

شبیه سازی رطوبت خاک با مدل HYDRUS-1D در شرایط کشت گندم

علی عصاره^۱، زهرا درخشان نژاد^۲، امیر سلطانی محمدی^۳ و محی الدین گوشه^۴

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، استادیار گروه مهندسی آب، اهواز، ایران

۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خوزستان

۳- استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۲۹

چکیده

برای دستیابی به افزایش عملکرد، شناخت عمیق عوامل محیطی جهت حفظ یا افزایش بهره‌دهی و پایداری سیستم‌های کشاورزی ضروری است و این مهم عملی نخواهد شد مگر آنکه سیستم بیچیده گیاه و نوع پاسخگویی آن به نهاده‌ها و شرایط محیطی تا اندازه زیادی شناخته شود. از روش‌های نوین کشاورزی که در امر تحقیق، مدیریت، بهینه کردن بهره‌وری، شناخت کامل سیستم و تدوین یک استاندارد دقیق برای آن بسیار مؤثر است، بهره‌گیری از مدل‌های مختلف می‌باشد. به منظور شبیه سازی رطوبت خاک تحت شرایط مختلف آبی، تحقیقی در مزرعه مرکز تحقیقات کشاورزی اهواز در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ بر روی گیاه گندم با سه تیمار آبیاری I₁ (بدون تنش آبی)، I₂ (قطع آبیاری در مرحله ظهور سنبله) و I₃ (قطع آبیاری در مرحله شیری شدن دانه) و پنج سطح نیتروژن با مقادیر N₁ (بدون مصرف کود نیتروژن)، N₂ = ۸۰، N₃ = ۱۲۰، N₄ = ۱۶۰، N₅ = ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار انجام شد. برای شبیه‌سازی رطوبت در خاک از مدل HYDRUS-1D استفاده گردید. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل نسبت به ضریب رطوبتی خاک در حالت اشباع (θ_s) بیش از دیگر ضرایب حساس است و با تغییر جزئی مقادیر این ضرایب تغییرات به سزایی در خروجی‌های مدل مشاهده شد. کمترین تأثیر مربوط به ضرایب α ، I و θ_r بود. همچنین نتایج آزمایش نشان داد مدل مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. مقدار کارایی مدل که نشان دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد بین ۰/۶۷ تا ۰/۹۰ متغیر بود که این نشان دهنده کارایی بالای مدل در شبیه سازی رطوبت است.

کلید واژه‌ها: شبیه سازی، رطوبت، مدل، گندم، HYDRUS-1D.

Simulation of Soil Moisture by HYDRUS-1D Model under Wheat Cultivation

A. Asareh¹, Z. Derakhshan Nejad², A. Soltani Mohammadi³ and M. Gosheh⁴

- 1- Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Assistant Professor of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.
- 2- Former Graduate Student of Soil Science, Islamic Azad University, Science and Research of Khuzestan.
- 3- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 4- Member of Scientific Staff, Ahvaz Agricultural Research Center.

Received: 20 Oct. 2012

Accepted: 20 May. 2013

Abstract

To achieve the goal of high yield, deep understanding of physiological, agronomic and environmental factors is necessary to improve the performance and sustainability of agricultural systems. This may not be practical unless the plant complex systems and the type of response to inputs and environmental conditions are known as important factors. In modern agricultural methods the uses of different models are important for management, optimize productivity, accurate understanding of the system and obtaining a precise formulation of the standard. In order to simulation of soil moisture under different water conditions on wheat (Chamran cultivar) a field experiment was conducted at the Agricultural Research Center- Ahvaz. In this experiment, three irrigation levels include I₁ (no water stress), I₂ (stop irrigation at the heading stage

and I₃(stop irrigation at the milky grain stage) and five levels of nitrogen fertilizer namely N₁(no nitrogen fertilizer), N₂=40, N₃=80, N₄=120 and N₅=160 kg/ha were used as treatments. In this research, HYDRUS-1D was used as simulation model. Analysis of results for sensitivity of model showed that soil moisture coefficient of model under saturation condition θ_s is more than other coefficients and a slight change in coefficient caused a large change in output variation of model. The minimum effect was observed in α , I and θ_r coefficients. Meanwhile, results indicated that model was estimated moisture content less than reality condition. Also, the amount of moisture on the basis of simulated model was estimated less than the real moisture. The model efficiency that reflects to quality and observed data was estimated between 0.67 and 0.90. This was due to high efficiency of simulated model for soil moisture.

