نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۴۸۴-۴۷۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 472-484

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی روش‌هایی برای استخراج معادلات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای

حسین شیبانی[۱]، امید محمدی[۲*]، علی‌رضا سلطانی تودِشکی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۰

چکیده

در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته آبیاری سطحی با مدیریت صحیح و استفاده از روش‌های مناسب شرایط حاکم بر اراضی تحت آبیاری، راندمان کاربرد آب در حد آبیاری تحت‌فشار چه‌بسا بالاتر نیز بهره‌برداری شده است. دو عامل اصلی کاهش راندمان آبیاری، نفوذ عمقی و هدر رفت آب به‌صورت رواناب است. از جمله مهم‌ترین پارامتر در بالا بردن راندمان آبیاری و کاهش رواناب و نفوذ عمقی، اطلاع از شرایط حاکم بر نفوذ آب در طول زمان آبیاری است. در این پژوهش شش روش استخراج معادلهٔ نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، در مزرعهٔ لورک دانشگاه صنعتی اصفهان بررسی شده و همچنین شدت تغییرات حجم ذخیره سطحی برآورد گردید. با انجام سه تکرار و پنج عملیات آبیاری جویچه‌ای و همچنین آزمایش استوانه‌های نفوذ، اطلاعات لازم شامل شکل جویچه، پیشروی، پسروی، شدت جریان ورودی-خروجی و همچنین تغییرات نفوذ در شرایط استغراقی ساکن جمع‌آوری و نتایج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی تحلیل گردید. بررسی فرآیند نفوذ معادلات مختلف در پنج بازهٔ زمانی موردبررسی نشان داد که از لحاظ آماری اختلاف معناداری در سطح یک درصد در زمینهٔ برآورد متوسط نفوذ توسط این معادلات وجود دارد، به‌طوری‌که بیشترین متوسط نفوذ مربوط به معادلهٔ موازنه حجم و کمترین آن مربوط به روش ورودی-خروجی بود. از طرف دیگر، مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، کمترین خطاها (نزدیک به صفر) مربوط به معادلات تعدیل‌یافتهٔ استوانه نفوذ می‌باشد. در حقیقت، این معادله‌ها، با توجه به تعدیلی که با لحاظ متوسط فرصت نفوذ و مقدار آب نفوذیافتهٔ اندازه‌گیری‌شده در آن‌ها صورت گرفته، برای مدّت زمان انجام آزمایش‌ها (با متوسط فرصت نفوذ حدود یک ساعته) مقادیر بسیار نزدیکی به مقدار اندازه‌گیری‌شده در مزرعه به‌دست داده‌اند به‌طورکلی معادلات با ساختار توانیِ چندجمله‌ای مقدار نفوذ را بیشتر از معادلات با ساختار توانی برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای نفوذ بایستی متناظر با شرایط کاربردی باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، تغییرات حجم ذخیره سطحی، معادلات نفوذ

مقدمه

پدیده نفوذ یکی از عوامل اساسی در عملکرد آبیاری سطحی و در اندازه‌گیری، از حساس‌ترین و مشکل‌ترین متغیّرها می‌باشد (انصاری، ۱۳۹۰ و مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۹۰). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که عملکرد آبیاری می‌تواند با مدیریت صحیح آبیاری بهبود یابد و از سویی یکی از مراحل مهم برای طراحی و عملکرد سیستم‌های آبیاری سطحی تعیین پارامترهای معادله نفوذ است (Gillies and smith, 2007). مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری سطحی بر اساس استفاده از یک معادله نفوذ است. معادلات نفوذ مختلفی به‌صورت تجربی، نیمه تجربی یا فیزیکی برای تعیین نفوذ آب به خاک بکار می‌روند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، نتایج معادلات تجربی (بر اساس اطلاعات تجربی) بهتر از معادلات فیزیکی، با داده‌های مزرعه‌ای مطابقت می‌کند. با توجه به اینکه دقت مدل‌های آبیاری سطحی به تعیین دقیق معادله نفوذ وابسته است لذا ضرورت دارد که این معادله تا حد امکان بیانگر شرایط حاکم بر مزرعه باشد. در آبیاری سطحی، معمولاً استفاده از معادله کاستیاکف- لوئیس را (که برای نفوذ یک تابع توانیِ چندجمله‌ای از فرصت نفوذ را در نظر می‌گیرد) برای این منظور توصیه می‌نمایند (محمودیان، ۱۳۷۶ و انصاری، ۱۳۹۰). معادلات مختلفی برای نفوذ خاک ارائه شده‌اند که انتخاب روش مناسب بستگی به داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مزرعه دارد (Kazeroonian et al., 2017). از این‌رو تابع هدفی که می‌تواند اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده زمان‌های پیشروی، پسروی و حجم رواناب را

۱- دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی،دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email:O..mohamadi333@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.3.2.3

به‌صورت هم‌زمان بهینه کند ضرایب را نیز با دقت بالایی تخمین می‌زند. این توابع هدف بر اساس کمینه کردن اختلاف بین زمان پیشروی، پسروی و کل حجم رواناب خروجی می‌باشند. از این‌رو مدل‌های مختلفی برای برآورد معکوس ضرایب نفوذ خاک وجود دارد (Sedaghatdoost and Ebrahimian, 2015). پژوهش‌ها نشان می‌دهد فرآیند نفوذ و پیشروی در آبیاری جویچه‌ای را می‌توان به‌وسیله معادلات سنت- ونانت[1] یک‌بعدی و معادله نفوذ ریچاردز[2] دو بعدی با دقّت بالایی شبیه‌سازی کرد (Banti et al., 2011). این معادلات، روابط پایه و اساسی در تبیین هیدرولیک آبیاری سطحی می‌باشد اما به دلیل مشکلات حل نمودن این معادلات، از یکسری فرض‌ها و ساده‌سازی‌ها برای محاسبات مربوط به آن‌ها استفاده می‌شود (مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۸۸). یکی از روش‌های متداول و قابل‌اعتماد در این زمینه، استفاده از اصل موازنهٔ حجمی است (Davis and fry., 1963). برای مثال روش تعادل حجمی مریام -کلر، عمدتاً روی فاز پیشروی روش‌های آبیاری نواری، کرتی و جویچه‌ای به کار گرفته می‌شود. به علت مشکل بودن حل معادله هیدرودینامیک کامل، از معادلات مومنتم در این معادله صرف‌نظر می‌شود که مدل‌هایی که بر اساس این ساده‌سازی می‌باشند تعادل حجمی نامیده می‌شوند. از خانواده نفوذ USDA به علت عملکرد و کارایی گسترده آن در آبیاری سطحی بسیار استفاده می‌شود (Sayah et al., 2016). مدل موازنه حجم[3] معادله دوم معادلات سنت- ونانت (معادله اندازه حرکت) را در نظر نمی‌گیرد و از قانون بقای جرم استفاده می‌کند. این مدل ساده‌ترین تحلیل هیدرولیک جریان در آبیاری سطحی می‌باشد که برای بسیاری از مسائل نتایج رضایت‌بخشی ارائه می‌نماید. از طرفی، چون کلّ جویچه را به‌عنوان یک نفوذسنج در نظر می‌گیرد، بنابراین شرایط واقعی جریان و شکل جویچه در آن منظور می‌شود (عباسی، ۱۳۹۱ و مصطفی‌زاده، ۱۳۷۰). نتایج مطالعه‌ای برای صحت‌سنجی مدلSISCO از مدل‌های WinSRFR و SIRMOD نشان داد، هر سه مدل مراحل پیشروی، رواناب و عمق نفوذ را یکسان برآورد نمودند. همچنین هر سه مدل مقادیر پیک هیدروگراف رواناب را ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر مشاهداتی، برآورد نمودند (Gillies smith and, 2016). روش موازنهٔ حجم در مقایسه با مدل‌های دیگر، دارای محدودیت‌هایی مانند ضرورت کافی بودن شیب مزرعه، متکی بودن بر اطلاعات مرحله پیشروی، ناچیز فرض کردن مرحله پسروی و ثابت فرض کردن ضرایب شکل ذخیره سطحی و زیرسطحی می‌باشد (عباسی، ۱۳۹۱). البته، اصل موازنه حجم همواره برقرار است، اما فرضیات و محدودیت‌های این مدل، باعث بروز خطاهایی در محاسبات می‌گردد. با توجه به مزیت‌های مدل موازنه حجمی، تحقیقات متعددی برای افزایش دقّت این مدل صورت گرفته است. برای نمونه، افزایش دقّت در برآورد مؤلفهٔ «ذخیرهٔ سطحی» می‌تواند به میزان قابل‌ملاحظه‌ای، دقّت تخمین مسافت پیشروی در مدل را افزایش دهد (گلستانی‌کرمانی و همکاران، ۱۳۸۸). در مقایسه روش‌های اندازه‌گیری نفوذ مشخص شده است که روش‌های بر اساس حرکت آب مانند روش ورودی- خروجی، سرعت نفوذ بزرگ‌تری نسبت به روش‌های بدون حرکت آب مانند استوانه‌های مضاعف به دست می‌دهند. همچنین نتیجه شد که معادلات کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح‌شده بسیار خوب با داده‌های واقعی مزرعه تطبیق یافتند (Holzapfel et al., 1988). سرعت‌های نفوذ به‌دست‌آمده توسط روش ورودی- خروجی معمولاً تغییر تدریجی بیشتری در منحنی سرعت نفوذ نسبت به روش توازن حجمی ایجاد می‌کند. نتایج، بیشتر برای زمان‌های نفوذ بزرگ کاربردی هستند و تا حدودی وابسته به طول جویچه و سرعت پیشروی می‌باشند (Kincaid, 1986). نفوذ در جویچه باید در صورت امکان با جریان یافتن آب اندازه‌گیری شود و برای این منظور روش‌های توازن حجمی و ورودی- خروجی دقیق‌ترین روش‌ها می‌باشند (Davis and fry, 1968). باید توجه شود که عدم دقّت در اندازه‌گیری شدت جریان، باعث ایجاد خطای بزرگ‌تری در محاسبه نفوذ به روش ورودی- خروجی می‌گردد. استفاده از وسایل یکسان و هم‌نوع در اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی معمولاً خطای محاسبه نفوذ را کاهش می‌دهد. به دلیل شرایط بسیار متغیر، برای اندازه‌گیری با دقّت سرعت نفوذ متوسط، آزمایش نفوذ باید در چند جویچه تکرار گردد (Trout and mackey, 1988). شدت جریان ورودی و خروجی مزرعه تشکیل آبنمودهای ورودی و خروجی می‌دهند که از آن‌ها سه نکته مهم حاصل می‌شود. اوّل، انتگرال‌گیری از آبنمودهای منفرد و سپس مقایسه آن‌ها، میزان دقیق حجم کل آب نفوذ کرده را می‌دهد. دوم، سرعت نفوذ پایه (شایان‌ذکر است که یکی از کاربردهای مهم روش ورودی- خروجی تعیین نفوذ نهائی خاک است (Bautista and wallender, 1993; Elliott et al., 1983) تعیین می‌شود. سوم، می‌توان تخمینی از ذخیره سطحی آب در زمان قطع جریان (بیشینه ذخیره سطحی) به دست آورد (Walker and Skogerboe, 1987). محققان در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که اگر در طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای از معادلات نفوذ اصلاح‌شده استفاده شود دقت نتایج به‌صورت قابل قبولی افزایش می‌یابد که باعث بهبود شاخص‌های هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری می‌شود (Maroufpoor et al., 2017). پوزن و همکاران در تحقیقی روشی جدید برای برآورد نفوذ ارائه دادند که برخلاف سایر روش‌های مقیاس سازی معادله نفوذ، منحنی مرجع در روش جدید اختیاری بوده و هریک از معادله‌های نفوذ را می‌توان به‌عنوان منحنی مرجع انتخاب کرد (پوزن و همکاران ۱۳۹۹). در پژوهشی روش‌های تخمین

