

## بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع

### خطی در خاک دو لایه

سونا خانجانی<sup>۱</sup>\* و رضا دلیرحسن‌نیا

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه تبریز.

[sona\\_khanjani@yahoo.com](mailto:sona_khanjani@yahoo.com)

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز.

[delearhasannia@yahoo.com](mailto:delearhasannia@yahoo.com)

#### چکیده

غالباً طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری قطره‌ای بدون آگاهی کافی از توزیع رطوبت در خاک انجام می‌گیرد که در نتیجه به طراحی و برنامه‌ریزی صحیح ختم نمی‌شود. معمولاً خاک‌های زراعی در اثر شخم و عملیات زراعی به دو لایه با چگالی متفاوت تبدیل می‌شوند، به طوریکه لایه بالایی بافتی سبکتر نسبت به لایه پایینی دارا می‌باشد. در این مطالعه گسترش جبهه رطوبتی در خاک دو لایه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های صحرایی به منظور تعیین پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دو لایه انجام شد. به منظور بررسی اثر زمان آبیاری و حجم آب وارد شده به خاک بر روی گسترش افقی و عمودی جبهه رطوبتی، آزمایش‌ها در چهار زمان ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت در خاک دو لایه انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش زمان آبیاری، پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی افزایش می‌یابد اما بعد از گذشت ۵ ساعت ابعاد جبهه رطوبتی تغییر چندانی نشان نداد. در لایه دوم به دلیل بافت سنگین آن گسترش پیاز رطوبتی بسیار کند بوده و تنها مقدار رطوبت در آن افزایش می‌یابد. همچنین با کاربرد مدل هایدروس دو بعدی اقدام به شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام یافته در شرایط مشابه گردید. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی با شبیه‌سازی عددی دو بعدی مدل هایدروس تطابق رضایت بخش شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات را نشان داد. بر اساس نتایج حاصل نتیجه گرفته شد که دقت مدل هایدروس در شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در خاک دو لایه زمانی که آب به لایه دوم رسیده باشد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: الگوی خیس‌شدگی، شبیه‌سازی، قطره‌چکان، مدل هایدروس

۱- آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه تبریز، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی

\* دریافت: آذر ۱۳۹۱ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۳

از مدل های تجربی موجود را برای تخمین ابعاد جبهه رطوبتی با داده های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل عددی هایدروس پیش‌بینی‌های خوبی داشته است (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰).

یائو و دانگ از هایدروس دوبعدی برای شبیه سازی دینامیک آب خاک در منطقه ریشه درخت عناب استفاده نموده‌اند. خروجی مدل نشان دهنده تناسب خوب مقادیر شبیه سازی شده با رطوبت حجمی اندازه-گیری شده بود (یائو و دانگ، ۲۰۱۱). تیشه‌زن و موسوی شکل جبهه پیشروی رطوبتی تحت منبع نقطه ای در خاک های مطبق با سطوح شیب دار را با انجام آزمایش‌هایی مورد بررسی قرار دادند.

ایشان نشان دادند که شیب در خاک دو لایه همانند خاک همگن، الگوی خیس شدگی را تحت تاثیر قرار می دهد و در خاک های سنگین پیشروی جبهه رطوبتی کندتر از خاک های سبک می باشد (تیشه زن و موسوی، ۱۳۸۵). کاظمی توزیع رطوبت خاک را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در عمق‌های مختلف و فواصل قطره-چکان مختلف مورد بررسی قرار داد. وی نتایج حاصل از آزمایشات صحرائی را با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل هایدروس مورد مقایسه قرار داد.

نتایج این پژوهش نشان دهنده توانایی مدل هایدروس در شبیه سازی توزیع رطوبت توسط قطره-چکان‌ها می‌باشد (کاظمی، ۱۳۹۰). مطالعات مشابه دیگری نیز به منظور بررسی نحوه گسترش جبهه رطوبتی تحت منبع قطره‌ای انجام پذیرفته است (هاشوم، ۱۹۷۳، پیتز و همکاران، ۲۰۰۳، دابرال و همکاران، ۲۰۱۲، مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۷۷، لی و همکاران، ۲۰۰۴، پلنگی و آخوندعلی، ۱۳۸۷، ملک و همکاران، ۱۳۸۸ و زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۸۹). هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی چگونگی پیش‌روی عمودی و افقی آب تحت منابع خطی در خاک دو لایه و مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر

آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا سیستم مناسب آبیاری در بسیاری از مناطق کم آب است. برای اطمینان از مرطوب شدن محدوده مورد نظر خاک توسط قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای، نیازمند مشخص بودن الگوی خیس‌شدگی خاک می‌باشد. بر اساس این الگوها می‌توان فاصله مناسب قطره‌چکان‌ها را تعیین نمود. معمولاً خاک‌های زراعی در اثر کشت و کار، افزودن خاک و فعالیت ریشه گیاهان به دولایه با چگالی متفاوت تبدیل می‌شوند. به طوریکه غالباً لایه بالایی دارای بافتی سبکتر نسبت به لایه پایینی می‌باشد. بنابراین مطالعه الگوی خیس‌شدگی خاک توسط قطره‌چکان‌ها در خاک‌های دو لایه می‌تواند به افزایش دقت تعیین ابعاد پیازچه رطوبتی و بهبود عمل‌کرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای کمک نماید.

