برآورد هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه

فریبرز عباسی و فواد تاجیک[۱]

چکیده

برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی و پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس، عمدتاً به تحلیل‌های یک بعدی در آزمایشگاه و با فرض شرایط ماندگار محدود شده است. علت این امر، هزینه زیاد و دشواری‌های اندازه‌گیری، جمع آوری و توصیف تغییرات زمانی و مکانی داده‌های مزرعه‌ای می‌باشد. در این مقاله، ویژگی‌های هیدرولیکی و پارامترهای انتقال املاح از آزمایش‌های مزرعه‌ای با آبیاری جویچه‌ای در شرایط دو بعدی و غیر ماندگار برآورد شده است. سه آزمایش در جویچه‌های با انتهای بسته و زمان آبیاری مشابه با مقادیر مختلف آب و املاح نفوذ یافته ناشی از عمق آب ۶، ۱۰، و ۱۴ سانتی‌متر انجام گردیده است. دو آزمایش دیگر با مقادیر مشابه آب و املاح کاربردی و زمان آبیاری متفاوت در جویچه‌هایی با عمق آب ۶ و ۱۰ سانتی‌متر نیز انجام شد. هدایت آبی اشباع (K_s) و پارامترهای انتقال املاح در مدل تعادل فیزیکی جابه‌جایی- انتشار (CDE) و مدل غیر تعادلی روان - ساکن (MIM) به روش معکوس و با استفاده از الگوریتم شبیه سازی لونبرگ – مارکوارت و نرم افزار HYDRUS-2D بر آورد گردید. در حین بهینه سازی، داده‌های رطوبت خاک، نفوذ تجمعی و غلظت املاح در تابع هدف به کار رفت. مقادیر K_s بین ۰/۰۹۹۶ – ۰/۰۳۸۹ سانتی‌متر در دقیقه با ضریب تغییرات(CV) ۴۸ درصد متغیر بوده است. مقدار رطوبت ساکن برآورد شده(θ_{im}) کم و بیش در مقدار متوسط $0.025\ cm^3cm^{-3}$ ثابت ماند، در حالی‌که ضریب تبادل مرتبه اول(ω) بین $0.10\ min^{-1}$ تا ۱۹/۵۲ تغییر نمود. ضریب انتشار پذیری طولی (D_L) بین ۲/۶ تا ۳۲/۸ سانتی‌متر و ضریب انتشار پذیری عرضی (D_T) بین ۰/۰۳ تا ۲/۲۰ سانتی‌متر متغیر بود. مقادیر D_L تا حدی به عمق آب و زمان کاربرد آب و املاح در جویچه‌ها وابسته بود اما چنین وابستگی برای مقادیر K_s و دیگر پارامترهای انتقال مشاهده نگردید. تطابق میان شدت نفوذ برآورد و اندازه‌گیری شده قابل قبول بوده است، در حالی که مقدار رطوبت خاک بیشتر از مقدار واقعی و غلظت املاح کمتر از مقدار واقعی برآورد گردید. تفاوت میان مقادیر برآورد شده غلظت املاح توسط مدل‌های انتقال CDE و MIM نسبتاً اندک بوده است. این نکته و هم‌چنین مقدار پارامترهای بهینه شده نشانگر آن است که داده‌های مشاهده‌ای به قدر کافی با استفاده از مدل ساده CDE قابل تخمین بوده و رطوبت ساکن نقش مهمی در فرایند انتقال ایفا نمی‌نماید.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، حل معکوس، انتقال املاح، جریان آب

۱. اعضای هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

مقدمه

اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه توصیف و مدل‌سازی حرکت آب و املاح تحت شرایط کنترل شده، غالباً ماندگار و در مقیاس آزمایشگاهی در چند دههٔ اخیر به دست آمده ولی تعداد تحلیل‌های دقیق در مقیاس مزرعه‌ای اندک بوده است. علت این امر را می‌توان عمدتاً در هزینه‌ها و نیروی کارگری مورد نیاز و هم‌چنین پیچیدگی‌های ذاتی ناشی از ناهمگنی خاک در مقیاس مزرعه‌ای دانست. به عنوان مثال، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ممکن است حتی در فواصل کم تا چند برابر تغییر یابد (۴ و ۶) و لذا کاربرد آنها در مطالعات مزرعه‌ای دشوار است.

مدل‌های زیادی برای شبیه سازی جریان آب و انتقال املاح در محیط غیر اشباع وجود دارد. ادیسکات و واگنت (۳) مروری از مدل‌های انتقال یک بعدی ارائه نموده‌اند. آنان مدل‌ها را تحت عناوین قطعی(Deterministic) یا غیر قطعی(Stochastic)، مکانیستیک(Mechanistic) یا تابعی (Functional)، عددی یا تحلیلی و تحقیقاتی(Research) یا مدیریتی (Management) تقسیم بندی و مقایسه نموده‌اند. آنان هم‌چنین درجه پیچیدگی، انعطاف پذیری، تعمیم پذیری و مفید بودن مدل‌ها در شرایط مزرعه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل‌های یک بعدی جریان آب و انتقال املاح (۱۴ و ۲۷) برای بسیاری از شرایط کاربرد مفیدی دارد. اگر چه مدل‌های یک بعدی نسبت به مدل‌های دو بعدی، به تخصص برنامه نویسی، داده‌های ورودی، حافظه رایانه‌ای، و زمان محاسبه کمتری نیاز دارد، اما معمولاً نتایج آنها برای توصیف دقیق ویژگی‌های هندسی و بنابراین حرکت آب و املاح در حین آبیاری با روش‌های جویچه‌ای، قطره‌ای و لوله‌های تراوا کافی نیست و بررسی جریان و انتقال آب و املاح مستلزم به‌کارگیری مدل‌های چند بعدی می‌باشد.

در حال حاضر مدل‌های دو بعدی (۲۸) و سه بعدی (۲۴) زیادی وجود دارد که معادلات جریان را به روش‌های اجزای محدود، تفاضل محدود یا سایر روش‌های عددی حل می‌کند. مدل‌های چند بعدی برای مطالعه تأثیر تغییرات مکانی خاک بر جریان آب و انتقال املاح در مقیاس مزرعه‌ای مناسب تر هستند. لیکن کاربرد چنین مدل‌هایی در مزرعه به دلیل نیاز به داده‌های ورودی و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای زیاد و به تبع آن هزینه بر بودن آنها، محدود مانده است.

