



## ارزیابی مدل Hydrus-1D برای شبیه‌سازی نفوذ در خاک‌های مطبق

سعید علی اکبرلو<sup>۱</sup>، امین وطنی<sup>۲</sup>، صمد دربندی<sup>۳</sup> و شیوا ابراهیم‌زاده بادکی<sup>۴</sup>  
۱- کارشناس ارشد گروه علوم خاک دانشگاه تبریز، ۲- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشگاه تبریز، ۳- عضو هیئت علمی گروه علوم خاک دانشگاه آزاد تبریز، ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشگاه آزاد تبریز

### چکیده

پدیده نفوذ یکی از پدیده‌های مهم در چرخه آبی است. با توجه به تغییرپذیری رطوبت خاک در اثر عوامل مختلف، برآورد مدلی مناسب جهت تخمین صحیح نفوذ حائز اهمیت است. این تحقیق به منظور ارزیابی مدل Hydrus-1D برای شبیه‌سازی نفوذ در خاک‌های مطبق صورت گرفته است. به همین منظور سه خاک لوم، لوم شنی و سیلت رس لومی در نظر گرفته شده و در ۶ آرایش مختلف لایه‌بندی، درون استوانه‌های نفوذسنجی ریخته و آزمایش‌های نفوذسنجی انجام گرفت. مقادیر نفوذسنجی مشاهده‌ای با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل Hydrus-1D، کوستیاکف، کوستیاکف تعدیل شده، هورتن و فیلیپ مقایسه گردید. نتایج نشان داد که، در بین معادلات مرسوم نفوذ بیشترین مقدار R<sup>2</sup> و کمترین مقدار RMSE مربوط به معادله‌ی کوستیاکف تعدیل شده و سپس Hydrus-1D می‌باشد. بنابراین در میان مدل‌های مرسوم نفوذ، ابتدا مدل کوستیاکف تعدیل شده و سپس Hydrus-1D بهترین مدل جهت شبیه‌سازی نفوذ تجمعی در حالت‌های مورد مطالعه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: Hydrus-1D، کوستیاکف، کوستیاکف تعدیل شده، هورتن و فیلیپ

### مقدمه

مهمترین مشخصه فیزیکی خاک از نظر کشاورزی نفوذ است. ورود آب از سطح مشترک خاک و اتمسفر به داخل خاک بخش غالب و آغازین تعامل پدوسفر و هیدروسفر است (Dingman, 2002)، که نقش بسیار مؤثری در چرخه‌ی هیدرولوژی و نوع پوشش گیاهی، اکولوژی منطقه، میزان رواناب و فرسایش و تخریب خاک، انتقال املاح و آلودگی آبهای زیرزمینی دارد (Hillel, 1998). قابلیت نفوذ در مباحث فیزیک خاک و هیدرولوژی به حداکثر شدت آب ورودی به خاک گفته می‌شود، بنابراین اگر شدت تغذیه آب در سطح خاک بیشتر از مقدار قابلیت نفوذ باشد آب اضافی بر حسب توپوگرافی منطقه یک لایه ایستا تشکیل داده یا به اطراف جاری می‌گردد (Williams et al., 1998). نفوذ آب در خاک‌های کشاورزی متأثر از برخی ویژگی‌ها، مثل تعداد و اتصال منافذ درشت موجود در سطح اراضی می‌باشد. ویژگی‌های شبکه‌های منافذ درشت و دیگر پارامترهای هیدرولیکی خاک تحت تأثیر عملیات شخم قرار می‌گیرند (Hangen et al., 2002). بنابراین مدیریت مناسب خاک می‌تواند به نفوذ حداکثر و جمع‌آوری آب اضافی متأثر از نوع خاک کمک کند (Ahaneke, 2011).