بررسی‌های گسترده‌ای با استفاده از مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای تخمین ابعاد خیس‌شده در آبیاری قطره‌ای انجام شده است. شوارتزن و زور از اولین کسانی بودند که به منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی گام‌های موثری برداشتند. آنها توانستند روابط نیمه تجربی را برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی به ازای منبع تغذیه نقطه-ای و خطی به دست بیاورند (شوارتزن و زور، ۱۹۸۶). لافولیه و همکاران راه حل عددی جدیدی را برای حل معادله دیفرانسیلی حاکم بر جریان آب در محیط غیر اشباع خاک ارائه نمودند.

این راه حل عددی قادر است تا در محیط‌های چند لایه خاک و در حالتی که خاک ناهمسان است، مساحت خیس شده را پیش‌بینی کند (لافولیه و همکاران، ۱۹۸۹). چن و همکاران به منظور حل تحلیلی رابطه ریچاردز روشی را با فرض دبی ثابت از منبع خطی ارائه نمودند. ایشان راه‌حل تحلیلی را برای محاسبه توزیع مقدار رطوبت در حین آبیاری با استفاده از حل معادله دو بعدی خطی شده ریچاردز به دست آوردند (چن و همکاران، ۲۰۰۶). کندلوس و سیمونک دقت چند روش از جمله مدل عددی هایدروس، نرم افزار تحلیلی وت آپ و برخی

های نصب شده بر روی لترال‌ها از نوع داخل خط و با دبی چهار لیتر در ساعت انتخاب گردیدند. لازم به ذکر است که دبی قطره‌چکان‌ها به صورت حجمی در ابتدای آزمایش‌ها اندازه‌گیری و تنظیم شدند تا اختلاف بین دبی-های قطره‌چکان‌ها در طول چهار لترال به حداقل ممکن برسد. از آنجایی که ابعاد مرطوب شده خاک به مدت زمان آبیاری بستگی دارد و از طرف دیگر قطر خاک مرطوب شده نسبت به عمق تغییر می‌کند لذا پس از هر آزمایش با حفر ترانشه در زیر قطره چکان پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی تحت منبع خطی در زمان‌های یک، سه، پنج و هفت ساعت پس از شروع آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد (پلنگی و آخوندعلی، ۱۳۸۷)، (مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۷۷)، (آرمسترانگ و ویلسون ۱۹۸۳)، (اخماج و همکاران، ۲۰۰۵) و (کلر و بیلینسنر، ۱۹۹۰). یکی از فاکتورهای موثر بر وضعیت جبهه رطوبتی تشکیل شده، حجم آب مصرفی است.

در این تحقیق مطابق مدت زمان‌های پخش آب چهار حجم ۴، ۱۲، ۲۰ و ۲۸ لیتر مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات خاک‌های هر دو لایه شامل چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و دانه بندی خاک با انجام آزمایش‌های مورد نیاز تعیین شدند. در جدول (۱) نتایج حاصل از آزمایش‌های خاک‌شناسی خاک مورد مطالعه در دو لایه ارائه گردیده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول (۱) لایه اول خاک دارای بافت سبک و لایه پایین نسبت به آن از بافت سنگین تری برخوردار می-باشد.

شبیه‌سازی شده توسط مدل هایدروس و صحت سنجی مدل مذکور در شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی خاک در این شرایط و همچنین پیشنهاد فاصله بهینه برای قطره-چکان‌ها می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

به منظور تعیین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دولایه، آزمایش‌های صحرائی در اراضی تحقیقاتی کرکج متعلق به دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام گردید طول و عرض جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۰°، ۴۶° و ۱°، ۳۸° و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۶۷ متر می‌باشد. به منظور بررسی اثر لایه‌های خاک بر روی وضعیت جبهه رطوبتی، قطعه زمینی با ابعاد ۴×۲/۵ متر برای ایجاد خاک دو لایه انتخاب شد. خاک این قطعه را تا عمق ۴۰ سانتی‌متر خارج کرده و آنرا با خاک شنی با نسبت ۱:۱ مخلوط و سپس خاک مخلوط شده به درون قطعه برگردانده شد.

