

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی روش آبیاری نشتی - زیرسطحی و توسعه روابط حاکم بر جریان

علی مالکی<sup>۱</sup>، مهدی قیصری<sup>۲\*</sup>، محمدرضا مصدقی<sup>۳</sup>، ناهید اکبری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۵

چکیده

آبیاری نشتی-زیرسطحی یکی از روش‌های نوین آبیاری است که به دلیل قرارگیری لوله‌ها در زیر سطح خاک و توزیع آب در منطقه توسعه ریشه با فشار کمتر از یک متر ستون آب می‌تواند کاربرد زیادی در باغات کوچک با محدودیت کمی و کیفی آب داشته باشد. طراحی بهینه این روش‌ها نیازمند شناخت تأثیر پارامترهای مختلف بر سرعت نفوذ آب به داخل خاک و شکل پیاز رطوبتی است. به همین دلیل در این تحقیق سرعت نفوذ آب به داخل خاک در مراحل مختلف آبیاری برای دبی‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳۵ لیتر بر ثانیه و حجم آب کاربردی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ لیتر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پروفیل عمقی رطوبتی خاک نیز در انتهای هر آزمایش با حفر گودالی در نزدیکی منبع نشت آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر بیشتر دبی ورودی آب به داخل سیستم بر سرعت نفوذ آب داخل خاک در مرحله تغذیه بود. در مرحله تخلیه نیز سرعت نفوذ آب به داخل خاک بیشتر تحت تأثیر حجم آب ورودی قرار داشت. بررسی پیاز رطوبتی در انتهای آزمایش نیز نشان داد نفوذ عمقی آب با افزایش دبی ورودی حدود ۱۷٪ افزایش یافت. مدل‌های توسعه داده‌شده در فاز تغذیه و مراحل تخلیه و تغذیه در حالت غیرآزاد دارای ضرایب تبیین ۰/۶۶، ۰/۷۷ و ۰/۶۹ بوده که نشان‌دهنده دقت بالاتر آن‌ها نسبت به سایر فازهای آزمایش است.

واژه‌های کلیدی: روش آبیاری زیرسطحی، پیاز رطوبتی، سرعت نفوذ، آبیاری نشتی، تلفات آب

مقدمه

منابع آبی به‌عنوان مهم‌ترین نیاز برای ادامه حیات بشر، در شرایط بحرانی قرار دارد. وجود این ماده حیاتی برای کشورهای که در کمربند بیابانی قرار دارند و متوسط بارش‌های جوی آن‌ها از متوسط جهانی کمتر است، از اهمیت بیشتری برخوردار است. کشور ایران نیز از این امر مستثنا نبوده و با توجه به خشک‌سالی‌های چندساله اخیر، طبق نظر کارشناسان، خطر روبرو شدن با بحران آب به‌واسطه افزایش

جمعیت و نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی بسیار جدی است. با توجه به مصرف ۸۰ درصد آب شیرین در بخش کشاورزی پروانک بروجنی و همکاران (۱۳۸۶) ضرورت دارد در مصرف آب در این بخش صرفه‌جویی و بهره‌وری آب افزایش یابد. روش‌های نوین آبیاری به دلیل تأمین دقیق نیاز آبی گیاه، رساندن آب به عمق توسعه ریشه گیاه، کاهش حجم تبخیر و نفوذ عمقی، موجب افزایش راندمان آب مصرفی شده است. به‌خصوص که در این روش‌ها انتقال و جابجایی آب در داخل مزرعه توسط لوله صورت می‌گیرد و از هدرروی آب نیز جلوگیری به عمل می‌آید (Braester, 1973; Hoffman et al., 2007). به همین دلیل امکان انجام کشاورزی در شرایط نامناسب، تغییرات بافت خاک، توپوگرافی مانند سطوح شیب‌دار و یا شکل نافرمانندسی در سیستم‌های آبیاری نوین فراهم می‌شود.

روش‌های نوین آبیاری بسیار متنوع بوده و هرکدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند که برای شرایط خاصی مناسب بوده و اگر به‌طور صحیح انتخاب، طراحی و بهره‌برداری شوند، برای افزایش بهره‌وری آب بسیار مفید هستند. بر این اساس، بهبود روش‌های آبیاری موجود و توسعه روش‌های جدید آبیاری در برنامه محققان این رشته قرار دارد.

- ۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۴- دانشجوی دکترا آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

\* نویسنده مسئول: (Email: gheysari@cc.iut.ac.ir)  
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.15.4.6.6

1986; Angelakis et al., 1993; Ali Khan et al., 1996; Hammami et al., 2002; Bhatnagar & Chauhan, 2008; Yao et al., 2001).

نتایج این مطالعات اطلاعات مناسبی در مورد شکل توزیع آب در زمان‌های مختلف تحت دبی‌های خروجی متفاوت و خاک‌های متفاوت در روش آبیاری قطره‌ای سطحی را در اختیار می‌گذارد. مطالعات او و کوالهو و کوالهو و ار نشان داد در صورت قرار دادن قطره‌چکان‌ها در زیر سطح خاک، با یکسان بودن بقیه شرایط، الگوی خیس شدگی خاک دارای مقطع متفاوتی نسبت به زمانی است که قطره‌چکان‌ها در سطح خاک قرار می‌گیرند (Or & Coelho, 1996; Coelho & Or, 1997).

به دلیل جدید بودن سیستم‌های آبیاری نشتی-زیرسطحی نسبت به سایر سیستم‌های تحت فشار، مطالعات گسترده‌ای در مورد الگوی نفوذ آب از منابع نشت در شرایط هیدرولیکی مختلف و با خاک‌های متفاوت در دسترس نیست. به همین دلیل یافتن الگوی نفوذ آب در سیستم‌های مدرن آبیاری نشتی-زیرسطحی در خاک‌های متفاوت و تحت دبی‌های متفاوت از جمله موارد مهمی است که در طراحی این سیستم‌ها برای تأمین کمبود رطوبت ناحیه ریشه گیاهان، حداقل هدرروی آب و یافتن عمق مناسب کارگذاری آن‌ها مورد نیاز است. یافتن این اطلاعات با انجام مطالعات مختلف به صورت عددی، آزمایشگاهی و در شرایط مزرعه‌ای انجام می‌پذیرد. انجام مطالعات صحرائی در مورد کارایی سیستم‌های نوین آبیاری نتایج واقعی‌تری نسبت به مدل‌سازی‌های عددی و مطالعات آزمایشگاهی دارد (Zerihun et al., 2014). اگرچه این مطالعات هزینه‌بر و نیاز به وقت زیادی دارد و از سوی دیگر مطالعات صحرائی کافی برای واسنجی و مقایسه بهتر نتایج آزمایشگاهی و عددی ضروری است (Honari et al., 2017). بنابراین یکی از اهداف مطالعات صحرائی فراهم آوردن اطلاعات کافی از شرایط مزرعه است تا در مطالعات و تحقیقات آینده برای سنجش کارایی مدل‌های عددی در طراحی این سیستم‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجاکه در طراحی آبیاری نشتی-زیرسطحی برای به دست آوردن سایز لوله‌ها، دبی تغذیه و تعداد لوله نشتی زیرسطحی اطلاعات هیدرولیکی جریان مورد نیاز است، هدف این تحقیق بررسی خصوصیات هیدرولیکی توزیع آب از سیستم آبیاری نشتی-زیرسطحی در لایه‌های زیرین خاک، تحت تأثیر دبی‌های مختلف ورودی و حجم‌های مختلف آب کاربردی است. با یافتن اطلاعات کافی در مورد تأثیر حجم آب مورد استفاده و دبی ورودی به سیستم بر سرعت نفوذ آب به داخل خاک و همچنین شکل پیاز رطوبتی، طراحی سیستم به نحوی انجام می‌شود که حداکثر یکنواختی در توزیع آب در سطح مزرعه محقق گردد و گیاه بتواند در بهترین شرایط ممکن از لحاظ آب قابل دسترس رشد نماید.

