

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد روش‌های برآورد ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف در آبیاری جویچه‌ای با جریان

موجی

محمد مهدی جعفری^۱، حسن اوجاقلو*^۲، حامد ابراهیمیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ojaghlo@znu.ac.ir

چکیده

به منظور افزایش راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع آب در روش‌های آبیاری سطحی، روش‌هایی نظیر جریان موجی توسعه داده شده است. عملکرد مناسب آبیاری موجی مستلزم تعیین دقیق پارامترهای معادله نفوذ آب در خاک می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سه روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای شپارد و روش رگرسیون غیرخطی در تخمین نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی می‌باشد. به همین منظور از داده‌های مربوط به آزمایش‌های ارزیابی مزرعه‌ای سه جویچه آزمایشی شامل دو جویچه با جریان موجی و یک جویچه با جریان پیوسته استفاده شد. طول جویچه‌ها ۱۵۰ متر، فواصل آن‌ها ۰/۷۵ متر و بافت خاک (لوم رسی) بود. نتایج نشان داد، روش یک نقطه‌ای ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد نفوذ در جویچه‌های با جریان موجی و همچنین جریان پیوسته داشت. از سوی دیگر نتایج دو روش رگرسیون غیر خطی و دونقطه‌ای قابل قبول و نزدیک به هم بدست آمد. مقادیر شاخص جذر میانگین مربعات خطا روش‌های یک نقطه‌ای، دونقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی در پیش‌بینی زمان پیشروی جویچه‌های با جریان موجی به ترتیب ۱۰/۸۵، ۲/۵۲ و ۲/۴۶ دقیقه و در جریان پیوسته به ترتیب ۸/۷۸، ۶/۵۷ و ۴/۷۷ دقیقه بدست آمد. مقادیر میانگین خطای نسبی روش‌های مذکور در برآورد حجم آب نفوذ یافته در جویچه‌های با جریان موجی به ترتیب ۴۲/۱۲، ۳/۵۱ و ۴/۷۹ درصد و در جریان پیوسته به ترتیب ۷/۷۰، ۶/۳۳ و ۲/۵۳ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد، روش رگرسیون غیرخطی عملکرد بهتری در برآورد نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و پیوسته داشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، جریان موجی، شبیه‌سازی، نفوذ، WinSRFR.

Evaluation of the Performance of Methods for Estimating the Coefficients of Kostiakov Infiltration Equation in Furrow Irrigation with Surge Flow

Mohammad Mahdi Jafari¹, Hassan Ojaghlo^{2*}, Hamed Ebrahimian³

Received: April 19, 2021 Accepted: June 17, 2021

1- MSc. Student, Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

2- Assist. Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

3- Assoc. Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

* Corresponding Author Email: ojaghlo@znu.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Surface irrigation is known as the most common method of irrigation for reasons such as low initial cost and low energy consumption. The main problems of surface irrigation methods are low water application efficiency and distribution uniformity. In order to remove these restrictions, some techniques such as the application of surge flow have been developed. However, these new techniques will also be successful if they are designed correctly. One of the requirements for proper and efficient design of surge irrigation is to accurately determine the infiltration equation parameters. Due to continuous changes in the infiltration process during on-off cycles in surge irrigation, determining the empirical equation of infiltration in this method is complex. No study has been performed to evaluate the proposed methods to estimate the empirical coefficients of the Kostiakov infiltration equation in furrow irrigation under surge flow. The purpose of the present study was to investigate the performance of three methods: Elliott and Walker two-point, Shepard one-point and nonlinear regression methods for estimating water infiltration in furrow irrigation with surge flow.

Methodology

The field evaluation data of three experimental furrow included two furrows with surge flow and a furrow with continuous flow were used. The experiments were performed in two irrigation events. The length and spacing of the furrows was 150 m and 0.75 m, respectively. The soil texture was clay loam. In all experiments, furrows were free-drainage without a return runoff system. Surge flow was applied during the advance phase and was converted to continuous flow when the water flow reached the end of the furrows. The longitudinal slope of the farm was variable; the slope of the initial 60 m was about 0.0088 m m^{-1} and the rest of the furrows' length was approximately 0.0034 m m^{-1} . In each experiments, for the first surge (dry phase), the empirical coefficients of the Kostiakov equation were determined using Elliott and Walker two-point, Shepard one-point and nonlinear regression methods. For second and later surges, these parameters were estimated by CRTM model (proposed by Blair and Smerdon). To evaluate the performance of the methods, simulations were performed using WinSRFR software and the results including advance times, the volume of infiltrated water and runoff losses were compared with the observed values.

Findings

The mean values of root mean square error index for the one-point, two-point and nonlinear regression methods in estimating the advance times in furrows with surge flow were calculated to be 10.85, 2.52 and 2.46 min, respectively, and in furrow with continuous flow were 8.87, 6.57 and 4.77 min, respectively. Also, the values of mean relative error for estimating the volume of infiltrated water in the furrows with surge flow were 42.12, 3.51 and 4.79%, respectively, and for continuous flow were 7.70, 6.33 and 2.53%, respectively. The values of mean relative error for prediction of runoff losses in experiments with surge flow were calculated 100, 12.80 and 17.98% (first irrigation event) and 93.44, 4.95 and 4.85% (second irrigation event), respectively. In experiments with continuous flow, the values of this index were obtained 11.11, 14.81 and 22.22% in the first irrigation event and 16.16, 27.45 and 88.5% in the second irrigation event, respectively. Results showed that the prediction error of the advance time and volume of infiltrated water increased in the second surge and later one due to the surge effect phenomenon. On the other hand, comparing the results of

two irrigation events revealed that the accuracy of methods in the second irrigation event was higher than the first. This may be due to hydraulic stabilization of the furrows bed. The surge flow reduced the total water applications compared to continuous flow, so that the ratio of water application depth in continuous flow to surge in the first and second irrigation events was determined as 1.68 and 1.11, respectively, however, runoff losses through continuous flow was significantly lower compared to surge flow. The simulation results showed that the surge flow leads to a uniform distribution of infiltrated water along the furrow, so that the distribution uniformity of low quarter (DU_{LQ}) ranged from 92 to 95% in the surge flow treatments and from 70 to 87% in the continuous flow.

Conclusion

The results revealed that the one-point method had the lowest performance for estimating the infiltration in furrow with surge and continuous flow. On the other hand, the results of nonlinear regression and two point methods were acceptable and close to each other. Results indicated that, the nonlinear regression method performed better for estimating the infiltration of furrow irrigation under surge and continuous flows.

Keywords: Furrow irrigation, Infiltration, Simulation, Surge flow, WinSRFR.

مقدمه

کاهش می‌دهد و موجب افزایش یکنواختی توزیع آب در خاک می‌گردد. روش جریان موجی، راندمان آبیاری را افزایش داده و می‌تواند به استفاده موثرتر از منابع آب کمک نماید (اوجاقلو و همکاران ۲۰۱۵b). عملکرد مناسب آبیاری موجی در مقایسه با آبیاری پیوسته توسط محققین مختلف گزارش شده است (استرینگهام و کلر ۱۹۷۹، واکر ۱۹۸۴، هورست و همکاران ۲۰۰۷، قبادی‌نیا و همکاران ۲۰۰۷، اوجاقلو و همکاران ۲۰۱۵a، قربانی و همکاران ۲۰۱۶). علاوه بر مطالعات مزرعه‌ای، در زمینه شبیه‌سازی و مدل‌سازی آبیاری موجی نیز مطالعاتی انجام شده است (ایزدی و همکاران ۲۰۰۵، صدرالدینی و همکاران ۲۰۰۶، میرزائی و همکاران ۲۰۱۱، ناظمی و همکاران ۲۰۱۹، اوجاقلو و همکاران ۲۰۲۰). با وجود مزایای آبیاری موجی، مشابه تمام روش‌های آبیاری سطحی، در صورتی که پارامترهای طراحی به طور صحیح تعیین نشوند منجر به عملکرد پایین این سامانه آبیاری خواهد شد. یکی از ملزومات طراحی مناسب و کارآمد، تعیین دقیق پارامترهای نفوذ آب در خاک می‌باشد. در روش‌های آبیاری سطحی، نفوذ آب در خاک از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار بوده و روی پارامترهای طراحی نظیر ابعاد کرت‌ها و جویچه‌ها و همچنین زمان قطع جریان اثرگذار می‌باشد. در بیش‌تر مزارع به دلیل عدم بررسی دقیق این مشخه مهم فیزیکی