از آنجایی که تراکم خاک نقش مهمی در حرکت آب در خاک و شکل پیاز رطوبتی دارد، خاک مخلوط شده را به صورت لایه لایه ریخته و با کوبیدن خاک به تراکم مورد نظر یعنی در حدی که جرم مخصوص ظاهری آن به حدود ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در حد خاک‌های طبیعی رسانده شد. به منظور انجام آزمایش‌ها یک سیستم آبیاری قطره‌ای شامل یک لوله مانیفولد، چهار لوله لترال نصب شده بر روی مانیفولد به فواصل یک متر و هر کدام به طول دو متر و فاصله قطره‌چکان‌های ۴۰ سانتی‌متر ایجاد گردید. قطره چکان-

جدول ۱- دانه‌بندی خاک مورد

عمق لایه (cm)	توزیع ذرات بافت خاک		
	درصد شن (۵۰-۲۰۰۰ $\mu$ m)	درصد سیلت (۲-۵۰ $\mu$ m)	درصد رس (>۲۰۰ $\mu$ m)
۴۰-۰	۸۴/۵	۳/۵	۱۲
۱۰۰-۴۰	۶۹	۷	۲۴

هدایت هیدرولیکی	چگالی ظاهری ( $\rho_{app}$ )
۶	۱/۴۵
۴/۵	۱/۶

که در این معادله  $K_r$  هدایت هیدرولیکی نسبی و  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$  می‌باشد.

پس از تعریف هندسه محدوده، شرایط اولیه (رطوبت اولیه خاک قبل از آزمایش) و مرزی (موقعیت قطره‌چکان) به صورت فلوی ثابت جریان در قسمت بالای محدوده برای المان‌های نمایانگر قطره‌چکان استفاده شد. شرط مرزی دوم زهکشی آزاد بود که در قسمت پایین محدوده و به منظور جلوگیری از اشباع شدن محدوده تعریف گردید. همچنین به منظور انتخاب فاصله بهینه برای قطره-چکان‌ها، مقادیر حداکثر عرض خیس شدگی در لایه اول و دوم مشخص گردید. سپس بر اساس رابطه زیر که توسط کلر و بلیسنر (۱۹۹۰) توصیه شده است، فاصله بهینه قطره‌چکان برای هر دولایه خاک به دست آمد.

$$s_p^* = \pi / R_w \quad (3)$$

در رابطه بالا  $w$  حداکثر قطر خیس شده (سانتی‌متر) و  $s_p^*$  فاصله بهینه برای قطره‌چکان می‌باشد.

## نتایج و بحث

### نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی

شکل (۱) پروفیل پیش‌روی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با دبی چهار لیتر بر ساعت و با گذشت یک، سه، پنج و هفت ساعت از شروع آبیاری را در دولایه خاک نشان می‌دهد.

ابعاد خاک مرطوب در آبیاری قطره‌ای با منبع خطی و در خاک دو لایه در هر چهار آزمایش تعیین گردید. یکی از پارامترهای مهم در آبیاری قطره‌ای، حداکثر عرض خیس شده است، به این دلیل که هر چه آب در عرض گسترش پیدا کند از گسترش آن در عمق جلوگیری می‌شود. در نتیجه تلفات عمقی آن کاهش می‌یابد به همین دلیل این پارامتر مهم در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

پس از تعیین ابعاد خیس شده خاک تحت منبع خطی در جهت افقی و عمودی، مقادیر پیش‌روی افقی و عمودی جبهه خیس شدگی نسبت به زمان و حجم آب به کار برده شده مورد مقایسه قرار گرفت و اثر زمان و حجم آب پخش شده بر این ابعاد مورد بررسی شد. به منظور شبیه سازی عددی چگونگی توزیع رطوبت حاصل از آبیاری قطره‌ای در خاک دولایه از نرم افزار هایدروس دو بعدی استفاده گردید.

### مدل هایدروس

مدل هایدروس معادله ریچاردز را به طور عددی برای جریان آب غیراشباع و معادلات نوع همرفت-انتشار را برای انتقال گرما و مواد محلول حل می‌کند. همچنین این برنامه می‌تواند برای تحلیل حرکت آب و مواد محلول در محیط متخلخل غیر اشباع استفاده نمود.

### معادله ریچاردز

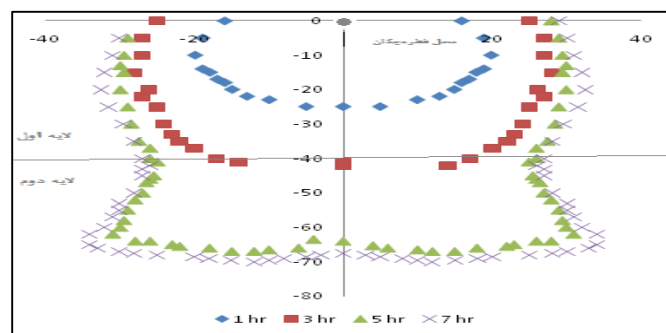
شکل اصلاح شده معادله ریچاردز<sup>۲</sup> که از ترکیب معادله پیوستگی جریان و قانون دارسی به دست می‌آید، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz}^A \right) \right] \quad (1)$$

که در آن  $\theta$  مقدار حجمی آب  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $h$  بار فشاری  $[L]$ ،  $x_i$  ( $i = 1, 2$ ) مختصات فضایی  $[L]$ ،  $t$  زمان  $[T]$ ،  $K_{ij}^A$  مولفه‌های بی بعد تانسور ناهمسانی  $K^A$  می‌باشند.  $K$  عبارت است از تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $[LT^{-1}]$  که بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$K(h, x_i) = K_s(x_i) K_r(h, x_i) \quad (2)$$

