

## کاربرد مدل‌های SIRMOD و HYDRUS-3D برای شبیه‌سازی کامل فرایند آبیاری جویچه‌ای

سعید نورآبادی<sup>۱\*</sup>، سیدعلی اشرف صدرالدینی<sup>۲</sup>، امیرحسین ناظمی<sup>۳</sup>، رضا دلیر حسن‌نیا<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۵

### چکیده

یکی از نرم افزارهای معروف برای شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای نرم افزار SIRMOD می‌باشد که از روابط سنت و نانت برای شبیه‌سازی مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای و از تابع نفوذ کوستیاکوف-لوئیس برای برآورد حجم آب نفوذیافته استفاده می‌کند. روش تعیین ضرائب معادله نفوذ، در نظر گرفتن فرضیات ساده‌ساز برای معادله نفوذ و یک بعدی فرض شدن پدیده نفوذ در نرم افزار مذکور باعث می‌شود تا برخی از عوامل مؤثر در پدیده نفوذ نادیده گرفته شوند. بنابراین استفاده از نرم افزاری مانند HYDRUS که در آن از معادله ریچاردز به عنوان معادله اساسی جریان استفاده شده و بسیاری از عوامل مؤثر در پدیده نفوذ را در نظر می‌گیرد، می‌تواند دقت تخمین حجم آب نفوذیافته و در نتیجه دقت شبیه‌سازی‌ها را افزایش دهد. در این تحقیق پس از انجام آزمایش‌های صحرایی و ثبت داده‌های مورد نظر، مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای در نرم افزار SIRMOD شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل از آن به عنوان شرایط اولیه و مرزی وارد نرم افزار HYDRUS-3D گردید تا حجم آب نفوذیافته با استفاده از معادله ریچاردز به دست آید. در نهایت مقادیر شبیه‌سازی شده توسط دو مدل با مقادیر آزمایش‌های عملی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل هیدرودینامیک کامل در SIRMOD توانایی بالایی در پیش‌بینی مراحل مختلف آبیاری به‌ویژه مرحله پیشروی دارد و مدل HYDRUS سه بعدی نیز حجم آب نفوذیافته و هیدروگراف جریان خروجی را با دقت بیشتری در مقایسه با SIRMOD شبیه‌سازی می‌کند. مقایسه نتایج حاصل با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد کاربرد توام دو نرم افزار مذکور دقت شبیه‌سازی مقادیر نفوذ و رواناب را افزایش می‌دهد و مزیت مهم دیگر آن شبیه‌سازی نحوه توزیع رطوبت خاک در تمامی مراحل آبیاری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری جویچه‌ای، شبیه‌سازی، معادلات سنت و نانت، معادله ریچاردز، SIRMOD، HYDRUS

### مقدمه

حرکت و پیوستگی بوده و توانایی تحلیل جریان‌های غیرماندگار را دارا می‌باشند. معادلات حاکم غیرخطی و پیچیده بوده و در حل آن‌ها از روش تفاضل‌های محدود و اجزاء محدود استفاده می‌شود و با وجود مشکل بودن روش حل دارای جواب‌های دقیق و قابل اعتماد می‌باشند. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل‌های هیدرودینامیک، اینرسی صفر، موج سینماتیک و موازنه حجم را نام برد. مدل‌های آبیاری سطحی وسیله‌ای برای طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی هستند. دقت نتایج حاصل از هر مدل بستگی بسیاری به دقت اطلاعات ورودی و شبیه‌سازی صحیح پدیده مورد نظر دارد. در بین این مدل‌ها نرم افزار SIRMOD توانایی حل سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک را دارد.

توانایی مدل SIRMOD توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. ماهشواری و مک‌ماهان در مقایسه‌ای که بین مدل‌های آبیاری سطحی قابل اجراء در نرم‌افزار SIRMOD انجام دادند اعلام داشتند که با وجود اینکه این مدل‌ها بسیار دقیق نیستند

آبیاری سطحی یکی از روش‌های متداول آبیاری است که در آن آب به صورت ثقی در زمین جریان می‌یابد. طراحی بهینه ابعاد مزرعه نیاز به دانش کافی در زمینه شناخت و تجزیه و تحلیل مراحل مختلف آبیاری و درک شرایط و چگونگی توزیع و پخش آب در خاک تحت عنوان پدیده نفوذ می‌باشد.

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای طراحی، مدیریت و ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی در دهه‌های اخیر بسیار معمول شده است. مدل‌های ریاضی زیادی در آبیاری سطحی مورد استفاده قرار گرفته است که این مدل‌ها مبتنی بر حل معادلات دیفرانسیل جزئی اندازه

۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی آب

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(\*- نویسنده مسئول: (Email: saeed\_noorabadi@yahoo.com)

مدل تعریف شود، می‌توان تأثیر بسیاری از عوامل مؤثر در پدیده نفوذ مانند بافت خاک، ساختمان خاک، شکل و ابعاد جویچه، ارتفاع آب داخل جویچه و محیط خیس شده را در شبیه‌سازی اعمال نمود.

مدل HYDRUS در بسیاری از تحقیقات برای پیش‌بینی نحوه حرکت آب در خاک و توزیع رطوبت در خاک استفاده شده است و اغلب این تحقیقات در زمینه آبیاری قطره‌ای بوده است (Provenzano, 2007؛ Kandelous et al., 2011؛ Bufon et al., 2012). اسکاگز و همکاران در یک مطالعه، شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D را با نتایج مشاهده‌ای در لوله‌های آبیاری قطره‌ای مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این مدل توانایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی رطوبتی در آبیاری قطره‌ای دارد و می‌توان از آن به عنوان ابزاری برای تحقیق و طراحی در مدیریت آبیاری قطره‌ای استفاده کرد (Skaggs et al., 2004). سیال و اسکاگز توزیع رطوبت خاک را در زیر لوله‌های سفالی متخلخل در آبیاری زیرسطحی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه داده‌های صحرائی را با داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل HYDRUS (2D/3D) مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که مقادیر شبیه‌سازی شده با این مدل مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند (Siyal and Skaggs, 2009). عباسی و همکاران مدل HYDRUS-2D را با استفاده از داده‌های آزمایشی حاصل از جویچه‌های طویل کالیبره کردند. مقادیر رطوبت در سه آزمایش با جویچه‌های انتها بسته به خوبی توسط مدل پیش‌بینی شدند. نتایج پیش‌بینی غلظت املاح و سرعت نفوذ عمقی در دو روش بهینه‌سازی استفاده شده در این تحقیق تطابق نسبتاً کمی با داده‌های آزمایشی از خود نشان دادند (Abbasi et al., 2004). محققین متعددی توانایی این مدل را در پیش‌بینی حرکت آب در خاک مورد بررسی قرار داده‌اند و توزیع رطوبت را به صورت یک بعدی یا دوبعدی در نظر گرفته‌اند. با این وجود به نظر می‌رسد مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی حرکت آب در خاک را در انواع شرایط اولیه و مرزی دارد و می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی جریان زیرسطحی در جویچه‌های آبیاری نیز استفاده کرد. بر این اساس هدف از انجام تحقیق حاضر استفاده از دو نرم افزار SIRMOD و HYDRUS جهت افزایش دقت شبیه‌سازی فرآیند نفوذ و پیش‌بینی نحوه توزیع آب در مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای می‌باشد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر آزمایش‌های عملی قابلیت روش پیشنهادی ارزیابی شده است.

