

## بررسی اثر بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک با روش‌های حل معکوس و پارامتریک در افزایش دقت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با مدل HYDRUS

سمانه اطمینان<sup>۱</sup>، وحیدرضا جلالی<sup>۲\*</sup>، مجید محمودآبادی<sup>۳</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۴</sup>، محسن پوررضا بیلندی<sup>۴</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷)

### چکیده

ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک زمین قرار گرفته است و از سوی دیگر به دلیل خشکسالی، تغییر اقلیم و سوءمدیریت با کاهش منابع آب شیرین مواجه می‌باشد. بنابراین لزوم افزایش بهره‌وری در مصرف آب امری کاملاً بدیهی و ضروری است. از روش‌های مدیریتی در راستای افزایش بهره‌وری از منابع آب می‌توان به روش‌های نوین آبیاری اشاره نمود. مدیریت و کاربرد این روش‌های نوین آبیاری نیز مستلزم مطالعه روند تغییرات رطوبت خاک و میزان قابل دسترسی آن برای گیاه می‌باشد. در این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی HYDRUS-1D در روش آبیاری سنتریپوت در مزرعه یونجه چهار ساله، به ارزیابی برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از روش حل معکوس نسبت به روش توابع پارامتریک در دو عمق متفاوت پرداخته شد. از این‌رو، در این تحقیق برای تعیین مقدار هر یک از پارامترهای هیدرولیکی خاک، از الگوریتم بهینه‌ساز مجموعه ذرات (PSO) به عنوان روش حل معکوس و سه تابع پارامتریک، Rosetta، قربانی و همایی و سپاس‌خواه و بندر استفاده شد. در ابتدا از بین سه تابع پارامتریک بهترین تابع انتخاب و در ادامه میزان کارایی روش حل معکوس نسبت به روش پارامتریک در فرآیند شبیه‌سازی جریان غیراشباع آب تحت مدل HYDRUS HYDRUS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر توانایی و کارایی قابل قبول الگوریتم PSO در برآورد منحنی رطوبتی خاک و پارامترهای هیدرولیکی آن بوده است. هم‌چنین با ارزیابی شاخص‌های آماری، نشان داده شد که طی لینک‌نمودن مدل HYDRUS HYDRUS با الگوریتم PSO، این مدل بهتر توانسته است روند تغییرات رطوبت خاک را برآورد نماید. بهترین عملکرد مدل در لایه سطحی با ضرایب  $R^2 = 0.98$  و  $d = 0.94$ ،  $\hat{E} = 0.89$  حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: حل معکوس، مدل HYDRUS، منحنی رطوبتی خاک

۱- اطمینان س.، جلالی و.، محمودآبادی م.، خاشعی سیوکی ع.، پوررضا بیلندی م. ۱۴۰۰. بررسی اثر بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک با روش‌های حل معکوس و پارامتریک در افزایش دقت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با مدل HYDRUS. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۹، شماره ۲. صفحه: ۱۵-۳۰.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

\*پست الکترونیک: [v.jalali@uk.ac.ir](mailto:v.jalali@uk.ac.ir)

## مقدمه

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین فاکتورهای چرخه آبی طبیعت بوده که به‌طور مستقیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و اقلیمی همانند تبخیر، تعرق از سطوح گیاهی و رواناب مؤثر است (Liu, 2010). هم‌چنین رطوبت خاک به‌طور غیرمستقیم از طریق رشد و نمو گیاه و فرآیند فتوسنتز بر چرخه کربن تأثیرگذار می‌باشد (Li *et al.*, 2015). از این‌رو، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی دقیق رطوبت خاک و بررسی تغییرات زمانی و مکانی آن در مطالعه مدل‌های هیدرولوژیکی، تغییر اقلیم، چرخه کربن، برآورد میزان رطوبت قابل دسترس خاک و هم‌چنین مدیریت منابع آب موجود با هدف حداکثر بهره‌وری برای تولید منابع غذایی مهم می‌باشد (Vereecken *et al.*, 2014). از روش‌های صحرائی مانند بلوک گچی و نوترون‌متر می‌توان برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده ریشه گیاه، تحت شرایط طبیعی و به‌صورت درجا استفاده نمود (Moradkhani, 2005). اگرچه این روش‌ها از نظر مفهوم ساده و کاربردی می‌باشند اما در مقابل وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند (Šimůnek *et al.*, 1999). از این‌رو روش‌های غیرمستقیمی از جمله روش‌های داده‌محور (شبکه عصبی و فازی)، توابع انتقالی و مدل‌های هیدرولوژیکی طی دهه‌های اخیر برای تخمین رطوبت خاک بکار گرفته شده‌اند. در سه دهه گذشته مدل‌های گوناگونی با هدف شبیه‌سازی و برآورد رطوبت خاک در سیستم‌های مختلف کشاورزی توسعه یافته‌اند. برخی از این مدل‌ها که بر پایه معادلات فیزیکی طراحی شده‌اند، ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب و خاک در جهات گوناگون می‌باشند. این مدل‌ها در دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: مدل‌های تعادل آب و خاک (Wessolek, 1989; Nishat *et al.*, 2007) و مدل‌های پویا که می‌توان به مدل SWAP (Van Dam *et al.*, 1997)، مدل SWAT (Neitsch *et al.*, 2005) و مدل HYDRUS (Šimůnek & Van Genuchten, 2008) اشاره نمود. مدل HYDRUS-1D یکی از پرکاربردترین مدل‌های عددی بر پایه معادله ریچاردز است (Šimůnek *et al.*, 2013) که طی چند دهه اخیر، به‌طور گسترده برای برآورد رطوبت خاک و

حرکت آب تحت شرایط گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است (Gabiri *et al.*, 2019).

در کاربرد مدل‌های پویای خاک به منظور مطالعه حرکت آب در خاک نیاز به تعیین برخی از پارامترهای فیزیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی، سرعت نفوذ آب در خاک و رطوبت اشباع خاک می‌باشد که برای تعیین این پارامترها نیز همانند رطوبت خاک از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی خاک نیازمند آزمایش‌هایی هستند تا شرایط ایستا و پایدار برقرار شود و هم‌چنین محدود به شرایط اولیه و مرزی می‌باشند (Van Dam *et al.*, 1994) برای رفع این محدودیت در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، می‌توان از روش‌های غیرمستقیمی چون توابع پارامتریک و حل معکوس بهره برد (Šimůnek & Van Genuchten, 1996). توابع پارامتریک برپایه ساختار فیزیکی، بر اساس روش رگرسیون و روش رگرسیون نقطه‌ای طراحی می‌شوند. از سوی دیگر این توابع برپایه اطلاعات مشخص و محدودی استخراج شده‌اند که این امر سبب افزایش عدم قطعیت توابع پارامتریک در شرایطی خارج از محدوده طراحی شده، می‌گردد (Kelishadi *et al.*, 2013). امروزه کاربرد روش‌های هوشمند و حل معکوس در فرآیندهای آب و خاک نسبت به توابع پارامتریک با توجه به ساختار محاسباتی آن‌ها از دقت و عملکرد بالایی برخوردارند (Saleh *et al.*, 2016).

روش حل معکوس امکان بهینه‌سازی پارامترهای مدل با تطبیق دادن داده‌های مشاهداتی با داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل را فراهم می‌سازد (Russo *et al.*, 1991; Vrugt *et al.*, 2008). لی و همکاران (Li *et al.*, 2018) از دو الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات<sup>1</sup> (PSO) و الگوریتم بردار شده ژنتیک<sup>2</sup> به منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک بهره بردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه بسیار نزدیک می‌باشد و هم‌چنین نمودار شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و منحنی رطوبتی خاک حاصل داده‌های شبیه‌سازی تطابق بالایی با نمودارهای حاصل از داده‌های اندازه‌گیری داشته است. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2016) طی ترکیب الگوریتم PSO با مدل SHAW

1. Particle Swarm Optimization (PSO)

2. Vector-Evaluated Genetic

نتایج تحقیق کویتینو دی اولیویرا و همکاران (Coutinho de Oliveira et al., 2020) نشان داد که کاربرد روش حل معکوس در برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن و گاردنر، سبب افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی فرآیند جریان آب در خاک می‌گردد. لیو و همکاران (Liu et al., 2020) با استفاده از روش حل معکوس به برآورد پارامترهای هیدرولیکی در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب در شرایط غیراشباع پرداختند. نتایج ایشان بیانگر کارایی روش‌های حل معکوس نسبت به روش‌های تجربی و آزمایشگاهی در تعیین مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک بوده است. نتایج تحقیقات لامیا و همکاران (Lamia et al., 2020) نیز نشان داد که کاربرد روش حل عددی در تعیین مقدار پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم عملکرد بهتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی در برآورد روند تغییرات فرآیندهای هیدرولیکی خاک دارد.