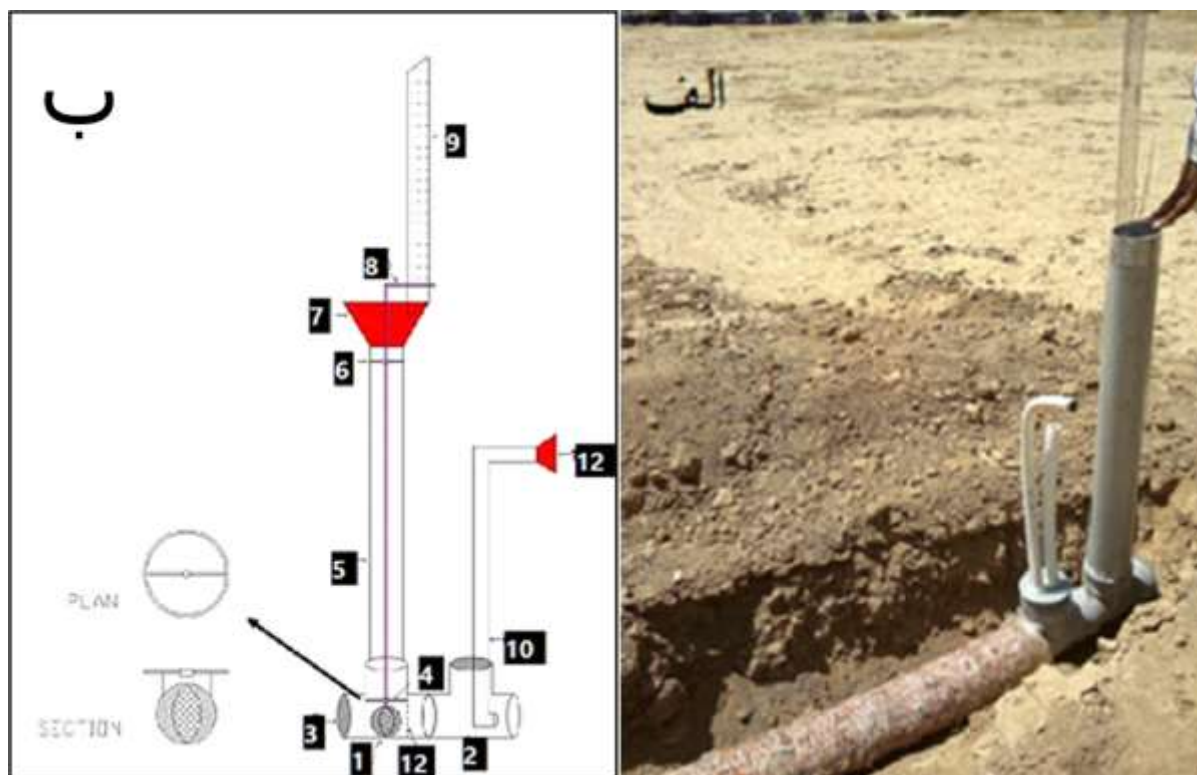
آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از جمله روش‌های آبیاری است که در دهه اخیر در نقاط مختلف دنیا گسترش یافته است. سیستم‌های آبیاری زیرسطحی به خاطر قرار ندادن آب در معرض تبخیر و رساندن مستقیم آب به منطقه‌ی توسعه ریشه‌های گیاه، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در میزان آب مصرفی می‌نمایند. بدین سبب راندمان آبیاری در سیستم‌های زیرسطحی در مقایسه با سایر سیستم‌های آبیاری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد (دستورانی و همکاران، ۱۳۸۷). در بین روش‌های نوین آبیاری، روش آبیاری نشتی-زیر سطحی به دلیل امکان استفاده از آب با کیفیت بسیار پایین، کاربرد آب با دبی بسیار کم و استفاده در اراضی کوچک بدون نیاز به سیستم فیلتراسیون تحت فشار و بدون نیاز به پمپ برای باغ‌های کوچک با محدودیت کمی و کیفی آب مناسب است (قیصری و نیکبخت، ۱۳۸۹). از سوی دیگر افزایش تراکم لایه سطحی خاک در اراضی کشاورزی به دلیل تردد ادوات کشاورزی و یا فضا‌های سبز شهری به دلیل تردد افراد و به سبب آن کاهش نفوذ در لایه‌های سطحی خاک، مشکلات اجرایی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و هزینه زیاد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی سبب شده است استفاده از سیستم‌های زیرسطحی مورد توجه بسیار قرار گیرد. روش آبیاری نشتی-زیرسطحی یکی از روش‌های نوین آبیاری است که آب را در ناحیه توسعه ریشه گیاه در زیر سطح خاک توزیع می‌نماید و کارایی آن در آبیاری درختان زیتون با پساب نتایج رضایت بخشی داشته است (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از مهم‌ترین مشکلات روش‌های آبیاری زیرسطحی نفوذ ریشه‌ها داخل قطره‌چکان‌ها و لوله‌ها می‌باشند (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۵; Suarez Rey et al., 2000; Camp, 1998; Ayars et al., 1999). استفاده از آبیاری نشتی زیرسطحی به دلیل استفاده از لوله‌های با قطر بزرگ و تعداد زیادی سوراخ دورتادور لوله به جای قطره‌چکان همچنین وجود پوشش روی لوله که مانع از ایجاد خیس شدگی نقطه‌ای در خاک می‌شود، ممکن است تا حدودی نگرانی گرفتگی توسط ریشه را برطرف کند. اما با توجه به اثرات مثبت این روش‌ها در افزایش بهره‌وری مصرف آب، استفاده از این روش‌ها در حال افزایش است.

طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت آن‌ها به منظور کاهش تلفات و استفاده مطلوب از آب و مواد مغذی خاک مستلزم آگاهی از چگونگی توزیع رطوبت خاک در هر سیستم آبیاری دارد (پروانک بروجنی و همکاران، ۱۳۸۶; Cote et al., 2003). در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، برای تعیین سطح خاک خیس شده مطالعات میدانی از سطح مزرعه انجام می‌شود (Braester, 1973; Zur, 1996; Cindy & Hunt, 1996). خصوصیات هیدرولیکی جریان هنگام خروج از منبع قطره‌ای در سیستم‌های مختلف آبیاری و خاک‌های متفاوت زراعی مورد بررسی قرار گرفته است (پروانک بروجنی و همکاران، ۱۳۸۶; Levin et al., 1979; Schwartzman & Zur, 1996).

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده. آرایش روش آبیاری نشتی-زیرسطحی به صورت خطی انتخاب شد. در این آزمایش‌ها لوله زهکش پوشش‌دار با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (لوله سوراخ‌دار)، اندازه سوراخ  $4 \times 1/5$  میلی‌متر با ۸ سوراخ در هر ردیف، ۲۰ ردیف در یک متر طول لوله، سطح نشت ۹۶۰ میلی‌متر مربع در متر طول لوله و حجم هر متر از لوله برابر  $7/85$  لیتر انتخاب گردید. خاک محیط آزمایش همگن بوده و تا عمق حداقل یک متری یکنواخت بود. محدوده انتخاب‌شده پس از گمانه‌زنی از ۲۰ نقطه در سطح مزرعه که خاک یکنواختی داشت، انتخاب گردید. پس از ایجاد ترانشه‌هایی با عرض ۲۵ سانتی‌متر و به عمق متوسط ۳۵ سانتی‌متر و نصب لوله سیستم آبیاری نشتی-زیرسطحی، روی لوله پوشانده شد. خاک استفاده‌شده، خاک مزرعه بدون سنگ‌ریزه و کلوخه بود. بعد از خاک‌ریزی، روی لوله‌ها به صورت دستی متراکم شد. در این پژوهش از لوله سوراخ‌دار دارای پوشش PLM و از جنس

