# یک مدل نیمه تجربی به‌منظور تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای

جمال عباس پلنگی* و علی محمد آخوند علی[۱]

(تاریخ دریافت: ۸۵/۱۱/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۶/۱۸)

## چکیده

**در هنگام طراحی یک سیستم آبیاری قطره‌ای لازم است الگوی خیس شدن نیمرخ خاک که اصطلاحاً به آن پیاز رطوبتی گفته می‌شود برای هر زمینی که قرار است با روش قطره‌ای آبیاری شود، از قبل مشخص گردد. شکل الگوی رطوبتی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در انتخاب قطره‌چکان می‌باشد و روی حجم آب آبیاری مؤثر است. فاصله قطره‌چکان‌ها نیز براساس شکل الگوی رطوبتی و مساحتی که هر قطره‌چکان اشغال می‌کند انتخاب می‌شود. ابعاد پیاز رطوبتی تحت تأثیر پارامترهای مهمی همچون خصوصیات هیدرولیکی خاک، دبی خروجی قطره‌چکان و زمان آبیاری می‌باشد. به‌منظور تخمین شکل جبهه رطوبتی ناشی از یک منبع نقطه‌ای این پژوهش در منطقه الباجی واقع در ۲۵ کیلومتری جاده اهواز- اندیمشک و خاکی با بافت شنی صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا قطره‌چکان‌ها برای تأمین دبی‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت کالیبره شدند. سپس آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین حداکثر قطر و عمق پیاز رطوبتی در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری به ازای هر دبی انجام گرفت. در نهایت روابطی نیمه تجربی با تأثیر عوامل فیزیکی حاکم بر پیشروی آب در خاک در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای و قضیه $\pi$ باکینگهام و آنالیز ابعادی به‌دست آمد. این روابط با استفاده از الگوهای رطوبتی به‌دست آمده واسنجی شده و به‌منظور صحت سنجی آن، روابط علمی- تجربی به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مطالعه انجام شده و حداکثر خطای نسبی ۱۴/۳ درصد و حداکثر جذر میانگین مربعات خطای ۳/۸ سانتی‌متر در پیش‌بینی قطر و عمق جبهه رطوبتی، معادلات به‌دست آمده که مبتنی بر نتایج آزمایش‌های میدانی نیز می‌باشند، با دقت بالایی ابعاد هندسی پیاز رطوبتی را برآورد می‌کنند و می‌توان از آنها در طراحی و مدیریت بهینه سیستم آبیاری قطره‌ای برای شرایط مورد مطالعه استفاده کرد.**

**واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، منبع نقطه‌ای، جبهه رطوبتی، آنالیز ابعادی**

## مقدمه

با تمام پیشرفت‌هایی که در علم آبیاری حاصل شده و با وجود این‌که بیش از ۸۰ درصد مصرف آب شیرین دنیا در بخش کشاورزی است، هنوز متوسط بازده آبیاری سطحی در دنیا از ۳۵ درصد تجاوز نمی‌کند (۴).

آنچه باعث پایین بودن بازده آبیاری است مسائل و مشکلات داخل مزرعه و در ارتباط با روابط آب و خاک و گیاه است که مسئولیت آن متوجه زارع نبوده بلکه متخصصان آبیاری و کشاورزی، طراحان سیستم‌های آبیاری و حتی مدیران مزارع و کشاورزی نیز در این امر مسئولیت دارند (۳).

۱. به ترتیب کارشناس ارشد و استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Palangi_47@yahoo.com



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

روش آبیاری قطره‌ای با راندمان بالاتری نسبت به سایر روش‌های آبیاری در دنیا مرسوم شده است و به‌علت قابلیت‌های خاصی که دارد در برخی از شرایط خاص (مانند آبیاری در خاک‌های شنی) تنها سیستم آبیاری مناسب تلقی می‌گردد.

برای آگاهی از این‌که قطره چکان مورد نظر مساحت دلخواه در سطح خاک را خیس می‌کند یا نه، نیاز به مشخص بودن الگوی رطوبتی حاصله می‌باشد. بر اساس این الگوها می‌توان فاصله قطره‌چکان‌ها را تعیین نمود. به‌عنوان مثال در خاک‌های شنی به‌دلیل سرعت عمودی آب و باریک بودن الگوهای رطوبتی فاصله قطره چکان‌ها را نزدیک‌تر در نظر می‌گیریم در حالی که در خاک‌های رسی به‌علت حرکت افقی آب و پهن‌تر بودن الگوهای رطوبتی، فاصله قطره چکان‌ها را باید بیشتر در نظر گرفت (۶).

مدت زمان آبیاری نیز بستگی دارد به این‌که چه زمانی پس از شروع آبیاری جبهه رطوبتی به عمق ریشه گیاه و یا مضربی از آن برسد. فاصله خروجی‌ها، شدت جریان و زمان آبیاری قطره‌ای باید طوری طراحی گردد که حجم خاک مرطوب شده به حجم ریشه گیاه نزدیک شود. بنابراین آگاهی از شکل و حجم خاک خیس شده در زیر قطره‌چکان به‌منظور تأمین نیاز آبی گیاه، مدیریت بهینه و افزایش راندمان آبیاری ضروری است.

کلر و همکاران جدولی ارائه کرده‌اند که مساحت خیس شده در زیر هر قطره‌چکان را به ازای دبی ۴ لیتر در ساعت و سه نوع خاک درشت، ریز و متوسط تخمین می‌زنند. نتایج آنها دارای محدودیت‌هایی می‌باشد چراکه به ازای دبی‌های کمتر یا بیشتر از مقدار مذکور سطح خیس شده غیر از مقادیر ذکر شده در جدول می‌باشد. این جدول عمق جبهه رطوبتی رامشخص نمی‌کند، علاوه بر آن جدول ارائه شده توسط آنها فقط سه گروه کلی از خاک‌ها را در نظر می‌گیرد در حالی که ۱۱ کلاس بافت خاک وجود دارد. قطر خاک خیس شده نیز به ازای یک دبی معین نسبت به زمان ثابت نیست بلکه تغییر می‌کند لذا با استفاده از این گونه جداول امکان برآورد مساحت خیس شده در زمان‌های مختلف آبیاری وجود ندارد(۵).

