵ - مرحله به‌روزرسانی فیلتر کالمن همادی

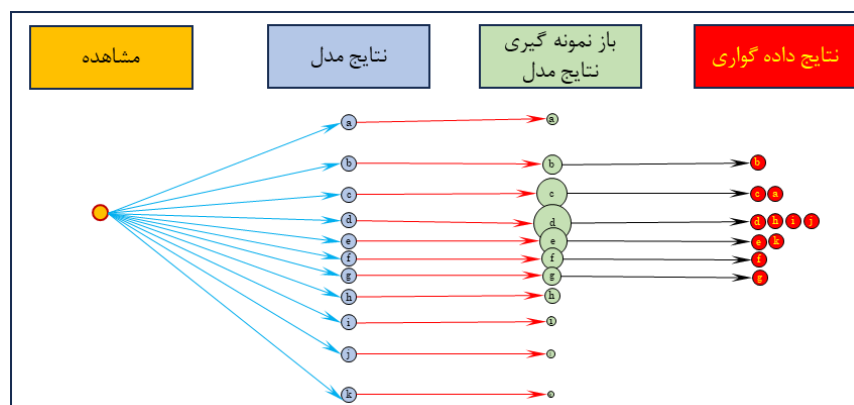
Figure 5- The updating phase of Ensemble Kalman filter

که مجموع q_i های پیش از آن بیشتر از r شده باشد با ذره پیشین جایگزین شد. بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$q_i = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi R}} e^{-\frac{0.5(y-x_i^-)^2}{R}}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi R}} e^{-\frac{0.5(y-Hx_i^-)^2}{R}} \right)} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در رابطه بالا، q_i وزن نرمال شده ذره i ام به شرط مشاهده y و N تعداد ذرات است. پس از به‌دست آوردن وزن هر یک از ذرات باز نمونه‌گیری می‌شوند و N ذره جدید بر اساس اوزان اهمیت ذره‌های پیشین تولید می‌شود (شکل ۶).

در روش PF، وزندهی به ذرات بر اساس احتمال وقوع هر یک از ذرات به شرط مشاهده، اولین مرحله از فاز به‌روزرسانی PF است. احتمال وقوع هر یک از ذرات به شرط مشاهده، توسط تابع مشاهدات محاسبه می‌شود. تابع مشاهدات برای پدیده‌های مختلف متفاوت است. تعیین تابع مشاهداتی که بهترین عملکرد با دقیق‌ترین نتایج را به همراه داشته باشد، مسئله‌ای بسیار چالش برانگیز است که مطالعات گوناگونی در این زمینه شده است. در این پژوهش، از الگوریتم ارائه شده توسط رستیک و همکاران (Ristic et al., 2003) استفاده شد. الگوریتم Ristic در دو مرحله اعمال شد. در مرحله اول عدد تصادفی r با توزیع یکنواخت بین صفر تا یک تولید گردید. پس از آن q_i ها به ترتیب شماره ذرات جمع شدند تا مقدار آنها از r بیشتر شود. ذره‌ای



شکل ۶- مرحله به روزرسانی فیلتر ذره

Figure 6- The updating phase of Particle filter

مدل های به شدت غیرخطی، مانند مدل های هیدرولوژیک، این روند لزوماً برقرار نخواهد بود. برای نمونه، پیش بینی رطوبت خاک در روزهای ابتدایی پس از یک آبیاری سنگین که خاک را به صورت کامل اشباع نماید نسبت به پیش بینی رطوبت خاک در روزهای بعدی از عدم قطعیت بیشتری برخوردار است. زیرا با گذشت زمان، رطوبت خاک به θ_{pwp} نزدیک می شود. از این رو کاهش عدم قطعیت شبیه سازی با استفاده از داده گواری، توسط سه شاخص حداکثر انحراف معیار در دوره شبیه سازی (σ_{AVG})، متوسط انحراف معیار در دوره شبیه سازی (σ_{AVG}) و انحراف معیار در انتهای دوره شبیه سازی (σ_{END}) ارزیابی شد.

• شاخص ۲: مقایسه نتایج با BL

نتایج رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه برای ۴ مزرعه در سراسر دوره رشد که با استفاده از EnKF، PF و OL به دست آمده بود، با نتایج رطوبت خاک به دست آمده از سامانه داده گواری دیگر با مشاهدات میدانی (BL)، مقایسه شد. در BL از مشاهدات حاصل از اندازه گیری رطوبت خاک با دستگاه TDR استفاده شده بود. رطوبت خاک در BL با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز با در نظر گرفتن جزء برداشت ریشه شبیه سازی

روش ارزیابی

هدف اصلی این پژوهش بررسی افزایش دقت تخمین ET در زمین های کشاورزی به کمک داده گواری با استفاده از مشاهدات سنجش از دور بود. به منظور دستیابی به هدف های پژوهش، کارایی هر یک از سناریوهای داده گواری از دو منظر بررسی شد: الف) کاهش عدم قطعیت شبیه سازی از طریق مقایسه انحراف معیار نتایج شبیه سازی رطوبت خاک اعضای جمعیت با استفاده از داده گواری و بدون استفاده از داده گواری (OL). ب) کاهش مجذور مربعات خطای (nRMSE) رطوبت خاک محاسبه شده توسط هر یک از روش های داده گواری نسبت به OL.