آزاد و همکاران (Azad et al., 2018) نیز با استفاده از الگوریتم PSO اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک نمودند. ایشان در این مطالعه توانایی و کارایی این الگوریتم در فرآیند شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت مدل HYDRUS HYDRUS را مورد ارزیابی قرار دادند. موسوی دهموردی و همکاران (Mousavi Dehmurdi et al., 2018) با بهینه‌سازی پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم با استفاده از روش حل معکوس در مدل HYDRUS به مقایسه عملکرد مدل‌های فیزیکی در زمینه بحث نفوذ تجمعی نسبت به روش استوانه دوگانه پرداختند. ایشان بیان نمودند روش حل معکوس سبب افزایش انعطاف‌پذیری مدل‌های فیزیکی نفوذپذیری خاک گردید. مشایخی و همکاران (Mashayekhi et al., 2016) نیز با کاربرد حل عددی معکوس مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک را تعیین نمودند. نتایج این تحقیق بیانگر کارایی بهتر روش حل معکوس نسبت به روش‌های آزمایشگاهی است. ایشان بیان نمودند که روش‌های حل معکوس یا روش‌های عددی علاوه بر ساده بودن و کاربرد سریع، سبب افزایش دقت در برآورد پارامترهای هیدرولیک خاک می‌گردد.

در بررسی مطالعات صورت گرفته و اکثر مقالات چاپ شده، عملکرد روش حل معکوس نسبت به شرایط کنترل شده آزمایشگاهی سنجیده شده است. در حالی که در این مطالعه

با هدف برآورد پارامترهای هیدرولیکی، پارامترهای پوشش گیاهی و دمای خاک استفاده نمودند. این الگوریتم بهینه‌ساز به خوبی توانست پارامترهای هیدرولیکی خاک را برای شبیه‌سازی رطوبت خاک برآورد نماید. هرچند که دمای خاک و شدت جریان گرما در خاک به خوبی شبیه‌سازی نشدند. مطالعه آبدلازیز و زامبران-بیگیرانی (Abdelaziz & Zambrano-Bigiarini, 2014) در بحث حرکت آب و املاح خاک نشان داد که لینک کردن الگوریتم PSO با مدل MODFLOW2005-MT3DMS ابزاری کارآمد در واسجی و اعتبارسنجی مدل در برآورد حرکت رطوبت خاک و میزان انتقال املاح خاک است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2009) به بررسی عملکرد پنج روش بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات، الگوریتم تکامل تصادفی جوامع، الگوریتم تکامل تفاضلی<sup>۲</sup> و سیستم ایمنی مصنوعی<sup>۳</sup>) پرداختند. نتایج ایشان بیانگر توانمندی الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات در کاربرد بهینه‌سازی پارامترها نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی در مدل‌های هیدرولوژیکی بوده است.

در ارتباط با رطوبت خاک علاوه بر اهمیت و نقش آن در کشاورزی و محیط زیست، نوع مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک از دیگر مسائل چالش‌برانگیز می‌باشد. با توجه به کاهش منابع آب شیرین ارائه راهکاری با هدف افزایش راندمان مصرف آب برای بالابردن سطح تولیدات کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. در ارزیابی میزان عملکرد روش‌های نوین آبیاری نیز به مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور مطالعه توزیع و روند حرکت آب در خاک و الگوی جذب آب توسط ساختار ریشه گیاه نیاز است (Šimůnek et al., 1999). مدل HYDRUS یکی از کاربردی‌ترین و باارزش‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی است که در تحلیل و طراحی انواع سیستم‌های آبیاری (سنتی- نوین) چه در سطح مزرعه و چه در سطح مطالعات آزمایشگاهی برای برآورد رطوبت خاک، انتقال املاح و گرما مورد استفاده قرار گرفته است (Šimůnek et al., 2006). نتایج تحقیقات چن و همکاران (Chen et al., 2014) تحت آبیاری با آب شور نشان داد که مدل HYDRUS HYDRUS به خوبی توانسته روند توزیع و حرکت آب در خاک را شبیه‌سازی کند.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بیرجند، واقع در فاصله پنج کیلومتری غرب شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی، با مختصات عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا با اقلیم خشک و نیمه‌خشک صورت گرفت. مجموع بارش سالیانه به طور میانگین برابر با ۱۷۱ میلی‌متر بر سال است. هم‌چنین میانگین سالیانه رطوبت نسبی نیز برابر با ۳۶ درصد می‌باشد. در این تحقیق قسمتی از مزرعه به وسعت سه هکتار که طی چهار سال متوالی تحت کشت گیاه یونجه می‌باشد و با هدف کاهش مصرف آب آبیاری و افزایش بهره‌وری به ازاء هر واحد آب مصرفی از روش آبیاری سنتریپوت استفاده می‌گردد، انتخاب شد. در این سیستم آبیاری برای جمع‌آوری آب جمع‌شده، از قوطی‌های به ارتفاع و قطر ۱۲ سانتی‌متری استفاده گردید. قوطی‌ها از مرکز سیستم به صورت شعاعی تا انتهای بازو به فاصله شش متر قرار داشتند. طول بازو ۳۰۰ متر و تعداد اسپن برابر با پنج و تعداد آبپاش برابر با ۱۰۲ بود.

با توجه به نوع گیاه کشت‌شده، پروفیلی به عمق یک متر حفاری گردید و بر اساس مطالعات رده‌بندی به دو افق تقسیم‌بندی شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های مورد نظر در جدول ۱ ارائه گردید. در این تحقیق با استفاده از TDR (مدل IMKO) میزان رطوبت خاک در پنج عمق اندازه‌گیری شد. دو عمق اول در افق A و سه عمق دوم در افق B قرار داشتند. همچنین قابل ذکر است هر عمق، ۲۰ سانتی‌متر طولی در نظر گرفته شد. برای واسنجی دستگاه، میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR نسبت به روش وزنی بر پایه وزن مخصوص ظاهری خاک و بافت خاک در هر دو افق مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از کالیبراسیون، رطوبت خاک در روزهای قبل و بعد از آبیاری و هم‌چنین در فواصل هر آبیاری اندازه‌گیری شد. در این تحقیق روند تغییرات رطوبت پروفیل خاک در طول یک سال زراعی به‌طور پیوسته بررسی گردید.

### شبیه‌سازی حرکت آب در خاک

برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از مدل یک بعدی HYDRUS (Šimůnek et al., 2016) استفاده شد. در

سعی شده است که پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز در شبیه‌سازی مدل HYDRUS علاوه بر روش محاسباتی حل معکوس، با روش‌های مرسوم پارامتریک نیز مورد ارزیابی قرار گیرند و در نهایت میزان کارایی روش حل معکوس نسبت به توابع پارامتریک سنجیده شود. به عبارت دیگر در این تحقیق برای اولین بار توانایی روش حل معکوس با روش‌های توابع انتقالی که بسیار معمول و پرکاربرد هستند، در شرایط واقعی مزرعه مورد مقایسه قرار گرفته است. از این‌رو در این تحقیق در گام نخست مقدار پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از سه تابع انتقالی Rosetta، قربانی و همایی (Gorbani Dashtaki & Homaei, 2002) و سپاس‌خواه و بندر (Sepaskhah & Bondar, 2002) محاسبه و بهترین تابع پارامتریک انتخاب گردید. در گام دوم عملکرد بهترین تابع پارامتریک تعیین گردید و در گام نهایی، خروجی مدل HYDRUS طی کاربرد داده‌های روش حل عددی و داده‌های بدست آمده از بهترین تابع پارامتریک در شبیه‌سازی جریان غیراشباع آب در خاک بررسی گردید.

