

مقاله پژوهشی

برآورد نفوذ در آبیاری موجی با استفاده از روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی

آرام زارعی^۱ - تیمور سهرابی^۲ - حسن او جاقلو^{۳*} - زینب بیگدلی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

چکیده

یکی از مهمترین نکات طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی، تعیین پارامترهای نفوذ می‌باشد. به خصوص اینکه در نظر گرفتن کاهش نفوذ بر پیچیدگی تخمین آن در آبیاری موجی افزوده است. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی مزرعه‌ای روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی و مدل توسعه یافته نفوذ به منظور شبیه‌سازی نفوذ در موج‌های پیشروی آبیاری موجی می‌باشد. به همین منظور، استوانه نفوذسنج موجی با قابلیت قطع و وصل جریان ورودی طراحی و ساخته شد. تعداد ۳۰ آزمایش نفوذسنجی در قالب چهار تیمار زمان و نسبت موج برای جریان موجی و یک تیمار جریان پیوسته که هر کدام در سه تکرار و در دو نوبت زمانی به فاصله هشت روز انجام گرفت. معادله نفوذ کوستیاکوف به منظور تخمین نفوذ در موج‌های مختلف جریان آب استفاده شد. در مدل توسعه داده شده، به منظور تطبیق دادن معادله نفوذ کوستیاکوف با شرایط خاک مزرعه در موج‌های دوم و سوم، از یک ضریب کاهنده استفاده گردید. به منظور مقایسه تیمارهای مختلف از مقادیر نفوذ تجمعی و همچنین تغییرات آن در هر موج استفاده شد. نتایج نشان داد، مقدار نفوذ در موج‌های دوم و سوم نسبت به موج اول کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. بیشترین اثر موج بر کاهش نفوذ در موج دوم مشاهده شد به طوری که مقدار نفوذ تجمعی در موج دوم نسبت به موج اول به طور میانگین کاهش بیش از ۵۰ درصدی را داشت. نتایج به دست آمده از مدل توسعه یافته نفوذ انطباق قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی داشت به طوری که میانگین مقادیر ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۰۹ سانتی‌متر برآورد شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های نفوذسنجی و همچنین مدل توسعه یافته نشان داد، جریان موجی موجب کاهش ۴۶ تا ۷۶ درصدی عمق آب نفوذ یافته تجمعی نسبت به جریان پیوسته می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جریان موجی، کوستیاکوف، نفوذسنج

مقدمه

مزایای این روش نسبت به روش‌های تحت فشار می‌باشد (۱۳). بر اساس نتایج ارزیابی‌های انجام شده در نقاط مختلف کشور، میانگین راندمان کاربرد آب در سامانه‌های آبیاری سطحی در حدود ۵۶ درصد گزارش شده است (۱). در سال‌های اخیر به منظور بالا بردن راندمان کاربرد آب در روش‌های سطحی، تکنیک‌های جدید از جمله کاهش جریان پس از پیشروی (۸)، آبیاری جویچه‌ای یک در میان (۶) و استفاده از جریان موجی (۱۱) توسعه یافته است. بررسی‌های متعدد نشان داده است که دوره‌ای نمودن جریان آب، سبب می‌گردد تا فاز پیشروی با آب کمتری نسبت به آب مورد نیاز در جریان مداوم، تکمیل گردد. بنابراین یکنواختی و راندمان کاربرد آب افزایش می‌یابد که این پدیده را اثر موج می‌نامند (۱۵، ۱۴ و ۱۲). دلایل اصلی پدیده اثر موج کاهش نفوذپذیری و بهبود مقطع هیدرولیکی برای بخش مرطوب شده قبلی می‌باشد. بنابراین تخمین صحیح نفوذ در آبیاری با جریان موجی می‌تواند منجر به طراحی صحیح این روش آبیاری و در نهایت افزایش راندمان کاربرد قابل انتظار گردد. مدل‌های تجربی پرکاربردترین مدل‌ها در تخمین مقدار نفوذ در روش‌های مختلف

هر چند با پیشرفت علم و تکنولوژی، روش‌های نوینی در آبیاری توسعه داده شدند، با این حال هنوز در بسیاری از کشورهای جهان حتی کشورهای پیشرفته، آبیاری سطحی یکی از مهمترین روش‌های آبیاری اراضی آبی است که پژوهشگران مختلفی برای بهبود و توسعه آن تلاش می‌کنند. در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر بیش از ۹۰٪ اراضی آبی با روش‌های سطحی آبیاری می‌شوند. هزینه کم سرمایه‌گذاری، سادگی تعمیر و نگهداری وسایل و در کل بهره‌برداری، عدم نیاز به کارگر ماهر و همچنین پذیرش توسط عامه کشاورزان از

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه زنجان
(*) نویسنده مسئول: (Email: ojaghlo@znu.ac.ir)

۴- دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز
DOI: 10.22067/jsw.2020.15045.0

یافته استوانه‌های مضاعف را به منظور اندازه‌گیری نفوذ تجمعی در آبیاری موجی توسعه دادند. به منظور محاسبه میزان عمق آب تجمعی نفوذ یافته در موج‌های دوم به بعد با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده موج اول، از ضرایب موج در معادله کوستیاکوف استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد معادله اصلاح شده کوستیاکوف از عملکرد قابل قبولی برخوردار بوده است. همچنین کاهش نفوذ تجمعی به میزان ۶۱ تا ۸۴٪ در موج اول و ۳۰ تا ۶۱٪ در موج‌های بعد مشاهده گردید. تخمین نفوذ در آبیاری موجی و بررسی میزان کاهش آن در اثر پدیده اثر موج نیاز به انجام آزمایش‌های ارزیابی آبیاری سطحی با جریان موجی و مدل‌سازی‌های پیچیده دارد. روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی به عنوان یک روش ساده و سریع به منظور برآورد مقدار نفوذ در موج‌های مختلف آبیاری موجی توسط محمود و لطیف (۱۰) توسعه داده شد. با این وجود ارزیابی‌های مزرعه‌ای کامل روش مذکور در شرایط مختلف نظیر بافت خاک، زمان موج و نسبت موج انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی مزرعه‌ای روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی به منظور شبیه‌سازی تغییرات نفوذ در موج‌های مختلف پیشروی جریان در تیمارهای مختلف از نظر نوع جریان، نوبت آبیاری، زمان و نسبت موج بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات مزرعه آزمایشی

آزمایش‌های مزرعه‌ای در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج در سال ۹۱ انجام شد. موقعیت جغرافیایی مزرعه آزمایشی شامل طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا است. به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، از اعماق ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متر از خاک نمونه‌برداری انجام و پارامترهای مهم و مورد نیاز تعیین شد (جدول ۱).