تحقیقی به منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت تأثیر کشت گیاه سویا و سایر تناوب‌های زراعی توسط فهد و همکاران (1982) به انجام رسید. طی این تحقیق با کاربرد مدل‌های نفوذ در قطعه‌های کاشته شده با گیاه سویا مشخص شد که مدل‌های کوستیاکف و فیلیپ مطابقت بهتری با داده‌های تجربی دارند لیکن در مراحل اولیه و نهایی نفوذ معادله کوستیاکف تطابق بهتری داشت. صبحی (1389) مدل Hydrus-1D را برای شبیه‌سازی نفوذ آب در سه خاک یکنواخت با بافت متفاوت مورد ارزیابی قرار داد و نتیجه گرفت مدل Hydrus-1D دقت زیادی در شبیه‌سازی نفوذ خاک‌های با بافت سنگین دارد. اسبگ و همکاران (2002) نفوذ و جریان عمقی در سطوح شیب دار را مطالعه نمودند. در این مطالعه نتایج عددی با استفاده از مدل Hydrus-1D و آزمایشگاهی مقایسه شدند. علاوه بر این نفوذ پذیری و جریان عمقی در سطوح شیب دار توسط ترکیب آزمایشات کنترل شده با مدل‌های ریاضی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مدل هماهنگی قابل قبولی با نتایج مشاهداتی جریان سطحی، عمقی و محتوای رطوبتی پروفیل خاک داشت. اژدری (1387) برای شبیه‌سازی جریان آب و میزان آب خارج شده از زیر ناحیه‌ی ریشه‌ی گیاه از نرم افزار Hydrus-2D استفاده کرد. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که مدل فوق در شبیه‌سازی توزیع آب در خاک مورد تحقیق جواب‌های منطقی می‌دهد.

هدف از انجام این تحقیق تعیین دقت مدل Hydrus-1D در شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک‌های مطبق و مقایسه دقت این مدل با مدل‌های مرسوم است.

### مواد و روش‌ها

سه نوع خاک با بافت‌های مختلف از اطراف شهر تبریز تهیه و سپس جهت تعیین برخی خصوصیات فیزیکی مورد نیاز به آزمایشگاه منتقل شد. خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده عبارت بودند از: رطوبت خاک، وزن مخصوص ظاهری خاک، کلاس بافت خاک و رطوبت ظرفیت زراعی. قابل توضیح است که چون مدل Hydrus-1D برای شبیه‌سازی نفوذ، نیاز به رطوبت اولیه دارد لذا، رطوبت اولیه خاک در هر بار تکرار جداگانه اندازه‌گیری شده است. در جدول (۱) این ویژگی‌ها آورده شده است:

جدول ۱- برخی از مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

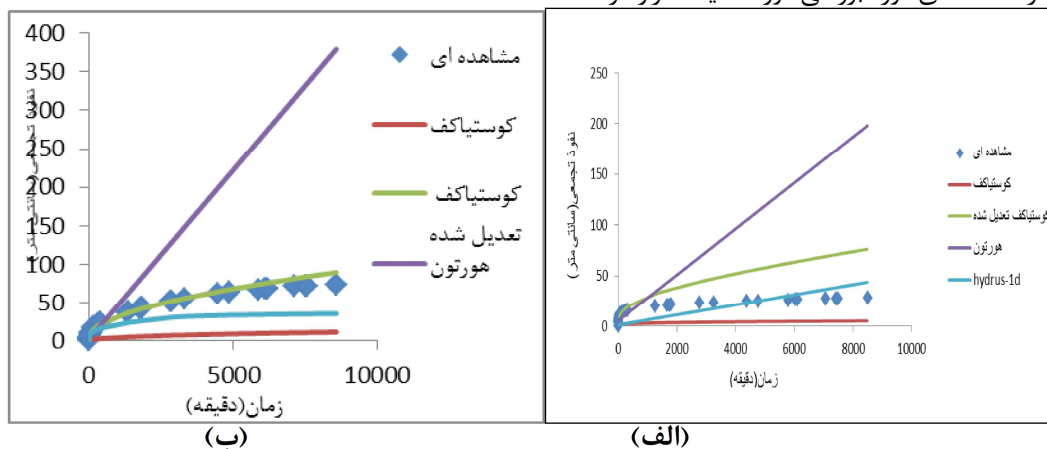
کلاس بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	رطوبت ظرفیت زراعی (%)	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )
لوم	۳۶	۴۴	۲۰	۸/۱۸	۳۵/۱
سیلت رس لومی	۱۲	۵۰	۳۸	۹/۳۱	۳/۱
شن لومی	۷۲	۱۸	۱۰	۴/۱۲	۵/۱

