

## کاربرد مدل Hydrus-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی

حسین دهقانی سانج<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا حاجی آقا بزرگی<sup>۲</sup>، الهه کنعانی<sup>۳</sup>، غزل دهقانی سانج<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۳۰

### چکیده

سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی روش مناسبی برای تأمین آب مورد نیاز گیاهان در محیط ریشه می‌باشد. مدیریت این روش آبیاری متکی بر علم توزیع آب در حجم خاک مرطوب است. مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری می‌توانند در بدست آوردن این دانش ارزشمند بکارگرفته شوند. در این پژوهش شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D و براساس یک تحقیق میدانی در در یک باغ پسته در منطقه صفاییه از توابع شهرستان سرخه در استان سمنان در طی سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. تیمارهای پژوهش شامل سه رژیم آبیاری منطبق بر مدیریت زارع (I1)، نیاز آبی (I2) و نیاز آبی و آبیویی (I3)، سه عمق نمونه‌گیری ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری و در زمان قبل و بعد از آبیاری بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در منطقه ریشه گیاه، درصد رطوبت حجمی مشاهده‌ای و برآورد شده نسبتاً بهم نزدیک بودند و حاکی از آن بود که مدل HYDRUS-2D قادر به شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته است و این توانایی را دارد که شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره آبیاری و تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و در اعماق مختلف خاک با دقت بالایی تخمین بزند. روند برآورد مدل در توزیع افقی و عمودی رطوبت نسبت به مقادیر مشاهده‌ای حالت بیش‌برآورد داشت. ارزیابی‌های آماری نیز با توجه به پارامترهای ضریب تبیین بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۰ و RMSE بین ۲/۲۳ تا ۴/۰۱ حاکی از دقت خوب مدل عددی HYDRUS-2D و توانایی خوب مدل در پیش‌بینی مقدار رطوبت در شرایط مزرعه‌ای بود.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی آبیاری، توزیع رطوبت، رژیم آبیاری، مدیریت آبیاری، HYDRUS-2D

### مقدمه

عمق و فاصله لوله‌های قطره‌چکان‌دار، طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود کارایی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارد (Phull et al., 2012). الگوی خیس شدن خاک می‌تواند به وسیله اندازه‌گیری مستقیم فرایند خیس شدن خاک در مزرعه یا با شبیه‌سازی توسط مدل‌های خاص به دست آید. مدل‌های عددی زیادی ارائه شده‌اند که با داشتن مشخصه‌های هیدرولیکی خاک، دبی خروجی و حجم آب خارج شده می‌توانند تخمین قابل‌قبولی از شکل پیاز رطوبتی ارائه دهند (ملایی کندلوس و همکاران، ۱۳۸۷). در این میان مدل عددی HYDRUS-2D یکی از مدل‌هایی است که حرکت آب، املاح و گرما را در خاک شبیه‌سازی می‌کند (Simunek et al., 2006). توانایی مدل عددی HYDRUS-2D در نقاط مختلفی از جهان به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای نفوذ آب و تجمع نمک در اطراف قطره‌چکان‌های نصب شده در زیر سطح خاک، مورد ارزیابی قرار گرفته است و مناسب بودن مدل و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی گزارش شده است (Roberts et al., 2009). کارایی خوب مدل HYDRUS-2D در تخمین الگوی رطوبتی ایجاد شده با استفاده از لوله‌های سفالی ۲۰ متری و کارگذاری شده در عمق ۴۰ سانتی‌متری نیز ارائه شده است

از مزایای سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تأمین نیاز واقعی گیاهان در منطقه توسعه ریشه می‌باشد. طراحی صحیح این سامانه آبیاری باید به گونه‌ای انجام گیرد که آب در محیط ریشه به طور یکنواخت و به اندازه کافی توزیع گردد. برای دستیابی به این مزیت باید از نحوه توزیع آب در خاک به صورت افقی و عمودی در شرایط مزرعه به خوبی اطلاع داشت (Dos Santos et al., 2016). شناخت الگوی خیس شدن خاک و حرکت آن نقش مهمی در تصمیم‌گیری

- ۱- دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران
  - ۲- کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران
  - ۳- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
  - ۴- دانشجوی کارشناسی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
- \* نویسنده مسئول: (Email: h.dehghansanj@areeo.ac.ir)

در محدوده ریشه گیاه مؤثر و مفید می‌باشد (Mguidiche et al., 2015). با توجه به توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع آب خاک و نیز نقش مهم آن در تصمیم‌گیری عمق و فاصله لوله‌های قطره‌چکان‌دار، طراحی و برنامه ریزی آبیاری و با در نظر گرفتن اهمیت سامانه قطره‌ای زیرسطحی و کارایی خوب این سامانه آبیاری در شرایط کمبود آب در مقایسه با دیگر روش‌های آبیاری، در این تحقیق سعی بر آن شد که استفاده از مدل HYDRUS-2D را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در درختان پسته مورد ارزیابی قرار دهد.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در طی سال زراعی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ در باغی به وسعت ۱۰۰ هکتار در منطقه‌ی صفائیه، از توابع شهرستان سرخه در استان سمنان با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب برابر با ۵۳°۱۲' و ۳۵°۲۸' و با ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریا انجام شد. اجرا شد. اجرای پروژه در مساحتی حدود ۲ هکتار از این باغ که دارای درختان پسته با سن تقریبی ۱۰ سال بود انجام گرفت. آرایش درختان بر روی ردیف ۳ متر و بین ردیف ۷ متر بود. به منظور تعیین مشخصات خاک قبل از مراحل آماده‌سازی زمین، نمونه‌گیری از اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰ و ۵۰-۷۵ سانتی‌متری خاک انجام شد. با قرار دادن نمونه‌های خاک اشباع شده (اشباع در آزمایشگاه) در دستگاه سلول فشاری با تنظیم فشار در یک سوم بار به مدت ۲۴ ساعت، مقدار رطوبت برای ظرفیت زراعی محاسبه گردید. مقدار رطوبت نقطه پژمردگی دائم در هر لایه نیز با قرار دادن نمونه‌های خاک اشباع شده (اشباع در آزمایشگاه) هر لایه در دستگاه سلول فشاری (pressure cell) و با تنظیم فشار در ۱۵ بار (مکش ۱۵ اتمسفر) بدست آمد. مشخصات خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باغ تجهیز شده به لوله‌های قطره‌چکان‌دار داخل خط (in-line) شرکت یورودریپ نصب شده در عمق ۴۰ سانتی متری بود. قطره‌چکان‌های این لوله‌ها از نوع تنظیم کننده فشار، با فاصله ۸۰ سانتی‌متری و آبدهی ۲/۲۶ لیتر در ساعت بود. لوله‌های قطره‌چکان‌دار در فاصله یک متر از درخت و با آرایش دو ردیفه قرار گرفته بودند.