هر چند با پیشرفت علم و تکنولوژی، شیوه‌های نوینی در آبیاری توسعه پیدا نموده‌اند، با این وجود هنوز در بسیاری از کشورهای جهان حتی کشورهای پیشرفته، آبیاری سطحی به دلیل هزینه سرمایه گذاری کم، ساده بودن تعمیر و نگهداری وسایل و در کل بهره‌برداری، عدم نیاز به کارگر ماهر و همچنین مقبول بودن این روش نزد کشاورزان، یکی از متداولترین روش‌های آبیاری است (سهرابی و همکاران ۱۹۹۶، عباسی ۲۰۱۲). مشکل اساسی روش‌های آبیاری سطحی پایین بودن بازده آبیاری است که دلیل آن عدم طراحی دقیق و عدم مدیریت صحیح این روش آبیاری می‌باشد. در دهه‌های اخیر روش‌های جدید به منظور بالا بردن راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع آب در طول جویچه‌ها از طریق کاهش اختلاف فرصت زمان نفوذ بین ابتدا و انتهای جویچه‌ها از جمله جریان موجی توسعه داده شده است. استرینگهام و کلر (۱۹۷۹) برای اولین بار روش آبیاری موجی با استفاده از لوله‌های دریچه‌دار اتوماتیک را به منظور خودکار نمودن سامانه‌های آبیاری سطحی و افزایش راندمان کاربرد آب توسعه دادند. در روش آبیاری موجی به جای انتقال پیوسته آب در جویچه‌ها و نوارها، به طور منقطع یعنی به صورت قطع و وصل انتقال می‌یابد. جریان موجی ضمن تامین آب و پر کردن منافذ خاک میزان مصرف آب را

(جیلی و اسمیت ۲۰۰۵) و SIPAR-ID (رودریگز و مارتوس ۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در شرایط کشت داخل جویچه مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. مدل SIPAR-ID در تخمین ضرایب معادله نفوذ عملکرد ضعیف و با نوسانات زیاد از خود نشان داد. علاوه بر این، روش دو نقطه‌ای نیز با متوسط خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد عملکرد قابل قبولی در تخمین حجم نفوذ یافته داشت. مروج الاحکامی (۲۰۱۹) به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد ضرایب معادله نفوذ در آبیاری جویچه‌ای پرداخت. ایشان بیان داشتند که نفوذ با استفاده از روش‌های مبتنی بر زمان پیشروی و داده‌های رواناب مانند روش بهینه‌سازی چند سطحی و رویکرد تعادل حجم، دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌شود، همچنین تکنیک‌های واریانس (براساس میانگین نفوذ و در نظر گرفتن تنوع نفوذ) نفوذ را تقریباً مشابه اندازه گیری‌های میدانی با استفاده از یک کاوشگر نوترون شبیه‌سازی می‌کنند. مطالعات انجام یافته در زمینه نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی محدود بوده و عمدتاً مربوط به بررسی تغییرات و مدل‌سازی نفوذ در موج‌های مختلف مرحله پیشروی جریان می‌باشد (واکر و هامفریس ۱۹۸۳، ایزونو و همکاران ۱۹۸۵، ایزونو و پودمور ۱۹۸۶، بنهام و همکاران ۲۰۰۰، حیدری و همکاران ۲۰۰۱). در خصوص تعیین ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی تنها می‌توان به دو مطالعه نفوذسنجی با استوانه‌های مضاعف توسعه داده شده اشاره نمود. محمود و لطیف (۲۰۰۵) روش اصلاح 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 بود. زارعی و همکاران (۲۰۲۱) روش

خاک و متعاقب آن عدم انتخاب صحیح پارامترهای طراحی آبیاری سطحی، نیمرخ رطوبتی در طول کرت‌ها و جویچه‌ها غیریکنواخت بوده و موجب کاهش راندمان کاربرد آب می‌گردد. مدل‌های تجربی پرکاربردترین مدل‌ها در تخمین مقدار نفوذ در روش‌های مختلف آبیاری سطحی می‌باشند و معادله کوستیاکوف معروف-ترین آن‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی بر پایه معادله بیلان حجمی به منظور تعیین ضرایب معادله فوق در روش‌های مختلف آبیاری سطحی توسعه داده شده و مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) روش‌های مختلف به منظور تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری نواری و جویچه‌ای را با دو روش پیشنهادی جدید براساس روش تک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد، روش‌های اصلاح شده میلاپالی و همکاران (۲۰۰۸) و دونقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) کمترین خطا را برای هر دو روش آبیاری نواری و جویچه‌ای ارائه می‌دهند. بیکزاده و همکاران (۲۰۱۴) روش‌های بهینه‌سازی چند سطحی واکر (۲۰۰۵) و دونقطه‌ای الیوت و واکر را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که روش بهینه‌سازی چند سطحی در هر دو مرحله پیشروی و پسروی نسبت به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر بهتر عمل کرده و موجب کاهش خطای شبیه‌سازی می‌شود. رضاوردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های مبتنی بر داده‌های پیشروی جریان شامل دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)، یک نقطه‌ای میلاپالی و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (۲۰۱۰) و از روش‌های مبتنی بر داده‌های مراحل پیشروی، ذخیره و پسروی، روش بهینه‌سازی چندسطحی را مورد ارزیابی قرار دادند. روش بهینه‌سازی چند سطحی، برآورد دقیق‌تری از نفوذ و رواناب را نسبت به سایر روش‌ها داشت. کمالی و ابراهیمیان (۲۰۱۷) چهار روش تخمین معکوس ضرایب معادله نفوذ شامل دو نقطه‌ای، بهینه‌سازی چند سطحی، IPARM

سه آزمایش اصلی شامل دو آزمایش ارزیابی آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی (با دو دبی ورودی مختلف) و یک آزمایش نیز با جریان پیوسته (به منظور مقایسه با جریان موجی) در نظر گرفته شد. ارزیابی‌ها در دو نوبت آبیاری اول و دوم و در مجموع شش آزمایش انجام شد. هر آزمایش شامل سه جویچه آزمایشی (یک جویچه اصلی در وسط و دو جویچه محافظ در دو طرف) بود. در آزمایش‌های با جریان موجی، موج‌ها فقط در طول مرحله پیشروی اعمال می‌شد. تعداد موج‌ها در آبیاری اول در هر دو جویچه ۴ بود، در حالی که در آبیاری دوم جویچه اول با ۲ موج و جویچه دوم با ۳ موج مرحله پیشروی تکمیل شد و پس از آن جریان ورودی به صورت پیوسته تبدیل می‌شد. زمان قطع جریان طوری انتخاب شد تا آزمایش‌ها به شرایط واقعی مزرعه نزدیک و حداقل عمق آب نفوذ یافته در انتهای مزرعه در حدود ۵۰ میلی‌متر باشد. زمان‌های پیشروی و پسروی به فواصل ۱۰ متر یادداشت برداری و جریان ورودی و خروجی از جویچه‌ها با استفاده از فلوم‌های WSC تیپ ۲ اندازه‌گیری شد. حداکثر دبی غیرفرسایشی جویچه‌ها در حدود ۰/۶۶ لیتر بر ثانیه برآورد شد، بنابراین در تمامی آزمایش‌ها دبی ورودی به جویچه‌ها کمتر از مقدار مذکور بود. مشخصات آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است. ابعاد مقطع جویچه‌ها با استفاده از روش مقطع‌سنجی در ابتدا، وسط و انتهای جویچه‌ها اندازه‌گیری شد و سپس پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جویچه‌ها محاسبه شد. میانگین پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جویچه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

نقطه‌ای توسعه داده شده توسط محمود و لطیف (۲۰۰۵) را برای تیمارهای مختلف زمان و نسبت موج مورد ارزیابی مزرعه‌ای قرار دادند. بر اساس نتایج مزرعه‌ای حاصل شده، 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. بررسی منابع نشان می‌دهد، مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی روش‌های تخمین

ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف بر پایه اطلاعات پیشروی جریان و معادله بیلان حجمی به منظور کاربرد در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی انجام نگرفته است. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سه روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای شپارد و روش رگرسیون غیرخطی رودریگز (رودریگز و همکاران ۲۰۰۴) در برآورد مقدار نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی است.