1- Saint-Venant
2- Richards
3- Volume balance model

معکوس ضرایب معادله نفوذ موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد روش دو نقطه‌ای عملکرد قابل قبولی در تخمین حجم نفوذ یافته با متوسط خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد ارائه نموده است (Kamali et al., 2018). هنوز هم با وجود افزایش روزافزون سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار، بسیاری از اراضی کشاورزی با استفاده از روش سطحی آبیاری می‌شود. عدم نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه، پایین بودن هزینه-های جاری و فقدان وجود هزینه بازسازی و تعمیرات باعث شده که آبیاری سطحی طرفداران زیادی داشته باشد؛ اما پایین بودن راندمان کاربرد آب به دلیل عدم مدیریت صحیح می‌تواند به هدر رفت حجم قابل‌ملاحظه‌ای از آب کشاورزی منجر شود. این در صورتی است که در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته با مدیریت صحیح و استفاده از روش‌های مناسب شرایط حاکم بر اراضی تحت آبیاری، راندمان کاربرد آب در حد آبیاری تحت‌فشار چه‌بسا بالاتر نیز بهره‌برداری شده است. دو عامل اصلی کاهش راندمان آبیاری نفوذ عمقی و هدر رفت آب به‌صورت رواناب است. از جمله مهم‌ترین پارامتر در بالا بردن راندمان آبیاری و کاهش رواناب و نفوذ عمقی، اطلاع از شرایط حاکم بر نفوذ آب در طول زمان آبیاری است. از این‌رو در این مطالعه میزان دقت برآورد و ارزیابی روش‌های مختلف در شرایط متفاوت در منطقه لورک اصفهان موردبررسی قرار داده خواهد شد. به‌طورکلی اهداف این مطالعه عبارت‌اند از:

۱- مقایسهٔ معادله نفوذ «توانی» و «توانیِ چندجمله‌ای» (کاستیاکف- لوئیس) در آبیاری سطحی، حاصل از:

استخراج به روشِ موازنهٔ حجمی جریان در مرحلهٔ پیشروی و با روش حل دونقطه‌ای.

روش آبنمودهای ورودی- خروجیِ ردیف‌های آبیاری

و روش «ترکیبیِ» تحلیل آماری اطلاعات استوانه‌های نفوذ و تعدیل با سنجش‌های مزرعه‌ای.

۲- بررسی ملاحظات کاربردی این روش‌ها و تحلیل چالش‌های احتمالی در تطبیق با ارقام مزرعه‌ای.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایشات: مزرعه آزمایشی- تحقیقاتی لورک در ۴۰ کیلومتری شمال‌غرب‌وز اصفهان (شکل-۱)، در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه قرار دارد. ارتفاع این مزرعه از سطح دریا ۱۶۳۰ متر و دارای اقلیم نیمه‌خشک خنک با تابستان‌های خشک می‌باشد. میانگین بارندگی در منطقه ۱۴۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالیانه ۵ درجهٔ سانتی‌گراد است.

