



ارزیابی ردپای آب خاکستری برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی

مهسا نادری رجه^۱، عبدالله درزی نفت‌چالی^{۲*}، فاطمه کاراندیش^۳، هادی رزاقیان^۴، ایریکا سیمیونک^۵

مهسا نادری رجه، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
عبدالله درزی نفت‌چالی، عضو هیات علمی گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
فاطمه کاراندیش، عضو هیات علمی گروه مهندسی آب دانشگاه زابل
هادی رزاقیان، عضو هیات علمی دانشگاه پیام نور
ایریکا سیمیونک، استاد دانشگاه کالیفرنیا - ریورساید
*مولف مکاتبه کننده: عبدالله درزی نفت‌چالی، دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی،
abdullahdarzi@yahoo.com، شماره تماس: ۰۹۱۱۹۲۶۲۵۹۸، adarzi@sanru.ac.ir

چکیده

با توجه به مصرف قابل توجه آب و مواد غذایی در سیستم‌های تولید برنج، ارزیابی ردپای آب خاکستری (GWF) در فرایند تولید این محصول اهمیت زیادی در برنامه‌های حفظ محیط زیست دارد. در این مطالعه، با استفاده از روش‌های مختلف، اثرات مدیریت‌های آبیاری و زهکشی بر GWF برنج بررسی شد. برای این منظور، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای دو مدیریت زهکشی میان‌فصل (MSD) و آبیاری و زهکشی متناوب (AWD)، مقدار GWF برنج به کمک روش درختی سطح یک، تخمین میدانی و مدل HYDRUS-2D برآورد شد. در طول فصول مختلف کشت، میزان مصرف و تلفات کود نیتروژن، جذب آن توسط گیاه و عملکرد محصول تعیین شد. از داده‌های سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل در مدیریت MSD و سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل در مدیریت AWD استفاده شد. میزان GWF در روش درختی سطح یک در محدوده ۱۳۶۸-۷۰۱ مترمکعب بر تن، در روش تخمین میدانی بین ۲۹۹۵-۱۷ متر مکعب بر تن و نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل HYDRUS-2D در محدوده ۲۷۷۰-۱۹ متر مکعب بر تن قرار داشت. در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، خطای نسبی روش شبیه‌سازی حدود ۱۲-۵ درصد و خطای نسبی روش درختی سطح یک بین ۳۹۶۱-۴ درصد متغیر بود. براساس نتایج، با استفاده از مدل HYDRUS-2D می‌توان با دقت قابل قبولی میزان GWF کشت برنج را تحت مدیریت‌های مختلف برآورد نمود.

کلید واژه‌ها: زهکشی زیرزمینی، کود نیتروژن، مدل HYDRUS-2D، مدیریت آبیاری.

مقدمه

در جهان امروز، آب به عنوان کالایی اقتصادی - اجتماعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. با توجه به رشد سریع جمعیت و افزایش قابل توجه تقاضای غذا، نیاز به این منبع حیاتی افزایش یافته است [۲ و ۳]. این در حالی است که کاهش شدید منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی و نابودی محیط‌زیست و اکوسیستم‌های آبی، پیامدهای ناگوار قابل توجهی در بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک به همراه داشته است [۴ و ۵]. کشور ایران نیز به دلیل قرار گرفتن در اقلیم خشک و نیمه خشک و همچنین، رشد



روزافزون مصارف آب در سال‌های آتی با خطر بروز بحران آب مواجه هست. برآوردها حاکی از آن است که سرانه منابع آب تجدیدپذیر کشور تا سال ۲۰۳۰ به کمتر از ۱۵۰۰ مترمکعب کاهش می‌یابد [۷].

بخش اعظم چالش‌های کنونی آب در دنیا، ناشی از مصرف بیش از اندازه از منابع آب شیرین و گاهی مصرفی فراتر از حد مجاز از این منابع توسط بشر در فرآیند تولید و مصرف محصولات کشاورزی می‌باشد [۸]. در این میان، غلات و فرآورده‌های آن، به دلیل داشتن جایگاه نخست در سید غذایی مردم، سهم بیشتری در مجموع مصارف منابع آب شیرین داراست. برنج با سطح زیر کشت بیش از ۸۵۴ هزار هکتار در کشور [۹]، یکی از بزرگترین مصرف کنندگان آب بشمار می‌رود [۱۰].

تاکنون شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی وضعیت مصرف آب، ارایه راهکارهای ارتقای بهره‌وری این نهاده ارزشمند و کاهش آلودگی‌های منشعب از مصرف بیش از حد آن ارایه شدند [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. در میان این‌ها، ردپای آب (WF) به عنوان جامع‌ترین شاخص برای کمی‌سازی مصرف آب توسط فعالیت‌های انسانی است و نشان دهنده حجمی از آب است که به طور مستقیم یا غیر مستقیم برای تولید کالا و یا ارایه هرگونه خدمات به مصرف می‌رسد [۱۱]. شاخص ردپای آب به سه شکل ردپای سبز، آبی و خاکستری بیان می‌باشد. ردپای آب سبز (WFgreen) به عنوان کسری از آب باران ذخیره شده در خاک و در دسترس گیاه برای تبخیر-تعرق در طول مراحل رشد تعریف می‌شود که می‌تواند معادل مفهوم بارش موثر در نظر گرفته شود [۱۴]. ردپای آب آبی (WFblue) به تمام آبی اطلاق می‌شود که برای آبیاری از سفره‌های زیرزمینی و منابع آب سطحی تامین می‌شود [۱۵]. بر اساس تعریف ارایه شده توسط هوکسترا و همکاران [۱۶]، ردپای آب خاکستری (GWF) مقدار آبی است که برای پالایش آب آلوده شده در یک یا مجموعه‌ای از فرآیندهای انسان‌نهاد لازم است به نحوی که غلظت آب در منابع آبی که این آلودگی بدان دفع می‌شود را به حد استاندارد بازگرداند یا حجم آب مورد نیاز برای رقیق کردن مقدار معینی از آلودگی است به شیوه‌ای که استانداردهای کیفیت آب محیطی را برآورده کند یا معادل غلظت طبیعی پس زمینه باشد [۱۷]. مقدار GWF یک فرآیند نشان‌دهنده میزان آلودگی آب شیرین به دلیل آن فرآیند می‌باشد. این شاخص، برای پذیرش بار آلاینده‌ها با لحاظ غلظت‌های طبیعی و استانداردهای کیفی موجود در محل مورد نظر، مبین حجم آب مورد نیاز می‌باشد. مفهوم GWF بر اساس این مهم توسعه داده شد که می‌توان آلودگی آب را به صورت حجم آب شیرین مورد نیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها، تا حدی که بی‌خطر شوند، تعریف نمود [۱۸]. این شاخص، علاوه بر داشتن بعدهای زمانی و مکانی، قادر است زنجیره‌ی تولید و مصرف را در فرآیندهای متعدد بشری به صورت جامع دربرگیرد و پایداری منابع آب را از دیدگاه‌های متفاوتی همچون دیدگاه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و کارآمدی سیستم عرضه و مصارف منابع آبی ارزیابی کند. شاخص GWF در سال‌های اخیر به‌طور گسترده توسط متخصصین در نقاط مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفته است. برخی محققین، GWF برنج را در مناطق مختلف ارزیابی کردند [۱۰، ۱۹، ۲۰ و ۲۱] و نشان دادند که به‌دلیل مصرف زیاد آب در زراعت برنج، مقدار GWF آن قابل توجه می‌باشد.