مواد و روش‌ها

داده‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های ارزیابی آبیاری جویچه‌ای در شرایط بدون کشت گیاه انجام شد. به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در مزرعه آزمایشی، از اعماق ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متری از خاک و در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای جویچه نمونه برداری انجام شد (جدول ۱). طول جویچه‌ها ۱۵۰ متر و فواصل آن‌ها ۰/۷۵ متر انتخاب شد. جویچه‌ها دارای شیب طولی متغیر بود به طوری که مقدار شیب در ۶۰ متر ابتدایی برابر با ۰/۰۸۸ و ادامه آن تا انتهای جویچه‌ها به طور متوسط برابر با ۰/۰۳۴ متر بر متر اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی.

عمق (cm)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	رطوبت ظرفیت زراعی (% حجمی)	رطوبت پژمردگی (% حجمی)	شوری عصاره اشباع (dS m ⁻¹)	ماده آلی (%)
۲۰-۰	لوم رسی	۱/۵۰	۲۸/۵	۱۲/۳	۲/۴۰	۱/۸۶
۴۰-۲۰	لوم رسی	۱/۴۴	۲۶/۳	۱۱/۴	۱/۳۵	۱/۴۱

۶۰-۴۰	لوم شنی	۱/۴۶	۲۱/۸	۱۰/۲	۱/۳۸	۰/۸۴
-------	---------	------	------	------	------	------

جدول ۲- مشخصات آزمایش‌های مزرعه‌ای

نوبت آبیاری	آزمایش	دبی ورودی ($L S^{-1}$)	زمان موج (min)	نسبت موج	زمان قطع جریان (min)
	جویچه اول موجی	۰/۵۱	۴۵	۰/۶۶	۲۲۵
اول	جویچه دوم موجی	۰/۴۲	۴۵	۰/۶۶	۲۲۵
	پیوسته	۰/۴۶	-	-	۳۰۵
	جویچه اول موجی	۰/۵۸	۴۵	۰/۶۶	۲۲۵
دوم	جویچه دوم موجی	۰/۴۲	۴۵	۰/۶۶	۱۹۵
	پیوسته	۰/۴۲	-	-	۱۹۵

جدول ۳- مشخصات هندسی و هیدرولیکی جویچه‌ها.

σ_2	σ_1	ρ_2	ρ_1	شیب		طول اول (m)	شیب طولی ۲ ($m m^{-1}$)	شیب طولی ۱ ($m m^{-1}$)	عرض پشته (m)	طول (m)
				عرضی ($m m^{-1}$)	دوم (m)					
۱/۵۴۶	۰/۹۲۷	۲/۷۰۹	۰/۲۷۶	۰/۰۰۲۰	۸۰	۷۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۸۸	۰/۷۵	۱۵۰

ρ_2 , ρ_1 ، ضرایب ثابت مقطع هیدرولیکی و σ_2 , σ_1 ضرایب ثابت رابطه بین سطح مقطع و عمق جریان می‌باشند.

روش‌های تعیین معادله نفوذ

در تحقیق حاضر از معادله‌های نفوذ کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده به ترتیب برای جریان موجی و پیوسته استفاده شد:

$$Z = kt^a \quad [۱]$$

$$Z = kt^a + f_0 t \quad [۲]$$

در روابط بالا، Z نفوذ تجمعی در واحد طول ($m^3 m^{-1}$)، t (min) زمان تماس آب با خاک (فرصت زمان نفوذ)، a (بدون بعد) و k ($m^3 m^{-1} min^{-1}$) پارامترهای تجربی هستند و f_0 ($m^3 m^{-1} min^{-1}$) مقدار نفوذ نهایی است. ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف با استفاده از مدل بیلان حجمی و استفاده از اطلاعات هیدروگراف جریان ورودی و همچنین پیشروی جریان محاسبه شد. در این تحقیق از سه روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه-

ای شپارد و رگرسیون غیرخطی رودریگز به منظور تعیین ضرایب تجربی معادله نفوذ کوستیاکف در جویچه‌های با جریان موجی و پیوسته استفاده شد. در روش آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی، ضرایب معادله نفوذ در مدت زمان آبیاری ثابت نمی‌باشد و با توجه به سیکل‌های تر و خشک و وقوع پدیده‌ای به نام اثر موج، مقدار نفوذ در موج‌های دوم به بعد کاهش می‌یابد. برای در نظر گرفتن این موضوع، ضرایب تجربی معادله کوستیاکف برای موج اول (شرایط خشک) تعیین شد و سپس با استفاده از مدل توسعه داده شده توسط بلایر و اسمردن (۱۹۸۷)، مقدار نفوذ در موج‌های دوم به بعد تخمین زده شد.

روش دونقطه‌ای الیوت و واکر

روش در مقایسه با روش دو نقطه‌ای می‌باشد با این وجود در برخی جویچه‌ها فرض در نظر گرفته شده برای توان معادله پیشروی مطابق با واقعیت نمی‌باشد (ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۰). در این روش مطابق رابطه زیر معادله نفوذ فیلیپ مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$Z = St^{0.5} + At \quad [۷]$$

که در آن، A و S ضرایب ثابت بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$A = \frac{3\bar{A}_2}{t_2} \quad [۸]$$

$$S = \frac{Q_2 t_2 - 3\bar{A}_2 x_2}{\frac{\pi}{4} t_2^{0.5} x_2} \quad [۹]$$

پارامترهای این معادلات قبلا در روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر معرفی گردیدند.

روش رگرسیون غیرخطی

در این روش به منظور استخراج ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف از ترکیب تمام داده‌های پیشروی و هیدروگراف جریان ورودی استفاده می‌گردد. بدین منظور در هر موج پیشروی جریان، از طریق حل گام به گام معادله بیلان حجم، میانگین نفوذ در طول جویچه به ازای زمان‌های پیشروی تعیین شده و رابطه رگرسیونی نمایی بین مقدار نفوذ و زمان برآزش داده می‌شود. این روش توسط رودریگز و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده است:

$$Q_0 t = V_y(t) + V_z(t) \quad [۱۰]$$

$$V_y(t) = \sigma_y (A_0)(x) \quad [۱۱]$$

$$A_0 = \left(\frac{Q_0 n}{60 \rho_1 \sqrt{S_0}} \right)^{\frac{1}{\rho_2}} \quad [۱۲]$$

در روابط فوق، V_z حجم آب نفوذیافته (m^3)، V_y حجم ذخیره سطحی (m^3)، A_0 سطح مقطع جریان در ابتدای جویچه (m^2)، σ_y ضریب شکل سطحی جریان، n ضریب زبری و S_0 شیب طولی جویچه ($m m^{-1}$) می‌باشد.

اساس این روش بر پایه معادله پیوستگی و شکل نمایی مرحله پیشروی بوده و برای آبیاری جویچه‌ای توسعه یافته است. در این روش از دو نقطه میانی و انتهایی مربوط به داده‌های پیشروی جریان به منظور تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه توانی زیر برای منحنی پیشروی و لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه و با استفاده از دو نقطه از داده‌های پیشروی، ضرایب ثابت p و r قابل محاسبه می‌باشند.

$$x = pt^r \quad [۳]$$

در رابطه فوق، x مسافت (m) و t زمان پیشروی (min) می‌باشد. پارامترهای معادله کوستیاکف- لوئیس از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a = \frac{\log\left[\frac{Q_1 t_1 - \bar{A}_1 - \frac{f_0 t_1}{1+r}}{x_1} - \log\left[\frac{Q_2 t_2 - \bar{A}_2 - \frac{f_0 t_2}{1+r}}{x_2}\right]}{\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad [۴]$$

$$k = \frac{\left[\frac{Q_1 t_1 - \bar{A}_1 - \frac{f_0 t_1}{1+r}}{x_1}\right]^{\frac{1}{a}}}{\sigma_2 t_1^a} \quad [۵]$$

که در آن، \bar{A} متوسط سطح مقطع جریان (m^2) و Q دبی ورودی به جویچه ($m^3 min^{-1}$) می‌باشد. اندیس‌های ۱ و ۲ در معادلات بالا به ترتیب مربوط به پیشروی تا نصف و تمام طول جویچه می‌باشد. σ_2 ضریب شکل زیرسطحی بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_2 = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad [۶]$$