پلی‌استر استفاده شد. این لوله‌ها از نخ‌های ضایعات فرش به صورت به هم پیوسته و حجیم ساخته می‌شوند. وجود پوشش علاوه بر اینکه باعث جلوگیری از ورود خاک و ریشه گیاهان به داخل لوله می‌شود، باعث افزایش هدایت هیدرولیکی و تماس هیدرولیکی اطراف محیط لوله و خاک نیز می‌شود. آب به صورت ثقلی وارد لوله سوراخ‌دار می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب در لوله هنگام ورود و تخلیه آب، شناورهایی داخل لوله تعبیه شد که به یک خط کش مدرج متصل شدند (شکل ۱). با استفاده از نشان‌گری که روی میله هادی شناور نصب شده بود، تغییرات سطح آب در لوله تغذیه بازمان اندازه‌گیری شد. با شروع ورود آب به لوله، زمان و تغییرات ارتفاع آب داخل لوله‌ها ثبت شده و این کار تا زمان قطع آب و پایین رفتن کامل شناور-ها (نفوذ تمامی آب لوله) ادامه پیدا کرد. مرحله ورود آب به داخل لوله و افزایش ارتفاع آب داخل لوله به اختصار فاز تغذیه و مرحله بعد از قطع شدن جریان آب و فروکش کردن آب در لوله فاز تخلیه نامیده شد.



شکل ۱- نمای کلی لوله سوراخ‌دار و شناور نصب‌شده داخل لوله تغذیه. در این شکل: (الف) تصویر لوله استفاده‌شده در آزمایش، (ب) ۱- نشان‌دهنده شناور کروی، ۲- سهراهی UPVC، ۳- درپوش UPVC، ۴- نگاه‌دارنده متحرک شناور، ۵- لوله غیر مشبک UPVC با قطر داخلی ۹۰ میلی‌متر (لوله تغذیه)، ۶- نگاه‌دارنده میله هادی شناور، ۷- آبیگر لوله، ۸- نشانگر خط‌کش، ۹- خط‌کش مدرج، ۱۰- لوله ۵ لایه با قطر داخلی ۳۲ میلی‌متر، ۱۱- اتصال رزوه‌دار و ۱۲- سیم‌های حائل برای جلوگیری از انحراف شناور و گیر کردن آن در موقع بالا آمدن است.

که در کل شامل ۹ ترکیب به شرح جدول ۱ است. در دبی ۰/۳۵ لیتر بر ثانیه و حجم کاربردی ۹۰ لیتر، به دلیل بروز پدیده جوشش و بلازدگی آب از سطح خاک، امکان انجام این آزمایش و ثبت داده‌های معتبر وجود نداشت.

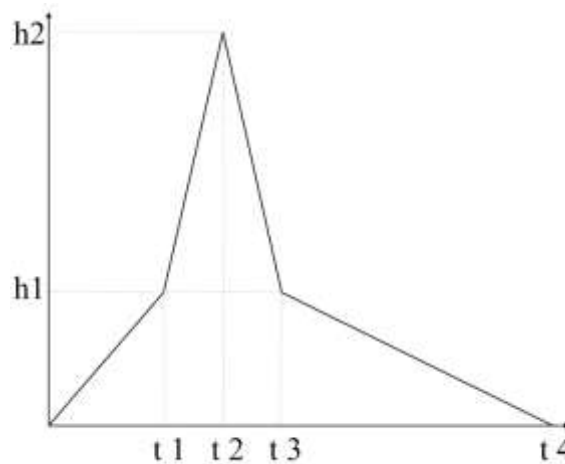
در این آزمایش اثر دبی‌های مختلف ورودی آب به لوله و حجم کل آب کاربردی در لوله مورد ارزیابی قرار گرفته و ابعاد گسترش جبهه رطوبتی در خاک تعیین گردید. سه دبی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳۵ لیتر در ثانیه و سه حجم آب کاربردی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ لیتر مورد ارزیابی قرار گرفت

جدول ۱- تعداد آزمایش‌های انجام شده با دبی و حجم آب مصرفی متفاوت در لوله سوراخ‌دار

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دبی (لیتر بر ثانیه)	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱
حجم (لیتر)	۳۰	۶۰	۹۰	۹۰	۳۰	۶۰	۹۰	۶۰	۹۰

در شکل ۲ و جدول ۲ مقدار  $t_1$  زمان پر شدن لوله در مرحله ۱،  $t_2$  زمان پر شدن لوله در مرحله ۲،  $t_3$  زمان خالی شدن لوله در مرحله ۳،  $t_4$  زمان اتمام آزمایش،  $A_{AL}$  سطح مقطع لوله تغذیه،  $h_1$  قطر لوله سوراخ‌دار،  $h_2$  ارتفاع اوج،  $Q_{in}$  دبی ورودی به لوله و  $L$  طول لوله است. برای بررسی جبهه رطوبتی، ۴۸ ساعت پس از اتمام آزمایش و نفوذ تمامی آب به خاک، پروفیل برداری از خاک آغاز شد. در این مدت برای جلوگیری از تبخیر سطحی، از یک پوشش پلاستیکی روی سطح خاک استفاده شد. محیط و عرض خیس شده در اعماق مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری با کنار زدن خاک سطحی اندازه‌گیری شد. سپس لوله از خاک بیرون آورده شد و با استفاده از بیل مکانیکی پروفیل عرضی برای بررسی پیاز رطوبتی حفاری شد. سپس با استفاده از یک چهارچوب شبکه‌بندی شده با فواصل ۱۰ سانتی‌متری (شکل ۳)، ابعاد پیاز رطوبتی به صورت مختصات نسبی برداشت می‌شود.

از آنجاکه قطر لوله سوراخ‌دار ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شده بود، زمانی که ارتفاع آب کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بود جریان داخل لوله با سطح آزاد رخ داد. زمانی که لوله پر آب می‌شود و آب در لوله تغذیه بالا می‌آید یا به عبارتی ارتفاع آب از ۱۰ سانتی‌متر بیشتر شود، لوله تحت فشار قرار می‌گیرد. بنابراین هر آزمایش دارای ۴ مرحله شامل (۱) فاز تغذیه از ارتفاع صفر تا ۱۰ سانتی‌متر (حالت آزاد)، (۲) فاز تغذیه از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تا اوج (حالت غیرآزاد)، (۳) فاز تخلیه از ارتفاع اوج تا ۱۰ سانتی‌متر (حالت غیرآزاد) و (۴) فاز تخلیه از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تا صفر (حالت آزاد) بود. با بررسی تغییرات ارتفاع آب نسبت به زمان تا انتهای آزمایش در لوله تغذیه و داشتن دبی ورودی ثابت تا زمان قطع جریان، می‌توان تغییرات حجم نسبت به زمان در لوله تغذیه را طبق روابط توسعه داده‌شده در این تحقیق به دست آورد (جدول ۲) و مقدار و سرعت نفوذ آب به خاک در مراحل مختلف را محاسبه نمود (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار شماتیک تغییرات ارتفاع آب در لوله تغذیه

جدول ۲- روابط استفاده شده برای محاسبه حجم و سرعت نفوذ آب به داخل خاک از لوله به طول ۱/۴ متر