در بررسی مطالعات صورت گرفته و اکثر مقالات چاپ شده، عملکرد روش حل معکوس نسبت به شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی سنجیده شده است. در حالی که در این مطالعه سعی شده است که پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز در شبیه‌سازی مدل HYDRUS علاوه بر روش محاسباتی حل معکوس، با روش‌های مرسوم پارامتریک نیز مورد ارزیابی قرار گیرند و در نهایت میزان کارایی روش حل معکوس نسبت به توابع پارامتریک سنجیده شود. به عبارت دیگر در این تحقیق برای اولین بار توانایی روش حل معکوس با روش‌های توابع انتقالی که بسیار معمول و پرکاربرد هستند، در شرایط واقعی مزرعه مورد مقایسه قرار گرفته است. از این‌رو، در این تحقیق در گام نخست مقدار پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از سه تابع انتقالی Rosetta، قربانی و همایی (Gorbani Dashtaki & Homaei, 2002) و سپاس‌خواه و بندر (Sepaskhah & Bondar, 2002) محاسبه و بهترین تابع پارامتریک انتخاب گردید. در گام دوم عملکرد بهترین تابع پارامتریک تعیین گردید و در گام نهایی، خروجی مدل HYDRUS طی کاربرد داده‌های روش حل عددی و داده‌های بدست آمده از بهترین تابع پارامتریک در شبیه‌سازی جریان غیراشباع آب در خاک بررسی گردید.

وضعیت هیدرولیکی محیط متخلخل و غیرهمگن خاک مورد مطالعه است. برای تعیین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک از سه تابع پارامتریک به ترتیب، رزتا در دو حالت توزیع اندازه ذرات خاک به تنهایی (R(PTF1)) و داده های توزیع اندازه ذرات+وزن مخصوص ظاهری+ مکش ۳۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتیمتر (R(PTF2))، تابع سپاس خواه و بندر (Sp(PTF3) (Sepaskhah & Bondar, 2002) با متغیرهای وزن مخصوص ظاهری+درصد ماده آلی+توزیع اندازه ذرات خاک و تابع قربانی و همایی (Ghorbani Dashtaki & Homaei, 2002) با در نظر گرفتن متغیرهای وزن مخصوص ظاهری+درصد رس +درصد شن استفاده گردید (جدول ۲).

مدل HYDRUS به طور عددی معادله ریچاردز با بیان روند تغییرات عمودی جریان آب در خاک حل می گردد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \left[ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right] - S \quad (1)$$

که در آن  $\theta$  درصد رطوبت حجمی خاک ( $L^3 L^{-3}$ )،  $h$ : بار فشاری آب خاک ( $L$ )،  $k(h)$ : هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $LT^{-1}$ )،  $t$ : زمان ( $T$ )،  $z$ : عمق خاک ( $L$ ) و  $S$ : sink term [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ] به عنوان میزان آب خارج شده در واحد سطح خاک در واحد زمان در اثر جذب آب توسط ریشه تعریف می گردد.

برای حل عددی معادله ریچاردز به یک سری پارامتر هیدرولیکی خاک نیاز می باشد که به طور دقیق بیان گر

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پروفیل خاک

Table 1. Chemical and physical properties of soil profile

Soil horizon (cm)	EC $dS m^{-1}$	pH	Soil texture	Sand %	Silt %	Clay %	pb $g cm^{-3}$	Ks $cm d^{-1}$	F -	O.M %	Ca ( $meq l^{-1}$ )	Mg ( $meq l^{-1}$ )
A :0-40	5.8	7.6	sandy clay loam	53	24	23	1.55	8.06	0.38	0.74	3.8	13
B :40-100	8.1	7.5	sandy loam	77	8	19	1.72	47.03	0.34	0.63	5.8	15

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی خاک حاصل از توابع پارامتریک

Table 2. Soil hydraulic parameters obtained from parametric PTFs

PTF	Soil texture	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	$(cm day^{-1})K_s$	L(-)
R(PTF1)	Sandy clay loam	0.065	0.39	0.02	1.36	12.78	0.5
	Sandy loam	0.058	0.37	0.028	1.44	32.6	0.5
R(PTF2)	Sandy clay loam	0.051	0.34	0.003	1.25	8.09	0.5
	Sandy loam	0.06	0.38	0.03	1.51	47.03	0.5
Sp(PTF3)	Sandy clay loam	0.04	0.32	0.06	1.39	12.78	0.5
	Sandy loam	0.051	0.36	0.09	1.59	32.6	0.5
Gh(PTF4)	Sandy clay loam	0.053	0.38	0.05	1.39	12.78	0.5
	Sandy loam	0.07	0.35	0.04	1.42	32.6	0.5

$$K = \begin{cases} K_e S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 & \text{if } h \leq 0 \\ K_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

که در روابط فوق  $\theta_r$  رطوبت باقی مانده  $(-)$ ،  $\theta_s$ : رطوبت اشباع خاک  $(-)$ ،  $K_s$ : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک  $(LT^{-1})$ ، n و  $(-)$   $\alpha$ : پارامترهای شیب منحنی رطوبتی خاک،  $S_e$ : درجه اشباع مؤثر  $(-)$  و L: بیان گر درجه اعوجاج و پیوستگی خلل و فرج خاک بوده که به طور معمول برابر با ۵/۰ فرض می شود. منحنی های رطوبتی ارائه شده

روابط ۲ تا ۵ توصیف ریاضی معادلات بکار برده شده است:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} + \theta_r & \text{if } h \leq 0 \\ 1 & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

دانشگاه بیرجند تعیین گردید (جدول ۳). ETC نیز با ضرب نمودن ETO در ضریب محصول مورد نظر (Kc) براساس نشریه FAO-56 تخمین زده شد. همچنین برای تعیین مقدار پتانسیل تبخیر از سطح خاک (Ep) و نرخ پتانسیل تعرق (Tp) از فرمول زیر استفاده گردید.

$$E_p = E_{T_c} \exp(-k LAI) \quad (6)$$

$$T_p = E_{T_c} - E_p \quad (7)$$

در رابطه فوق  $k$  ضریب جذب نور می باشد که در این مطالعه برای گیاه یونجه برابر با  $0/8$  در نظر گرفته شد (Dincă & Dunea, 2018). شاخص سطح برگ (LAI) نیز با اندازه گیری سطح هر برگ با استفاده از دستگاه برگ سنج مدل Licow تعیین گردید.

در نتایج، بر اساس افزونه Solver و در محیط Excel محاسبه و ترسیم گردیدند.

### شرایط اولیه و مرزی

برای تعیین شرایط اولیه توزیع آب در خاک از TDR استفاده گردید و مقدار رطوبت خاک در دو عمق مورد نظر قبل از آبیاری اندازه گیری و به عنوان داده ورودی مدل در نظر گرفته شد. از جریان جانبی و افقی در طول پروفیل صرف نظر شد و برای تعیین شرایط مرزی بالادست پروفیل، از شرایط لایه سطحی اتمسفریک انتخاب گردید. برای تعیین شرایط مرزی بالادست پروفیل خاک، نیاز به تعیین مقدار بارندگی، تبخیر و تعرق، روند تغییرات دما و سرعت باد می باشد. مقدار بارندگی، دما، سرعت باد و تبخیر و تعرق روزانه (ETO) براساس گزارش های ایستگاه هواشناسی

جدول ۳- اطلاعات هواشناسی منطقه

Table 3. The climatic information of study area

Irrigation (mm)	Rain (mm)	Evaporation (mm)	Transpiration (mm)	Average Temperature (°C)	Wind speed (m sec <sup>-1</sup> )
346.5	120	109.7	182.6	23.7	8.79

برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده گردید. الگوریتم PSO به طور موفقیت آمیزی در حل بسیاری از مسائل مهندسی بکار گرفته شده است و دلیل توانایی آن شناسایی بهینه فراکاوشی حتی در مسائل چند بعدی می باشد (Brunetti et al., 2018). مسئله بهینه سازی برپایه تابع هدف حداقل تفاضل بین درصد رطوبت اندازه گیری شده و درصد رطوبت برآورد شده توسط مدل تعریف گردید و سپس ریشه میانگین مجموع مربعات خطا<sup>1</sup> (RMSE) به عنوان شاخص ارزیابی استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\theta_i - \hat{\theta}_i]^2} \quad (8)$$

که در رابطه فوق  $\theta_i$  درصد رطوبت اندازه گیری شده،  $\hat{\theta}$  درصد رطوبت مدل سازی شده و  $N$  تعداد نمونه آزمایشگاهی در هر نمونه خاک مورد مطالعه است. پارامترهای بکار رفته در هر نمونه خاک مورد مطالعه است. پارامترهای بکار رفته PSO به منظور بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک برای هر افق با توجه به توزیع اندازه ذرات در جدول ۴ ارائه شده است. در جدول ۵ نیز مقدار حد بالا و پایین پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در روند بهینه سازی ارائه گردید.

