



مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۴۰۷-۳۹۱

DOI: 10.22059/jwim.2021.322794.867

مقاله پژوهشی:

ارزیابی روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با حضور سوپرجاذب‌ها

اعظم احمدی سراعیلانی^۱، بهزاد آزادگان^۲، حامد ابراهیمیان^۳، محمود مشعل^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی، منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۳۰

چکیده

اضافه کردن سوپرجاذب به خاک می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات آب داشته باشد. با توجه به اهمیت تخمین نفوذ در طراحی و ارزیابی آبیاری سطحی، در این مطالعه چهار روش بهینه‌سازی چندسطحی، دوتقطه‌ای الیوت واکر، IPARM و SIPAR-ID در شرایط حضور سوپرجاذب مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش‌ها در بهار و تابستان ۱۳۹۷ طی پنج نوبت آبیاری به صورت جویچه‌ای در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان در شرایط بدون کشت، به‌طورکلی روی ۱۰ جویچه اصلی با دو نوع سوپرجاذب (A200 و استاکوزورب)، دو مقدار (۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع) و دو شدت جریان (۰/۳ و ۰/۶ لیتر بر ثانیه) انجام شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن سوپرجاذب باعث افزایش حجم آب نفوذ یافته (در دبی کم از ۵/۹ تا ۱۸/۹ درصد و در دبی بالا از ۵/۵ تا ۱۸/۱ درصد) شد و هر چه مقدار سوپرجاذب بیشتر شد، مقدار اثرگذاری افزایش داشت و در شدت جریان ورودی بالاتر این تأثیر کم‌تر بود. در مقایسه دو پلیمر، سوپرجاذب استاکوزورب بر افزایش مقدار نفوذ آب تأثیر بیش‌تری نسبت به A200 داشت (۳/۴ و ۳/۳ درصد در دبی کم و ۰/۵ و ۱/۷ درصد در دبی بالا). روش بهینه‌سازی چندسطحی با کم‌ترین خطای نسبی، حدود ۱ درصد در برآورد پارامترهای معادله نفوذ بهترین عملکرد را ارائه داد. مدل IPARM و روش دوتقطه‌ای الیوت واکر نیز عملکرد قابل‌قبولی داشتند. مدل SIPAR-ID با خطای نسبی بالا و نوسان زیاد عملکرد مناسبی در این مطالعه نداشت. هم‌چنین با افزایش شدت جریان ورودی به جویچه‌ها، دقت مدل IPARM و روش دو نقطه‌ای کم شد.

کلیدواژه‌ها: آبیاری سطحی، استاکوزورب، مدل نفوذ، A200.

Evaluation of infiltration parameters estimation methods in furrow irrigation with the presence of superabsorbents

Azam Ahmadi Saraeilani¹, Behzad Azadegan^{2*}, Hamed Ebrahimian³, Mahmoud Mashal²

1. Ph.D. Candidate, Department of irrigation and drainage engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Associate professor, Department of Irrigation & Reclamation Eng. College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: May 20, 2021

Accepted: July 20, 2021

Abstract

A solution for optimal management of water resources is to add superabsorbents to the soil to increase water consumption efficiency. Due to the importance of soil infiltration in the design and evaluation of surface irrigation methods, several methods including multi-level optimization, Elliott and Walker two-point method, IPARM and SIPAR-ID were used in this study to estimate the volume of infiltrated water in soil with the presence of superabsorbents. This study was carried out during spring and summer of 2019, in experimental filed of Aboureyhan College of Tehran University. With 5 times irrigation in 10 furrows, two dosages of A200 and Stockosorb superabsorbents (16 and 32 g/m²) and two flow rates (0.3 and 0.6 Ls-1). According to the results, adding superabsorbent to the soil increased soil infiltration. The effect of superabsorbent was reduced with the increase of the flow rate to the furrows (In low flow rate from 5.9% to 18.9% and 5.5% to 18.1% in high flow rate). Stockosorb superabsorbent had a greater effect on increase of water infiltration in the soil compared to A200 (3.4% and 3.3% for low and high dosages of superabsorbent and low flow rate and respectively 0.5% and 1.7% in high flow rate). Multi-level optimization method estimated soil infiltration parameters with the lowest relative error (1%). Having high relative error, the SIPAR-ID model did not perform properly during the evaluation. Results also showed that with increasing the flow rate to the furrows, the performance of the IPARM model and two-point method decreased.

Keywords: A200, infiltration model, Stockosorb, surface irrigation.

مقدمه

محدودیت منابع آب کشور ضرورت صرفه‌جویی در مصرف آب را در بخش کشاورزی روشن می‌سازد. اعمال مدیریت صحیح و به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته به منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک، از جمله اقدامات مؤثر برای افزایش راندمان آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب می‌باشد. یکی از راه‌کارهای استفاده بهینه از منابع آب و حفظ آن، استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب است (Seyed Dorraji *et al.*, 2010). هدف اصلی از افزودن پلیمرهای سوپرجاذب به خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش دور آبیاری است (Helalia & Letey, 1988; Miller, 1979). ظرفیت نگهداری آب به بافت خاک، نوع، اندازه پلیمر و املاح خاک بستگی دارد (Johnson & Velkamp, 1984). Peterson (2002) گزارش کرد که هیدروژل‌ها بیش‌ترین اهمیت را در احیا و آبادسازی مناطقی که زمان آبیاری برای گیاه محدود است، داشته و آب قابل‌دسترس را برای اجتناب از خشک‌شدن بحرانی فراهم می‌کند. سوپرجاذب‌ها هرگز به مواد اولیه خود (مواد تشکیل‌دهنده) برنمی‌گردند، در شرایط یونی و میکروبی خاک به آرامی تجزیه شده و سرانجام به آب، دی‌اکسیدکربن و ترکیبات نیتروژن‌دار غیرسمی از جمله آمونیاک تبدیل شده و به ماده آلی خاک اضافه می‌شوند (Sojka & Lentz, 1997). بنابراین، با وجود ساختار شیمیایی هیچ اثر منفی و تخریبی روی ساختمان خاک نداشته و سازگار با محیط زیست هستند (Boatright *et al.*, 1997; Eubeler *et al.*, 2010). Ebrahimian *et al.* (2017) طی مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که با استفاده از سوپرجاذب (وینیل‌الکل آکریلیک اسید) می‌توان با کاربرد آب کم‌تر، عملکرد قابل قبول محصول ذرت به‌دست آورد و بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد (کارایی مصرف آب در سطح ۰/۳ درصد

وزنی کاربرد سوپرجاذب، ۲/۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب در مقابل ۱/۶۶ کیلوگرم بر مترمکعب برای تیمار شاهد. Sohrabi *et al.* (2005) تأثیر پلی‌آکریل‌آمید را در کنترل فرسایش و تلفات خاک از جویچه‌ها و افزایش نفوذ آب بررسی کردند. نتایج نشان داد که پلی‌آکریل‌آمید باعث کاهش تلفات خاک از جویچه‌ها و افزایش میزان نفوذپذیری می‌شود. نفوذپذیری از سطح خاک یک فرایند پیچیده است که به خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و آب و ماده آلی خاک وابسته است. Montazar (2007) تأثیر پلیمر سوپرجاذب استاکوزورب را در آبیاری جویچه‌ای بررسی کرد. نتایج نشان داد که اضافه‌کردن سوپرجاذب به خاک باعث افزایش زمان پیشروی و نفوذ تجمع می‌شود و کاربرد این پلیمر می‌تواند وضعیت نفوذپذیری خاک را تا حد قابل‌قبولی بهبود بخشد. در پژوهش حاضر از دو نوع سوپرجاذب مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و علاوه بر بررسی زمان‌های پیشروی و پسروی و حجم نفوذیافته، پارامترهای معادله نفوذ توسط مدل‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت. Mokhtari Motlagh & Sharifan (2014) گزارش کردند که استفاده از سوپرجاذب A200 در آبیاری جویچه‌ای باعث افزایش زمان پیشروی و پسروی می‌شود. دلیل این نتیجه را می‌توان به عملکرد سوپرجاذب نسبت داد که با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و ایجاد چسبندگی بین خاکدانه‌ها، زمان رسیدن آب به انتهای جویچه‌ها را افزایش می‌دهد. Aghayari *et al.* (2016) در پژوهشی عنوان کردند که استفاده از سوپرجاذب در آبیاری جویچه‌ای باعث افزایش بهره‌وری آب و عملکرد ذرت می‌شود.

برای تخمین بهتر پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. نفوذ آب در خاک با زمان و مکان متغیر بوده و ممکن است از یک نقطه مزرعه به نقطه دیگر و از زمانی به زمان دیگر،

پارامترهای نفوذ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که این روش عملکرد بسیار خوبی در تخمین حجم آب نفوذیافته در خاک دارد (Kamali *et al.*, 2018).