پارامتر محاسبه شده	رابطه مورد استفاده	پارامتر محاسبه شده	رابطه مورد استفاده
حجم لوله سوراخ دار	$V_P = \pi \times h_1^2 \times L$	حجم آب نفوذ کرده به خاک در فاز تخلیه	$V_{DA} = V_3 + V_4$
تغییرات حجم در لوله تغذیه در حالت غیر آزاد	$\Delta V_{AL} = \pi \times A_{AL} \times (h_2 - h_1)^2 \times L$	سرعت متوسط نفوذ در مرحله ۱	$I_1 = \frac{V_1}{t_1} \times 60$
حجم آب نفوذ کرده به خاک در مرحله ۱	$V_1 = Q_{in} \times t_1 - V_P$	سرعت متوسط نفوذ در مرحله ۲	$I_2 = \frac{V_2}{t_2 - t_1} \times 60$
حجم آب نفوذ کرده به خاک در مرحله ۲	$V_2 = Q_{in} \times (t_2 - t_1) - \Delta V_{AL}$	سرعت متوسط نفوذ در مرحله ۳	$I_3 = \frac{V_3}{t_3 - t_2} \times 60$
حجم آب نفوذ کرده به خاک در مرحله ۳	$V_3 = \Delta V_{AL}$	سرعت متوسط نفوذ در مرحله ۴	$I_4 = \frac{V_4}{t_4 - t_3} \times 60$
حجم آب نفوذ کرده به خاک در مرحله ۴	$V_4 = V_P$	سرعت متوسط نفوذ در فاز تغذیه	$I_A = \frac{V_1 + V_2}{t_2} \times 60$
حجم آب نفوذ کرده به خاک در فاز تغذیه	$V_A = V_1 + V_2$	سرعت متوسط نفوذ در فاز تخلیه	$I_{AD} = \frac{V_3 + V_4}{t_4 - t_2} \times 60$

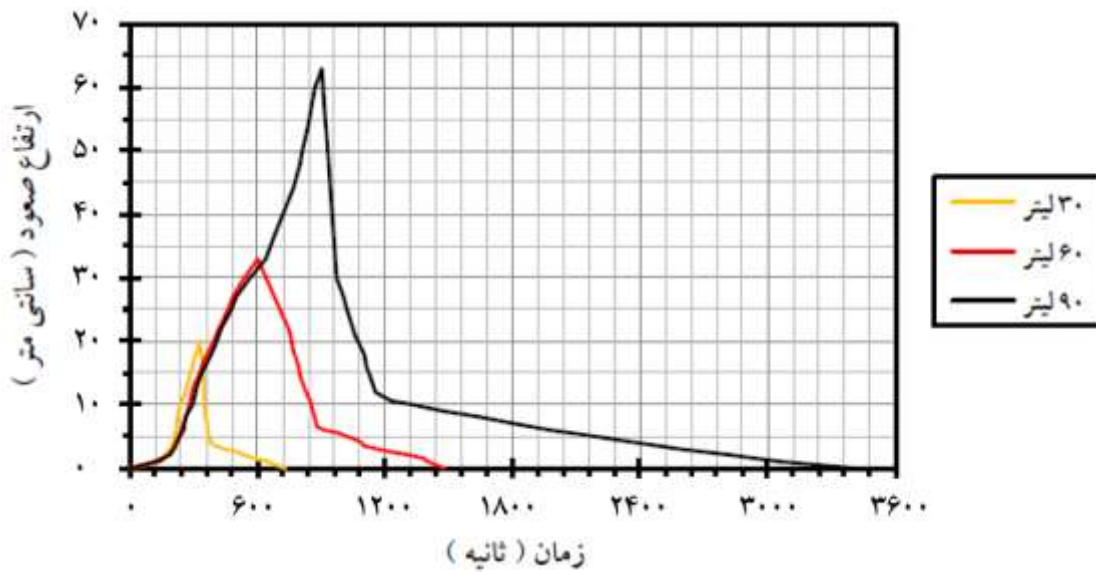


شکل ۳- (الف) جبهه رطوبتی ایجاد شده و (ب) استفاده از چهارچوب مشبک برای اندازه گیری ابعاد پیاز رطوبتی

## نتایج و بحث

نحوه ورود آب به داخل خاک نیز بود. شکل ۴ روند تغییرات ارتفاع آب داخل لوله نسبت به زمان در حالت دبی ورودی ثابت ۰/۱ لیتر بر ثانیه و حجم آب کاربردی متفاوت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ لیتر را نشان می‌دهد. در فاز تغذیه با افزایش حجم آب کاربردی در دبی یکسان، ارتفاع اوج آب در لوله تغذیه افزایش یافت و شیب افزایش ارتفاع، روند غیرخطی پیدا کرد. در فاز تخلیه در حالت غیر آزاد (مرحله ۳)، با افزایش حجم، تغییر در شیب منحنی کاهش مشاهده نشده اما در حالت آزاد (مرحله ۴) با افزایش حجم آب کاربردی، شیب منحنی کاهش یافت و مدت زمان تخلیه آب به داخل خاک افزایش یافت. دلیل این امر را می‌توان اشیاع شدن خاک و کاهش سرعت نفوذ آب، برای حجم آب کاربردی بیشتر، دانست. با افزایش حجم آب کاربردی و طولانی‌تر شدن زمان نهایی، شیب خط فروکش کردن آب در مرحله تخلیه کاهش یافت. همچنین نقاط عطف نمودار در مرحله تخلیه (فروکش کردن آب) نیز با افزایش حجم آب به ارتفاع بالاتری منتقل شد.

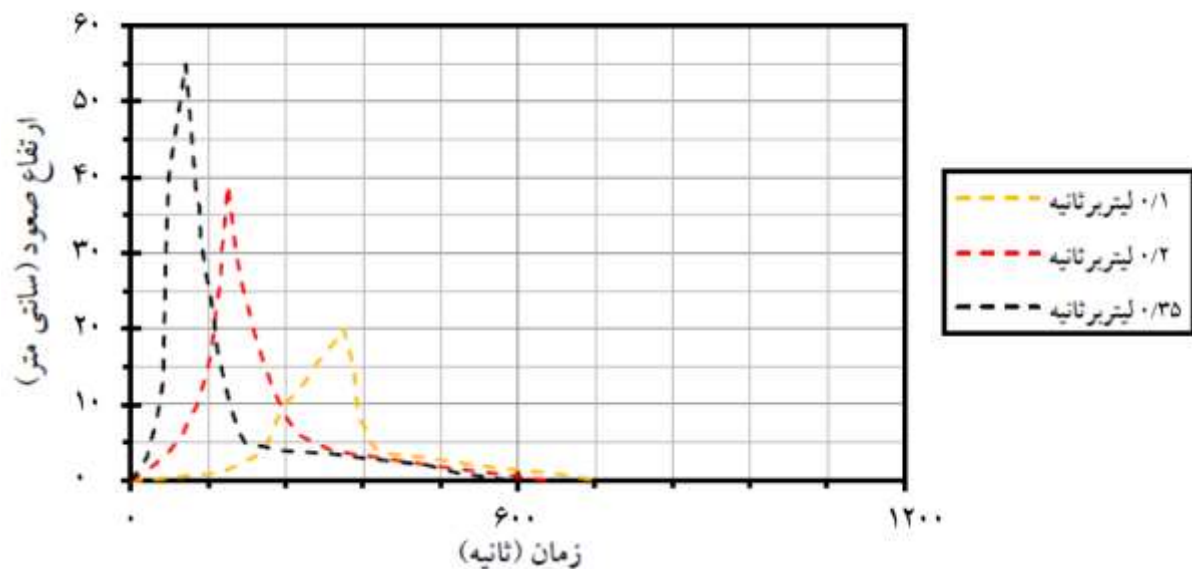
روند تغییرات افزایش ارتفاع نسبت به زمان دارای یک نقطه عطف است. در ابتدای آزمایش با ورود آب به لوله سوراخ دار، شیب افزایش ارتفاع در لوله تغذیه بسیار کم است (مرحله ۱) زیرا آب اضافه شده برای پر کردن لوله سوراخ دار مصرف می‌شود. پس از آن شیب افزایش ارتفاع روند صعودی گرفته و بیشترین شیب در مرحله ۲ مشاهده شد (شکل ۴ و ۵). در فاز تخلیه با قطع جریان آب، ارتفاع آب در لوله تغذیه شروع به کاهش نمود به طوری که منحنی با شیب زیادی روند نزولی را تا زمانی که بار فشاری بر کف لوله سوراخ دار برابر قطر لوله شود ادامه یافت (مرحله ۳). در مرحله ۴ اگرچه روند کاهش ارتفاع همچنان ادامه داشت اما شیب کاهش ارتفاع نسبت به زمان بسیار کم شد که دلیل آن ایجاد جریان آزاد داخل لوله و کاهش فشار است. همان‌طور که اشاره شد، یکی از اهداف تحقیق بررسی تأثیر حجم آب استفاده شده بر روند تغییرات ارتفاع آب درون لوله بوده که نشان گر



شکل ۴- منحنی تغییرات بار فشاری-زمان در لوله سوراخ‌دار با دبی ورودی ۰/۱ لیتر بر ثانیه در حجم آب کاربردی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ لیتر

و ارتفاع آب لوله تغذیه را تحت تأثیر قرار داد به طوری که در حجم ثابت، با افزایش دبی، ارتفاع اوج و شیب خط در فاز تغذیه و شیب خط در فاز تخلیه افزایش و زمان فروکش کردن آب در مرحله ۴ کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد انتخاب مقدار دبی ورودی رابطه مستقیمی با جنس خاک و سرعت نفوذ آب به داخل خاک دارد.