دستگاه نفوذسنج موجی

دستگاه نفوذسنج موجی برای اولین بار توسط محمود و لطیف (۱۰) طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر نیز اقدام به ساخت دستگاه مذکور شد. شکل ۱ شماتیک دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد. دستگاه نفوذسنج، استوانه فلزی است که دو بازوی محرک فلزی سوراخ‌دار از دو طرف به آن متصل شده است. با تغییر حالت این بازوها از عمودی به افقی می‌توان ورود و خروج جریان به داخل استوانه را کنترل کرد به این ترتیب که در هنگام وصل جریان بازوها به حالت عمودی قرار گرفته و آب از شکاف تعبیه شده بر روی بازو وارد استوانه می‌شود. در هنگام قطع جریان بازو به حالت افقی

آبیاری می‌باشند و معادله کوستیاکوف معروفترین آن‌ها می‌باشد. با تخمین پارامترهای معادلات تجربی نفوذ، تخمین مقدار آب نفوذیافته ممکن می‌شود. یکی از روشهای تخمین پارامترهای نفوذ، استفاده از روش نقطه‌ای می‌باشد که نتایج روش نقطه‌ای اندازه‌گیری نفوذ به منظور تخمین پارامترهای معادلات تجربی نفوذ رضایت بخش گزارش شد (۱۶). مطالعات مختلفی در خصوص ارزیابی روش مذکور در آبیاری سطحی با جریان پیوسته انجام گرفته است اما در خصوص کاربرد این روش در آبیاری سطحی با جریان موجی مطالعات محدودی وجود دارد. در ادامه به مهمترین مطالعات انجام گرفته در زمینه نفوذ در آبیاری موجی اشاره شده است. واکر و همکاران (۱۷) شرایط موج دوم را شرایط انتقالی محیط خیس شده نام‌گذاری و بیان نمودند، مقدار نفوذ در اثر افزایش محیط خیس شده در این موج از طریق تطابق دادن پارامترهای معادله کوستیاکوف توسط یک تابع انتقالی غیر خطی با شرایط فاز انتقالی قابل محاسبه خواهد بود. به طور کلی در نظر گرفتن پدیده اثر موج در کاهش مقدار نفوذ در موج‌های دوم به بعد مهمترین نکته در تخمین نفوذ در آبیاری با جریان موجی می‌باشد. الیوت و واکر (۷) نشان دادند تغییرات در سرعت نفوذ نهایی در آبیاری موجی معنی دار نیست و اثر جریان موجی بیشتر در زمان رسیدن به سرعت نفوذ نهایی است. کولبیج و همکاران (۵) نشان دادند، سرعت نفوذپذیری در یک خاک لوم سیلتی تحت جریان موجی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج ایشان نشان داد تغییرات مکانی نفوذ در جریان موجی نسبت به جریان پیوسته کم بود به طوری که مقدار انحراف معیار تغییرات نفوذ در روش موجی ۵۳ تا ۸۶٪ کمتر از روش پیوسته به دست آمد. همچنین کاهش نفوذ تجمعی به میزان ۶۱ تا ۸۴٪ در موج اول و ۳۰ تا ۶۱٪ در موج‌های بعدی مشاهده شد. واکر و هامفریس (۱۸) پیشنهاد نمودند، مقدار نفوذ در اثر افزایش محیط خیس شده از طریق تطابق دادن پارامترهای معادله کوستیاکوف با استفاده از یک تابع انتقالی غیر خطی با شرایط مرحله انتقالی قابل محاسبه است. بلایر و اسمردن (۴) مدل سیکل نسبت زمان CRTM را برای یافتن پارامترهای نفوذ در آبیاری موجی پیشنهاد کردند. ایشان بیان داشتند که نفوذ در آبیاری موجی علاوه بر زمان نفوذ به محیط خیس شده، زمان موج و نسبت موج بستگی دارد. ایشان مدلی را به عنوان الگوریتم محاسبه ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف در روش موجی ارائه نمودند. بنهام و همکاران (۳) سه معادله تعیین نفوذ را در شرایط آبیاری موجی توسعه داده و بیان داشتند، معادله کوستیاکوف در تخمین مقادیر نفوذ، دقت کمتری نسبت به معادله‌های دیگر دارد اما کارایی آن با توجه به نیاز کم به داده‌های ورودی بیشتر از دو معادله دیگر است. حیدری و همکاران (۹) با آزمایش بر روی چهار تیمار کیفیت آب نشان دادند، اثر جریان موجی بر کاهش نفوذ، در تیمارهای با شوری کم قابل ملاحظه‌تر از تیمارهای با شوری بالا می‌باشد. محمود و لطیف (۱۰) روش اصلاح

خروج آب در نزدیک سطح خاک باز شده و آب داخل استوانه سریعاً تخلیه می‌شد. سپس با شروع زمان وصل موج بعدی، شیرهای خروج آب بسته شده و آب از طریق حفره ورودی دوباره ریخته می‌شد. به این ترتیب یک توالی موج قطع و وصل ایجاد می‌شد.