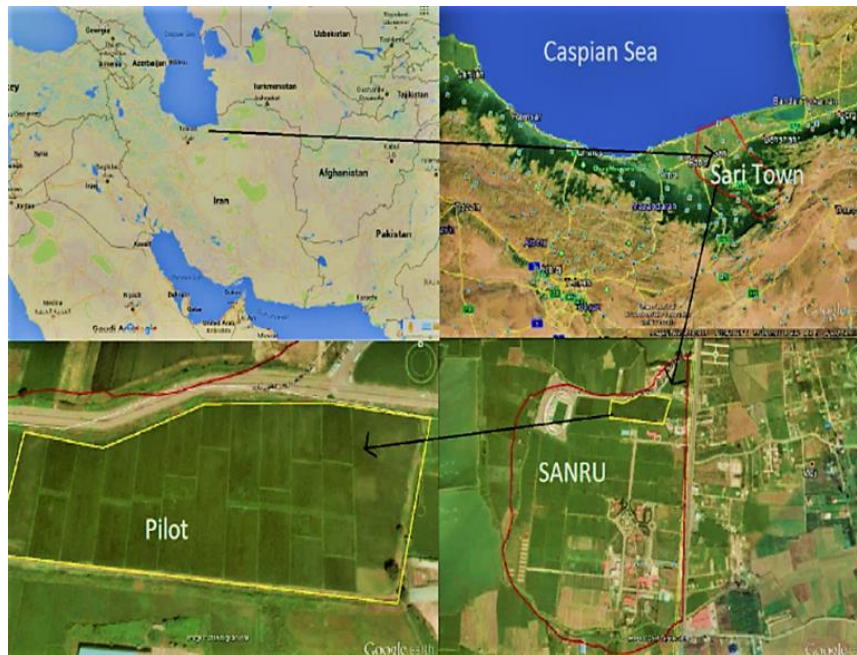
مطالعات بسیاری در مورد شاخص GWF برای بخش‌های مختلف کشاورزی، اقتصادی، سیستم‌های تولید و همچنین، روش‌شناسی در سطح جهانی [۲۲، ۲۳ و ۲۴]، در سطح ملی [۲۵، ۲۶ و ۲۷] و در مقیاس‌های کوچک [۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲] انجام شد. از سوی دیگر، آزمایش‌های میدانی برای تهیه داده‌های مورد نیاز برای برآورد GWF بسیار وقت گیر و پرهزینه می‌باشد، می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه استفاده نمود. از میان مدل‌های متعدد موجود برای شبیه‌سازی آب و خاک و پویایی املاح، HYDRUS-2D یک مدل عددی قدرتمند است که کارآیی مطلوبی برای شبیه‌سازی انتقال آب و مواد غذایی در خاک دارد [۱۱، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸]. با توجه به اینکه تاکنون کارایی روش‌های مختلف برای کمی‌سازی شاخص GWF صورت نپذیرفته است، در این پژوهش با استفاده

از داده‌های مزرعه‌ای تحت مدیریت‌های متفاوت آبیاری و زهکشی، میزان ردپای آب خاکستری برنج با استفاده از روش‌های درختی سطح یک، تخمین میدانی و مدل HYDRUS-2D مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

داده‌های مزرعه‌ای مورد نیاز این تحقیق طی چهار فصل کشت برنج در سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۹۱، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ از حدود ۴/۵ هکتار اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شد. بافت لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری، اغلب از نوع سیلتی رسی و از ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری، رسی می‌باشد. مزرعه مورد مطالعه دارای سه نوع سیستم زهکشی زیرزمینی معمولی متشکل از سیستم زهکشی با فاصله ۳۰ متر و عمق نصب ۰/۹ متر ($D_{0.9L_{30}}$)، سیستم زهکشی با فاصله ۳۰ متر و عمق نصب ۰/۶۵ متر ($D_{0.65L_{30}}$) و سیستم زهکشی با فاصله ۱۵ متر و عمق نصب ۰/۶۵ متر ($D_{0.65L_{15}}$) می‌باشد (D و L به ترتیب معرف عمق و فاصله زهکش بر حسب متر می‌باشند). مشخصات این سیستم‌های زهکشی در تحقیقات درزی نفت‌چالی و همکاران [۳۹ و ۴۰] ارایه شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی، ۵۳/۰۴ درجه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا، ۱۵- متر می‌باشد. موقعیت این منطقه در کشور و استان در شکل ۱ نشان داده شد.



شکل ۱- موقعیت پایلوت زهکشی اراضی شالیزاری

میانگین بلند مدت بارندگی و دما در منطقه مطالعه به ترتیب ۶۱۶ میلی‌متر و ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد و حداقل و حداکثر دمای مطلق هوا به ترتیب ۶- و ۳۸/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برخی از خصوصیات اقلیمی مربوط به فصول مختلف کشت در جدول ۱ ارایه شد.