شکل ۵ روند تغییرات ارتفاع آب درون لوله نسبت به زمان برای حجم آب کاربردی ثابت و دبی‌های ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. با افزایش دبی ورودی به لوله سوراخ‌دار، حداکثر ارتفاع آب درون لوله تغذیه افزایش و زمان وقوع پیک ارتفاع آب در لوله نیز کاهش یافت که دلیل این امر پایین بودن سرعت نفوذ آب به داخل خاک نسبت به دبی‌های جریان ورودی است. نتایج نشان داد دبی ورودی فرصت نفوذ



شکل ۵- منحنی تغییرات بار فشاری-زمان در لوله سوراخ‌دار در حجم آب کاربردی ۳۰ لیتر با دبی‌های ورودی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳۵ لیتر بر ثانیه

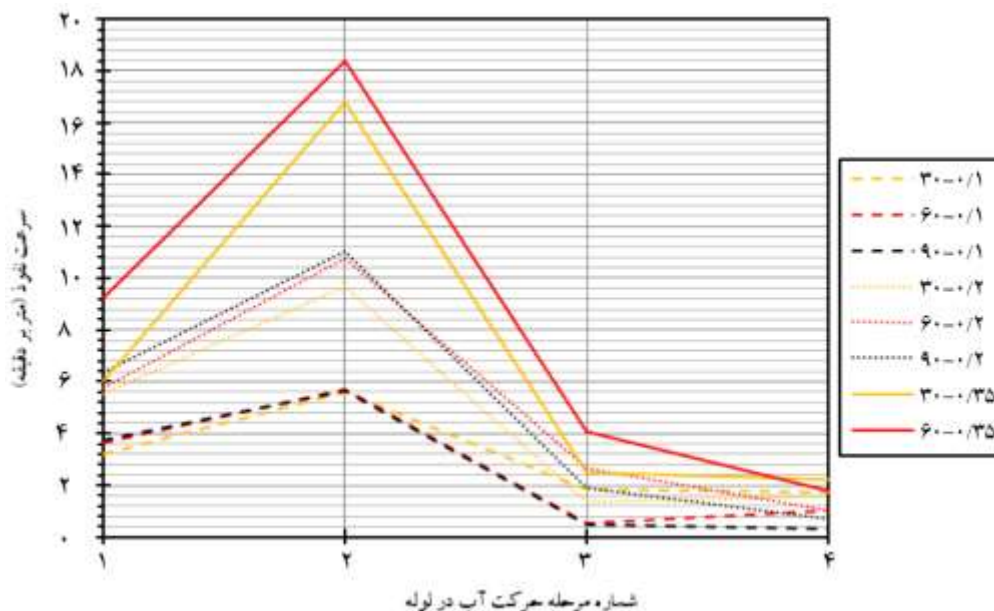
سرعت نفوذ در مراحل مختلف آزمایش با دبی و حجم آب متفاوت با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۲، محاسبه شد و در شکل ۶ و

پس از بررسی تأثیر حجم آب کاربردی و دبی‌های متفاوت ورود آب به لوله تغذیه بر روند تغییرات ارتفاع آب درون لوله نسبت به زمان،

افزایش می‌یابد که باعث افزایش فشار در لوله و به تبع آن در خاک شده و این امر موجب افزایش سرعت نفوذ می‌شود. در مرحله ۳ که در فاز تخلیه قرار دارد، تغییرات سرعت نفوذ در حالات مختلف آزمایش کمتر از مراحل ۱ و ۲ بود. در این مرحله، زمانی که دبی ورودی در کمترین حالت آزمایش قرار دارد (دبی ۰/۱ لیتر بر ثانیه)، افزایش حجم آب کاربردی تأثیر بسیار ناچیزی در سرعت نفوذ آب داخل خاک داشته که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. دلیل این امر نیز کم بودن بار فشاری است که نفوذ را تحت تأثیر مکش خاک قرار می‌دهد. در دبی ۰/۳۵ لیتر بر ثانیه، با افزایش حجم آب کاربردی، سرعت نفوذ افزایش یافت. دلیل این امر افزایش بار فشاری ناشی از حجم آب کاربردی است. اگرچه آب کاربردی با حجم ۶۰ لیتر، خاک اطراف محیط لوله بیشتر از حجم ۳۰ لیتر اشباع شده اما به دلیل بار فشاری زیادتر، سرعت نفوذ نیز در این حالت افزایش پیدا کرده است. در دبی ۰/۲ لیتر بر ثانیه کمترین سرعت نفوذ مربوط به حجم آب کاربردی ۳۰ لیتر بود و برخلاف انتظار، افزایش حجم آب کاربردی موجب افزایش سرعت نفوذ آب به داخل خاک در این دبی نشده است به طوری که در حجم ۹۰ لیتر، سرعت نفوذ از حجم ۶۰ لیتر کمتر و از حجم ۳۰ لیتر بیشتر است. دلیل این امر افزایش بسیار زیاد محیط اشباع در این حالت است که علی‌رغم بیشتر بودن بار فشاری در حجم آب ۹۰ لیتر، مانع از افزایش بیشتر سرعت نفوذ شده است.

جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ و شکل ۶، در مرحله ۱ و ۲، در دبی ثابت با افزایش حجم آب کاربردی، سرعت نفوذ در تمامی حالات افزایش یافته است با این تفاوت که در دبی کم، افزایش حجم آب کاربردی موجب افزایش بسیار ناچیز در سرعت نفوذ شده و برای دبی‌های زیادتر، افزایش حجم آب کاربردی موجب افزایش بیشتر سرعت نفوذ می‌شود. همچنین با افزایش دبی در حجم ثابت نیز، سرعت نفوذ افزایش یافت. میزان افزایش سرعت نفوذ در این حالت بسیار بیشتر از زمانی است که در دبی ثابت، حجم آب کاربردی افزایش یافت.

این نتایج نشان می‌دهد تغییر دبی ورودی آب به داخل لوله نسبت به تغییر حجم آب کاربردی، تأثیر بیشتری بر میزان سرعت نفوذ آب دارد. دلیل این امر نیز اشباع شدن سریع‌تر خاک اطراف محیط لوله است که موجب ایجاد فشار مثبت می‌شود. شانی و همکاران نیز عنوان کردند که هرگاه مقدار دبی خروجی از قطره‌چکان بیشتر از ظرفیت نفوذ خاک باشد، مقدار فشار آب در اطراف قطره‌چکان بالا رفته و مثبت می‌شود (Shani et al., 1996). شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که افزایش حجم آب کاربردی و دبی ورودی به لوله، موجب افزایش ارتفاع آب در لوله تغذیه شده و همین امر سبب افزایش فشار مثبت درون لوله می‌شود که نتیجه آن، افزایش سرعت نفوذ است. با توجه به قانون داری، با افزایش فشار، شدت جریان (سرعت نفوذ) نیز افزایش می‌یابد. از طرفی با زیاد شدن دبی، ارتفاع آب در لوله تغذیه



شکل ۶- سرعت نفوذ در مراحل مختلف آزمایش تحت تأثیر دبی و حجم آب کاربردی (عدد صحیح حجم آب کاربردی بر حسب لیتر و عدد اعشاری دبی جریان بر حسب لیتر بر ثانیه است)

آب کمتر به درون خاک و با دبی کم است. به طور کلی، سرعت نفوذ آب داخل خاک در مرحله ۴، برای حالتی که حجم آب کاربردی کمترین میزان بوده، ۳۰ لیتر، بیشتر از سایر موارد است زیرا این امر موجب کاهش رطوبت خاک اطراف لوله شده و در مرحله ۴ میزان جذب آب را افزایش می‌دهد.