عمده مطالعاتی که برای ارزیابی روش‌های مختلف تخمین ضرایب معادله نفوذ در آبیاری جویچه‌ای انجام شده است، در حالت کشت معمول آبیاری جویچه‌ای است، بوده است و تاکنون مطالعات بسیار محدودی برای ارزیابی روش‌های تخمین پارامترهای معادله نفوذ در هنگام استفاده از پلیمر سوپرجاذب انجام شده است. Mokhtari Motlagh & Sharifan (2017) چهار روشی که فقط از داده‌های مرحله پیشروی برای تخمین پارامترهای نفوذ استفاده می‌کند (شامل دونقطه‌ای Elliott and Walker (1982)، Benami & Ofen (1984)، یک نقطه‌ای Shepard *et al.* (1993) و یک نقطه‌ای Valiantzas *et al.* (2001)) در صورت افزودن سوپرجاذب A200 به خاک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که کم‌ترین میانگین خطای نسبی در پیش‌بینی مقدار آب نفوذیافته در روش الیوت و واکر برابر با $1/88$ و بیش‌ترین خطای نسبی در روش Shepard *et al.* (1993) برابر با $20/79$ درصد شد. با توجه به مزیت‌های پلیمر سوپرجاذب و تأثیری که بر هیدرولیک جریان و روند نفوذ در آبیاری جویچه‌ای دارد، لازم است که روش‌های مختلف برآورد ضرایب معادله نفوذ در شرایط استفاده از سوپرجاذب مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرند. در این تحقیق، چهار روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (Elliott & Walker, 1982)، SIPAR-ID، بهینه‌سازی چند سطحی و IPARM برای تخمین ضرایب معادله نفوذ در شرایط افزودن سوپرجاذب به خاک جویچه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM از داده‌های تمام مراحل آبیاری برای تخمین پارامترهای نفوذ استفاده می‌کنند. هدف این

چندین برابر تغییر کند (Abbasi, 2013). با تخمین دقیق پارامترهای معادله نفوذ، طراحی مناسب‌تری انجام خواهد شد و در نتیجه می‌تواند موجب افزایش راندمان آبیاری شود. در مطالعه‌ای چهار روش دونقطه‌ای الیوت و واکر، نفوذسنج جویچه‌ای (روش ورودی و خروجی)، یک نقطه‌ای Shepard *et al.* (1993) و پیشروی Benami & Ofen (1984) برای تعیین پارامترهای معادله نفوذ ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که روش دو نقطه‌ای مناسب‌ترین و روش یک نقطه‌ای ضعیف‌ترین نتیجه را برای برآورد پارامترهای معادله نفوذ داشتند (Holzapfel *et al.*, 2004). در مطالعه دیگر گزارش شد که روش بهینه‌سازی چندسطحی بهتر از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر پارامترهای معادله نفوذ را برآورد می‌کند (Moravejalahkami *et al.*, 2009). Etedali *et al.* (2011) برای تخمین ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس از سه مدل EVALUE، SIPAR-ID و INFILT استفاده کردند. نتایج نشان داد در برآورد حجم آب نفوذ یافته در خاک دو مدل EVALUE و SIPAR-ID کم‌ترین خطای نسبی را داشتند. Kamali *et al.* (2015) از دو روش IPARM و بهینه‌سازی چندسطحی برای برآورد ضرایب معادله نفوذ استفاده کردند. هر دو روش دقت خوبی در برآورد ضرایب معادله نفوذ داشتند. در مطالعه‌ای روش‌های IPARM، INFILT و روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر را برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف و لوئیس مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل IPARM دقیق‌ترین روش می‌باشد (Ebrahimian, 2014). Beykzadeh *et al.* (2014) نشان داد که روش بهینه‌سازی چندسطحی در هر دو مرحله پیشروی و پسروی نسبت به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر عملکرد بهتری داشته و موجب کاهش خطای شبیه‌سازی می‌شود. در پژوهشی عملکرد روش بهینه‌سازی چند سطحی در تخمین

استفاده می‌کند. روش دو نقطه‌ای بخشی از فرایند جریان در تخمین پارامترهای نفوذ را نادیده می‌گیرد. در این روش از دو نقطه میانی و انتهای پیشروی برای تخمین دو پارامتر معادله کوستیاکف- لوئیس (k و a) استفاده می‌شود. با فرض رابطه‌ی توانی پیشروی (Fok & Bishop, 1965) و لگاریتم گرفتن از طرفین آن برای دو نقطه میانی و انتهای جویچه، ضرایب ثابت r و p محاسبه می‌شود.

$$x = pt^r \quad (2)$$

$$a = \frac{\log\left(\frac{Qt_1 - \sigma_y A_0 - f_0 t_1}{x_1} - \frac{f_0 t_1}{1+r}\right) - \log\left(\frac{Qt_2 - \sigma_y A_0 - f_0 t_2}{x_2} - \frac{f_0 t_2}{1+r}\right)}{\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad (3)$$

$$k = \frac{\frac{Qt_1 - \sigma_y A_0 - f_0 t_1}{x_1} - \frac{f_0 t_1}{1+r}}{\sigma_z t_1^a} \quad (4)$$

که در آن: A_0 سطح مقطع ورودی جریان، x فاصله پیشروی، t زمان پیشروی، Q دبی ورودی به جویچه، اندیس‌های ۱ و ۲، مربوط به پیشروی تا نصف و انتهای جویچه می‌باشند. σ_y ضریب شکل سطحی بوده که بین ۰/۷ تا ۰/۸ متغیر بوده Elliott & Walker (1982) ۰/۷۷۸ و رونالت و والندر (۱۹۹۷) مقدار ۰/۷۹ را پیشنهاد کردند. σ_z نیز ضریب شکل زیرسطحی بوده و از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (Kiefer, 1965):

$$\sigma_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad (5)$$

در این روش، فرض بر این است که f_0 قبلاً از سایر روش‌ها مانند روش ورودی- خروجی تعیین شده است.

مدل SIPAR-ID

SIPAR-ID مدلی تحت ویندوز برای تخمین ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف و ضریب زبری مانینگ در آبیاری سطحی پیشنهاد شده است (Rodriguez & Martos, 2010). محدودیتی از نظر باز یا بسته بودن انتهای مزرعه

مطالعه بررسی تأثیر سوپرچاذب بر هیدرولیک جریان آبیاری سطحی، افزایش نفوذپذیری خاک و تأثیر روی حجم نفوذ، هم‌چنین ارزیابی و مقایسه روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ در حضور دو نوع سوپرچاذب با دو مقدار متفاوت تحت دو شدت جریان مختلف در آبیاری جویچه‌ای بوده است. با توجه به این‌که طراحی، مدیریت و ارزیابی آبیاری جویچه‌ای بستگی به این دارد که پارامترهای نفوذ با چه دقتی تخمین زده شوند (Nasseri et al., 2008). نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در مطالعات، برنامه‌ریزی و طراحی آبیاری در شرایط اعمال مواد سوپرچاذب در خاک مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

معادله نفوذ کاستیاکوف-لوئیس

معادله نفوذ کاستیاکوف- لوئیس برای گستره وسیعی از خاک‌ها مناسب بوده و بیش‌ترین کاربرد را در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی دارد (Hanson et al., 1993):

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

در این رابطه، Z حجم نفوذ تجمعی در واحد طول (m^3/m)، f_0 سرعت نفوذ نهایی ($m^3/m/min$)، t زمان (min) و a و k ($m^3/m/min^a$) پارامترهای تجربی معادله نفوذ کاستیاکوف- لوئیس می‌باشند.

روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)

این روش براساس معادله‌ی بیلان حجم (پیوستگی) و شکل تابع نمایی مرحله پیشروی و برای آبیاری جویچه‌ای، توسعه یافته و برای سامانه‌های آبیاری کرتی و نواری نیز قابل استفاده است. مهم‌ترین ویژگی این روش آن است که در مزارع شیب‌دار کاربرد داشته و فقط از داده‌های مرحله پیشروی برای برآورد ویژگی‌های نفوذ

در این رابطه، V_I و V_S به ترتیب حجم آب ذخیره سطحی و نفوذیافته، Q دبی و t زمان می‌باشد در مدل بیلان حجمی با فرض فاکتور شکل زیرسطحی (σ_Z)، حجم نفوذ به فرم معمولی (غیردیفرانسیلی) $\sigma_Z Z x$ می‌باشد (Abbasi, 2013). با تخمین حجم جمع‌ی نفوذ (Z) از رابطه کاستیاکوف-لویس (فرض رابطه (۱) برای تابع Z) و تفکیک σ_Z به اجزای σ_{Z1} و σ_{Z2} ، حجم آب نفوذیافته از سطح خاک (V_I)، با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) در طول سطح خیس‌شده، محاسبه می‌شود (Gillies & smith, 2005):

$$V_I = \int_{s=0}^{s=x} Z(t-t_s) ds = (\sigma_{z1} k t^a + \sigma_{z2} f_0 t) x \quad (7)$$

در این رابطه، x طول پیشروی و σ_{Z1} و σ_{Z2} فاکتورهای شکل زیرسطحی هستند.