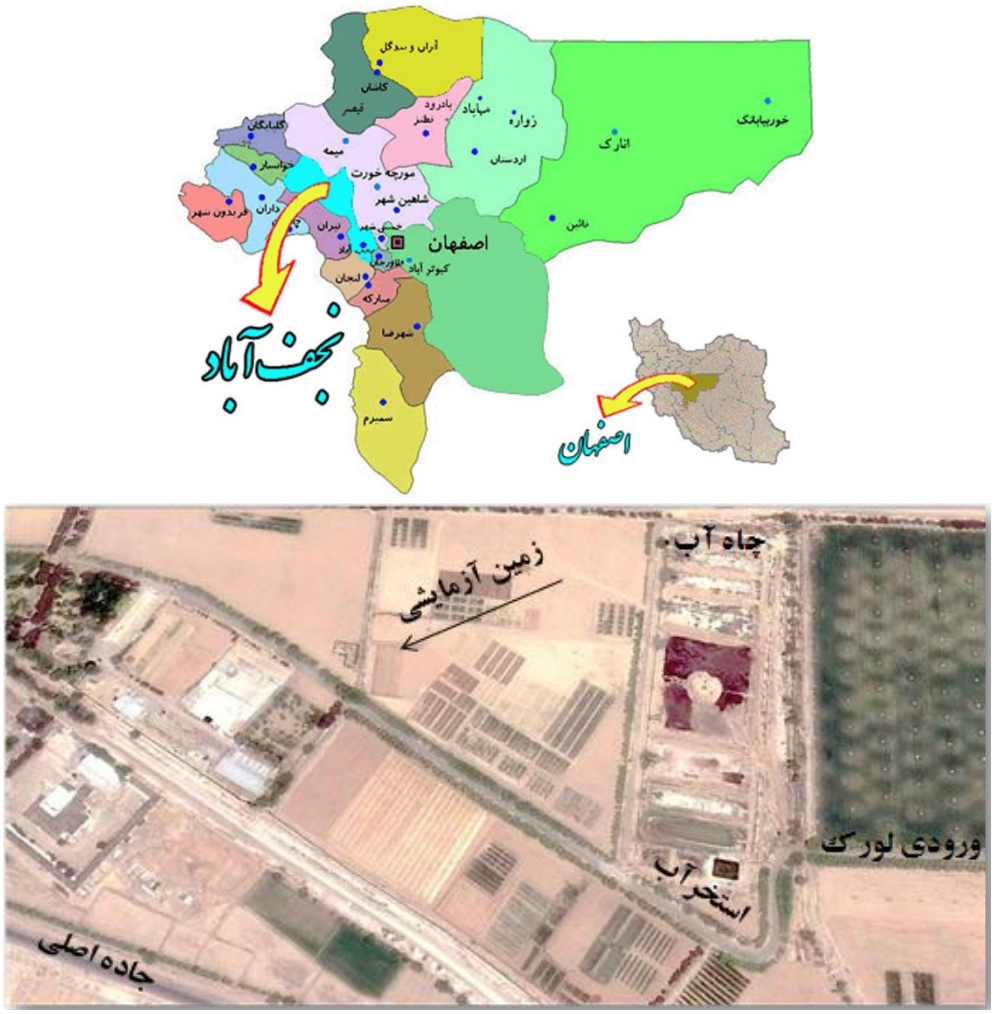
به‌منظور استخراج معادلات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، مزرعهٔ آزمایشی-تحقیقاتی لورک در ۴۰ کیلومتری شمال غربی اصفهان، در نظر گرفته شد و عملیات شخم زدن، خاک‌برگردانی و مالهٔ زنی با وسایل سنتی در آن‌ها صورت پذیرفت. آنگاه عملیات تسطیح زمین با استفاده از دستگاه شیب‌ساز[1] صورت گرفت و ضمن ترسیم نقشهٔ پستی بلندی، شیب کلی زمین و نیم‌رخ مزرعه در جهت طولی با استفاده از نقشه‌برداری تعیین گردید. بعد از تسطیح، جویچه‌هایی با عرض ۶۰ سانتی‌متر، عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر و حداقل طول ۳۰ متر ایجاد شد.

در این تحقیق نمونه‌برداری از اعماق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر از خاک توسط متهٔ نمونه‌برداری[2]، انجام گردید و بافت خاک به روش هیدرومتری[3] تعیین شد. خصوصیات خاک منطقه موردبررسی در جدول ۱ آمده است.

با توجه به جدول ۱ می‌توان مطالعه پیش رو را برای انجام عملیات زراعی و آبیاری با عمق ریشه متوسط ۶۰ سانتی‌متر و خاک با بافت لومی تعمیم داد.

مزرعهٔ طرح، پنج بار در طول آزمایش آبیاری گردید. برای توزیع آب در جویچه‌ها از لوله دریچه دار[4] استفاده شد و جریان‌های ورودی-خروجی در آن‌ها توسط ناوی‌های کوتاه گلوی ذوزنقه‌ای[5] اندازه‌گیری گردید. شدت جریان ورودی به هر جویچه ثابت و در حدود ۰/۴ لیتر بر ثانیه از طریق ثابت نگه‌داشتن سطح آب در مخزن تثبیت (از طریق ایجاد سرریز در مخزن) تأمین شد. همچنین از محل نصب ناوی ابتدایی به سمت پائین‌دست، ۱۰ ایستگاه به فواصل سه متری نشانه‌گذاری گردید. آزمایش با انتقال آب به جویچه‌ها آغاز و اطلاعات موردنیاز منحنی‌های پیشروی-پسروی و آبنمود[6] جریان ورودی و خروجی در هر آزمایش ثبت گردید. پیش از قطع جریان، عمق آب در ابتدای جویچه‌ها اندازه‌گیری و بعد از اتمام آبیاری نیز مختصات سطح مقطع جویچه در ایستگاه اوّل با مقطع سنج برداشت شد. با استفاده از این اطلاعات ضرایب شکل هندسی جویچه و ضرایب هیدرولیکی مقطع جریان محاسبه گردید. لازم به ذکر است هم‌زمان، آزمایش‌های استوانه نفوذ با شش ساعت تداوم در سه نقطه از سطح زمین به موازات جویچه‌ها، در هر آبیاری انجام گرفت. به‌جز استخراج معادلهٔ نفوذ، برای برآورد هدایت هیدرولیکی نیز از استوانهٔ نفوذ استفاده شد که به این موضوع در قسمت بعد پرداخته می‌شود.

1- grader
2- Auger
3- Hydrometer Method
4 Hydroflume
5 WSC flume
6 Hydrograph



شکل ۱- نمایی از موقعیت کلی منطقه موردمطالعه.

جدول ۱- توزیع اندازه ذرات و بافت خاک در دو لایه سطحی و زیرسطحی و مشخصات شیب مزرعه

عمق نمونه‌برداری	ذرات خاک			بافت خاک	شیب مزرعه		عرض جویچه	طول جویچه
	شن	سیلت	رس		شیب طولی	شیب عرضی		
س.م	درصد	درصد	درصد	-	متر در متر	متر در متر	متر	متر
۰ - ۳۰	۴۹	۲۵/۶	۲۵/۴	Loam	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	۰/۶	۳۰
۳۰ - ۶۰	۵۱/۶	۲۶	۲۲/۴	Sandy clay loam				

برای اندازه‌گیری نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع در مزرعه به‌طور گسترده‌ای از نفوذسنج استوانه‌های مضاعف به دلیل سهولت کاربرد و کم‌هزینه بودن آن استفاده می‌شود. استوانه‌های مضاعف به‌صورت متحدالمرکز تا عمق ۱۵ سانتی‌متر در خاک فرو برده می‌شوند، آنگاه با اعمال عمق آب موردنظر در استوانه مقدار نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری می‌شود. همچنین در این روش در نظر گرفتن استوانه بیرونی سبب کمینه شدن جریان جانبی در استوانه داخلی می‌شود. با توجه به اینکه پس از گذشت زمان کافی و تا برقراری جریان ماندگار، معمولاً شیب هیدرولیکی، واحد فرض می‌گردد، بنابراین در این روش مقدار هدایت هیدرولیکی خاک معادل با سرعت نفوذ آب به خاک در حالت ماندگار در نظر گرفته می‌شود. همچنین با استفاده از داده‌های استوانه‌های مضاعف مقدار هدایت هیدرولیکی با تقریب بسیار خوب برابر با سرعت نفوذ آب به خاک در حالت ماندگار است (رضایی پور ۱۳۹۱).

در این تحقیق، برای تخمین ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای از مدل EVALUE استفاده شد. اساس مدل EVALUE بر رابطه بیلان حجم است و پارامترهای رابطه نفوذ کوستیاکف شاخه‌ای و ضریب زبری مانینگ را به‌طور هم‌زمان در مزارع آبیاری سطحی برآورد می‌کند. برای استخراج معادله‌های نفوذ از شش روش زیر استفاده شد:

روش موازنه حجمی (چندجمله‌ای)

روش معمول برای به دست آوردن معادله نفوذ در جویچه روش موازنه حجمی است. این روش که اولین بار توسط کریستیانسن معرفی گردیده (Childs and wallendr, 1993)، کل جویچه را به‌عنوان یک نفوذسنج در نظر می‌گیرد. روش موازنهٔ حجم بر قانون بقای جرم استوار بوده (مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۹۰ و عباسی، ۱۳۹۰) و بر اساس آن حجم ورودی در مدت پیشروی (V_{input_adv})، با ذخیرهٔ سطحی (متوسط سطح مقطع جریان در طول پیشروی آب، $V_{surface_adv} = \overline{A}_{sur} \times \boldsymbol{x}_{adv}$) و آب نفوذیافته ($V_{infiltration_adv} = \overline{A}_{inf} \times \boldsymbol{x}_{adv}$)، معادل قرار می‌گیرد:

$$V_{input_adv} \equiv V_{surface_adv} + V_{infiltration_adv} \quad (۱)$$

$$\Rightarrow \int_0^{t_{adv}} Q_{in(t)}.dt = (\overline{A}_{sur} + \overline{A}_{inf}) \times \boldsymbol{x}_{adv} \quad (۲)$$