به طور کلی سرعت نفوذ متوسط در فاز تغذیه  $I_A$ ، در دبی ثابت، با افزایش حجم آب کاربردی افزایش یافته و در فاز تخلیه  $I_{DA}$ ، کاهش یافته است. همچنین سرعت نفوذ متوسط در حجم آب کاربردی ثابت، با افزایش دبی، هم در فاز تغذیه  $I_A$  و هم در فاز تخلیه  $I_{DA}$ ، افزایش یافته است.

در مرحله ۴ نیز آب باقی مانده در لوله در حالت آزاد به خاک نفوذ می‌کند. در دبی ثابت با افزایش حجم آب کاربردی، سرعت نفوذ کاهش یافت. دلیل این امر نیز اشباع شدن خاک اطراف لوله با حجم آب بیشتر است که موجب کاهش فرصت نفوذ آب در مرحله آخر می‌شود. از آنجاکه بار فشاری در این مرحله برای تمامی حالات تقریباً یکسان است، نقش اصلی در سرعت نفوذ آب، میزان اشباع شدن و رطوبت خاک در حالات مختلف آزمایش است که رابطه مستقیمی با حجم آب کاربردی دارد. به طور مثال شکل ۶ نشان می‌دهد سرعت نفوذ در دبی ۰/۱ لیتر بر ثانیه و حجم آب ۳۰ لیتر در این مرحله بیشتر از سایر حالات آزمایش قرار گرفته است که دلیل این امر ورود حجم

جدول ۳- سرعت نفوذ متوسط و فرصت نفوذ در ترکیب دبی و حجم‌های مختلف در تمامی مراحل آزمایش

$I_{DA}$	$I_4$	$I_3$	$I_A$	$I_2$	$I_1$	$t_4$	$t_3$	$t_2$	$t_1$	$h_2$	$V_t$	$Q_{in}$
(Lit/min)	(Lit/min)	(Lit/min)	(Lit/min)	(Lit/min)	(Lit/min)	(sec)	(sec)	(sec)	(sec)	(cm)	(Lit)	(Lit/s)
۱/۷۴	۱/۷۳	۱/۸۲	۳/۸۸	۵/۵۹	۳/۲۲	۷۳۱	۳۵۰	۳۲۹	۲۳۷	۲۰	۳۰	۰/۱
۰/۹۳	۱/۰۳	۰/۵۴	۴/۷۴	۵/۷	۳/۶۴	۱۴۱۵	۷۷۷	۶۰۰	۲۸۰	۳۵	۶۰	۰/۱
۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۴۸	۵/۰۴	۵/۶۷	۳/۷۶	۳۳۷۷	۱۳۲۵	۹۰۰	۲۹۵	۶۳	۹۰	۰/۱
۱/۵۳	۱/۵۶	۱/۳۷	۶/۸۶	۹/۶۹	۵/۵۳	۶۵۴	۲۳۱	۱۵۰	۱۰۲	۳۹	۳۰	۰/۳
۱/۲۱	۱/۰۲	۲/۶۷	۸/۸۸	۱۰/۷۷	۵/۷۸	۱۰۰۴	۳۶۰	۲۸۰	۱۰۶	۶۶	۶۰	۰/۳
۰/۹	۰/۷۱	۱/۹۱	۹/۸۴	۱۱/۰۴	۶/۳۶	۱۵۵۰	۶۲۵	۴۵۵	۱۱۷	۹۵	۹۰	۰/۳
۲/۲۸	۲/۲۳	۲/۴۹	۱۱/۲۲	۱۶/۸۱	۶/۰۱	۴۵۰	۱۵۴	۸۵	۴۴	۵۵	۳۰	۰/۳۵
۲/۱۸	۱/۷۹	۴/۰۷	۱۵/۴۶	۱۸/۴	۹/۲۲	۶۲۰	۲۵۱	۱۷۵	۵۶	۹۱	۶۰	۰/۳۵

۱، ۲، ۳ و ۴، فاز تغذیه و تخلیه توسعه داده شد (جدول ۴). ضریب تبیین مدل‌های توسعه یافته فاز تغذیه، مرحله ۲ تغذیه و مرحله ۳ تخلیه نسبت به سایر مراحل بیشتر و مدل‌های مربوط دقت بیشتری داشتند.

#### توسعه مدل برای تخمین سرعت نفوذ

مدل‌های مختلف بر داده‌های سرعت نفوذ، دبی جریان و حجم آب کاربردی برازش داده شد. با توجه به تعداد نمونه‌ها، بهترین برازش و اعتبار را معادله خطی نشان داد. به همین منظور مدل‌های شدت نفوذ به صورت تابعی از دبی جریان و حجم آب کاربردی برای مراحل

جدول ۴- مدل‌های توسعه یافته برای مراحل مختلف آزمایش و ضریب تبیین هر کدام از آن‌ها

مراحل	مدل توسعه یافته	ضریب تبیین ( $R^2$ )
مرحله ۱	$I_1=(0.41011Q-0.04559)V+(-1.62632Q+4.037)$	۰/۴۱
مرحله ۲	$I_2=(0.20653Q-0.01915)V+(38.7352Q+1.58847)$	۰/۶۶
مرحله ۳	$I_3=(0.26632Q-0.05172)V+(-5.3527Q+2.706)$	۰/۷۷
مرحله ۴	$I_4=(0.203216Q-0.02443)V+(1.2402Q+2.0824)$	۰/۳۵
فاز تغذیه	$I_A=(0.46768Q-0.03773)V+(13.96853Q+2.28013)$	۰/۶۹
فاز تخلیه	$I_{DA}=(-0.069Q-0.00895)V+(6.05698Q+1.035567)$	۰/۴۷