### بهینه سازی مدل HYDRUS

مدل سازی معکوس روشی مناسب برای برآورد پارامترهای ناشناخته مدل برپایه داده های آزمایشگاهی می باشد. این روش به طور گسترده در حل مسائل گوناگون مهندسی با هدف برآورد پارامترهایی که به طور مستقیم قابل اندازه گیری نمی باشند، استفاده می گردد. فرآیند برآورد پارامترها با ترکیب نمودن یک مدل عددی که توصیف کننده مسائل برپایه روابط فیزیکی می باشد، با یک الگوریتم بهینه ساز انجام می شود. الگوریتم بهینه ساز برپایه تابع هدف تعریف شده و عملکرد مدل عددی و داده های اندازه گیری شده طی هر تکرار تابع احتمالی را محاسبه می کند سپس، براساس معیارهای ارزیابی از پیش تعیین شده بهترین پاسخ انتخاب می گردد. فرآیند بهینه سازی تا زمانی ادامه دارد که خروجی الگوریتم برپایه تابع هدف تعریف شده به یک حداقل یا حداکثر تفاضل بین خروجی الگوریتم بهینه سازی و خروجی مدل عددی دست یابد و یا تعداد اجرای الگوریتم بهینه سازی به یک حد آستانه تعریف شده برسد (Brunetti et al., 2018). در این مطالعه از الگوریتم PSO (Kennedy & Eberhart, 1995) برای

1 Root Mean Squared Errors

لایه سطحی و عمقی خاک استفاده (Jalali & Homaei, 2010; Saadat & Homaei, 2015) و در جدول ۷ ارائه گردید.

$$\hat{E} = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} \quad (9)$$

$$\hat{d} = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (11)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (12)$$

در معادلات فوق،  $O_i$ : مقدار درصد رطوبت اندازه‌گیری شده،  $S_i$ : مقدار درصد رطوبت برآورد شده توسط مدل،  $\bar{O}$ : میانگین مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{S}$ : میانگین مقدار برآورد شده و  $N$ : تعداد زوج مقدار اندازه‌گیری شده-برآورد شده درصد رطوبت می‌باشند. مقدار  $\hat{E}$  در دامنه بین یک و منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند که مقادیر مساوی یک بیانگر برابر بودن مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده است. در مقابل هرچه مقدار  $\hat{E}$  از یک کمتر باشد از دقت برآورد مقادیر کاسته می‌گردد. دامنه تغییرات  $\hat{d}$  بین یک و صفر می‌باشد. مقادیر بزرگتر از صفر نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد مقادیر است. مقادیر شاخص CRM میزان توانایی مدل در برآورد مقادیر نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقادیر منفی CRM بیانگر تمایل مدل به بیش برآورد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد (Jalali et al., 2008).

مقدار پارامترهای رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع براساس کلاس بافتی ارائه شده توسط راتول و همکاران (Rawls et al., 1982) تعیین شد.

#### چگونگی ادغام الگوریتم PSO در برنامه HYDRUS

در گام نخست، دامنه تغییرات (حد بالا و حد پایین) هر پارامتر مورد نظر تعیین گردد. سپس با استفاده از الگوریتم LHS در دامنه تغییرات تعیین شده برای هر پارامتر، به طور تصادفی و با توزیع یکنواخت داده تصادفی تولید گردید. داده‌های تصادفی حاصل به صورت input file of HYDRUS-1D در محیط متلب وارد گردید و مدل مورد نظر در محیط متلب اجرا گردید. خروجی حاصل از مدل در تعیین تابع هدف استفاده و بهترین مقادیر تابع هدف و موقعیت ذرات انتخاب شد. در گام بعدی، بردار سرعت تولید گردید. سپس موقعیت ذرات در فضای مسئله به‌روزرسانی شد. برپایه حداقل تابع هدف که به نتایج مزرعه نزدیکتر است، با حاصل بهترین تابع هدف و موقعیت ذره، روند اجرای الگوریتم به پایان رسید.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

به‌منظور بررسی میزان دقت مدل HYDRUS در برآورد رطوبت خاک تحت مدیریت آبیاری بارانی، پس از تعیین شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولیکی خاک در محیط نرم‌افزاری Rosetta برپایه معادله ون‌گنوختن-معلم حاصل و مدل واسنجی شد. برای واسنجی مدل از داده‌های خرداد ماه ۱۳۹۷ در عمق سطحی خاک (صفر تا ۴۰ سانتی‌متر) که با استفاده از TDR در فواصل آبیاری اندازه‌گیری شد، استفاده گردید. هم‌چنین برای تعیین میزان توانایی مدل در شبیه‌سازی توزیع آب در خاک از شاخص‌های آماری، ضریب کارایی اصلاح‌شده ( $\hat{E}$ )، شاخص مطابقت اصلاح‌شده ( $\hat{d}$ )، ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای

جدول ۴- مؤلفه های الگوریتم PSO در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک

Table 4. PSO algorithm component in estimating soil hydraulic parameters

Soil texture	n	w	$c_1$	$c_2$
Sandy clay loam	300	0.74	1.54	1.49
Sandy loam	100	0.74	1.54	1.49

جدول ۵- دامنه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خاک در فرآیند بهینه سازی  
Table 5. Variability of soil hydraulic parameters in optimization process

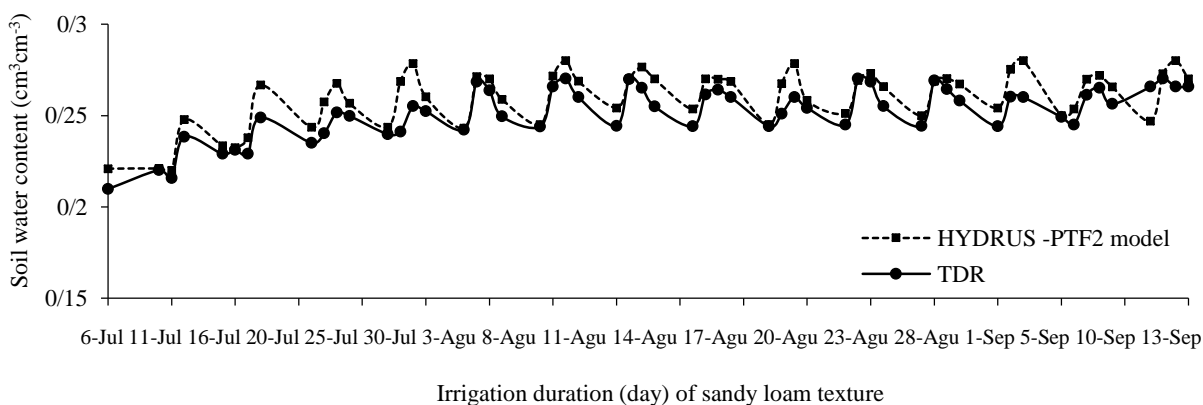
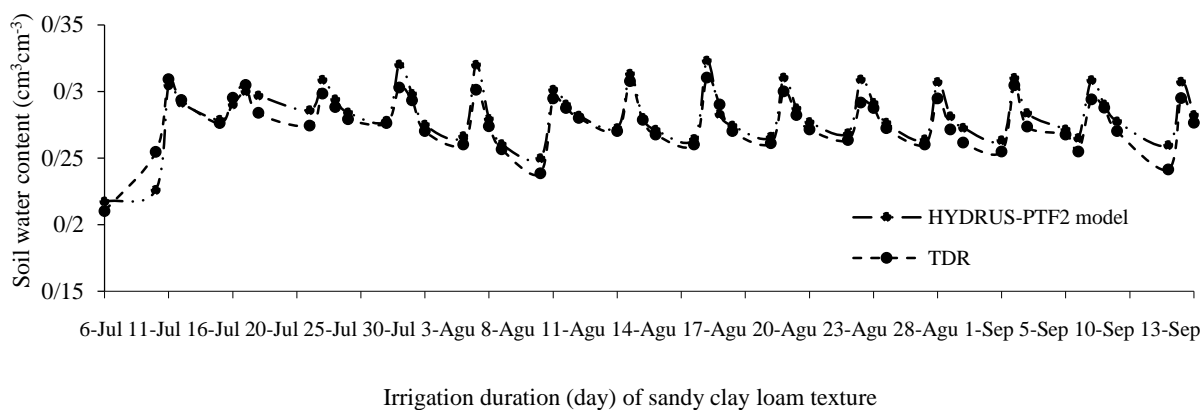
Soil texture	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	$K_s$ (cm day <sup>-1</sup> )
Sandy clay loam	0-0.137	0.332-0.464	0-1	1-4	7.69-8.49
Sandy loam	0-0.106	0.351-0.55	0-1	1-4	46.88-47.52