مدل HYDRUS-2D که توسط سیمیونک و همکاران (۲۸) ارائه شده است، یک مدل تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل جریان آب، انتقال املاح و گرما در شرایط دو بعدی بوده و قادر به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می‌باشد. در این مدل برای حل عددی معادلات حاکم، از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین و برای بهینه سازی پارامترها از روش لونبرگ- مارکوارت (۱۹) استفاده شده است. این مدل در بسیاری از مطالعات مزرعه‌ای و آزمایشگاهی (۱۷ و ۲۹) برای بهینه سازی و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن نسبتاً رضایت بخش بوده است. وانگ و همکاران (۳۵) با استفاده از این مدل تأثیر روش‌های مختلف آبیاری و تغییرات مکانی هدایت آبی اشباع را بر انتقال املاح در آبیاری جویچه‌ای مورد بررسی قرار دادند. مطالعات صورت گرفته در زمینه انتقال املاح در شرایط غیراشباع و در مقیاس مزرعه‌ای موید آن است که فرایند انتقال املاح به طور محسوسی از روش و رژیم آبیاری تأثیر می‌پذیرد (۵، ۱۵ و ۳۵). در یک بررسی جامع، عباسی و همکاران (۱) نشان داده‌اند که عمق جریان و مدت زمان آبیاری و کاربرد املاح نقش مهمی در انتقال و توزیع رطوبت و املاح در زیر جویچه‌ها دارد.

هدف اصلی این مطالعه، برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انتقال املاح در جویچه‌های انتها بسته و تحت شرایط غیر ماندگار بوده است. با فرض همگن بودن خاک، قابلیت‌های مدل HYDRUS-2D برای تخمین K_s و پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس در مدل‌های جابه‌جایی- انتشار یا CDE (Convection – Dispersion Equation) و روان – ساکن یا MIM (Mobile – Immobile Model) مورد استفاده قرار

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق (cm)	افق خاک	بافت خاک	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	هدایت الکتریکی (dS/m)	pH
۰–۳۳	Ap	لوم شنی	۷۴/۶۶	۹/۳۴	۱۶/۰۰	۱/۴۹	۰/۹۳	۷/۶۵
۳۳–۵۸	Btkn1	لوم شنی	۷۶/۷۳	۸/۲۷	۱۵/۰۰	۱/۵۶	۰/۷۷	۷/۹۶
۵۸–۷۱	Btkn2	لوم شنی	۷۲/۳۴	۱۱/۹۴	۱۵/۷۲	۱/۵۰	۰/۶۳	۷/۷۵
۷۱–۱۲۵	Btkn3	لوم شنی	۷۱/۱۶	۱۲/۶۷	۱۶/۱۷	۱/۴۱	۷۰/۰	۷/۸۵

گرفت. مدل CDE در شرایط جریان نسبتاً یک‌نواخت صادق است اما مدل MIM برای شرایط غیر یک‌نواخت و جریان ترجیحی در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

۱. آزمایش‌های مزرعه‌ای

پنج آزمایش مزرعه‌ای در جویچه‌های انتها بسته در مرکز تحقیقات کشاورزی ماریکوپا در منطقه فینیکس ایالت آریزونا بر روی خاک لوم شنی فاقد پوشش گیاهی انجام شد. آزمایش‌ها در کرت‌هایی با سه جویچه به طول ۳ متر، عمق تقریبی ۲۰ سانتی‌متر و فاصله یک متر انجام گردید. جویچه وسط هر کرت، غیر چرخ رو بوده است که از آن داده برداری شده وبا جویچه‌های چرخ رو در طرفین آن احاطه شده است. جزئیات آزمایش‌ها را در مقاله عباسی و همکاران (۱) می‌توان یافت.

مشخصات عمومی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

در این تحقیق، دو سری آزمایش انجام گردید. در سری اول، سه آزمایش با عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر و مدت زمان کاربرد یکسان آب و املاح یا SD (Same Duration) اجرا گردید. آبیاری اول به مدت ۹۰ دقیقه و در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول، آبیاری در مدت ۶۰ دقیقه (برای هر سه عمق) به منظور خیس کردن نیمرخ خاک صورت گرفت. در مرحله دوم، آب با بروماید کلسیم ($CaBr_2$) مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه به‌طور یکسان در هر سه آزمایش به کار رفت. در پایان مراحل اول و دوم، آب باقی‌مانده در جویچه‌ها تخلیه و اندازه‌گیری شد. در ادامه این مقاله همه جا منظور از غلظت املاح، غلظت بروماید می‌باشد.

سری دوم آزمایش‌ها شامل کاربرد مقادیر مشابه آب و املاح یا SWS (Same Water and Solute)بود. مقدار آب مصرفی در این آزمایش‌ها مشابه مقدار آب نفوذ یافته در عمق آبیاری ۱۴cm در آزمایش‌های SD بود. آزمایش‌ها با عمق آب آبیاری ۶ و۱۰ سانتی‌متر اجرا شدند. آبیاری اول مشابه با سناریوی SD در دو فاز آب خالص و آب همراه با بروماید کلسیم انجام شد با این تفاوت که مدت آبیاری برای هر عمق بر اساس آزمایش قبلی با ۱۴ cm آب نفوذ یافته تنظیم گردید. در همه آزمایش‌ها، از غلظت یکسان بروماید (۱۰ گرم بر لیتر) استفاده گردید.

مجموعه‌ای پنج تایی از لوله‌های نوترون متر به طول ۳/۳ متر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در فواصل مختلف از محور جویچه اصلی کار گذاشته شد. لوله‌های نوترون متر در دو ردیف با فاصله ۵۰ سانتی‌متر به منظور جلوگیری از تأثیر متقابل قرائت‌ها نصب گردید. نوترون متر مورد استفاده در شرایط مزرعه واسنجی شده و برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفت. قرائت‌ها در عمق ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۴۰، ۱۸۰، ۲۲۰، ۲۶۰ سانتی‌متری قبل از هر آبیاری (شرایط اولیه)، بلافاصله بعد از هر آبیاری، و هر یک ساعت تا ۶ ساعت پس از شروع آزمایش و سپس هر ۳ ساعت تا ۲۴ ساعت بعد از هر آبیاری صورت گرفت. سپس ۳ تا ۴ قرائت در هر روز تا روز سوم و ۱ تا ۲ قرائت در هر روز تا آبیاری بعدی انجام شد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

به دلیل خطای نوترون متر، رطوبت لایه سطحی خاک (۳۰-۰ cm) با استفاده از TDR و در زمان‌های مشابه نوترون متر اندازه‌گیری شد.