### مواد و روش‌ها

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از دو مدل با شرایط طبیعی، چهار سری آزمایشات آبیاری جویچه‌ای در ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشگاه تبریز انجام گرفت. بدین منظور ابتدا قطعه زمینی به ابعاد

اما حل هیدرودینامیکی و اینرسی صفر مدل SIRMOD برآورد دقیق‌تری از زمان پیشروی و عملکرد کل سیستم ارائه می‌دهد (Maheshwari and McMahan., 1993). مک‌کلایمونت و همکاران به منظور بررسی اعتبار مدل SIRMOD، نتایج پیشروی، رواناب و نفوذ برآورد شده را در مقابل ۷۰ سری اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مورد بررسی قرار دادند و اعلام داشتند که این مدل حجم نفوذ را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند (McClymont et al., 1999). مهانا و همکاران کاربرد مدل SIRMOD را در مصر تحت شرایط خاک لوم رسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که این مدل فازهای پیشروی و پسروی و عمق آب نفوذ یافته را به خوبی می‌تواند پیش‌بینی بکند (Mehana et al., 2009). کلارک و همکاران از مدل SIRMOD برای افزایش پتانسیل کاربرد آبیاری در کالیفرنیا جنوبی استفاده کردند. از نتایج این شبیه‌سازی برای تعیین کاهش رواناب حاصل از دی‌های ورودی و زمان قطع متفاوت و برای تعیین کفایت آبیاری استفاده شد (Klark et al., 2009). بهبهانی و همکاران (۱۳۸۴) عملکرد مدل SIRMOD را در مزرعه‌ای با خاک رسی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که این مدل در سه روش حل رابطه سنت-نانت، سرعت پیشروی و نفوذ را کمتر از نتایج مزرعه‌ای برآورد می‌نماید. همچنین میزان پیشروی در مدل هیدرودینامیک به مقادیر مشاهده شده نزدیک‌تر بود و در مقایسه رواناب، مدل برآورد بیش‌تری از مقادیر مشاهده شده از خود نشان داد.

نفوذ مهم‌ترین فاکتور مؤثر در آبیاری سطحی است. نفوذ آب به خاک پدیده‌ای پیچیده است که به نوع خاک، شرایط سطح آن، فرصت زمان نفوذ و عوامل دیگر بستگی دارد. اکثر معادلات نفوذ برای بیان نفوذ آب به خاک، با فرض جریان یک بعدی نفوذ و به صورت تابعی از فرصت زمان ارائه شده‌اند. از جمله این معادلات می‌توان به معادله کوستیاکوف-لوئیس اشاره کرد که مدل SIRMOD نیز برای پیش‌بینی حجم آب نفوذ یافته از این معادله که ضرائب آن بر مبنای متوسطی از مشخصه‌های خاک و مقطع جویچه و جریان تعیین می‌شود، استفاده می‌کند. اما در آبیاری جویچه‌ای، جریان نفوذ دوبعدی است و تعیین عمق آب نفوذ یافته در جویچه‌ها، به دلایل متعدد از جمله تغییر در سطح تماس آب با خاک، اثر جویچه‌های مجاور، شکل هندسی جویچه‌ها و عوامل دیگر پیچیدگی بیش‌تری دارد. در نتیجه استفاده از یک مدل کامل‌تر که بتواند اثرات فاکتورهای بیش‌تری را بر پدیده نفوذ مدنظر قرار دهد می‌تواند دقت تخمین حجم آب نفوذ یافته را افزایش دهد. مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به صورت اشباع و غیراشباع را با استفاده از معادله ریچاردز دارد. بنابراین از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی حجم آب نفوذ یافته در جویچه‌های آبیاری نیز استفاده کرد. در این مدل اگر شرایط مرزی و اولیه، دامنه جریان، خصوصیات هیدرولیکی خاک به طور صحیح برای

### مدل SIRMOD

مدل SIRMOD قابلیت شبیه‌سازی و اجرای سه روش حل رابطه سنت-ونانت (مدل هیدرودینامیک کامل، مدل اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک) را دارد. این مدل از معادله تجربی کوستیاکوف-لوئیس برای برآورد حجم آب نفوذ یافته و از روش دو نقطه‌ای برای محاسبه پارامترهای معادله نفوذ حاصل از داده‌های پیشروی استفاده می‌کند (Walker, 1987). معادله کوستیاکوف-لوئیس به صورت زیر می‌باشد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۷۵):

$$z = kt^a + f_0 t \quad (1)$$

که در آن  $k$  و  $a$  پارامترهای تجربی،  $f_0$  سرعت نفوذ نهایی،  $t$  زمان و  $z$  نفوذ تجمعی می‌باشد. برای تعیین نفوذپذیری نهایی ( $f_0$ ) از هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی استفاده شد. مقدار این ضریب از رابطه (۲) بدست می‌آید (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۷۵):