معادله حاکم بر حرکت آب در خاک در حالت غیراشباع معادله ریچاردز می‌باشد، که فرم دوبعدی آن به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] \qquad [۱]$$

که در آن، $\theta$ درصد رطوبت حجمی، $h$ بار مکش، $K$ هدایت هیدرولیکی، $x$ و $Z$ به ترتیب جهت افقی و عمود بر حرکت آب و $t$ زمان می‌باشد (۳).

در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۹ محققین بسیاری ( ۱۰، ۱۱،۱۴ و ۱۹) به تحلیل مسئله نفوذ در آبیاری قطره‌ای و تعیین شکل الگوی رطوبتی و فاصله قطره‌چکان‌ها پرداخته و راه‌حل‌های تحلیلی و عددی متعددی را با در نظر گرفتن ساده‌سازی‌ها و فرضیات متفاوت ارائه نمودند. آنجلاکیس و همکاران (۷) در یک مطالعه آزمایشگاهی توزیع آب را در نیمرخ خاک همگن در دو نوع خاک لوم رسی و شنی تحت یک منبع قطره‌ای مطالعه نمودند. آنها مدل‌ها و روش‌های گوناگون را با نتایج به دست آمده مقایسه کردند. عموماً پیشروی‌های عمودی جبهه رطوبتی محاسبه شده با مشاهدات آزمایشگاهی درهر دو نوع خاک هم‌بستگی زیادی داشت ولی جبهه رطوبتی افقی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای زمان‌های طولانی دارای اختلاف فاحش بوده‌اند.

تحقیقات زیادی نیز در زمینه حل عددی و تحلیلی معادله ریچاردز انجام شده و مدل‌های عددی متفاوتی مانند CSMP، HYDRUS-2D و SWMS-2D کارایی بالایی در پیش‌بینی شکل الگوی رطوبتی و پروفیل خیس شده خاک از خود نشان داده‌اند (۸، ۹ ، ۱۳، ۱۷و ۱۸). مطمعناً دقیق‌ترین و بهترین روش برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی حل معادله ریچاردز تحت شرایط اولیه و مرزی مورد نظر می‌باشد، علی‌رغم در دسترس بودن رایانه و مدل‌های عددی گوناگونی که برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در دنیا وجود دارد به‌علت عدم دسترسی آسان به



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها و نیز فقدان نرم افزارهای شبیه‌سازی در داخل کشور، متأسفانه طراحان سیستم‌های آبیاری تمایل چندانی به استفاده از روش‌های مذکور ندارند و کمتر از این قبیل روش‌ها برای به‌دست آوردن ابعاد پیاز رطوبتی و یا تعیین پروفیل خاک خیس شده استفاده می‌کنند.

شوارتزمن و زور (۱۶) از اولین کسانی بودند که به‌منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی و در نهایت تعیین فاصله قطره چکان‌ها گامهای مؤثری برداشتند. آنها توانستند روابط نیمه تجربی را برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای و خطی به‌دست بیاورند. رابطه آنها به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای به فرم زیر می‌باشد:

$$d = 1.32\, z^{0.35} q^{0.33} k_s^{-0.33} \qquad [۲]$$

که $q$ دبی قطره‌چکان، $k_s$ هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، $d$ حداکثر قطر و $z$ عمق خاک خیس شده می‌باشد.

زور (۲۰) تحقیقی را به‌منظور ایجاد و اثبات یک جریان طراحی انجام داد به‌طوری که قبل از پیاده کردن یک طرح آبیاری قطره‌ای، در ابتدا حجم خاک مرطوب شده را بتوان تخمین زد. در این تحقیق در خاتمه با ترکیب دبی، عمق و قطر خاک خیس شده، حجم خاک خیس شده بر اساس فرمولی که به وسیله شوارتزمن و زور پیشنهاد شده، محاسبه گردید.

داسبرگ و برسلر (۱۲) به‌منظور به‌دست آوردن شعاع جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، راه حل تقریبی را برای معادله حرکت آب ارائه نمودند.

رایس و چزنس (۱۴) روش پیشنهاد شده توسط داسبرگ و برسلر را اصلاح نمودند به‌طوری که تنها پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی شعاع خیس شده خاک عبارت از: آبدهی قطره چکان، بافت خاک و پتانسیل آب خاک بود. آزمایش‌های مزرعه‌ای آنها روی خاک لومی شنی و برای دو مقدار آبدهی (۳/۷۸ و ۷/۵۷ لیتر درساعت) نشان داد که مقادیر خیس شده پیش بینی شده در حدود ۱۱٪ تا ۱۹٪ با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف دارند. هم‌چنین برای مقدار آبدهی ۳/۸ لیتر در ساعت اختلاف بین مقادیر سطح خیس شده پیش بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبوده ولی برای آبدهی ۷/۵۷ لیتر در ساعت این اختلاف معنی‌دار بوده است.

خانجانی و بارانی (۲) نیز به بررسی توزیع رطوبتی خاک زیر قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای پرداختند و سعی کردند که ابعاد هندسی پیاز رطوبتی خاک را با روش‌های مختلف به‌دست آورند و اندازه آن را به‌صورت تابعی از سایر پارامترهای گیاه و خاک محاسبه کنند. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که معادلات به‌دست آمده در سطح مزرعه‌ای برای مدیریت آبیاری کافی بوده و می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه برای به‌دست آوردن معادلات مربوطه یکسری ساده‌سازی در رابطه بین آب و خاک و گیاه صورت گرفته است.