## نتایج و بحث

قابل قبول مدل HYDRUS در برآورد رطوبت خاک است که براساس نتایج جدول ۷ می توان بیان نمود که مدل در لایه سطحی خاک عملکرد بهتری داشته است. با توجه به شاخص CRM می توان ذکر نمود که مدل در هر دو عمق مقدار رطوبت خاک را کمی بیش تر از مقدار اندازه گیری شده برآورد نموده است. این روند عملکرد مدل را به خوبی می توان در شکل ۱ نیز مشاهده نمود. نتایج تحقیق ونترالا و همکاران (Ventrella et al., 2019) نیز بیانگر عدم تطبیق کامل بین نتایج شبیه سازی رطوبت خاک در پنج عمق با داده های حاصل از اندازه گیری رطوبت خاک با TDR است. ایشان بیان نمودند که با افزایش عمق، این اختلاف عملکرد در عمق های زیرین، شدیدتر می باشد. این عدم تطبیق را می توان در زمان های عدم آبیاری به خوبی مشاهده نمود که جذب آب توسط ریشه گیاه و کاهش رطوبت خاک را می توان از دلایل این اختلاف برشمرد. با توجه به شکل ۱، به ویژه در عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی متری به دلیل تراکم بالای ریشه کاهش شدید رطوبت و عدم هم خوانی عملکرد مدل با قرائت های TDR را می توان به نقش ریشه گیاه در جذب آب نسبت داد. هم چنین مقدار پایین  $K_s$  در لایه سطحی نیز یک مانعی دیگر در انتقال رطوبت از لایه سطحی به لایه عمقی خاک محسوب می گردد. عامل دیگری که موجب عدم تطابق کامل نتایج شبیه سازی شده با داده های اندازه گیری شده دانست، به تغییر پذیری ویژگی های فیزیکی خاک و هم چنین میزان توانایی نرم افزار Rosetta در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک باز می گردد. از آنجایی که نرم افزار Rosetta نیز یک تابع انتقالی برپایه شبکه عصبی می باشد و با توجه به نوع داده ورودی که عمدتاً توزیع اندازه ذرات خاک است، این امر می تواند سبب کاهش دقت مدل گردد. کیو و همکاران (Qu et al., 2014) نیز با مطالعه روند شبیه سازی حرکت آب در خاک در سه عمق با استفاده از مدل HYDRUS نیز بیان نمودند که تفاوت عملکرد مدل در عمق های پایین به وضوح قابل مشاهده است که این روند تغییرات را به تغییر پذیری ویژگی های خاک نسبت دادند بطوریکه وجود ذرات سنگ و تغییر کلاس بافتی در عمق های زیرین سبب تفاوت عملکرد مدل گردید.

پروفیل مورد مطالعه از دو افق تشکیل و در پنج عمق، مقدار رطوبت خاک با استفاده از TDR در فواصل زمانی (روز) اندازه گیری شد. از پنج عمق مورد نظر، نتایج عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری برای بیان روند جریان آب در افق A انتخاب شد تا روند تغییرات رطوبت در لایه سطحی خاک که مستقیماً متأثر از تبخیر، بارندگی و آبیاری است، بررسی گردد. هم چنین نتایج عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی متری برای بیان روند تغییرات جریان آب در افق B در نظر گرفته شد. با انتخاب این عمق روند جریان در عمقی که محل تراکم بالای ریشه گیاه است، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور شبیه سازی حرکت آب در خاک در مدل HYDRUS، نیاز به تعیین پارامترهای هیدرولیکی می باشد. در این تحقیق از سه تابع پارامتریک استفاده گردید (جدول ۲). روند عملکرد این سه تابع با یکدیگر و هم چنین نسبت به الگوریتم PSO مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۶). براساس مقدار شاخص آماری RMSE می توان بیان نمود که نتایج خروجی R(PTF2) نسبت به دو تابع پارامتریک دیگر و هم چنین R(PTF1) دارای عملکرد بهتری است از این رو در فرآیند شبیه سازی حرکت آب در خاک از داده های R(PTF2) استفاده گردید. با استفاده از نتایج جدول ۲ و ۶، ابتدا مدل HYDRUS براساس داده های خردادماه واسنجی شد و سپس روند شبیه سازی رطوبت خاک برای کل ماه های تابستان ۹۷ برای هر دو عمق نسبت به داده های اندازه گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۱). با توجه به روند تغییرات رطوبت خاک در شکل ۱، میزان هم پوشانی خروجی مدل HYDRUS با مقادیر اندازه گیری شده در سطح مزرعه در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری نسبت به عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی متری دارای روند بهتری می باشد. هر چند که در هر دو عمق، مدل توانسته است مقدار رطوبت خاک را به شکل قابل قبولی برآورد نماید و روند تغییرات رطوبت خاک را در نقطه ظرفیت زراعی، پژمردگی و هم چنین در فاصله این دو نقطه رطوبتی به خوبی نشان دهد. شاخص های ارزیابی ارائه شده در جدول ۷ نیز بیانگر عملکرد





شکل ۱- تغییرات فرآیند شبیه سازی رطوبت خاک در دو کلاس بافتی خاک

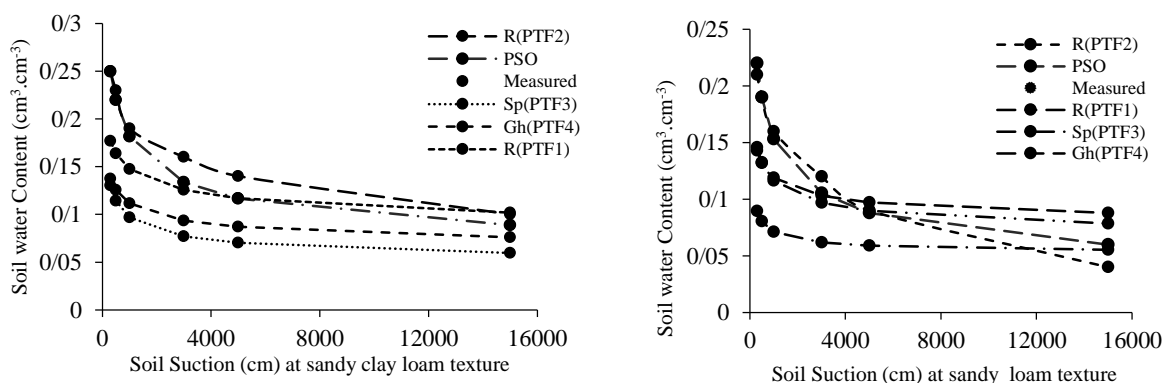
Figure 1. Variability of soil water at the simulation process in the two soil textures

در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد، از الگوریتم بهینه‌ساز PSO استفاده گردید. مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی خاک در هر دو عمق تحت مطالعه با استفاده از الگوریتم PSO در جدول ۶ ارائه شده است. برای تعیین بهترین مقادیر از شاخص آماری RMSE استفاده گردید. منحنی رطوبتی مقایسه‌ای خاک حاصل از عملکرد الگوریتم PSO و تابع انتقالی نیز در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲، نمودار رطوبتی حاصل، طی بهینه‌سازی هم‌پوشانی کاملی با داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده دارد. یانگ و یو (Yang & You, 2013) به مطالعه توانایی الگوریتم توسعه‌یافته PSO در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک نسبت به دو تابع انتقالی Rosetta و RETC در چند کلاس بافتی (رسی، لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی) پرداختند. با توجه به شاخص آماری RMSE بیان نمودند که این الگوریتم نسبت به دو روش دیگر بهتر توانسته است پارامترهای هیدرولیکی خاک را برآورد نماید. نتایج تحقیق لی و همکاران (Li et al., 2018) نیز نشان داد، کاربرد روش‌های حل معکوس روشی