روش یک نقطه‌ای شپارد

این روش مشابه روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر بوده با این تفاوت که مقدار نمای معادله پیشروی (r) ثابت و ۰/۵ فرض شده است. در این روش اندازه‌گیری پیشروی آب در طول جویچه فقط در یک نقطه و آن هم در انتهای جویچه صورت می‌گیرد. روش مذکور متوسط نفوذ در طول جویچه را با استفاده از داده‌های زمان پیشروی در انتهای جویچه، دبی ورودی، سطح مقطع جریان و معادله فیلیپ محاسبه می‌نماید. استفاده از اطلاعات تنها یک نقطه پیشروی مهم‌ترین حسن این

فرض اینکه معادله کوستیاکف دقت کافی را در برآورد مقدار نفوذ دارد، با استفاده از رابطه ۱۵ مقدار نفوذ تجمعی در واحد طول را برای جویچه‌های با جریان موجی ارائه نمودند:

$$Z_n = kt_c^a P^b \sum_{i=0}^n [(r+i)^a - i^a] \quad [15]$$

در رابطه فوق، t_c زمان سیکل موج (min)، i شماره موج ($i=0$ موج اول، $i=1$ موج دوم و ...) و r نسبت سیکل (بدون بعد) می‌باشند. در این مدل، ابتدا با استفاده از روش‌های مبتنی بر بیلان حجمی، ضرایب تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف برای حالت خشک (موج اول) محاسبه شده و به عنوان ورودی رابطه فوق تعریف می‌شوند. در نهایت با استفاده از معادله فوق، مقدار نفوذ در طول جویچه و در زمان‌های مختلف برآورد می‌گردد.

شبیه‌سازی

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای از نرم افزار WinSRFR استفاده شد. این نرم افزار در سال ۲۰۰۶ با همکاری مرکز تحقیقات کشاورزی مناطق خشک، سرویس تحقیق کشاورزی و بخش تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه و از جمله نرم‌افزارهایی است که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی داشته است. پارامترهای ورودی این نرم افزار شامل عمق آب کاربردی مورد نیاز، مشخصات هندسی جویچه‌ها شامل طول، عرض، شیب طولی و عرضی و ابعاد جویچه‌ها، مشخصات نفوذپذیری خاک و ضریب زبری و هیدروگراف جریان ورودی می‌باشد. پارامترهای خروجی مدل نیز شامل منحنی‌های پیشروی و پسروی، تغییرات نفوذ در طول جویچه، پارامترهای ارزیابی عملکرد سیستم آبیاری شامل راندمان و یکنواختی و هیدروگراف‌های جریان و عمق در نقاط مختلف جویچه می‌باشد. نرم افزار WinSRFR به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های برآورد

مقدار ضریب σ_y طبق توصیه واکر و همکاران (۱۹۸۷) برابر با ۰/۷۷ در نظر گرفته شد. مقدار ضریب زبری برای آزمایش‌های آبیاری اول ۰/۰۴ و برای آبیاری نوبت دوم ۰/۰۳ لحاظ شد. در آزمایش‌های با جریان پیوسته نیز مطابق سه روش ارائه شده، با استفاده از اطلاعات منحنی پیشروی و حل معادله بیلان حجم، پارامترهای k و a تعیین شد. مقدار f_0 نیز از طریق داده‌های هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی محاسبه شد:

$$f_0 = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{L} \quad [13]$$

در رابطه بالا، Q_{in} و Q_{out} ($m^3 \min^{-1}$) به ترتیب جریان ورودی و خروجی از جویچه در حالت ماندگار می‌باشد.

مدل CRTM

معادله کوستیاکف توسعه داده شده با در نظر گرفتن اثر محیط خیس شدگی توسط بلایر و اسمردن (۱۹۸۷) به صورت زیر ارائه شد:

$$z_n = kt_c^a p^b \quad [14]$$

در این رابطه Z_n مقدار نفوذ تجمعی در آبیاری موجی در واحد طول ($m^3 m^{-1}$) در پایان سیکل n ام، k و a و b ضرایب تجربی معادله نفوذ و P محیط خیس شده (m) می‌باشد. در ادامه، معادله توسعه داده شده کوستیاکف را با نام (Cycle Ratio Time Model) CRTM به منظور برآورد نفوذ در موج‌های مختلف آبیاری موجی پیشنهاد نمودند. مدل CRTM بر این فرض استوار است که فرآیندهای فیزیکی که با پیشرفت زمان و خیس شدگی اولیه منجر به کاهش میزان نفوذ می‌شوند، در هنگام قطع بودن جریان نیز ادامه دارند. دو عامل کاهش هدایت هیدرولیکی خاک به دلیل جذب آب توسط ذرات خاک و کاهش گرادیان هیدرولیکی، باعث پیشرفت جبهه رطوبتی در زمان قطع جریان موجی می‌شوند. نفوذ در آبیاری موجی علاوه بر زمان نفوذ به محیط خیس شده، زمان موج و نسبت موج بستگی دارد. در این روش با

شبیه‌سازی‌ها شامل زمان‌های پیشروی، تلفات رواناب و حجم آب نفوذیافته با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت.

ضرایب معادله نفوذ مورد استفاده قرار گرفت. برای هر آزمایش، ضرایب معادله نفوذ محاسبه شده با استفاده از سه روش مورد مطالعه وارد نرم افزار شده و نتایج

جدول ۴- مقادیر شاخص خطای RMSE (دقیقه) حاصل از مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده زمان‌های پیشروی.

آزمایش	آبیاری اول				آبیاری دوم			
	جویچه اول موجی		جویچه دوم موجی		جویچه اول موجی		جویچه دوم موجی	
شماره موج	موج اول	موج دوم	موج اول	موج دوم	موج اول	موج دوم	موج اول	موج دوم
دو نقطه‌ای	۰/۸۴	۱/۵۶	۴/۰۷	۲/۵۳	۱/۸۳	۲/۰۹	۱/۵۸	۲/۰۴
یک نقطه‌ای	۳/۷۷	۸/۴۷	۹/۵۹	۳۰/۴۵	۴/۵۰	۶/۱۱	۹/۷۶	۲۵/۹۹
رگرسیون غیرخطی	۲/۰۲	۱/۴۳	۵/۴۲	۲/۹۴	۱/۲۰	۰/۷۶	۳/۰۱	۱/۶۲

شاخص‌های ارزیابی

مقادیر میانگین ریشه مربعات خطای مربوط به زمان‌های پیشروی در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته در جدول ۴ ارائه شده است. در آبیاری نوبت اول، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شاخص RMSE برای روش یک نقطه‌ای به ترتیب برابر ۳/۷۷ و ۳۰/۴۵ دقیقه، روش دو نقطه‌ای برابر با ۰/۸۴ و ۴/۰۷ دقیقه و روش رگرسیون غیرخطی برابر با ۰/۷۶ و ۵/۴۲ دقیقه به دست آمد. در نوبت دوم نیز مقادیر مذکور برای روش یک نقطه‌ای به ترتیب برابر با ۲/۹۰ و ۲۹/۱۳، روش دو نقطه‌ای برابر با ۲/۳۶، ۳/۸۱ و روش رگرسیون غیرخطی برابر با ۰/۷۴ و ۴/۰۴ دقیقه به دست آمد.

روش یک نقطه‌ای ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داد، به طوری که مقدار میانگین شاخص خطای RMSE برای این روش در آزمایش‌های موجی نوبت اول و دوم به ترتیب ۱۲/۳۳ و ۹/۳۷ دقیقه تعیین شد. همچنین میانگین مقادیر این شاخص برای روش‌های دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی در آبیاری اول به ترتیب برابر ۲/۰۷ و ۲/۳۰ و در آبیاری دوم برابر ۲/۹۸ و ۲/۶۳ دقیقه محاسبه شد. روش‌های دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی دارای دقت تقریباً نزدیک به هم بود. خطای تخمین زمان پیشروی در موج‌های دوم به بعد

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های برآورد نفوذ از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad [16]$$

$$RE = \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \times 100 \quad [17]$$

در روابط مذکور، N تعداد داده‌ها، O_i مقادیر مشاهداتی و P_i مقادیر تخمینی از روش‌های مورد مطالعه می‌باشند. شاخص یکنواختی توزیع چارک پایین (DU_{LQ}^1) با استفاده از مقادیر عمق آب نفوذیافته شبیه‌سازی شده مطابق رابطه زیر محاسبه شد:

$$DU_{LQ} = \frac{\overline{D_{1/4}}}{\overline{D}} \quad [18]$$

در رابطه فوق، $\overline{D_{1/4}}$ میانگین مقدار آب نفوذ یافته در چاک پایین و \overline{D} میانگین کل آب نفوذ یافته می‌باشد.