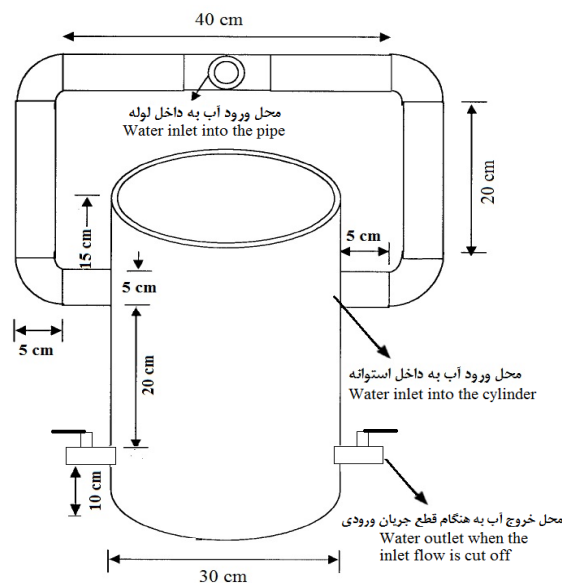
مشخصات آزمایش‌ها

چهار تیمار آزمایشی برای جریان موجی با زمان و نسبت موج‌های متفاوت و هر کدام در سه تکرار انجام پذیرفت. همچنین به منظور مقایسه نفوذ تجمعی و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف به دست آمده در جریان موجی، آزمایش‌های نفوذسنجی در شرایط جریان پیوسته (آزمایش معمول نفوذسنجی) نیز در سه تکرار انجام گرفت.

قرار داده می‌شود تا آب مازاد از بازو خارج شود. استوانه متحد المکز با استوانه نفوذسنج موجی با تعبیه نمودن دو شیر خروجی آب در دو طرف آن ساخته شد و به منظور برقراری شرایط همگن رطوبتی در اطراف نقطه اندازه‌گیری نفوذ، مورد استفاده قرار گرفت. استوانه ساخته شده به حالت عمودی تا محل شیرهای خروج در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از کف استوانه در خاک فرو برده و بخش باقی‌مانده سیلندر روی سطح خاک به عنوان مخزن آب مورد استفاده قرار گرفت. قبل از شروع آزمایش یک ورقه پلاستیکی روی سطح خاک درون سیلندر قرار داده می‌شد تا از بهم خوردگی ساختمان خاک هنگام ورود آب جلوگیری کند. در مرحله بعد آب از طریق حفره ورودی در بالای بازوی تعبیه شده داخل استوانه می‌شد و به سطح اولیه مدنظر می‌رسید. عمق آب در فواصل زمانی مختلف و در طول مدت وصل جریان ثبت می‌شد. با پایان یافتن زمان وصل شیرهای

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی
Table 1- Some physical and chemical properties of the soil at farm

عمق (cm) Depth	بافت خاک Soil texture	جرم مخصوص ظاهری (gr.cm ⁻³) Soil bulk density	رطوبت ظرفیت زراعی (%) Field capacity	رطوبت پژمردگی (%) Permanent wilting point	شوری عصاره اشباع (dS.m ⁻¹) Saturated extract salinity	ماده آلی (%) Organic matter
0-20	لوم رسی Clay loam	1.50	28.5	12.3	2.40	1.86
20-40	لوم رسی Clay loam	1.44	26.3	11.4	1.35	1.41
40-60	لوم شنی Sandy loam	1.46	21.8	10.2	1.38	0.84



شکل ۱- شمایی از دستگاه نفوذسنج موجی
Figure 1- Schematic view of surge-ring infiltrometer

منظور تخمین نفوذ در موج‌های دوم به بعد استفاده شده است و معادله کوستیاکف به منظور در نظر گرفتن شرایط جریان موجی مطابق رابطه (۴) اصلاح شد:

$$z_i = s_f k t_i^a \quad (4)$$

در رابطه فوق، s_f ضریب موج بوده و مقدار آن برای موج اول (آبیاری پیوسته) برابر با یک می‌باشد. مقدار ضریب فوق برای موج-های بعدی از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$s_f = \frac{z_{1+nsi}}{z_1} \quad (5)$$

در رابطه فوق z_{1+nsi} مقدار عمق آب نفوذ یافته تجمعی در موج‌های بعدی (cm) و z_1 عمق آب نفوذ یافته تجمعی در موج اول (cm) می‌باشد. با محاسبه ضریب موج، مقدار آب نفوذ یافته در هر موج و در زمان‌های مختلف قابل محاسبه خواهد بود.

نتایج و بحث

شکل ۲ روند تغییرات نفوذ تجمعی مشاهداتی و تخمین یافته با مدل توسعه یافته را در آزمایش‌های نفوذسنجی با جریان موجی نشان می‌دهد.

مطابق نمودارهای ارائه شده ملاحظه می‌گردد، مقدار نفوذ در موج‌های دوم و سوم نسبت به موج اول کاهش یافته است. در تمامی موج‌ها مقادیر نفوذ در آزمایش‌های نوبت دوم نسبت به نوبت اول کم بود. دلیل اصلی این موضوع رطوبت بالای قبل آبیاری و تا حدودی تحکیم لایه سطحی خاک بود. به طور کلی مقدار نفوذ تجمعی در موج‌های دوم به بعد کاهش یافته است به طوری که نسبت عمق آب نفوذ یافته در انتهای موج دوم به موج اول در بیشتر آزمایش‌ها عموماً کمتر از ۰/۵ می‌باشد و به همین ترتیب، مقدار آب نفوذ یافته در موج سوم کاهش یافته است (البته با سرعت کمتر نسبت به موج دوم).