جدول ۱- دمای حداقل و حداکثر، مجموع بارندگی و تبخیر در فصول مختلف کشت برنج

فصل کشت	بارندگی (mm)	حداقل دما (°C)	حداکثر دما (°C)	میانگین دما (°C)	تبخیر از تشتک (mm)
۱۳۹۰	۱۳۶/۶	۱۰	۳۷/۴	۲۵/۳	۴۰۱/۶
۱۳۹۱	۷۳/۷	۱۷	۳۵/۳	۲۵/۱	۵۳۵/۲
۱۳۹۳	۸۶/۴	۱۵/۴	۳۵	۲۶/۲	۵۱۱
۱۳۹۴	۸۸/۶	۱۷/۳	۳۷	۲۷/۳	۵۰۲/۵

عملیات زراعی و مدیریتی

در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱، از ۲۵ روز پس از نشاکاری به مدت یک هفته شرایط زهکشی آزاد در تیمارهای مختلف فراهم شد (زهکشی میان فصل، MSD). در دوره زهکشی، عمق سطح ایستابی در چاهک مشاهده‌ای واقع در نقطه میانی فاصله بین دو زهکش در تیمارهای مختلف، به صورت روزانه اندازه‌گیری شد [۴۱]. طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴، آبیاری و زهکشی متناوب (AWD) به اجرا درآمد. برای اعمال AWD، در دو زمان مختلف قبل از گلدهی (۲۵ و ۴۳ روز پس از نشاکاری به ترتیب در دو دوره ۱۰ و ۵ روزه) و حدود دو هفته قبل از برداشت (۶۴ روز پس از نشاکاری تا زمان برداشت)، شرایط زهکشی آزاد فراهم شد [۴۱].

محاسبه ردپای آب خاکستری

ردپای آب خاکستری (GWF) برای آلودگی ناشی از ورود نیتروژن به منابع آب پیرامون محاسبه شد. این شاخص، از تقسیم بار آلاینده بر تفاضل بین استاندارد کیفیت آب موجود در محیط پیرامون برای آن آلاینده از مقدار غلظت طبیعی آن آلاینده در سیستم آبی که آلودگی به آن وارد می‌شود به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$GWF (m^3t^{-1}) = \frac{aAR}{Y(C_{max} - C_{nat})} \quad (1)$$

که در آن؛ GWF ردپای آب خاکستری بر حسب متر مکعب در هر تن، aAR مجموع نیتروژن دفع شده به منابع آب پیرامون (کیلوگرم بر هکتار)، Y عملکرد محصول (تن بر هکتار)، C_{max} حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب پیرامون (کیلوگرم بر هکتار) و C_{nat} غلظت طبیعی نیتروژن در منابع آب پیرامون (کیلوگرم بر هکتار) می‌باشد. مقدار C_{max} بر اساس پیشنهاد لیو و همکاران [۴۲] برابر با سه میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد که این مقدار، با عددی که توسط شورای وزیران محیط‌زیست کانادا برای حداکثر غلظت نیتروژن در منابع آب شیرین با هدف حفاظت از سلامت آبخوان‌ها ارایه شد، مطابقت دارد. مقدار C_{nat} برابر با ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد [۴۲ و ۴۳]. برای تخمین مجموع بار آلودگی دفع‌شده به منابع آب پیرامون (aAR) که بر حسب کیلوگرم بر هکتار در رابطه ۱ وارد شد، از سه روش به شرح ذیل استفاده شد:



- در روش اول، غلظت نیترات زه‌آب اندازه‌گیری شد و مقدار معادل نیتروژن آن به عنوان **aAR** به صورت مستقیم در رابطه ۱ استفاده شد.
- در روش دوم، غلظت نیترات زه‌آب تحت سیستم‌های مختلف زهکشی با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد و مقادیر نیتروژن معادل آن به عنوان **aAR** به صورت مستقیم وارد رابطه ۱ شد.
- در روش سوم، با فرض در دسترس نبودن مقادیر مشاهده‌ای یا شبیه‌سازی شده‌ی **aAR**، این مقدار از روش درختی سطح یک محاسبه شد. برای این منظور، درصدی (**a**) از کل شدت کوددهی نیتروژن (**AR**) به عنوان مقداری از نیتروژن که پتانسیل دفع به منابع آب پیرامون را دارد در نظر گرفته شد و به عنوان **aAR** در رابطه ۱ وارد شد. فرانک و همکاران [۴۴] در تدوین گزارش مربوط به ارزیابی آب خاکستری با روش درختی سطح یک، مقدار ۱۰ درصد را برای **a** پیشنهاد نمودند و پس از آن، محققان بسیاری از این عدد در محاسبات خود استفاده کردند [۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹ و ۵۰]. به همین دلیل، در پژوهش حاضر نیز مقدار **a** معادل ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در دانشگاه کالیفرنیا طراحی شد [۵۱]. HYDRUS-2D یکی از مدل‌های توانا در شبیه‌سازی انتقال آب، گرما و املاح در خاک می‌باشد که شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است [۵۲]. اطلاعات تکمیلی در مورد مدل HYDRUS-2D و معادلات آن را می‌توان در سیمونک و همکاران [۳۳ و ۵۳] یافت. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شامل داده‌های هواشناسی، بافت لایه‌های خاک و ویژگی‌های محصول است. نمایش دقیق بارش نقش مهمی در تجزیه و تحلیل شاخص GWF ایفا می‌کند [۴۴ و ۵۴] لذا در این مطالعه، داده‌های هواشناسی روزانه در ایستگاه هواشناسی نزدیک مزرعه آزمایشی جمع‌آوری شد. در ابتدا و انتهای فصل کشت، نمونه‌های خاک، از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری برداشت شد. در مدت زهکشی، دبی خروجی از زهکش‌ها به صورت دستی و با استفاده از ظرف مدرج و زمان‌سنج در محل تخلیه زه‌آب زهکش‌ها به درون نهر جمع‌کننده، اندازه‌گیری شد. هم‌زمان از زه‌آب زهکش‌ها نمونه‌برداری و غلظت نیترات این نمونه‌ها تعیین شد. شبیه‌سازی مدل به دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم شد. در بخش واسنجی، ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای (داده‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۰)، مدل را با شرایط آزمایش واسنجی کرده و برخی خصوصیات شیمیایی خاک به روش حل معکوس به دست آمد و در انتها در بخش صحت‌سنجی (داده‌های سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۱)، دقت مدل ارزیابی شد.