ترابی و صدرقائن (۱) طرحی را در ۶ منطقه واقع در استان اصفهان و خراسان و در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف اجرا نمودند که بر اساس آن مدل شوارتزمن وزور را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها دلالت بر امکان استفاده موفقیت آمیز از این مدل در پیش‌بینی فاصله قطره‌چکان‌ها دارد.

میرزایی و همکاران (۵) به‌منظور نمون سازی جبهه رطوبتی، روابطی را با دخالت عوامل فیزیکی مؤثر بر حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه خطی و با استفاده از قضیه $\pi$ باکینگهام و آنالیز ابعادی به‌دست آوردند. در نهایت این روابط با داده‌های اندازه گیری شده واسنجی شد و روابط علمی- تجربی ۳ و ۴ به‌دست آمد که هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها نشان داد. علاوه بر آن معادلات ارائه شده تابعی از زمان هستند و در هر زمان امکان محاسبه قطر و عمق خاک خیس شده وجود دارد.

$$d = ۲/۱۲۳ k_S^{(-۰/۰۸)} q^{(۰/۵۴)} t^{(۰/۴۶)} \qquad [۳]$$

$$z = ۲/۲۸۱ k_S^{(۰/۱۷)} q^{(۰/۴۲)} t^{(۰/۵۸)} \qquad [۴]$$

و $t$ مدت زمان آبیاری می‌باشد.

بنابراین انجام آزمایش‌های تجربی در مزرعه و ایجاد روابطی بین بافت خاک، بده قطره چکان، حجم آب نفوذ یافته به زمین، حجم خاک خیس شده، قطر و عمق پیاز رطوبتی به‌منظور دستیابی به روابطی تجربی که بتواند در طراحی و



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

مدیریت یک سیستم آبیاری کمک نماید، ضروری به‌نظر می‌رسد.

تپه‌های شنی و شن‌زارهای استان خوزستان ۵/۴ درصد مساحت استان و ۲۹/۵ درصد اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهد. از طرفی با توجه به تلفات زیاد آب در هنگام آبیاری با روش‌های متداول و به‌منظور تثبیت این اراضی، جلوگیری از خطرات ناشی از حرکت شن‌های روان و بهره‌برداری کشاورزی و زراعت جنگل در این مناطق، ناگزیر به استفاده از سیستم‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای هستیم (۳).

با توجه به کمبود مطالعات در این گونه مناطق و وجود درصد زیادی از مناطق کشورمان با خصوصیات مشابه این مناطق این پژوهش به‌منظور دستیابی به روابطی ساده، تجربی و دارای مبنای فیزیکی به‌منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای انجام پذیرفته است.

به‌علاوه در این پژوهش سعی شده پارامتر زمان نیز که در مدل شوارتزمن و زور (۱۶) وجود ندارد، در معادلات به‌دست آمده وارد گردد. بدین ترتیب امکان تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در هر زمان دلخواه پس از شروع آبیاری وجود خواهد داشت.

**تئوری تحقیق**

برداشت ما از قوانین فیزیکی حاکم بر حرکت آب خاک در اطراف یک منبع نقطه‌ای اینست که شکل هندسی حجم خاک خیس شده در پایان هر آبیاری به نوع خاک، دبی قطره‌چکان (q) و کل حجم آب وارد شده به خاک (V) و زمان آبیاری (t) بستگی دارد.

شکل هندسی پیاز رطوبتی در بهترین حالت به‌صورت حداکثر قطر (d) و عمق خاک (z) خیس شده بیان می‌شود. نوع خاک به‌وسیله هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) نشان داده می‌شود.

برای شناخت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده که رابطه بین آنها مشخص شده نیست آنالیز ابعادی روش مناسبی می‌باشد. یکی از قضایای مهم آنالیز ابعادی در مکانیک سیالات قضیه $\pi$ باکینگهام است. بر اساس این قضیه اگر n متغیر بعددار در یک معادله همگن ابعادی وجود داشته باشد که به‌وسیله m متغیر اصلی توصیف می‌شود، می‌توان آنها را به n-m گروه بدون بعد تقسیم کرد(۱۵).

لذا مطابق مطالب بیان شده بر اساس این قضیه می‌توان نوشت:

$$f(d,z,v,q,k_S,t)=0 \qquad [۵]$$

که در آن، $(d)$ = حداکثر قطر خاک خیس شده، $(z)$ = عمق خاک خیس شده، $(q)$ = دبی قطره چکان $(v)$ = حجم آب وارد شده به خاک، $k_s$= هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و $(t)$ = زمان آبیاری می‌باشند.

با ۶ متغیر بعد دار $(d,z,v,q,k_S,t)$ و ۲ بعد اصلی $(L,T)$ ، $n-m=۴$ عدد بدون وجود خواهد داشت که بر اساس قضیه $\pi$ باکینگهام می‌توان آنها را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\pi_۱ = q^{a_۱} k_S{}^{b_۱} d$$
$$\pi_۲ = q^{a_۲} k_S{}^{b_۲} z$$
$$\pi_۳ = q^{a_۳} k_S{}^{b_۳} v \qquad [۶]$$
$$\pi_۴ = q^{a_۴} k_S{}^{b_۴} t$$

از آنجا که $\pi_۱$ بدون بعد است پس به‌جای بعد آن $L^۰T^۰$ جایگزین می‌شود با جای‌گذاری ابعاد $q,k_S$ و $d$ در $\pi_۱$ و بر قراری تساوی $L^۰T^۰=(L^۳T^{-۱})^{a_۱}.(LT^{-۱})^{b_۱}.L^۱$ مقدار ضرایب $a_۱$ و $b_۱$ به ترتیب ۰/۵- و ۰/۵ به‌دست می‌آید. به این ترتیب ضرایب ثابت اعداد بدون بعد $\pi_۲,\pi_۳$ و $\pi_۴$ نیز به‌دست می‌آید. از آنجا که $\pi_۳,\pi_۲,\pi_۱$ و $\pi_۴$ بدون بعد بوده و توابعی از $z,d,v$ و $t$ هستند، آنها را به ترتیب با $z^*,d^*,v^*$ و $t^*$ نشان می‌دهیم(معادله ۷).