<sup>2</sup>. Richards equation



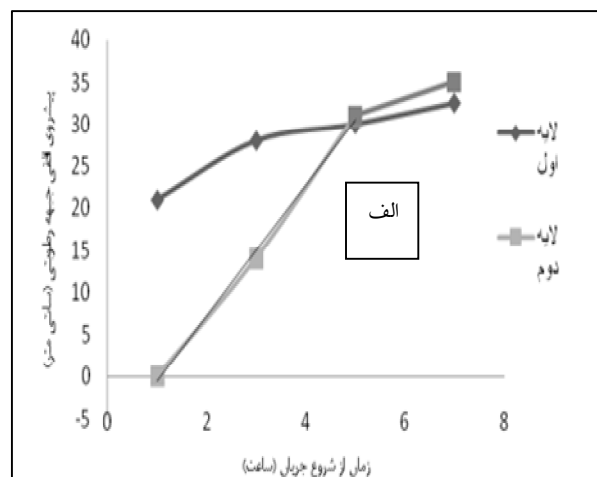
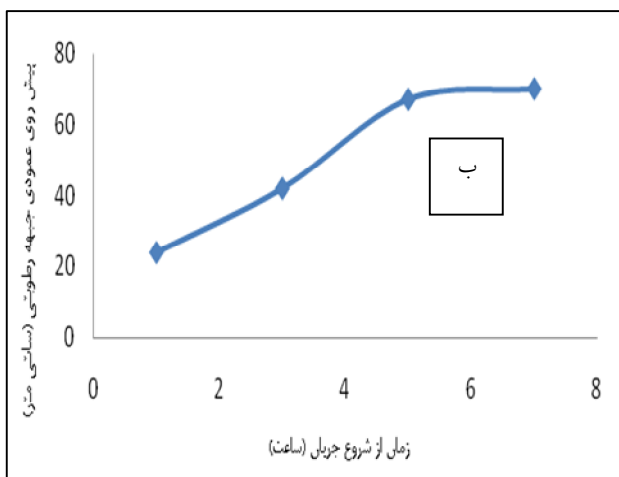
فاصله افقی از محل قطره‌چکان

فاصله قائم از محل قطره‌چکان

شکل ۱- پروفیل پیش‌روی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای در خاک دو لایه

نرسیده، پیشروی افقی در آن وجود ندارد. در لایه دوم که بافت سنگین‌تری نسبت به لایه بالایی دارد نیز تغییرات پیشروی افقی بعد از گذشت پنج ساعت از زمان آبیاری جزئی می‌باشد و این امر به دلیل بافت سنگین این لایه می‌باشد که پیشروی را کند کرده و حجم آب در این ناحیه افزایش یافته است.

مقادیر حداکثر پیشروی افقی جبهه رطوبتی با زمان برای لایه اول و دوم در شکل (۲ الف) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، در حالت کلی پیشروی افقی جبهه رطوبتی با گذشت زمان در هر دو لایه افزایش یافته است. در آزمایش اول با مدت زمان آبدهی یک ساعت به دلیل این‌که هنوز جبهه رطوبتی به لایه دوم



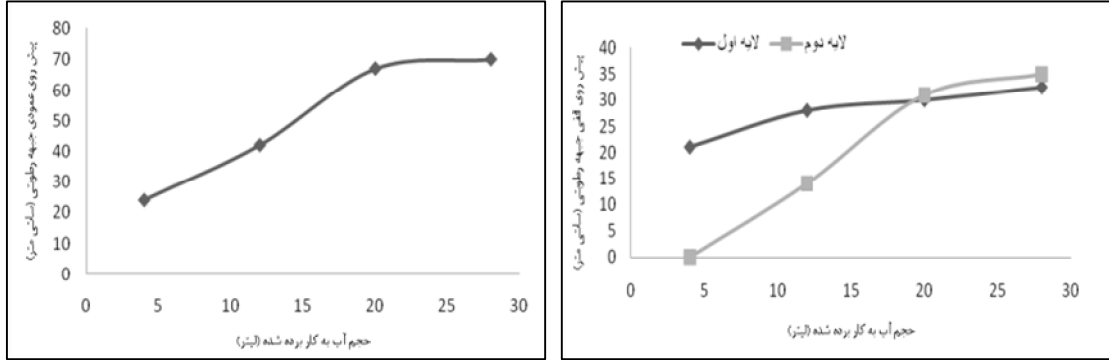
شکل ۲- مقایسه پیش‌روی افقی (الف) و پیشروی عمودی (ب) جبهه رطوبتی در لایه اول و دوم نسبت به زمان

زمان پیشروی عمودی جبهه رطوبتی افزایش یافته است. ابعاد جبهه رطوبتی خاک از حجم آب به کار برده شده تاثیر می‌پذیرد. افزایش حجم آب به کار برده شده باعث افزایش پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی می‌شود. شکل (۳ الف) رابطه بین پیش‌روی افقی و حجم آب

شکل (۲ ب) حداکثر پیشروی عمودی جبهه رطوبتی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار و شکل (۱) استنباط می‌شود در آزمایش اول با مدت زمان آبدهی یک ساعت، جبهه رطوبتی به لایه دوم نرسیده است، اما می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت

پیشروی جبهه رطوبتی هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی افزایش می‌یابد.