در گام نخست این تحقیق، برای تعیین مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک از سه تابع پارامتریک استفاده گردید. از آنجایی که ساختار این توابع پارامتریک برپایه شبکه عصبی و روابط رگرسیونی می‌باشند و رابطه ریاضی مشخصی بین ورودی و خروجی‌های این توابع انتقالی وجود ندارد (Vereecken et al., 2010)، می‌توان فرض نمود که یکی از دلایل کاهش عملکرد مدل HYDRUS نحوه عملکرد این توابع پارامتریک است. گریب و همکاران (Gribb et al., 2009) نیز با مقایسه عملکرد روش‌های حل معکوس در تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک با توجه به روند تغییرات رطوبت خاک نسبت به توابع انتقالی ذکر نمودند که پارامترهای هیدرولیکی حاصل از روش حل معکوس در مقایسه با تابع پارامتریک بهتر توانستند توزیع آب در خاک و پویایی رطوبت خاک را بیان کنند. از این‌رو، در این تحقیق با در نظر گرفتن این فرض و هم‌چنین با توجه به تحقیقات لیو و همکاران (Liu et al., 2020)، واگلر و همکاران (Vogeler et al., 2019) و اسپرینگر و همکاران (Sprenger et al., 2015) که بیانگر توانمندی روش‌های حل معکوس

اندازه‌گیری شده رطوبت خاک با روند شبیه‌سازی شده طی بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک با الگوریتم PSO و برآورد با مدل HYDRUS می‌باشد. در لایه عمقی نیز الگوریتم PSO توانسته عملکرد خوبی نسبت به عملکرد مدل HYDRUS (شکل ۱) داشته باشد هرچند که در برخی نقاط اختلاف عملکردی بین مقدار رطوبت برآورد شده توسط PSO نسبت به رطوبت اندازه‌گیری شده توسط TDR مشاهده می‌گردد. این تفاوت عملکرد را می‌توان به روند تغییرپذیری ویژگی‌های خاک مرتبط دانست به‌ویژه این که در لایه زیرین درصد شن خاک روند افزایشی داشته است و همچنین تفاوت عمده بین هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی و زیرین وجود دارد که یک مانع در انتقال رطوبت خاک محسوب می‌گردد.

توانمند و کارآمد در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد. روند عملکرد الگوریتم PSO طی بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی در مدل HYDRUS در شکل ۳ در هر دو لایه سطحی و عمقی خاک ارائه شده است. با توجه به روند تغییرات رطوبت خاک می‌توان بیان نمود که الگوریتم PSO به خوبی توانسته پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در تغییرات رطوبت خاک را برآورد نماید، به طوری که روند شبیه‌سازی مدل با روند اندازه‌گیری داده‌ها در هر دو عمق یکسان می‌باشد. این روند را بیش‌تر در لایه سطحی خاک می‌توان مشاهده نمود که هم‌پوشانی کاملی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و روند شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در نقاط گوناگون رطوبتی به‌وضوح قابل مشاهده است. نتایج بریونتی و همکاران (Brunetti *et al.*, 2018) نیز بیانگر وجود هم‌پوشانی بین داده‌های

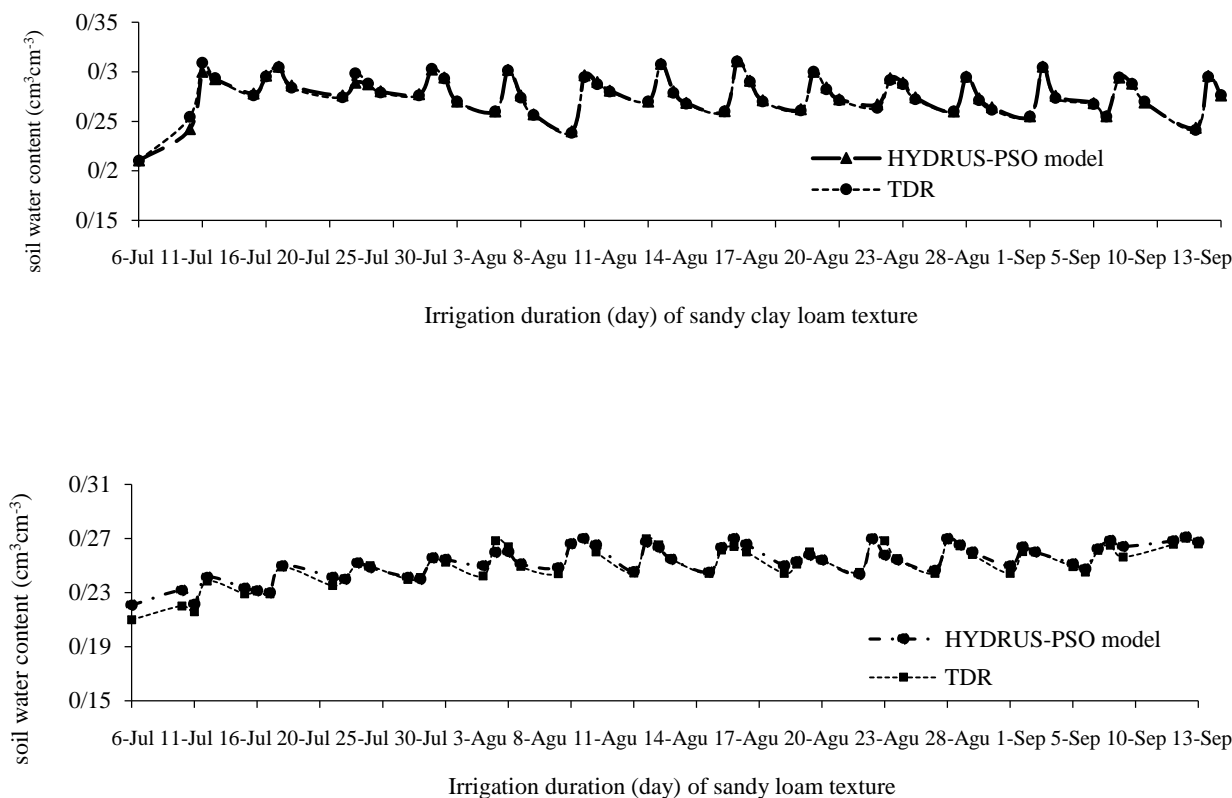


شکل ۲- منحنی رطوبتی خاک در دو کلاس بافتی خاک تحت مطالعه براساس مقادیر اندازه‌گیری شده، بهینه‌سازی شده و توابع پارامتریک  
Figure 2. Soil water retention curve for two studying soil textures according to measured, optimized and parametric PTFs values

جدول ۶- مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه‌ساز با توابع پارامتریک در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک

Table 6. Performance comparison of optimization algorithm with parametric functions in estimating soil hydraulic parameters

Method	Soil Texture	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	(cm/day) $K_s$	RMSE
PSO	Sandy clay loam	0.034	0.352	0.0021	1.24	10.32	0.003802
R(PTF1)	Sandy clay loam	0.065	0.39	0.02	1.36	12.78	0.004213
R(PTF2)	Sandy clay loam	0.051	0.34	0.003	1.25	8.09	0.003862
Sp(PTF3)	Sandy clay loam	0.04	0.32	0.06	1.39	12.78	0.004612
Gh(PTF4)	Sandy clay loam	0.053	0.38	0.05	1.39	12.78	0.004732
PSO	Sandy loam	0.00	0.35	0.0088	1.1	47.2	0.01102
R(PTF1)	Sandy loam	0.058	0.37	0.028	1.44	32.6	0.03246
R(PTF2)	Sandy loam	0.06	0.38	0.027	1.5	47.2	0.01223
Sp(PTF3)	Sandy loam	0.051	0.36	0.09	1.59	32.6	0.04326
Gh(PTF4)	Sandy loam	0.07	0.35	0.04	1.42	32.6	0.038126



شکل ۳- ارزیابی عملکرد مدل HYDRUS-PSO در دو کلاس بافتی خاک

Figure 3. Evaluation of HYDRUS-PSO model performance in two soil textural classes

مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۶، استفاده از روش حل معکوس سبب گردید روند تغییرات رطوبت خاک با مدل HYDRUS بهتر ارزیابی گردد. بهترین عملکرد الگوریتم بهینه‌ساز PSO در لایه سطحی خاک با  $\bar{E}$  برابر با ۰/۸۹،  $\bar{d}$  برابر با ۰/۹۴ و  $R^2$  برابر با ۰/۹۸ نسبت به عملکرد مدل HYDRUS مشاهده شد. البته قابل ذکر می‌باشد که با توجه به جدول ۷، الگوریتم بهینه‌ساز در عمق زیرین نیز نسبت به تابع پارامتریک در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک عملکرد بهتری داشته است.