• شاخص ۱: انحراف معیار نتایج مدل سازی

انحراف معیار (σ) نتایج شبیه سازی به روش مونت کارلو معیاری مناسب برای ارزیابی عدم قطعیت سیستم است. شاخص مذکور معیار کمی از دامنه نتایج ممکن پدیده مورد بررسی است. به عبارت دیگر، مقادیر بزرگ تر انحراف معیار به این معنی است که رفتار سیستم غیرقابل پیش بینی است. در مدل های خطی، با هر گام از شبیه سازی به سبب انتشار خطا، σ نتایج شبیه سازی افزایش می یابد. شدت افزایش σ در گام های ابتدایی زیاد و پس از آن کاهش می یابد؛ با ای همه، در

روند و میزان کاهش σ برای هر یک از به‌روزرسانی‌ها در مزارع تقریباً مشابه به‌دست آمد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با اولین به‌روزرسانی، σ به نحو چشمگیری کاهش یافته است و با گذشت زمان، σ افزایش می‌یابد تا با به‌روزرسانی بعدی مجدداً σ کاهش یابد. در سه مزرعه C، S2 و S4، پس از اولین به‌روزرسانی، σ روش‌های PF و EnKF همواره کمتر از OL است. برخلاف مزارع یادشده، نتایج تحقیق در مزرعه M مؤید آن است که پس از هر بار به‌روزرسانی σ کاهش می‌یابد، اما با گذشت زمان، σ به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد و برابر σ در حالت OL می‌شود. مهم‌ترین تفاوت مزرعه M با دیگر مزارع، روش آبیاری آن است که برخلاف سه مزرعه دیگر که به سیستم آبیاری سنتریپوت مجهز بودند، از نوار تیپ در آن استفاده شده است؛ از این رو، عمق هر نوبت آبیاری در آن بسیار بیشتر از عمق هر نوبت آبیاری در سه مزرعه دیگر است. پیشتر گفته شد که در شبیه‌سازی ET، عدم قطعیت نتایج مدل در شرایطی که رطوبت خاک نزدیک به ظرفیت زراعی و بیشتر از آن است، در مقایسه با خاک‌های با رطوبت کمتر، بیشتر است و عمق زیاد آبیاری سبب افزایش عدم قطعیت می‌شود. به همین دلیل پس از روز صد و یکم از ابتدای دوره رشد که مزرعه M (که دیگر آبیاری نشده و رطوبت خاک آن کاهش یافته است)، روند تغییرات σ در آن مزرعه مشابه با روند تغییرات σ در سه مزرعه دیگر است؛ از این رو در مزرعه M با هر نوبت آبیاری سنگین σ به‌طور ناگهانی افزایش یافته است، اما در سه مزرعه دیگر که آبیاری در آنها با عمق کمتر و فاصله زمانی کوتاه‌تر بوده، روند افزایش σ تدریجی است.

شد. برای مقایسه اختلاف BL با EnKF، PF و OL از شاخص‌های مجذور مربعات خطای نرمال شده (RMSE) و خطای سوگیری (BIAS) استفاده شد:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^T \frac{1}{T} (\bar{\theta}_i^S - \bar{\theta}_i^{BL})^2} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