شاخص‌های معیار

عملکرد مدل HYDRUS-2D با استفاده از شاخص معیار خطای نسبی (RE) ارزیابی شد. همچنین، از معیار خطای نسبی برای مقایسه‌ی میزان خطای تخمین در روش‌های مختلف برآورد ردپای آب خاکستری استفاده شد. این خطا در مقایسه با مقادیر بدست آمده در روش مستقیم و مبتنی بر داده‌های مشاهده‌ای (روش اول) محاسبه شد. این شاخص به صورت ذیل محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$RE = \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (2)$$

که در آن؛ P_i و O_i به ترتیب داده‌های پیش‌بینی و مشاهده شده هستند.



نتایج و بحث

جدول ۲ مقادیر کوددهی، عملکرد دانه، جذب و تلفات واقعی و شبیه‌سازی شده نیتروژن در سیستم‌های مختلف زهکشی تحت مدیریت MSD را نشان می‌دهد. میزان جذب واقعی نیتروژن در فصول ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ به ترتیب بین ۱۳۴/۸-۱۵۱/۳ و ۱۱۵/۲-۱۳۵/۰ کیلوگرم بر هکتار بود. این درحالیست که مدل این میزان را کمی کمتر (به ترتیب برابر ۱۲۸-۱۴۲ و ۱۰۵-۱۲۸ کیلوگرم بر هکتار) برآورد کرد. کمترین و بیشترین مقدار جذب نیتروژن واقعی و شبیه‌سازی شده به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی $D_{0.65}L_{30}$ و $D_{0.9}L_{30}$ بود. تلفات واقعی نیتروژن طی دو سال مدیریت MSD به ترتیب بین ۰/۱۰-۰/۷۵ و ۰/۵-۲/۵۸ کیلوگرم بر هکتار بود. مدل مقادیر تلفات نیتروژن را در مقایسه با مقادیر واقعی کمی بیشتر تخمین زد که این مقادیر بین ۰/۱۱-۰/۸ و ۰/۵۳-۲/۷۸ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده در سیستم‌های زهکشی $D_{0.65}L_{30}$ ، $D_{0.9}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{15}$ در سال اول به ترتیب برابر ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ و در سال دوم برابر ۰/۰۵، ۰/۰۳ و ۰/۲۰ بود. کمترین و بیشترین مقدار تلفات نیتروژن واقعی و شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۰ به ترتیب متعلق به سیستم‌های زهکشی $D_{0.9}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{15}$ و در سال ۱۳۹۱ مربوط به سیستم‌های زهکشی $D_{0.65}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{15}$ بود. در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱، مقادیر خطای نسبی مطلق برای میزان جذب نیتروژن به ترتیب بین ۵/۰-۱۰/۵ درصد و ۵/۲-۸/۸ درصد و خطای نسبی مطلق مربوطه به ترتیب از ۷/۹-۱۱/۹ درصد و ۷/۰-۸/۲ درصد متغیر بود. کمترین و بیشترین مقدار خطای شبیه‌سازی جذب نیتروژن در سال اول به ترتیب برای سیستم‌های زهکشی $D_{0.65}L_{30}$ و $D_{0.9}L_{30}$ و در سال دوم به ترتیب برای سیستم‌های زهکشی $D_{0.9}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{30}$ بدست آمد. میزان این خطا برای تلفات نیتروژن عکس روند جذب بود و در سال اول به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی $D_{0.65}L_{30}$ و $D_{0.9}L_{30}$ و در سال دوم به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی $D_{0.9}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{30}$ بود. یانگ و همکاران [۵۵] برای انتقال املاح مقدار RE را با مدل HYDRUS-2D ۰/۴۰ درصد گزارش کردند. RE ها در مطالعه حاضر در محدوده موارد گزارش شده توسط کاراندیش و سیمونک [۱۱] بودند (۱۲-۳/۵ درصد). در مجموع، مدل HYDRUS-2D از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی جذب و تلفات نیتروژن تحت سیستم‌های زهکشی مختلف برخوردار بود.

جدول ۲- میزان کوددهی، عملکرد و میزان جذب و تلفات نیتروژن واقعی و شبیه‌سازی شده تحت مدیریت MSD

سال	عملیات	سیستم زهکشی	مشاهد ه شده	شبیه‌سازی شده	RE (%)
۱۳۹۰	کوددهی (کیلوگرم بر هکتار)	$D_{0.9}L_{30}$	۴۱/۴	-	-
		$D_{0.65}L_{30}$	۴۱/۴	-	-
		$D_{0.65}L_{15}$	۴۱/۴	-	-
	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	$D_{0.9}L_{30}$	۳۸۹۱/۷	-	-
		$D_{0.65}L_{30}$	۳۵۱۵/۵	-	-
		$D_{0.65}L_{15}$	۳۰۰۸/۳	-	-
	جذب نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	$D_{0.9}L_{30}$	۱۴۵/۲	۱۳۰	-۱۰/۵
		$D_{0.65}L_{30}$	۱۳۴/۸	۱۲۸	-۵/۰
		$D_{0.65}L_{15}$	۱۵۱/۳	۱۴۲	-۶/۱



۱۳۹۱	تلفات نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{0.9} L ₃₀	۰/۱۰	۰/۱۱	۷/۹
		D _{0.65} L ₃₀	۰/۲۴	۰/۲۷	۱۱/۹
		D _{0.65} L ₁₅	۰/۷۵	۰/۸	۸/۵
	کوددهی (کیلوگرم بر هکتار)	D _{0.9} L ₃₀	۴۱/۴	-	-
		D _{0.65} L ₃₀	۴۱/۴	-	-
		D _{0.65} L ₁₅	۴۱/۴	-	-
	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	D _{0.9} L ₃₀	۳۹۳۷/۹	-	-
		D _{0.65} L ₃₀	۳۷۱۵/۴	-	-
		D _{0.65} L ₁₅	۳۲۷۱/۷	-	-
	جذب نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{0.9} L ₃₀	۱۳۵/۰	۱۲۸	-۵/۲
		D _{0.65} L ₃₀	۱۱۵/۲	۱۰۵	-۸/۸
		D _{0.65} L ₁₅	۱۲۱/۱	۱۱۳	-۶/۷
	تلفات نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{0.9} L ₃₀	۰/۶۴	۰/۶۹	۸/۲
		D _{0.65} L ₃₀	۰/۵۰	۰/۵۳	۷/۰
		D _{0.65} L ₁₅	۲/۵۸	۲/۷۸	۷/۸