آزمایش‌های فوق در دو نوبت زمانی به فاصله هشت روز برای شبیه‌سازی شرایط آبیاری اول (کاملاً خشک) و آبیاری دوم (خاک با رطوبت اولیه و بستر تقریباً تثبیت شده) انجام گرفت. در مجموع تعداد ۳۰ آزمایش نفوذسنجی تحت شرایط جریان موجی و پیوسته انجام گرفت. مشخصات آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

معادله نفوذ کوستیاکوف

پرکاربردترین معادلات تجربی نفوذ در آبیاری، معادلات کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده می‌باشد. در آبیاری موجی به دلیل کاربرد آب در دوره‌های زمانی کوتاه، سرعت نفوذ در اکثر مواقع به سرعت نفوذ پایه نخواهد رسید و در نتیجه معادله کوستیاکف تخمین قابل قبولی از مقدار آب نفوذ یافته را بدست می‌دهد. در پژوهش حاضر نیز، از معادله کوستیاکف به منظور برآورد نفوذ استفاده شد. شکل ریاضی رابطه کوستیاکوف در رابطه (۱) آورده شده است:

$$z_i = k t_i^a \quad (1)$$

در رابطه فوق، z_i نفوذ تجمعی (cm/min)؛ t_i زمان تماس آب با خاک (min)؛ a ضریب تجربی (بدون بعد) و k ضریب تجربی (min/cm^a) است. ضرایب تجربی a و k با استفاده از روش دو نقطه‌ای واکر و اسکوگرو (۱۶) محاسبه می‌گردد. معادلات مربوطه در زیر ارائه شده است.

$$a = \frac{\log(z_n/z_{0.5n})}{\log(t_n/t_{0.5n})} \quad (2)$$

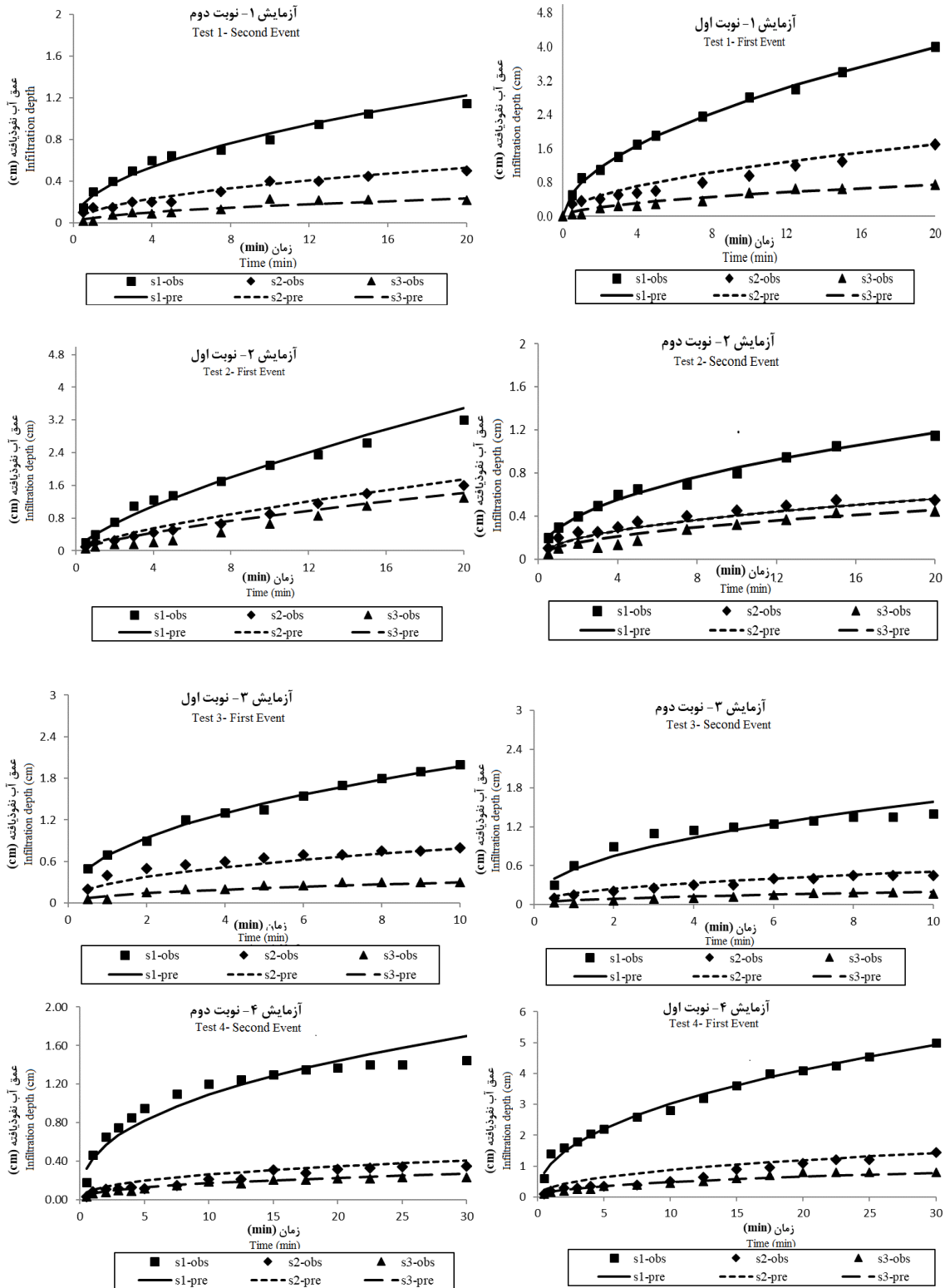
$$k = \frac{z_n}{t_n^a} \quad (3)$$

در روابط فوق، z_n عمق آب نفوذ یافته در کل زمان وصل جریان (cm)، $z_{0.5n}$ عمق آب نفوذ یافته در نصف زمان وصل (cm)، t_n مدت زمان وصل و $t_{0.5n}$ نصف مدت زمان وصل می‌باشد. مطالعات پیشین در زمینه آبیاری موجی نشان داد، اثر موج منجر به کاهش نفوذپذیری به طور متوسط در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد می‌گردد. برای این منظور در مدل توسعه داده شده، از یک ضریب کاهنده (S_f) به

جدول ۲- مشخصات آزمایش‌ها با دستگاه نفوذسنج موجی

Table 2- The tests characteristics with surge-ring infiltrometer

آزمایش (No.) Test	زمان موج (min) Surge time	نسبت موج Surge rate	تعداد موج No. Surge	مدت زمان آزمایش (min) Test time
1	40	0.50	3	120
2	30	0.66	3	90
3	30	0.33	3	90
4	60	0.50	3	180
5	جریان پیوسته Continuous flow			140



شکل ۲- نفوذ تجمعی مشاهداتی و تخمین یافته با استفاده از مدل توسعه داده شده در آزمایش‌های نفوذسنجی با جریان موجی