معادلهٔ موزانهٔ حجم به روش‌های مختلف و با فرضیات متفاوت حل گردیده است (عباسی، ۱۳۹۱) که از متداول‌ترین آن‌ها فرض یک «ساختار توانی» برای معادلهٔ پیشروی و یک تابع توانیِ چندجمله‌ای (کاستیاکف- لوئیس) به‌عنوان معادله نفوذ است که حل آن به «روش دو نقطه‌ای» پیشنهاد شده است (مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۹۰) با این فرضیات، معادله موازنهٔ حجم آب در هر زمان به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q_0.t = \sigma_y.A_o.x_{adv} + \sigma_z.k.t^{\alpha}.x_{adv} + \sigma'_z.f_o.t.x_{adv} \quad (۳)$$

که در آن، a و k ضرایب معادله نفوذ به‌صورت تابع توانی چندجمله‌ای ($Z = k.t^{\alpha} + f_o.t$)، Q_0 شدت جریان ورودی، مترمکعب در ثانیه، f_0 سرعت نفوذ نهایی خاک، مترمکعب در متر در ثانیه، t_a زمان پیشروی آب تا مسافت x_a، ثانیه، A_0 سطح مقطع جریان ورود آب به جویچه، مترمربع، σ_y ضریب شکل ذخیره سطحی که ثابت بوده و برابر ۰/۷ تا ۰/۸ فرض می‌شود. σ_z و σ'_z نیز ضریب شکل ذخیره زیرسطحی هستند که مقدار آن‌ها با استفاده از رابطه‌های زیر تعیین می‌گردند:

$$\sigma_z = \frac{1}{(1+r)} \times (1 + r \times \frac{1-\alpha}{1+\alpha}) \quad (۴)$$

$$\sigma'_z = \frac{1}{1+r}$$

در این معادلات، α توان معادله نفوذ و r توان معادله پیشروی ($x = p.t^r$) می‌باشد.

متغیرهای معادله موازنه در جویچه به‌صورت زیر به دست آمد:

الف- مقدار نفوذ نهایی خاک، بر اساس اختلاف شدت جریان ورودی و خروجی در مقطعی از زمان که جریان ثابت می‌شد:

$$f_o = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A} \quad (۵)$$

در این معادله Q_{in} و Q_{out} مقادیر تثبیت شدت جریان ورودی و خروجی هستند (بر حسب حجم بر زمان) و L طول یک جویچه است (مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۸۸). مقادیر fo حاصل از معادله فوق با تقسیم بر عرض جویچه به واحد کاربردی آن یعنی شدت (طول بر زمان) تبدیل خواهد شد.

ب- برای به دست آوردن مقدار r (توان معادله پیشروی) از داده‌های پیشروی و روش معمول دو نقطه‌ای استفاده شد (Walker and Skogerboe, 1982).

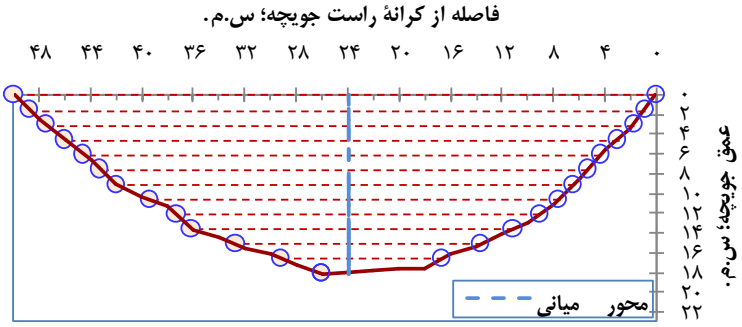
ج- مقدار سطح مقطع جریان در ابتدای جویچه، *Ao*، با استخراج مشخصه‌های هندسی مقطع در مزرعه به دست آمد.

برای به دست آوردن مشخصه‌های سطح مقطع جریان، اطلاعات هندسی مقطع بازسازی شد (شکل ۲) تا بتوان به کمک نقاطی با مختصات و عمق مشخص، محیط خیس، عرض بالایی و مقدار سطح مقطع جریان را محاسبه نموده و معادلات موردنظر را به آن‌ها برازش داد.

برای برازش معادلات شکل هندسی جریان، شامل محیط خیس شده، عرض بالایی جریان و سطح مقطع جریان، ضمن استفاده از روش دونقطه‌ای و انتخاب دو نقطه میانی و انتهایی از محدوده عمق جریان، نسبت به بازبینی نمودار نتایج برازش اقدام و ضرایب معادلات استخراج شد. با مشخص شدن متغیرهای معادلهٔ موازنه، تنها یک جملهٔ مجهول در معادلهٔ موازنه باقی می‌ماند که عبارت است از: $\sigma_z.k.t_i^{\alpha}$. با جابجایی جملات معادلهٔ موازنه می‌توان این جمله را محاسبه نمود.

$$V_i = \sigma_z.k.t^{\alpha} = \frac{Q_0.t}{x_{adv}} - \sigma_y A_0 - \frac{f_o.t}{1+r} \quad (۶)$$

که در آن V_i حجم ویژه در زمان‌های مختلف پیشروی می‌باشد. برای حل معادله موازنه حجم روش‌های گوناگونی ارائه شده است که در اینجا از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر استفاده گردید (Elliott et al., 1983). طبق روش الیوت و واکر از دو نقطه که یکی در انتهای جویچه و دیگری در میانهٔ جویچه (هم‌زمان با بازبینی نتیجهٔ برازش) استفاده شد و ضرایب α و k برای معادله نفوذ طبق روابط زیر به دست آمد:



شکل ۲- نمودار سطح مقطع جویچه همراه با نقاط بازسازی‌شده برای عمق‌های مختلف

$$a = \ln(\frac{V_L}{V_{0.5L}}) \div \ln(\frac{t_L}{t_{0.5L}}) \qquad (۷)$$

$$k = \frac{V_L}{\sigma_z (t_L)^a}$$

روش موازنه حجمی (توانی)

معادله نفوذ توانی به‌دست‌آمده از روش موازنه حجم نیز همانند قالب چندجمله‌ای آن می‌باشد با این تفاوت که در این روش نفوذ نهایی صفر در نظر گرفته می‌شود ($\sigma'_z . f_o . t \ . x_a = 0$)

۱- روش ورودی-خروجی (توانی)

برای به دست آوردن معادله نفوذ به روش ورودی- خروجی از آبنمودهای جریان استفاده شد. داده‌های جمع‌آوری‌شده شامل ارتفاع آب در ناوی ورودی-خروجی بود. معادله نفوذ به‌دست‌آمده از این روش به‌صورت زیر قابل‌استخراج است:

از اتمام پیشروی تا ابتدای تثبیت جریان خروجی

در این روش نیز اختلاف شدت جریان ورودی و خروجی در زمان‌های پس از اتمام مرحلهٔ پیشروی، هم‌ارز با شدّت نفوذ، به اضافه شدّت تغییر حجم ذخیره سطحی، می‌باشد، با این تفاوت که A_{inf} سطح اسمیِ نفوذ از حاصل‌ضرب عرض جویچه، W، در طول جویچه، L، به دست می‌آید. لازم به‌دقت است ازآنجاکه شدت نفوذ در معادلهٔ فوق به‌صورت متوسط در طول جویچه محاسبه می‌شود، مقادیر شدت نفوذ به‌دست‌آمده از این روش، بایستی متناظر با این شرایط به کار گرفته شود؛ بنابراین زمان در معادلهٔ نفوذ به‌صورت $t-(T_{adv}-\overline{T}_{adv})$ به کار برده می‌شود که T_{adv} مدت پیشروی و $\overline{T}_{adv}$ متوسط زمان پیشروی یا متوسط فرصت نفوذ در مرحلهٔ پیشروی می‌باشد. به‌منظور برآورد تغییرات ذخیرهٔ سطحی در محدودهٔ مذکور، می‌توان یک معادله چندجمله‌ای درجهٔ دو در نظر گرفته و با شرایط مرزی مناسب ضرائب آن را به دست آورد:

$$R_{SS} = a.t^2 + b.t \ + c \qquad (۸)$$

بدیهی است، مقدار تغییرات ذخیرهٔ سطحی در ابتدای تثبیت جریان خروجی (T_f)، صفر می‌باشد و در زمان اتمام پیشروی (T_{adv})، نیز مقدار آن از مشتق معادلات حجم ذخیره سطحی قابل تخمین خواهد بود. ذخیرهٔ سطحی در مرحلهٔ پیشروی (V_{Sur})، از صفر تا رقم مشخصی افزایش می‌یابد (Va)، که از دو رابطهٔ زیر قابل برآورد (به مترمکعب) می‌باشد (سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴ و مصطفی‌زاده و موسوی، ۱۳۹۰):

$$V_S : \begin{cases} = \sigma_y \times A_o . x = \sigma_y \times C_1 . \left(\frac{q_o . n}{\sqrt{S}}\right)^{C_2} . x \\ = f(x, \frac{q_o . n}{\sqrt{S}}) = \left(C'_1 . \left(\frac{q_o . n}{\sqrt{S}}\right)^{C'_2} + C'_3\right) . x \times \frac{1000}{0.3048} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C'_1 = 2.947 \\ C'_2 = 0.753 \\ C'_3 = -0.0217 \end{cases} \qquad (۹)$$