جدول ۳ میزان کوددهی، عملکرد دانه و میزان جذب و تلفات واقعی و شبیه‌سازی شده نیتروژن در سیستم‌های مختلف زهکشی تحت مدیریت AWD را نشان می‌دهد. میزان جذب واقعی نیتروژن در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب بین ۱۷۱-۱۱۹ و ۱۳۵-۹۱ کیلوگرم بر هکتار بود. همانند مدیریت MSD مدل این میزان را کمی کمتر و به ترتیب برابر ۱۱۲-۱۶۵ و ۱۴۹-۹۸ کیلوگرم بر هکتار برآورد کرد. کمترین و بیشترین مقدار جذب نیتروژن واقعی و شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۳ به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₁₅ و در سال ۱۳۹۴ به ترتیب برای سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₃₀ مشاهده شد. تلفات واقعی نیتروژن طی دو سال مدیریت AWD به ترتیب بین ۱۷-۱۲ و ۱۳۹۴ کیلوگرم بر هکتار بود. در مقایسه با مقادیر واقعی، مدل مقادیر تلفات نیتروژن را در سال ۱۳۹۳ کمی بیشتر و در سال ۱۳۹۴ کمی کمتر تخمین زد که این مقادیر به ترتیب بین ۱۹/۲-۱۶/۹ و ۱۱/۲-۶/۹ کیلوگرم بر هکتار بدست آمد. اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده تلفات نیتروژن در سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀، D_{0.65}L₃₀ و D_{0.65}L₁₅ در سال اول به ترتیب برابر ۱/۱۲، ۱/۲۹ و ۱/۲۸ و در سال دوم برابر ۰/۳۶، ۰/۷۴ و ۱/۱۶ بود. کمترین و بیشترین مقدار تلفات واقعی و شبیه‌سازی شده نیتروژن در سال ۱۳۹۳ به ترتیب متعلق به سیستم‌های زهکشی D_{0.65}L₁₅ و D_{0.65}L₃₀ و در سال ۱۳۹۴ مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₃₀ بود. مقادیر خطای نسبی شبیه‌سازی جذب نیتروژن بین ۳/۲-۵/۶ درصد و ۸/۱-۱۰/۵ درصد و برای تلفات نیتروژن از ۶/۷-۸/۲ درصد و ۵/۰-۹/۴ درصد در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ متغیر بود. کمترین و بیشترین مقدار خطای شبیه‌سازی جذب نیتروژن در سال اول و دوم به ترتیب برای سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₃₀ بود. کمترین و بیشترین مقدار خطای شبیه‌سازی تلفات نیتروژن نیز در سال اول به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₃₀ و در سال دوم به ترتیب مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.65}L₁₅ و D_{0.9}L₃₀ بود. با توجه به نتایج جدول، پارامترها و مدل HYDRUS-2D عملکرد خوبی داشتند.

جدول ۳- میزان کوددهی، عملکرد و میزان جذب و تلفات نیتروژن واقعی و شبیه‌سازی شده تحت مدیریت AWD

سال	عملیات	سیستم	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	RE (%)
-----	--------	-------	------------	---------------	--------



		زهکشی			
۱۳۹۳	کوددهی (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۸۷	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۸۷	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۸۷	-	-
	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۴۲۶۰	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۴۶۲۷	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۵۰۲۷	-	-
	جذب نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۱۱۹	۱۱۲	-۵/۶
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۱۶۶	۱۵۹	-۴/۰
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۱۷۱	۱۶۵	-۳/۲
	تلفات نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۱۷	۱۷/۷	۶/۷
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۱۶	۱۶/۹	۸/۲
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۱۸	۱۹/۲	۷/۱
۱۳۹۴	کوددهی (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۶۹	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۶۹	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۶۹	-	-
	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۴۰۴۰	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۴۹۷۰	-	-
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۴۸۶۳	-	-
	جذب نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۹۱	۹۸	۸/۱
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۱۳۵	۱۴۹	۱۰/۵
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۹۱	۱۰۰	۹/۹
	تلفات نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	D _{۰.۹} L _{۳۰}	۷	۶/۹	-۵/۰
		D _{۰.۶۵} L _{۳۰}	۱۱	۹/۹	-۷/۰
		D _{۰.۶۵} L _{۱۵}	۱۲	۱۱/۲	-۹/۴

مقادیر GWF حاصله از روش‌های تخمین میدانی، درختی سطح یک و شبیه‌سازی با HYDRUS-2D در جدول ۴ ارائه شد. در روش تخمین میدانی، مقادیر GWF از ۱۷ تا ۲۵۹۵ مترمکعب بر تن متغیر بود. در مدیریت MSD کمترین و بیشترین مقدار GWF مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₁₅ به ترتیب برابر ۱۷ و ۵۲۵ متر مکعب بر تن و در مدیریت AWD کمترین و بیشترین مقدار آن مربوط به سیستم زهکشی D_{0.9}L₃₀ به ترتیب برابر ۱۱۹۲ و ۲۵۹۵ متر مکعب بر تن بود. در روش درختی سطح یک، میزان GWF در محدوده ۱۳۶۸ - ۷۰۱ مترمکعب بر تن بدست آمد. در مدیریت MSD کمترین و بیشترین مقدار GWF مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₁₅ به ترتیب برابر ۷۰۱ و ۹۱۷ متر مکعب بر تن و در مدیریت AWD کمترین و بیشترین این مقدار متعلق به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₃₀ به ترتیب برابر ۹۲۶ و ۱۳۶۸ متر مکعب بر تن بود. همچنین، در روش شبیه‌سازی به کمک مدل HYDRUS-2D مقادیر GWF از ۱۹ تا ۲۷۷۰ مترمکعب بر تن متغیر بود. کمترین و بیشترین مقدار GWF در مدیریت MSD مربوط به سیستم‌های زهکشی D_{0.9}L₃₀ و D_{0.65}L₁₅ به ترتیب برابر ۱۹ و ۵۶۶ متر مکعب بر تن و در



مدیریت AWD کمترین و بیشترین این مقدار برای سیستم زهکشی D0.9L30 به ترتیب برابر ۱۱۳۲ و ۲۷۷۰ متر مکعب بر تن بود.