Table 2- Comparison of observed (obs) and predicted (pre) cumulative infiltration by the developed model in ring infiltrometer tests with surge flow

مقدار نفوذ در انتهای موج اول در آزمایش‌های نوبت اول و دوم به ترتیب در محدوده ۲ تا ۵ و ۱/۱ تا ۱/۷ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اختلاف بین مقادیر آب نفوذیافته در انتهای موج اول و در آزمایش‌های نوبت اول، به دلیل متفاوت بودن زمان وصل قابل توجه بود در حالی که در نوبت دوم از میزان این اختلاف کاسته شد. به عبارتی اثر مدت زمان وصل جریان بر مقدار نفوذ آب در آزمایش‌های نوبت اول بیشتر از نوبت دوم بود. از سوی دیگر مدت زمان قطع جریان نیز به عنوان عامل موثر بر کاهش نفوذ در موج‌های دوم به بعد شناخته شد به طوری که مقدار نفوذ آب در موج‌های دوم و سوم مربوط به آزمایش اول با زمان وصل و قطع ۲۰ دقیقه و قطع ۱۰ دقیقه قابل ملاحظه تر بود. در آزمایش سوم (زمان وصل ۱۰ دقیقه و قطع ۲۰ دقیقه) کاهش زمان وصل از یکسو و افزایش زمان قطع جریان از سوی دیگر سبب شد تا بیشترین کاهش مقدار نفوذ در موج‌های دوم و سوم در این آزمایش مشاهده گردد. در این آزمایش زمان رسیدن به سرعت نفوذ پایه نسبت به سایر آزمایش‌ها کم بود. در آزمایش چهارم (زمان وصل ۳۰ و قطع ۳۰ دقیقه) روند تغییرات نفوذ در موج‌های دوم و سوم مشابه آزمایش اول بود. به عبارتی در یک نسبت موج یکسان، افزایش زمان‌های وصل و یا قطع جریان منجر به تغییرات قابل ملاحظه نفوذ در موج‌های دوم و سوم نمی‌گردد. در خصوص مقایسه نتایج به‌دست آمده در دو نوبت زمانی اشاره شده به منظور شبیه‌سازی آبیاری‌های نوبت اول و دوم می‌توان بیان داشت در آزمایش‌های نوبت اول، مقدار

آب نفوذ یافته در موج دوم نسبت به موج اول بیش از ۵۰ تا ۷۰٪ کاهش یافته است. همچنین میزان کاهش نفوذ در موج سوم نسبت به موج اول نیز به طور متوسط تقریباً ۵۹ تا ۸۵٪ اندازه‌گیری شد. مقادیر فوق در آزمایش‌های نوبت دوم به ترتیب ۵۲ تا ۷۶٪ و ۶۱ تا ۸۸٪ محاسبه شد. تثبیت شرایط هیدرولیکی، تحکیم لایه سطحی خاک و رطوبت اولیه خاک را می‌توان به عنوان دلایل این اختلاف به وجود آمده بیان داشت. نتیجه به دست آمده با نتایج مطالعه محمود و لطیف (۲۰۰۵) مطابقت داشت به طوری که کاهش نفوذ تجمعی به میزان ۶۱ تا ۸۴٪ در موج‌های دوم به بعد گزارش شد. مطابق شکل ۲ مدل توسعه یافته نفوذ با دقت قابل قبولی مقادیر نفوذ را در موج‌های دوم به بعد با استفاده از اطلاعات موج اول (فاز خشک) پیش‌بینی نموده است. اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده نفوذ تجمعی توسط مدل توسعه یافته قابل قبول ارزیابی شد (جدول ۳). مقدار ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا در آزمایش‌های نوبت اول به ترتیب در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ و ۰/۰۳ تا ۰/۱۶ سانتی‌متر برآورد شد. مقادیر مذکور در آزمایش‌های نوبت دوم به ترتیب ۰/۷۳ تا ۰/۹۷ و ۰/۰۳ تا ۰/۱۰ محاسبه شد. پارامترهای تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف، ضرایب موج و مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برای هر موج در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. ضرایب تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف با استفاده از روش‌های دو نقطه‌ای واکر و اسکرگرو (۱۶) برای موج اول (فاز خشک) و مدل توسعه یافته برای موج‌های دوم و سوم (مرحله خیس شدگی) محاسبه شده است.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده از مقایسه مقادیر مشاهداتی و تخمین یافته نفوذ

Table 3- The values of statistical indices calculated from comparing the observed and estimated values of infiltration

آزمایش No. Test	موج Surge	نوبت اول First time		نوبت دوم Second time	
		RMSE	R ²	RMSE	R ²
1	دوم Second	0.08	0.96	0.03	0.97
	سوم Third	0.07	0.97	0.03	0.95
2	دوم Second	0.12	0.97	0.07	0.96
	سوم Third	0.16	0.93	0.05	0.93
3	دوم Second	0.11	0.92	0.08	0.86
	سوم Third	0.03	0.95	0.04	0.76
4	دوم Second	0.10	0.93	0.10	0.73
	سوم Third	0.06	0.97	0.05	0.81

دوم و مربوط به آزمایش چهارم با زمان قطع جریان ۳۰ دقیقه بود. کمترین کاهش نفوذپذیری نیز در آزمایش دوم با زمان قطع جریان ۱۰ دقیقه بود. مقادیر ضریب موج در نوبت‌های اول و دوم تقریباً نزدیک به هم بوده و اختلاف زیادی از خود نشان نداد.