در ارزیابی سیستم آبیاری جویچه‌ای، به‌طورکلی پیشروی و رواناب در گام‌های مکانی و زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود (Walker & Skogerboe, 1987). هدف توابع زیر، کمینه‌کردن ۱- فواصل پیشروی اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز پیشروی و ۲- حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز ذخیره، برای برآورد پارامترهای معادله نفوذ می‌باشد:

$$O.F.1 = SSE_{Advance} = \sum_{i=1}^{N_a} \left(x_i - \frac{Q t_i}{\sigma_y A_0 + \sigma_{z1} k t_i^a + \sigma_{z2} f_0 t_i} \right)^2 \quad (8)$$

$$O.F.2 = SSE_{Runoff} = \quad (9)$$

در این رابطه، SSE مربع خطای استاندارد، x_i ، t_i و V_{Ri} به ترتیب فواصل پیشروی اندازه‌گیری‌شده، زمان و حجم رواناب، N_a تعداد نقاط اندازه‌گیری پیشروی و N_r تعداد حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده (تعداد نقاط هیدروگراف خروجی) می‌باشد. با ترکیب دو تابع هدف، می‌توان مسأله را به یک مسأله تک‌هدفه و بدون بعد تبدیل و حل آن را ساده‌تر کرد:

برای این مدل وجود ندارد. این مدل برای تخمین ضرایب از معادله بیلان حجم و روش حل معکوس استفاده کرده و از شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور به حداقل رساندن اختلاف مرحله پیشروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده استفاده می‌کند. ورودی‌های این مدل شامل هیدروگراف جریان ورودی، فاز پیشروی، شیب کف مزرعه، پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مقطع و عمق جریان در هر ایستگاه در زمان‌های مختلف است. این مدل توانایی انجام آنالیز حساسیت و عدم قطعیت نتایج خروجی را نیز داراست. در مدل SIPAR-ID برای شبیه‌سازی فاز پیشروی از مدل بیلان حجم استفاده می‌شود و حل عددی در مدل بر اساس ترکیب معادله بیلان حجمی و شبکه عصبی مصنوعی است. در این مدل از ساده‌ترین رویکرد معادله سنت-ونانت که ادغام معادله پیوستگی روی کل جریان سطحی و نفوذ کرده و همچنین جایگزینی معادله دینامیک برای تعیین مشخصات در وسط نیم‌رخ جریان است، استفاده شده است. این کار باعث تسهیل مدل‌سازی آبیاری سطحی می‌شود. معادله سنت-ونانت بر اصول فیزیکی دو معادله پیوستگی و مومتم استوار است. این معادلات حل تحلیلی ندارند ولی با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده و معتبر در آبیاری سطحی به راحتی حل می‌شوند.

مدل IPARM

مدل IPARM نرم‌افزاری است که ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف-لویس را براساس معادله بیلان حجمی برآورد می‌کند. در این مدل علاوه بر اطلاعات مرحله پیشروی، از اطلاعات مرحله ذخیره نیز برای برآورد ضرایب معادله نفوذ استفاده می‌شود. به‌منظور در نظر گرفتن فاز ذخیره در معادله بیلان حجمی، عبارت رواناب خروجی (V_R) به معادله بیلان حجمی اضافه شد (Gillies & smith, 2005):

$$Q t = V_s + V_I + V_R \quad (6)$$

مدل اینرسی- صفر برای شبیه‌سازی جریان آب در آبیاری جویچه‌ای به کار گرفته شد.

برخلاف روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، f_0 نیز در این روش از داده‌های مراحل آبیاری برآورد می‌شود. علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ نیز توسط این روش قابل تخمین است. در این روش پارامترها با استفاده از تحلیل حساسیت، اولویت‌بندی و براساس داده‌های مزرعه‌ای (زمان‌های پیشروی و پسروی و هیدروگراف جریان خروجی) برآورد می‌شوند. حساسیت این داده‌ها به پارامترهای مختلف نفوذ متفاوت است. مثلاً پیشروی تقریباً به a و k حساس نبوده اما به n حساس‌تر است. هیدروگراف خروجی بیش‌تر تابعی از a و f_0 است. زمان پیشروی هم بیش‌تر به a و k حساس است (Walker, 2005). روش بهینه‌سازی چندسطحی طی دو گام محاسبات را انجام می‌دهد. گام اول، تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول می‌باشد. مثلاً k از پیشروی، a و f_0 از هیدروگراف خروجی و n از داده‌های پیشروی، تخمین زده می‌شوند. در گام دوم به ترتیب اولویت، به روش بهینه‌سازی برآورد می‌شوند. Walker (2005) با آزمون و خطا، ترتیب تخمین k ، f_0 و a را مناسب‌ترین گزینه پیشنهاد کرد. محاسبات با این روش طولانی و وقت‌گیرتر است، ولی از آنجایی‌که از داده‌های مراحل مختلف آبیاری استفاده می‌نماید، از دقت بیش‌تری برخوردار است. عملیات تکرار تا زمانی ادامه خواهد یافت که خطای پیش‌بینی پیشروی، پسروی و رواناب خروجی توسط ضرایب تخمینی نفوذ و زبری، حداقل شود.

داده‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت در سال ۱۳۹۷ انجام شد. در بهار ۱۳۹۷ قطعه زمینی مستطیلی

$$O.F. = \text{Min.} \left[\frac{\sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{Q_{t_i}}{\sigma_y A_0 + \sigma_{z1} k t_i^a + \sigma_{z2} f_0 t_i} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right)} + \frac{\sum_{i=1}^N \left(V_{Ri} - (Q_{t_i} - \sigma_{ys} A_0 L - \sigma_{z1} k L - \sigma_{z2} f_0 L) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N V_{Ri}^2 \right)} \right] \quad (10)$$

ضرایب معادله نفوذ (a)، k و f_0 به‌عنوان متغیرهای تصمیم مساله بهینه‌سازی مدل IPRAM هستند که از کمینه‌کردن تابع هدف بالا (معادله ۱۰) برآورد می‌شوند.

بهینه‌سازی چندسطحی

روش بهینه‌سازی چندسطحی، یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین پارامترهای معادله کاستیاکف- لوئیس و نیز ضریب زبری مانینگ می‌باشد که برخلاف روش‌های قبلی، از اطلاعات تمام مراحل آبیاری استفاده می‌نماید (Walker, 2005). عیب این روش نیاز به محاسبات به‌طور نسبی طولانی می‌باشد. روش بهینه‌سازی چندسطحی به یک مدل ریاضی آبیاری سطحی برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری نیاز دارد. برای این منظور نرم‌افزار WinSRFR به کار گرفته شد. نرم‌افزار WinSRFR ریاضی یک بعدی برای تحلیل و شبیه‌سازی آبیاری سطحی است که در سال ۲۰۰۶ توسعه یافته و از جمله مدل‌هایی است که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی داشته است و با دو مدل ریاضی اینرسی صفر و موج کینماتیکی محاسبات را انجام می‌دهد (Bautista et al., 2009). با توجه به این‌که مدل اینرسی- صفر به سبب سادگی، دقت و دامنه کاربرد زیاد، مدل برتر در مدل‌سازی هیدرولیک جریان آب روی سطح خاک بوده و در شرایط مزرعه‌ای، دقت مدل هیدرودینامیک کامل را داشته و فاقد نقاط ضعف آن (ناپایداری و واگرایی) می‌باشد (Abbasi, 2013). در این مطالعه نیز از

انجام شد. دو نوع سوپرجاذب شامل استاکوزورب و A200 با دو مقدار ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. هر دو سوپرجاذب از نوع پلیمرهای مصنوعی هستند با ماندگاری حداکثر هفت سال و جذب آب بین سه تا پنج برابر وزن خود و غیرسمی برای گیاهان، میکروارگانیزم خاک و آب‌های زیرزمینی هستند. براساس کاتالوگ محصول استاکوزورب (۶۶۰) پلیمری بر پایه پلی‌اکریلیک اسید، نمک پتاسیم با اسیدیته ۷ تا ۸ است. اندازه گرانول بسته به سایز آن در چهار نوع مختلف تولید می‌شود که در این پژوهش از نوع متوسط با اندازه ۱ تا ۲/۵ میلی‌متر استفاده شد. A200 پلیمری بر پایه آمونیوم با اندازه گرانول ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر و اسیدیته ۶ تا ۷ است. ابتدا مقدار مورد استفاده هر نوع سوپرجاذب برای هر جویچه براساس مساحت جویچه محاسبه، توزین، و سپس با استفاده از دستگاه بذر پاش به خاک اضافه شد. در مطالعه Ostrand *et al.* (2020) با جمع‌بندی ۲۲ مطالعه انجام‌شده روی اثرات پلیمرها بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مشخص شده که در هر مطالعه میزان و نوع کاربرد براساس هدف و شیوه مطالعه متفاوت است و در پژوهش‌های مزرعه‌ای این میزان در کاربرد به‌صورت ماده خشک از ۷۵ تا ۲۲۵ کیلوگرم بر هکتار و در کاربرد به‌صورت ماده محلول ۱۲ تا ۱۸ گرم بر مترمکعب بوده است. در هر دو روش استفاده نتایج مشابهی به‌دست آمد که مقادیر کم سوپرجاذب تأثیر خاصی روی پارامترهای مورد بحث نمی‌گذارد (Ostrand *et al.*, 2020).