رابطه بین پارامترهای بی بعد $z^*$، $d^*$ و $v^*$ در معادله ۷ را می‌توان از نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌دست آورد. در صورت عدم دسترسی به این نتایج می‌توان ازنتایج آزمایشگاهی (مانند باکس‌های شیشه‌ای یا سایر مدل‌های فیزیکی) و یا شبیه‌سازی



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

عددی استفاده نمود (۱۶).

$$d^* = d(\frac{k_S}{q})^{1/2}$$
$$z^* = z(\frac{k_S}{q})^{1/2}$$
$$v^* = v(\frac{k_S}{q})^{3/2}$$
$$t^* = t(\frac{k_S^{3/2}}{q^{1/2}}) \quad [۷]$$

برای برقراری روابطی بین پارامترهای بدون بعد و ترسیم مقادیر $d^*$ و $z^*$ در برابر $v^*$ ملاحظه شد که می‌توان بین آنها رابطه توانی به‌صورت زیر برقرار نمود.

$$d^* = A_1 v^{*n_1}$$
$$z^* = A_2 v^{*n_2} \quad [۸]$$

که $A_1, A_2, n_1, n_2$ ضرایب ثابت می‌باشند. با ترکیب معادله فوق با معادله ۷ و جاگذاری $(v = q.t)$ روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$d = A_1 . k_S^{(\frac{3}{2}n_1 - \frac{1}{2})} q^{(-\frac{1}{2}n_1 + \frac{1}{2})} t^{n_1} \quad [۹]$$

$$z = A_2 . k_S^{(\frac{3}{2}n_2 - \frac{1}{2})} q^{(-\frac{1}{2}n_2 + \frac{1}{2})} t^{n_2} \quad [۱۰]$$

در معادلات ۹ و ۱۰ عمق و قطر ماکزیمم خاک خیس شده $(z,d)$ تابعی از دبی خروجی $(q)$، هدایت هیدرولیکی اشباع $(k_S)$و مدت زمان آبیاری $(t)$است. $A_1, A_2, n_1, n_2$ نیز ضرایب ثابت معادله می‌باشند که با استفاده از نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای، آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی عددی به‌دست می‌آیند.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش در آبان ماه سال ۱۳۸۴ در ایستگاه تحقیقاتی منابع طبیعی استان خوزستان، تپه‌های شنی الباجی واقع در ۲۸ کیلو متری جاده اهواز- اندیمشک به عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی در ارتفاع ۲۰ متری از سطح دریا اجرا گردید.

برای انجام این کار از یک مخزن به ابعاد ۳۳×۴۰×۵۰ سانتی‌مترمکعب (حجم ۰/۰۶۶ متر مکعب) به‌عنوان مخزن اصلی استفاده شد و برای ثابت نگه داشتن فشار آب نیز از قانون ظروف ماریوت استفاده گردید. در ابتدا قطره‌چکان‌های مورد آزمایش برای رسیدن به دبی های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت تنظیم شدند. بعد از آزمایش‌های اولیه مشخص گردید که در صورت استفاده از میکروتیوب‌ها و تغییر طول و قطر آنها ( دبی ۵، ۳۰ و ۴۰ لیتر در ساعت) و یا با وارد کردن لوله‌های باریک‌تر و پیچ‌دار در داخل لوله‌های میکروتیوب (دبی ۱۰و ۲۰ لیتر در ساعت)، می‌توان با استفاده از یک هد آب کمتر به راحتی دبی‌های مورد نیاز را تأمین کرد و چون هدف اصلی تأمین دبی‌های مورد نظر بود بیشتر قطره‌چکان‌ها از این نوع انتخاب شدند.

پس از تنظیم کردن قطره‌چکان‌ها در آزمایشگاه، مدل به مزرعه انتقال داده شد و آزمایش‌های مزرعه‌ای برای به‌دست آوردن الگوهای رطوبتی اجرا گردید. به این ترتیب که برای هر دبی و پس از اتمام هر زمان کاربرد با ایجاد یک برش با دیواره عمودی از محل نصب قطره‌چکان، الگوی خیس شده مشاهده و ابعاد آن اندازه‌گیری شد (شکل ۱). میزان پیشروی رطوبت در راستای افقی روی سطح خاک از محل نصب قطره چکان و در راستای عمودی با فواصل ۱۰ سانتی‌متری قرائت و ثبت گردید. در جدول ۲ مدت زمان کارکرد سیستم به ازای هریک از قطره‌چکان‌ها درج گردیده است.