(Siyal and Sakaggs, 2009). با مدل کردن آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه نتایج حاصل با مدل تحلیلی و عددی HYDRUS-2D مشاهده شد که روند تغییرات دبی بر الگوی رطوبتی و نفوذ عمقی تأثیرگذار بود اما بر مقدار تبخیر-تعرق تأثیری نداشت. همچنین نشان داد که تأثیر خصوصیات هیدرولیکی خاک بر هندسه خیس شده توسط قطره‌چکان تأثیرگذار است (Elmaloglou and Diamantopoulos, 2009). توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی حجم آب خاک پنبه با دقت بالا و مفید بودن این شبیه‌سازی‌ها در طراحی مطلوب سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در کشت پنبه در مقایسه با داده‌های تجربی گزارش شد (Zhang et al., 2017). مقایسه گرافیکی و آماری مقادیر هفتگی و شبیه‌سازی شده توزیع رطوبت و شوری در عمق و فاصله‌های مختلف از قطره چکان در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی در باغ درختان بادام نیز تطبیق قابل‌قبولی از این مقایسه را گزارش کرد (Phogat et al., 2013). پیش‌بینی دقیق حجم آب خاک در منطقه ریشه گیاه سیب‌زمینی و همچنین الگوی توزیع متوسط مقادیر غلظت نمک خاک در اطراف قطره‌چکان‌ها تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی گزارش شد و بر طبق پیش‌بینی مدل بیشترین تجمع املاح در اطراف پیاز رطوبتی مشاهده شد که با نتایج داده‌های اندازه‌گیری برآورد نسبتاً نزدیکی را داشتند (Mguidiche et al., 2015). عملکرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع آب خاک در عمق ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری کارگزاری لوله‌های قطره‌چکان‌دار دارای دقت بالا و اختلاف ناچیزی در مقایسه با داده‌های واقعی مزرعه دارا بود و این شبیه‌سازی به طراحی سامانه قطره‌ای زیرسطحی برای استفاده کارآمد از آب با حداقل زهکشی کمک می‌کند (Patel and Rajput, 2008). تحقیقات انجام شده در نقاط مختلف جهان توانایی مدل HYDRUS-2D را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت و نیز تجمع املاح را در نزدیکی قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد استفاده در محصولات زراعی و باغی را تحت شرایط مختلف محیطی نشان دادند و نیز کارآمدی بالای مدل شبیه‌سازی را در تشخیص تکامل پیاز رطوبتی در شرایط خاک‌های غیر اشباع، برای شناسایی زمان آبیاری به منظور به حداکثر رساندن بهره‌وری استفاده از آب را گزارش کردند. آگاهی از نحوه توزیع آب خاک برای تعیین پارامترهای طراحی، مانند نصب بهینه عمق لوله‌های قطره‌چکان‌دار و بهترین ترکیب فاصله قطره‌چکان‌ها و نرخ‌های جریان به منظور تأمین رطوبت بهینه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

عمق خاک (cm)	بافت خاک	رس (%)	شن (%)	سیلت (%)	جرم مخصوص ظاهری خاک (g/cm <sup>3</sup> )	رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (%)	رطوبت وزنی در حد پژمردگی دائم (%)
۰-۲۵	لوم‌شنی	۶	۸۱	۱۳	۱/۶۲	۱۱/۸۵	۴/۳۹
۲۵-۵۰	لوم‌شنی	۴	۷۷	۱۹	۱/۵۶	۱۱/۹۷	۵/۱۲
۵۰-۷۵	لوم‌شنی	۴	۸۱	۱۵	۱/۵۵	۱۲/۸۸	۵/۵۲

آبیاری (یک روز درمیان) محاسبه شد. عمق ناخالص آبیاری ( $d_g$ ) نیز با احتساب مقدار راندمان آبیاری موردانتظار در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۹۰ درصد بر حسب (میلی‌متر) به دست آمد. حجم کل مقدار آب آبیاری ( $d_g$ ) در تیمارهای رژیم آبیاری  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  به ترتیب برابر  $۶۲۵۴/۲۹$ ،  $۹۲۹۰/۷۹$  و  $۱۰۶۸۲/۲۴$  مترمکعب در هکتار بود.

### اندازه‌گیری رطوبت

هدف از آبیاری و بخصوص آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، توزیع مناسب‌تر رطوبت در خاک و محیط ریشه در طول فصل آبیاری است. به منظور پایش تغییرات جبهه رطوبتی در خاک، میزان رطوبت خاک در قبل و بعد از آبیاری در دوره‌های رشد گیاه به ترتیب شامل دوره اولیه رشد (Initial stage)، توسعه و پیشرفت فصل (Crop Development)، فصل میانی (Mid- season)، فصل نهایی (Late- season) با نمونه‌گیری وزنی وزنی قبل و بعد از آبیاری به ترتیب بین دو لوله قطره‌چکان دار مربوط به ردیف درختان (با حفر دو چاله به قطر ۵۰ سانتی‌متر در ردیف درختان (ردیف درخت ۱) بین دو لوله قطره‌چکان دار ۱ و ۲ در وسط دو درخت به فاصله ۱/۵ متری از تنه درخت) و به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از هر لوله قطره‌چکان‌دار، روی لوله‌های قطره‌چکان‌دار (در روی لوله‌های قطره‌چکان‌دار شماره ۱ و ۲ و ۳، در فاصله ۱/۵ متری از تنه درخت (به سمت درخت بعدی روی همان ردیف درخت) در اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری و خارج از لوله‌های قطره‌چکان‌دار (با حفر دو چاله به قطر ۵۰ سانتی‌متر، به فاصله ۳۰ سانتی‌متری خارج از لوله‌های قطره‌چکان‌دار ۲ و ۳ (به سمت ردیف کناری درختان) و در راستای وسط دو تنه درخت برداشت شد (شکل ۱).

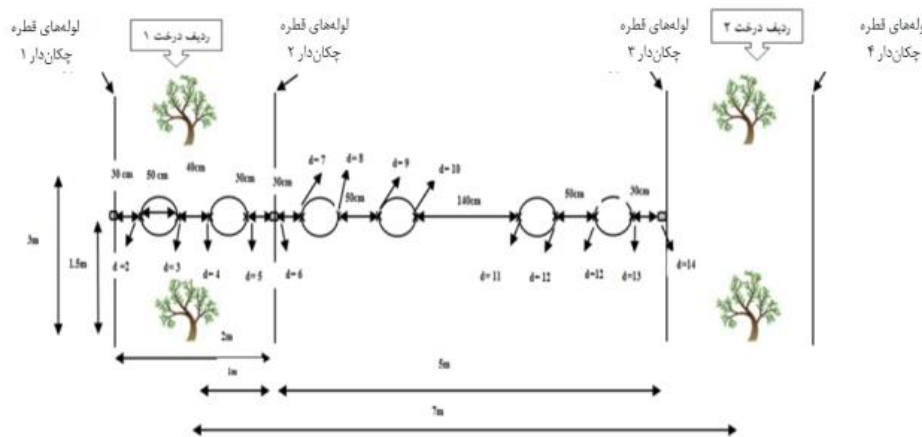
در جهت رسیدن به اهداف تحقیق سه رژیم آبیاری در قطعه آزمایشی اعمال گردید که به شرح زیر می‌باشند:

- رژیم آبیاری  $I_1$  - در این رژیم، آبیاری طبق مدیریت زارع که مبتنی بر ترکیبی از پیشنهاد دفترچه طراحی و تجربه و شرایط مزرعه بوده است، صورت گرفت و حجم آب داده شده، زمان آبیاری و دور آبیاری آن ثبت گردید.

- رژیم آبیاری  $I_2$  - در این رژیم، از داده‌های بهنگام هواشناسی مزرعه (داده‌های روزانه) برای محاسبه تبخیر و تعرق (روش پنمن - مانیتث اصلاح شده و پیشنهادی فائو ۵۶) استفاده شد و نیاز آبیاری محاسبه شد. دور آبیاری قطعه آزمایش همان دور آبیاری تیمار  $I_1$  بود و تنها ساعت آبیاری با توجه به تغییر میزان آب آبیاری تغییر کرد.