برای انجام آزمایشات نفوذسنجی، لوله‌هایی از جنس پیویسیبا قطر ۱۴ سانتی متر و به طول یک متر تهیه شد، که در انتهای تختانی آن فیلترشنی برای ممانعت از عبور ذرات ریز خاک تعبیه گردید. خاک‌ها به صورت لایه لایه داخل استوانه‌ها به نحوی ریخته شد که همان وزن مخصوص ظاهری طبیعی را داشته باشند. ترتیب لایه‌ها برای بدست آوردن تاثیر توالی لایه‌ها بر روی نفوذ آب تغییر داده شد. طول ستون خاک ۶۰ سانتی متر و ارتفاع آب ۳۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. آب درون لوله‌ها اضافه شده و ارتفاع آن در زمان‌های ۰، ۵، ۱، ۲، ۳، ۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه و ۷، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ ساعت بعد از شروع آزمایش در روز اول و سپس هر روز دو بار تا رسیدن به نفوذ نهایی، از روی خط کش نصب شده روی بدنه‌ی استوانه قرائت گردید. یک نور روی سطح خاک برای جلوگیری از به هم ریختن ساختمان خاک هنگام اضافه کردن آب قرار داده شد. قابل ذکر است که در طول آزمایش از هر گونه حرکت رو به بالا (تبخیر) جلوگیری به عمل آمد. برای این منظور با استفاده از یک پوشش مناسب سطح خاک‌ها پوشانده شد. پس از اتمام قرائت مقدار نفوذ تجمعی محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم شد.

برای ارزیابی دقت مدل‌ها در پیش بینی نفوذ تجمعی از چهار شاخص آماری ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>)، ریشه میانگین مربعات خط<sup>۱۸۸</sup> (RMSE)، بازده یا کارایی مدل<sup>۱۸۹</sup> (EF) و خطای میانگین مطلق<sup>۱۹۰</sup> (MAE) استفاده شد.