مقایسه‌ی دو مدیریت MSD و AWD نشان می‌دهد روش درختی سطح یک، در مدیریت MSD ۳۸-۹۸ درصد مقادیر تخمین میدانی و در مدیریت AWD ۵-۱۰۵ درصد مقادیر تخمین میدانی بود. در روش شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D نیز مدیریت MSD ۷-۱۱ درصد مقادیر تخمین میدانی و در مدیریت AWD ۵-۱۰ درصد مقادیر تخمین میدانی بود. در تمامی روش‌ها، میزان GWF در مدیریت AWD بیشتر از مقدار آن در مدیریت MSD بود که دلیل اصلی آن افزایش تلفات نیتروژن در مدیریت AWD بود.

خطای نسبی در روش درختی سطح یک در محدوده ۳۹۶۱-۴ درصد متغیر بود که کمترین و بیشترین این مقدار در مدیریت MSD به ترتیب برابر ۶۱ و ۳۹۶۱ درصد مربوط به سیستم‌های زهکشی D0.65L15 و D0.9L30 و در مدیریت AWD این میزان به ترتیب برابر ۴ و ۵۱ درصد و متعلق به سیستم‌های زهکشی D0.65L15 و D0.9L30 بود. خطای نسبی روش شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D بین ۱۲-۵ درصد متغیر بود که کمترین و بیشترین آن برای مدیریت MSD به ترتیب برابر ۷ و ۱۲ درصد مربوط به سیستم زهکشی D0.65L30 و در مدیریت AWD به ترتیب برابر ۵ و ۹ درصد مربوط به سیستم‌های زهکشی D0.65L15 و D0.9L30 بود. روش شبیه‌سازی با مقدار متوسط خطای نسبی ۷/۹ درصد در مقایسه با روش درختی سطح یک با مقدار متوسط خطای نسبی ۶۳۳ درصد دقت بیشتری در برآورد GWF داشت. با توجه به نتایج برآزش مدل و اختلاف کمتر اعداد بدست آمده در نتایج شبیه‌سازی با مبنای مطالعه می‌توان اذعان داشت مدل HYDRUS2D توصیف قابل اعتمادتری نسبت به روش درختی سطح یک، از شاخص GWF در سیستم‌های زهکشی ارائه کرد.

مطالعات پیشین مقادیر متفاوتی از مقدار GWF محصول برنج گزارش نمودند: در پژوهشی سینگ هوان و همکاران [۱۰] میزان GWF برنج طی ۵ سال را در کشور کره جنوبی ۴۸/۴ مترمکعب بر تن گزارش نمودند. بولسینک و همکاران [۵۶] ردپای GWF مربوط به مصرف محصولات زراعی در کشور اندونزی را ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعه آن‌ها، گیاه برنج با ۲۱۲ مترمکعب بر تن GWF به دلیل مقدار نسبتاً زیاد کود مصرفی، بیشترین جزء خاکستری را دارد که نتایج این پژوهش‌ها با نتایج بدست آمده از روش‌های تخمین میدانی و شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D در مدیریت MSD مطابقت دارد. همچنین، زینچان و همکاران [۱۹] طی مطالعه‌ای بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی مقدار GWF محصول برنج آبی را طی ۳ سال در کشور چین برآورد نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد مقدار ۰.۰۰۰۷ مترمکعب بر تن از کل ردپای آب مربوط به GWF است که نسبت به پژوهش حاضر مقدار GWF را بسیار کمتر تخمین زدند. در بین پژوهش‌های داخلی، اشک تراب و زیبایی [۵۷] مقدار GWF چند محصول از جمله برنج بصورت زراعت آبی را در استان فارس برآورد نمودند. آن‌ها مقدار GWF برنج را ۴۰۰۰ مترمکعب بر تن بدست آوردند که نسبت به پژوهش حاضر مقدار GWF را کمی بیشتر تخمین زدند. نتایج گزارشات مطالعات پیشین حاکی از دامنه وسیع GWF می‌باشد. تفاوت‌های منطقه‌ای در میزان GWF محصولات در برخی موارد نسبتاً زیاد است. این تفاوت‌ها عمدتاً بدلیل تفاوت در شرایط آب و هوایی، مدیریت آب، مدیریت مزرعه، دوره رشد محصول، میزان و نوع کود مصرفی (کودهای زیستی و آلی یا کودهای شیمیایی) و شرایط خاک می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر ردپای آب خاکستری برای تیمارهای مورد مطالعه طی چهار فصل زراعی

سال	سیستم زهکشی	ردپای آب خاکستری (مترمکعب بر تن)			RE (%)	RE (%)
		تخمین میدانی	درختی سطح یک	شبیه‌سازی	(تخمین میدانی و درختی سطح یک)	(تخمین میدانی و شبیه‌سازی)



	D..۹L۳۰	۱۷	۷۰۹	۱۹	۳۹۶۱	۸
۱۳۹۰	D..۶۵L۳۰	۴۶	۷۸۵	۵۱	۱۶۱۶	۱۲
	D..۶۵L۱۵	۱۶۵	۹۱۷	۱۸۰	۴۵۵	۸
	D..۹L۳۰	۱۰۸	۷۰۱	۱۱۷	۵۴۹	۸
۱۳۹۱	D..۶۵L۳۰	۸۹	۷۴۳	۹۵	۷۳۶	۷
	D..۶۵L۱۵	۵۲۵	۸۴۴	۵۶۶	۶۱	۸
	D..۹L۳۰	۲۵۹۵	۱۳۶۸	۲۷۷۰	-۴۷	۷
۱۳۹۳	D..۶۵L۳۰	۲۲۵۰	۱۲۵۹	۲۴۳۵	-۴۴	۸
	D..۶۵L۱۵	۲۳۷۷	۱۱۵۹	۲۵۴۶	-۵۱	۷
	D..۹L۳۰	۱۱۹۲	۱۱۳۹	۱۱۳۲	-۴	-۵
۱۳۹۴	D..۶۵L۳۰	۱۴۲۲	۹۲۶	۱۳۲۳	-۳۵	-۷
	D..۶۵L۱۵	۱۶۹۴	۹۴۶	۱۵۳۵	-۴۴	-۹