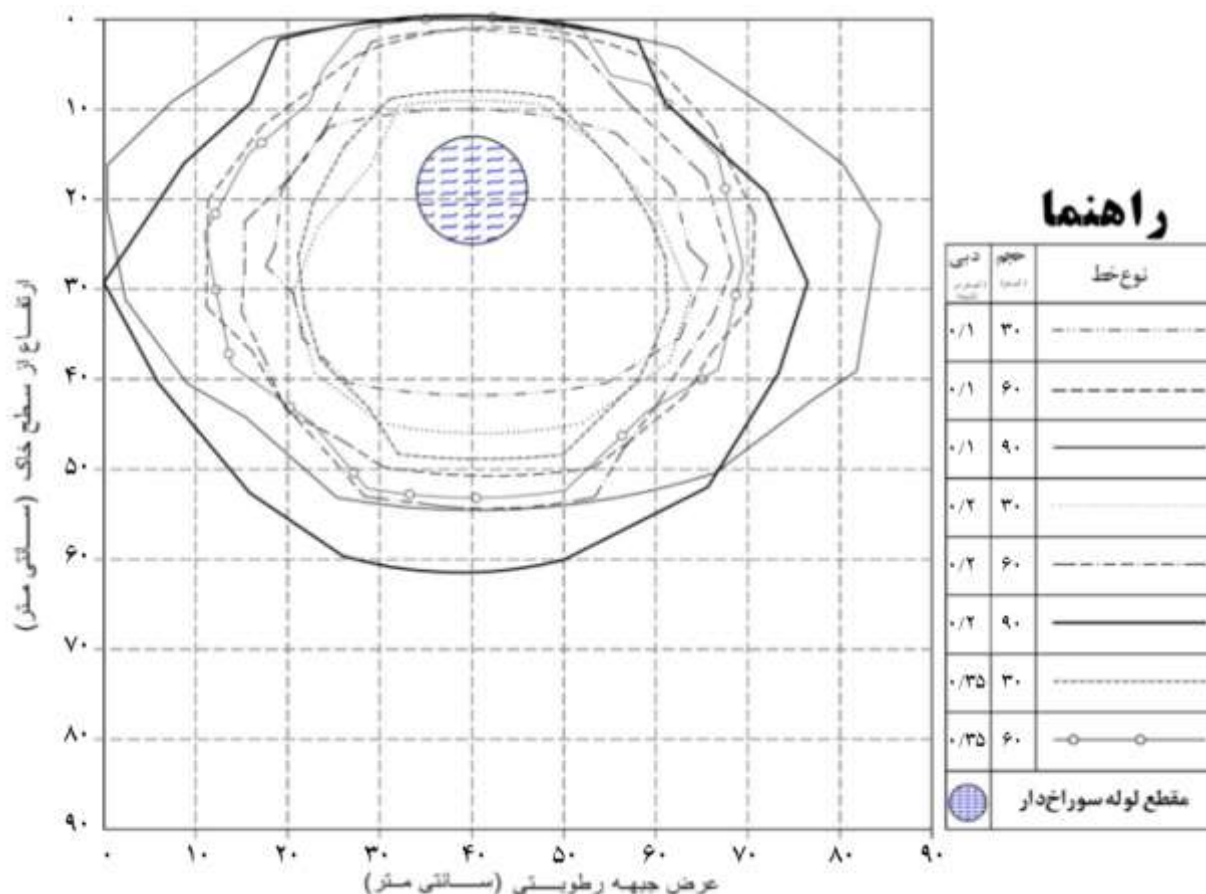
که در این روابط Q دبی ورودی به لوله بر حسب لیتر بر ثانیه و V حجم آب کاربردی بر حسب لیتر است.



### گسترش جبهه رطوبتی در خاک

تیمارهای آزمایشی بررسی شده به منظور تعیین الگوی توزیع آب در خاک (ابعاد پیاز رطوبتی) تحت تأثیر دبی جریان ورودی و حجم آب کاربردی در جدول ۱ ارائه گردیده است. شکل ۷ هشت الگوی توزیع آب اطراف لوله سوراخ‌دار تحت تأثیر دبی‌های مختلف و حجم‌های آب کاربردی را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی رابطه خطی  $I=(aQ-b)V+(cQ+d)$  برای محاسبه سرعت نفوذ در مراحل مختلف پیشنهاد می‌شود که ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  بر اساس مشخصات خاک و مراحل مختلف آزمایش تعیین می‌گردد.



شکل ۷- الگوی توزیع آب اطراف لوله سوراخ‌دار تحت تأثیر دبی ورودی و حجم آب کاربردی

۶۲ سانتی‌متر بود. به‌طور کلی الگوی پیاز رطوبتی در تمامی حالات آزمایش به صورت دایره‌ای متمایل به بیضی با مرکزیت منبع تخلیه آب است که مشابه نتایج ار و کوالهو و کوالهو و ار از یک منبع زیرسطحی است (Or & Coelho, 1996; Coelho & Or, 1997). راستای قطر اصلی این بیضی موازی سطح خاک است. لویین و همکاران نیز الگوی مشابهی برای پیاز رطوبتی ناشی از منبع آبی واقع در سطح خاک ارائه کردند با این تفاوت که راستای قطر بزرگ این الگو عمود بر سطح خاک است (Levin et al., 1979). علاوه بر شکل ۷، ابعاد جبهه رطوبتی در جدول ۵ نیز ارائه شده است. با توجه به شکل ۷ و جدول ۵، در حجم آب کاربردی ثابت، با

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش دبی و حجم آب کاربردی سبب توسعه بیشتر پیاز رطوبتی شد. افزایش حجم آب کاربردی سبب گسترش جبهه رطوبتی شد به طوری که در دبی ورودی ۰/۱ لیتر بر ثانیه، عرض جبهه رطوبتی برای حجم آب کاربردی ۳۰ لیتر ۴۸ سانتی‌متر، برای حجم ۶۰ لیتر ۶۰ سانتی‌متر و برای حجم ۹۰ لیتر ۸۴ سانتی‌متر بود. همچنین ارتفاع پیاز رطوبتی برای حجم‌های کاربردی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ لیتر به ترتیب ۳۲، ۵۰ و ۵۴ سانتی‌متر به دست آمد. کاربرد ۹۰ لیتر آب در لوله در دو دبی ۰/۱ و ۰/۲ لیتر بر ثانیه نیز نشان می‌دهد عرض جبهه رطوبتی برای دبی ۰/۱ و ۰/۲ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۸۴ و ۷۶ سانتی‌متر و ارتفاع جبهه رطوبتی به ترتیب ۵۴ و

شد. که دلیل این امر قرارگیری منبع خروج آب در زیر سطح خاک است که امکان نفوذ آب را در ۳۶۰ درجه دور لوله و بر اساس نیروی موئینگی فراهم می‌کند. همچنین با افزایش دبی ورودی به لوله، ارتفاع خیس شدگی بالای لوله افزایش یافت و جبهه رطوبتی در دبی‌های بالا به سطح خاک نزدیک‌تر شدند. همچنین ابعاد پیاز رطوبتی در جدول ۵ نشان می‌دهد حجم آب کاربردی تأثیر بیشتری بر ابعاد پیاز رطوبتی در مقایسه با دبی جریان ورودی داشت که مشابه نتایج روث است (Roth, 1974). با این تفاوت که مطالعه حاضر در مورد منبع جریان زیرسطحی بوده و مطالعه روث در مورد منبع آبیاری سطحی است (Roth, 1974).

افزایش دبی ورودی آب به لوله، عرض جبهه رطوبتی کاهش و عمق جبهه رطوبتی افزایش یافت. به عبارت دیگر افزایش دبی باعث کشیدگی پیاز رطوبتی در جهت عمودی و کاهش دبی باعث کشیدگی پیاز رطوبتی در جهت افقی شد. این نتایج برخلاف یافته‌های پروانک بروجنی و همکاران (۱۳۸۶) و علی‌خان و همکاران (Ali Khan et al., 1996) است که تأثیر دبی آب آبیاری بر الگوی نفوذ آب از یک منبع نقطه‌ای در سطح خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین پروانکی بروجنی و همکاران (۱۳۸۶) به این نتیجه دست یافتند که افزایش دبی خروجی از منبع نقطه‌ای واقع در سطح خاک موجب کاهش مساحت خیس شده می‌گردد، در صورتی که در این تحقیق افزایش دبی موجب افزایش ابعاد پیاز رطوبتی و مساحت خیس شده

جدول ۵- ابعاد بیشینه جبهه رطوبتی در ترکیب دبی و حجم‌های مختلف آب کاربردی

دبی (لیتر بر ثانیه)	حجم (لیتر)	عرض بیشینه محیط خیس شده (سانتی‌متر)	ارتفاع بیشینه محیط خیس شده (سانتی‌متر)
۰/۱	۳۰	۴۸	۳۲
۰/۱	۶۰	۶۰	۵۰
۰/۱	۹۰	۸۴	۵۴
۰/۲	۳۰	۴۳	۳۷
۰/۲	۶۰	۵۳	۵۳
۰/۲	۹۰	۷۶	۶۲
۰/۳۵	۳۰	۴۰	۴۱
۰/۳۵	۶۰	۵۹	۵۳