$$f_0 = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{L} \quad (2)$$

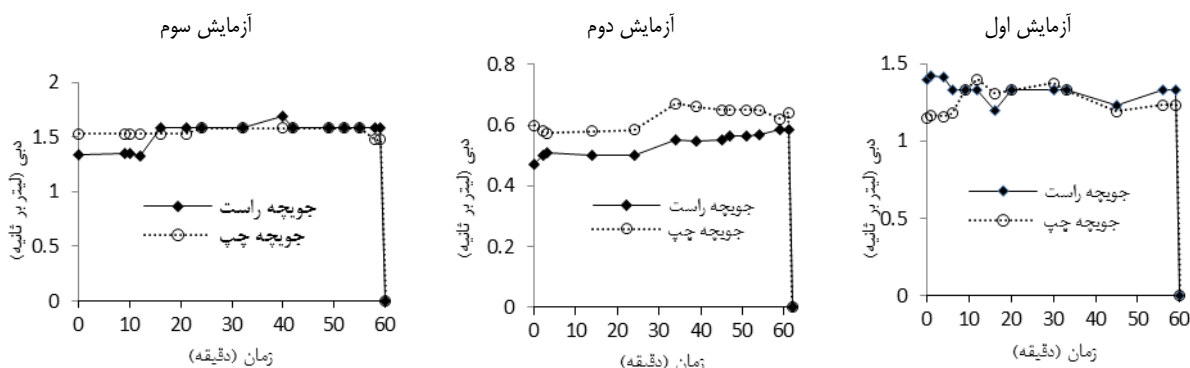
در این رابطه  $Q_{in}$  دبی ورودی،  $Q_{out}$  دبی خروجی وقتی که مقدار آن ثابت شده باشد ( $lit/min$ ) و  $L$  طول جویچه ( $m$ ) می‌باشد. مقدار  $f_0$  برحسب  $lit/min.m$  به دست می‌آید.

در جدول ۲ ورودی‌های این مدل نشان داده شده است. خروجی این مدل نیز شامل زمان‌های پیشروی و پسروی جریان در طول جویچه، توزیع نفوذ آب در طول شیار، بیلان حجمی، هیدروگراف رواناب خروجی، عمق جریان آب در انتهای مزرعه، راندمان کاربرد آب و یکنواختی توزیع آب می‌باشد.

تقریبی  $30 \times 80$  متر انتخاب و تعداد ۳۰ عدد جویچه در آن احداث شد. سپس تعداد چهار سری جویچه آبیاری، هر یک شامل چهار جویچه مشخص شد. برای حذف خطای اندازه‌گیری جریان جانبی از جویچه‌های کناری، دو جویچه وسط برای اندازه‌گیری و نمونه‌برداری انتخاب شدند. با توجه به شکل و ابعاد و توپوگرافی زمین، طول جویچه‌ها ۶۰ متر انتخاب شد. عرض جویچه‌ها  $0.5$  متر و فاصله‌ی آن‌ها از هم نیز  $0.75$  متر در نظر گرفته شد. به منظور تعیین رطوبت اولیه قبل از آبیاری، نمونه‌هایی در یک نقطه واقع در وسط فاصله طولی جویچه‌ها برداشت شد. نمونه‌ها با استفاده از یک آگر (مته نمونه‌برداری) و از اعماق  $0-10$ ،  $10-20$ ،  $20-30$  و  $30-40$  سانتی‌متری برداشت شد. سطح مقطع جویچه‌ها در طول جویچه در نقاط مختلف با استفاده از یک مقطع‌سنج رسم و تعیین شد. زمان هر آبیاری برای تمامی آزمایش‌ها یک ساعت در نظر گرفته شد. در حین آبیاری زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری و یادداشت گردید. برای به‌دست آوردن هیدروگراف دبی‌های ورودی و خروجی، در ابتدا و انتهای جویچه‌های مورد آزمایش فلوم‌های واسنجی شده WSC نصب و در زمان‌های معین ارتفاع آب در فلوم‌ها قرائت و یادداشت شد. تمامی فلوم‌ها دارای ابعاد و استاندارد یکسانی بودند. بعد از قطع جریان زمان‌های پیشروی ثبت شد. بعد از اتمام مرحله پسروی، سطح مقطع جویچه‌ها در سه مقطع مورد نظر دوباره اندازه‌گیری شد. نمونه‌ای از عمق  $10-20$  سانتی‌متری برداشت شد و بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین گردید. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از آزمایش داری و چگالی ظاهری خاک از دو روش دست‌نخورده و دست‌خورده به‌دست آمد (عباسی، ۱۳۸۶). نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک جویچه‌های آزمایشی

درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک	چگالی ظاهری $g/cm^3$	هدایت هیدرولیکی اشباع $cm/day$
۶۴	۲۳	۱۳	لوم شنی	۱/۴۵	۲۱۲



شکل ۱- هیدروگراف جریان ورودی در دو جویچه‌ی میانی در آزمایشات اول تا سوم

$$h(\theta) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e^{\frac{1}{m}} \left[ 1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (5)$$

که در آن:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (7)$$

در این معادلات  $\theta_s$  رطوبت اشباع،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\alpha$ ،  $n$  و  $l$  پارامترهای شکلی هستند.  $\alpha$  ضریب ثابتی است که به خصوصیات جذب سطحی خاک مربوط می-شود و  $n$  پارامتر بی بعدی است که مربوط به شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک می شود.

در این تحقیق برای بدست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک از مدل ROSETTA استفاده شد. بدین منظور با وارد کردن مقادیر درصد شن، سیلت، رس و مقدار چگالی ظاهری، این پارامترها بدست آمدند. جدول ۳ مقادیر بدست آمده توسط مدل ROSETTA را نشان می دهد.