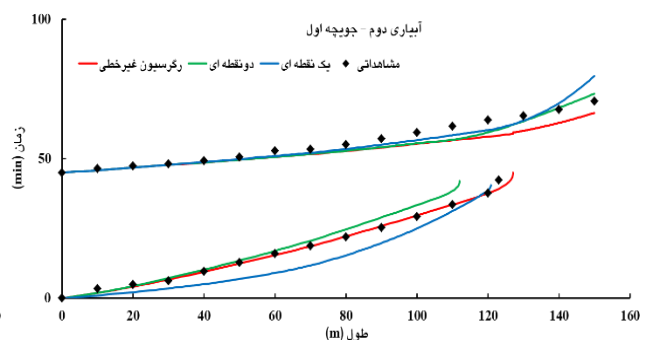
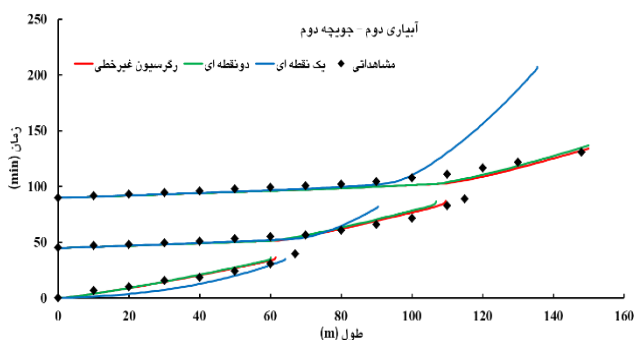
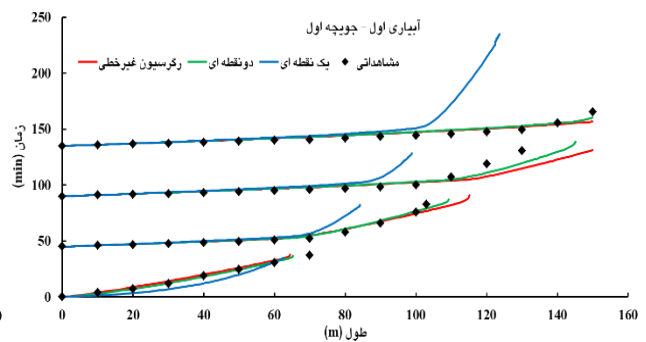
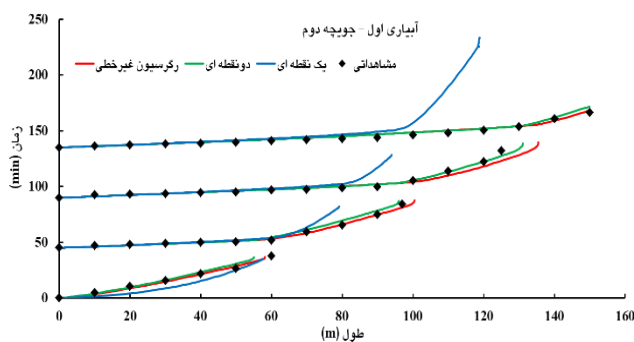
نتایج و بحث

منحنی پیشروی

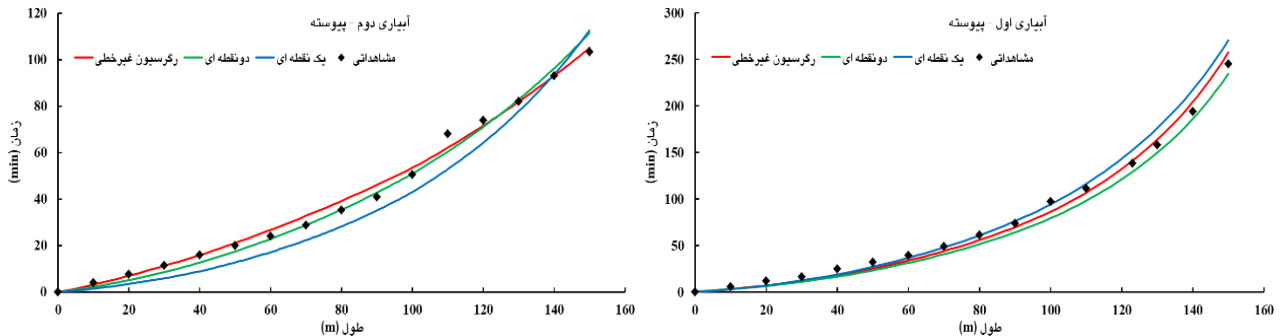
¹ Distribution uniformity of low quarter

مختاری مطلق و همکاران ۲۰۱۸). زمان پیشروی اندازه گیری و شبیه سازی شده با استفاده از ضرایب نفوذ به دست آمده از سه روش مورد مطالعه در آزمایش های با جریان موجی در شکل ۱ ارائه شده است. روش یک نقطه ای در برخی آزمایش های با جریان موجی منجر به تکمیل مرحله پیشروی جریان نشده است و بنابراین روش مذکور از کارایی و دقت قابل قبولی در برآورد ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف در آبیاری موجی برخوردار نیست. در مقابل نتایج دو روش دو نقطه ای الیوت و واکر و رگرسیون غیرخطی دارای انطباق قابل قبول با مقادیر مشاهده ای می باشد. منحنی های پیشروی مشاهده ای و شبیه سازی شده برای آزمایش با جریان پیوسته در شکل ۲ نشان داده شده است. روش های دو نقطه ای و رگرسیون غیرخطی بیشترین تطابق را با مقادیر مشاهداتی پیشروی از خود نشان دادند. ضعیف ترین عملکرد در جریان پیوسته نیز مربوط به روش یک نقطه ای است، به طوری که در آبیاری اول بیش برآورد و در آبیاری دوم کم برآورد داشت.

نسبت به موج اول افزایش یافت. با توجه به اینکه در موج های دوم به بعد دو فاز خشک و تر وجود دارد، لذا تخمین نفوذ به خصوص در قسمت خیس شدگی از پیچیدگی بیشتری برخوردار بوده و بنابراین بر دقت شبیه سازی ها موثر بود. مقایسه نتایج بین دو نوبت آبیاری نیز نشان داد که اختلاف بین عملکرد سه روش تخمین ضرایب نفوذ در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول کمتر شد به طوری که اختلاف بین مقادیر حداقل و حداکثر شاخص RMSE در آبیاری های اول و دوم به ترتیب برابر ۱۰/۲۶ و ۶/۷۵ دقیقه بدست آمد. در آبیاری های دوم به بعد به دلیل تثبیت شرایط هیدرولیکی جویچه ها، اثر موج بر نفوذ آب در خاک کاهش یافته و در نتیجه تغییرات مکانی نفوذ در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول کم تر شد. در آزمایش های با جریان پیوسته، بهترین و ضعیف ترین عملکرد به ترتیب مربوط به روش های رگرسیون غیرخطی و یک نقطه ای شپارد بود. عملکرد ضعیف روش یک نقطه ای شپارد در پیش بینی زمان پیشروی در مطالعات پیشین گزارش شده است (ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۰، راستگو و بشارت ۲۰۱۷).



شکل ۱- مقایسه زمان‌های پیشروی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده- آزمایش‌های با جریان موجی.



شکل ۲- مقایسه زمان‌های پیشروی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده- آزمایش با جریان پیوسته.

لذا جریان موجی سبب گردید تا فاز پیشروی با حجم آب کم‌تری نسبت به جریان پیوسته تکمیل شود. به دلیل اثر موج در کاهش نفوذپذیری جویچه‌ها، حجم آب نفوذیافته در جویچه‌های با جریان موجی نسبت به پیوسته کم بود به طوری که نسبت حجم آب نفوذیافته در آزمایش با جریان پیوسته به میانگین حجم آب نفوذیافته در آزمایش‌های با جریان موجی برای آبیاری اول و دوم به ترتیب برابر با ۲/۱۷ و ۱/۵۴ محاسبه شد. در مقابل با توجه به افزایش سرعت پیشروی جریان، تلفات رواناب در این جویچه‌ها بیش‌تر از جویچه با جریان پیوسته بود. لازم به ذکر است عمق آب مورد نیاز در شبیه‌سازی‌ها معادل ۵۰ میلی‌متر لحاظ شده بود.