- رژیم آبیاری  $I_3$  - برابر با مجموع نیاز آبیاری ( $I_2$ ) و آب آشویی بود ( $LR+I_2$ ).

بر اساس استاندارد فائو ۲۹ سطح تحمل درختان پسته به شوری آب آبیاری و شوری خاک به ترتیب برابر با  $۱/۶$  و  $۲/۵$  دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (Ayers and Westcot, 1985). لذا اعمال ضریب بر اساس اعمال تنش شوری ممکن نبود. با توجه به شرایط منبع آب در مزرعه تنها امکان اعمال ۱۵ درصد به عنوان آشویی فراهم بود که اعمال گردید. برای محاسبه حجم آب مصرفی در رژیم آبیاری  $I_2$ ، تبخیر و تعرق پتانسیل ( $ET_0$ ) با استفاده از اطلاعات روزانه هواشناسی و با روش پنمن - مانیتث اصلاح شده و پیشنهادی فائو (PM) تعیین گردید (Allen et al., 1998)، سپس با استفاده از ضریب گیاهی ( $K_c$ ) برای پسته در دوره‌های مختلف رشد برای منطقه سمنان (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶)، تبخیر و تعرق گیاه محاسبه گردید. عمق خالص آب آبیاری ( $d_n$ ) بر اساس  $ET_c$  و با احتساب سطح سایه‌انداز درختان (در این تحقیق براساس شرایط مزرعه ۴۳ درصد تعیین گردید) و دور



شکل ۱- الگوی محل نمونه‌گیری‌ها

○ : چاله نمونه‌گیری حفر شده به قطر ۵۰ سانتی‌متر  
 × = محل نمونه‌گیری در اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده خاک

عمق خاک	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$K_s$	$l$
۰-۲۵	۰/۰۲۴۲	۰/۳۴۷۹	۴/۷۲	۱/۴۱۶۴	۰/۹۱۱۴	۰/۵
۲۵-۵۰	۰/۰۲۶۲	۰/۳۵۵۹	۵/۱۴	۱/۴۴۸۶	۰/۸۷۶۷	۰/۵
۵۰-۷۵	۰/۰۲۶۶	۰/۳۶۴۹	۴/۹۴	۱/۴۲۲۳	۰/۹۳۳۲	۰/۵

### توصیف مدل عددی

این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال - انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است که معادلات مربوطه به روش عناصر محدود Galerkin حل گردیده‌اند (Simunek et al., 2006). در این مدل حرکت سه بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک همروند و یکنواخت از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] \quad (1)$$

در این رابطه  $\theta$  رطوبت حجمی [ $L^3L^{-3}$ ]،  $h$ : پتانسیل فشاری آب موجود در خاک [ $L$ ]،  $t$  زمان [ $T$ ]،  $X$ ،  $Y$  مختصات افقی [ $L$ ]،  $Z$ : مختصات عمودی [ $L$ ] و  $K$ : هدایت آبی [ $LT^{-1}$ ] می‌باشد. هم‌چنین از مدل شناخته شده ون‌گنوختن - معلم ۱۹۸۰ برای شبیه‌سازی منحنی مشخصه و منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک استفاده گردید که به شرح رابطه‌های ۲ و ۳ و ۴ است:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + ah^2)^2} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

در این رابطه  $S_e =$  اشباع نسبی،  $\theta_s =$  رطوبت اشباع (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)،  $\theta_r =$  رطوبت باقی‌مانده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)،  $K_s =$  هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر دقیقه)،  $\alpha =$  (بر سانتی‌متر)،  $n$  و  $l =$  پارامترهای تجربی.

### تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک

قبل از اجرای مدل و شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک (در دو حالت افقی و عمودی) لازم بود که پارامترهای هیدرولیکی خاک تعیین شوند. برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی  $\theta_s$ ،  $\theta_r$ ،  $\alpha$ ،  $n$  و  $l$  از مدل ROSSETA استفاده شد که یک نسخه از آن به صورت لینک با مدل HYDRUS-2D\3D وجود دارد. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول  $\theta_r$ : رطوبت باقی‌مانده در خاک،  $\theta_s$ : رطوبت اشباع خاک،  $K_s$ : ضریب نفوذپذیری خاک در حالت اشباع،  $n$  و  $\alpha$ : ضرایبی هستند مربوط به توابع هیدرولیکی خاک که

مستقیماً توسط شبکه عصبی تخمین زده می‌شوند،  $l$  نیز پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است که پارامترهای ورودی مدل HYDRUS2D\3D هستند.

مدل HYDRUS2D\3D بمنظور حل عددی عناصر محدود، محیط شبیه‌سازی سه بعدی را با استفاده از مش گریدها به منشورهای چهار وجهی، شش وجهی و یا مثلثی تقسیم می‌نماید، در این تحقیق به دلیل استفاده از حالت دو بعدی از حالت مثلثی برای مش‌بندی استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از مش‌بندی توسط مدل نشان داده شده است. هر چه گره‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، نتایج دقیق‌تر ولی زمان محاسبات طولانی‌تر می‌گردد. تعداد گره‌ها توسط مدل ۴۰۴۴ عدد تعیین گردید.

کل زمان شبیه‌سازی ۱۴۴ روز در نظر گرفته شد و تعداد دفعاتی که شرایط مرزی در طی مرحله شبیه‌سازی تغییر می‌کند ۲۰ روز در نظر گرفته شد. حوزه‌ی مورد استفاده برای حل عددی، مستطیلی به ابعاد  $۱/۲ \times ۹/۵$  متر و سه عدد قطره‌چکان بود به طوری که قطره‌چکان اول و دوم به فاصله دو متر و قطره‌چکان دوم و سوم به فاصله پنج متر از یکدیگر در عمق ۴۰ در نظر گرفته شد. تعداد گره‌ها توسط مدل ۴۰۴۴ عدد تعیین گردید. نمایی از محیط شبیه‌سازی شده در شکل ۳ ارائه شده است.

### ارزیابی مدل

جهت ارزیابی و مقایسه پارامترهای قابل مقایسه مثل عوامل برآورد شده به کمک مدل عددی با پارامترهای مشاهده‌ای از عواملی چون RMSE، ME، R و EF به شرح زیر استفاده گردید.

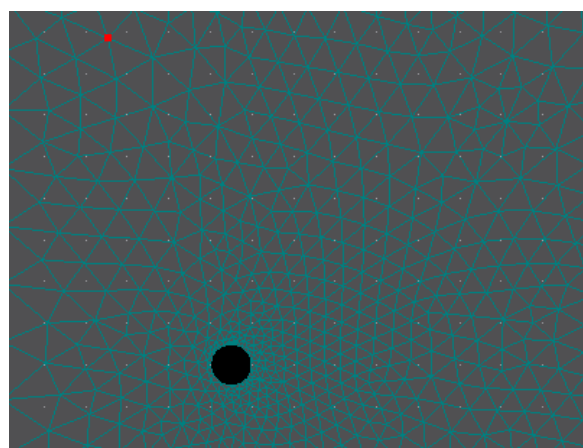
$$EF = 1 - \frac{\sum_{p=1}^n (c_p - c_o)^2}{\sum_{p=1}^n (c_o - c_e)^2} \quad (5)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum c_p - c_o \quad (6)$$

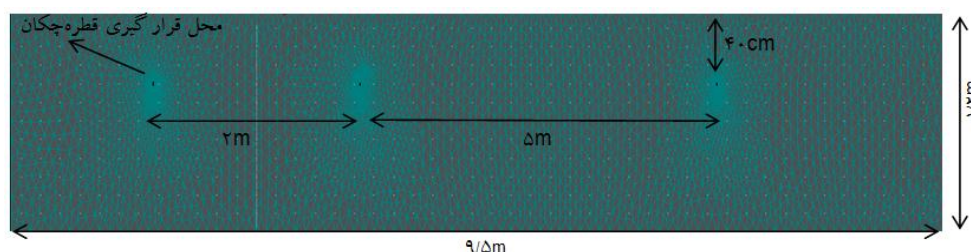
$$RMSE = \left( \frac{\sum (c_p - c_o)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{p=1}^n (c_p - c_o)^2}{\sum_{p=1}^n (c_p - \bar{c}_o)^2} \quad (8)$$

که در این رابطه‌ها  $n$ : تعداد مشاهدات،  $\bar{c}_o$ : میانگین مقادیر مشاهده‌ای،  $C_o$ : مقادیر مشاهده‌ای،  $C_p$ : مقادیر برآورد شده.