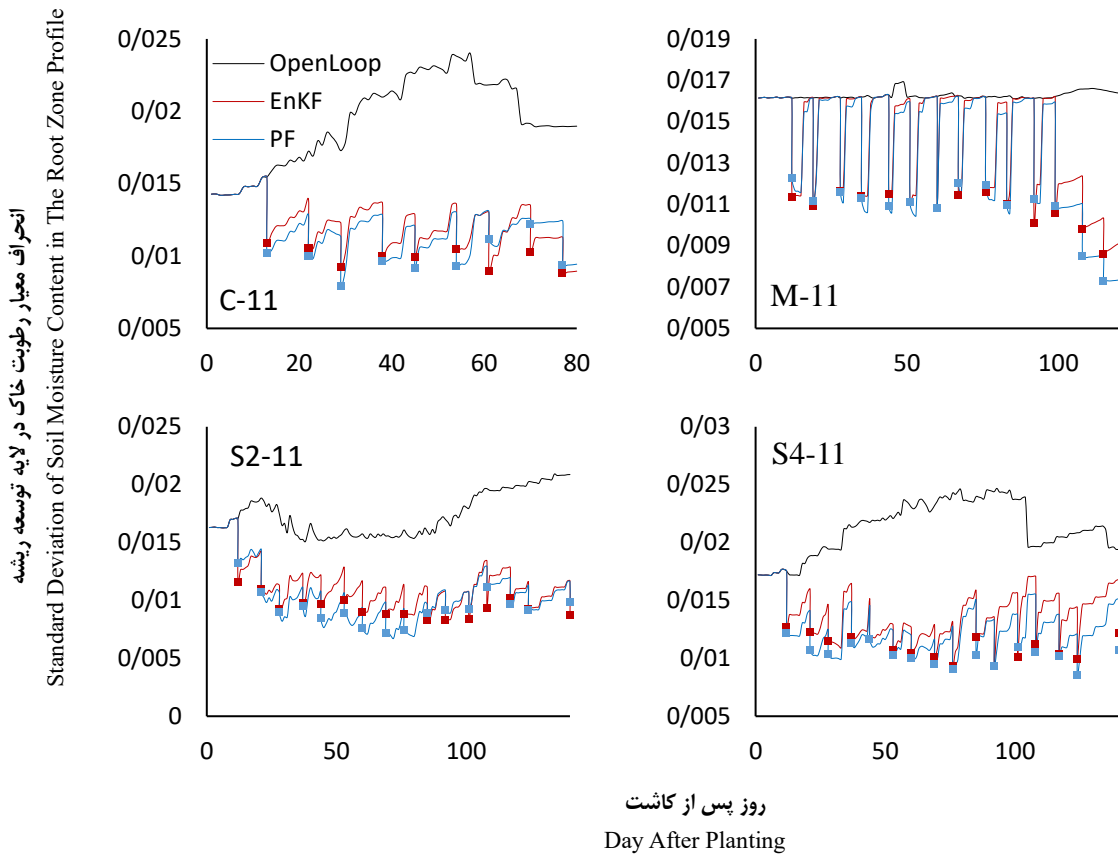
$$\text{BIAS} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (\bar{\theta}_i^S - \bar{\theta}_i^{BL}) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در رابطه‌های بالا، N تعداد روزهای شبیه‌سازی، $\bar{\theta}_i^S$ متوسط رطوبت خاک در لایه توسعه ریشه در روز i ام است که از روش‌های EnKF، PF و OL به‌دست آمد. $\bar{\theta}_i^{BL}$ متوسط رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه در روز i ام BL است. دو شاخص RMSE و BIAS به‌ترتیب معرف تفاوت میانگین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی و انحراف سیسماتیک مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی هستند. هرچه قدر مطلق مقادیر دو شاخص RMSE و BIAS کوچک‌تر باشد، پیش‌بینی‌ها دقت بیشتری دارند.

نتایج و بحث

انحراف معیار نتایج مدلسازی

مقایسه نتایج خروجی داده‌گواری به کمک PF و EnKF با OL مبین آن است که با استفاده از داده‌گواری می‌توان عدم قطعیت تخمین رطوبت خاک را در لایه توسعه ریشه کاهش داد. در شکل ۷، سری زمانی انحراف معیار (σ) چهار مزرعه ارائه شده است. لازم است یادآوری شود شبیه‌سازی برای تمامی ۵۱ محل اندازه‌گیری رطوبت خاک جداگانه بوده است؛ در شکل ۷ نمونه‌ای از هر یک از مزارع ارائه شده است. با توجه به انحراف معیار یکسانی که برای مشاهدات در نظر گرفته شد،



شکل ۷- سری زمانی تغییرات انحراف معیار رطوبت خاک در شرایط OL، EnKF و PF
Figure 7- Time series of soil moisture standard deviation changes in OL, EnKF and PF conditions

σ_{END} را در حدود ۵۰ درصد کاهش دهند (شکل ۷). بیشینه σ در دوره رشد (σ_{MAX})، برای شرایط OL و EnKF، PF به ترتیب برابر ۰/۰۱۶۶، ۰/۰۱۶۵ و ۰/۰۲۱۶ به دست آمد که به ترتیب ۲۸، ۲۶ و ۱۷ درصد بیشتر از σ_{AVG} است. به عبارت دیگر، در شرایط OL عدم قطعیت در دوره رشد نسبتاً یکسان است، اما عملکرد داده‌گواری در شرایطی که برای مثال با اجرای یک یا چند نوبت آبیاری سنگین، عدم قطعیت مدلسازی افزایش یابد، کاهش می‌یابد و به منظور دستیابی به نتایج بهتر مستلزم به-روزرسانی با مشاهدات جدید است.

متوسط σ در دوره رشد (σ_{AVG})، برای شرایط EnKF، PF، OL و به ترتیب برابر ۰/۰۱۲۰، ۰/۰۱۲۶ و ۰/۰۱۸۶ به دست آمد (جدول ۳). به عبارت دیگر داده‌گواری به روش‌های PF و EnKF توانسته است عدم قطعیت در تخمین رطوبت خاک را در دوره رشد به ترتیب ۳۶ و ۳۲ درصد کاهش دهد. بررسی σ در پایان دوره شبیه‌سازی (σ_{END}) نیز برای چهار مزرعه مشابه σ_{AVG} بود. متوسط σ_{END} برای چهار مزرعه برای شرایط OL و EnKF، PF به ترتیب برابر ۰/۰۰۹۳، ۰/۰۰۹۵ و ۰/۰۱۸۵ به دست آمد و هر دو روش داده‌گواری توانستند به طور متوسط