در این معادله‌ها که هرکدام یک تابع خطی نسبت به طول پیشروی (x) می‌باشند $(V_S = C_a \times x)$، A_o سطح مقطع بیشینهٔ جریان در ابتدای ردیف آبیاری، σ_y ضریب شکل ذخیرهٔ سطحی، q_o شدت جریان ورودی (لیتر بر ثانیه)، n ضریب زبری، S شیب ردیف آبیاری، $C1$ و $C2$ مربوط به ضرایب قابل‌استخراج از اطلاعات سطح مقطع جریان و ضرایب C' مقادیر ثابت معادله هستند. برای انتخاب یکی از دو روش فوق، مناسب است در هر شرایط، میزان اعتماد و دسترسی به داده‌های موردنیاز، مدنظر قرار گیرد. با فرضِ توانی بودن سرعت پیشروی $(x = p \times t^r)$، رابطهٔ V_S نسبت به زمان، به‌صورت غیرخطیِ زیر درخواهد آمد:

$$V_S = C_a \times p.t^r \qquad (۱۰)$$

این معادله را می‌توان با جایگزینی ضریب C_a، با استفاده از نقطهٔ انتهائی پیشروی در زمان T_{adv}، که حجم ذخیره معادل با $V_a = C_a . p \times T_{adv}^{\ r}$ را ایجاد خواهد نمود، به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$V_S = V_a \times \left(\frac{t}{T_{adv}}\right)^r \qquad (۱۱)$$

بر این اساس، شرایط مرزی معادلهٔ شدت تغییرات ذخیره سطحی را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\begin{cases} R_{ss} = \dfrac{dV_s}{dt} = \dfrac{V_a}{T_{adv}^{\,r}} \times r \times t^{r-1} \xrightarrow{t=T_a} = \dfrac{r}{T_a} \times V_a & [1] \\ R_x = 0 & [2] \end{cases} \qquad (۱۲)$$

در این معادلات، R_a و R_x به ترتیب، شدت تغییرات ذخیره سطحی در نقطهٔ اتمام پیشروی و در نقطهٔ تثبیت جریان خروجی (یا حداقل مقدار ذخیرهٔ سطحی) می‌باشد.

با توجه به شرایط مرزی فوق و به‌منظور سادگی محاسبات، معادله شدت تغییرات ذخیرهٔ سطحی به‌صورت زیر تنظیم گشت:

$$R_{SS} = \omega.(t - T_f)^2 \qquad (۱۳)$$

ویژگی این معادله، قرارگیری شرط مرزی در ساختار معادله است.

$$\omega = \frac{R_a}{(t - T_f)^2} = \frac{V_a}{T_a} \times \frac{r}{(T_a - T_f)^2} \qquad (۱۴)$$

با این روش، مقادیر تغییرات ذخیرهٔ سطحی در هر عملیات آبیاری محاسبه شد.

با این حال در جویچه‌هایی با شیب بیشتر از ۰/۰۰۵ سرعت تغییرات ذخیره سطحی[1] (بعد از پیشروی) کوچک است به‌طوری‌که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد (Kincaid, 1986).

۱- روش ورودی-خروجی (چندجمله‌ای)

در روش تکمیل‌یافتهٔ پیشنهادی، قبل از انتگرال‌گیری، مقدار نفوذ نهائی که از بخش تثبیت جریان قابل استحصال است، از مقادیر شدت نفوذ کسر گردید (سلطانی تودشکی، ۱۳۹۰) و با برازش یک معادله توانی ساده ضرایب معادلات به دست آمد:

$$Z - f_o.t = \int (I(t) - f_o).dt = k \times t^{\alpha} \quad \Rightarrow \quad Z = k \times t^{\alpha} + f_o.t \qquad (۱۵)$$

۱- روش تعدیل مزرعه‌ای اطلاعات استوانه‌های نفوذ (توانی)

در این روش، ابتدا با استفاده از داده‌های استوانه‌های نفوذ، معادله توانی ساده به دست می‌آید. آنگاه با استفاده از داده‌های مربوط به جویچه، متوسط فرصت نفوذ از «پیشروی- پسروی» (OT_{mean}) و متوسط عمق نفوذ از «جریان ورودی- خروجی» ($\overline{Z}_{inf}$) استخراج شده و ضریب معادله تعدیل گردید:

$$Z = k_{Adj}.t^{\alpha} = (Z_{inf} / {OT_m}^{\alpha}) \qquad (۱۶)$$

۲- روش ترکیبی آماری- تعدیل مزرعه‌ای (چندجمله‌ای)

به‌طور خلاصه نحوهٔ استخراج معادلهٔ نفوذ به این روش عبارت است:

گام اوّل - استخراج معادلهٔ اولیه نفوذ با ساختار توانی ساده، از طریق برازش بر داده‌های انتهائی و برآورد سرعت نفوذ نهائی از تعریف استاندارد پیش‌گفته (علّت انتخاب داده‌های انتهائی، نزدیکی آن‌ها با نفوذ پایه می‌باشد). داده‌های انتهائی بر اساس نظر کارشناسی (قضاوتِ چشمی خوبی برازش و توجه به نقطهٔ عطف و روند تغییرات داده‌ها و بررسی شاخص‌های ارزیابی مانند ضریب تعیین و میانگین جذر مربعات خطا) انتخاب می‌شوند.

گام دوم- بازسازی داده‌های مزرعه‌ای بر اساس تفاوت مقدار نفوذ از نفوذ نهایی: $Z \rightarrow (Z - f_o.t)$

گام سوم- استخراج ضرایب معادلهٔ توانی سادهٔ نفوذ از برازش داده‌های بازسازی‌شده که با توجه به ضرورت مشارکت همهٔ اطلاعات مزرعه‌ای و کاربرد قبلی داده‌های انتهائی در ساختار تابع نفوذ، اولویّت بهره‌گیری از داده‌ها در این مرحله با ارقام ابتدائی نفوذ است (شکل ۲-۱۹):

$$(Z - f_o.t) = k.t^{\alpha} \qquad \Rightarrow Z = k.t^{\alpha} + f_o.t$$

گام ۴- ترسیم معادلهٔ نفوذ توانی چندجمله‌ای و بررسی خوبیِ برازش (به‌صورت چشمی و با شاخص‌های علمی) و در صورت نیاز، اصلاح در «معیار تثبیت نسبی سرعت نفوذ؛ ε» در جهت بهبود برازش نهائی.

آنگاه با استفاده از داده‌های مربوط به جویچه، متوسط فرصت نفوذ از «پیش‌روی- پس‌روی» (OT_{mean}) و متوسط عمق نفوذ از «جریان ورودی- خروجی» ($\overline{Z}_{inf}$) استخراج شده و ضریب معادله تعدیل می‌گردید (سلطانی تودشکی، ۱۳۹۰):

$$Z = k_{adj}.t^{\alpha} + f_o.t$$

$$k_{adj} = \frac{\overline{Z} - f_o.\overline{OT}}{\overline{OT}^{\alpha}} \qquad (۱۷)$$

نحوهٔ ارزیابی:

برای ارزیابی معادلات و مشاهدهٔ بهتر تفاوت‌های بین معادلات و بررسی فرآیند نفوذِ شبیه‌سازی‌شده آن‌ها، از متوسط نفوذ در بازه‌های زمانی مشخص استفاده گردید. بازه‌های زمانی مورداستفاده، با توجه به بررسی تغییرات شدت نفوذ در تحقیق، عبارت بودند از ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۱۲۰-۶۰، ۲۱۰-۱۲۰ و ۳۶۰-۲۱۰ دقیقه. نتایج حاصل با ذکر معنی‌داری و نشان دادن تفاوت‌های بین روش‌های مختلف مذکور، توسط نرم‌افزار SAS و Statistics مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