نمونه برداری خاک برای اندازه‌گیری غلظت برومایـد در عمق‌ها و مکان‌های مشابه با نوترون متر و در ۴ نوبت، قبل از آغاز آزمایش (مقادیر اولیه)، ۵ روز بعد از آبیاری اول و ۶ و ۲۰ روز بعد از آبیاری دوم صورت گرفت. نمونه‌های خاک در هوا خشک گردید و سپس از الک ۲ میلیمتری عبور داده شد. مقدار بروماید در عصاره ۱:۱ خاک و با استفاده از روش رنگ سنجی استاندارد توسط دستگاه یون سنج Lachat Quikchem اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، ۳۸ نمونه خاک دست نخورده (استوانه به طول ۶ و قطر ۵/۴ سانتی‌متر) به طور تصادفی از عمق‌ها و مکان‌های متفاوت (تا ۱۰۰ سانتی‌متر) جمع آوری و برای تعیین منحنی رطوبتی در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور برآورد حجم آب مورد نیاز برای پر کردن مقطع جویچه و هم‌چنین محاسبه پارامترهای مورد نیاز در مدل HYDRUS-2D، سطح مقطع جویچه‌ها قبل از هر آبیاری در دو نقطه تعیین گردید. برای آنکه در حین آزمایش، آبیاری تنها منبع تأمین آب باشد، کرت‌های آزمایشی هنگام بارندگی با صفحات پلاستیکی پوشانده شد. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (در فاصله ۱۵۰ متری مزرعه) و روش پنمن- مانتیس برآورد گردید. آزمایش‌های SWS و SD به ترتیب در ۳۰ ژانویه و ۲۶ فوریه ۲۰۰۱ آغاز و بعد از ۳۰ روز به اتمام رسید.

۲. مدل

الف) جریان آب

برای بررسی جریان آب در محیط متخلخل از معادله دو بعدی ریچاردز استفاده شده است. منحنی رطوبتی خاک $\theta(h)$ با معادله وان گنوختن (۳۱) و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک $K(h)$ با مدل کاپیلاری معلم (۲۱) مطابق روابط زیر به دست آمده است.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad [1]$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad [2]$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad m = 1 - \frac{1}{n} \quad , \quad n > 1 \quad [3]$$

که در آن، θ_r رطوبت باقی‌مانده (L^3L^{-3})؛ θ_s رطوبت اشباع (L^3L^{-3})؛ S_e اشباع نسبی؛ و α، l، n و m پارامترهای تجربی هستند. l، n و m پارامترهای بی بعد و α دارای بعد L^{-1} است. مقادیر θ_r و θ_s از Rosetta برآورد گردیده و به عنوان مقادیر ثابت برای تخمین α و n از داده‌های اندازه‌گیری شده در RETC مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل دشواری‌های اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی، K_s از داده‌های مزرعه‌ای رطوبت خاک و نفوذ تجمعی با استفاده از حل معکوس پارامترها به کمک HYDRUS-2D برآورد گردید.

ب) انتقال املاح

مدل فیزیکی غیر تعادلی جابه‌جایی- انتشار که به عنوان مدل روان- ساکن (MIM) یا مدل دو ناحیه‌ای نیز شناخته می‌شود، برای انتقال املاح واکنش ناپذیر در محیط متخلخل توسط وان گنوختن و واگنت (۳۲) و کلوتیر و همکاران (۸) به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{\partial(\theta_m C_m)}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\theta_m D_{ij} \frac{\partial C_m}{\partial x_j}) - \frac{\partial(q_i C_m)}{\partial x_i} \quad [4]$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \omega(C_m - C_{im}) \quad [5]$$

که در آن: θ_m، رطوبت ناحیه روان (L^3L^{-3})، θ_{im}، رطوبت ناحیه ساکن (L^3L^{-3})، C_m، غلظت املاح موجود در ناحیه روان (ML^{-3})، C_{im}، غلظت املاح موجود در ناحیه ساکن (ML^{-3})، ω، ضریب تبادل مرتبه اول (T^{-1})، q_i، شدت جریان (LT^{-1}) و Dij، تانسور ضریب انتشار (L^2T^{-1}) است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta_m D_{ij} = D_T |q_i \delta_{ij}| + (D_L - D_T) \frac{q_i q_j}{|q|} + \theta_m D_0 \tau_0 \delta_{ij} \quad [6]$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

که در آن: D_0، ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد (L^2T^{-1})؛ τ_0، عامل خمیدگی خلل و فرج خاک (بدون بعد)؛ δ_{ij}، تابع دلتای کرونکر؛ D_L، ضریب انتشار پذیری طولی(L)؛ و D_T ضریب انتشار پذیری عرضی(L) است. با فرض فقدان ناحیه ساکن ($\theta_{im} = 0$) روابط ۴ و ۵ به صورت معادله استاندارد CDE ساده می‌شود:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial(q_i C)}{\partial x_i} \qquad [۷]$$

ج) شرایط اولیه و مرزی

غلظت برومایـد و رطوبـت انـدازه‌گیـری شـده خـاک قبـل از آزمایش، به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. عمـق جریـان در حین آبیاری جویچه‌ها و شرط مرزی اتمسفری بعد از آبیاری (حین توزیع مجدد رطوبت) به عنوان شرط مرزی بالادست در نظر گرفته شد. از متوسط شدت تبخیر و تعرق مرجع و بـرآورد شده به روش پنمن مانتیس بـه عنـوان شـرط مـرزی اتمـسفری استفاده گردید. شرط کوچی (Cauchy) برای مرز بـالایی انتقـال املاح، زهکشی آزاد برای حرکت آب و املاح در مرز پایینی، و شرط مرزی بدون شدت جریان در طـرفین جویچـه‌هـا در نظـر گرفته شد.

۳. بهینه سازی معکوس

حل معکوس بر پایه حل عددی معادلـه ریچـاردز و مـدل‌هـای MIM یا CDE (معادله ۴ و ۷) با استفاده از روش بهینـه سـازی لـونبرگ – مـارکوارت (۱۹) صـورت گرفتـه اسـت. رطوبـت اندازه‌گیری شده خاک، داده‌های نفـوذ و غلظـت برومایـد بـرای تخمـین هـم‌زمـان K_s و پارامترهـای معـادلات CDE و MIM $(D_L, D_T, \omega, \theta_{im})$ در حل معکوس به کار گرفتـه شـد. سـایر پارامترها (به ویژه پارامترهای هیـدرولیکی مـدل وان گنـوختن) طی بهینه سازی ثابت در نظـر گرفتـه شـده کـه مقـدار آنهـا در جدول ۲ آورده شده است. به منظور افزایش احتمال دست‌یـابی به مقدار کمینه تابع هدف، هر شبیه سازی معکـوس حـداقل بـا سه حدس اولیه صورت گرفت.

مقادیر K_s و پارامترهای انتقال املاح به طور هم‌زمان برآورد گردید تا تأثیر متقابل جریان آب و پارامترهای انتقال امـلاح نیـز در نظر گرفته شود (۳۰). بر اساس آنالیز حساسیت انجـام شـده (۲) K_s یکی از حساس ترین ویژگی‌های هیـدرولیکی خـاک در مزرعه مورد مطالعه بود که در بهینه سـازی مـورد اسـتفاده قـرار گرفتـه اسـت. در ایـن روش، همـه داده‌هـای موجـود بـه طـور هم‌زمان به کـار مـی‌رود و لـذا نتـایج آن دارای خطـای بـرآورد کمتری نسبت به تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال امـلاح در دو گام زمانی متـوالی مـی‌باشـد (۲۰ و ۲۹). نـسخهٔ موجـود HYDRUS-2D قادر است به طور هم‌زمان ۱۵ پـارامتر مختلـف از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، جذب آب توسـط ریـشه و یـا پارامترهای انتقال املاح را برآورد نماید. بـا ایـن حـال، تخمـین پارامترهای کمتر توصیه می‌شود. تعداد پارامترهایی که هـم‌زمـان می‌توانند بهینه شوند به کمیت و کیفیـت داده‌هـای انـدازه‌گیـری شده بستگی دارد.