شکل در مزرعه انتخاب شد. آزمایش طی پنج نوبت آبیاری و در شرایط بدون کشت انجام شد. برای ایجاد جویچه‌ها از شخم شیارکن استفاده شد. فاصله و طول جویچه‌ها به‌ترتیب ۰/۷۵ و ۸۰ متر و انتهای جویچه‌ها باز بود. شهرستان پاکدشت در محدوده جغرافیایی ۵۶° ۵۱' تا ۳۴' ۵۱° طول شرقی و عرض شمالی ۳۵° ۳۵' تا ۱۷' قرار دارد. منطقه مورد مطالعه با ارتفاع ۱۱۰۷ متر از سطح دریا در زمین‌های آبرفتی جنوب رشته کوه‌های البرز قرار گرفته است.

از محدودیت‌های انجام طرح نیاز به ثابت نگه‌داشتن دبی در طول آبیاری بود، با توجه به عدم دسترسی به منبع آب ثابت از کامیون با تانکر آب در طول عملیات آبیاری استفاده شد. دبی خروجی شیر تانکر را ثابت کرده و آب پمپاژشده به مخزن از آن سرریز شود و آب آبیاری از مخزن خارج شده و به یک مجموعه بسته با یک خروجی مجهز به شیر فلکه وارد شد. سطح آب در فلوم ابتدایی به‌صورت دائم کنترل شد. آزمایش با دو شدت جریان کم‌تر از حدود حداکثر دبی غیرفرسایشی انجام پذیرفت. در تمامی ورودی جویچه‌ها پلاستیک قرار داده شد تا از فرسایش جلوگیری شود.

مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه با نمونه‌برداری از ابتدا، وسط و انتهای مزرعه و در اعماق مختلف تعیین شد، که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. این آزمایش تحت دو دبی و دو نوع سوپرجاذب

Table 1. Physical and chemical characteristics of the first, middle and end of experimental field soil

Sampling point	depth (m)	Soil Type	γ (g.cm-3)	FC (%)	PWP (%)	Soil Acidity	E _{Ce} (ds.m ⁻¹)	Soil moisture (mm)
First	0.0-0.2	Loam	1.50	17.80	8.10	7.63	2.55	29.10
	0.0-2.4	Sandy Loam	1.45	15.80	6.80	7.82	1.77	313.20
	0.0-2.6	Sandy Loam	1.47	14.20	6.00	7.47	1.88	554.48
Middle	0.0-0.2	Loam	1.50	18.10	8.50	7.82	2.10	28.80
	0.0-2.4	Sandy Loam	1.45	15.90	6.80	7.94	2.08	316.68
	0.0-2.6	Sandy Loam	1.52	14.50	6.20	7.80	2.00	580.34
End	0.0-0.2	Loam	1.51	17.90	8.40	7.45	2.98	28.69
	0.0-2.4	Sandy Loam	1.48	15.60	6.70	7.63	2.05	316.13
	0.0-2.6	Sandy Loam	1.49	14.30	6.20	7.85	2.47	562.03

شده (m/min) ۱۵-۱۰ و برای خاک‌های کم‌تر تحکیم شده و فرسایشی (m/min) ۱۲-۸ می‌باشد. در جویچه‌های شامل سوپرجاذب حداکثر سرعت مجاز میانگین مقدار پیشنهادی برای خاک‌های تحکیم شده (با توجه به اثر سوپرجاذب در کاهش تلفات و فرسایش خاک) و برای تیمارهای شاهد حداکثر سرعت مجاز میانگین مقدار پیشنهادی برای خاک‌های کم‌تر تحکیم شده و فرسایشی در نظر گرفته شد. پارامترهای ρ_1 و ρ_2 پارامترهای هندسی مقطع هستند که برای خاک شخم زده شده با بافت لوم شنی به ترتیب 0.3269 و 2.734 در نظر گرفته شده است.

مشخصات تیمارهای آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. مقدار مورداستفاده سوپرجاذب برای هر جویچه محاسبه شد و سپس با استفاده از دستگاه بذریاش در عرض 120 سانتی‌متری و عمق 25 سانتی‌متری به خاک اضافه شد. برای ایجاد شرایط نزدیک‌تر به آبیاری مزرعه دو جویچه محافظ در دو طرف جویچه‌های اندازه‌گیری ایجاد شده بودند که دبی، زمان قطع و سطح مقطع مشابه داشتند. چون خشک‌بودن جویچه‌ها در کنار یکدیگر بر تابع نفوذ و در نتیجه آن بر سرعت پیشروی اثرگذار است (Sepaskhah & Afshar-Chamanabad, 2002). وظیفه جویچه‌های محافظ، فقط ایجاد شرایط مشابه نفوذ دو بعدی در آبیاری جویچه‌ای بود و داده‌برداری در آن‌ها انجام نمی‌شد.

در مطالعه‌ای که میزان سوپرجاذب در سه سطح صفر، 75 ، 150 و 225 کیلوگرم بر هکتار انتخاب شد، نتایج نشان داد که مقدار پایین $7/5$ گرم در مترمربع تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای مورد اندازه‌گیری نداشت (0.4 درصد بهبود) در حالی که مقدار $22/5$ گرم در مترمربع تأثیر بیش‌تری را نشان داد (10 درصد بهبود) (Yazdani et al., 2008). هم‌چنین اختلاف بین مقدارهای افزوده‌شده بهتر است به نحوی باشد تا اثر تغییر میزان سوپرجاذب مورداستفاده روی نتایج بررسی مشهودتر باشد. بنابراین میزان سوپرجاذب‌ها با سه غلظت صفر، 16 و 30 گرم در مترمربع خاک در نظر گرفته شد.

هم‌چنین در این پژوهش از دو شدت جریان 0.3 و 0.6 لیتر بر ثانیه برای آبیاری استفاده گردید. این دبی‌ها براساس شبیه‌سازی قبل از شروع آزمایشات با نرم‌افزار SIRMOD و تعیین حداکثر دبی غیر فرسایشی برای آبیاری استفاده شد. در سیستم آبیاری جویچه‌ای با انتهای باز ماکزیمم دبی ورودی (Q_{0max}) براساس حداکثر سرعت (V_{0max}) مجاز تعیین می‌شود (Elliot & Walker, 1982).

$$Q_{0max} = \left[\frac{v_{max}^{\rho_2} n^2}{3600 \rho_1 S_0} \right]^{\frac{1}{\rho_2 - 2}} \quad (11)$$

که در آن، Q_{0max} ، ماکزیمم دبی ورودی غیر فرسایشی برحسب (m^3/min) در واحد عرض جویچه است، و v_{max} مقادیر حداکثر سرعت مجاز است که برای خاک‌های تحکیم

Table 2. Specification of experiment treatments

Treatment	n	Q0max (l.s-1)	Flow rate (l.s-1)	Superabsorbent type	Superabsorbent dosage (g.m-2)
IL	0.044	1.2	0.3	-	-
IH	0.038	1.3	0.6	-	-
ILA1	0.045	1.6	0.3	A200	16
IHA1	0.056	0.8	0.6	A200	16
ILA2	0.038	1.3	0.3	A200	30
IHA2	0.022	1.1	0.6	A200	30
ILS1	0.048	1.5	0.3	Stockosorb	16
IHS1	0.052	0.9	0.6	Stockosorb	16
ILS2	0.032	0.5	0.3	Stockosorb	30
IHS2	0.042	0.7	0.6	Stockosorb	30

ورودی و خروجی جویچه به‌دست آمد. حجم کل آب نفوذیافته پیش‌بینی شده با استفاده از قانون دوزنقه‌ای تخمین زده شد:

$$V_i = \sum_{i=1}^{n-1} \left(L_i \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right) \right) \quad (12)$$

در این رابطه، n تعداد ایستگاه‌ها، L_i فاصله ایستگاه‌ها برحسب متر، Z_i و Z_{i+1} به ترتیب نفوذ تجمعی برحسب مترمکعب بر متر برای ایستگاه i و $i+1$ می‌باشد. درصد خطای نسبی نیز برای ارزیابی روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$RE = \frac{V_p - V_m}{V_m} \times 100 \quad (13)$$

در این رابطه، V_p و V_m به ترتیب مقدار اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده حجم کل آب نفوذیافته می‌باشند. هم‌چنین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی و مقایسه روش‌ها محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{n}} \quad (14)$$

در این رابطه، P_i و M_i به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و n تعداد نمونه است.

آزمایش‌ها در پنج نوبت آبیاری و با فواصل سه هفته‌ای از تاریخ ۱۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۷ و در ۱۰ جویچه اصلی مورد مطالعه انجام گرفت. اندازه‌گیری شدت جریان ورودی و خروجی جویچه‌ها به کمک فلوم‌های WSC تپ ۲ انجام شد. با نصب میخ‌های چوبی در طول جویچه با فواصل ۱۰ متری و اندازه‌گیری زمان پیشروی و پسروی، منحنی‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شد. جدول (۳) زمان قطع جریان را برای دو دبی ورودی و برای پنج آبیاری انجام شده در ۱۰ جویچه مورد مطالعه را در طول آزمایش نشان می‌دهد.