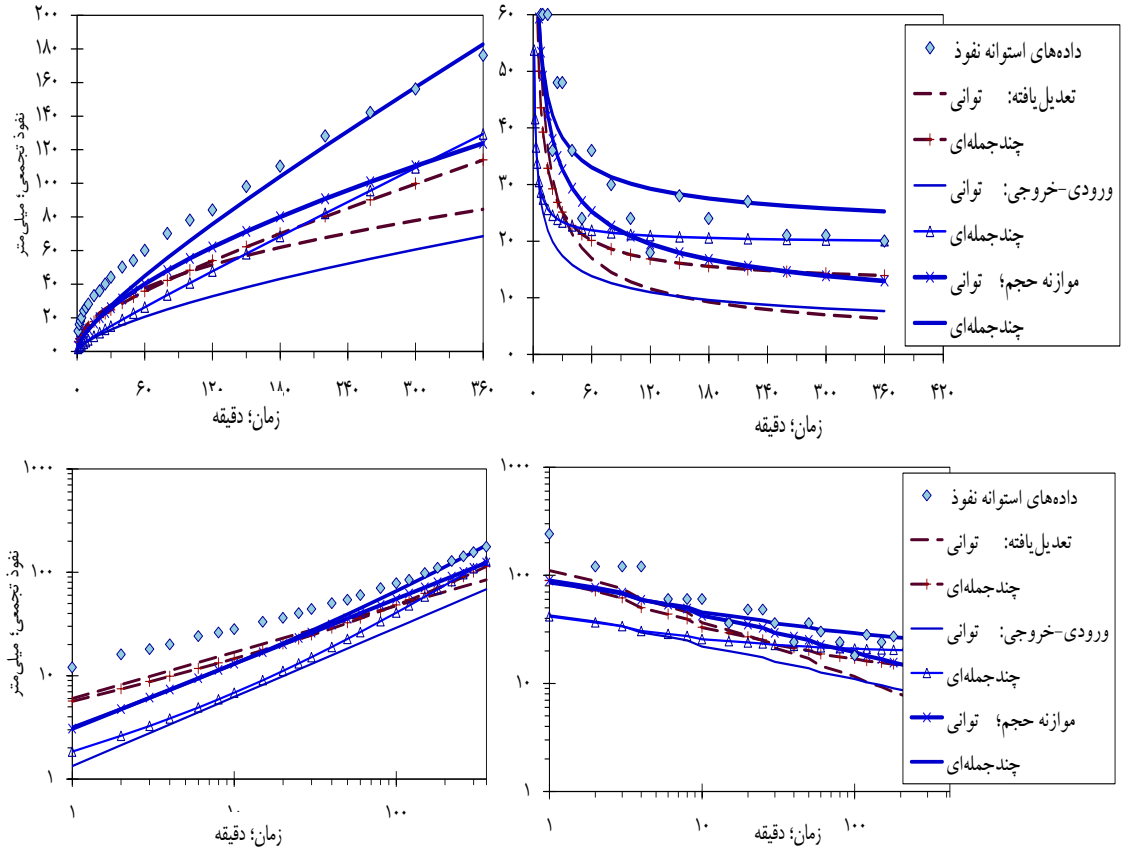
با توجّه به روش‌های مختلف استخراج معادله نفوذ، بدیهی است معادلات متفاوتی برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ در مزرعه به دست آمد.

1 Surface Storage

شکل ۳ نمونه‌ای از این نمودارها را با مقیاس ساده و لگاریتمی (برای مشاهدهٔ بهتر تفاوت‌ها) ارائه نموده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد از لحاظ عمق آب نفوذ یافته، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای، خصوصاً با تداوم زمان، بین معادلات مختلف مشاهده می‌گردد که با دست‌آوردهای پیشین محققان هم‌خوانی دارد (Gillies and smith, 2005, 2007). با توجه به نمودار شکل ۳ در اغلب معادلات برآورد حاصل از میزان نفوذ تجمعی، کمتر از مقدار واقعی آن درروش استوانه مضاعف می‌باشد، اما معادله موازنه حجم بهترین برآورد را نسبت به روش‌های دیگر برای برآورد میزان نفوذ تجمعی را به دست می‌دهد که با نتایج Sayah و همکاران هم‌خوانی داشت (Sayah et al., 2016). همچنین با توجه به شکل ۳، برآورد شدت نفوذ در زمان‌های ابتدایی نفوذ (دو ساعت اول) در معادلات موازنه حجم توانی و موازنه حجم چندجمله‌ای، بیش از دیگر روش‌ها به مقادیر واقعی شدت نفوذ نزدیک هستند. در ساعت‌های پایانی، شدت نفوذ، بیشترین تبعیت را از معادله ورودی–خروجی چندجمله‌ای دارد.

همان‌طور که گفته شد برای مقایسهٔ فرآیند نفوذ در معادلات مختلف، از مقدار نفوذ در بازه‌های زمانی مشخص (متوسط سرعت نفوذ) استفاده شد. با توجه به بررسی آماری صورت گرفته، معادلات نفوذ تقریباً در تمامیِ بازه‌ها در سطح یک درصد در نوبت‌های آبیاری اختلاف بسیار معنی‌داری با یکدیگر دارند (جدول ۲). البته این اختلاف در تکرارها کمتر مشاهده می‌شود به‌طوری‌که در غالب نوبت‌های آبیاری به جزء آبیاری اول، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد در آبیاری اول دلیل عدم تفاوت خشک بودن خاک و بالا بود سرعت نفوذ در مراحل اولیه است که به همین دلیل در مقادیر بالا اختلاف‌ها کمتر به چشم می‌خورد (جدول ۳).

همچنین نتایج مقایسه میانگین معادلات مختلف نفوذ نشان می‌دهد بیشترین نفوذ در تمامی معادلات در آبیاری اول صورت گرفته است و یک روند نزولی در متوسط سرعت نفوذ در تمامی بازه‌ها طی نوبت‌های آبیاری در تیمارهای مختلف قابل‌مشاهده می‌باشد که می‌تواند به دلیل کاهش نفوذ در طی نوبت‌های آبیاری باشد.



شکل ۳- معادلات مختلف نفوذ برای یک جویچه (آبیاری اول، تکرار دوم).

جدول ۲-تحلیل آماری «متوسط سرعت نفوذ در تمامی بازه‌ها» در روش‌های مختلف استخراج معادلهٔ نفوذ.

بازه	حداقل سطح معنی‌داری (p value) در نوبت‌های آبیاری				
	۱	۲	۳	٤	٥
۰-۳۰	۰/۰۱٪**	۰/۰۷٪**	۰/۰۵٪**	۰/۰۳٪**	۰/۰۱٪**
۳۰-۶۰	۱/۵٪**	۰/۳۰٪**	۰/۰۳٪**	۰/۴۰٪**	۰/۰۱٪**
۶۰-۱۲۰	۰/۳۵٪**	۰/۲۵٪**	۲٪**	۰/۰۳٪**	۰/۰۱٪**
۱۲۰-۲۱۰	۰/۱۰٪**	۰/۰۲٪**	۰/۵۵٪**	۰/۰۱٪**	۰/۱۱٪**
۲۱۰-۳۶۰	۰/۰۴٪**	۰/۰۱٪**	۰/۲۰٪**	۰/۰۱٪**	۰/۰۲٪**

جدول ۳- تحلیل آماری «متوسط سرعت نفوذ در تمامی تکرارها» در روش‌های مختلف استخراج معادلهٔ نفوذ.

بازه	حداقل سطح معنی‌داری (p value) در نوبت‌های آبیاری				
	۱	۲	۳	٤	٥
۰-۳۰	۰/۰۱٪**	۲۱٪ns	۰/۰۷٪**	۹٪ns	۳٪*
۳۰-۶۰	۰/۰۷٪**	۴۶٪ns	۰/۱٪**	۳۸٪ns	۶۲٪ns
۶۰-۱۲۰	۰/۱۶٪**	۶۵٪ns	۳۴٪ns	۵۲٪ns	۷۳٪ns
۱۲۰-۲۱۰	۰/۳۰٪**	۲۵٪ns	۳۵٪ns	۵۱٪ns	۳۳٪ns
۲۱۰-۳۶۰	۰/۵۰٪**	۲۰٪ns	۴۴٪ns	۵۶٪ns	۷۸٪ns