## نتیجه‌گیری

افزایش حجم آب کاربردی و دبی ورودی در فاز تغذیه باعث افزایش ارتفاع آب در لوله تغذیه شد. در فاز تخلیه افزایش دبی باعث کوتاه‌تر شدن زمان نفوذ و افزایش حجم آب کاربردی باعث افزایش زمان نفوذ گردید. سرعت نفوذ متوسط در دبی ثابت، در فاز تغذیه افزایش و در فاز تخلیه کاهش یافت. همچنین سرعت نفوذ متوسط در حجم ثابت با افزایش دبی، هم در فاز تغذیه و هم در فاز تخلیه افزایش یافت. بیشترین سرعت نفوذ در مرحله ۲ (فاز تغذیه در حالت آزاد) برابر ۱۸/۴ لیتر بر دقیقه مشاهده شد. مدل‌های ریاضی به‌منظور تخمین سرعت نفوذ به‌صورت تابعی از دبی و حجم آب کاربردی توسعه داده شدند. مدل‌های ریاضی توسعه داده‌شده در فاز تغذیه و مرحله ۳ دارای بیشترین ضریب تبیین برابر ۰/۶۹ و ۰/۷۷ بودند. نتایج نشان داد در دبی ثابت، با افزایش حجم آب کاربردی از ۳۰ لیتر به ۹۰ لیتر، عرض و ارتفاع پیاز رطوبتی حدود ۷۰٪ افزایش یافت. در حجم آب کاربردی ثابت، افزایش دبی ورودی آب به لوله از ۰/۱ لیتر بر ثانیه تا ۰/۳۵ لیتر بر ثانیه باعث کاهش حدود ۱۰٪ عرض و افزایش حدود ۱۷٪ ارتفاع جبهه رطوبتی گردید. به عبارت دیگر افزایش دبی باعث

کشیدگی پیاز رطوبتی در جهت عمودی و کاهش دبی باعث کشیدگی پیاز رطوبتی در جهت افقی گردید که برخلاف الگوی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی است.

## منابع

- اشرفی، ن.، نیکبخت، ع.، قیصری، م.، اعتمادی، ن. و اسکوبار، ر.ف. ۱۳۹۲. پاسخ نهال‌های زیتون به کاربرد پساب تصفیه‌شده در دو روش آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب). ۲۷ (۳): ۳۳۶-۳۲۹.
- پروانک بروجنی، ک.، فتاحی نافچی، ر. و موسوی، س.ف. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر بافت خاک و دبی آب آبیاری بر الگوی نفوذ آب از یک منبع نقطه‌ای. مجله علمی پژوهشی گیاه و زیست‌بوم. ۱۰: ۸۶-۱۰۱.
- دستورانی، م.ت.، صادق زاده، م.ع. و حشمتی، م. ۱۳۸۷. بررسی کارایی آبیاری زیرسطحی در میزان رشد و تولید درختان پسته. آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲ (۱): ۳۵-۴۷.

- 347-360.
- Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L. and Elliott, R.L. 2007. Design and operation of farm irrigation systems. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Honari, M., Ashrafzadeh, A., Khaledian, M., Vazifedoust, M. and Mailhol, J.C. 2017. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the south of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 143 (7).
- Levin, I., van Rooyen, P.C. and van Rooyen, F.C. 1979. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 43(1): 8-16.
- Or, D. and Coelho, F.E. 1996. Soil water dynamics under drip irrigation: transient flow and uptake models. *Transactions of the ASAE*. 39 (6): 2017-2025.
- Roth, R.L. 1974. Soil moisture distribution and wetting front pattern from a point source. *Proc. Second International Drip Irrigation Congress, San Diego, California*.
- Schwartzman, M. and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 122 (3).
- Shani, U., Xue, S., Gordin-Katz, R. and Warrick, A.W. 1996. Soil-limiting flow from subsurface emitters, I: pressure measurements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 122 (5).
- Suarez Rey, E., Choi, C.Y., Waller, P.M. and Kopec, D.M. 2000. Comparison of subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation for bermuda grass in Arizona. *Transactions of the ASAE*. 43 (3): 631-640.
- Yao, W.W., Ma, X.Y., Li, J. and Parkes, M. 2011. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 29: 331-339.
- Zerihun, D., Sanchez, C.A. and Nolte, K. 2014. Field-scale sprinkler irrigation system hydraulic model. I: hydraulic characterization. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 140 (7).
- Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*. 16: 101-105.
- قیصری، م. و نیکبخت، ع. ۱۳۸۹. سیستم آبیاری نشتی-زیرسطحی. اداره کل ثبت شرکت‌ها و مالکیت صنعتی، گواهی‌نامه ثبت اختراع، شماره ۶۶۹۸۰/۰۷/۳۴ تاریخ ۱۳۸۹/۰۷/۳۴.
- محمدیان، م.، قیصری، م.، فاضل، ف. و اعتمادی، ن. ۱۳۹۵. مقایسه گرفتگی چند نوع قطره‌چکان داخل خط در اثر نفوذ ریشه تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۴۷ (۳): ۵۳۷-۵۲۹.
- Ali Khan, A., Yitayew, M. and Warrick, A.W. 1996. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 122 (4).
- Angelakis, A.N., Rolston, D.E., Kadir, T.N. and Scott, V.H. 1993. Soil-water distribution under trickle source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 119 (3).
- Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S. and Mead, R.M. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agricultural Water Management*. 42 (1): 1-27.
- Bhatnagar, P.R. and Chauhan, H.S. 2008. Soil water movement under a single surface trickle source. *Agricultural Water Management*. 95 (7): 799-808.
- Braester, C. 1973. Moisture variation at the soil surface and the advance of the wetting front during infiltration at constant flux. *Water Resources Research*. 9 (3): 687-694.
- Camp, C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*. 41 (5): 1353-1367.
- Cindy, S.K. and Hunt, J.R. 1996. Prediction of wetting front movement during one-dimensional infiltration into soils. *Water Resources Research*. 32 (1): 55-64.
- Coelho, F.E. and Or, D. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Science Society of America Journal*. 61 (5): 1331-1341.
- Cote, C.M., Birstow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J. and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 143-156.
- Hammami, M., Daghari, H., Balti, J. and Maalej, M. 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage*. 51 (4):

## Investigation of Hydraulic Characteristics and Developed Equations for Subsurface Leaky Irrigation System

A. Maleki<sup>1</sup>, M. Gheysari<sup>\*2</sup>, M.R. Mosaddeghi<sup>3</sup>, N. Akbari<sup>4</sup>

Received: Mar. 08, 2021

Accepted: Jun. 05, 2021

### Abstract

Subsurface leaky irrigation systems are one of the novel irrigation systems developed in recent years. In this system, the pipes are located below the soil surface and water is distributed in root zone with a very low pressure of less than one meter water column. This system can be widely used in small gardens with quantitative and qualitative water restrictions. Optimal design of these systems depends on the effect of different parameters on water infiltration and wetting pattern. For this reason, the volume of water infiltration is investigated at different Subsurface leaky irrigation strategies. The inlet discharge and volume of applied water at each strategy differs from 0.1, 0.2 and 0.35 liters per second and 30, 60 and 90 liters, respectively. The humidity of the soil is also measured in wetting area at the end of each experiment. The results show that inlet discharge in feeding stage has dramatic effect on water infiltration, while the volume of applied water has more effects in discharge stage. Measurements of wetting pattern at the end of experiments also showed that water infiltration increased by 17% with increasing the inlet discharge into the system. The developed models in feeding phase and discharge and feeding phase in non-free surface flow had correlation coefficients of 0.69, 0.77 and 0.66, respectively, which show their higher accuracy in comparison with other phases.

**Keywords:** Infiltration rate, Leaky irrigation, Water losses, Wetting pattern, Subsurface drip irrigation

---

1- Graduate Student, Master of Science in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

4 -Ph.D. Candidate in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(\*Corresponding Author Email: gheysari@iut.ac.ir)