نتایج و بحث

پارامترهای معادله وان گنـوختن شـامل θ_r، θ_s و n از مقـادیر اندازه‌گیری شده رطوبت $\theta(h)$ با استفاده از برنامـه کـامپیوتری RETC (۳۳) برآورد گردید. پارامترهای بهینـه شـده، مجمـوع مربع باقی‌مانده‌ها (SSQ) و هم‌بستگی میـان مقـادیر بـرآورد و مشاهده شده در جدول ۲ آمده اسـت. مقـدار بهینـه θ_r کمـی بیشتر از رطوبت اندازه‌گیری شده در سطح خاک (۲۰-۰ cm) در انتهای آزمایش‌ها ($۰/۰۹ \ cm^3cm^{-3}$) بوده است. بـه همـین دلیل، مقدار θ_r با استفاده از مدل Rosetta نیز محاسبه گردیـد (۲۶). مدل RETC حاوی مقـادیر بـرازش یافتـه بـر داده‌هـای انـدازه‌گیـری شـده اسـت در حـالی کـه در مـدل Rosetta ویژگی‌های هیدرولیکی از مشخصات زودیافت خـاک بـرآورد گردیده و منحنی رطوبتی بر اسـاس آن ویژگـی‌هـا بـه دسـت می‌آید. مقادیر θ_r و θ_s از مدل Rosetta برآورد گردیده و بـه عنـوان مقـادیر ثابـت بـرای تخمـین α و n از داده‌هـای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

جدول ۲. ویژگی‌های هیدرولیکی مدل وان گنوختن به دست آمده از مدل RETC و Rosetta

روش	θ_r (cm^3cm^{-3})	θ_r (cm^3cm^{-3})	α (cm^{-1})	n	SSQ^a	R^2
RETC	۰/۱۰	۰/۴۳۳	۰/۰۷۵۸	۱/۴۷۸	۰/۲۷۳	۰/۹۲
Rosetta	۰/۰۶۵	۰/۴۰۷	۰/۰۵۴۵	۱/۵۰۳	–	–
RETC+Rosetta	۰/۰۶۵[b]	۰/۴۰۷[b]	۰/۰۶۸۹	۱/۳۷	۰/۳	۰/۹۱

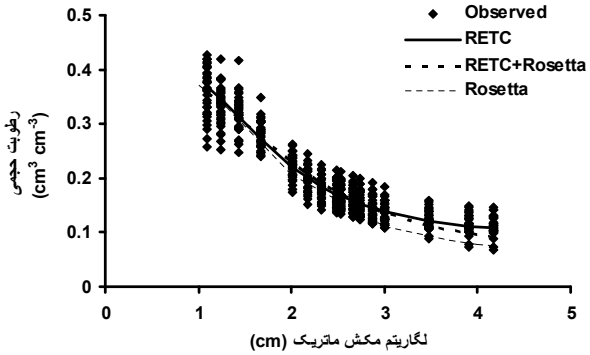
a : مجموع مربع باقی‌مانده‌ها b : برآورد شده با Rosetta و به کار رفته به عنوان مقدار ثابت در بهینه سازی RETC

جدول ۳. خلاصه مقادیر بهینه K_s و پارامترهای مدل CDE و MIM در آزمایش‌های مختلف.

مقادیر بهینه شده پارامترهای مدل CDE در پرانتز آمده است.

	آزمایش	K_s (cm min^{-1})	θ_s (cm^3cm^{-3})	ω (day^{-1})	D_L (cm)	D_T (cm)	SSQ	R^2
SD[a]	کرت ۱(۶ cm)	۰/۰۳۹۴(۰/۰۳۸۹)	۰/۰۲۹	۱۹/۵۲	۳۲/۸(۱۸/۳)	۰/۰۷(۰/۰۳)	۱/۶۹(۱/۶۹)	۰/۹۹(۰/۹۹)
	کرت ۲(۱۰ cm)	۰/۰۳۹۶(۰/۰۳۹۲)	۰/۰۱۰	۰/۱۰	۱۶/۸(۱۷/۰)	۰/۸۱(۰/۴۰)	۳/۴۸(۴/۲۲)	۰/۹۹(۰/۹۹)
	کرت ۳(۱۴ cm)	۰/۰۴۹۷(۰/۰۴۹۷)	۰/۰۵۷	۴/۱۱	۱۳/۵(۱۲/۵)	۰/۰۵(۰/۰۴)	۶/۴۰(۶/۳۲)	۰/۹۸(۰/۹۸)
SWS[b]	کرت ۴(۶ cm)	۰/۰۴۵۶(۰/۰۴۳۶)	۰/۰۱۰	۷/۸۷	۷/۹(۸/۳)	۰/۰۴(۰/۰۷)	۸/۷۳(۸/۹۳)	۰/۹۹(۰/۹۹)
	کرت ۵(۱۰ cm)	۰/۰۹۵۷(۰/۰۹۹۶)	۰/۰۲۰	۱۱/۲۰	۳/۷(۲/۶)	۲/۱۰(۲/۲۰)	۳/۲۳(۳/۵۰)	۰/۹۹(۰/۹۹)
CV (%)		۴۳/۹(۴۷/۵)	۷۶/۸	۸۶/۴	۷۴/۷(۵۵/۱)	۱۴۵(۱۷۰)	–	–

a : آزمایش‌های با زمان آبیاری مشابه (SD) b : آزمایش‌های با کاربرد مقادیر مشابه آب و املاح(SWS)



شکل ۱. مقادیر مشاهده و برازش شده منحنی رطوبتی با مدل RETC ، Rosetta و ترکیب مدل‌های RETC و Rosetta.

اندازه‌گیری شده در RETC مورد استفاده قرار گرفت (روش سوم در جدول ۲).

مقادیر θ_r، θ_s و α برآورد شده توسط Rosetta کمتر از مقادیر تخمینی RETC بود، در حالی که هر دو مدل مقدار تقریباً مشابهی برای n برآورد نمودند. تخمین θ_r و θ_s توسط Rosetta به خوبی با مقادیر گزارش شده توسط کارسل و پاریش (۷) مطابقت داشت. در نتیجه ترکیبی از مدل‌های RETC وRosetta برای نهایی کردن پارامترهای هیدرولیکی استفاده شد (شکل ۱).

مقادیر نهایی بهینه شده K_s و پارامترهای انتقال معادله‌های MIM و CDE برای آزمایش‌های مختلف در جدول ۳ خلاصه شده است. نکته قابل توجه آن است که پارامترهای بهینه شده و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

مجموع مربع باقی‌مانده‌ها (SSQ) در مدل‌های MIM و CDE در کرت‌های مختلف (به جز پارامتر D_L در کرت ۱) خیلی به هم نزدیک هستند که نشانگر اثر اندک آب ساکن در داده‌های این تحقیق بوده است.