به کار برده شده و شکل (۳ ب) رابطه بین پیشروی عمودی و حجم آب به کار برده شده در چهار آزمایش را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها با افزایش حجم آب



شکل ۳- پیشروی افقی (الف) و عمودی (ب) جبهه رطوبتی نسبت به حجم آب

ب

به کار برده شده

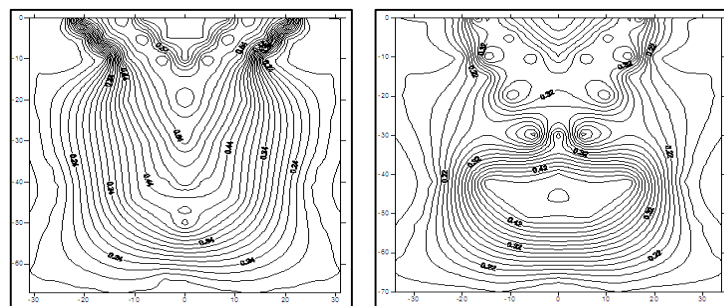
الف

لایه دوم بعد از گذشت پنج ساعت رو به افزایش می‌باشد اما با توجه به شکل (۲) پیشروی جبهه رطوبتی هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی بعد از گذشت پنج ساعت بسیار کند می‌باشد که این موضوع به دلیل بافت سنگین این لایه و بالا بودن چگالی ظاهری آن می‌باشد که مانع از پیشروی جبهه رطوبتی شده و میزان رطوبت ذخیره شده در آن افزایش یافته به عبارت دیگر آب را در خود نگه داشته است.

شکل (۴ الف و ب)، بر اساس مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده منحنی‌های هم رطوبت خاک را در دو لایه به ترتیب با گذشت پنج و هفت ساعت از شروع آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که از این منحنی‌ها استنباط می‌شود، در لایه اول با توجه به بافت سبک آن پیش روی جبهه رطوبتی بیشتر به صورت عمودی می‌باشد و هر چه از محل قطره‌چکان دورتر می‌شویم، از میزان رطوبت خاک کم می‌شود. اما به دلیل این که لایه دوم دارای بافت سنگین‌تری نسبت به لایه بالایی می‌باشد، پیشروی جبهه رطوبتی بیشتر به صورت افقی می‌باشد و مقدار رطوبت در

قطره چکان

ب



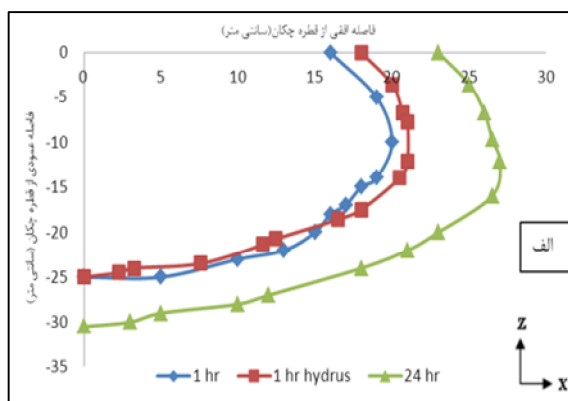
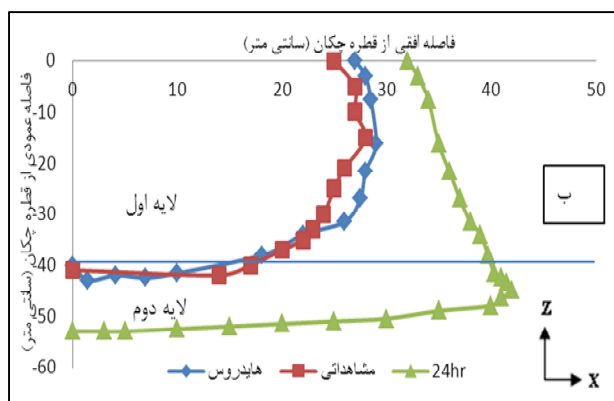
الف

شکل ۴- الف - منحنی‌های هم رطوبت بعد از گذشت پنج ساعت از زمان آبیاری. ب - منحنی‌های هم رطوبت بعد از گذشت هفت ساعت از زمان آبیاری