### نتایج و بحث

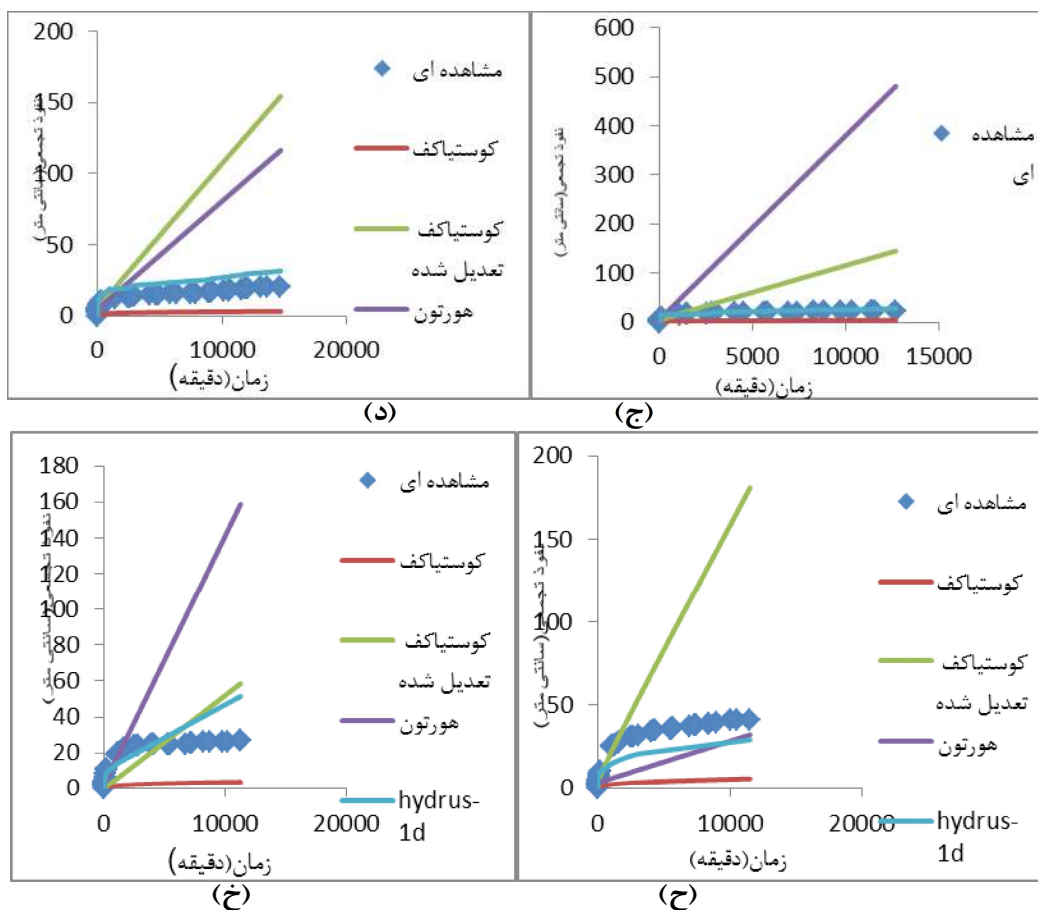
پس از اندازه‌گیری مستقیم نفوذ تجمعی، ضرایب مدل‌های نفوذ (کوستیاکف، فیلیپ، کوستیاکف تعدیل شده و هورتون) تعیین شد. لازم به ذکر است که مدل فیلیپ در هیچ یک از حالات برآورد خوبی از نفوذ در این تحقیق نداشته و از دقت کمی برخوردار بود لذا از مدل فیلیپ صرف نظر شد. در اشکال (الف تا خ) نفوذ تجمعی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با سایر مدل‌های نفوذ و همچنین مدل Hydrus-1D در حالت‌های مورد بررسی مورد مقایسه قرار گرفته است.



<sup>۱۸۸</sup> - Root mean square error

<sup>۱۸۹</sup> - Model efficiency

<sup>۱۹۰</sup> - Mean absolute error



شکل ۱- مقایسه‌ی مقادیر نفوذ تجمعی شبیه سازی شده و مشاهداتی در استوانه ۱ (الف)، استوانه ۲ (ب)، استوانه ۳ (ج) استوانه ۴ (د)، استوانه ۵ (ح) و استوانه ۶ (خ)