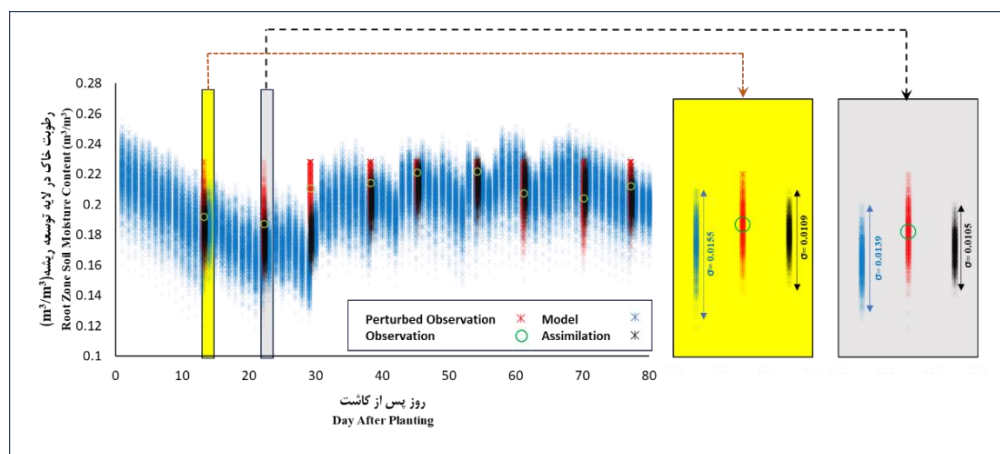
جدول ۳- نتایج عملکرد روش‌های داده‌گذاری

Table 3- Results of the performance of Data assimilation methods

شاخص	روش	مزرعه C	مزرعه M	مزرعه S2	مزرعه S4	متوسط
Indicator	Method	Farm C	Farm M	Farm S2	Farm S4	Average
σ_{AVG}	PF	0.0166	0.0135	0.0104	0.0123	0.0120
	EnKF	0.0120	0.0139	0.0111	0.0134	0.0126
	OL	0.0193	0.0163	0.0174	0.0213	0.0186
σ_{MAX}	PF	0.0154	0.0163	0.0171	0.0177	0.0166
	EnKF	0.0154	0.0158	0.0171	0.0177	0.0165
	OL	0.0240	0.0169	0.209	0.0247	0.0216
σ_{END}	PF	0.008	0.008	0.010	0.011	0.009
	EnKF	0.009	0.009	0.009	0.011	0.010
	OL	0.019	0.016	0.021	0.019	0.015

پژوهش ثابت در نظر گرفته شد. با این همه، با هر بار به- روزرسانی σ نتایج کاهش یافته است. بنابراین، سطح اعتماد سامانه داده‌گذاری به نتایج مدل افزایش پیدا کرده و به تبع آن K_K کاهش یافته است. برای نمونه، در نقطه C-11، در روز سیزدهم از ابتدای شبیه‌سازی که اولین به‌روزرسانی است، میزان $\Delta\sigma$ برابر 0.005 است؛ حال آنکه در به‌روزرسانی دوم $\Delta\sigma$ برابر 0.003 به‌دست آمده است (شکل ۸). متوسط $\Delta\sigma$ برای همه به‌روزرسانی‌ها با استفاده از EnKF برای مزارع C، M، S2 و S4 به‌ترتیب برابر 0.0035 ، 0.0046 ، 0.0028 و 0.0040 به‌دست آمده است.

نتایج به‌دست آمده دلالت بر آن دارد که در هر دو روش PF و EnKF، با هر مرحله از به‌روزرسانی، شدت تغییرات σ که عبارت بود از میزان کاهش σ قبل و بعد از به‌روزرسانی $(\Delta\sigma)$ ، کاهش یافته است. در روش EnKF، متوسط $\Delta\sigma$ برای اولین به‌روزرسانی در چهار مزرعه C، M، S2 و S4 به‌ترتیب برابر 0.0046 ، 0.0051 ، 0.0053 ، 0.0051 و برای دومین به‌روزرسانی برابر 0.0033 ، 0.0051 ، 0.0035 و 0.0041 به- دست آمد. منطق داده‌گذاری در روش EnKF، بر اساس وزن- دهی بین نتایج مدل و مشاهدات بر اساس سطح اعتمادی است که به دو منبع اطلاعاتی وجود دارد. σ مشاهدات طی