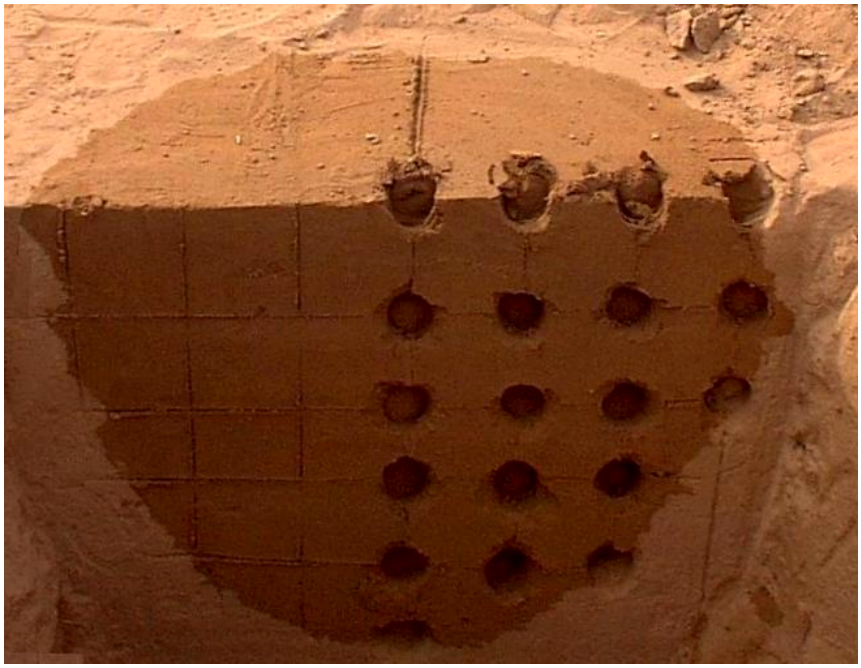
مقدار عمق جبهه رطوبتی و حداکثر قطر پیاز رطوبتی به ازای هر زمان کارکرد قطره‌چکان، برای انجام محاسبات مربوطه و مراحل بعدی تحقیق انتخاب گردید (جدول ۲ و ۳).

در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه درج شده است. درصد اشباع خاک‌های الباجی بین۲۴ تا ۲۸ درصد وزنی و وزن مخصوص ظاهری شن های روان الباجی ۱/۵۵ و وزن مخصوص حقیقی ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۰۵ + ۰/۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر بوده اسیدیته آن در محدوده ۸/۴– ۷/۸ و رطوبت اولیه خاک خشک قبل ازآبیاری نیز ۱/۷۳ درصد وزنی است. در ضمن



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]



**شکل۱. پیاز رطوبتی حاصل از قطره‌چکان با دبی ۵ لیتر در ساعت پس از ۵ ساعت کارکرد (۳)**

**جدول۱. دانه بندی خاک مورد آزمایش**

| عمق نمونه گیری | شن درشت ۱ – ۰/۵ | شن متوسط ۰/۵ – ۰/۲۵ | شن ریز ۰/۲۵ –۰/۱ | شن خیلی ریز ۰/۱ – ۰/۰۵ | سیلت ۰/۰۵–۰/۰۰۲ | رس کمتر از ۰/۰۰۲ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰–۳۰ | ۰ | ۲۸ | ۶۵/۵ | ۱/۵ | ۲ | ۲/۵ |
| ۳۰–۶۰ | ۰ | ۲۷/۹ | ۶۵/۵ | ۱/۴ | ۱/۹ | ۲/۵ |
| ۶۰–۹۰ | ۰ | ۲۸ | ۶۴/۴ | ۱/۵ | ۲ | ۲/۴ |
| بافت | | | شنی | | | |

هدایت هیدرولیکی خاک مورد آزمایش ۰/۴۲ متر بر ساعت می‌باشد (۳).

## نتایج

برای تعیین $A_1, A_2, n_1, n_2$ در معادلات ۹ و ۱۰ مقادیر *d و *Z در برابر *V رسم شده که نمودار آنها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. سپس با استفاده از رگرسیون و برازش بهترین منحنی، مقادیر پارامترهای ذکر شده به شرح زیرتعیین شد:

$A_1 = ۲/۲۱۷ , n_1 = ۰/۳۲۷۲ , R^2 = ۰/۹۷۸۶$
$A_2 = ۱/۷۸۱۲ , n_2 = ۰/۴۲۴۱ , R^2 = ۰/۹۸۵۸$ [۹] و [۱۰]

با اعمال مقادیر فوق در معادلات ۹ و ۱۰ خواهیم داشت:

$$d = ۲/۲۲ k_S^{(-۰/۰۰۹)} q^{(۰/۳۴)} t^{(۰/۳۳)} \quad [۱۱]$$

$$z = ۱/۷۸ k_S^{(۰/۱۴)} q^{(۰/۳)} t^{(۰/۴۲)} \quad [۱۲]$$



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

**جدول۲. مقایسه بین مقادیر عمق جبهه رطوبتی اندازه‌گیری(Zo) و برآورد شده (Ze)**

| ردیف | q(lit/hr) | t(min) | V(m3) | Zo (cm) | Ze (cm) | خطای نسبی(٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵ | ۳۰ | ۰/۰۰۲۵ | ۲۴/۵ | ۲۵/۶ | ۴/۵ |
| ۲ | ۵ | ۳۰۰ | ۰/۰۲۵ | ۷۰ | ۶۸ | -۳ |
| ۳ | ۵ | ۴۸۰ | ۰/۰۴ | ۷۹ | ۸۳ | ۵ |
| ۴ | ۱۰ | ۶۰ | ۰/۰۱ | ۴۲ | ۴۲ | ۰ |
| ۵ | ۱۰ | ۲۴۰ | ۰/۰۴ | ۷۴ | ۷۵/۵ | ۲ |
| ۶ | ۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۱ | ۳۵ | ۳۸/۲ | ۹ |
| ۷ | ۲۰ | ۹۰ | ۰/۰۳ | ۵۹ | ۶۰/۸ | ۳ |
| ۸ | ۲۰ | ۱۲۰ | ۰/۰۴ | ۷۲ | ۶۸/۷ | -۴/۶ |
| ۹ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۰۵ | ۲۵ | ۲۷ | ۸/۶ |
| ۱۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۰/۰۱۵ | ۴۱ | ۴۳ | ۴/۶ |
| ۱۱ | ۳۰ | ۶۰ | ۰/۰۳ | ۵۶ | ۵۷/۶ | ۲/۸ |
| ۱۲ | ۳۰ | ۸۰ | ۰/۰۴ | ۷۲ | ۶۵ | -۹/۸ |
| ۱۳ | ۴۰ | ۱۰ | ۰/۰۰۶۸ | ۲۸ | ۲۹/۵ | ۵/۳ |
| ۱۴ | ۴۰ | ۲۰ | ۰/۰۱۳۲ | ۴۵ | ۳۹ | -۱۳ |
| ۱۵ | ۴۰ | ۴۰ | ۰/۰۲۶۸ | ۶۰ | ۵۲/۸ | -۱۲ |
| RMSE(cm) | ۳/۶ | | | | | |
| نتایج حاصل از رگرسیون | $Ze = 0.9418Zo + 0.0258, R^2 = 0.9622$ | | | | | |

بر اساس معادلات ۱۱ و ۱۲ (که معرف شرایط مزرعه‌ای می‌باشند) حداکثر قطر و عمق جبهه رطوبتی (m) را می‌توان بر حسب دبی خروجی قطره‌چکان ($\frac{m^3}{s}$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($\frac{m}{s}$) و زمان آبیاری (s) به‌دست آورد.