طبق شکل (الف-۱) مدل Hydrus-1D تا زمان ۴۷۶۹ دقیقه و مدل های هورتون و کوستیاکف تعدیل شده تا زمان ۳۱۶ دقیقه توانسته‌اند نفوذ تجمعی را در این حالت شبیه‌سازی نمایند. یعنی تمامی مدل‌ها در زمان‌های اولیه برآورد خوبی داشته‌اند اما با گذشت زمان از دقت آنها کاسته شده است. مدل Hydrus-1D برآورد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشته است. در شکل (ب-۱) مدل Hydrus-1D برآورد کمتری از نفوذ تجمعی نسبت به مشاهده‌ای برای این حالت شبیه‌سازی نموده است. مدل کوستیاکف تعدیل شده برآورد خوبی برای این حالت داشته است. سایر مدل‌های مرسوم در زمان‌های اولیه برآورد خوبی داشته‌اند اما با گذشت زمان از دقت آنها کاسته شده است. در شکل (ج-۱) مدل Hydrus-1D، به خوبی نفوذ تجمعی را شبیه‌سازی نموده است. مدل‌های هورتون و کوستیاکف تعدیل شده نیز به ترتیب تا زمان ۱۴۵ و ۱۰۴۸ دقیقه برآورد خوبی داشته‌اند با افزایش زمان از دقت آنها کاسته شده است. مدل کوستیاکف نیز برآورد خوبی از همان ابتدای نفوذ نداشته و از دقت کمی برخوردار است. در شکل (د-۱) مشاهده می‌شود مدل Hydrus-1D به خوبی توانسته است نفوذ تجمعی را نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده ما در این حالت شبیه‌سازی نماید. تمامی مدل‌های مرسوم به جز کوستیاکف در زمان‌های اولیه برآورد خوبی داشته‌اند اما با گذشت زمان از دقت آنها کاسته شده است. مدل Hydrus-1D برآورد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشته است. در شکل (خ-۱) مدل Hydrus-1D برآورد کمتری از نفوذ تجمعی نسبت به مشاهده‌ای داشته است. در زمان‌های اولیه تمامی مدل‌ها برآورد خوبی داشته‌اند اما پس از گذشت ۳۸۹ دقیقه از دقت مدل‌ها کاسته شده است. در شکل (۱-خ) مقادیر نفوذ تجمعی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل Hydrus-1D و مدل‌های مرسوم در استوانه ۶ نشان داده شده است. مدل‌های هورتون، Hydrus-1D و تعدیل شده به ترتیب تا زمان‌های ۱۳۷۰، ۴۰۷۳، ۵۰۹۶ دقیقه برآورد خوبی از خود نشان دادند و با افزایش زمان از دقت آنها کاسته شده است. مدل کوستیاکف نیز برای شبیه‌سازی نفوذ از دقت بسیار کمی برخوردار بود.

نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده برای نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده توسط مدل Hydrus-1D و دیگر مدل‌ها در جدول (۲) درج شده است.

جدول ۲- مقادیر شاخص های آماری  $R^2$ ، EF، MAE و RMSE برای نفوذ تجمعی شبیه سازی شده.