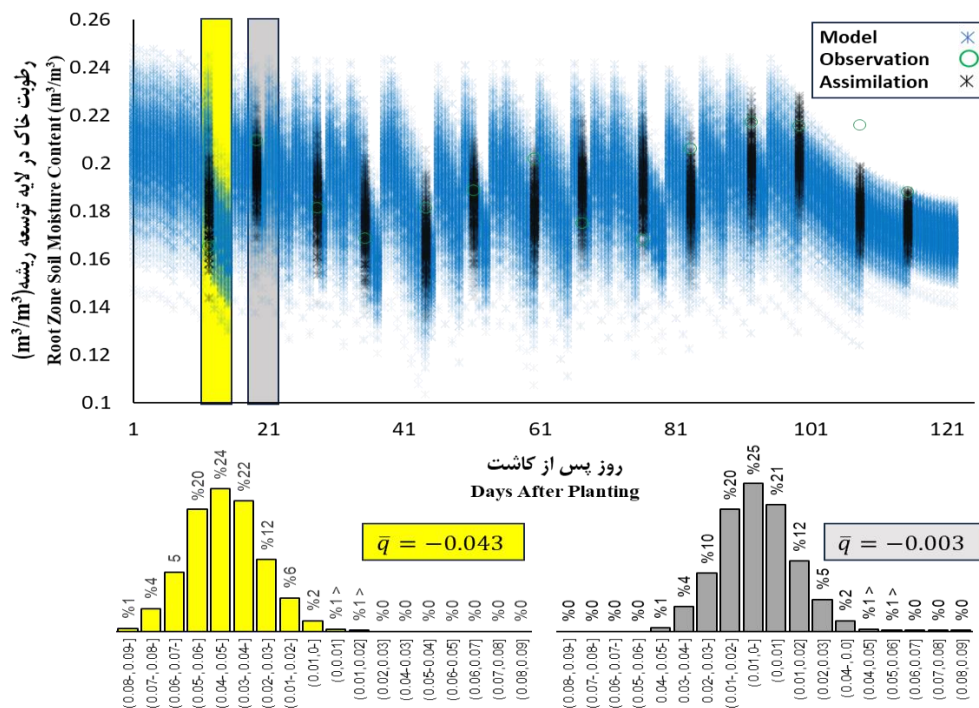


شکل ۸- نتایج C-11 با استفاده از EnKF

Figure 8-Results of C-11 using EnKF

با توجه به اینکه ذرات به هم نزدیک تر شده اند، فاصله آنها از مشاهده بعدی نیز به هم نزدیک تر شده است؛ بدین ترتیب احتمال حذف ذرات نسبت به مرحله به روزرسانی قبلی کمتر می شود. برای مثال، در داده گزاری نقطه M-11، در اولین و دومین به روزرسانی، متوسط فاصله اعضا از مشاهدات (q) به ترتیب برابر ۰/۰۴۳- و ۰/۰۰۳- است (شکل ۹). متوسط $\Delta\sigma$ برای همه به روزرسانی ها با استفاده از PF برای مزارع M، C، S2 و S4 به ترتیب برابر ۰/۰۰۳۱، ۰/۰۰۴۲، ۰/۰۰۲۰ و ۰/۰۰۳۴ به دست آمده است.

در PF نیز مشابه EnKF با هر مرحله از به روزرسانی، $\Delta\sigma$ کاهش یافته است. در روش PF، متوسط $\Delta\sigma$ برای به اولین به روزرسانی در چهار مزرعه C، M، S2 و S4 به ترتیب برابر ۰/۰۰۴۷، ۰/۰۰۳۷، ۰/۰۰۴۶، ۰/۰۰۵۶ و برای آخرین به روزرسانی برابر ۰/۰۰۲۹، ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۰۱۸ و ۰/۰۰۳۹ به دست آمده است. در اولین به روزرسانی در روش PF در هر مرحله از داده گزاری نتایج آن دسته از ذراتی که فاصله زیادی با مشاهده داشته اند، بر اساس مکانیسم ارائه شده در شکل ۶، حذف و با نتایج دیگر ذرات جایگزین شدند. شبیه سازی بر اساس همین نتایج ادامه می یابد. در مرحله بعدی به روزرسانی



شکل ۹- نتایج M-11 با استفاده از PF

Figure 9-Results of M-11 using PF

شاخص ها برای تمامی نقاط هر مزرعه به عنوان شاخص آماری مزرعه در نظر گرفته شد و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که هر دو روش داده گزاری PF و EnKF به نحو چشمگیری توانسته اند خطای سوگیری شبیه سازی در حالت OL را کاهش دهند. به طور

مقایسه نتایج رطوبت خاک با BL

شاخص های آماری خطای سوگیری (BIAS)، مجذور مربعات خطا (RMSE) و مجذور مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) برای هر یک از ۵۱ محل های اندازه گیری رطوبت خاک به صورت جداگانه استخراج شد. متوسط هر یک از

متوسط BIAS روش‌های EnKF و PF به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۹ کمتر از OL به دست آمد؛ از این رو می‌توان استنباط کرد که مدل آلن و همکاران (Allen et al., 1998) و یا پارامترهای مورد نیاز آن که در پژوهش استفاده شد، سبب شده است

مدل ET را بیش‌برآورد کند و داده‌گواری با استفاده از ET به دست آمده از روش سبال می‌تواند اثر سوگیری مدل را در حدود ۳۰ درصد کاهش دهد.

جدول ۴- شاخص‌های آماری عملکرد حاصل از مقایسه نتایج روش‌های PF، EnKF و OL با BL

Table 4- Statistical performance indicators obtained by comparing the results of PF, EnKF, and OL methods with BL