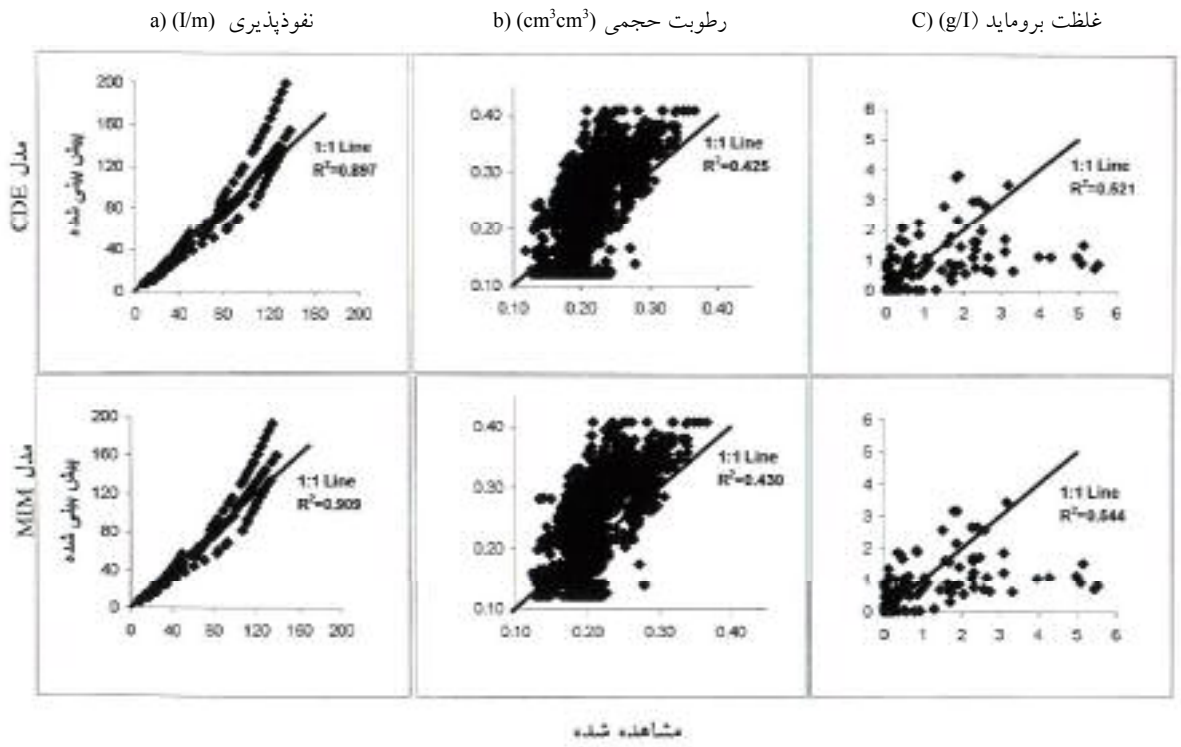
برآورد K_s کم و بیش برای همه آزمایش‌ها (به جز کرت ۵ که تقریبا دو برابر سایر آزمایش‌هاست) یکسان بود. این نتایج با مشاهدات مزرعه‌ای مطابقت داشته است. در حین آبیاری دوم، حجم آب نفوذ یافته در مدت زمان تقریباً یکسان، در کرت‌های ۳ و۵ (با عمق آب ۱۴ و ۱۰ سانتی‌متر) مشابه بوده است. اما بر خلاف انتظار، زمان کاربرد کوتاه‌تری برای کرت ۵ که عمق آب کمتری داشت مشاهده گردید. برآورد K_s به عدد گزارش شده توسط کارسل و پاریش (۷) و اسخاپ و همکاران (۲۵) درخاک‌های لوم شنی نزدیک بوده است. نتایج بهینه سازی، هم‌بستگی کمی بین K_s و سایر پارامترها را نشان داد. ضرایب هم‌بستگی در کرت‌های مختلف، اغلب کمتر از ۰/۰۵ بوده است.

علی رغم نتایج مطالعات اخیر (۱۳ و ۳۴) و پیشنهاد اینکه وجود آب ساکن نقش مهمی در مدل سازی انتقال املاح در مقیاس مزرعه‌ای دارد، در این تحقیق مقادیر نسبتاً کمی برای θ_{im} برآورد شد (جدول ۳) که می‌توان نتیجه گرفت آب ساکن نقش مهمی در این مطالعه نداشته و پخشیدگی و انتشار، فرایندهای اصلی انتقال بوده‌اند. این نتیجه ممکن است به علت درشت بافت بودن خاک به دست آمده باشد. مقادیر θ_{im} برای کرت‌های مختلف بین ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۵۷ متغیر بوده است. مقادیر ضریب تبادل مرتبه اول ω بسیار متفاوت (درصد CV = ۸۶/۴) و یک تا دو برابر مقادیر گزارش شده مطالعات قبلی در شرایط آزمایشگاه (۱۲ و ۱۸) و مزرعه (۱۳ و ۱۶) بوده است (جدول ۳). مقدار زیاد پارامتر ω نشانگر تبادل سریع املاح بین دو ناحیه روان و ثابت می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که حتی با وجود مقدار کم آب ساکن، جابه‌جایی املاح بین دو ناحیه چنان به سرعت انجام شده که تفاوت فرایندهای انتقال بین مدل‌های MIM و CDE غیر قابل تشخیص گشته است. سایر مطالعاتی که مدل دو ناحیه‌ای و یا پارامترهای MIM را مورد بررسی قرار داده‌اند (۱۶ و ۱۸) معمولاً شامل مدل‌های یک بعدی بوده و غالباً در شرایط جریان ماندگار یا نزدیک به آن صورت گرفته است. برای تأیید نتایج این تحقیق، بررسی جریان دو بعدی در شرایط غیرماندگار مورد نیاز بود که در بررسی منابع یافت نشد.