ارزیابی عملکرد روش‌ها

با استفاده از حجم آب ورودی و مقدار آب خروجی از انتهای مزرعه به‌صورت رواناب، حجم آب نفوذیافته محاسبه شد. پارامترهای نفوذ توسط هر روش، برای هر پنج نوبت آبیاری برآورد شد. به‌منظور بررسی دقت و صحت روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، کل حجم آب نفوذیافته پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، برای هر جویچه آزمایشی مقایسه شد. مجموع حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری شده داخل خاک از تفاوت بین حجم آب

Table 3. Irrigation cut off time, measured volume of infiltration water in soil (l) percentage of total inflow (%) in five irrigation events

Irrigation event	Treatment										
	Lower flow rate (0.3 l.s-1)					Higher flow rate (0.6 l.s-1)					
	IL	ILA1	ILA2	ILS1	ILS2	IH	IHA1	IHA2	IHS1	IHS2	
Cut off time (Min)	1	215	217	219	216	220	204	207	219	206	210
	2	212	214	215	215	221	203	204	215	205	210
	3	211	213	214	214	214	203	203	214	205	208
	4	209	212	213	214	214	201	205	213	203	206
	5	210	211	213	213	216	202	204	213	202	206
Measured volume of infiltration (l)	1	1812	2748	1957	2942	1995	3215	2078	2888	2209	3254
	2	1899	2685	1948	2786	2096	3081	2020	2915	2229	3230
	3	1749	2518	1968	2661	2055	2898	2017	2533	2126	3068
	4	1683	2462	1861	2688	2046	2898	1998	2787	2152	3114
	5	1914	2602	1942	2735	2087	2895	2223	2786	2320	3006
Infiltration% of total inflow	1	46.80	37.25	49.82	39.18	50.42	42.60	53.90	38.94	55.98	43.16
	2	49.43	37.92	50.56	39.16	54.24	42.36	52.10	40.86	55.54	44.35
	3	46.16	35.39	51.18	37.62	53.47	40.27	52.53	35.85	54.99	42.41
	4	44.67	34.93	48.50	37.81	53.41	40.71	52.19	39.35	55.84	42.91
	5	50.41	36.65	51.32	38.47	54.03	40.58	57.71	39.50	59.92	42.27

نتایج و بحث

حجم آب نفوذ یافته در تیمارهای مختلف

مقادیر اندازه گیری شده حجم آب نفوذ یافته در تیمارهای مختلف در جدول (۳) ارائه شده است.

افزایش مقدار سوپرجاذب از هر دو نوع و تحت هر دو دبی کوچک و بزرگ باعث افزایش نفوذ شد. با اعمال سوپرجاذب A200، در دبی کم، افزودن ۱۶ گرم در مترمربع (ILA1) مقدار نفوذ را به میزان ۲/۷۸ درصد و افزودن ۳۰ گرم در مترمربع در خاک (IHA2) مقدار نفوذ را ۵/۶۲ درصد بیش تر از تیمار شاهد افزایش داد. در دبی زیاد نیز افزودن ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع سوپرجاذب A200 به ترتیب ۲/۰۲ و ۴/۸۸ درصد مقدار نفوذ را بیش تر از تیمار شاهد افزایش داد که این افزایش بیانگر نقش پلیمر در جذب آب در جویچه است. با اعمال سوپرجاذب استاکوزورب، به مقدار ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع سوپرجاذب در دبی کم (ILS1 و ILS2)، به ترتیب مقدار نفوذ تجمعی به میزان ۶/۱۹ و ۸/۹۶ درصد دبی ورودی افزایش یافت. در دبی زیاد نیز افزودن ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع سوپرجاذب (IHS1 و IHS2)، به ترتیب باعث افزایش مقدار نفوذ به میزان ۲/۴۷ و ۶/۵۹ درصد دبی ورودی شد. در مقایسه دو نوع سوپرجاذب، در دبی کم، اعمال سوپرجاذب استاکوزورب به مقدار کم ۳/۴ درصد و اعمال مقدار بزرگ تر ۳/۳ درصد دبی ورودی، نفوذ بیش تری از اعمال سوپرجاذب A200 داشت و در دبی زیاد برای دو مقدار کم و زیاد به ترتیب ۰/۵ و ۱/۷ درصد نفوذ سوپرجاذب استاکوزورب بیش تر از اعمال سوپرجاذب A200 است (Ahmadi Saracilani, 2020).

اضافه کردن هر دو نوع سوپرجاذب A200 و استاکوزورب به خاک باعث افزایش مقدار نفوذ شد و با افزایش مقدار سوپرجاذب تأثیر آنها بر نفوذ بیش تر شد که حاکی از نقش سوپرجاذب در جذب و نگهداشت آب و افزایش فرصت نفوذ است. تأثیر سوپرجاذب استاکوزورب

روی افزایش نفوذ بیش تر از سوپرجاذب A200 بود که دلیل آن را می توان در خواص فیزیکی و شیمیایی پلیمر استاکوزورب از لحاظ ظرفیت بالاتر جذب و نگهداشت آب و اندازه گرانول بزرگ تر دانست. هم چنین نتایج نشان می دهد که با افزایش شدت جریان ورودی به جویچه ها از تأثیر هر دو سوپرجاذب کاسته شد بر این اساس که افزایش دبی در همه تیمارها باعث کاهش اثر سوپرجاذب در افزایش نفوذ شد. بدین دلیل که دبی ورودی بالا براساس حداکثر دبی غیرفرسایشی در نظر گرفته شده بود و افزایش دبی خود باعث افزایش سرعت پیشروی و کاهش فرصت نفوذ و افزایش میزان رواناب نسبت به دبی پایین شد و نقش اصلاح کننده سوپرجاذب ها را کاهش داد. افزایش میزان نفوذ تجمعی در تیمارهای شامل سوپرجاذب مؤید پژوهش های پیشین در نقش سوپرجاذب در افزایش ظرفیت نگهداری و میزان نگهداشت آب در خاک و در نتیجه افزایش میزان نهایی نفوذ آب است (Renkuan, 2016). با اعمال سوپرجاذب استاکوزورب، به مقدار ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع در دبی کم (ILS1 و ILS2)، به ترتیب مقدار نفوذ تجمعی به میزان ۶/۱۹ و ۸/۹۶ درصد افزایش یافت. در دبی زیاد نیز افزودن ۱۶ و ۳۰ گرم در مترمربع سوپرجاذب (IHS1 و IHS2)، به ترتیب باعث افزایش مقدار نفوذ به میزان ۲/۴۷ و ۶/۵۹ درصد شد. Montazar (2007) و Sohrabi *et al.* (2005) نیز در مطالعه های جداگانه به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن سوپرجاذب به خاک باعث افزایش مقدار نفوذ و کاهش رواناب خروجی از انتهای جویچه ها می شود. افزایش میزان نفوذ تجمعی در تیمارهای شامل سوپرجاذب مؤید پژوهش های پیشین در نقش سوپرجاذب در افزایش ظرفیت نگهداری و میزان نگهداشت آب در خاک و در نتیجه افزایش میزان نهایی نفوذ آب است. Wenju *et al.* (2019) نیز به این نتیجه رسیدند که نفوذ تجمعی نهایی در ستون های حاوی سوپرجاذب SAP از تیمارهای شاهد

برآورد ضرایب معادله نفوذ گزارش شده است (Etedali et al., 2011)، اما در این مطالعه خطای نسبی زیاد و با نوسانی داشت. مقدار نفوذ در حضور سوپرجاذب در دبی کم توسط روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر تغییرات به‌خوبی برآورد شد ولی در شدت جریان زیاد روند افزایش نفوذ به درستی برآورد نشد. متوسط خطای نسبی در روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر در این مطالعه قابل قبول بود، به‌طوری‌که متوسط خطای نسبی آن تیمارهای مختلف، کم‌تر از ۱۰ درصد به‌دست آمد. در مطالعه Ebrahimian et al. (2010) نیز روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر در پیش‌بینی نفوذ در آبیاری‌های جویچه‌ای و نواری یکی از بهترین عملکردها را نسبت به روش‌های دیگر (دو روش جدید و پنج روش موجود برای تخمین نفوذ) نشان داد. خطای نسبی روش دو نقطه‌ای برای تمام آبیاری‌ها بین ۱۱/۷- تا ۳۱/۱۵ درصد متغیر بود و در برآورد حجم آب نفوذیافته در خاک دارای نوسان بود، به‌طوری‌که هم کم برآورد و هم بیش برآورد داشت. با افزایش دبی از دقت روش دو نقطه‌ای کاسته شد.