nRMSE			RMSE			Bias			روش	مزرعه
Maximum	Average	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Method	Farm
0.228	0.137	0.063	0.041	0.025	0.011	0.005	-0.004	-0.014	PF	C
0.245	0.138	0.036	0.041	0.025	0.006	0.011	-0.003	-0.020	EnKF	
0.252	0.154	0.072	0.046	0.028	0.013	0.003	-0.012	-0.026	OL	
0.131	0.122	0.110	0.027	0.025	0.022	-0.015	-0.017	-0.019	PF	M
0.132	0.121	0.108	0.027	0.024	0.022	-0.014	-0.015	-0.018	EnKF	
0.125	0.119	0.106	0.026	0.024	0.022	-0.014	-0.018	-0.021	OL	
0.329	0.257	0.169	0.071	0.049	0.029	-0.022	-0.042	-0.070	PF	S2
0.316	0.258	0.176	0.068	0.049	0.030	-0.021	-0.041	-0.067	EnKF	
0.393	0.311	0.242	0.085	0.059	0.042	-0.039	-0.055	-0.083	OL	
0.278	0.177	0.113	0.063	0.032	0.019	0.013	-0.015	-0.061	PF	S4
0.266	0.181	0.118	0.060	0.033	0.020	0.014	-0.013	-0.058	EnKF	
0.320	0.173	0.089	0.072	0.032	0.014	0.008	-0.023	-0.070	OL	
0.242	0.173	0.114	0.051	0.033	0.020	-0.005	-0.020	-0.041	PF	متوسط Average
0.240	0.175	0.110	0.049	0.033	0.020	-0.003	-0.018	-0.041	EnKF	
0.273	0.189	0.127	0.057	0.036	0.023	-0.011	-0.027	-0.050	OL	

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر داده‌گواری در بهبود تخمین ET زمین‌های کشاورزی با ترکیب اطلاعات ET به-دست آمده از مدل فائو ۵۶ و ET محاسبه شده بر اساس روش سبال، اجرا شد. از دو روش داده‌گواری شامل فیلتر ذره (PF) و فیلتر کالمن همادی (EnKF) استفاده شد. به منظور ارزیابی کارایی این روش‌ها، نتایج به دست آمده از دو رویکرد داده-گواری PF و EnKF و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به-صورت حلقه باز (OL)، با نتایج سامانه داده‌گواری دیگر مقایسه گردید که در آن از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به-وسیله دستگاه رطوبت‌سنج TDR و حل عددی معادله ریچاردز استفاده شده بود (BL). انحراف معیار (σ) مقادیر رطوبت خاک

نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که روش‌های PF و EnKF توانایی نسبتاً یکسانی برای بهبود خطای RMSE و nRMSE تخمین رطوبت خاک دارند. RMSE و nRMSE استفاده از EnKF و PF در مقایسه با OL، به طور متوسط ۸ درصد کاهش یافته است. کمینه و بیشینه nRMSE برای PF، ۰/۱۱۴ و ۰/۲۴۲، برای EnKF ۰/۱۱۰ و ۰/۲۴۰ و برای OL ۰/۱۲۷ و ۰/۲۷۳ به دست آمد. این نتایج مؤید آن است که داده‌گواری می‌تواند بازه تغییرات RMSE و nRMSE را کاهش و دقت مقادیر برآورد شده رطوبت خاک را افزایش دهد. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های لی و همکاران (Li et al., 2018) که گزارش داده اند داده‌گواری با استفاده از EnKF توانسته است دقت تخمین آب مصرفی گیاه در سطح مزرعه را افزایش دهد، همخوانی دارد.

مشاهدات است. از این رو پیشنهاد می شود که در پژوهش های آتی حساسیت تخمین رطوبت خاک در سطح مزارع به خطای مشاهدات سنجش از دوری ارزیابی شود. ممقایسه نتایج بدست آمده برای چهار مزرعه همچنین نشانگر آن بود که دستیابی به عملکرد مناسب در داده گواری برای شرایطی که عدم قطعیت نتایج مدل بسیار زیاد است، مستلزم افزایش تعداد به روزرسانی با مشاهدات جدید است.

نتایج دلالت بر آن دارد که داده گواری توانسته است شاخص های BIAS و nRMSE را در مقایسه با OL کاهش دهد. متوسط BIAS برای EnKF، PF و OL به ترتیب برابر ۰/۰۱۸، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۸ و متوسط nRMSE برای سه روش مورد اشاره به ترتیب ۰/۱۷۳، ۰/۱۷۵ و ۰/۱۸۹ به دست آمد. به عبارت دیگر، استفاده از مشاهدات حاصل از ET به دست آمده از تصاویر ماهواره لندست و روش سبال به نحو چشمگیری توانست تخمین ET با مدل فائو ۵۶ را بهبود ببخشد. بنابراین، با استفاده از داده گواری می توان اقدام به بهبود برآورد آب مصرفی گیاهان و ارتقای مدیریت آبیاری کرد.

که توسط سه رویکرد شبیه سازی شده بود، به عنوان معیاری از عدم قطعیت نتایج بررسی گردید.