مقادیر بهینه D_L بین ۲/۶ تا ۳۲/۸ سانتی‌متر و D_T بین ۰/۰۳ تا ۲/۲۰ سانتی‌متر بوده است (جدول ۳). مقادیر D_L قدری بیشتر از مقادیر به دست آمده در شرایط آزمایشگاهی (۲–۰/۵ cm) و آزمایش‌های یک بعدی در شرایط ماندگار (۲۰–۵ cm) بوده است اما با مقادیر گزارش شده توسط بومن و رایس (۵) و جینس و همکاران (۱۵) با رژیم آبیاری غرقابی منقطع و پیوسته در آزمایش‌های مزرعه‌ای در همین منطقه مشابه بود. مقادیر D_L برآورد شده با مدل CDE یک بعدی توسط جینس و همکاران (۱۵) برابر ۲۲/۸– ۱۳/۸ سانتی‌متر بوده است. مقادیر برآورد شده D_L و D_T با مقادیر گزارش شده توسط فورر و همکاران (۹) نیز قابل مقایسه می‌باشد. آنها مقادیر ۱۱/۷۳–۰/۶۶ cm را برای D_L و مقادیر ۶/۵۹–۰/۳۳ cm را برای D_T گزارش نموده‌اند. به نظر می‌رسد مقادیر نسبتاً بزرگ D_L و D_T در برخی کرت‌ها به علت رفتار ذاتا دو بعدی فرایند انتقال املاح و جریان جانبی موجود در جویچه‌ها بوده است (۱). تغییرات مکانی رطوبت خاک و رطوبت کمتر در برخی موارد، باعث تفاوت برآوردها شده است. مقدار نسبتاً زیاد D_T در کرت ۵ ممکن است به دلیل افزایش حرکت جانبی آب و املاح در جویچه‌ها باشد. مقادیر غلظت مشاهده شده توسط عباسی و همکاران (۱) توزیع جانبی قابل توجه املاح به ویژه در کرت‌های SWS را تأیید می‌کند. علاوه بر این، D_T نسبت به سایر پارامترهای بهینه شده، دارای ضریب تغییرات (CV) بیشتری می‌باشد (جدول ۳). تحلیل حساسیت در مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مدل‌های عددی به تغییرات D_T (۹) نسبت به D_L (۹ و ۳۴) حساسیت بیشتری دارند. ضریب هم‌بستگی میان D_L و D_T حدود ۰/۲۵ بوده است. به طور کلی، دامنه تغییرات نسبتاً وسیع مقادیر بهینه شده D_T در دامنه اطمینان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]



شکل ۲. مقادیر مشاهده و برآورد شده نفوذ تجمعی، رطوبت خاک، و غلظت بروماید در همه کرت‌های آزمایشی با استفاده از مدل‌های انتقال CDE و MIM.

آماری ۰/۹۵ نشان می‌دهد که آزمایش‌های این تحقیق، داده‌های کافی برای تخمین قابل اعتماد این پارامتر فراهم نمی‌کند.

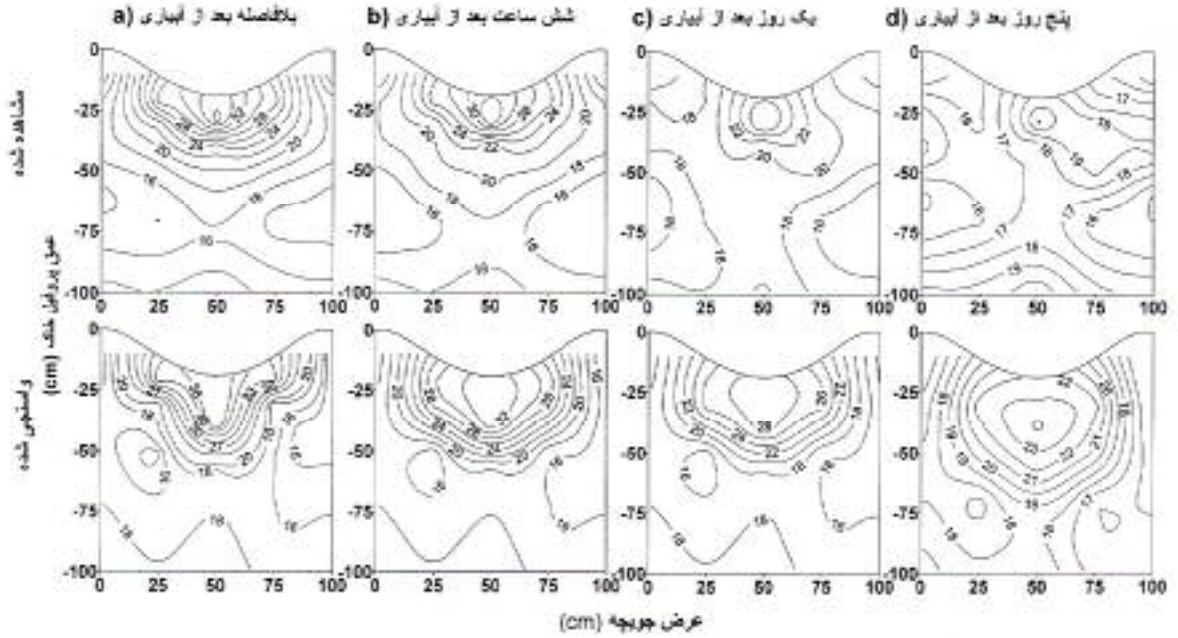
با توجه به توصیف کرت‌ها که در بخش مواد و روش‌ها ارائه گردیده، به نظر می‌رسد بین مقادیر تخمینی D_L (ستون ششم جدول ۳) و عمق آب داخل جویچه‌ها و زمان کاربرد آب و املاح (ستون اول و دوم جدول ۳) رابطه‌ای وجود دارد. در مجموع، مقادیر D_L به دست آمده در کرت‌های SD (با رطوبت کمتر) بیشتر از کرت‌های SWS (با رطوبت بیشتر) بوده است. این نتیجه با تحلیل نظری صورت گرفته توسط روسو (۲۲ و ۲۳) که افزایش ضریب انتشار پذیری را در رطوبت‌های کم و تغییرات مکانی زیاد آن نشان می‌دهد، مطابقت دارد. هم‌چنین ، D_L به عمق آب داخل جویچه‌ها و زمان کاربرد آب و املاح وابستگی نشان داد. هرچند، تفکیک اثر عمق آب یا زمان کاربرد و تغییرات خصوصیات خاک بر D_L چندان ساده نیست.

مطالعات نظری و آزمایشگاهی نشان داده است که ضریب انتشار پذیری در محیط‌های متخلخل مشابه در مقیاس مزرعه‌ای نسبت به مقیاس آزمایشگاهی آن چند برابر بیشتر است (۱۱) و متناسب با بزرگ شدن مقیاس افزایش می‌یابد (۱۰ و ۱۱). مقادیر مشاهده شده ضریب انتشار پذیری طولی در ۵۹ خاک و آبخوان مختلف، بین 10^{-2} تا 10^{4} متر برای مقیاس‌های 10^{-1} تا 10^{5} متر بوده است (۱۱).

مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی، رطوبت خاک و غلظت بروماید در ۵ کرت آزمایشی با مقادیر برآورد شده آنها توسط پارامترهای بهینه شده، در شکل ۲ آمده است. داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذپذیری به طور قابل قبولی(R^2 = ۰/۹۵) با مقادیر برآورد شده مطابقت داشت. اما تطابق میان رطوبت و غلظت‌های اندازه‌گیری شده با برآورد آنها کمتر بود. در اغلب موارد، مقادیر رطوبت، بیشتر و مقادیر غلظت، کمتر از حد واقعی برآورد گردید. بیش برآورد رطوبت ممکن است به دلیل تعیین بیش از حد واقعی رطوبت اشباع در آزمایشگاه باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]



شکل ۳. مقادیر رطوبت واسنجی و مشاهده شده در کرت ۱ در زمان‌های مختلف پس از آبیاری اول. نتایج آبیاری دوم (ارائه نشده) کم و بیش با آبیاری اول مشابه بوده است.