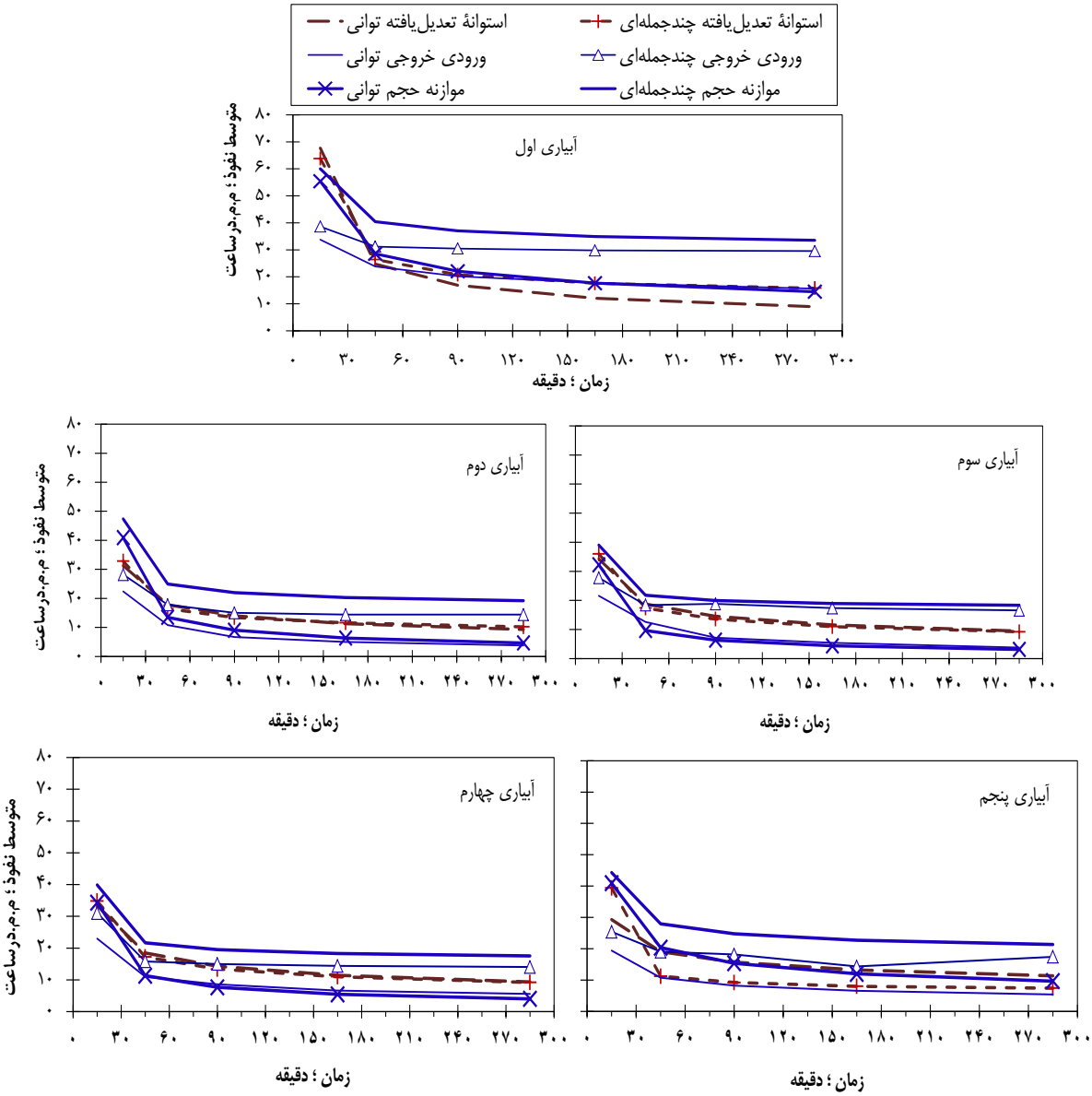
همچنین با توجه به بررسی آماری جداول ۲ و ۳ که سطح معنی‌داری تکرارها از تیمارها (معادلات نفوذ) کمتر بوده به‌طوری‌که به غیر از آبیاری اول در بقیه آبیاری‌ها اختلاف معناداری مشاهده نشد و این عدم‌معنی‌داری یعنی بلوک‌ها با هم تفاوت نداشتند. در میان روش‌های استخراج نفوذ نیز به‌طورکلی بیشترین مقدار نفوذ در تمامی آبیاری‌ها (به جزء آبیاری اول که نوسانات داده‌ها به خاطر وضعیت خاک تازه شخم‌خورده، در آن‌ها زیاد است)، مربوط به روش موازنهٔ حجم (به‌صورت چندجمله‌ای) و کمترین مقدار مربوط به روش ورودی-خروجی (توانی) می‌باشد که این شرایط تقریباً برای تمامیِ بازه‌ها صدق می‌کند که بیشینه بودن مقادیر نفوذ در روش موازنه حجم را می‌توان با محدودیت‌هایی محدودیت‌هایی مانند ضرورت کافی بودن شیب مزرعه، متکی بودن بر اطلاعات مرحله پیشروی، ناچیز فرض کردن مرحله پسروی و ثابت فرض کردن ضرایب شکل ذخیره سطحی و زیرسطحی مرتبط دانست (عباسی، ۱۳۹۱). شکل ۴ روند حاکم بر مقایسه میانگین معادلات مختلف نفوذ را نشان می‌دهد.

خطاهای برآورد معادلات مختلف نفوذ (با استفاده از نیمرخ رطوبتی متناظر به هر معادله) نسبت به مقدار نفوذ اندازه‌گیری‌شده در مدت انجام آزمایش (از آبنمودهای جریان)، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین خطاها (نزدیک به صفر) مربوط به معادلات تعدیل‌یافتهٔ استوانه نفوذ می‌باشد و بیشترین خطاها در روش موازنه حجم چندجمله‌ای مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۵ روش ورودی خروجی در تمامی آبیاری‌ها میزان نفوذ را کمتر از میزان واقعی برآورد کرده است این در حالی است که روش موازنه حجم، در تمامی آبیاری‌ها دارای برآوردی بیش از مقدار واقعی نفوذ بوده است.

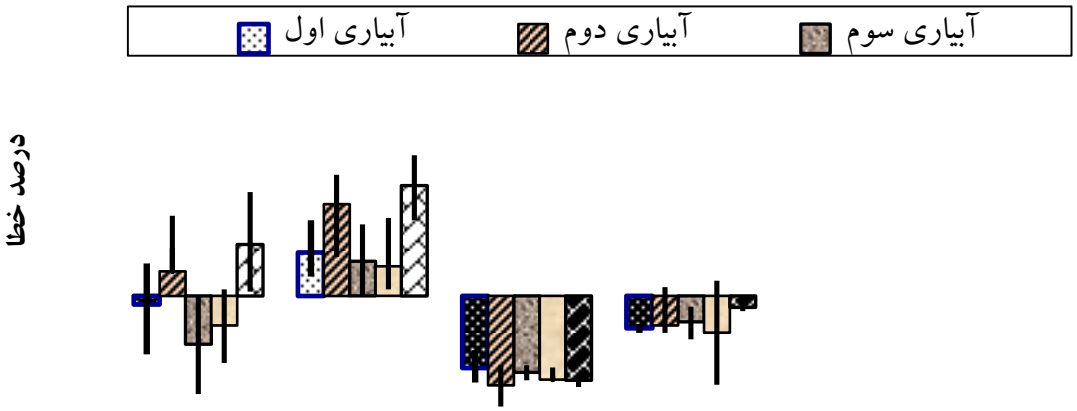
نتیجه‌گیری

مقایسه معادلات مختلف نفوذ در بازه‌های موردنظر نشان می‌دهد که در تمامیِ بازه‌ها، بیشترین مقدار نفوذ نسبت به نفوذ واقعی در مزرعه مربوط به روش موازنه حجم چندجمله‌ای و کمترین مقدار نفوذ مربوط به روش ورودی-خروجی توانی است (به غیر از آبیاری اول که روش تعدیل‌یافته توانی کمترین مقدار نفوذ را به دست می‌دهد). همچنین، از نظر متوسط نفوذ، معادلات چندجمله‌ای در روش ورودی-خروجی نتایج نزدیکی به معادلهٔ موازنه حجم چندجمله‌ای داشته و استوانهٔ تعدیل‌یافته نیز در رتبهٔ پس از آن قرار دارد. یک روند نزولی در متوسط سرعت نفوذ در بازه‌های زمانی ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۱۲۰-۶۰، ۲۱۰-۱۲۰ و ۳۶۰-۲۱۰ طی نوبت‌های آبیاری در معادلات قابل‌مشاهده بود که می‌توان به دلیل کاهش نفوذ در طی نوبت‌های آبیاری باشد و معادلات مختلف نفوذ تفاوت معناداری در متوسط نفوذ در این بازه‌های زمانی داشتند. همچنین با توجه به بررسی آماری صورت گرفته نتیجه شد که سطح معنی‌داری تکرارها از تیمارها (معادلات نفوذ) کمتر بوده به‌طوری‌که به غیر از آبیاری اول در بقیه آبیاری‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و این عدم‌معنی‌داری یعنی بلوک‌ها با هم تفاوت نداشتند. به‌طورکلی معادلات با ساختار چندجمله‌ای در مقایسه با معادلات با ساختار توانی، نفوذ را بیشتر برآورد کرده‌اند. از نظر خطای برآورد شده نیز کمترین خطای برآورد (نزدیک به صفر) مربوط به معادلات تعدیل‌یافتهٔ استوانه نفوذ و