شکل ۲- نمایی از محیط مش بندی شده توسط مدل HYDRUS-2D



شکل ۳- نمایی از محیط شبیه سازی با قطر چکان در عمق نصب ۴۰ سانتی متر

$$R^2=0.88 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \text{برآورد درصد رطوبت حجمی بعد از آبیاری} \\ &22.59-4.012d+0.852d^2-0.088d^3+0.0033d^4 \\ &R^2=0.93 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه های بالا d: مکان نمونه گیری است.

مدل برآوردی مناسب بین میزان رطوبت حجمی (متغیر وابسته) و فاصله از لوله قطر چکان دار ۱ (متغیر مستقل) تحت رژیم های مختلف آبیاری نیز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۵ رابطه بین این دو متغیر ارائه شده است

مدل های مناسب برآوردی به صورت روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ می باشد که در زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} &= \text{برآورد درصد رطوبت حجمی در رژیم آبیاری } I_1 \\ &16.47-5.011d+1.412d^2-0.147d^3+0.0051d^4 \\ &R^2=0.96 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &= \text{برآورد درصد رطوبت حجمی در رژیم آبیاری } I_2 \\ &19.94-3.313d+0.867d^2-0.101d^3+0.0038d^4 \\ &R^2=0.88 \end{aligned} \quad (12)$$

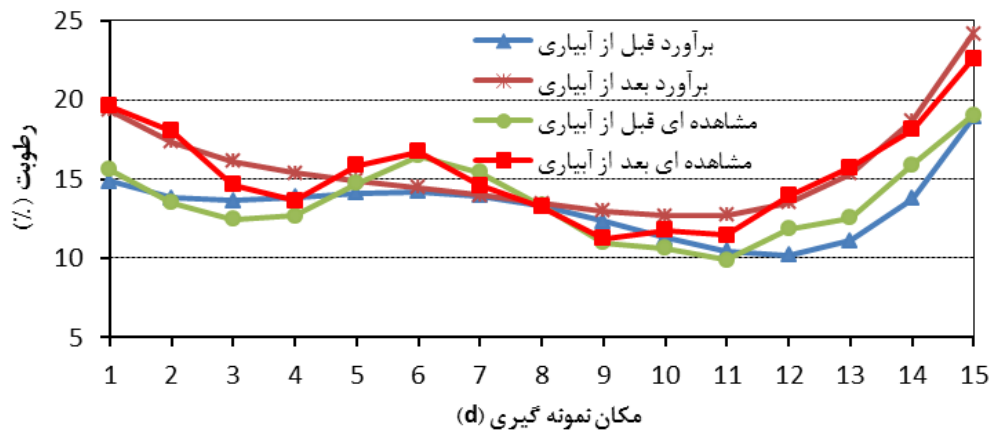
$$\begin{aligned} &= \text{برآورد درصد رطوبت حجمی در رژیم آبیاری } I_3 \\ &23.48-2.858d+0.598d^2-0.071d^3+0.0029d^4 \\ &R^2=0.91 \end{aligned} \quad (13)$$

## نتایج و بحث

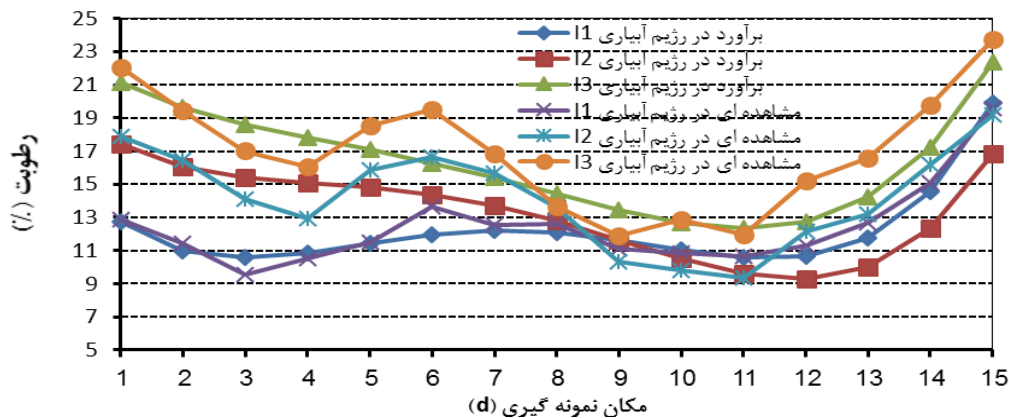
به منظور برآورد میزان رطوبت، داده های مورد بررسی در دو زمان قبل و بعد از آبیاری تحت تیمارهای رژیم آبیاری در اعماق مختلف خاک، بطور مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند برآورد درصد رطوبت حجمی در زمان قبل و بعد از آبیاری و در مکان های مختلف نمونه گیری در شکل ۴ ارائه شده است.

همان طوری که در شکل ۴ مشاهده می شود میزان رطوبت برآوردی و مشاهده ای در زمان بعد از آبیاری نسبت به زمان قبل آبیاری مقدار بیشتری را نشان می دهد. برای تعیین مدل برآوردی، میزان رطوبت (درصد رطوبت حجمی) به عنوان متغیر وابسته و فواصل از لوله قطر چکان دار ۱ به عنوان متغیر مستقل بر پایه مدل های مختلف از قبیل مدل درجه ۱ و ۲، خطی، لگاریتمی، نمایی و غیره مورد بررسی قرار گرفت که از بین مدل های برآورد شده بالاترین میزان  $R^2$  مختص مدل ریاضی از نوع درجه چهار بود. میزان ضرایب تعیین به ترتیب برای قبل و بعد از آبیاری ۰/۸۸ و ۰/۹۳ برآورد گردید. مدل های برآوردی به صورت رابطه های ۹ و ۱۰ ارائه شده است:

$$\begin{aligned} &= \text{برآورد درصد رطوبت حجمی قبل از آبیاری} \\ &17.34-3.443d+1.066d^2-0.124d^3+0.0046 \end{aligned}$$



شکل ۴- مدل برآورد میزان رطوبت (درصد رطوبت حجمی) بر پایه فواصل از لوله قطره‌چکان دار ۱ (مکان نمونه‌گیری) در سطوح مختلف زمان قبل و بعد از آبیاری



شکل ۵- مدل برآورد میزان رطوبت (درصد رطوبت حجمی) بر پایه فواصل از لوله قطره‌چکان دار ۱ (مکان نمونه‌گیری) در سطوح مختلف رژیم‌های آبیاری I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub>