به‌منظور بررسی نتایج به‌دست آمده رگرسیون خطی و ضریب هم‌بستگی ($R^2$) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده و هم‌چنین خطای نسبی و ریشه میانگین مجذور خطا *(RMSE)* (Root mean square error) محاسبه گردید. در جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده برای (z) و (d) و میزان خطا در محاسبه آنها درج گردیده است.

## بحث

با توجه به جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که مقدار خطای نسبی برای پیش‌بینی ماکزیمم قطر خیس شده بین ۱/۴ تا ۱۴/۳ درصد (میانگین ۵/۸۶ درصد) بوده و در ۸۰ درصد موارد نیز مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشد. مقدار خطای نسبی



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

**جدول۳. مقایسه بین مقادیر قطر جبهه رطوبتی اندازه‌گیری($d_o$) و برآورد شده($d_e$)**

| ردیف | q(lit/hr) | t(min) | V(m3) | $d_o$(m) | $d_e$(m) | خطای نسبی(٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۵ | ۳۰ | ۰/۰۰۲۵ | ۳۴/۵ | ۳۰ | ۱۳ |
| ۲ | ۵ | ۳۰۰ | ۰/۰۲۵ | ۶۶ | ۶۳/۷ | -۳/۵ |
| ۳ | ۵ | ۴۸۰ | ۰/۰۴ | ۷۷ | ۷۴ | ۳/۶ |
| ۴ | ۱۰ | ۶۰ | ۰/۰۱ | ۵۰ | ۴۷/۵ | -۵ |
| ۵ | ۱۰ | ۲۴۰ | ۰/۰۴ | ۷۲ | ۷۴/۷ | ۳/۸ |
| ۶ | ۲۰ | ۳۰ | ۰/۰۱ | ۴۶ | ۴۷/۸ | ۳/۹ |
| ۷ | ۲۰ | ۹۰ | ۰/۰۳ | ۶۵ | ۶۸/۵ | ۵/۳ |
| ۸ | ۲۰ | ۱۲۰ | ۰/۰۴ | ۷۲ | ۷۵/۲ | ۴/۵ |
| ۹ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۰۰۵ | ۳۶ | ۳۸/۵ | ۶/۹ |
| ۱۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۰/۰۱۵ | ۵۴ | ۵۴/۸ | ۱/۴ |
| ۱۱ | ۳۰ | ۶۰ | ۰/۰۳ | ۶۵ | ۶۸/۷ | ۵/۷ |
| ۱۲ | ۳۰ | ۸۰ | ۰/۰۴ | ۶۶ | ۷۵/۴ | ۱۴/۳ |
| ۱۳ | ۴۰ | ۱۰ | ۰/۰۰۶۸ | ۴۵ | ۴۲/۴ | -۵/۸ |
| ۱۴ | ۴۰ | ۲۰ | ۰/۰۱۳۲ | ۵۶ | ۵۲/۷ | ۶ |
| ۱۵ | ۴۰ | ۴۰ | ۰/۰۲۶۸ | ۷۰ | ۶۶/۴ | ۵ |
| RMSE(cm) | | | | ۳/۸ | | |
| نتایج حاصل از رگرسیون | | | $de = 1.0708.do - 0.0374,\ R^2 = 0.9367$ | | | |

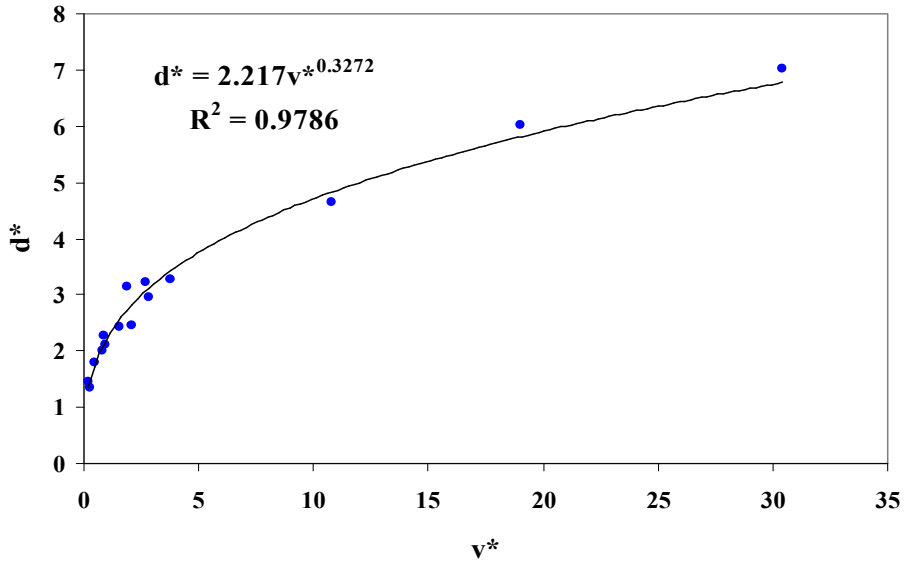
در محاسبه ماکزیمم عمق جبهه رطوبتی نیز بین ۰ تا ۱۳ درصد (به‌طور میانگین۵/۸۵ درصد) بوده که در ۶۰ درصد موارد مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر از موارد واقعی بوده است. این مقادیر خطا خیلی کمتر از حداکثر ۳۰درصد خطای به‌دست آمده توسط ترابی و صدرقائن (۱) در بافت‌های مختلف خاک می‌باشد. البته آنها نیز حداقل صفر درصد خطا را در محاسبات خود به‌دست آوردند. همین‌طور کمتر از ۱۱ تا ۱۹ درصد خطایی است که رایس و چزنس (۱۴) برای پیش بینی شعاع خیس شده توسط یک قطره‌چکان در خاکی با بافت لومی شنی به‌دست آوردند.