### روش بدست آوردن حجم آب نفوذیافته در مدل HYDRUS سه بعدی

پدیده نفوذ آب در خاک مخصوصاً در فرایند آبیاری جویچه‌ای یک پدیده‌ی سه بعدی است و مطالعه یک بعدی و دو بعدی آن همواره با خطاهایی همراه خواهد بود. در این تحقیق روشی ارائه شده است که در آن می توان فرایند نفوذ را به صورت سه بعدی در نظر گرفت. در فرایند شبیه سازی سه بعدی موجود در این تحقیق از دو جویچه میانی استفاده شده است و حجم آب نفوذیافته و رواناب خروجی برابر حاصل جمع مقادیر مربوط به این دو جویچه می باشد. ابتدا طول جویچه به ده قطعه مساوی تقسیم شد و در هر قطعه به طور جداگانه و با اعمال شرایط اولیه و مرزی مناسب، فرایند شبیه سازی به صورت سه بعدی انجام گرفت. سطح مقطع جویچه‌ها در طول جویچه (در هر کدام از این قطعه‌ها) ثابت و به صورت منشوری در نظر گرفته شد (البته می توان در هر کدام از این قطعه‌ها سطح مقطع را تغییر داد). شرایط مرزی در یک قطعه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود برای اعمال تغییرات سطح آب نسبت به زمان در هر کدام از این قطعه‌ها از گزینه ارتفاع متغیر استفاده شده است که برای تمامی نقاط موجود در یک قطعه مشابه می باشد. به

هیدروگراف‌های جریان ورودی اندازه گیری شده در شکل ۱ نشان داده شده است. نکته‌ی قابل ذکر این است که مقدار ضریب  $n$  مانینگ را به طور مستقیم نمی توان به دست آورد که بدین منظور از روشی که توسط رنالت و والندر (۱۹۹۷) ارائه شد استفاده گردید. در این روش با برازش داده‌های یکی از آزمایشات با نتایج شبیه سازی مدل موج سینماتیک، یک مقدار متوسط ضریب  $n$  برای تمامی مزرعه به دست آمد.

جدول ۲- پارامترهای ورودی مدل SIRMOD

پارامتر ورودی	مقدار
طول جویچه‌ها (متر)	۶۰
شیب طولی جویچه‌ها	۰/۰۰۰۵
دبی ورودی به جویچه	به صورت هیدروگراف (شکل ۱)
نوع جریان	پیوسته
زمان قطع جریان (دقیقه)	۶۰
عرض بالای جویچه‌ها (متر)	۰/۵
وضعیت انتهای جویچه‌ها	با زهکشی آزاد
ضریب $n$ مانینگ	۰/۰۴
مشخصات سطح مقطع جریان	با توجه به مقاطع اندازه گیری شده در هر آزمایش
مدل مورد استفاده	هیدرودینامیک کامل

### مدل HYDRUS

مدل HYDRUS به طور قابل توجهی برای مدل سازی جریان آب در مناطق اشباع و غیراشباع مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل براساس کاربرد به سه صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی توسط سیمونک و همکاران (۲۰۰۶) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، در دانشگاه کالیفرنیا طراحی گردید. معادله‌ی اساسی مورد استفاده در مدل HYDRUS به منظور بررسی و شبیه سازی حرکت آب در خاک، معادله ریچاردز می باشد. این معادله به صورت کلی در رابطه (۳) بیان گردید (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_1 \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_2 \right) \right] - S \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

در این معادله  $\theta$  رطوبت حجمی،  $t$  زمان،  $h$  مکش ماتریک،  $S$  جذب آب توسط ریشه،  $x_i$  مختصات مکانی،  $K_{ij}^A$  مولفه‌های تانسور ناهمسان بدون بعد  $K_A$ ، و  $K$  تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع می-باشد.

در این مدل خصوصیات هیدرولیکی خاک با استفاده از روابط ترکیبی معلم-وان گنوختن (۱۹۸۰) بدست می آید:

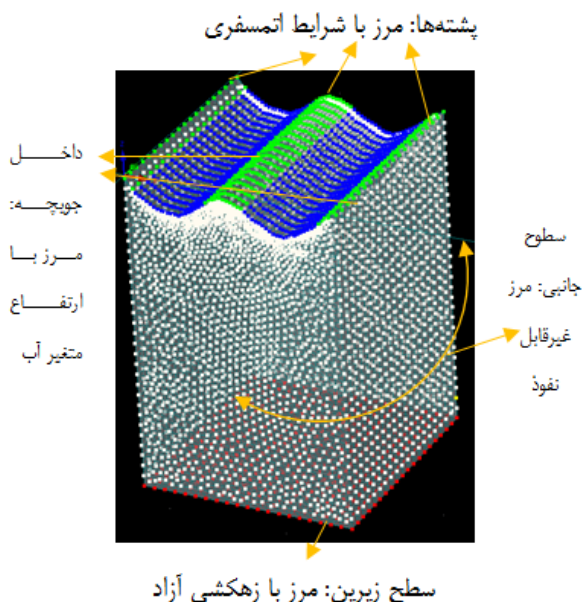
کنار هم شکلی مانند شکل ۴ به وجود می‌آید. این شکل فرایند شبیه‌سازی سه‌بعدی نفوذ آب در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه بعد از شروع آبیاری در آزمایش دوم را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که زمان قطع جریان در این آزمایش ۶۰ دقیقه و زمان پیشروی آب تا انتهای جویچه نیز ۳۷ دقیقه می‌باشد. پروفیل نفوذ آب در خاک در این شکل‌ها را می‌توان در سمت راست به خوبی مشاهده کرد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که روند نفوذ در طول آبیاری جویچه‌ای بسیار شبیه به حالت واقعی آن می‌باشد. برای به دست آوردن کل نفوذ در طول جویچه مقادیر نفوذ در تمامی قطعه‌ها با هم جمع شد. یکی دیگر از مزایای این روش آن است که می‌توان مقدار نفوذ را در هر زمان دلخواه به دست آورده و در نتیجه با در دست داشتن هیدروگراف ورودی، هیدروگراف خروجی را نیز به دست آورد. حجم آبی که تا زمان  $t$  وارد یک جویچه می‌شود به سه قسمت تقسیم می‌شود: نفوذ عمقی، ذخیره سطحی و رواناب. نفوذ عمقی تا زمان  $t$  را می‌توان از داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS به دست آورد. ذخیره سطحی را نیز با در دست داشتن عمق آب شبیه‌سازی شده توسط مدل SIRMOD در چند مقطع می‌توان تخمین زد.