مقدار ضریب موج نشان دهنده نسبت نفوذ تجمعی در انتهای هر موج به موج اول می‌باشد. ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت زمان قطع به وصل جریان مقدار ضریب موج کاهش بیشتری را از خود نشان می‌دهد و به عبارتی اثر موج بر کاهش نفوذ پذیری بیشتر نمایان می‌شود. نتایج نشان داد، بیشترین کاهش نفوذپذیری در موج

جدول ۴- پارامترهای تجربی، ضرایب موج و مقدار نفوذ تجمعی برای هر موج (آزمایش‌های نوبت اول)

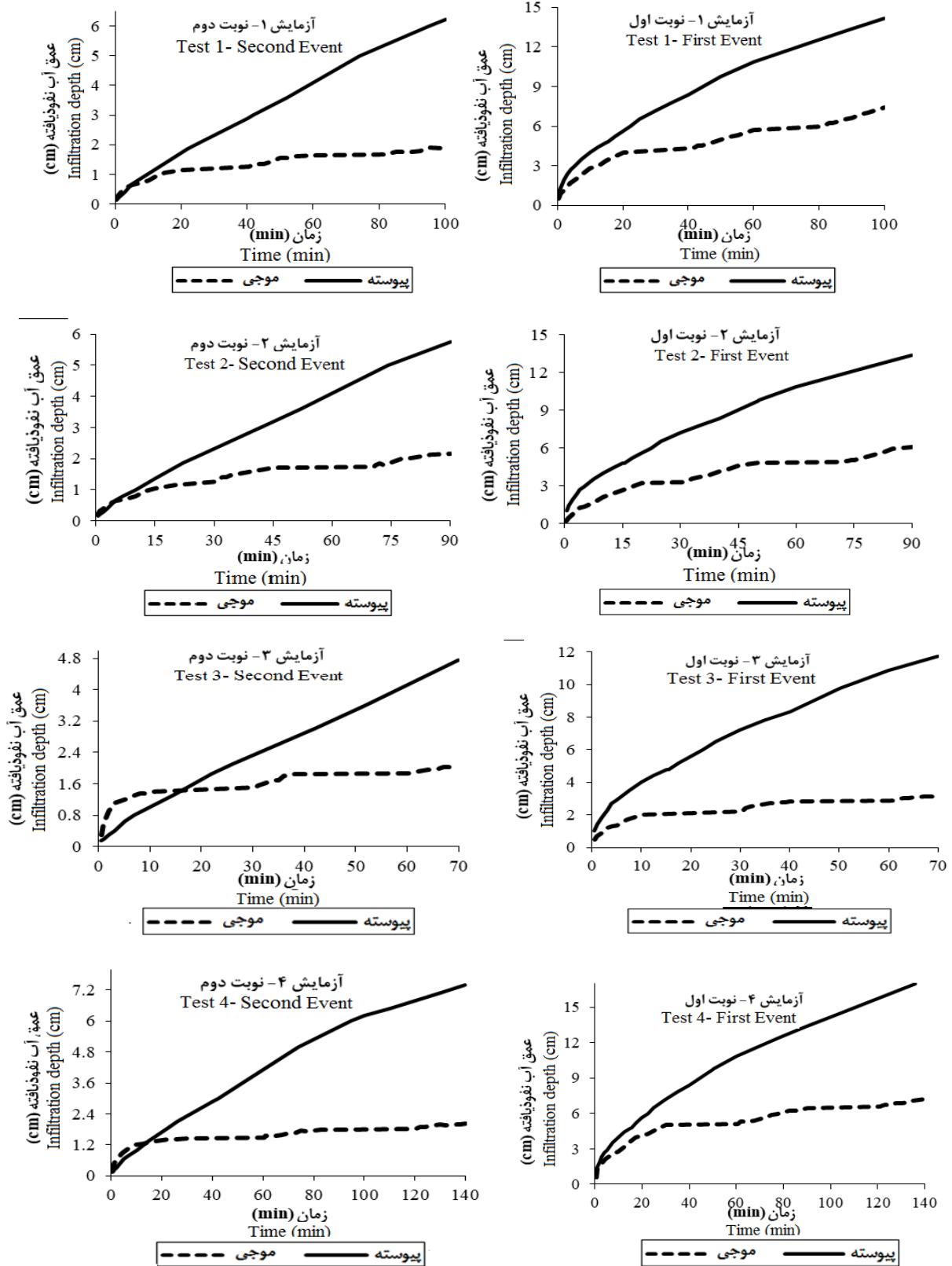
Table 4- Empirical parameters, surge factors and cumulative infiltration for each surge (first experiments)

آزمایش No. Test	شماره موج Surge number	ضریب موج Surge factor	نفوذ تجمعی (cm) Cumulative infiltration	ضرایب نفوذ (مشاهده‌ای) Kostiakov parameters (Observed)		ضرایب نفوذ (مدل توسعه یافته) Kostiakov parameters (Developed model)	
				a	K	a	k
				1	1	1	4
	2	0.338	1.70	0.507	0.296	0.515	0.289
	3	0.188	0.75	0.447	0.196	0.515	0.161
2	1	1	3.20	0.608	0.518	0.608	0.518
	2	0.515	1.6	0.874	0.120	0.608	0.267
	3	0.36	1.3	0.823	0.097	0.608	0.186
3	1	1	2	0.567	0.542	0.567	0.542
	2	0.40	0.8	0.300	0.401	0.567	0.217
	3	0.15	0.3	0.263	0.164	0.567	0.081
4	1	1	5	0.474	0.998	0.474	0.998
	2	0.29	1.4	0.988	0.140	0.474	0.289
	3	0.16	0.8	0.415	0.135	0.474	0.160

جدول ۵- پارامترهای تجربی، ضرایب موج و مقدار نفوذ تجمعی برای هر موج (آزمایش‌های نوبت دوم)

Table 5- Empirical parameters, surge factors and cumulative infiltration for each surge (second experiments)

آزمایش No. Test	شماره موج Surge number	ضریب موج Surge factor	نفوذ تجمعی (cm) Cumulative infiltration	ضرایب نفوذ (مشاهده‌ای) Kostiakov parameters (Observed)		ضرایب نفوذ (مدل توسعه یافته) Kostiakov parameters (Developed model)	
				a	K	a	k
				1	1	1	1.15
	2	0.435	0.50	0.322	0.191	0.524	0.104
	3	0.242	0.23	0.262	0.127	0.524	0.058
2	1	1	1.15	0.524	0.240	0.524	0.240
	2	0.48	0.55	0.290	0.231	0.524	0.115
	3	0.33	0.45	0.238	0.188	0.524	0.080
3	1	1	1.4	0.222	0.839	0.222	0.839
	2	0.32	0.45	0.585	0.117	0.222	0.270
	3	0.12	0.17	0.548	0.048	0.222	0.101
4	1	1	1.45	0.158	0.849	0.158	0.849
	2	0.24	0.35	0.168	0.198	0.158	0.205
	3	0.16	0.23	0.147	0.139	0.158	0.135



شکل ۳- مقایسه نفوذ تجمعی در آزمایش‌های نفوذسنجی با جریان موجی و پیوسته

Figure 3- Comparison of cumulative infiltration in infiltrometer tests under surge and continuous flow.