مقدار *RMSE* نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر، صرف‌نظر از این که کمتر یا بیشتر باشد، وجود دارد. مقدار *RMSE*، ۳/۸ سانتی‌متر برای ماکزیمم قطر تخمین زده شده و همین‌طور ۳/۶ سانتی‌متر برای ماکزیمم عمق جبهه رطوبتی در برابر ۱۰ سانتی‌متری که ترابی و صدرقائن (۱) به‌دست آورده‌اند، دلالت بردقت بالای این مدل در پیش‌بینی ابعاد پیاز رطوبتی دارد.

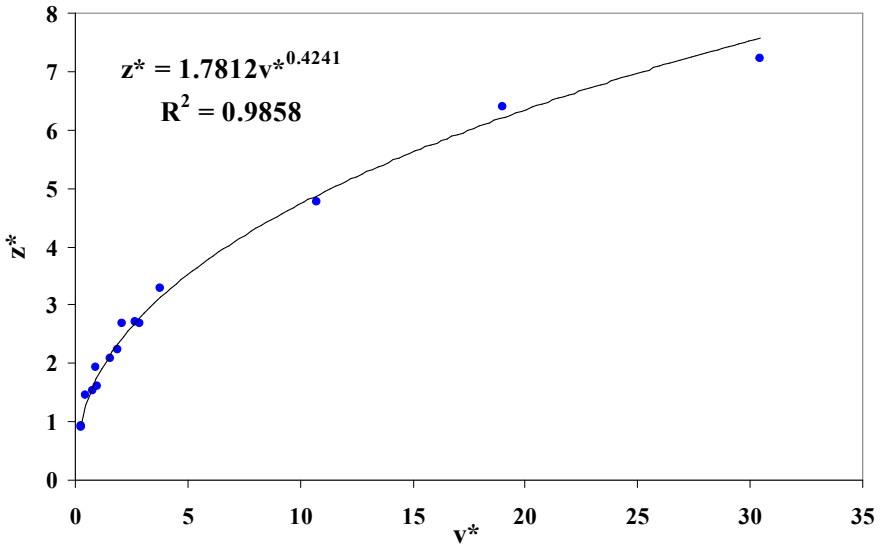


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]




شکل۲. رابطه بین اعداد بدون بعد *d و *v




شکل۳. رابطه بین اعداد بدون بعد *z و *v

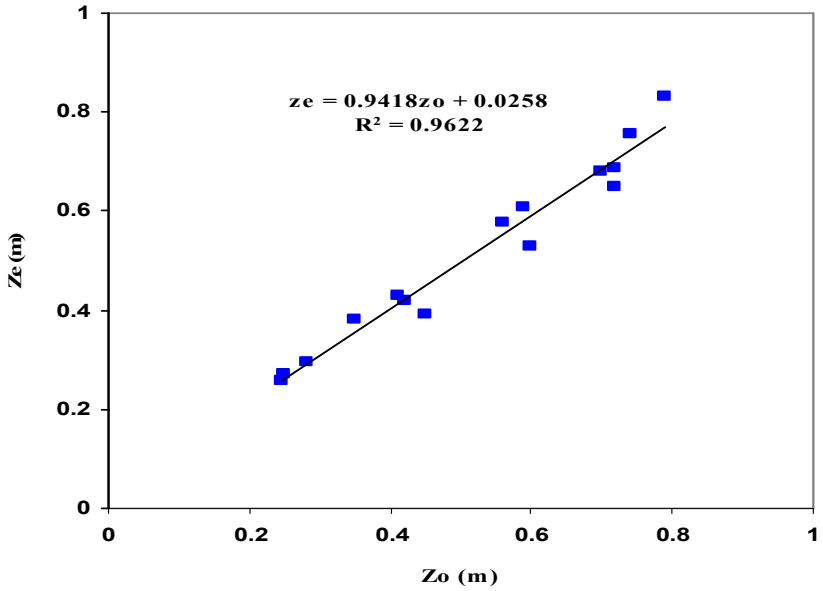
مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده قطر و عمق خیس شدگی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود ضریب هم‌بستگی قطر خیس شده اندازه‌گیری شده ($d_o$) و قطر خیس شده برآورد شده($d_e$) ، ۰/۹۳۶۷ بوده (شکل ۵) و ضریب هم‌بستگی عمق خیس شدگی اندازه‌گیری شده ($Z_o$) و برآورد شده ($Z_e$) نیز ۰/۹۶۲۲ (شکل۴) می‌باشد که در برابر ضرایب درج شده توسط میرزایی و همکاران (به ترتیب ۰/۹۹۹ برای d و ۰/۹۹۲ برای$Z$ ) (۵) و شوارتزمن و زور (۰/۹۹ برای هردو مورد) (۱۶) اختلاف جزئی وجود دارد و کفایت بالای مدل در پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر را بیان می‌کند.

دلیل این اختلاف در مقدار $R^2$ که در رابطه رگرسیونی بین *d و *Z در برابر *V نیز دیده می‌شود آن است که روابطی را که آنها به‌دست آورده‌اند، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی (۵) و یا شبیه‌سازی عددی (۱۶) می‌باشد که طبیعتاً در برابر نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی الگوهای منظم‌تر و جواب‌های دقیق‌تری به‌دست می‌آید در حالی‌که نتایج حاصل از کارهای میدانی عملی‌تر و کاربردی‌ترند.