منظور اعمال مراحل پیشروی و پسروی از نمودارهای به دست آمده از اجرای مدل SIRMOD استفاده شد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است برای قطعه‌های یک تا ده از روی نمودارهای پیشروی و پسروی، زمان شروع نفوذ (رسیدن جبهه آب) و اتمام نفوذ (ناپدید شدن آب) تعیین می‌شود تا بدین صورت مراحل پیشروی و پسروی در شبیه‌سازی مدنظر قرار گیرد. برای مثال توضیحات مربوط به قطعه شماره پنج در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای تعیین شرایط اولیه از گزینه رطوبت اولیه استفاده شد. مقدار رطوبت اولیه با استفاده از داده‌های آزمایشی و هم‌چنین توزیع آن‌ها نسبت به عمق در مدل وارد شدند. شرایط اولیه برای تمامی قطعات یکسان فرض شد. برای تعریف شرایط مرزی همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود داخل جویچه‌ها به عنوان مرز با ارتفاع آب متغیر در نظر گرفته شد. تغییرات این ارتفاع آب متغیر با توجه به منحنی‌های پیشروی، پسروی و نیز ارتفاع آب به دست آمده از مدل SIRMOD وارد مدل HYDRUS شدند. پشته‌ها به عنوان مرز با شرایط اتمسفری، سطح زیرین به عنوان مرز با زهکشی آزاد و سطوح جانبی نیز به عنوان مرز غیر قابل نفوذ در نظر گرفته شدند. بعد از شبیه‌سازی فرایند نفوذ در تمامی قطعات و قرار دادن آن‌ها

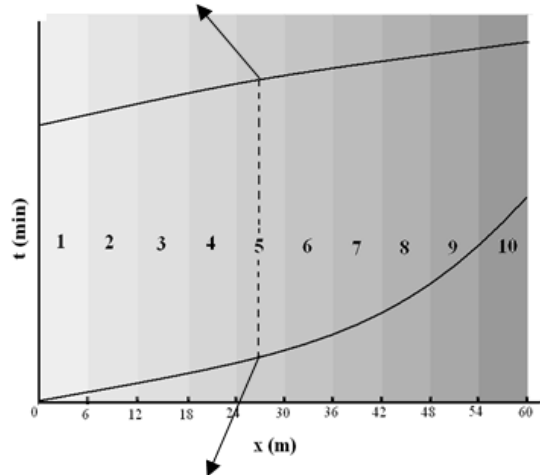
جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن - معلم مورد استفاده برای شبیه‌سازی

پارامتر	$K_g (cm/day)$	$n$	$\alpha$	$\theta_g (cm^3/cm^3)$	$\theta_r (cm^3/cm^3)$
مقدار	۲۱۲	۲/۰۰۹۷	۰/۰۳۸۵	۰/۳۹۸۶	۰/۰۴۵۳



شکل ۳- شرایط مرزی اعمال شده برای یک قطعه سه‌بعدی

پایان نفوذ با توجه به فاز پسروی در قطعه ۵



شروع نفوذ با توجه به فاز پیشروی در قطعه ۵

شکل ۲- اعمال مراحل پیشروی و پسروی در شبیه‌سازی هر کدام از قطعه‌ها با استفاده از منحنی‌های بدست آمده از آزمایشات

آبیاری سطحی دارد (Walker, 1987). شکل ۵ نمودارهای پیشروی حاصل از مدل و داده‌های آزمایشی در جویچه راست آزمایش‌های مختلف و جدول ۴ مقادیر  $R^2$  و RMSE برای تمامی آزمایشات در مرحله پیشروی برای این مدل را نشان می‌دهد.

مقادیر نفوذ و هیدروگراف جریان خروجی حاصل از دو مدل نیز با هم مقایسه شد. جدول ۵ مقادیر نفوذ برای آزمایشات اول تا سوم و به صورت حاصل جمع مقادیر دو جویچه میانی و نیز مقادیر خطای نسبی دومدل در پیش‌بینی حجم آب نفوذیافته را نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر جدول مشاهده می‌شود که هر دو مدل حجم آب نفوذیافته را کمتر از مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی می‌کنند. هم‌چنین دقت مدل HYDRUS سه بعدی بیش‌تر از مدل SIRMOD می‌باشد. در شکل ۶ هیدروگراف خروجی حاصل از دو مدل با مقادیر آزمایشی مقایسه شده است.

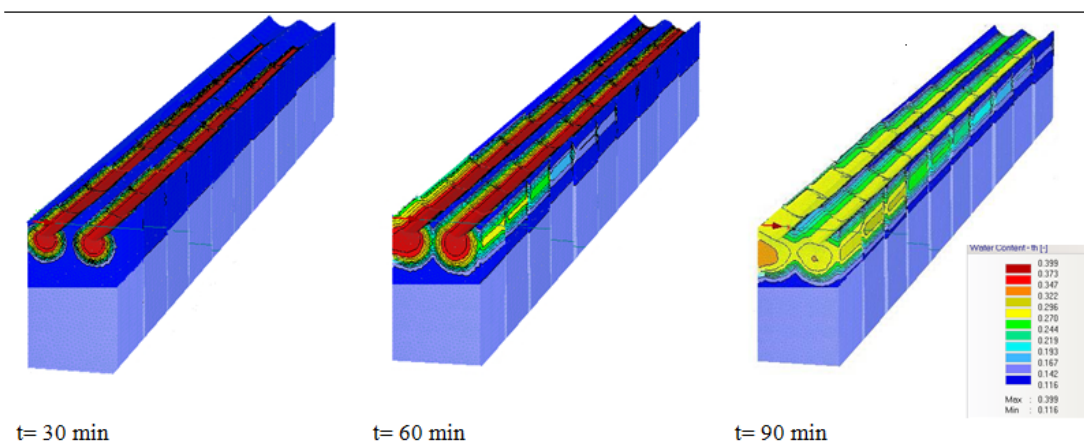
در نهایت با معلوم بودن مقادیر هیدروگراف ورودی، حجم آب نفوذیافته و ذخیره سطحی و با توجه به معادله موازنه حجمی می‌توان هیدروگراف خروجی را نیز به‌دست آورد. برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشی از معیارهای آماری  $R^2$  و RMSE استفاده شد:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i)^2}{(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)^2) (\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N y_i)^2)} \quad (8)$$