بیان آب

مقادیر حجم آب ورودی، حجم رواناب و آب نفوذیافته برآورد شده با استفاده از روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ در جدول ۵ ارائه شده است. حجم آب ورودی در آزمایش‌های با جریان موجی نسبت به آزمایش با جریان پیوسته بخصوص در آبیاری اول به طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر می‌باشد. نسبت حجم آب ورودی آزمایش با جریان پیوسته به میانگین حجم آب ورودی در آزمایش‌های با جریان موجی به ترتیب برای آبیاری‌های اول و دوم برابر با ۱/۶۸ و ۱/۱۱ محاسبه شد. با توجه به اینکه در آبیاری اول، جویچه‌ها خشک و دارای ضریب زبری بالایی بود،

جدول ۵- مقادیر اندازگیری و شبیه‌سازی شده اجزای بیان آب و خطای نسبی روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ.

آبیاری دوم		آبیاری اول		پارامتر	روش برآورد
جویچه اول	جویچه دوم	جویچه اول	جویچه دوم		
۴/۳۱	۳/۶۹	۸/۴۲	۴/۵۴	حجم آب ورودی (m ³)	مشاهده‌ای
۰/۵۱	۱/۱۱	۰/۲۷	۱/۱۶	حجم رواناب (m ³)	
۱۴/۱۵	۳۰/۰۸	۳/۲۱	۲۵/۵۵	درصد رواناب (%)	
۳/۸۰	۲/۵۸	۸/۱۵	۳/۲۸	حجم آب نفوذیافته (m ³)	
۰/۳۷	۱/۰۳	۰/۲۳	۱/۲۴	حجم رواناب (m ³)	مشاهده‌ای
۳/۷۱	۲۷/۹۱	۲/۷۳	۲۷/۳۱	درصد رواناب (%)	
۲۷/۴۵	۷/۲۱	۱۴/۸۱	۶/۹۰	خطای نسبی برآورد رواناب (%)	دو نقطه‌ای
۳/۹۴	۲/۶۶	۸/۱۹	۳/۳۰	حجم آب نفوذیافته (m ³)	مشاهده‌ای
۳/۶۸	۳/۱۰	۰/۴۹	۲/۳۷	خطای نسبی برآورد نفوذ (%)	
۰/۰۴	۰	۰/۲۴	۰	حجم رواناب (m ³)	

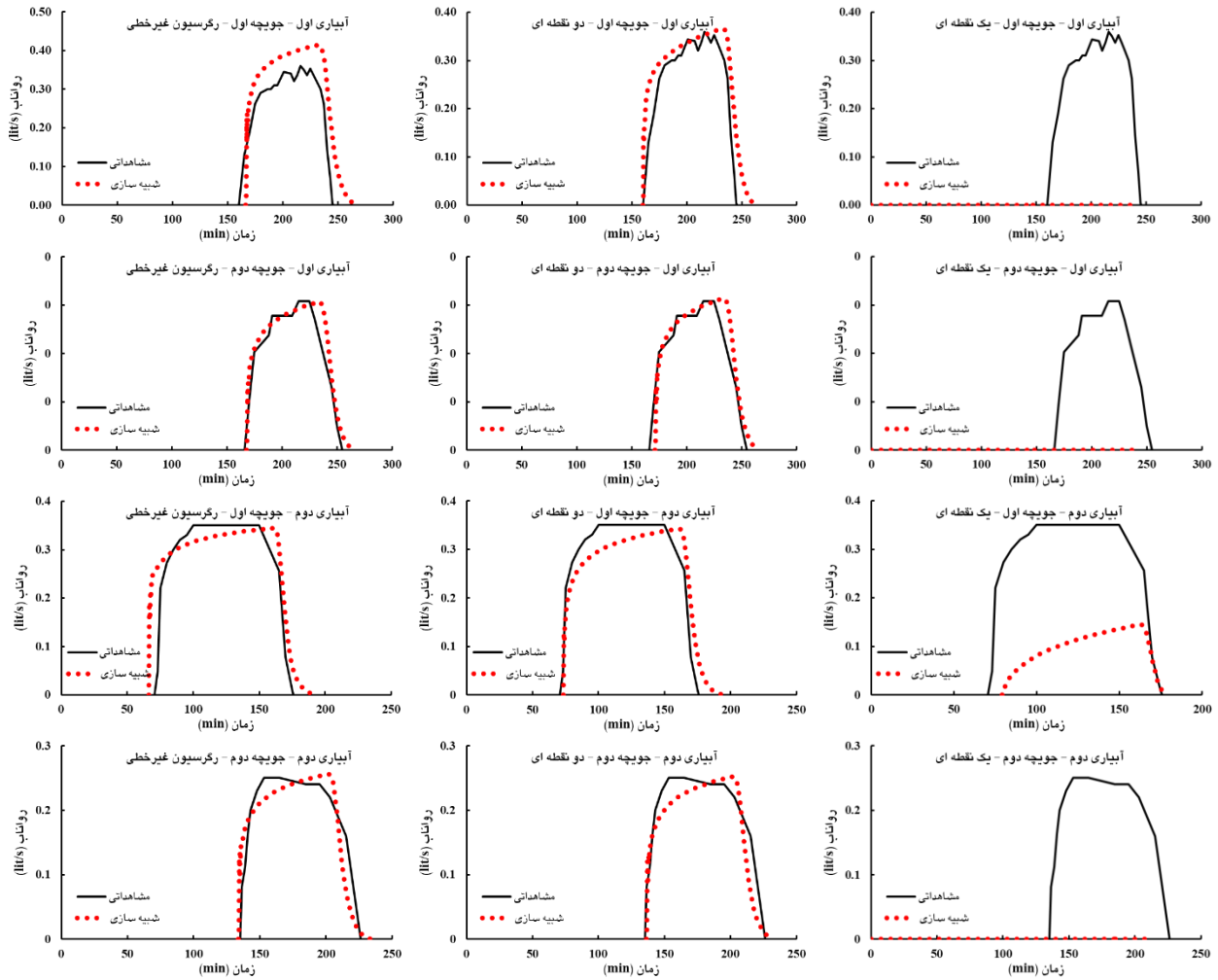
۰/۹۳	۰	۱۴/۱۸	۲/۸۵	۰	۰	درصد رواناب (%)	
۹۲/۱۶	۱۰۰	۶۸/۸۲	۱۱/۱۱	۱۰۰	۱۰۰	خطای نسبی برآورد رواناب (%)	
۴/۲۷	۳/۶۹	۳/۵۱	۸/۱۸	۴/۵۴	۵/۵۱	حجم آب نفوذیافته (m ³)	
۱۲/۳۷	۴۳/۰۲	۵۷/۴۰	۰/۳۷	۳۲/۳۴	۳۳/۷۴	خطای نسبی برآورد نفوذ (%)	
۰/۴۸	۱/۰۸	۱/۹۹	۰/۲۱	۱/۲۶	۱/۷۷	حجم رواناب (m ³)	
۱۱/۱۴	۲۹/۲۷	۴۸/۶۶	۲/۴۹	۲۷/۷۵	۳۲/۱۲	درصد رواناب (%)	
۵/۸۸	۲/۷۰	۶/۹۹	۲۲/۲۲	۸/۶۲	۲۷/۳۴	خطای نسبی برآورد رواناب (%)	رگرسیون غیرخطی
۳/۸۳	۲/۶۱	۲/۱۰	۸/۲۱	۳/۲۸	۳/۷۴	حجم آب نفوذیافته (m ³)	
۰/۵۹	۱/۱۶	۵/۸۳	۰/۷۴	۲/۹۶	۹/۲۲	خطای نسبی برآورد نفوذ (%)	

آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول کاهش یافت. دلیل این موضوع نیز مربوط به کاهش تغییرات مکانی نفوذ در جویچه‌ها و در نتیجه افزایش دقت مدل در برآورد اجزای بیلان آب می‌باشد. در مقابل خطای مدل در برآورد حجم آب نفوذیافته کم‌تر از رواناب بود. در آزمایش‌های آبیاری نوبت اول با جریان موجی، میانگین شاخص خطای نسبی در تخمین حجم آب نفوذیافته برای روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیر خطی به ترتیب ۰/۳۴، ۳۴/۰۳ و ۶/۰۹ درصد و نوبت دوم به ترتیب برابر با ۵۰/۲۱، ۲/۶۷ و ۳/۵۰ درصد محاسبه شد. در نوبت اول آبیاری با جریان پیوسته نیز شاخص خطای نسبی در پیش‌بینی رواناب با استفاده از روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی به ترتیب برابر با ۱۱/۱۱، ۱۴/۸۱ و ۲۲/۲۲ درصد و در نوبت دوم آبیاری به ترتیب ۹۲/۱۶، ۲۷/۴۵ و ۵/۸۸ درصد محاسبه شد. همچنین میانگین خطای نسبی در پیش‌بینی حجم آب نفوذ یافته برای روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی به ترتیب برابر با ۲/۰۹ و ۰/۷۶ درصد حاصل شد. نتایج به‌دست آمده از مقایسه اجزای بیلان آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان داد که روش رگرسیون غیرخطی در جریان پیوسته بهترین عملکرد را داشت. هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده از طریق سه روش برآورد پارامترهای نفوذ برای جریان‌های موجی و پیوسته به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود روش یک نقطه‌ای