وجود θ_S و سایر پارامترهای هیدرولیکی در بهینه سازی می‌تواند منجر به بهبود نتایج مدل گردد. مدل‌های انتقالCDE و MIM در اغلب موارد از نظر تطابق مقادیر واقعی با برآورد مشابه بود (شکل ۲ و ۴). باید توجه داشت که R^2ارائه شده در شکل ۲، ضریب هم‌بستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردها را برای همه داده‌های بهینه سازی (هر۵ کرت) نشان می‌دهد در حالی که R^2 ارائه شده در جدول ۳ مربوط به نوع خاصی از داده‌ها (نفوذ، رطوبت و غلظت) در یک بهینه سازی واحد می‌باشد.

برخی مقایسه‌ها بین مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک و غلظت املاح و برآورد آنها برای کرت ۱ در شکل‌های ۳ و ۴ ارایه گردیده است. کرت ۱ به علت تفاوت نسبتاً زیاد بین پارامترهای بهینه شده مدل‌هایCDE و MIM در آن (جدول ۳) برای مقایسه انتخاب شده است. مطابقت نسبتاً خوبی میان مقادیر واسنجی و مشاهده شده رطوبت در فاز توزیع مجدد (شکل ۳b و ۳c) دیده می‌شود اما رطوبت در فاز نفوذپذیری (شکل ۳a) و هم‌چنین در شرایط خشک‌تر (شکل ۳d) بیشتر از حد واقعی برآورد شده است.

تطابق میان غلظت اندازه‌گیری شده املاح و برآورد آن در نزدیکی سطح خاک ضعیف و برآورد مدل کمتر از مقدار واقعی آن بوده است. اما نتایج در لایه‌های پایین بسیار بهتر بود (شکل ۴). علی‌رغم برآورد کمتر غلظت حداکثر، مدل به خوبی توانست در زمان‌های مختلف محل پیشروی جبهه املاح را تخمین بزند.

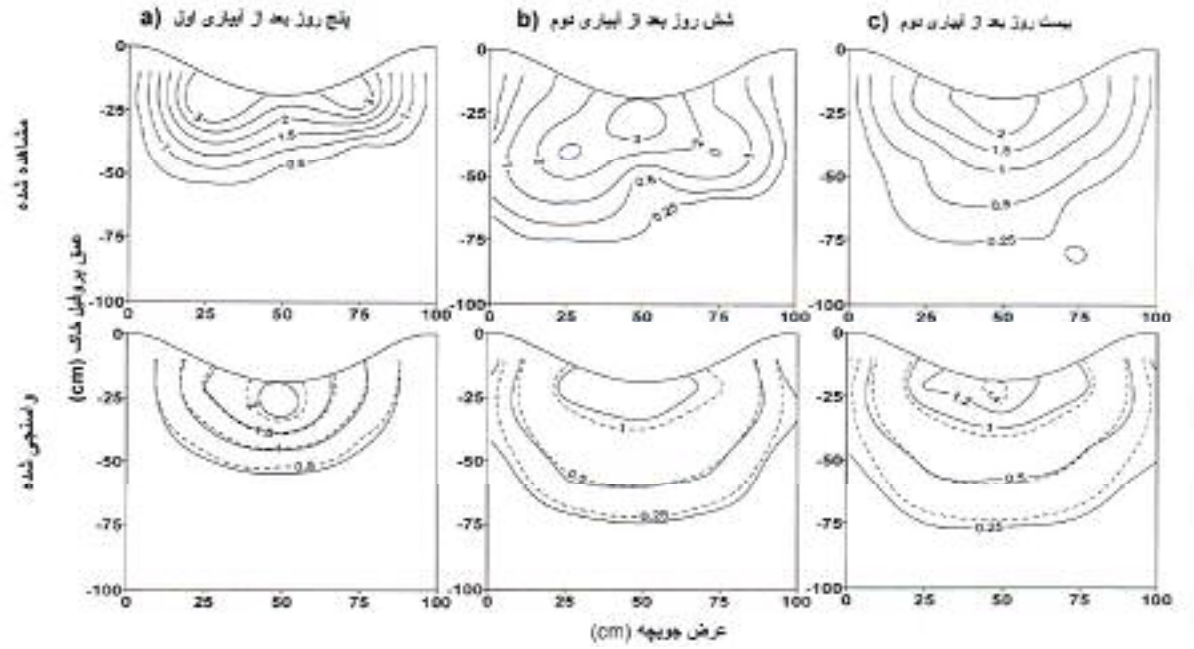
با وجود اختلاف زیاد میان مقادیر بهینه شده پارامترها با مدل‌هایMIM وCDE در کرت ۱ (جدول ۳) تفاوت محسوسی میان برآوردهای آنها (شکل ۴) دیده نشد. این نتیجه مجدداً حساسیت کم مدل‌های انتقال املاح به ضریب انتشارپذیری طولی در شرایط مزرعه را نشان می‌دهد که با یافته‌های ونترلا و همکاران (۳۴) در جریان یک بعدی و فورر و همکاران (۹) در جریان دو بعدی مطابقت دارد.

جمع بندی

در این پژوهش، مدل HYDRUS-2D همراه با الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ- مارکوارت برای تخمین معکوس هدایت

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]



شکل ۴. غلظت‌های واسنجی و مشاهده شده املاح در کرت ۱ در زمان‌های مختلف نمونه برداری خاک (خط نقطه چین: مدل CDE، خط پیوسته: مدل MIM).

هیدرولیکی اشباع و پارامترهای انتقال مدل‌هایMIM وCDE از آزمایش‌های انتقال املاح و جریان آب در مقیاس مزرعه‌ای و در شرایط غیر ماندگار استفاده شده است. پارامترهای بهینه شده، بخصوص هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب انتشارپذیری، با مقادیر گزارش شده مطالعات قبلی در مقیاس مزرعه‌ای تطابق خوبی داشته است. نتایج نشان داد که آب ساکن (θ_{im}) احتمالاً به علت بافت نسبتا درشت خاک مورد مطالعه نقش مهمی را ایفا نمی‌کند. مقدار θ_{im} در آزمایش‌های مختلف کم و بیش یکسان و دارای حد متوسط ۰/۰۲۵ cm^3cm^{-3} بوده است. ضریب تبادل مرتبه اول بیش تر از مقادیر گزارش شده در مطالعات آزمایشگاهی و مزرعه‌ای بود. این نتیجه، تبادل سریع املاح را با همه آب ساکن موجود در پروفیل خاک نشان می‌دهد و بنابراین اثر آب ساکن در این تحقیق نسبتاً ناچیز بوده است. این نتیجه‌گیری با تفاوت‌های اندک در برآورد غلظت املاح توسط مدل‌های انتقال MIM وCDE نیز تأیید شده است.