= برآورد درصد رطوبت حجمی در عمق ۵۰ سانتی‌متر  
 $18.01 - 3.181 d + 0.814 d^2 - 0.089 d^3 + 0.0033 d^4$   
 $R^2 = 0.83$  (۱۵)

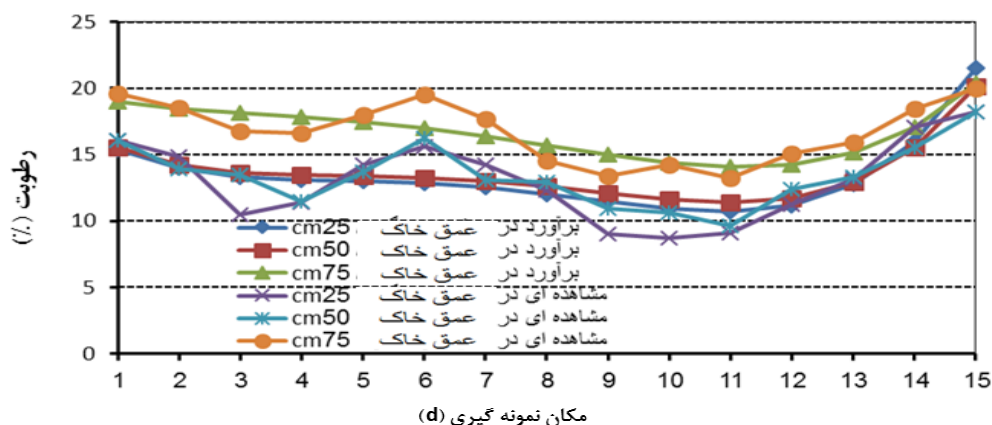
= برآورد درصد رطوبت حجمی در عمق ۷۵ سانتی‌متر  
 $19.85 - 1.104 d + 0.286 d^2 - 0.041 d^3 + 0.0018 d^4$   
 $R^2 = 0.85$  (۱۶)

میزان ضرایب تعیین برای اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۸۳ و ۰/۸۵ برآورد گردید. بر طبق شبیه‌سازی‌های مدل بیش‌ترین مقدار رطوبت، در زمان بعد از آبیاری در رژیم آبیاری I<sub>3</sub> و در عمق ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک مشاهده شد و با اندکی بیش‌برآوردی با مقادیر مشاهده‌ای تطابق خوبی را دارا بود.

از بین مدل‌های برآورد شده در تیمار رژیم‌های آبیاری نیز بالا-ترین میزان R<sup>2</sup> به مدل ریاضی از نوع درجه چهار اختصاص یافت. میزان ضرایب تعیین برای رژیم آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> بترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۸۸ و ۰/۹۱ برآورد گردید. در شکل ۶ برآورد درصد رطوبت حجمی را در اعماق مختلف خاک را نسبت به فواصل مختلف از لوله قطره‌چکان‌دار نشان داده است:

از بین مدل‌های مورد بررسی از قبیل مدل درجه ۱ و ۲، خطی، لگاریتمی، نمایی و غیره بالاترین میزان R<sup>2</sup> اختصاص به مدل ریاضی از نوع درجه چهار بود. که این مدل‌ها برای اعماق مختلف خاک به صورت روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است:

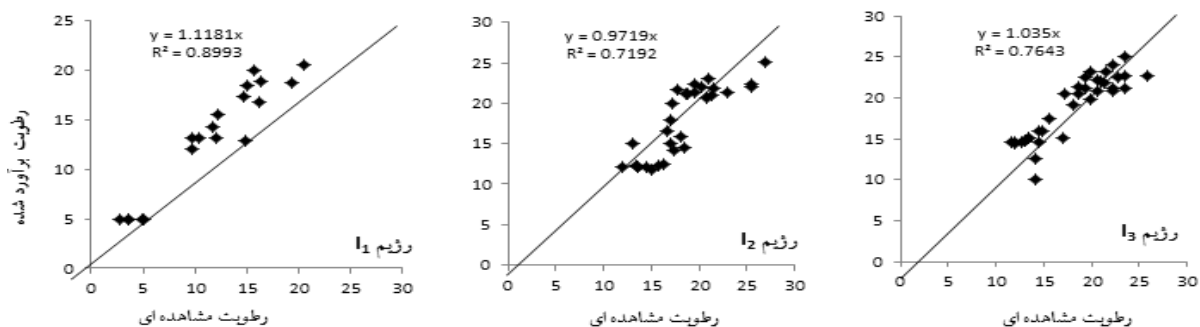
= برآورد درصد رطوبت حجمی در عمق ۲۵ سانتی‌متر  
 $18.13 - 3.522 d + 0.910 d^2 - 0.101 d^3 + 0.0038 d^4$   
 $R^2 = 0.81$  (۱۴)



شکل ۶- مدل برآورد میزان رطوبت (درصد رطوبت حجمی) بر پایه فواصل از لوله قطره‌چکان دار ۱ (مکان نمونه‌گیری) در سطوح مختلف عمق خاک (۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر)

بهتری با خط نیمساز دارد و در رژیم I<sub>1</sub> تمامی داده‌ها بالاتر از خط نیمساز قرار گرفته‌اند که بیانگر این مطلب است که مدل هایدروس در تمامی نقاط مقدار بیش‌تری را برای رطوبت برآورد کرده است، با این حال ضریب زاویه خط رگرسیون در تمامی رژیم‌ها به عدد یک بسیار نزدیک بوده که نشان از شباهت زیاد بین داده‌های برآورد شده و مشاهده‌ای دارد (شکل ۷). نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیقات افشار جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۱) و حسینی‌نیا و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد.

به منظور بررسی توانایی مدل عددی HYDRUS-2D در تخمین میزان رطوبت در خاک (درصد رطوبت حجمی) در زمان بعد از آبیاری، مقایسه‌ای با داده‌های مشاهده‌ای در اعماق و مکان‌های مختلف خاک در هر سه رژیم آبیاری انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D برآورد خوبی از میزان رطوبت را در هر سه رژیم آبیاری، از خود نشان داد و ضریب تبیین حاصل از این برآورد بین ۰/۷۲ تا ۰/۹ بود. همان طوری که مشاهده می‌شود در رژیم I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> خط رگرسیون انطباق



شکل ۷- رابطه بین مقادیر رطوبت برآورد شده و مشاهده‌ای (درصد حجمی) در هر رژیم آبیاری