موجی و پیوسته به ترتیب مربوط به آزمایش‌های سوم و چهارم بود. در واقع مهمترین عامل ایجاد اختلاف بین آزمایش‌ها مربوط به مدیریت جریان و به خصوص مدت زمان قطع جریان در هر موج بود.

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی به منظور شبیه‌سازی نفوذ در آبیاری با جریان موجی تحت شرایط مختلف نظیر نوبت آبیاری، زمان و نسبت موج بود. نتایج نشان داد، در آزمایش‌های با جریان موجی مقدار نفوذ در موج‌های دوم و سوم نسبت به موج اول کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. عملکرد معادله کوستیاکوف توسعه داده شده برای جریان موجی قابل قبول ارزیابی شد به طوری که مقدار نفوذ تجمعی با استفاده از معادله توسعه یافته با دقت بالایی برآورد شد. همچنین نتایج نشان داد، کاهش نسبت زمان وصل به قطع جریان منجر به کاهش قابل توجه نفوذ در موج‌های دوم و سوم می‌گردد. در تمامی آزمایش‌های نفوذسنجی با جریان موجی، ضریب معادله (k) در موج‌های دوم به بعد کاهش می‌یافت. مقدار توان معادله (a) در موج‌های دوم به بعد دارای تغییرات کمتری نسبت به مقادیر k داشت. اختلاف مقادیر آب نفوذیافته در جریان موجی و پیوسته در آزمایش‌های نفوذسنج موجی قابل ملاحظه بود، به طوری که جریان موجی منجر به کاهش بیش از ۷۰ درصدی نفوذ در برخی آزمایش‌ها شد. می‌توان بیان داشت، عملکرد روش نقطه‌ای نفوذسنج موجی با توجه به هزینه کم، سرعت و دقت بالا قابل قبول می‌باشد. مقایسه نتایج این روش با روش‌های مبتنی بر داده‌های پیشروی و اطلاعات جریان می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

مطابق جدول‌های مذکور، ضرایب معادله کوستیاکوف محاسبه شده بر اساس داده‌های مشاهده‌ای در هر موج متفاوت می‌باشد به طوری که در هر موج به صورت جداگانه و بر اساس داده‌های مربوط به همان موج محاسبه می‌شود. مقادیر این ضرایب در موج‌های دوم و سوم نسبت به موج اول کاهش یافته‌اند (به دلیل کاهش نفوذپذیری). در مدل توسعه یافته، توان معادله نفوذ در موج‌های مختلف ثابت بوده و برابر با مقدار بدست آمده در موج اول می‌باشد. ضریب k نیز با توجه به مقدار ضریب موج بدست آمده در موج‌های دوم و سوم تعدیل شده است.

شکل ۳ مقایسه بین منحنی‌های نفوذ تجمعی در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته را نشان می‌دهد. به طور کلی عمق آب نفوذ یافته در آزمایش‌های با جریان پیوسته بیشتر از جریان موجی مشاهده شد. مقدار عمق آب نفوذ یافته در آزمایش‌های با جریان موجی برای نوبت اول در محدوده $3/1$ تا $7/25$ سانتی‌متر تعیین شد در حالی که مقدار مذکور در آزمایش نفوذسنجی با جریان پیوسته $13/4$ سانتی‌متر بدست آمد. ملاحظه می‌گردد جریان موجی در آزمایش‌های نوبت اول که نشان دهنده شرایط خشک یا همان آبیاری اول بود، موجب کاهش نفوذ به مقدار 46 تا 76 ٪ شده است. در آزمایش‌های نوبت دوم مقدار عمق آب نفوذ یافته در آزمایش‌های نفوذسنجی با جریان موجی در محدوده $1/78$ تا $2/15$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد در حالی که مقدار مذکور برای جریان پیوسته $5/6$ سانتی‌متر بود. در این نوبت آبیاری نیز جریان موجی منجر به کاهش نفوذ به مقدار 61 تا 68 ٪ شده است. نتایج به دست آمده از مقایسه میزان نفوذ در جریان موجی و پیوسته با نتایج بلایر و اسمردن (۴)، واکر و هامفریس (۱۸) و محمد السعود و همکاران (۲) مطابقت دارد. کمترین و بیشترین اختلاف بین جریان

منابع

- 1- Abbasi F., Sohrab F., and Abbasi N. 2016. Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Journal of Irrigation and Drainage Engineering Research 17(67): 113-128. (In Persian with English abstract)
- 2- Al-Saud M., and Podmore T.H. 1999. Infiltration Rate Reduction Prediction under Surge Irrigation Using Management Variables and Soil Composition. Ph.D thesis, Department of Chemical and Bioresource Engineering, Colorado State University.
- 3- Benham B.L., Reddel D.L., and Marek T.H. 2000. Performance of three infiltration models under surge irrigation. Irrigation Science 20: 37-43.
- 4- Blair A.W., and Smerdon E.T. 1987. Modeling surge irrigation infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 113(4): 497-515.
- 5- Coolidge P.S., Walker W.R., and Bishop A.A. 1982. Advance and runoff surge flow furrow irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division 108(1): 35-42.
- 6- Ebrahimian H., Keshavarz M.R., and Playan E. 2014. Surface fertigation: a review, gaps and needs. Spanish Journal of Agricultural Research 12(3): 820-837.
- 7- Elliott R.L., and Walker W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transaction, ASAE 25: 396-400.
- 8- Hamdi Ahmadabad Y., Liaghat A., Sohrabi T., and Rasoolzadeh A. 2017. Improving irrigation Performance by managing the irrigation cut-off time in SIRMOD (Case Study: Moghan Agro-Industry and Husbandry). Iranian Journal of Soil and Water Research 4(48): 811-822. (In Persian with English abstract)