مقادیر برآورد ضریب انتشارپذیری طولی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی بوده است اما با مقادیر مزرعه‌ای مشابهت داشت. ضریب انتشارپذیری طولی به عمق آب در جویچه‌ها و زمان کاربرد آب و املاح وابستگی داشت، اما تأثیر عمق آب برضریب انتشارپذیری عرضی، رطوبت ساکن و ضریب تبادل جرمی مرتبه اول قابل توجه نبوده است. تطابق میان برآورد داده‌های نفوذپذیری و مقادیر اندازه‌گیری شده آن به طور کلی رضایت بخش بود. سازگاری میان مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک و غلظت املاح نسبتاً ضعیف تر بود. برآورد هم‌زمان پارامترهای انتقال و خصوصیات هیدرولیکی خاک دارای این مزیت است که بهینه سازی در یک مرحله قابل انجام است.

تحقیق حاضر با فرض همگنی نیمرخ خاک انجام شده است. در نظر گرفتن لایه بندی خاک و به کار بردن روش Scaling برای توصیف تغییرات مکانی خصوصیات هیدرولیکی و انتقال در خاک و به دنبال آن، برآورد پارامترهای هیدرولیکی و سپس پارامترهای انتقال املاح در دو گام زمانی مختلف ممکن است سبب بهبود برآوردها گردد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., F. J. Adamsen, D. J. Hunsaker, J. Feyen, P. Shouse and M. Th. Van Genuchten. 2003. Effects of water depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis. J. Irrig. Drain. Eng. 129(4): 237-246.
2. Abbasi, F., D. Jacques, J. Simunek, J. Feyen and M. Th. van Genuchten. 2003. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: heterogeneous soil. Trans. ASAE 46(4): 1097–1111.
3. Addiscott, T. M. and R. J. Wagenet. 1985. Concepts of solute leaching in soils: A review of modeling approaches. Soil Sci. 36: 411-424.
4. Biggar, J. W. and D. R. Nielsen. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. Water Resour. Res. 12: 78-94.
5. Bowman, R. S. and R. C. Rice. 1986. Transport of conservative tracers in the field under intermittent flood irrigation. Water Resour. Res. 22: 1531-1536.
6. Bresler, E., G. Dagan, R. J. Wagenet and A. Laufer. 1984. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 16-25.
7. Carsel, R. F. and R. S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 24: 755-769.
8. Clothier, B. E., I. Vogeler, S. R. Green and D. R. Scotter. 1998. Transport in unsaturated soil: aggregates, macropores, and exchange. PP. 273-295, *In*: H. M. Selim and L. Ma (Eds.), Physical Nonequilibrium in Soils. Modeling and Application, Ann Arbor Press, Chelsea, MI.
9. Forrer, I, R. Kasteel, M. Flury and H. Fluhler. 1999. Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil. Water Resour. Res. 35: 3049-3060.
10. Fried, J. J., 1975. Groundwater Pollution. Elsevier Pub., New York.
11. Gelhar, L. W., C. Welty and K. R. Rehfeldt. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resour. Res. 28(7): 1955-1974.
12. Jacobsen, O. H., F. J. Leij and M. Th. van Genuchten. 1992. Parameter determination for chloride and tritium transport in undisturbed lysimeters during steady flow. Nordic. Hydrol. 23: 89-104.
13. Jacques, D. 2000. Analysis of water flow and solute transport at the field scale. Ph.D dissertation, No. 454, K.U. Leuven, Fac. Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Leuven, Belgium.
14. Jarvis, N. J., P. E. Jonsson, P. E. Dik and I. Messing 1991. Modeling water and solute transport in macroporous soil. I. Model description and sensitivity analysis. Soil Sci. 42: 59-70.
15. Jaynes, D. B., R. S. Bowman and R. C. Rice. 1988. Transport of conservative tracers in the field under continuous flood irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 618-624.
16. Jaynes, D. B., S. D. Logsdon and R. Horton. 1995. Field method for measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 352-356.
17. Kodesova, R., S. E. Ordway, M. M. Gribb and J. Šimůnek. 1999. Estimating of soil hydraulic properties with cone permeameter: Field studies. Soil Sci. 163(6): 436-453.
18. Mallants, D., M. Vanclooster and J. Feyen 1996. Transect study on solute transport in a macroporous soil. Hydrol. Processes 10: 55-70.
19. Marquardt, D. W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. J. Ind. Appl. Math. 11: 431-441.
20. Mishra, S. and J. C. Parker. 1989. Parameter estimation for coupled unsaturated flow and transport. Water Resour. Res. 25(3): 385-396.
21. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12(3): 513-522.
22. Russo, D. 1993. Stochastic modeling of macrodispersion for solute transport in a heterogeneous unsaturated porous formation. Water Resour. Res. 29: 383-397.
23. Russo, D. 1998. Stochastic analysis of flow and transport in unsaturated heterogeneous porous formations: Effects of variability in water saturation. Water Resour. Res. 34: 569-581.
24. Russo, D., J. Zaidel and A. Laufer. 1998. Numerical analysis of flow and transport in a three-dimensional partially saturated heterogeneous soil. Water Resour. Res. 34 (6): 1451-1468.
25. Schaap, M. G., F. J. Leij and M. Th. Van Genuchten. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 847-855.
26. Schaap, M. G., F. J. Leij and M. Th. van Genuchten 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol. 251: 163-176.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]

27. Šimůnek, J., M. Sejna and M. Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0, IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.
28. Šimůnek, J., M. Sejna and M. Th. van Genuchten 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0, IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.
29. Šimůnek, J., D. Jacques, J. W. Hopmans, M. Inoue, M. Flury and M. Th. van Genuchten. 2002. Solute transport during variably-saturated flow-inverse methods. *In*: J.H. Dane and G. C. Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods, Chapter 6.6, Third edition, SSSA, Madison, WI.
30. Sun, N. Z. and W. W. G. Yeh. 1990. Coupled inverse problems in groundwater modeling. 1. Sensitivity analysis and parameter identification. Water. Resour. Res. 26(10): 2507-2525.
31. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
32. Van Genuchten, M. Th. and R. J. Wagenet. 1989. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 53(5): 1303-1310.
33. Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij and S. R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. 85 p.
34. Ventrella, D., B. P. Mohanty, J. Šimůnek, N. Losavio and M. Th. van Genuchten 2000. Water and chloride transport in a fine-textured soil: Field experiments and modeling. Soil Sci. 165(8): 624-631.
35. Wang, D., S. R. Yates, J. Šimůnek and M. Th. van Genuchten. 1997. Solute transport in simulated conductivity fields under different irrigations. J. Irrig. Drain. Eng. 123(5): 336-343.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.9.6]