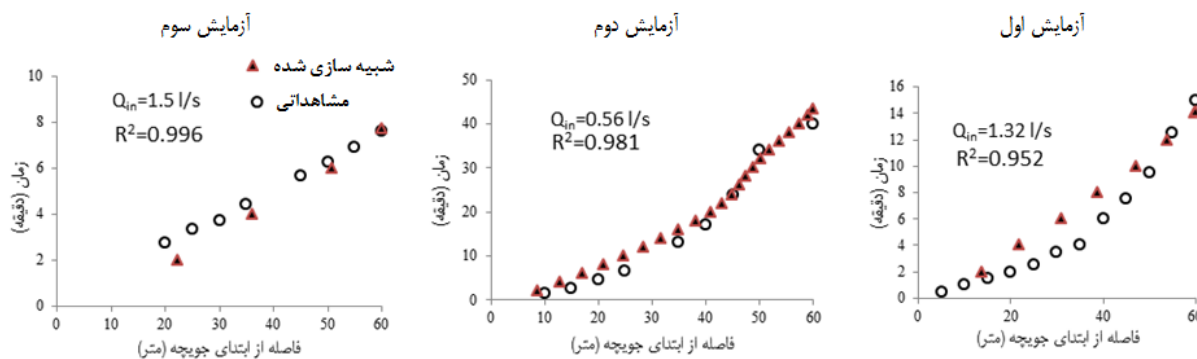
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N}} \quad (9)$$

### نتایج

ابتدا نتایج شبیه‌سازی فازهای مختلف آبیاری جویچه‌ای توسط مدل SIRMOD بررسی می‌شود. مدل هیدرودینامیک کامل عرضه شده در SIRMOD توانایی بالایی در پیش‌بینی مراحل مختلف



شکل ۴- کنار هم قرار دادن قطعه‌های شبیه‌سازی شده سه‌بعدی و لحاظ کردن فرایند نفوذ در آبیاری جویچه‌ای به صورت سه‌بعدی در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه (در آزمایش دوم)



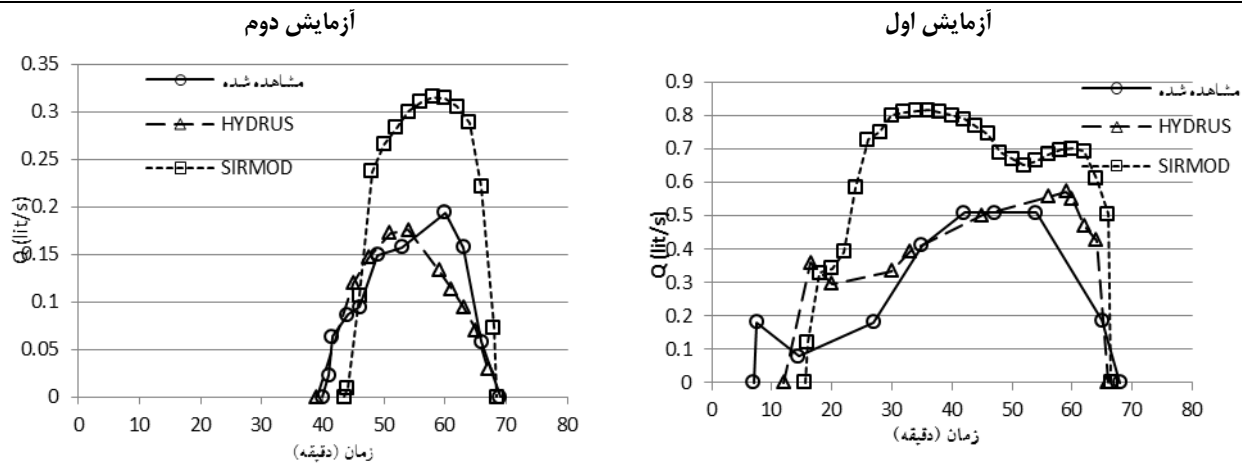
شکل ۵- نمودارهای پیشروی حاصل از داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در جویچه راست در آزمایش‌های مختلف

جدول ۴- نتایج بررسی دقت مدل SIRMOD در پیش بینی مرحله پیشروی

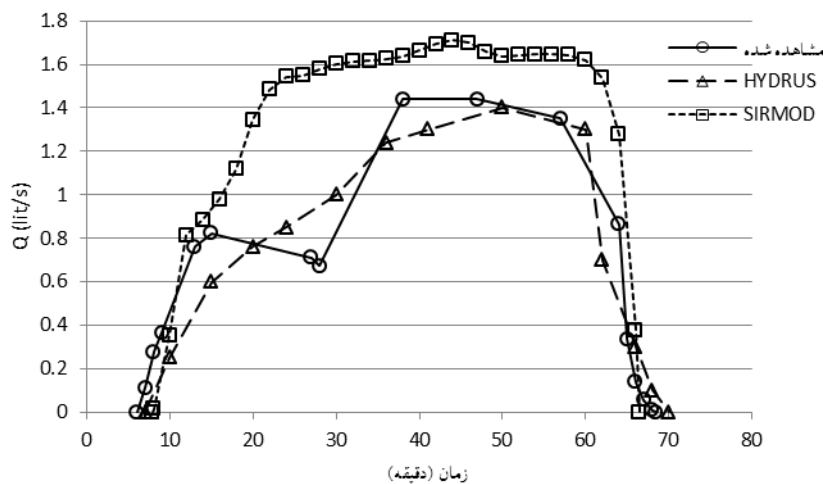
آزمایش سوم		آزمایش دوم		آزمایش اول		R <sup>2</sup>
جویچه چپ	جویچه راست	جویچه چپ	جویچه راست	جویچه چپ	جویچه راست	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۸۳	۰/۹۸۱	۰/۹۹۴	۰/۹۵۲	RMSE (دقیقه)
۰/۵۴	۰/۵۳	۳/۱۳	۲/۶۶	۱/۶۹	۱/۶۹	
۸	۷	۱۰	۸	۱۱	۸	n (تعداد مشاهدات)

جدول ۵- نتایج بررسی دقت مدل‌های SIRMOD و HYDRUS در پیش بینی مقادیر حجم آب نفوذیافته (برحسب مترمکعب)

آزمایش اول	آزمایش دوم	آزمایش سوم	
۷/۳۵	۳/۹	۶/۳۹	مدل SIRMOD
۷/۷۶	۴/۱۹	۶/۹۳	مدل HYDRUS
۸	۴/۲	۷/۲	مقادیر اندازه‌گیری شده
٪۸/۱	٪۷/۱	٪۱۱/۲	خطای نسبی SIRMOD
٪۳	٪۰/۲	٪۳/۷	خطای نسبی HYDRUS