مقایسه نتایج به دست آمده از روش های PF و EnKF با OL مبین آن است که با استفاده از داده گواری می توان عدم قطعیت تخمین رطوبت خاک را در لایه ریشه کاهش داد. به طور متوسط σ در دو رویکرد PF و EnKF به ترتیب ۳۶ و ۳۲ درصد کمتر از OL بودند. در کل دوره شبیه سازی، σ به دست آمده در شرایط PF و EnKF در سه مزرعه C، S2 و S4 همواره کمتر از شرایط OL بود. پس از هر نوبت آبیاری در مزرعه M، σ به ناگهان افزایش یافت و تقریباً برابر OL گردید. دلیل افزایش ناگهانی σ در این مزرعه را می توان مربوط به عمق بیشتر آبیاری در مزرعه M نسبت به مزارع دیگر دانست. به طور متوسط شدت تغییرات سیگما که عبارت است از میزان کاهش سیگما قبل و بعد از به روزرسانی ($\Delta\sigma$) برای PF و EnKF به ترتیب برابر ۰/۰۳۲ و ۰/۰۳۷ به دست آمد؛ نتایج دلالت بر آن دارد که داده گواری عدم قطعیت نتایج شبیه سازی را کاهش داده است. روشن است که میزان $\Delta\sigma$ تابع دقت

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی ستاد توسعه اقتصاد دانش بنیان آب، اقلیم و محیط زیست معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش بنیان ریاست جمهوری اجرا شده است. از مجموعه ی کشت و صنعت جوین به خصوص مدیریت محترم کشت و صنعت، واحد پژوهش و واحد فناوری های نوین که این پژوهش با حمایت های ایشان اجرا شد قدردانی می شود.

مراجع

- Alavi, N. (2008). Data Assimilation techniques to improve evapotranspiration estimates. university of guelph faculty. Canada
- 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, Italy, 301 pp.
- Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation. Advanced Training and User's Manual, version 1.0.
- 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 Extension Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1), 2-13.

- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., ... & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6), 311-346.
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote sensing of Environment*, 81(2-3), 179-193.
- Burt, C. M., Mutziger, A. J., Allen, R. G., & Howell, T. A. (2005). Evaporation research: Review and interpretation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 37-58.
- Deb, P., Abbaszadeh, P., & Moradkhani, H. (2022). An ensemble data assimilation approach to improve farm-scale actual evapotranspiration estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 321, 108982.
- Doherty, C. T., Johnson, L. F., Volk, J., Mauter, M. S., Bambach, N., McElrone, A. J., ... & Melton, F. S. (2022). Effects of meteorological and land surface modeling uncertainty on errors in winegrape ET calculated with SIMS. *Irrigation Science*, 40(4-5), 515-530.
- Dong, Q., Zhan, C., Wang, H., Wang, F., & Zhu, M. (2016). A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 26, 230-242.
- Gebler, S., Franssen, H.H., Pütz, T., Post, H., Schmidt, M. and Vereecken, H., 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: a comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), p.2145.
- He, X., Liu, S., Xu, T., Yu, K., Gentine, P., Zhang, Z., ... & Wu, D. (2022). Improving predictions of evapotranspiration by integrating multi-source observations and land surface model. *Agricultural Water Management*, 272, 107827.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Holton, J.R., Hakim, G.J., (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology – 5th ed.* Academic Press
- Hirschi, M., Michel, D., Lehner, I., & Seneviratne, S.I., (2017). A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 1809-1825.
- Jensen, M.E., & Allen, R.G. (2016). *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements: Task Committee on Revision of Manual 70 (No. Ed. 2).* American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Li, D., Franssen, H.J.H., Han, X., Jiménez-Bello, M.A., Alzamora, F.M. & Vereecken, H., (2018). Evaluation of an operational real-time irrigation scheduling scheme for drip irrigated citrus fields in Picassent, Spain. *Agricultural water management*, 208, pp.465-477.
- Kozak, J. A., Ahuja, L. R., Green, T. R., & Ma, L. (2007). Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(2), 229-241.
- Kutz, J. N., & Kutz, J. N. (2013). *Data-driven modeling & scientific computation: methods for complex systems & big data.* OUP Oxford.
- Netzer, Y., Yao, C., Shenker, M., Bravdo, B.-A., & Schwartz, A. (2008). Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrigation Science*, 27(2), 109-120.
- Ristic, B., Arulampalam, S., & Gordon, N. (2003). *Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications.* Artech house.
- Tabatabaai, S.H., Mirlatifi, S.M., Dehghanisani, H., Shokri, A. (2021). Comparison of computed sugar beet evapotranspiration by the Penman-Monteith equation using measured climatological parameters and

- predicted products of GFS, ECMWF and MeteoBlue meteorological forecasting models in the Jovein region. *Irrigation and Drainage Structures Engineering*, 83(22), 1-20. (In persian)
- Tabatabaai, S.H., Mirlatifi, S.M., Dehghanisanij, H., Naghedifar, S.M.R., Shokri, A. (2024). Sensitivity Assessment of Soil Moisture Data Assimilation to the Number of the Sampling Depths and the Time Intervals Between Measurements Using Numerical Solution of the Richards Equation. *Irrigation and Drainage Structures Engineering*, 91(24), 87-108. (In persian)
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Rep. EPA-600/2-91/065. 92 pp., U.S. Environ, Prot. Agency, Ada, Okla.
- Von Hoyningen-Huene J. 1981. The interception of precipitation in agricultural crops. Work report from the German Association for Water Management and Cultural Building, DVWK, Braunschwig, Germany (In Germany)
- Zhang, Z., Tian, F., Hu, H., & Yang, P. (2014). A comparison of methods for determining field evapotranspiration: Photosynthesis system, sap flow, and eddy covariance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3), 1053–1072.