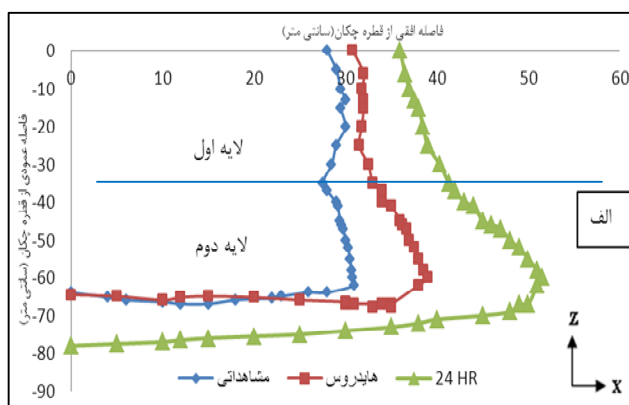
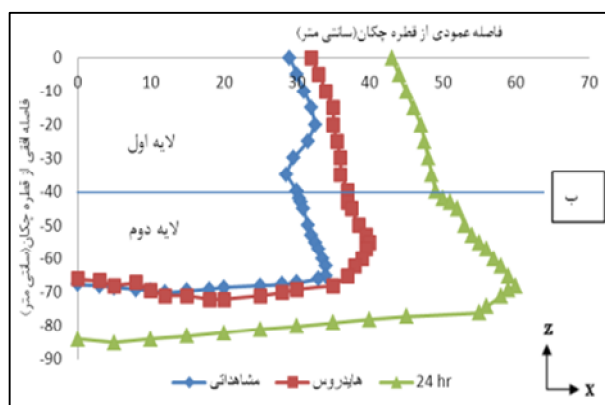
گسترش یافته است. در این شکل با مقایسه دو منحنی مشخص می‌گردد که مدل هایدروس توانسته به خوبی گستردگی رطوبت در خاک شن لومی را بعد از گذشت یک ساعت از شروع آبیاری شبیه‌سازی نماید.

نتایج حاصل از تحقیقات یائو و همکاران (۲۰۰۴) و کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) با نتایج حاصله مطابقت دارد. شکل (۵ ب) نیز جبهه رطوبتی شبیه‌سازی شده توسط مدل هایدروس و مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایشات صحرائی بعد از گذشت سه ساعت از شروع آزمایش در خاک دو لایه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که تفاوت محسوسی بین دو منحنی وجود ندارد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط مدل هایدروس پس از اجرا کردن مدل هایدروس برای خاک دولایه مورد آزمایش، منحنی‌های پیش‌روی برای چهار آزمایش با دبی چهار لیتر در ساعت رسم گردید. منحنی‌های مذکور در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها همچنین منحنی مربوط به توزیع مجدد جبهه رطوبتی بعد از گذشت ۲۴ ساعت از قطع جریان که توسط مدل هایدروس شبیه‌سازی شده است، آورده شده است. شکل (۵) پیش‌روی جبهه رطوبتی در خاک دولایه بعد از گذشت یک و سه ساعت و شکل (۶) پیش‌روی جبهه رطوبتی در خاک دولایه بعد از گذشت پنج و هفت ساعت از زمان آبیاری را نشان می‌دهد. بعد از گذشت یک ساعت از شروع آزمایش جبهه رطوبتی تنها در لایه اول



شکل ۵- پروفیل پیش‌روی جبهه رطوبتی با گذشت یک ساعت (الف) و سه ساعت (ب) از شروع



شکل ۶- پروفیل پیش‌روی جبهه رطوبتی با گذشت پنج ساعت (الف) و هفت ساعت (ب) از شروع آزمایش

پیشروی افقی و پیشروی عمودی جبهه رطوبتی می‌باشند. با توجه به مقادیر  $R^2$  و RMSE این جدول، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای توزیع عمودی و افقی رطوبت در خاک دو لایه تطابق خوبی دارند. در لایه دوم به دلیل بافت متفاوت آن، توزیع رطوبت اندکی متفاوت‌تر از لایه اول می‌باشد، که مدل نتوانسته به خوبی آنرا شبیه‌سازی کند. مدل هایدروس قادر به شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک نیز می‌باشد.

جدول (۳) مقایسه میان مقادیر رطوبتی به دست آمده از مدل هایدروس و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. با توجه به این جدول تفاوت چندانی بین این مقادیر وجود ندارد و همانند داده‌های مشاهداتی، مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده نیز در مرز بین دو لایه به دلیل حرکت کند آب در لایه دوم، افزایش یافته و مقدار رطوبت خاک حتی از مقدار رطوبت در محل قطره‌چکان نیز بیشتر می‌باشد. همین‌طور به منظور پیشنهاد فاصله بهینه برای قطره‌چکان‌ها تحت منبع خطی در آبیاری قطره‌ای، مقادیر حداکثر قطر خیس شده در هر چهار آزمایش اندازه‌گیری شد و بر اساس رابطه (۳) فاصله بهینه برای قطره‌چکان‌ها بدست آمد، که این نتایج در جدول (۴) گنجانده شده است.

همان‌طور که از جدول (۴) پیداست، با گذشت مدت زمان آبیاری مقدار حداکثر عرض خیس شده در جبهه رطوبتی و همچنین عمق آن تغییر چندانی نداشته است و این مطلب نشان دهنده این است که عرض خیس شده در لایه اول به مقدار ثابت میل می‌کند و پیشروی در لایه اول عمدتاً به صورت عمودی می‌باشد که این مطلب با یافته‌های آرمسترانگ و ویلسون (۱۹۸۳)، کلوتیر و همکاران (۱۹۸۵) و اخماج و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت دارد. جدول (۴) شامل مقادیر فاصله بهینه قطره‌چکان‌ها می‌باشد توجه به جدول (۴) ب، فاصله بهینه قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای را بسته به حجم آب به کار برده شده می‌توان بین ۴۵ تا ۸۰ سانتی‌متر پیشنهاد کرد.