آزمایش سوم



شکل ۶- مقایسه هیدروگراف خروجی حاصل از مدل SIRMOD و HYDRUS (با کاربرد معادله موازنه حجم) با داده‌های صحرایی

## جدول ۶- نتایج بررسی دقت مدل‌های SIRMOD و HYDRUS در پیش‌بینی مقادیر حجم آب خروجی (برحسب مترمکعب)

آزمایش اول	آزمایش دوم	آزمایش سوم	
۱/۷۶	۰/۴۹	۴/۳۹	مدل SIRMOD
۱/۳۵	۰/۲۰	۳/۸۵	مدل HYDRUS
۱/۱۱	۰/۱۹	۳/۵۸	مقادیر اندازه‌گیری شده

بعدی (معادله ریچاردز) نیز تخمین زده شد. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS سه بعدی به دلیل اینکه از معادله ریچاردز برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک استفاده می‌کند و پارامترهای مؤثر بیش‌تری را در رابطه با نفوذ آب در خاک در نظر می‌گیرد، در پیش‌بینی حجم آب نفوذیافته نیز دارای دقت بیشتری می‌باشد. مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌ها نیز نشان داد که مدل سه بعدی HYDRUS دقت بالاتری نسبت به مدل SIRMOD در پیش‌بینی حجم آب نفوذیافته دارد.

مقایسه هیدروگراف‌های خروجی نیز نشان داد که مدل SIRMOD در پیش‌بینی هیدروگراف خروجی نسبت به حالتی که از نتایج مدل HYDRUS سه بعدی در معادله موازنه حجم برای تعیین جریان خروجی استفاده شده بود، دقت پائین‌تری دارد به‌طوری که مدل SIRMOD مقادیر دبی خروجی را در زمان‌های مختلف بیش‌تر برآورد می‌کند که منجر به برآورد بیش‌تر حجم آب خروجی می‌شود.

می‌توان نتیجه گرفت که برای شبیه‌سازی یک فرایند آبیاری جویچه‌ای، مدل هیدرودینامیک کامل توانائی خوبی در پیش‌بینی مقادیر پیشروی آب در جویچه دارد و نیز مشخصات مقطع جریان (از جمله عمق آب) را در تمام مراحل آبیاری در حد مطلوب تخمین می‌زند. تخمین دقیق مقادیر نفوذ توسط HYDRUS نشانگر آن است که عمق‌های آب برآوردی توسط مدل هیدرودینامیک کامل از دقت قابل قبولی برخوردار بوده‌اند. از طرف دیگر معادله ریچاردز معادله حرکت آب در خاک می‌باشد که در صورت تعریف دقیق و درست شرایط اولیه و مرزی می‌تواند به عنوان یک معادله نفوذ در آبیاری جویچه‌ای استفاده گردد به دلیل اینکه این معادله بسیاری از عوامل مؤثر در پدیده نفوذ مانند خصوصیات هیدرولیکی خاک، محیط خیس شده، عمق آب داخل جویچه، شکل و ابعاد جویچه را مد نظر قرار می‌دهد که در نتیجه از دقت بالاتری در پیش‌بینی حجم آب نفوذیافته برخوردار است. به عبارت دیگر می‌توان مدلی را ارائه داد که در آن مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای با استفاده از معادلات سنت و نانت و مقادیر حجم آب نفوذیافته و هیدروگراف خروجی با استفاده از معادله سه بعدی ریچاردز شبیه‌سازی و پیش‌بینی شود. در این تحقیق نیز کاربرد مدل‌های SIRMOD و HYDRUS سه بعدی برای بررسی این فرضیه به کار گرفته شد که نتایج بسیار رضایت‌بخشی حاصل شد و نشان داده شد که استفاده از این تلفیق باعث افزایش دقت شبیه‌سازی فرایند آبیاری جویچه‌ای می‌شود.

در نهایت پیشنهاد می‌شود از روش ارائه شده در این مقاله برای مطالعات زیر استفاده شود:

با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که دبی خروجی محاسبه شده از طریق HYDRUS سه بعدی با کاربرد معادله موازنه حجم به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر می‌باشند. مدل SIRMOD نسبت به مدل HYDRUS هیدروگراف جریان خروجی را با خطای بیش‌تری پیش‌بینی می‌کند.

نکته قابل ذکر دیگر اینکه مدل SIRMOD در تمامی آزمایشات مقادیر هیدروگراف خروجی را بیش‌تر تخمین زده و بالاتر از مدل HYDRUS قرار گرفته است. دلیل این موضوع می‌تواند استفاده دو مدل از معادله‌های نفوذ متفاوت باشد. مدل SIRMOD از معادله تجربی نفوذ کوستیاکوف-لوئیس استفاده می‌کند ولی مدل HYDRUS از معادله ریچاردز برای تخمین حجم آب نفوذ یافته استفاده می‌کند. و بالا بودن نمودار SIRMOD نسبت به HYDRUS نشان دهنده این است که معادله ریچاردز مقدار نفوذ را کمی بیش‌تر از معادله کوستیاکوف-لوئیس تخمین می‌زند. این نتیجه در جدول ۵ نیز قابل مشاهده می‌باشد.

در جدول ۶ نیز مقادیر حجم آب خروجی نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود دقت مدل SIRMOD در پیش‌بینی حجم آب خروجی نیز پایین‌تر می‌باشد. دلایل این موضوع می‌تواند دقت پایین در پیش‌بینی حجم آب نفوذیافته، تغییرات ضریب  $n$  و مشخصات هندسی در طول جویچه‌ها و طی آبیاری‌های مختلف باشد. اما چنانچه در جدول ۶ مشخص است با افزایش زمان آبیاری و حجم آب خروجی از میزان خطا کاسته شده است.

## نتیجه‌گیری

مدل SIRMOD در پیش‌بینی فازهای مختلف آبیاری به ویژه فاز پیشروی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. نتایج این تحقیق و تحقیقات قبلی نیز این مطلب را تایید می‌کنند (ماهشواری و مک ماهان، ۱۹۹۳؛ مک کلایمونت و همکاران، ۱۹۹۶؛ مهانا و همکاران، ۲۰۰۹). دقت این مدل در تخمین مقدار آب نفوذیافته به‌ویژه زمانی که طول جویچه کوتاه بوده یا زمان پیشروی کم باشد، کاهش می‌یابد. این مدل برای تخمین حجم آب نفوذیافته از مدل تجربی کوستیاکوف-لوئیس استفاده می‌کند. مدل‌های تجربی به دلیل اینکه اکثر پارامترهای مؤثر در پدیده نفوذ را مدنظر قرار نمی‌دهند خطاهای اجتناب‌ناپذیری را نیز در بر دارند. در این تحقیق مقدار حجم آب نفوذیافته در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از مدل HYDRUS سه



75(2):488-497.