Original Research

Assessment of improving the accuracy of actual evapotranspiration estimation in agricultural lands using data assimilation with remote sensing observations and the FAO-56 model

Seyed Hasan Tabatabaai, Seyed Majid Mirlatifi*, Hosein Dehghanisanij, Ashkan Shokri

* **Corresponding Author:** Dept. of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 11 November 2023, **Accepted:** 7 April 2024

Email: mirlat_m@modares.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2024.364097.1565

Abstract

The impact of the application of data assimilation (DA) on improving the accuracy of estimates of ET was investigated by applying two different methods of (DA) namely Ensemble Kalman Filter (EnKF) and Particle Filter (PF). The ET calculated using the SEBAL algorithm was used as the observations and the ET calculated according to the FAO 56 was considered as the model outputs. In order to ascertain the performance of these two aforementioned DA methods, the results obtained from three different approaches including a) application of DA using PF method, b) application of DA using EnKF method, and c) application of an open-loop simulation (OL) were compared with the results of another data assimilation system. In this alternative system, soil moisture contents were measured by a soil moisture sensing device (TDR) and the numerical solution of the Richards equation was utilized to calculate soil moisture content (BL). The results indicated that the PF and EnKF methods reduced the average bias error in the soil moisture estimations in the root zone layer by 7% and 9%, respectively, compared to the OL. Furthermore, the PF and EnKF methods were able to reduce the nRMSE of the soil moisture contents by 8% compared to the open-loop simulation (OL). These findings suggest that with the application of the DA, it is possible to improve the accuracy of the ET estimations and therefore, to enhance irrigation management.

Introduction

Data assimilation is a scientific method which integrates information from the actual measurements and the model predictions within a defined framework to enhance the accuracy of the estimations of variables or parameters under investigation. This process comprises of two phases called prediction and update. In the prediction phase, the model estimations are computed using the Monte Carlo simulation method. This process continues until observation data (measurements) becomes available. In the update phase, model estimations and observations are combined, taking into account the confidence level associated with each one of the data sources (observations, and model estimations), resulting in posteriori estimates (updated outcomes). This study focuses on improving the accuracy of the estimates of the soil moisture contents at root zone depth using the ET estimation model suggested for non-standard conditions by FAO 56 (Allen et al., 1998) through the utilization of two data assimilation methods namely the Ensemble Kalman Filter (EnKF) and the Particle Filter (PF). ET was calculated according to the Surface Energy Balance (SEBAL) algorithm using Landsat 8 satellite imagery as observation data for the data assimilation system.

Materials and Methods

In order to ascertain the effectiveness of the data assimilation methods applied, results obtained from a data assimilation system (referred to as BL) which was implemented in two sugar beet fields and two corn fields in the Jovein region were utilized. In the BL system, simulated soil moisture contents of the root zone layer obtained by numerically solving the Richards equation were combined with the soil moisture measurements taken at specific points in the fields using soil moisture sensors (TDR). 51 TDR access tubes were installed in the fields to measure soil moisture contents at various depths using Time Domain Reflectometry (TDR) sensors. Soil moisture measurements were recorded from Khordad to Aban 1399 (write in English calendar).

The essence of data assimilation methods lies in the amalgamation of homogeneous information about the studied phenomenon obtained through different mechanisms. In this study, the observations utilized included ET calculated based on the SEBAL algorithm. In the FAO-56 model, evapotranspiration and soil moisture content of the surface and root zone layers were computed. Since soil moisture contents of the surface and the root zone layers serve as the initial conditions for subsequent simulation steps, data assimilation was applied to the soil moisture content instead of the ET. To achieve this, ET obtained from the SEBAL algorithm was converted into soil moisture content and subsequently used in the data assimilation process.

Conclusion

The average standard deviation of the simulated soil moisture contents (σ) in the PF and EnKF approaches was 36% and 32% lower, respectively, compared to the open-loop (OL) approach. Throughout the growth period, PF and EnKF consistently resulted in lower σ compared to OL in the three fields which were irrigated by center-pivot irrigation systems. However, following each irrigation event in the field M, which was irrigated by a drip irrigation system, σ suddenly increased and became nearly equivalent to OL. This was attributed to the greater depth of irrigation water in this field as compared with the other three fields. On the average, the magnitude of σ change ($\sigma\Delta$), representing the reduction in σ before and after the update, was 0.032 and 0.037 for PF and EnKF, respectively. Consequently, the results suggested that data assimilation reduces the uncertainty of simulation results.

The research findings indicate that data assimilation significantly reduced the BIAS and nRMSE indices compared with the OL approach. The average BIAS for EnKF, PF, and OL was 0.018, 0.020, and 0.028, respectively, while the average nRMSE for the three methods was 17.3%, 17.5%, and 18.9%, respectively. In other words, the use of ET observations obtained from Landsat 8 satellite imagery and the SEBAL algorithm significantly improved the accuracy of the estimation of ET with the FAO-56 model. Therefore, the obtained results suggest that data assimilation can be employed to enhance the accuracy water consumption estimates and to improve irrigation management.

Keywords: Ensemble Kalman Filter, Particle Filter, SEBAL, Soil-Water-Plant Modeling.