مدل	$R^2$	RMSE	EF	MAE	
استوانه ۱	Hydrus-1D	۹۸۲/۰	۱۴۵/۹	-۷۱۷/۰	۸۹/۳
	کوستیاکف	۸۷۶/۰	۷۶۰/۱۵	-۱۸۲/۲	۰۱/۱۴
	کوستیاکف تعدیل شده	۹۸۹/۰	۹۶۷/۲۲	-۷۵۸/۵	۳۱/۱۵
	فیلیپ	۷۱۱/۰	۲۱/۱۲۰۳۲	-۱/۱۸۵۴۸۹۲	۲/۷۷۱۵
استوانه ۲	هورتن	۷۲۲/۰	۴۲۱/۷۱	-۳۵/۶۴	۳/۴۲
	Hydrus-1D	۹۷۱/۰	۰۷۴/۲۰	۴۰۵/۰	۴۲/۱۴
	کوستیاکف	۹۳۲/۰	۰۳/۳۷	۰۲۱/۱	۶۸۸/۲۲
	کوستیاکف تعدیل شده	۹۸۸/۰	۸۰۹/۴	۹۶۵/۰	۶۶۴/۱
استوانه ۳	فیلیپ	۸۷۲/۰	۸۶/۷۰۳۸	-۱/۷۳۰۴۴	۸۷/۴۵۱۰
	هورتن	۸۷۴/۰	۰۵۲/۱۱۸	-۵۴۶/۱۹	۶۵۸/۶
	Hydrus-1D	۹۶۲/۰	۸۳۶/۳	۷۴۴/۰	۱۰۸/۳
	کوستیاکف	۹۲۳/۰	۶۱۴/۱۳	-۸۵۵/۱	۸۱۲/۱۱
استوانه ۴	کوستیاکف تعدیل شده	۷۳۳/۰	۰۱۲/۵۴	-۶۲۷/۴۳	۰۳۷/۳۵
	فیلیپ	۷۱۵/۰	۸۳/۱۹۵۶	-۴/۵۸۵۷۶	۶۸۲/۱۳۴۱
	هورتن	۷۱۸/۰	۰۶۷/۲۰۹	-۶۴۴/۶۶۷	۱۶۶/۱۴۲
	Hydrus-1D	۹۹۲/۰	۰۷۸/۷	۷۳۱/۰	۳۹۸/۶
استوانه ۵	کوستیاکف	۹۴۲/۰	۳۶۷/۱۱	۳۰۶/۰	۲۹۳/۱۰
	کوستیاکف تعدیل شده	۷۷۸/۰	۸۳۲/۵۷	-۹۴۱/۱۶	۶۵۷/۳۸
	فیلیپ	۷۶۰/۰	۲۴۳/۱۸۲۲۸	-۲/۱۷۸۲۴۱۵	۳۸/۱۲۶۹۳
	هورتن	۸۸۳/۰	۶۵۳/۴۰	-۸۶۵/۷	۵۳۱/۲۶
استوانه ۶	Hydrus-1D	۹۰۹/۰	۷۸۴/۹	۵۵۹/۰	۶۰۸/۷
	کوستیاکف	۷۹۴/۰	۷۶۲/۲۴	-۸۱۸/۱	۱۶۸/۲۱
	کوستیاکف تعدیل شده	۸۸۹/۰	۰۱۹/۵۵	-۹۱۴/۱۲	۷۳۳/۳۳
	فیلیپ	۷۰۰/۰	۵/۸۱۱۹	-۷/۳۰۳۰۳۹	۲۹/۵۶۲۹
استوانه ۶	هورتن	۴۷۱/۰	۶۷۱/۱۴	۰۱۰۵/۰	۱۲۳/۱۲
	Hydrus-1D	۸۷۷/۰	۴۵۹/۹	۰۰۱۷/۰	۱۴۴/۳
	کوستیاکف	۸۷۶/۰	۹۱۰/۱۷	-۵۷۸/۲	۸۳۴/۱۵
	کوستیاکف تعدیل شده	۹۰۵/۰	۱۳۹/۱۳	-۹۲۵/۰	۶۲۸/۰
استوانه ۶	فیلیپ	۵۷۸۳/۰	۳/۶۹۸۴	-۷/۵۴۴۱۳۱	۱۳/۴۸۷۶
	هورتن	۵۸۲/۰	۴۵۹/۵۴	-۷۰۴/۳۲	۵۳۹/۳۳

با توجه به نتایج بدست آمده، در بین معادلات مرسوم نفوذ بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار RMSE مربوط به معادله‌ی کوستیاکف تعدیل شده و سپس Hydrus-1D می‌باشد. بنابراین در میان مدل‌های مرسوم نفوذ ابتدا مدل کوستیاکف تعدیل شده و سپس Hydrus-1D بهترین مدل جهت شبیه سازی نفوذ تجمعی در حالت های مورد مطالعه می‌باشند. مقایسه‌ی دو مدل فیلیپ و کوستیاکف تعدیل شده نشان می‌دهد که مدل فیلیپ حالت خاصی از مدل کوستیاکف تعدیل شده است. بدین ترتیب که اگر در مدل کوستیاکف تعدیل شده  $b=5$  در نظر گرفته شود این مدل به مدل فیلیپ تبدیل می‌شود. بنابراین چون مدل کوستیاکف تعدیل شده یک مدل کلی تر است لذا انتظار می‌رود که مقدار  $R^2$  این مدل نسبت به مدل فیلیپ بیشتر باشد. محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) نیز نفوذ تجمعی محاسبه شده و تخمین زده شده بر اساس مدل کوستیاکف و فیلیپ را مورد بحث و مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که معادله‌ی کوستیاکف نسبت به معادله‌ی فیلیپ دارای تطبیق بیشتری با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. با توجه به نتایج، مدل Hydrus-1D در



## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - فیزیک خاک و رابطه آب، خاک و گیاه