روش بهینه‌سازی چندسطحی هم تأثیر سوپرجاذب‌ها و مقدار آن‌ها و هم نوع سوپرجاذب‌ها را در شدت جریان کم و زیاد به درستی پیش‌بینی کرد. این روش در همه نوبت‌های آبیاری و تیمارها عملکرد بسیار خوب و کم نوسانی داشت. متوسط خطای نسبی روش بهینه‌سازی چند سطحی کم‌تر از ۲ درصد برای تمام تیمارها بود. مدل IPARM و روش دو نقطه‌ای در مطالعه عملکرد قابل قبولی داشتند و در مطالعاتی که در جویچه‌های بدون حضور سوپرجاذب برای برآورد ضرایب معادله نفوذ مورد استفاده قرار گرفته بودند نیز عملکرد خوبی داشتند (Ebrahimian, 2014; Kamali et al., 2015). در کل، روش بهینه‌سازی چندسطحی با توجه به این‌که فقط از داده‌های سایر مراحل آبیاری علاوه بر داده‌های مرحله پیشروی استفاده می‌کند، در برآورد حجم آب نفوذیافته در خاک عملکرد دقیق و مناسبی داشت.

بیش‌تر بود و مقدار نفوذپذیری با افزایش غلظت سوپرجاذب بیش‌تر شد.

مقایسه روش‌های تخمین ضرایب نفوذ

مقدار خطای نسبی روش‌های مختلف مورد استفاده در این مطالعه در تخمین حجم آب نفوذیافته در خاک در جدول‌های (۴) تا (۷) ارائه شده است. مدل IPARM با متوسط خطای نسبی تقریباً کم‌تر از ۱۰ درصد عملکرد خوبی در این مطالعه داشت. حجم آب نفوذیافته برآورد شده با مدل IPARM نشان می‌دهد که این مدل تأثیر افزودن سوپرجاذب به خاک را به درستی پیش‌بینی کرد. فقط در سوپرجاذب A200 مقدار تخمینی نفوذ در دبی کم با افزایش مقدار سوپرجاذب کاهش یافت و مدل تأثیر افزایش مقدار سوپرجاذب و تأثیر آن بر حجم آب نفوذ یافته لحاظ نکرد. نتایج این مدل نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان خطای نسبی مدل در همه تیمارها افزایش یافت، هم‌چنین در تیمارهایی که سوپرجاذب وجود داشت خطای مدل نسبت به تیمار شاهد خطای نسبی بالاتری در تخمین حجم نفوذ داشت. مدل IPARM در تمام آبیاری‌ها بیش برآورد داشت و محدوده خطای نسبی آن برای تیمارهای مختلف بین ۰/۵۲ تا ۱۷/۳۷ درصد بود. مدل SIPAR-ID با این‌که در دبی کم روند افزایش نفوذ به‌واسطه اضافه‌کردن سوپرجاذب‌ها به درستی پیش‌بینی کرده است، ولی در دبی زیاد تأثیر سوپرجاذب در این مدل دیده نشد. به‌طورکلی، مدل SIPAR-ID حجم آب نفوذیافته در خاک را خیلی کم‌تر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی کرد. با توجه به این‌که این مدل سرعت نفوذ نهایی را برآورد نمی‌کند در تمام آبیاری‌ها کم برآورد داشت و مقدار حجم آب نفوذیافته را کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده آن برآورد کرد. در بررسی جداگانه نوبت‌های آبیاری نیز مدل SIPAR-ID عملکرد خوبی نداشت و خطای نسبی آن بین ۱۷/۹۵- تا ۷۱/۳- درصد متغیر بود. با این‌که مدل SIPAR_ID در مطالعات گذشته، مدل مناسبی برای

Table 4. The percentage of relative error of IPARM method in estimation of soil infiltration in five irrigation events

Irrigation event	Treatment									
	IL	IH	ILA1	IHA1	ILA2	IHA2	ILS1	IHS1	ILS2	IHS2
1	2.87	6.26	1.48	7.07	2.31	8.65	4.72	9.80	2.72	10.72
2	1.11	8.53	1.69	9.80	2.81	7.27	1.58	9.84	2.74	7.58
3	2.80	3.65	1.98	7.48	2.87	11.42	3.52	17.37	1.83	5.87
4	2.55	5.81	1.99	7.29	3.03	12.97	4.45	7.32	2.74	3.82
5	0.52	3.00	10.76	6.18	0.77	12.16	1.30	5.31	3.75	8.52
Mean	1.97	5.45	3.58	7.56	2.36	10.49	3.11	9.93	2.75	7.30

Table 5. The percentage of relative error of SIPAR-ID method in estimation of soil infiltration in five irrigation events

Irrigation event	Treatment									
	IL	IH	ILA1	IHA1	ILA2	IHA2	ILS1	IHS1	ILS2	IHS2
1	-46.47	-36.02	-49.77	-29.67	-41.35	-41.90	-49.76	-36.22	-46.85	-31.47
2	-56.77	-51.73	-62.73	-38.66	-51.72	-17.95	-44.65	-49.95	-49.08	-42.60
3	-55.86	-37.25	-64.78	-56.29	-37.23	-36.99	-68.67	-55.27	-61.34	-44.20
4	-68.09	-51.06	-55.99	-25.45	-46.87	-55.31	-58.26	-34.52	-58.87	-64.03
5	-71.73	-22.21	-65.81	-30.53	-40.58	-26.22	-70.31	-28.03	-53.10	-23.09
Mean	-59.78	-39.66	-59.82	-36.12	-43.55	-35.67	-58.33	-40.80	-53.85	-41.08

Table 6. The percentage of relative error of two-point method in estimation of soil infiltration in five irrigation events

Irrigation event	Treatment									
	IL	IH	ILA1	IHA1	ILA2	IHA2	ILS1	IHS1	ILS2	IHS2
1	0.16	19.29	-5.47	14.92	-2.56	9.95	-0.87	17.73	3.12	18.59
2	1.26	1.90	-5.08	2.62	4.58	1.17	-0.89	1.23	0.76	2.45
3	6.86	0.95	-4.11	31.15	14.45	13.46	-7.83	2.96	1.60	5.90
4	-9.09	-9.71	-2.04	12.98	3.52	14.91	-2.60	17.04	-0.74	-9.86
5	-11.7	17.06	-0.10	6.84	8.72	20.79	-11.7	25.09	0.99	12.31
Mean	5.82	9.78	3.36	13.7	6.76	12.06	4.79	12.81	1.44	9.82

Table 7. The percentage of relative error of multi-level optimization method in estimation of soil infiltration in five irrigation events

Irrigation event	Treatment									
	IL	IH	ILA1	IHA1	ILA2	IHA2	ILS1	IHS1	ILS2	IHS2
1	0.06	0.04	-0.77	-0.44	-1.10	1.28	-0.05	-0.10	0.41	-2.34
2	-2.26	0.97	-0.87	2.23	-1.00	-0.13	-0.25	0.51	-1.53	1.49
3	-0.11	-0.87	-1.93	0.86	-1.31	-2.86	-0.45	2.49	-1.88	-0.81
4	-1.31	1.14	0.64	1.19	-1.08	-0.66	-1.05	-0.50	-1.86	-1.22
5	-2.35	1.23	1.34	0.80	-1.44	1.69	-1.35	1.01	-0.26	-0.20
Mean	1.22	0.85	1.11	1.11	1.19	1.32	0.63	0.92	1.19	1.21

خوبی در تخمین داشت. روش‌های IPARM و دو نقطه‌ای الیوت و واکر نیز عملکرد مناسبی ارائه دادند. اگر هدف برآورد بسیار دقیق پارامترهای معادله نفوذ بر اثر استفاده از سوپرچادب‌ها باشد، روش بهینه‌سازی چند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

روش بهینه‌سازی چندسطحی اگر چه با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی نتایج بهتری ارائه می‌کند، اما خود به‌تنهایی با محاسبات فرمولی نیز روش مناسبی به‌شمار می‌رود. باید توجه داشت این رویکرد به محاسبات طولانی و یک مدل

میزان نفوذ اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده توسط مدل‌های مختلف برای مقایسه کلی در شکل (۱) آمده است که نشان می‌دهد. به‌غیر از روش SIPAR ID، بقیه روش‌ها بین مقدار حجم نفوذ یافته اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده اختلاف کمی وجود دارد. ریشه میانگین مربعات میانگین روش‌های مختلف برآورد پارامترهای معادله نفوذ در شکل (۲) و ضریب تبیین در شکل (۳) ارائه شده است. ارزیابی براساس این دو پارامتر نیز نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی چندسطحی عملکرد بسیار

ارزیابی روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با حضور سوپرچادها

عملکرد مناسبی در این مطالعه ارائه نکرد و خطای این روش در تخمین حجم آب نفوذ یافته در خاک بسیار زیاد بود. روش‌های IPARM و دو نقطه‌ای الیوت و واکر نیز عملکرد مناسب ارائه دادند.