بیشترین خطاها در روش موازنه حجم چندجمله‌ای مشاهده شد. همچنین دو معادلهٔ به‌دست‌آمده از روش استوانه تعدیل‌یافته (به‌جز آبیاری اول)، عموماً مقادیر متوسطی را برای نفوذ پیش‌بینی می‌کنند. این روش برای مدت‌زمان انجام آزمایش (فرصت نفوذهای ۶۰ تا ۹۰ دقیقه) مقادیر بسیار نزدیکی به مقدار اندازه‌گیری شده در مزرعه دارند. پیشنهاد می‌شود مطالعات دیگری در شرایط مختلف از جمله مناطق و خاک‌های دیگر، در راستای تأیید نتایج پژوهش حاضر انجام گیرد.



شکل ٤- متوسط نفوذ در میانهٔ بازه‌ها در آبیاری‌های مختلف



شکل ۵- برآورد خطای معادلات نفوذ در آبیاری‌های مختلف

منابع

انصاری، ح. ۱۳۹۰. آبیاری سطحی، ارزیابی، طراحی و شبیه‌سازی، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

پوزن، م.، جاری، م.م. و افراسیاب، پ. ۱۳۹۹. ارزیابی روش‌های مختلف مقیاس‌سازی معادله نفوذ فیلیپ. مجله آب و خاک. ۳۴ (۱):۲۷-۴۲.

سروش، ف. ۱۳۹۵. ارزیابی دقیق خانواده‌های دریافتی اصلاح‌شده NRCS با استفاده از داده‌های میدانی و مدل‌های اینرسی صفر. ۵ امین کنفرانس مدیریت منابع آب. کرمان. ایران.

سهرابی، ت. و پایدار، س. ۱۳۸۴. طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه تهران، ص ۴۰۴.

عباسی، ف. ۱۳۹۱. اصول جریان در آبیاری سطحی.کمیتهٔ ملّی آبیاری و زهکشی و مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۲۳۲ ص.

گلستانی کرمانی، س.، طباطبایی ، س .ج. و شایان‌ذکر، م. ۱۳۸۸. اصلاح مدل بیلان حجمی با بهبود عبارت ذخیره سطحی برای آبیاری جویچه‌ای، دانش آب و خاک، ۲: ۴۷-۶۰.

مصطفی‌زاده فرد، ب .و .موسوی، س. ف. ۱۳۹۰. آبیاری سطحی؛ تئوری و عمل .ویرایش چهارم. انتشارات کنکاش. ۵۸۲ ص (ترجمه:Walker and Skogerboe, 1987).

مصطفی‌زاده فرد، ب. و س .ف .موسوی. ۱۳۸۸. آبیاری سطحی: تئوری و عمل (ترجمه)، انتشارات کنکاش. ۵۸۳ ص.

مصطفی‌زاده فرد، ب. ۱۳۷۰. تعیین پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف - لوئیس با استفاده از معادله بیلان حجم در یک مزرعه جویچه‌ای در اصفهان. علوم و صنایع کشاورزی. ۵(۱): ۱۰۱-۱۱۲.

محمودیان، م. ۱۳۷۶. پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف- لوئیس معادل با پارامترهای معادله نفوذ SCS، آب و خاک. ۱۱ (۱).

Banti, M., Zissis, T. and Anastasiadou-Partheniou, E. 2011. Furrow irrigation advance simulation using a surface–subsurface interaction model. The Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 137: 304-314.

Bautista, E. and Wallender, W. W. 1993. Reliability of optimized furrow-infiltration parameters. The Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 119 (5): 784–800.

Childs, J. L. and Wallendr, W. W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. The Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 119 (1): 74-90.

Davis, J. R. and Fry, A. W. 1963. Measurement of infiltration rates in irrigated furrows. Trans. ASAE. 6: 318–319.

Sedaghatdoost, A. and Ebrahimian, H. 2015. Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. Biosystems Engineering. 136: 129-139.

Ebrahimian, H. 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. KSCE Journal of Civil Engineering. 18(6): 1904-1911.

Elliott, R. L., Walker, W. R. and Skogerboe, G. W. 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. Transactions of the ASAE. 26 (6): 1726–1731.

Holzapfel, E. A., Marino, M. A., Valenzuela, A. and F. Diaz. 1988. Comparison of infiltration measuring methods for surface irrigation. The Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 114 (1): 130–142

Gillies, M. H. and Smith, R. J. (2015). SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. Irrigation Science, 33(5), 339-355.

265.
Maroufpoor, E., Seyedzadeh, A. and Behzadynasab, M. 2017. Investigation of the accuracy of Non-point infiltration measurement methods in designing of furrow irrigation system. Journal of Water and Soil Conservation. 24(2): 257-271.
Sayah, B., Gil-Rodríguez, M. and Juana, L. 2016. Development of one-dimensional solutions for water infiltration. Analysis and parameters estimation. Journal of Hydrology.535: 226-234.
Sedaghatdoost, A. and Ebrahimian, H. 2015. Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. Biosystems Engineering. 136: 129-139.
Walker, W. R. and G. V. Skogerboe. 1982. Surface Irrigation Theory and Practice, Prentice-Hall., New Jersey.
Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. 1987. Surface Irrigation Theory and Practice, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs NJ.
Gillies, M. H. and Smith, R. J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. Irrigation Science. 24: 25-35.
Gillies, M. H., R. J. Smith and S. R. Raine. 2007. Accounting for temporal inflow variation in the invers solution for infiltration in surface irrigation. Irrigation Science. 25:87-97
Kamali, P., Ebrahimian, H. and Parsinejad, M. 2018. Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows. Irrigation Science. 36(6): 339-348.
Kazeroonian, S. M., Abbasi, F. and Sedghi, H. (2017). Statistical study of infiltration parameters variations of kostiakov-lewis equation in furrow irrigation during three farming seasons. Journal of Water and Soil Conservation. 24(4): 83-101
Kincaid, D. C. 1986. Intake rate: border and furrow. 871–887. In: Methods of Soil Analysis, no. 9, 2nd ed.
Trout, T. J., and B. E. Mackey. 1988. Inflow-outflow infiltration measurement accuracy. The Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 114 (2): 256–

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 16, Aug.-Sep. 2022, p. 472-484

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۶، مرداد - شهریور ۱۴۰۱، ص. ۴۸۴-۴۷۲

Evaluation of Methods for Deriving Infiltration Equations in Furrow Irrigation

H. Sheibany[1], **O. Mohamadi** [2]*, **A. R. Soltani Todeshki** [3]
Recived: Nov.20, 2022 Accepted: Mar.01, 2022

Abstract

In this study, six extracting method of infiltration equation in furrow in Lavark field of Isfahan University of technology was performed and the rate of surface storage change has been calculated. Information was collected, among three replications and five furrow irrigation event, double ring test, including cross-section, advance, recession, inflow and outflow rates, in addition to infiltration changes in submerged static condition and hydraulic conductivity of soil. The results were analyzed using a randomized complete block design. The study of infiltration process related to the various equations showed that there is high statistically significant difference at level of one percent in estimation of average infiltration in different time intervals of five using these equations. The most infilteration rate is related to volume balance equation and the least value was observed in input-output method results. On the other hand, According to result, the errors least (nearly zero) related to modified double ring equation. In fact, this equations, according to modified with the measured amount of water infiltration and the average infiltration time taken them, for the duration of the tests (average time of about one hour influence) is very near the measured values have been obtained on the farm. Generally, the equations with polynomial-power function estimated greater infiltration rate than simple power equations. This study showed that it is necessary to operate the farm experimentals corresponding with the applicational conditions of farm.

Keywords: Furrow irrigation, Infiltration equations, Rate of surface storage

1 - M. S. Student, Departmentof Water Engineering. Faculty of Agriculture. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2 – Ph.D. Department of Water Engineering. Faculty of Water and Soil. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3 - Ph.D, Departmentof Water Engineering. Faculty of Agriculture. Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: O.Mohamadi333@gmail.com)