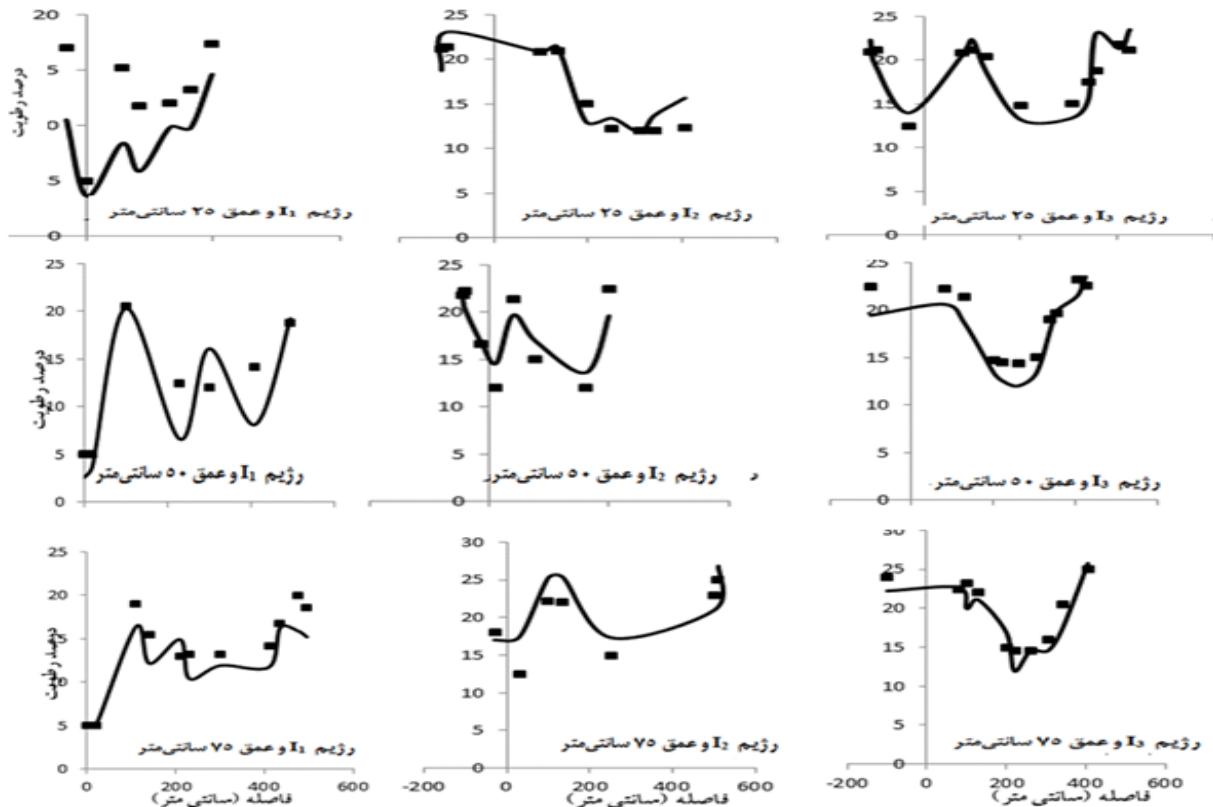
### توزیع افقی رطوبت

نتایج نشان داد که مدل عددی در رژیم I<sub>1</sub> و عمق خاک ۲۵ سانتی‌متر، مقدار رطوبت را بیش‌تر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است، ولی در بقیه رژیم‌های آبیاری و عمق‌های دیگر در بعضی نقاط بیش‌تر و در بعضی نقاط دیگر کم‌تر از مقادیر مشاهده‌ای تخمین زده است. نتایج شبیه‌سازی مدل همچنین نشان می‌دهد که بیشترین میزان رطوبت در هر شکل در محل قرارگیری قطره‌چکان‌ها است و

با توجه به اینکه رژیم I<sub>1</sub> آبیاری شاهد کم‌آبیاری بوده و رطوبت تا عمق ۲۵ سانتی‌متری بالا نیامده است و برای گسترده‌گی ریشه نیاز به اطلاعات زیادی بود و درخت پسته نیز در نرم‌افزار-HYDRUS 2D گنجانده نشده است بالاتر بودن داده‌ها از خط نیمساز با در نظر گرفتن این دلیل در مدل عددی قابل توجیه می‌باشد.

می‌باشد (رژیم آبیاری I<sub>1</sub> و در عمق ۲۵ سانتی‌متر) و همچنین در فواصل میانی که از قطره‌چکان‌ها فاصله‌ی بیشتری وجود دارد اختلاف بیشتری بین مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای وجود دارد که این موضوع با نتایج دیگر محققان هم‌خوانی دارد (صمدیان‌فرد و همکاران، ۱۳۹۱؛ M-Kandelous and Simunek., 2010).

شکل ۸ بیانگر این موضوع است و در همه رژیم‌های آبیاری و عمق‌های مختلف نقاط ماکزیمم نسبی بیانگر این موضوع است. در اکثر حالات تحت رژیم و عمق‌های مختلف مشاهده شد که مقادیر برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک می‌باشد و در بعضی حالات نیز کم‌تر از مقادیر مشاهده‌ای



شکل ۸- توزیع افقی رطوبت (درصد حجمی) در هر رژیم برای عمق‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر (— مشاهده‌ای، ■ برآورد شده). محور افقی بیانگر فاصله از درخت سمت چپ (شکل ۱) تا محل نمونه‌برداری‌هاست که در اصل نقطه صفر همان تنه درخت ردیف ۱ می‌باشد.

آبیاری این اختلاف بین مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای کمتر بود و تطابق بهتری را با هم داشتند (شکل ۱۰)، که با نتایج سایر محققان (M-Kandelous and Simunek., 2011; Provenzano, 2007) مطابقت دارد. این نتایج حاکی از آن است که در رطوبت‌های پایین، برآورد مدل مورد تایید نیست.

#### ارزیابی HYDRUS-2D

با توجه به بررسی‌های آماری با در نظر گرفتن پارامتر آماری RMSE هرچه مقادیر این پارامتر کم‌تر باشد مدل از کارایی بهتری برخوردار خواهد بود ولی با این پارامتر نمی‌توان مشخص نمود که مقادیر پیش‌بینی شده، بیش‌تر یا کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند لذا از پارامتر میانگین خطا (ME) استفاده گردید، به این ترتیب که مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بیش‌تر (بیش‌برآورد) و

با توجه به رابطه رگرسیونی برازش داده شده بین مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای برای عمق‌های مختلف خاک در هر رژیم آبیاری مشاهده می‌شود که ضریب تبیین بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۸ درصد متغیر بود ولی به‌طور متوسط بیش‌ترین همبستگی متعلق به رژیم I<sub>2</sub> آبیاری است. در همه حالات به‌جز رژیم I<sub>1</sub> در عمق ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متر، ضریب زاویه خط رگرسیون نزدیک به یک است که نشان از دقت بالای نرم افزار در برآورد میزان رطوبت دارد (شکل ۹).