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای یک دوره چهار ساله در اراضی شالیزاری دارای سیستم‌های مختلف زهکشی، شاخص GWF با روش‌های تخمین میدانی، درختی سطح یک و شبیه‌سازی به کمک مدل HYDRUS-2D محاسبه شد. میزان GWF در روش‌های تخمین میدانی، درختی سطح یک و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D به ترتیب در محدوده ۱۷-۲۵۹۵ متر مکعب بر تن، ۷۰۱-۱۳۶۸ مترمکعب بر تن و ۱۹-۲۷۷۰ متر مکعب بر تن متغیر بودند. روش شبیه‌سازی با ۷/۹ درصد خطا نسبت به روش درختی سطح یک با ۶۳۳ درصد خطا دقت بالاتری برای برآورد GWF داشت. همچنین، مقادیر GWF در مدیریت MSD نسبت به مدیریت AWD کمتر بود. اگرچه تولید برنج به اصطلاح منبع انتشار آلودگی است و از این رو کاهش آن دشوار است اما یافته‌های تحقیقاتی کافی وجود دارد که نشان می‌دهد اقداماتی نظیر استفاده از کودهای زیستی و آلی جایگزین کودهای شیمیایی نه تنها سبب کاهش GWF می‌شود، بلکه آلودگی آب و خاک ناشی از آن را نیز کاهش می‌دهد.

منابع مورد استفاده:

- Xia, J., Zhai, J.L. and Zhan, C.S. (2011). Some reflections on the research and development of water resources in China. *Adv. Earth Sci*, 26, 905-915.
- Kang S, Hao X, Du T, Tong L, Su X, Lu H, Li X, Huo Z, Li S, Ding R. (2017). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice. *Agric Water Manag.* 179:5-17. doi:10.1016/j.agwat.2016.05.007.
- Muluneh A, Stroosnijder L, Keesstra S, Biazin B. (2017). Adapting to climate change for food security in the Rift Valley dry lands of Ethiopia: supplemental irrigation, plant density and sowing date. *J Agric Sci.* 155(5):703-724. doi:10.1017/S0021859616000897.
- Zhang, C., McBean, E.A., and Huang, J. (2014). A Virtual Water Assessment Methodology for Cropping Pattern Investigation *Water Resour Manage* 28:2331-2349.
- van Oel, P. R. & Hoekstra, A. Y. (2012). Towards Quantification of the Water Footprint of Paper: A First Estimate of its Consumptive Component. *Water Resour Manage.* 26:733-749.



6. Ridoutt, B.G., and Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change* 20: 113-120.
۷. رضانی اعتدالی، ه. و آبابایی، ب. (۱۳۹۵). برآورد اجزاء ردپای آب مجازی در تولید جو در مقیاس ملی و استانی. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۰ (۳): ۴۳۲-۴۴۳.
8. Karandish, F., Hoekstra, A.Y., (2017). Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. *Water* 9 (11), 25. <https://doi.org/10.3390/w9110831>. 831.
۹. وزارت جهاد کشاورزی، (۱۴۰۰). آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸. جلد اول: محصولات زراعی. ۹۷ ص.
10. Seung-Hwan Yoo, Jin-Yong Choi, Sang-Hyun Lee, Taegon Kim. (2014). Estimating water footprint of paddy rice in Korea. *Paddy Water Environ*, 12:43-54. DOI 10.1007/s10333-013-0358-2.
11. Karandish, F and Simunek, J. (2019). A comparison of the HYDRUS (2D/3D) and SALTMED models to investigate the influence of various water-saving irrigation strategies on the maize water footprint. *Agricultural Water Management*, 213: 809-820.
12. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: a first global assessment. *Ecological Indicators*. 46: 214-23.
13. Brauman, K.A., Siebert, S., Foley, J.A., (2013). Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security: a global analysis. *Environ. Res. Lett.* 8 024030, 2013.
14. Yang, M., Xiao, W., Zhao, Y., (2018). Assessment of potential climate change effects on the Rice yield and water footprint in the Nanliujiang. *Sustain* 10, 1-19. <https://doi.org/10.3390/su10020242>.
15. Madugundu, R., Al-Gaadi, K.A., Tola, E.K., Hassaballa, A.A., Kayad, A.G., (2018). Utilization of Landsat-8 data for the estimation of carrot and maize crop water footprint under the arid climate of Saudi Arabia. *PLoS One* 13, 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192830>.
16. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London, UK.
17. Symeonidou, S., Vagiona, D., (2019). Water footprint of crops on Rhodes Island. *Water (Switzerland)* 11.
۱۸. کاراندیش، ف.، اسماعیلی ساری، ع و درزی، ع. (۱۳۹۹). کتاب راهنمای ارزیابی ردپای آب: تدوین استاندارد جهانی. ۲۳۰ ص.
19. Xinchun, C., Mengyang, W., Rui, S., La, Z., Dan, C., Guangcheng, S., Xiangping, G., Weiguang, W., Shuhai, T., (2018). Water footprint assessment for crop production based on field measurements: a case study of irrigated paddy rice in East China. *Sci. Total Environ.* 610-611, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.011>.
20. Roberto P. Maranoa, Rocío A. Filippi. (2015). Water Footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Ríos, Argentina. *Ecological Indicators* 56 : 229-236.
21. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics* 70 (2011) 749-758.
22. Zhao, X., Liao, X., Chen, B., Tillotson, M.R., Guo, W., Li, Y., (2019). Accounting global grey water footprint from both consumption and production perspectives. *J. Clean. Prod.* 225, 963-971. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.037>.
23. Liu, W., Antonelli, M., Liu, X., Yang, H., (2017). Towards improvement of grey water footprint assessment: with an illustration for global maize cultivation. *J. Clean. Prod.* 147, 1-9. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.01.072>.
24. Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M., (2012). The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 3232-3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.