ریاضی نیاز دارد و می‌توان گفت که استفاده از آن زمان‌بر است. در صورت نیاز، روش ساده IPARM و یا روش دونقطه‌ای که فقط از داده‌های مرحله پیشروی استفاده می‌کند، می‌وانند قابل اعتماد باشند. روش SIPAR-ID

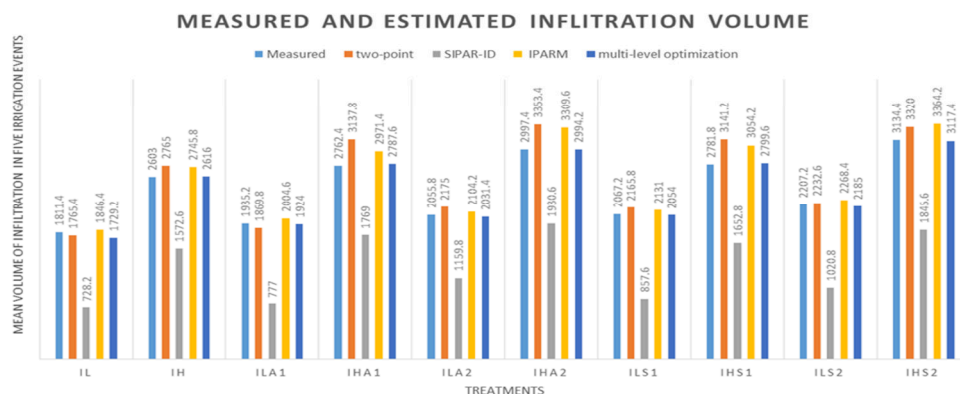


Figure 1. Measured and estimated infiltration volume (l)

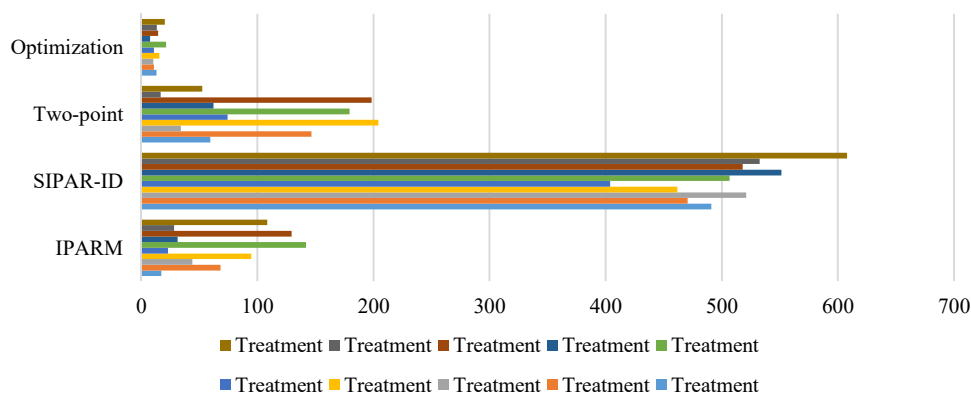


Figure 2. RMSE values of the studied methods in the estimation of soil infiltration

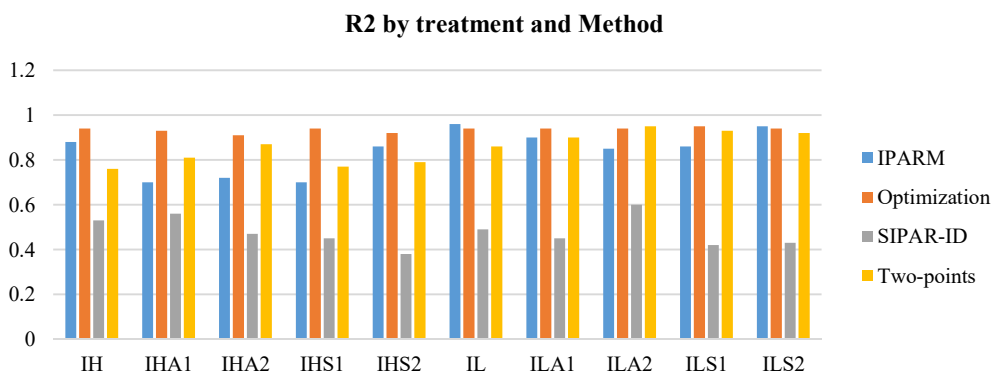


Figure 3. R² values of the studied methods in the estimation of soil infiltration

در جذب بیش تر و نگهداشت آب در محدوده رشد ریشه عمل می‌کند. تیمار حاوی سوپر جاذب الگوی متفاوتی از جریان را به نسبت خاک بدون پلیمر نشان داد. از آنجاکه اساس این مدل‌ها هیدروگراف‌های پیشروی و پسروی و معادلات نفوذ هستند سوپر جاذب با تأثیر روی این مشخصات نتایج مدل‌سازی و خروجی مدل را تغییر می‌دهند. تقریباً همه این مدل برای تخمین ضرایب معادله نفوذ از معادله بیلان حجم استفاده می‌کنند و در مدل‌سازی میزان حجم نفوذ بیش‌ترین حساسیت را به فاکتورهای نوع سوپر جاذب، مقدار سوپر جاذب و دبی جریان نشان دادند.

نتیجه‌گیری

نفوذ آب در خاک یکی از عوامل مهم در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است. در این مطالعه، روش‌های مختلف برآورد پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف- لوئیس در حضور دو نوع سوپر جاذب با دو شدت جریان در آبیاری جویچه‌ای مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که سوپر جاذب‌ها باعث می‌شوند میزان بیش‌تری از آب در خاک نفوذ پیدا کند که می‌تواند به دلیل تمایل شدید این پلیمرهای گرانیولی به جذب آب باشد. افزایش مقدار پلیمر ترکیب‌شده با خاک به‌ویژه در آبیاری‌های پس از اولین آبیاری که سوپر جاذب‌ها وارد فاز جذب و نگهداشت آب در خاک شده‌اند باعث افزایش زمان پیشروی و افزایش فرصت نفوذ می‌شود که به‌نوبه خود منجر به نفوذ تجمعی بیش‌تر آب در خاک می‌شود (Mashal et al., 2020). تأثیر سوپر جاذب استاکوزورب در هر دبی و هر دو مقدار به مراتب بیش‌تر از سوپر جاذب A200 در افزایش مقدار نفوذ بود. هم‌چنین افزایش دبی در هر دو سوپر جاذب باعث کاهش تأثیر آن‌ها بر میزان نفوذ شد و در دبی کم‌تر اثرگذاری سوپر جاذب‌ها بر افزایش جذب آب در خاک

در این مطالعه روش بهینه‌سازی چندسطحی در برآورد ضرایب معادله نفوذ در حضور سوپر جاذب عملکرد دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشت. در مطالعه‌ای که به‌منظور بررسی ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و دو نقطه‌ای در کشت معمول جویچه انجام شد، به این نتیجه رسیدند که روش بهینه‌سازی چند سطحی دقت بالاتری نسبت به روش دو نقطه‌ای الیوت داشت (Moravejalakhami et al., 2009; Beykzadeh et al., 2014). در مطالعه Kamali et al. (2018) نیز روش بهینه‌سازی چندسطحی در جویچه‌های کشت‌شده و بدون حضور سوپر جاذب با میانگین خطای کم‌تر از ۳ درصد عملکرد بسیار خوبی ارائه داد.

مدل IPARM در این مطالعه عملکرد قابل‌قبولی ارائه داد. در مطالعه‌ای که مدل‌های INFILT, IPARM و روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر را برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف و لوئیس مورد بررسی واقع شد، مدل IPARM را با متوسط خطای نسبی ۲/۲ درصد دقیق‌ترین روش معرفی شد (Ebrahimian, 2014). Kamali et al. (2015) به این نتیجه رسیدند که مدل IPARM و بهینه‌سازی چندسطحی عملکرد قابل قبول و نزدیکی به هم داشتند. روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر با این‌که از داده‌های کم‌تری برای تعیین پارامترهای معادله نفوذ استفاده می‌کند، در این مطالعه با افزودن سوپر جاذب به خاک عملکرد قابل‌قبولی ارائه داد. مدل SIPAR-ID در این مطالعه عملکرد بسیار ضعیفی داشت. عملکرد این روش در کشت داخل جویچه ضعیف و در کشت معمول جویچه‌ای عملکرد مناسبی داشت (Kamali & Ebrahimian, 2017). مطالعه Nie et al. (2014) نیز عملکرد مدل SIPAR-ID را برای جویچه‌های انتهای بسته مطلوب گزارش کردند.