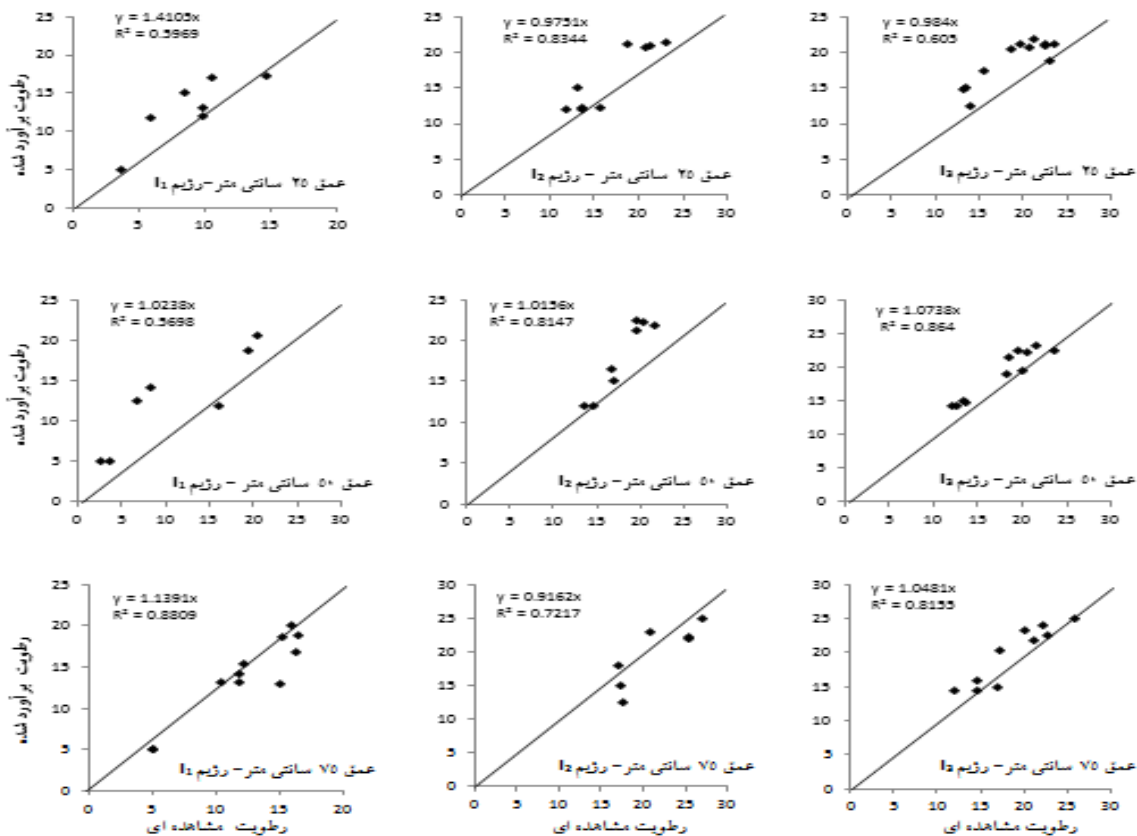
#### توزیع عمودی رطوبت

با توجه به توزیع عمودی رطوبت در رژیم‌های مختلف آبیاری بیش‌ترین اختلاف بین داده‌های برآورد شده و مشاهده‌ای در رژیم I<sub>1</sub> آبیاری مشاهده شد که در اکثر موارد مدل مقدار رطوبت را بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. ولی در رژیم‌های I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub>

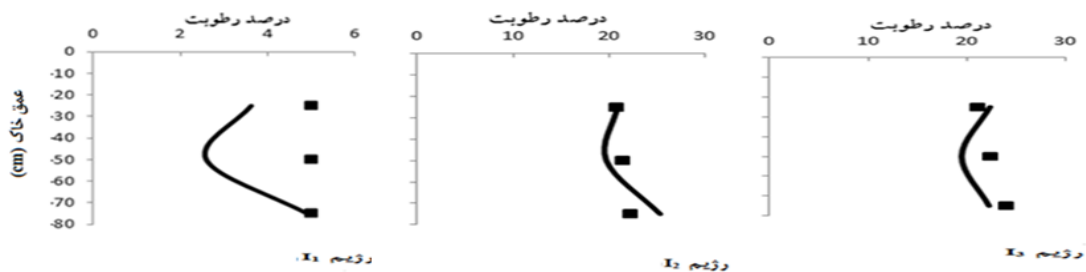


کارایی مدل را بیشتر و بهتر نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بدست آمده از پارامتر EF می‌توان بیان نمود که مدل HYDRUS-2D از بازده خوبی برخوردار است. همچنین جدول مقایسه میانگین‌ها مقادیر بالای  $R^2$  را برای هر کدام از تیمارهای تحقیق گزارش کرد. ارزیابی و مقایسه مقادیر RMSE، ME، EF و  $R^2$  در شرایط مختلف تحقیق حاضر حاکی از توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در پیش‌بینی مقدار رطوبت در شرایط مزرعه‌ای است که نتایج فوق با نتایج خیلی و همکاران (۱۳۹۱) و ملایی کندلوس و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد.

مقادیر منفی آن نشان‌دهنده پیش‌بینی کم‌تر (کم‌برآورد) از مقادیر واقعی (مشاهده‌ای) می‌باشد. نتایج حاصل از مقایسه آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در اعماق مختلف خاک در زمان بعد از آبیاری در جدول ۳ ارائه شده است با توجه به مقادیر بدست آمده مشاهده می‌شود که تحت همه تیمارهای تحقیق مدل HYDRUS-2D مقدار رطوبت را بیش‌تر از مقدار واقعی (مشاهده‌ای) برآورد می‌نماید. پارامتر آماری EF نیز نشان‌دهنده بازدهی مدل بود و هرچه این پارامتر بیشتر باشد بازدهی و



شکل ۹- رابطه بین مقادیر رطوبت برآورد شده و مشاهده‌ای (درصد حجمی) در توزیع افقی در هر رژیم آبیاری برای عمق‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر



شکل ۱۰- توزیع عمودی رطوبت در رژیم‌های مختلف آبیاری (- مشاهده‌ای، ■ برآورد شده)

جدول ۳- مقایسه آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده

بارامترهای مورد مقایسه	RMSE	ME	EF	R <sup>2</sup>
رژیم I <sub>1</sub>	۲/۲۳	۱/۸۳	۰/۸۱	۰/۹۰
رژیم I <sub>2</sub>	۳/۷۲	۲/۰۷	۰/۶۰	۰/۷۲
رژیم I <sub>3</sub>	۴/۰۱	۱/۶۹	۰/۷۶	۰/۷۶
رژیم I <sub>1</sub> - عمق ۲۵ cm	۴/۶۲	۴/۱۴	۰/۵۷	۰/۶۰
رژیم I <sub>1</sub> - عمق ۵۰ cm	۳/۶۸	۲/۸۹	۰/۷۱	۰/۵۷
رژیم I <sub>1</sub> - عمق ۷۵ cm	۲/۴۴	۲/۰۵	۰/۶۲	۰/۸۸
رژیم I <sub>2</sub> - عمق ۲۵ cm	۱/۷۸	۱/۴۴	۰/۷۹	۰/۸۳
رژیم I <sub>2</sub> - عمق ۵۰ cm	۱/۸۶	۱/۶۱	۰/۵۰	۰/۸۱
رژیم I <sub>2</sub> - عمق ۷۵ cm	۲/۸۹	۲/۶۵	۰/۴۷	۰/۷۲
رژیم I <sub>3</sub> - عمق ۲۵ cm	۰/۶۷	۰/۱۹	۰/۷۴	۰/۶۱
رژیم I <sub>3</sub> - عمق ۵۰ cm	۱/۸۵	۱/۶۶	۰/۷۶	۰/۸۶
رژیم I <sub>3</sub> - عمق ۷۵ cm	۱/۹۴	۱/۶۲	۰/۷۷	۰/۸۲