Klark, B., Hall, L., Davids, G., Walker, W and Eckhardt, J. 2009. Application of SIRMOD to evaluate potential tailwater reduction from improved irrigation management. Proceeding World Environmental and Water Resources Congress, Reston, VA, USA: 1-11.

Maheshwari, B.L and McMahan, T.A. 1993. Performance evaluation of border irrigation model for southeast Australia, Part 2: Overall suitability for field application. Journal of Agriculture Engineering Research, 54: 127-139.

Mehana, H.M., El-Bagoury, K.F., Hussein, M.M and El-Gindy, A.M. 2009. Validation of surface irrigation Model SIRMOD under clay loam soil conditions in Egypt. Misr Journal Agricultural Engineering, 26(3): 1299- 1317.

McClymont, D.J., Smith, R.J and Raine, S.R. 1999. An integrated numerical model for the design and management of surface irrigation. International Conference on Multi-Objective Decision Support Systems, Brisbane, Australia: 148-160.

Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 133(4): 342-349.

Renault, D., and Wallender, W. W. 1997. Surface storage in furrow irrigation evaluation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 123(6): 415-422.

Simunek, J., Sejna, M and van Genuchten, M.Th. 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, HYDRUS Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 241 p.

Siyal, A.A and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. Journal of Agricultural Water Management, 96: 893-904.

Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J and Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip Irrigation with experimental observations. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 130(4): 304-310.

Walker, R.W. 1987. Surface irrigation and simulation model (SIRMOD). Utah State University, Utah, USA, 450 p.

- مطالعه تغییرات پروفیل رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری
- مدنظر قرار دادن بسیاری از پارامترهای مؤثر در پدیده نفوذ مانند محیط خیس شده، ارتفاع آب داخل جویچه، خصوصیات هیدرولیکی خاک از قبیل بافت و ساختمان خاک، هدایت هیدرولیکی و ...، شکل و ابعاد جویچه‌ها، فاصله جویچه‌ها از هم و اثر جویچه‌های مجاور
- مدنظر قرار دادن تغییرات پارامترهای مؤثر در پدیده نفوذ در حین آبیاری مانند تغییرات محیط خیس شده.
- مطالعه تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر روی مقادیر نفوذ و حجم آب خروجی
- مطالعه تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف بر روی مقادیر نفوذ و حجم آب خروجی
- مطالعه دقیق نحوه تغییرات رطوبت زیرسطحی در مدیریت‌های مختلف آبیاری سطحی مانند آبیاری موجی
- علاوه بر این، مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی جذب آب و اصلاح توسط ریشه را نیز دارد که می‌توان تأثیرات نوع گیاه و الگوی کشت بر روی نحوه توزیع رطوبت خاک در آبیاری جویچه‌ای و هم‌چنین حرکت اصلاح در این نوع آبیاری را مورد بحث و بررسی قرار داد.

## منابع

- بهبهانی، م.ر.، بابازاده، ح. ۱۳۸۴. ارزیابی مزرعه‌ای مدل آبیاری سطحی (SIRMOD) (مطالعه موردی در آبیاری شیاری). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. سال دوازدهم، شماره ۲، صفحه ۱۰-۱.
- عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران.
- مصطفی زاده، ب.، موسوی، ف. ۱۳۷۵. آبیاری سطحی (تئوری و عمل). انتشارات فرهنگ جامع، تهران.
- Abbasi, F., Feyen, J and van Genuchten, M.Th. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. Journal of Hydrology 290: 63-79.
- Bufon, V.B., Lascano, R.J., Bednarz, C., Booker, J.D and Gitz, D.C. 2012. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. Irrigation Science. 30(4): 259-273.
- Kandelous, M.M., Simunek, J., van Genuchten, M.Th. and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. Soil Science Society of America Journal.

## Application of the SIRMOD and HYDRUS-3D Models to Completely Simulate the Furrow Irrigation Process

S. Noorabadi<sup>1\*</sup>, S. A. Sadraddini<sup>2</sup>, A. H. Nazemi<sup>3</sup>, R. Delirhasannia<sup>4</sup>

Received: Nov. 20, 2013      Accepted: Aug. 27, 2014

### Abstract

SIRMOD as one of the widely used softwares for simulation of furrow irrigation uses Saint- Venant equations to describe different phases of furrow irrigation and Kostiakov-Lewis infiltration model to predict the infiltrated water volume during irrigation. The method of determining the coefficients of the infiltration equation, simplified assumptions for infiltration equation and considering infiltration as a one-dimensional phenomenon cause some effective factors in the infiltration process to be neglected. Therefore, using a software such as HYDRUS that uses Richards equation as basic water movement equation and considers many effective factors in infiltration, can increase the accuracy of predicted infiltrated water volume and consequently simulation accuracy. In this research, after conducting field experiments and recording related data, all phases of furrow irrigation were predicted using the SIRMOD and the results were introduced to the HYDRUS-3D as initial and boundary conditions to determine the infiltrated water volume using the Richards equation. Finally, the simulated values from two models were compared with the experimental data. Results showed that the complete hydrodynamic model in SIRMOD had high ability in the prediction of all phases of the irrigation, especially in advance phase and the HYDRUS-3D model simulated the infiltrated water volume and outflow hydrograph more accurately than SIRMOD model. Comparison of results from the models and measured values showed that incorporation of the two softwares would increase the accuracy of simulated infiltration and run-off values. In addition, the important advantage of this method is simulating soil water distribution during all irrigation phases.

**Key words:** Furrow irrigation, HYDRUS, Richards equation, Saint-Venant equations, Simulation, SIRMOD

1 - Ph.D. Candidate of Irrigation and Drainage, Faculty of agriculture, University of Tabriz

2 - Professor of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3 - Professor of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

4 - Assistant of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(\*-Corresponding Author Email: saeed\_noorabadi@yahoo.com)