سوپر جاذب به‌عنوان مکمل و بهبوددهنده رفتار خاک

منابع

- Abbasi, F. (2013). *Principles of flow in surface irrigation*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID), Tehran (in Persian)
- Aghayari, F., Khalili, F., & Ardakani, M.R. (2016). Effect of different irrigation methods and super absorbent polymer on yield and water productivity of corn. *Journal of plant Ecophysiology*, 8(24), 34-48. (in Persian)
- Ahmadi Saraeilani, A., Mashal, M., Azadegan, B., & Kamali, P. (2020). Field evaluation of the effect of two superabsorbent polymers A200 and stacozorab on flow hydraulics in furrow irrigation. *Journal of Water and Irrigation Management*, 10(2), 173-187. (In Persian)
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., & Schlegel, J. (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric Water Manag*, 96, 1146-1154.
- Benami, A., & Ofen, A. (1984). *Irrigation Engineering: Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices*. Irrigation Engineering Scientific Publication, IIIC Bet Dagan, Israel.
- Beykzadeh, E., Ziacy, A.N., & Ansari, H. (2014). Finding the Optimum Infiltration and Roughness Parameters in Furrow Irrigation Using Complete Hydrodynamic Model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(3), 549-555. (in Persian)
- Boatright, J. L., Balint, D. E., Mackay, W. A., & Zajicek, J. M. (1997). Incorporation of a hydrophilic polymer into annual landscape beds. *Journal of Environmental Horticulture*, 15, 37-40.
- Ebrahimian, H. (2014). Soil Infiltration Characteristics in Alternate and Conventional Furrow Irrigation using Different Estimation Methods. *Korean Society of Civil Engineers*, 18(6), 1904-1911.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A.M., Ghanbarian-Alavijeh, B., & Abbasi, F. (2010). Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrig. Sci.*, 28 (6), 479-488.
- Ebrahimian, H., Brahimipak, N.A., Khodadadi Dehkordi, D., & Egdernejhad, A. (2017). Effect of water stress and superabsorbent on soil and corn crop. *Water Irrig Manag*, 7(1), 59-72. (in Persian)
- Elliott, R.L., & Walker, W.R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25(2), 396-400.
- Etedali, H.R., Ebrahimian, H., Abbasi, F., & Liaghat, A. (2011). Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness. *Span J Agric Res*, 9, 641-649.

بیش‌تر بود. نتایج نشان داد که هرچه مقدار بیش‌تری از سوپرجاذب به خاک اضافه شود، تأثیر آن‌ها را در افزایش نفوذ آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای افزایش می‌یابد. روش بهینه‌سازی چندسطحی با متوسط خطای نسبی حدود ۱ درصد برای تمام تیمارها عملکرد بسیار خوب و دقیقی در برآورد حجم آب نفوذیافته در خاک داشت. مدل IPARM نیز با متوسط خطای نسبی کم‌تر از ۱۰ درصد عملکرد قابل‌قبولی داشت. روش دو نقطه‌ای Elliott and Walker (1982) با این‌که تا حدودی با نوسان همراه بود، اما با توجه داده‌های کم موردنیاز این روش، دقت این روش نیز قابل‌قبول بود و در صورتی‌که دسترسی به داده‌های تمام مراحل آبیاری وجود نداشته باشد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین نتایج مدل IPARM و دو نقطه‌ای نشان داد که با افزایش شدت جریان ورودی به جویچه‌ها از دقت آن‌ها کاسته شد. مدل SIPAR-ID در این بررسی نتایج مناسبی ارائه نداد و با توجه به این‌که سرعت نفوذ نهایی را برآورد نمی‌کند، نتایج مدل با خطای زیادی همراه بود. نتایج نشان داد که اضافه‌کردن سوپرجاذب به خاک باعث افزایش خطای نسبی مدل IPARM شد و در سایر روش‌ها تأثیر خاصی بر دقت آن‌ها نداشت. در پژوهش‌های آتی بررسی چگونگی بهبود و ارتقای مدل‌ها یا ترکیب با روش‌های دیگر هم‌چون شبکه‌های عصبی مصنوعی، انجام روش بهینه‌سازی با کمک نرم‌افزار سیرمد به‌جای محاسبات عددی پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین تغییرات زمانی اثر سوپرجاذب‌ها و اصلاحاتی که لازم است روی پارامترها هنگام طراحی، مدل‌سازی و یا ارزیابی اعمال شود می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

- Eubeler, J. P., Bernhard, M., & Knepper, T. P. (2010). Environmental biodegradation of synthetic polymers II. Biodegradation of different polymer groups. *Trends in Analytical Chemistry*, 29(1), 84-100.
- Fok, Y.S., & Bishop, A.A. (1965). Analysis of water advance in surface irrigation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 91(1), 99-116.
- Gillies, M.H., & Smith, R.J. (2005). Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrig Sci*, 24(1), 25-35.
- Hanson, B.R., Prichard, T.L., & Schulbach, H. (1993). *Estimating furrow infiltration. Agricultural Water Management*, 24(4), 281-298.
- Helalia, A., & Letey, J. (1988). Cationic polymer effects on infiltration rates with a rainfall simulator. Soil Science holding capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 13(2), 103-111.
- Holzappel, E.A., Jana, J., Zuniga, C., Marino, M., Paredes, J., & Billib, M. (2004). Infiltration parameters for furrow irrigation, *Agricultural Water Management*, 68(1), 19-32.
- Johnson, M.S., & Velkamp, C.J. (1984). Structure and functioning of water storing agricultural polyacrylamide. *J. Sci. Food Agric.*, 36, 789-793.
- Kamali, P., & Ebrahimian, H. (2017). Comparison and evaluation of different methods for inverse estimation of the infiltration equation parameters in vegetated furrows. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 39-48. (in Persian)
- Kamali, P., Ebrahimian, H., & Parsinejad, M. (2018). Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows. *Irrig. Sci.*, 36 (6), 339-348.
- Kamali, P., Ebrahimian, H., & Verdinejad, V.R. (2015). Evaluation and comparison of multilevel optimization method and IPARM model to estimate infiltration parameters in furrow. *Water Irrig Manag*, 5, 43-54. (in Persian)
- Keifer, F.W. (1965). *Average depth of absorbed water in surface irrigation*. Special Publication, Dept. of Civil Engineering, Utah State Univ. Logan, Utah.
- Miller, D.E. (1979). Effect of H- span on water retained by soils after irrigation: *Soil sci. Am. J.*, 43, 628-629.
- Mokhtari Motlagh, P., & Sharifan, H. (2014). Study of the Effect Super absorbent A200 on the Pattern of Water Flow in Furrow Irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(3), 203-220. (in Persian)
- Mokhtari Motlagh, P., & Sharifan, H. (2017). 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)
- Montazar, A. (2007). Study the effect of stockosorb super absorption polymer on the flow advance time and infiltration parameters in furrow irrigation. *Journal of Water and Soil*, 22(2), 342-357. (in Persian)
- Moravejalahkami, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpoor, M., & Abbasi, F. (2009). Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. *Biosystems Engineering*, 103(3), 371-381.
- Nasseri, A., Neyshabouri, M.R., & Abbasi, F. (2008). Effectual components on furrow infiltration. *Irrigation and Drainage*, 57(4), 481-489.
- Nie, W.B., Fei, L.J., & Ma, X.Y. (2014). Applied closed-end furrow irrigation optimized design based on field and simulated advance data. *J Agric Sci Technol*, 16, 395-408.
- Ostrand, M.S., DeSutter, T.M., Daigh, A.L.M., Limb, R.F., & Steele, D.D. (2020). Superabsorbent polymer characteristics, properties and applications. *Agrosyst Geosci Environ.*, 3(1), e20074.
- Peterson, D. (2002). Hydrophilic polymers-Effect and uses in the landscape. *Restoration and Reclamation Review*. 7S. 16p.
- Liao, R., Wu, W., Ren, S., & Yang, P. (2016). Effects of superabsorbent polymers on the hydraulic parameters and water retention properties of soil. *Journal of Nanomaterials*, 2016.
- Rodriguez, J.A., & Martos, J.C. (2010). SIPAR-ID: freeware for surface irrigation parameter identification. *J Environ Model Softw*, 25(11), 1478-1488.
- Sepaskhah, A.R., & Afshar-Chamanabad, H. (2002). Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation. *Bio system Eng.*, 82(4), 479-484.
- Seyed Dorraji, S., Golchin, A., & Ahmadi, S.H. (2010). The Effects of Different Levels of a Superabsorbent Polymer and Soil Salinity on water Holding Capacity with three Textures of Sandy, Loamy and clay. *Journal of Water and Soil*, 24(2), 306-316. (in Persian)
- Shepard, J.S., Wallender, W.W., & Hopmans, J.W. (1993). One-point method for estimating furrow infiltration. *Transaction of the ASAE*, 36(2), 395-404.
- Sohrabi, T., Jahanjou, B., & Keshavarz, A. (2005). Effect of polyacrylamide (PAM) application on soil losses and water infiltration in furrow irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(24), 34-46. (in Persian)

- Sojka, R.E., & Lentz, R.D. (1997). Reducing furrow irrigation erosion with polyacrylamide (PAM). *Journal of Production Agriculture*, 10(1), 47-52.
- Valiantzas, J.D., Aggelides, S., & Salsalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, 52, 17-32.
- Walker, W.R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Irrig Drain Eng*, 131, 129-136.
- Walker, W.R., & Skogerboe, G. (1987). *Surface irrigation: theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Wenju, Zh., Jiazhen, H., Zhen, C., Pinxin, D., & Yanwei, F. (2019). Effects of superabsorbent polymers on the vertical infiltration of soil water with sand mulching. *Environmental Earth Sciences*, 19 (78), 648.
- Yazdani, F., Allahdadi, I., & Akbari, G. (2008). Impact of Superabsorbent Polymer on Yield and Growth Analysis of Soybean under Drought Stress Condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10 (23), 4190-6. (in Persian)