- 9- Heydari N., Das Gupta A., and Loof R. 2001. Salinity and sodicity influences on infiltration during surge flow irrigation. *Irrigation Science* 20(4): 165-173.
- 10-Mahmood S., and Latif M. 2005. A simple procedure for simulating surge infiltration using first-surge infiltrometer data. *The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage* 54(4):407-416.
- 11-Nazemi A., Parandin M., Sadraddini A., and Ghamarnia H. 2019. Effects of Surge Irrigation on Water Use Efficiency and Water Productivity of Maize in Islamabad-Gharb Area. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture (Formerly Soil and Water Sciences)* 33(3): 353 -369. (In Persian with English abstract)
- 12-Ojaghlou H., Sohrabi T., Abbasi F., and Javani H. 2020. Development and evaluation of a water flow and solute transport model for furrow fertigation with surge flow. *Irrigation and Drainage* 69(4): 682-695.
- 13-Sohrabi T., Heydari N., Tavakoli A., and Nirizi S. 1375. Wave irrigation. National Irrigation and Drainage Committee, Ministry of Energy.
- 14-Stringham G.E. 1979. Surge flow for automatic irrigation. p. 132-142. In *Irrigation and drainage in the nineteen eighties*, Proceedings of the specialty conference of American Society of Civil Engineers, 345 east, 47th Street, New York.
- 15-Walker W.R. 1984. Surge flow in the west. Proceedings of the surge flow irrigation conference. Texas Agriculture Extension Service. Midland. 1-30.
- 16-Walker W.R., and Skogerboe G.V. 1987. *Surface irrigation theory and practice*. Prentice- Hall INC. New Jersey.
- 17-Walker W.R., Henggle J.C., and Bishap A.A. 1981. Effect of surge flow in level basins. *ASAE*, (81-2555): 13.
- 18-Walker W.R., and Humpherys A.S. 1983. Kinematic-wave furrow irrigation model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 109(4): 377-392.

Point Estimation of Infiltration in Surge Irrigation Using Surge Infiltrometer Method

A. Zaree¹- T. Sohrabi²- H. Ojaghlo^{3*}- Z. Bigdeli⁴

Received: 12-10-2020

Accepted: 29-11-2020

Introduction: In recent years, to increase the efficiency of surface irrigation methods, new techniques such as surge irrigation have been developed. Numerous studies have shown that the surge flow can reduce water consumption in the advance phase and subsequently improve irrigation efficiency and water distribution uniformity. One of the factors affecting the performance of surface irrigation systems is the accurate estimation of infiltration. Due to continuous changes in the infiltration process during on-off cycles in surge irrigation, determining the empirical equation of infiltration in surge irrigation method is complex and requires time-consuming and costly field data. As a result, proper selection and parameterization of empirical equations with a simplified procedure are needed. The goal of this research was the field evaluation of the point method (surge infiltrometer) to simulate the infiltration process in advance phase surges.

Materials and Methods: A field experiment was conducted at the experimental station of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. A ring infiltrometer was modified by connecting a pipe arm for inward and outward water flow to the ring and from the ring to the pipe to create on-off surge cycles, respectively. Water entered the ring through the inlet hole at the top of the pipe arm and water depth was recorded at different time intervals during the on-time of each cycle. Four treatments were performed for infiltration tests under surge flow, including different cycle time and ratio. Also, infiltration tests were performed under continuous flow conditions. To simulate the first (dry soil) and second irrigation conditions, infiltration experiments were conducted twice on an 8-day interval. The Kostiakov infiltration equation was corrected by applying surge factors to predict infiltration water depth for subsequent surges, using first surge data. The empirical coefficients of the Kostiakov equation were calculated by applying the two-point technique.

Results and Discussion: Results of the study revealed that the infiltration data simulated by the developed Kostiakov equation matched closely with those collected from the surge-ring infiltrometer. The coefficient of determination and the root mean square error were calculated to be 0.92 to 0.97 and 0.03 to 0.16 cm, respectively. In general, the amount of cumulative infiltration in the second and subsequent surges decreased. The ratio of the infiltration depth at the end of the second to the first surge was less than 0.5. In all experiments, the depth of water infiltrated in the third surge was significantly reduced and almost reached to the final infiltration rate. As the cycle ratio increased, the cumulative infiltration also increased. However, the effect of on-off time on the infiltrated water depth in the first experiment was greater than that in the second experiment. It was concluded that in the first experiments, the surging phenomena substantially reduced water movement and the reduction in cumulative infiltration ranged from 50 to 70% during the second surge and from 59 to 85% during the third surge. The above values were determined 52 to 76% and 61 to 88% for the second experiment, respectively. A significant difference was observed between surge and continuous flow tests. The surge flow led to a 46 to 76% reduction in the cumulative infiltration depth compared to the continuous flow. The effect of surge flow was greater in the first experiments.

Conclusion: One of the most important points in designing surface irrigation systems is to determine the infiltration equation parameters. In particular, the difficulty involved in the planning and design of surge irrigation systems is the prior knowledge and understanding of how infiltration changes occur during surging. The main objective of the present study was to evaluate the surge ring infiltrometer test to predict the infiltration in the second and third surges using the first surge data. The results obtained from the surge infiltrometer experiments showed that the use of surge irrigation has the potential to reduce infiltration. The observed and

1 and 2- Graduated in Master Irrigation and Drainage and Professor, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, respectively.

3- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Zanjan

(*- Corresponding Author Email: ojaghlo@znu.ac.ir)

4- Ph.D. Candidate, Water Engineering Department, University of Tabriz

DOI: 10.22067/jsw.2020.15045.0

predicted cumulative infiltration for the second and third surges showed a good agreement. The surge-ring infiltrometer has the potential for creating an on-off mechanism and is best suited to determine the cumulative infiltration from surges for constant on-off time surge intervals.

Keywords: Surge flow, Ring infiltrometer, The Kostiakov equation