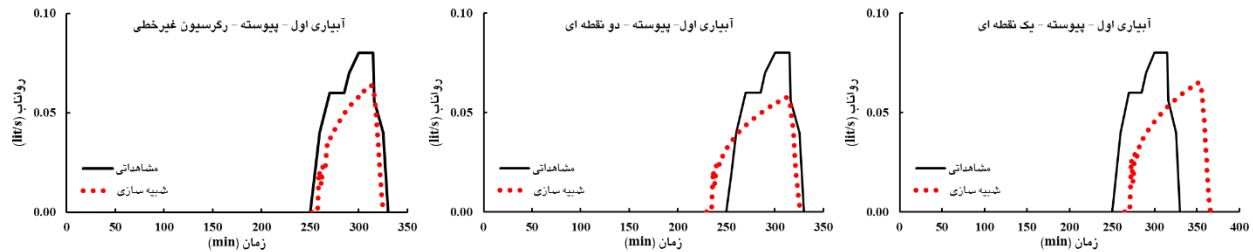
نتایج مطالعات پیشین از جمله الیوت و واکر (۱۹۸۲)، محمود و لطیف (۲۰۰۵) و اوجاقلو و همکاران (۲۰۲۰) نیز تایید کننده نتیجه به‌دست آمده می‌باشد، به‌طوری‌که جریان موجی سبب کاهش سرعت نفوذپذیری در اثر تغییرات بوجود آمده در مشخصات هیدرولیکی جویچه و به‌دنبال آن موجب پیشروی سریع و بهبود یکنواختی توزیع آب در خاک خواهد شد. میانگین تلفات رواناب در جویچه‌های با جریان موجی در حدود ۳۱ درصد و در جویچه با جریان پیوسته در حدود ۹ درصد اندازه‌گیری شد. مقایسه مقادیر حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان داد که در آزمایش‌های با جریان موجی، مقدار شاخص خطای نسبی در برآورد تلفات رواناب از طریق سه روش تخمین ضرایب نفوذ یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیر خطی به ترتیب ۱۰۰، ۱۲/۸۰ و ۱۷/۹۸ درصد برای آبیاری نوبت اول و ۹۳/۴۴، ۴/۹۵ و ۴/۸۵ درصد برای آبیاری نوبت دوم به‌دست آمد. ضرایب نفوذ بدست آمده از روش یک نقطه‌ای منجر به برآورد بیش از حد نفوذ و حتی عدم تکمیل مرحله پیشروی در آبیاری اول شد که به همین دلیل بیش‌ترین خطای مربوط به تخمین حجم رواناب مربوط به این روش می‌باشد. عملکرد دو روش رگرسیون غیرخطی و دو نقطه‌ای در آبیاری دوم نزدیک به هم ولی در آبیاری اول روش دو نقطه‌ای عملکرد بهتری داشت. با صرف نظر کردن از نتایج روش یک نقطه‌ای، مقدار خطای دو روش دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی در آزمایش‌های

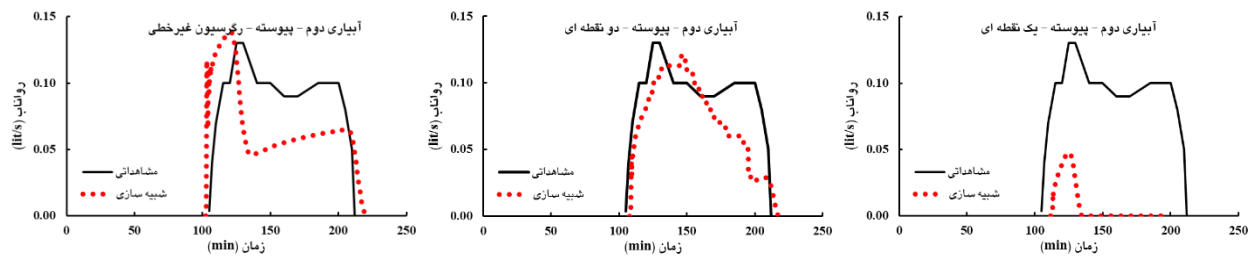
دونقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی عملکرد نزدیک به هم در برآورد هیدروگراف رواناب داشتند.

دارای خطای فاحشی در پیش‌بینی میزان رواناب در جریان موجی می‌باشد به طوری که در بیشتر آزمایش‌ها مقدار رواناب به دست آمده از این روش به دلیل عدم تکمیل پیشروی جریان صفر می‌باشد. روش‌های



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در جریان موجی.





شکل ۴- مقایسه هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در جریان پیوسته.

عدم تکمیل پیشروی جریان دور از واقعیت می‌باشد و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در جریان موجی ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به این روش می‌باشد. مقدار یکنواختی نفوذ آب در آبیاری اول با جریان پیوسته برای روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی به ترتیب برابر با ۷۰، ۷۵ و ۷۹ درصد و در آبیاری نوبت دوم به ترتیب برابر با ۷۱، ۸۵ و ۸۷ درصد تعیین شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد، یکنواختی توزیع آب در آزمایش‌های با جریان موجی همواره بیشتر از جریان پیوسته می‌باشد به طوری که با صرف نظر از نتایج روش یک نقطه‌ای، میانگین شاخص یکنواختی نفوذ آب در خاک در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به ترتیب برابر با ۹۴/۱ و ۸۱/۵ درصد تعیین شد.

نتیجه‌گیری کلی

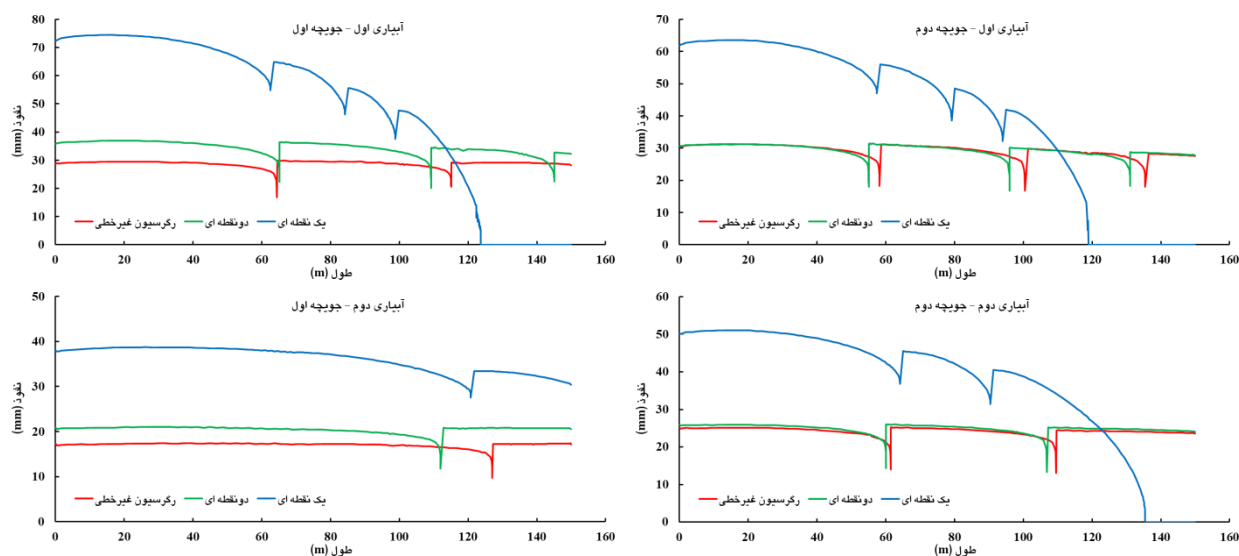
در مطالعه حاضر، سه روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای شپارد و رگرسیون غیرخطی به منظور تخمین ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده از سه روش مورد مطالعه نشان داد، روش یک نقطه‌ای ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد نفوذ در جویچه‌های با جریان موجی و همچنین جریان پیوسته داشت.

مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌

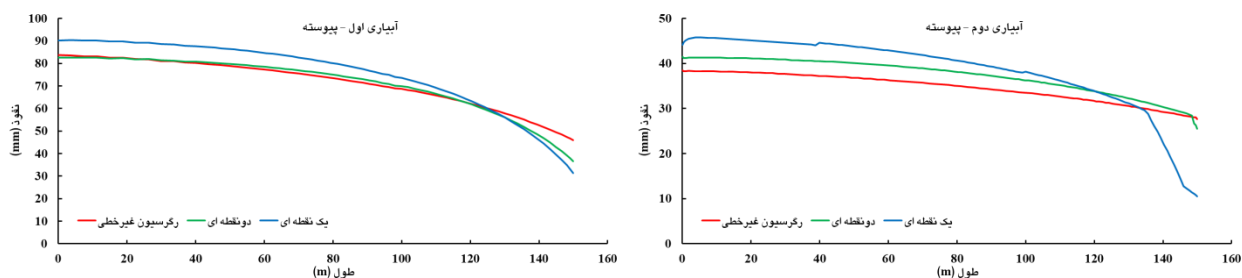
سازی شده نشان می‌دهد دقت روش‌های دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی در آزمایش‌های با جریان موجی بیشتر از پیوسته می‌باشد. در آزمایش با جریان پیوسته و به خصوص آبیاری نوبت اول، بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به نقاط اوج هیدروگراف است. به نظر می‌رسد کاهش شیب طولی در انتهای جویچه‌ها یکی از دلایل این موضوع باشد.

یکنواختی نفوذ آب

مقادیر شبیه‌سازی شده عمق آب نفوذیافته در طول جویچه‌ها با استفاده از سه روش تخمین پارامترهای نفوذ برای جریان‌های موجی و پیوسته به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵، روش یک نقطه‌ای در جریان موجی دارای بیش برآورد در تخمین عمق آب نفوذ یافته در تمام نقاط جویچه بود. با این وجود نتایج روش دو نقطه‌ای و رگرسیون غیر خطی به خصوص در آبیاری دوم نزدیک به هم می‌باشد. مقدار یکنواختی نفوذ آب در آزمایش‌های آبیاری نوبت اول با جریان موجی برای روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی به ترتیب برابر با ۶۱/۵، ۹۲ و ۹۴ درصد و در آبیاری نوبت دوم به ترتیب برابر با ۶۲/۵، ۹۵ و ۹۵/۵ درصد محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای روش یک نقطه‌ای به دلیل



شکل ۵- پروفیل آب نفوذ یافته در طول جویچه در روش‌های مختلف با جریان موجی.



شکل ۶- پروفیل آب نفوذ یافته در طول جویچه در روش‌های مختلف با جریان پیوسته.

نشان داد. بررسی اجزای بیلان آب نشان داد، اثر جریان موجی بر کاهش مصرف آب و بالا رفتن یکنواختی توزیع آب در طول جویچه در آبیاری نوبت اول قابل ملاحظه بود. پیشنهاد می‌گردد سایر روش‌های برآورد پارامترهای معادله نفوذ در آزمایش‌های با جریان موجی و با در نظر گرفتن شرایط مختلف مزرعه‌ای از قبیل طول جویچه‌ها، دبی ورودی و بافت خاک مورد مطالعه قرار گیرد.

از سوی دیگر عملکرد دو روش رگرسیون غیرخطی و دو نقطه‌ای قابل قبول ارزیابی شد. دقت دو روش مذکور در برآورد زمان پیشروی و تلفات رواناب آزمایش‌های با جریان موجی بیش‌تر از آزمایش‌های با جریان پیوسته به‌دست آمد. اختلاف بین نتایج دو روش دو نقطه‌ای و رگرسیون غیرخطی ناچیز بود با این وجود روش رگرسیون غیرخطی بهترین عملکرد را در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و پیوسته از خود

منابع مورد استفاده

- Abbasi F, 2012. Principle of flow in surface irrigation. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID), Tehran, Iran. P. 232. (In Persian)
- Benham BL, Reddel DL and Marek TH, 2000. Performance of three infiltration model under surge irrigation. Irrigation Science 20: 37-43.
- Beykzadeh E, Ziaei AN, Davari K and Ansari H, 2014. Finding the optimum infiltration and roughness parameters irrigation using complete hydrodynamic model. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 8(3): 549-555. (In Persian with English abstract)
- Blair AW and Smerdon ET, 1987. Modeling surge irrigation infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 113(4): 497-515.

- Ebrahimian H, Liaghat A, Ghanbarian-Alavijeh B and Abbasi F, 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science* 28: 479–488.
- Elliott RL and Walker WR, 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans ASAE* 25(2):396–400.
- Ghobadi Nia M, Sohrabi T and Mirabzadeh M, 2007. Effect of stepwise inflow increment on advance rate with surge flow irrigation. *Agricultural Research (Water, Soil and Plant in Agriculture)* 7(2):79-89. (In Persian with English abstract)
- Ghorbani A, Nazari S and Zerangi M, 2016. Comparison of Zea mays water consumption under two irrigation methods of surge and continuous furrow in the Eghlid plain. *Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi)* 108: 14-18. (In Persian with English abstract)
- Gillies MH and Smith RJ, 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science* 24(1): 25-35.
- 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.
- Horst MG, Shamutalov SS, Goncalves JM and Pereira LS, 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agricultural Water Management* 87: 115 – 127.
- Izadi M, Kouchakzadeh M, Samani MV and Shahabifar M, 2005. Investigating the effect of surge parameters on the uniformity and surge irrigation efficiency. *Journal of Water and Soil Science* 19(2): 271-279. (In Persian with English abstract)
- Izuno FT, Podmore TH and Duke HR, 1985. Infiltration under surge irrigation. *Transactions ASAE* 28(2): 517–521.
- Izuno FT and Podmore TH, 1986. Surge irrigation management. *Agricultural Water Management* 11(3–4): 279–291.
- Kamali P and Ebrahimian H, 2017. Comparison and evaluation of different methods of inverse estimation of infiltration equation parameters in vegetated furrows. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(1): 39-48. (In Persian with English abstract)
- Mahmood S and Latif M, 2005. A simple procedure for simulating surge infiltration using first-surge infiltrometer data. *Irrigation and Drainage*. 54(4): 437–447.
- Mailapalli DR, Wallender WW, Raghuwanshi NS and Singh R, 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(6):788–795.
- Mirzaei AA, Sadraddini AA and Nazemi AH, 2011. Simulation of surge irrigation and comparison with continuous flow. *Water Resources Engineering* 4(9): 75-85. (In Persian with English abstract)
- Mokhtari Motlagh P, Gholami Sefidkouhi MA and Sharifan H, 2018. Estimation of different soil infiltration parameters in furrow irrigation with super absorbent polymer. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(5): 281-289. (In Persian with English abstract)
- Moravejalakhkami B, 2019. Methods of infiltration estimation for furrow irrigation. *Irrigation and Drainage* 69(1): 52–62.
- Nazemi AH, Parandin MA, Sadraddini AA and Ghamarnia H, 2019. Effects of surge irrigation on water use efficiency and water productivity of maize in Islamabad-Gharb area. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Science)* 3: 353-370. (In Persian with English abstract)
- Ojaghlou H, Sohrabi T and Abbasi F, 2015 a. Evaluation of water and nitrate losses in furrow fertigation with surge and fixed input hydrographs. *Iranian Water Research Journal* 18: 169-180. (In Persian with English abstract)
- Ojaghlou H, Sohrabi T and Abbasi F, 2015 b. Uniformity of water and nitrate distribution under furrow irrigation through surge flow. *Water and Soil Science* 25: 3: 267-279. (In Persian with English abstract)
- 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): 1–14.
- Rastgo S and Besharat S, 2017. Studying and evaluating of developed methods for estimation of infiltration parameters in conventional and fixed alternate furrow irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(11): 680-691. (In Persian with English abstract)
- Rezaverdinejad V, Ahmadi H, Hemmati M and Ebrahimian H, 2016. Evaluation and comparison of different approaches of infiltration parameters estimation under different furrow irrigation systems and inflow regimes. *Journal of Water and Soil Science* 20(76): 161-176. (In Persian with English abstract)