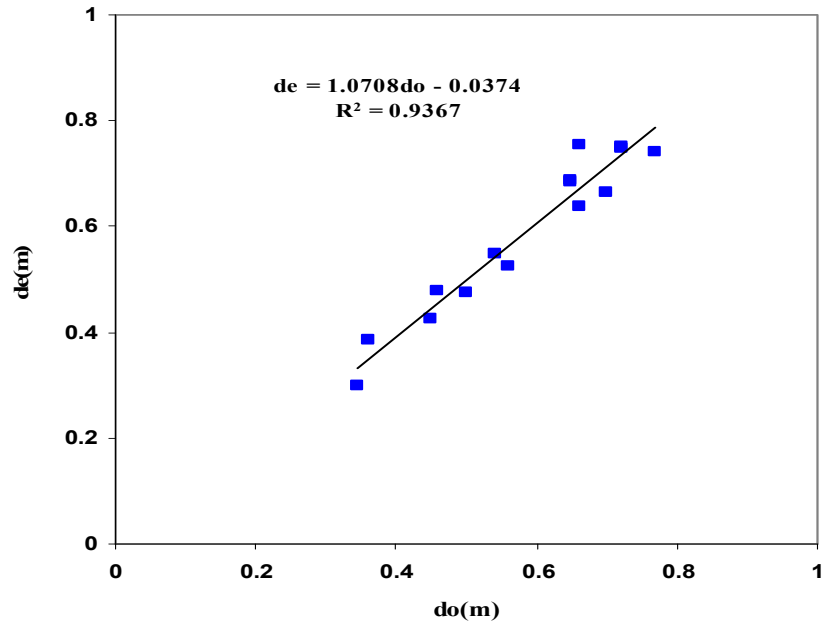


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]




**شکل۴. رابطه بین عمق اندازه‌گیری شده(Zo) و برآورد شده(Ze)**




**شکل ۵. رابطه بین قطر اندازه‌گیری شده(do) و برآورد شده(de)**

## نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات موجود برای تعیین شکل پیاز رطوبتی (انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای و عدم امکان استفاده از مدل‌های عددی)، نتایج به‌دست آمده دلالت بر امکان موفقیت‌آمیز از روابط به‌دست آمده دارد و می‌توان از نتایج حاصله در انتخاب قطره‌چکان‌ها و تعیین فاصله بین قطره‌چکان‌ها به‌منظور طراحی و مدیریت بهینه سیستم آبیاری قطره‌ای در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. علاوه بر این، تهیه جداولی مشابه جدول کلر و همکاران با استفاده از روابط به‌دست آمده به طراحان سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کمک شایانی می‌نماید(۴).



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]

## منابع مورد استفاده


۱. ترابی، م. و ح. صدرقائن. ۱۳۸۲ . ارزیابی یک مدل نیمه تجربی برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی و فاصله قطره چکان‌ها. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۴(۱۷) :۱۵-۲۷.

۲. خانجانی، ج. و غ. بارانی. ۱۳۷۵. بررسی توزیع رطوبت خاک زیر قطره چکان آبیاری قطره‌ای. مجموعه مقالات ششمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳. عباس پلنگی، ج. ۱۳۸۵. تعیین الگوهای پیشروی رطوبتی در خاک‌های شنی، تحت منبع نقطه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد و آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴. علیزاده، ا. ۱۳۸۴. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد.

۵. میرزایی، ف.، ع. لیاقت، ت. سهرابی و م. امید. ۱۳۸۴. نمونسازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۶(۲۳) : ۵۳-۶۶.

۶. نجفی مود، م. ۱۳۸۴. *طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار* (ترجمه). مؤسسه چاپ دانشگاه فردوسی، مشهد.

7. Angelakis, A. N., D. E. Rolstin, T. N. Kadir and V.H. Scott. 1993. Soil water distribution under trickle source. J. Irrig. and Drain. Eng. 119(30):767-774.
8. Armstrong, C., R. Fletcher and T. V. Wilson. 1983. Computer model for moisture distribution in started soils under trickle source. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 26:1704-1709.
9. Assouline, S. 2002. The effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1630-1636.
10. Brandt, A., E. Breslker, N. Diner, I. K. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg. 1971. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. Soil Sci. Soc. Am. 35:683-689.
11. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle-irrigation with application to design problems. Irrig. Sci. 1:13-17.
12. Dasberg, S. and E. Beresler. 1985. Drip irrigation manual. International Irrigation Information Center, Bet Dagen, Israel.
13. Meshkat, M., R. C. Warner and S. R. Workman. 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation. J. Irrig. and Drain. Eng. 125(6): 315-323.
14. Risse, L. M. and J. L. Chesness. 1989. A single simplified design procedure to determinate the wetted radius for a trickle emitter. Trans. ASCE. 32(6):1909-1913
15. Robert, L. and Y. Daugherty. 1977. Fluid Mechanics, with Engineering Applications. McGraw-Hill Book Co. USA.
16. Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. J. Irrig. and Drain. Eng. 112(3): 242-253.
17. Skaggs, T. H., T. J. Trout., J. Simunek and P. J. Shose. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. J. Irrig. Drain. Eng. 130(4):304-310.
18. Tan, T. S., K. K. Phoon and P. C. Chong. 2004. Numerical study of finite element method based solutions for propagation of wetting fronts in unsaturated soil. J. Irrig. and Drain. Eng. 130(3):254-263.
19. Warrick, A. W. 1974 . Time-dependent linearized infiltration, I: point-sources. Soil Sci. Soc. of Am. Proc. 38(3):383-386
20. Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. Irrig. Sci. 16:101-105.


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-11 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.7.2 ]