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل HYDRUS-2D قادر به شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته است و این توانایی را دارد که شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره آبیاری و تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و در اعماق مختلف خاک با دقت بالایی تخمین بزند و این دقت شبیه‌سازی مدل تحت تأثیر تیمارهای مختلف تحقیق و شرایط مختلف قرار نگرفت. از بین مدل‌های برآورد شده در تیمار رژیم‌های آبیاری نیز بالاترین میزان R<sup>2</sup> به مدل ریاضی از نوع درجه چهار اختصاص یافت. میزان ضرایب تعیین برای رژیم آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۸۸ و ۰/۹۱ برآورد گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D برآورد خوبی از میزان رطوبت را در هر سه رژیم آبیاری، از خود نشان داد و ضریب تبیین حاصل از این برآورد بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۰ بود. با توجه به رابطه رگرسیونی برآورد داده شده بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده برای عمق‌های مختلف خاک در هر رژیم آبیاری مشاهده می‌شود که ضریب تبیین بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۸ درصد متغیر بود ولی به‌طور متوسط بیش‌ترین همبستگی متعلق به رژیم I<sub>2</sub> آبیاری است. نتایج شبیه‌سازی مدل در توزیع افقی رطوبت نشان داد که مدل عددی در رژیم آبیاری I<sub>1</sub> و عمق خاک ۲۵ سانتی‌متر خاک، مقدار رطوبت را بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کرد، ولی در بقیه حالات در بعضی نقاط بیش‌تر و در بعضی نقاط دیگر کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زد. نقاط ماکزیمم توزیع افقی میزان رطوبت مشخص‌کننده محل قرارگیری قطره چکان‌ها بود و در اکثر حالات مقادیر برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک بود و این نشان از برآورد دقیق مدل در شبیه‌سازی میزان رطوبت می‌باشد. روند برآورد مدل در شبیه‌سازی توزیع عمودی میزان رطوبت نسبت به مقادیر

مشاهده‌ای نیز بیش‌برآورد داشت و این اختلاف در رژیم آبیاری I<sub>1</sub> نمایان‌تر بود. ارزیابی‌های آماری نیز حاکی از توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در پیش‌بینی مقدار رطوبت در شرایط مزرعه‌ای است.

## تشکر و قدردانی

اطلاعات ارائه‌شده در این مقاله نتایج پروژه پژوهشی با عنوان "شاخص‌های طراحی، اجرا و مدیریت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و ارزیابی آن در باغات سمنان" می‌باشد که با حمایت مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی به اجرا رسیده است. همچنین از شرکت بنیز تجهیز که بستر این پژوهش را در مزرعه الگویی آن شرکت فراهم کرده است و همکاری صمیمانه و دلسوزانه مدیر مزرعه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

- افشار جهان‌شاهی، م.، زارع ابیانه، ح.، نقوی، ه و اسلامی، ا. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره‌چکان با دبی‌های یکسان بر توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، ۱۰: ۱۱۳-۱۰۱.
- حسینی‌نیا، م.، کریمی‌گوغری، ش.، نقوی، ه و ایران‌دوست، م. ۱۳۸۹. مدیریت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب.
- خلیلی، م.، هزارجریبی، ا.، اکبری، م و ذاکری‌نیا، م. ۱۳۹۱. تعیین پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

- M-Kandelous, M., Simunek, J., van Genuchten, M.Th and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2): 488-497.
- Patel, N and Rajput, T.B.S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*, 95(2008): 1335-1349.
- Phogata, V., Skewesa, M.A., Mahadevana, M. and Coxa, J.W. 2013. Modelling water and salinity distribution in soil under advance fertigation systems in horticultural crops. In 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 635-641.
- Phull, A. M and Babar, M. M. 2012. Summulation of soil wetting pattern of subsurface drip irrigation system. In Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC (Vol. 16).
- Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133: 342-349.
- Roberts, T., Lazarovitch, N., Warrick, A.W and Tompson, T.L. 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*, 73:233-240
- Simunek, J., Van Genuchten, M.Th and Sejna, M. 2006. The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably - Saturated Media. Technical Manual.
- Siyal, a. a and Skaggs, T. H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay management. *Journal of Agriculture water Management*, 96(6):893-904.
- Zhang, Y.Y.; Wu, P.T., Zhao, X.N. and Wang, Z.K. 2017. Simulation of soil water dynamics for uncropped ridges and furrows under irrigation conditions. *Can. Soil Science Society of America Journal*, 93: 85-98.
- صمدیان فرد، س، صدرالدینی، س.ع.ا، ناظمی، ا.ح و فرسادی-زاده، د. ۱۳۹۱. شبیه سازی عددی و تحلیلی پیشروی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای. *مجله دانش آب و خاک*، ۳: ۱۶-۱.
- فرشی، ع ا، شریعتی، م ج، جارالهی، ر، قائمی، م. ح، شهابی فر، م و تولائی، م م. ۱۳۷۶. برآورد آب موردنیاز گیاهان عمده باغی و زراعی کشور. *جلد دوم. تحقیقات آب و خاک ایران*. ۳۹۴ ص.
- ملایی‌کندلوس، م، لیاقت، ع و عباسی، ف. ۱۳۸۷. استفاده از آنالیز ابعادی در تعیین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی (SDI). *علوم کشاورزی ایران*، ۲: ۳۷۸-۳۷۱.
- Allen, RG., Pereira, LS., Raes, D and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration –guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO: Rome, Italy
- Ayers, R.S and Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. irrigation and drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy, 29: 1-117.
- Dos Santos, L.N., Matsura, E.E., Gonçalves, I.Z., Barbosa, E.A., Nazário, A.A., Tuta, N.F., Elaiuy, M.C., Feitosa, D.R and de Sousa, A.C. 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*, 170: 91-98.
- Elmaloglou, S and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*, 96: 1587-1595
- Mguidiche, A., Provenzano, G., Douh, B., Khila, S., Rallo, G and Boujelben, A. 2015. Assessing Hydrus-2D to Simulate Soil Water Content (SWC) and Salt Accumulation Under an SDI System: Application to a Potato Crop in a Semi-Arid Area of Central Tunisia. *Irrigation and drainage*, 64(2): 263-274.
- M-Kandelous, M and Simunek, J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 97: 1080-1076.

## Application of Hydrus-2D Model to Investigate the Soil Moisture Changes under Pistachio Trees with Subsurface Drip Irrigation

H. Dehghanisanij<sup>1\*</sup>, H. Haji Agha Bozorgi<sup>2</sup>, E. Kanani<sup>3</sup>, G. Dehghanisanij<sup>4</sup>

Received: Jul.14, 2019

Accepted: Aug.21, 2019

### Abstract

Subsurface drip irrigation is the most suitable irrigation method to provide the water requirements for plants in the root environment. The management of this irrigation method is based on the science of water distribution in wet soil volumes. Simulation models can be used in obtaining this valuable knowledge. In this study, was evaluated simulation the distribution of soil moisture in the plant root zone under subsurface drip irrigation using the HYDRUS-2D model and based on a field research in a pistachio garden, in Sorkhe, Safaeieh, Semnan province, during two years of cultivation 2012-2013. The treatments were three irrigation regimes; control ( $I_1$ ), Irrigation based on irrigation requirement ( $I_2$ ) and  $I_2$  plus leaching requirement ( $I_3$ ), three soil depth of 25, 50, and 75 cm from soil surface at before and after irrigation event. The results of this study showed that in the root zone of the plant, the percentage of moisture content measured and estimated were relatively close, and showed that the HYDRUS-2D is able to simulate the soil moisture content in the root zone of the pistachio plant, and has this ability that it estimates conditions the soil moisture with highly accurate, during irrigation under different irrigation regimes at different depths of the soil. Model estimation process in the horizontal and vertical distribution of moisture, it was more than estimated in relation to the measured values. The statistical evaluations also showed that the accuracy of the HYDRUS-2D numerical model with respect to the coefficients of determination between 0.76 to 0.9 and RMSE ranged from 2.23 to 4.01, and the good ability of the model in predicting moisture content in field conditions.

**Keywords:** HYDRUS-2D, Irrigation Management, Irrigation Regime, Irrigation Scheduling

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Alborz, Iran.

2- Master of Science (MSc), Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran

3- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4- Bachelor student, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(\* - Correspondin Author Email: h.dehghansanij@areeo.ac.ir)