25. Li, H., Liu, G., Yang, Z., (2019). Improved graywater footprint calculation method based on a mass-balance model and on fuzzy synthetic evaluation. *J. Clean. Prod.* 219, 377–390. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.080>.
26. Qin, X.H., Sun, C.Z., Han, Q., Zou, W., (2019). Grey water footprint assessment from the perspective of water pollution sources: a case study of China. *Water Resour.* 46 (3), 454–465.
27. Zhang, L., Dong, H.J., Geng, Y., Francisco, M.J., (2019). China's provincial grey water footprint characteristic and driving forces. *Sci. Total Environ.* 677, 427–435.
28. Li, H.Y., Wang, Y.F., Qin, L.J., He, H.S., Zhang, T.Y., Wang, J.Q., Zheng, X.X., (2020). Effects of different slopes and fertilizer types on the grey water footprint of maize production in the black soil region of China. *J. Clean. Prod.* 246 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119077>.
29. Yang, T., Liu, X., Wang, L., Bai, P., Li, J., (2020). Simulating hydropower discharge using multiple decision tree methods and a dynamical model merging technique. *J. Water Resour. Plann. Manag.* 146 (2), 04019072.
30. Cai, B., Liu, B., Zhang, B., 2019. Evolution of Chinese urban household's water footprint. *J. Clean. Prod.* 208, 1–10.
31. Liao, X., Chai, L., Xu, X., Lu, Q., Ji, J., (2019). Grey water footprint and interprovincial virtual grey water transfers for China's final electricity demands. *J. Clean. Prod.* 227, 111–118. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.179>.
32. Xu, Z.C., Chen, X.Z., Wu, S.R., Gong, M.M., Du, Y.Y., Wang, J.Y., Li, Y.K., Liu, J.G., (2019b). Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region. *J. Clean. Prod.* 224, 375–383.
33. Simunek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M., (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone J.* 7 (2), 587–600.
34. Simunek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M., (2016). Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone J.* 15(7), 25.
35. Karandish, F., Šimůnek, J., (2016a). A field-modeling study for assessing temporal variations of soil-water-crop interactions under water-saving irrigation strategies. *Agr. Water Manage* 178, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.009>.
36. Karandish, F., Šimůnek, J., (2016b). Numerical and machine-learning modeling of soil water content for sustainable water management in agriculture under water stress. *J.*
37. Karandish, F and Simunek, J. (2018). An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS. *Agricultural water management*. 208:67-82.
38. Darzi-Naftchali, A., Karandish, F and Simunek, J. (2018). Numerical modeling of soil water dynamics in subsurface drain paddies with midseason drainage or alternate wetting and drying management. *Agricultural Water Management*. 197: 67-78.
۳۹. درزی ع، میر لطفی س.م، شاهنظری ع، اجلالی ف. و مهدیان م.ح. (۱۳۹۱). تاثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج در اراضی شالیزاری. *مجله پژوهش‌های آب در کشاورزی*، ج ۲۶ (۱): ۶۱-۷۰.
۴۰. درزی ع، میر لطفی س.م، شاهنظری ع، اجلالی ف و مهدیان م.ح. (۱۳۹۲). تاثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر تلفات نیتروژن از اراضی شالیزاری در فصل کشت برنج. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۳ (۲۷): ۳۰۵-۲۹۴.
۴۱. درزی نفت‌چالی. (۱۳۹۵). تحلیل تاثیر مدیریت زهکشی بر شوری زه‌آب در تناوب کشت برنج- کلزا. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۰ (۴): ۵۲۰-۵۳۱.
42. Liu C, Kroeze C, Hoekstra AY, Gerbens-Leenes W (2012) Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecol Ind* 18(0):42–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoli.2011.10.005>.



43. Karandish, F. (2019). Applying grey water footprint assessment to achieve environmental sustainability within a nation under intensive agriculture: a high-resolution assessment for common agrochemicals and crops. *Environmental Earth Sciences* (2019) 78:200.
44. Franke, N., Boyacioglu, H., Hoekstra, A.Y., (2013). Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delfth, The Netherlands.
45. Zhuo, L., Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., (2016b). Benchmark levels for the consumptive water footprint of crop production for different environmental conditions: a case study for winter wheat in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 20 (11), 4547–4559.
46. Shrestha S, Pandey VP, Chanamai C, Ghosh DK (2013) Green, blue and grey water footprints of primary crops production in Nepal. *Water Resour Manag* 27:5223–5243.
47. Ericin AE, Aldaya MM, Hoekstra AY (2011) Corporate water footprint accounting and impact assessment: the case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage. *Water Resour Manag* 25:721–741.
48. Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2010a), The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products Rep. 47, UNESCO-IHE, Delft.
49. Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2010b), The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products Rep. 48, UNESCO-IHE, Delft.
50. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., (2009). Water footprint manual: state of the art 2009. Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.
51. Šimůnek J, Van Genuchten MT, Šejna M (2006) The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *Techn Manual Ver 1:241*.
۵۲. مرادی کشکولی، م.، هاشمی، س. ر.، خاشعی سیوکی، ع. و شهیدی، ع. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح در خاک با استفاده از مدل هایدروس جهت تعیین عمق بهینه کارگذاری قطره‌چکان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (۱۰): ۹۴-۱۰۳.
53. Simunek, J., Sejna, M., and Van genuchten, M.Th. (1999). The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably-saturated media. International groundwater modeling center. Colorado School of Mines Golden, Co 80401 .
54. Zhang, L.L., Zhang, R., Wang, Z.Z., Yang, F., (2020). Spatial heterogeneity of the impact factors on gray water footprint intensity in China. *Sustainability* 12 (3). <https://doi.org/10.3390/su12030865>.
55. Yang Rui, Tong Juxiu., Hu Bill X, Li Jiayun & Wei Wenshuo. (2017). Simulating water and nitrogen loss from an irrigated paddy field under continuously flooded condition with Hydrus-1D model. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI 10.1007/s11356-017-9142-y.
56. Bulsink, F., Hoekstra, A.Y., Booij, M.J., (2010). The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14:119–128. <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-6-5115-2009>.
۵۷. اشک تراب، ن و زیبایی، م. (۱۴۰۰). حسابداری ردپای آب محصولات زراعی اصلی در استان فارس. تحقیقات اقتصاد کشاورزی. ۳(۳۱): ۲۰۷-۲۳۴.