از سوی دیگر به دلیل تجمع ریشه در محدوده مرز بین دو لایه و افزایش جذب آب توسط ریشه، این پدیده یک مانع دیگر در شبیه‌سازی رطوبت خاک در لایه زیرین خاک محسوب می‌شود. نقش ریشه و هم‌چنین هدایت هیدرولیکی اشباع در بررسی روند تغییرات رطوبت خاک در هر دو شکل ۱ و ۳ مشاهده می‌گردد. هرچند که در شکل ۱ این تفاوت نسبت به شکل ۳ شدیدتر می‌باشد که بیانگر میزان عملکرد ضعیف توابع پارامتریک در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک است.

در جدول ۷ نیز با استفاده از شاخص‌های آماری میزان عملکرد الگوریتم PSO در برآورد تغییرات رطوبت خاک

جدول ۷- ارزیابی عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان آب در پروفیل خاک مورد مطالعه

Table 7. Performance evaluating of the models in simulating water flow in the studied soil profile

Type model	$\bar{E}$	$\bar{d}$	CRM	$R^2$
HYDRUS(0-20cm)	0.51	0.76	-0.02	0.88
HYDRUS-PSO(0-20cm)	0.89	0.94	-0.0012	0.98
HYDRUS(40-60)	0.25	0.67	-0.03	0.79
HYDRUS-PSO(40-60cm)	0.74	0.86	-0.006	0.93

بهینه‌ساز مجموعه ذرات (PSO) با هدف برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک در دو لایه سطحی و زیرین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از منحنی رطوبتی خاک بیانگر توانمندی بهتر الگوریتم PSO نسبت به تابع انتقالی Rosetta در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک بوده است. این کارایی در لایه زیرین در منحنی رطوبتی خاک خود را بهتر نشان داد. هم‌چنین نتایج کاربرد مدل HYDRUS در فرآیند شبیه‌سازی رطوبت خاک در هر دو عمق نشان‌دهنده توانمندی کاربرد مدل مذکور در مطالعات مدیریت منابع آب و خاک می‌باشد. هرچند که در عمق زیرین به دلیل وجود درصد بالای شن، تجمع ریشه و اختلاف معنی‌دار بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سطحی و زیرین از میزان عملکرد آن کاسته گردید. میزان کارایی الگوریتم بهینه‌ساز PSO در برآورد رطوبت خاک با مدل HYDRUS مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به شاخص‌های آماری بکار گرفته شده و هم‌چنین نمودارهای تغییرات رطوبت خاک می‌توان بیان نمود که الگوریتم PSO سبب افزایش عملکرد مدل HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک گردید. این افزایش کارایی به ویژه در لایه سطحی طی هم‌پوشانی کامل خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه به خوبی قابل مشاهده بود. از این‌رو، می‌توان به توانمندی مدل HYDRUS در مطالعه روش‌های نوین آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک اشاره نمود و هم‌چنین بیان نمود که روش‌های حل معکوس در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک روشی کارآمد می‌باشند که می‌توانند در افزایش دقت و عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی خاک نقش شایانی داشته باشند.

برونتی و همکاران (Brunetti *et al.*, 2016) نیز طی بررسی نفوذپذیری خاک و حرکت آب در خاک تحت پوشش‌های گوناگون زراعی با مدل HYDRUS-1D نشان دادند که در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک با الگوریتم بهینه‌ساز PSO، مدل بهتر توانسته است روند تغییرات رطوبت را برآورد نماید. هم‌چنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، می‌توان بیان نمود که مدل HYDRUS در هر دو روش بکاررفته در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک توانسته است روند تغییرات رطوبت خاک را شبیه‌سازی کند هرچند که عملکرد آن طی کاربرد الگوریتم PSO بهبود یافته است. از این‌رو می‌توان بیان نمود که در مطالعه روش آبیاری سنتریپوت نیز همانند آبیاری قطره‌ای از مدل HYDRUS می‌توان بهره برد. نتایج مطالعات وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2013) و عطایی و همکاران (Ataee *et al.*, 2018) نیز بیانگر توانمندی مدل HYDRUS در برآورد رطوبت خاک تحت روش‌های گوناگون آبیاری است. هم‌چنین مطالعات بریونتی و همکاران (Brunetti *et al.*, 2018) و بریونتی و همکاران (Brunetti *et al.*, 2016)، مهبد و زندپارسا (Mahbod & Zand-Pars, 2010) و ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2009) نیز بازگوکننده توانمندی روش حل معکوس در افزایش دقت عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی به ویژه مدل HYDRUS می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه روند عملکرد مدل HYDRUS در روش آبیاری سنتریپوت طی کاربرد نرم افزار Rosetta و الگوریتم

### References

- Azad N., Behmanesh J., Rezaverdinejad V., Abbasi F., and Navabian M. 2018. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements. *Agricultural Water Management*, 208: 344-356.
- Ataee A., Nishabouri M.R., Akbari M., Zare Haghi D., and Anabi Milani A. 2018. Evaluation of HYDRUS-2D model for determination of soil moisture distribution under surface and sub-surface drip irrigation of Pistachio trees. *Search Water at Agriculture*, 32(4): 581-595.
- Abdelaziz R., and Zambrano-Bigiarini M. 2014. Particle Swarm Optimization for inverse modeling of solute transport in fractured gneiss aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 164: 285-298.
- Brunetti G., Šimůnek J., and Piro P. 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 540: 1146-1161.
- Brunetti G., Porti M., and Piro P. 2018. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. *Applied Energy*, 221: 204-219.
- Chen M., Willgoose G.R., and Saco P.M. 2014. Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS - 1D. *Hydrological Processes*, 28(2): 171-185.

- Coutinho de Oliveira L.F., Rezende de Souza G., Vilela Corrêa F., and Ribeiro Motae Silva J. 2020. Parameter estimation of soil hydraulic characteristics by inverse modeling of the analytical equation for unsaturated subsurface water flow. *Journal of Hydroinformatic*, 22 (5): 1270-1282.
- Dincă N., and Dunea D. 2018. On the assessment of light use efficiency in alfalfa (*medicago sativa* l.) In the eco-climatic conditions of târgoviște piedmont plain. *Romanian Agricultural Research*, (35): 59-69.
- Gribb M.M., Forkutsa I., Hansen A., Chandler D.G., and McNamara J.P. 2009. The effect of various soil hydraulic property estimates on soil moisture simulations. *Vadose Zone Journal*, 8(2): 321-331.
- Gabiri G., Leemhuis C., Diekkrüger B., Näschen K., Steinbach S., and Thonfeld F. 2019. Modelling the impact of land use management on water resources in a tropical inland valley catchment of central Uganda, East Africa. *Science of the Total Environment*, 653: 1052-1066.
- Gorbani Dashtaki S., and Homae M. 2002. Parametric estimation of hydraulic functions of the unsaturated part of the soil using transfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(12): 1-16.
- Jalali V.R., Homae M., and Mirnia K. 2008. Modeling Canola Response to Salinity on Vegetative Growth Stages.
- Jalali V.R., and Homae M. 2010. Modeling the effect of salinity application time of root zone on yield of canola (*brassica napus* l.).
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., and Ayoubi S. 2013. Evaluation and developing pedotransfer functions to predict soil saturated hydraulic conductivity at landscape scale in center Zagros. *Applied Soil Research*, 1(2): 16-33. (In Persian)
- Kennedy J., and Eberhart R. 1995. November. Particle swarm optimization. In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, 4: 1942-1948.
- Lamia G., Brahim A., Jérôme J., and Rachida B. 2020. Estimation of the soil hydraulic properties from field data by solving an inverse problem. *Scientific Reports*, 10(1): 28-40.
- Li Y. B., Liu Y., Nie W. B., and Ma X. Y. 2018. Inverse modeling of soil hydraulic parameters based on a hybrid of vector-evaluated genetic algorithm and particle swarm optimization. *Water*, 10(1): 84.
- Li C., Zhang C., Luo, G., Chen X., Maisupova B., Madaminov A. A., and Djenbaev B.M. 2015. Carbon stock and its responses to climate change in Central Asia. *Global Change Biology*, 21(5): 1951-1967.
- Liu K., Huang G., Jiang Z., Xu X., Xiong Y., Huang Q., and Šimůnek J. 2020. A Gaussian Process-based Iterative Ensemble Kalman Filter for parameter estimation of unsaturated flow. *Journal of Hydrology*, 125210.
- Liu Z. 2010. Bimodality in a monostable climate–ecosystem: the role of climate variability and soil moisture memory. *Journal of Climate*, 23(6): 1447-1455.
- Mahbod M., and Zand-Parsa S. 2010. Prediction of soil hydraulic parameters by inverse method using genetic algorithm optimization under field conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(1): 13-28.
- Mashayekhi P., Gorbani Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H., Panahi M., and Nouri M. R. 2016. Inverse estimation of the soil water retention curve parameters using double-ring infiltration data. *Applied Soil Research*, 4(2): 26-37. (In Persian)
- Moradkhani H., Hsu K.L., Gupta H., and Sorooshian S. 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41(5).
- Mousavi Dehmurdi A., Gorbani Dashtaki S., and Mashayekhi P. 2018. Performance of selected information models based on obtained data from double-ring and Hydrus-1D software. *Applied Soil Research*, 7(2): 182-195. (In Persian)
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool (SWAT), theoretical documentation. Blackland Research Center, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, TX.
- Nishat S., Guo Y., and Baetz B.W. 2007. Development of a simplified continuous simulation model for investigating long-term soil moisture fluctuations. *Agricultural Water Management*, 92(1-2): 53-63.
- Qu W., Bogen H.R., Huisman J.A., Martinez G., Pachepsky Y.A., and Vereecken H. 2014. Effects of soil hydraulic properties on the spatial variability of soil water content: Evidence from sensor network data and inverse modeling. *Vadose Zone Journal*, 13(12).

- Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Saxton K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5): 1316-1320.
- Russo D., Bresler E., Shani U., and Parker J. C. 1991. Analyses of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. *Water Resources Research*, 27(6): 1361-1373.
- Saadat S., and Homae M. 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management*, 152: 119-124.
- Saleh I., Kaviani A., Jafarian Z., and Ahmadi R. 2016. Estimation of final soil rate using fuzzy clustering algorithm, nero fuzzy (ANFIS) and fuzzy inference system (FIS) (a case study: Behshahr plain, Galougah, Mazandaran, Iran). *Applied Soil Research*, 4(2): 47-59. (In Persian)
- Sepaskhah A.R., and Bondar H. 2002. Estimating van genuchten soil water retention curve from some soil physical properties. *Iran Agricultural Research*, 21: 105-118. (In Persian)
- Šimůnek J., and Van Genuchten M. T. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 32(9): 2683-2696.
- Šimůnek J., Wendroth O., and Van Genuchten M.T. 1999. Soil hydraulic properties from laboratory evaporation experiments by parameter estimation. In Proc. Int. Workshop, Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, 713-724.
- Šimůnek J., Van Genuchten M.T., and Sejna M. 2006. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, 1.
- Šimůnek J., and Van Genuchten M.T. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 782-797.
- Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., and Van Genuchten M.T. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media; Version 4.17; Department of Environmental Sciences University of California Riverside: Riverside, CA, USA.
- Šimůnek J., Van Genuchten M.T., and Šejna M. 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7): vzj2016-04.
- Sprenger M., Volkmann T.H., Blume T., and Weiler M. 2015. Estimating flow and transport parameters in the unsaturated zone with pore water stable isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6): 2617-2635.
- Van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Walsum P.E.V., . and Van Diepen C.A. 1997. Theory of SWAP version 2.0; Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment (No. 71). DLO Winand Staring Centre.
- Van Dam J.C., Stricker J.N.M., and Droogers P. 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3): 647-652.
- Ventrella D., Castellini M., Di Prima S., Garofalo P., and Lassabatère L. 2019. Assessment of the physically-based Hydrus-1D model for simulating the water fluxes of a Mediterranean cropping system. *Water*, 11(8): 1657.
- Vereecken H., Weynants M., Javaux M., Pachepsky Y., Schaap M.G., and Genuchten M.T. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4): 795-820.
- Vereecken H., Huisman J.A., Pachepsky Y., Montzka C., Van Der Kruk J., Bogaen, H., . and Vanderborght J. 2014. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516: 76-96.
- Vogeler I., Carrick S., Cichota R., and Lilburne L. 2019. Estimation of soil subsurface hydraulic conductivity based on inverse modelling and soil morphology. *Journal of Hydrology*, 574: 373-382.
- Vrugt J.A., Stauffer P.H., Wöhling T., Robinson B.A., and Vesselinov V.V. 2008. Inverse modeling of subsurface flow and transport properties: A review with new developments. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 843-864.
- Wessolek G. 1989. Einsatz von Wasserhaushalts—Und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Schriftenreihe des FB 14. TU Berlin, 61: 164.

- Wang J., Gong S., Xu D., Juan S., and Mu J. 2013. Numerical simulations and validation of water flow and heat transport in a subsurface drip irrigation system using HYDRUS - 2D. *Irrigation and Drainage*, 62(1): 97-106.
- Yang X., and You X. 2013. Estimating parameters of van Genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 7(5): 1977.
- Yang Q., Zuo H., and Li W. 2016. Land Surface Model and Particle Swarm Optimization Algorithm Based on the Model-Optimization Method for Improving Soil Moisture Simulation in a Semi-Arid Region. *PloS One*, 11(3) .
- Zhang X., Srinivasan R., Zhao K., and Liew M.V. 2009. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(3): 430-441.

## Investigating the Effect of Optimizing Soil Hydraulic Parameters with Inverse and Parametric Solution Methods in Increasing the Accuracy of Water Movement Simulation with HYDRUS

Samaneh Etminan<sup>1</sup>, Vahidreza Jalali<sup>2\*</sup>, Majid Mahmoodabadi<sup>3</sup>, Abbas Khashei Siuki<sup>4</sup>, Mohsen Pourreza Bilondi<sup>4</sup>

(Received: March, 2020 Accepted: November, 2020)

### Abstract

Iran is located in arid and semi-arid belt of the earth and also because of drought, climate changes and mismanagement of water use; its freshwater resources are declining. Therefore, the need to increase water productivity is obviously rational. New methods of irrigation can be mentioned to increase the efficiency of water resources management. Management and application of these new methods of irrigation also requires studying the process of soil moisture changes and its availability to the plant. The purpose of this study was to evaluate the performance of HYDRUS-1D hydrological model at two different depths using inverse solution method in relation to pedo-transfer functions in four-year alfalfa farm which irrigated with center pivot irrigation system. Therefore in this study, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm (as inverse solution method) as well as three parametric functions including Rosetta, Gorbani Dashtaki and Homae, and Sepaskhah and Bondar were used to estimate soil hydraulic parameters in simulating soil movement and moisture distribution in HYDRUS-1D hydrological model. So, among the three parametric functions, the best function was selected and then the efficiency of the inverse solution method was compared to the parametric method in the process of simulating the unsaturated flow with the HYDRUS model. The results indicated the acceptable ability of PSO algorithm to estimate soil moisture characteristic curve and its hydraulic parameters. Also by evaluating the statistical indices, it was shown that by linking HYDRUS model with PSO algorithm, this model was efficient to estimate the trend of soil moisture changes. The best model performance was obtained in the soil upper layer with  $\hat{E} = 0.89$ ,  $d' = 0.94$  and  $R^2 = 0.98$ .

**Keywords:** HYDRUS Model, Inverse solution, Soil moisture characteristic curve

Etminan S., Jalali V.R., Mahmoodabadi M., Khashei Siuki A., and Pourreza Bilondi M. 2021. Investigating the effect of optimizing soil hydraulic parameters with inverse and parametric solution methods in increasing the accuracy of water movement simulation with HYDRUS. *Applied Soil Research*, 9(2): 15-30.

1. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman

2. Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Higher Education Complex of Shirvan

3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman

4. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand

\* Corresponding Author Email: [v.jalali@uk.ac.ir](mailto:v.jalali@uk.ac.ir)