استوانه، به خوبی نفوذ تجمعی را شبیه سازی نموده است. این نتایج گویای کارآمدی و دقت بالای این مدل در شبیه سازی نفوذ می باشد و می توان گفت نه تنها دقت آن کم تر از مدل های مرسوم نبوده بلکه نسبت به سه مدل فیلیپ، هورتن و کوستیاکف از دقت بالاتری برخوردار است. ینگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز از کاربرد مدل Hydrus-۱D برای شبیه سازی نفوذ تجمعی در یک ستون لایه بندی شده ی خاک نتایج رضایت بخشی را بدست آوردند. صبوحی (۱۳۸۹) از مدل Hydrus-۱D برای شبیه سازی نفوذ آب در سه خاک یکنواخت با بافت متفاوت مورد ارزیابی قرار داد و نتیجه گرفت در بین معادلات مرسوم نفوذ بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار RMSE مربوط به معادله ی کوستیاکف و سپس مدل کوستیاکف تعدیل شده می باشد.

### منابع

- اژدری، خ. ۱۳۸۷. استفاده از نرم افزار Hydrus-۲D در شبیه سازی جریان آب از زیر ناحیه ی ریشه ی گیاه در سیستم کود آبیاری. دومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی. ۹ صفحه.
- صبوحی، ب. ۱۳۸۹، ارزیابی مدل Hydrus-۱D جهت شبیه سازی نفوذ در خاک های مختلف، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشگاه آزاد واحد تبریز.
- محمدی، م. و ج. رفاهی. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله ی علوم کشاورزی ایران. شماره ی ۶. صفحه: ۱۳۹۱-۱۳۹۸.
- Ahaneku, I. E. ۲۰۱۱. Infiltration characteristics of two major agricultural soils in north central Nigeria. Agricultural Science Research Journals, ۱(۷): ۱۶۶-۱۷۱.
- Dingman, S. L. ۲۰۰۲. Physical hydrology. ۲nd, edition Prentice-Hall Inc, USA, pp ۲۲۰-۲۷۱.
- Essig, E. T., C. Corradini, R. Morbidelli, and S. Gonindraj. ۲۰۰۲. Infiltration and deep flow over sloping surfaces: Comparison of numerical and experimental results. Hydrology. ۳۷۴: ۳۰-۴۲.
- Fahad, A. A., L. N. Mielke, A. D. Flowerday., and D. Swatzenruber. ۱۹۸۲. Soil physical properties as affected by soybeans and other cropping sequences. Soil Sic. Soc. Am. ۴۶: ۳۷۷-۳۸۱.
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J. and Huttl, R. F. ۲۰۰۲. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. Soil and Tillage Research, ۶۳: ۱۸۱-۱۸۶.
- Hillel, D. ۱۹۹۸. Environmental soil physics. Academic press. P. ۷۷۱.
- Williams, J. R., Ouyang, Y., Song Chen, J. Ravi, V. and Corporation, D. ۱۹۹۸. Estimation of infiltration rate in vados zone: application of selected mathematical models. EPA, pp ۹۷-۱۲۸.
- Ying, M., S. Feng., D. Su, G. Gao, and H. Zailin. ۲۰۱۰. Modeling water infiltration in a modified green-amp model and Hydrus-۱D. Computers and Electronic in Agriculture. ۷۱S. pp: S۴۰-S۴۷.

### Abstract

Diffusion is one of the important phenomena in hydraulic cycle. Proposing a proper model for estimation of correct diffusion seems important due to soil humidity change by influence of different factors. This research was carried out in order to evaluate model Hydrus-۱D for simulation of the diffusion in the soils. For doing so, three loamy soil, sandy loam and silt clay loam were chosen and layered in six different arrangements and poured in cylinders for measuring diffusion and diffusion experiments. The observatory diffusion measuring values were compared with values of simulation with model Hydrus ۱D, Coustiacove, adjusted Coustiacove, Horton and Philip. The results showed that among common diffusion equations the highest value of  $R^2$  and lowest value of RMSE value were achieved by adjusted Coustiacove and then Hydrus-۱D. So, among common diffusions models at first, adjusted Coustiacove and then Hydrus-۱D were the best models for diffusion simulations in the studied cases.