شکل ۶ (الف) پروفیل پیشروی جبهه رطوبتی با گذشت پنج ساعت از شروع آزمایش برای مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل هایدروس و مشاهداتی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید، بعد از گذشت پنج ساعت از آبیاری جبهه رطوبتی به لایه دوم رسیده و در حال گسترش در آن می‌باشد. با توجه به اینکه لایه دوم بافت سنگین‌تری نسبت به لایه بالا دارا می‌باشد، می‌توان اظهار داشت که زمانی که آب به لایه دوم می‌رسد ابتدا توانایی نفوذ در آن را ندارد بنابراین در امتداد مرز بین دو لایه بصورت افقی گسترش می‌یابد و آب در مرز تجمع پیدا کرده و سپس گسترش عمودی جبهه رطوبتی در لایه دوم آغاز می‌شود. منحنی‌های هم رطوبت خاک در شکل (۴) نیز مویید این مطلب می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمایش صحرائی و شبیه‌سازی شده با مدل هایدروس از نظر نحوه گسترش آب در لایه دوم با مکانیسم نفوذ آب در خاک سنگین مطابقت دارد، اما چنین به نظر می‌رسد که مدل هایدروس گسترش جبهه رطوبتی در لایه دوم را به خوبی شبیه‌سازی نکرده است. شکل ۶ (ب) پروفیل پیشروی جبهه رطوبتی در خاک دو لایه بعد از گذشت هفت ساعت از شروع آزمایش را نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل مدل هایدروس گستردگی افقی پیاز رطوبتی را بیشتر از مقدار مشاهداتی پیش‌بینی نموده است. با مقایسه شکل ۶ (الف و ب) و با در نظر گرفتن این‌که ابعاد جبهه رطوبتی در پنج و هفت ساعت آبیاری تفاوت چندانی نداشته است شکل (۱)، می‌توان گستردگی بیشتر جبهه رطوبتی مربوط به توزیع مجدد رطوبت در هفت ساعت آبیاری نسبت به پنج ساعت را توجیه کرد که به دلیل مقدار رطوبت بیشتر خاک در پیاز رطوبتی مربوط به هفت ساعت آبیاری می‌باشد همان‌طور که در شکل (۴) نیز نشان داده شده است. جدول (۲) مقادیر  $R^2$  و RMSE مربوط به مقادیر X و Z نظیر نقاط شبیه‌سازی شده و مشاهداتی واقع در جبهه رطوبتی را نشان می‌دهد. در این جدول X و Z به ترتیب نشان‌گر



جدول ۲-  $R^2$  و  $RSME$  مربوط به مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

مدت زمان آبیاری (ساعت)	پیشروی جبهه رطوبتی	$R^2$	RMSE
۱	X	۰/۹۵۶	۱/۶۸۳
	Z	۰/۹۵۸	۲/۵۷
۳	X	۰/۸۱۴	۵/۰۸۳
	Z	۰/۹۸۷	۲/۰۸
۵	X	۰/۸۸۳	۶/۳۳
	Z	۰/۹۹۹	۰/۲۰۶
۷	X	۰/۸۷۲	۴/۸
	Z	۰/۹۹۶	۱/۳۲

جدول ۳- مقادیر  $R^2$  و  $RSME$  مربوط به مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای منبع خطی

مدت زمان آبیاری (ساعت)	$R^2$	RMSE
۱	۰/۹۶۵	۱/۱۴
۳	۰/۹۸۴	۱/۸۲۱
۵	۰/۹۷۶	۲/۶۴۲
۷	۰/۹۴۹	۳/۲۰۸

جدول ۴- حداکثر قطر خیس شدگی و فاصله بهینه قطره‌چکان در لایه اول (الف) فاصله بهینه قطره‌چکان و برای توزیع مجدد (ب)

ساعت آبیاری	حجم آب به کار برده شده (لیتر)				ساعت آبیاری	W (cm)	$S_z^*(cm)$	Z(cm)
	۱	۴	۵۴	۴۳/۲				
۱	۴	۵۴	۴۳/۲	-۱۲/۱۲	۱	۴۰	۲۸	-۱۰
۳	۱۲	۷۹/۶	۶۳/۶۸	-۳۸	۳	۵۶	۴۴/۸	-۱۵
۵	۲۰	۸۶	۶۸/۸	-۴۰	۵	۶۰	۴۸	-۱۵
۷	۲۸	۹۷	۷۷/۶	-۴۰	۷	۶۵	۵۲	-۲۰

ب

الف

### نتیجه‌گیری

حجم آب به کار برده شده، پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی افزایش یافته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توزیع رطوبت در خاک دو لایه نیز نشان دهنده توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی پیشروی رطوبت در خاک دولایه تحت منبع خطی است. مطالعه پیشروی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای در خاک دو لایه می‌تواند در

نتایج بررسی منحنی‌های پیشروی افقی و عمودی جبهه رطوبتی با زمان و حجم آب به کار برده شده در چهار آزمایش برای خاک دو لایه نشان داد که گسترش افقی پیاز رطوبتی در خاک سنگین‌تر پایینی بیشتر از خاک سبک‌بالایی است و همچنین با افزایش

جهت مدیریت بهینه آب در مزرعه و افزایش راندمان کاربرد آب و جلوگیری از تلفات عمقی مفید واقع شود. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن توزیع مجدد رطوبت پس از گذشت ۲۴ ساعت از قطع جریان، فاصله بهینه قطره‌چکان را پیشنهاد داد.

### فهرست منابع

۱. پلنگی، ج.ع. و ع.م. آخوند علی. ۱۳۸۷. یک مدل نیمه تجربی به منظور تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای، تحت منبع نقطه‌ای. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۴۴): ۸۵-۹۵.
۲. تیشه زن، پ. و س.ف. موسوی. ۱۳۸۵. بررسی پیشروی جبهه رطوبتی تحت منبع نقطه‌ای در خاکهای مطبق با سطوح شیبدار. اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی اهواز.
۳. حسینی نیا، م.، کریمی گوغری، ش.، نقوی، ه. و ایراندوست، م. ۱۳۸۹. استفاده از مدل شبیه‌ساز HYDRUS-2D جهت ارزیابی حجم خاک مرطوب شده در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا.
۴. زارع ابیانه، ح.، ا. فرخی، م. وظیفه دوست. و خ. اژدری. ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز، نشریه آب و خاک. ۲۴(۶): ۱۱۹۷-۱۲۰۹.
۵. مصطفی‌زاده، ب.، س.ف. موسوی. و م.ح. شریف بیان الحق. ۱۳۷۷. پیشروی جبهه رطوبتی از منبع نقطه‌ای در سطوح شیب‌دار. نشریه کشاورزی و منابع طبیعی. ۲(۳): ۱۳-۲۲.
۶. ملک، ک.، ت. کریمی، م. حیدری. و م. ملایی کندلوس. ۱۳۸۸. باریابی ضرایب معادله زور و شوارتزمن در تخمین ابعاد پیاز رطوبتی به دو روش رگرسیون غیرخطی و بهینه‌سازی با حداقل مربعات. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب شاهرود.
۷. کاظمی، ه. (۱۳۹۰). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز.
8. Armstrong, C. and Wilson, T.V. 1983. Computer model for moisture distribution in stratified soils under trickle source. Transaction of American society of agricultural engineers. 26: 1704- 1709.
9. Chen , J.M. , Tan, Y.C. and Wu , Y.Z. 2006 . A study of the Infiltration of trickle irrigation. 7<sup>th</sup> International micro irrigation congress. September 10-16 Kuala Lumpur, Malaysia.
10. Clothier, B., Scotter, D., and Harper, E. 1985. Three dimensional infiltration and trickle irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering- ASCE, 25(2), 479-501.
11. Dabral, P.P., Pandey, P.k., Pandey, A., Singh, K.p., Singh, M.S. 2012. Modelling of wetting pattern under trickle source in sandy soil of Nirjuli, Arunachal Pradesh (India). Irrigation Science. 30(1):287-292.
12. Hachum, A.Y. 1973. Water movement in soil from a trickle source. M.Sc. Thesis, Utah State University. Logan, Utah, USA.
13. Ekhmaj, A.I., Amin, M.S.M., Salim, S., and Zakaria, A.A. 2005. Wetted surface radius under point-source trickle irrigation in sandy soil. Agriculcher engineering. 14(2): 67-75.
14. Jiu-sheng LI, Hong-yan JI, Bei LI and Yu-chun LIU. 2007. Wetting patterns and nitrate distributions in layered-textural soils under drip irrigation. Agricultural sciences in China. 6(8): 970-980.

15. Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28(5): 435-444.
16. Keller, J and Bliesner, R.D. 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.
17. Lafolie, F., Guennelon, R., van Genuchten M. T. 1989. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil science Society of American journal*. 53(5) : 1310-1318.
18. Li, J., Zhang, J., Rao M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distribution as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agriculture Water Management*. 67:89- 104.
19. Peter, J., Thorburn, J., Cook, F., Bristow, K.L. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*. 22: 121-127.
20. Schwartzman, M., and Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*. 112(3), 242-253.
21. Sepaskhah, A.R. and Chitsaz, H. 2004. Validating the green- ampt analysis of wetted radius and depth in trickle irrigation. *Bio systems engineering*. 89(2): 231- 236.
22. Yao, P., Dong, X. and Hu, A. 2011. Using HYDRUS-2D Simulate Soil Water Dynamic in jujube root zone under drip irrigation. *Water Resource and Environmental Protection*. May, 20-22. Urumqi, China.