Key words: Simulation, Moisture, model, Wheat, HYDRUS-1D.

مقدمه

(۱۳۹۰)، اژدری(۱۳۸۷)، تقوی و همکاران(۱۳۹۱) و مقبلی دامنه و دلقاری (۱۳۸۸) از مدل HYDRUS برای شبیه سازی رطوبت خاک استفاده نمودند، نتایج شبیه سازی نشان می داد که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است. دانشمندان بسیاری الگوی پخش آب در خاک را اندازه گیری یا به صورت عددی شبیه سازی نموده اند (اسولین^۳، ۲۰۰۲؛ گاردناس و همکاران^۴، ۲۰۰۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ لازارویچ و همکاران^۵، ۲۰۰۷). وگل و همکاران^۶ (۱۹۹۶) مدل HYDRUS-1D را به زبان برنامه‌نویسی فرترن برای شبیه سازی جریان آب، حرارت و حرکت املاح گوناگون در یک محیطی با شرایط متغیر از نظر اشباع در یک بعد استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این مدل، شبیه‌سازی حرکت املاحی مانند نیترات و جریان آب و حرارت را به خوبی برآورد می‌کند. پارسایی قادر آبادی و همکاران(۱۳۸۹) و صیاد و همکاران(۱۳۸۷) نیز به نتایج مشابهی در استفاده از مدل HYDRUS در شبیه سازی املاح دست یافتند. لذا در این مطالعه از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی رطوبت در خاک در شرایط کشت گندم استفاده شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۸۵-۱۳۸۴ در مزرعه مرکز تحقیقات کشاورزی اهواز انجام گرفت. عرض جغرافیایی ایستگاه ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی آن ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱ متر می‌باشد. آمار هواشناسی در محدوده زمانی آزمایش (جدول ۱) نشان می‌دهد که در این دوره، میزان بارندگی ۱۹۸/۶ میلی‌متر بوده که بیشترین آن در بهمن ماه به مقدار ۱۰۲/۶ میلی‌متر و کمترین آن مربوط به اسفند ماه و به مقدار ۱/۵ میلی‌متر بوده است. متوسط درجه حرارت ماهانه ۲۰ درجه‌سانتی‌گراد گزارش شده است. علاوه بر این، با مقایسه آمار بارندگی و تبخیر از تشتک در طول دوره کشت دیده می‌شود که تقریباً در تمام طول دوره تبخیر از بارندگی بیشتر است.

رمز بقا و موفقیت کشاورزان امروزی در عرصه اقتصاد جهانی دارا بودن کشاورزی پایدار و کارا می باشد. معیار کارائی در مبحث اقتصادی رابطه بین نهاده‌ها و ستاده‌ها و چگونگی برگشت سرمایه بوده و معیار پایداری در بخش کشاورزی حفظ سرمایه ملی منابع آب و خاک می باشد. در دو دهه اخیر بخش مهندسی کشاورزی به تقلید از تحلیل سیستم‌های مهندسی به سمت مدل کردن روابط پیچیده و تا حد زیادی ناشناخته رشد و نمو گیاهان زراعی و رابطه آن با آب، خاک و اتمسفر گام برداشته و با هدف شناخت عمیق‌تر آن را دنبال می‌کند. از روش‌های نوین کشاورزی که در امر تحقیق، مدیریت، بهینه کردن بهره‌وری و شناخت کامل سیستم و تدوین یک استاندارد دقیق برای آن بسیار مؤثر است، بهره‌گیری از مدل‌های مختلف می‌باشد. گسترش سریع سیستم‌های اطلاعاتی مبتنی بر کامپیوتر، بعد جدیدی در علوم کشاورزی فراهم آورده است. به‌خصوص اینکه مدل‌ها و بانک‌های اطلاعاتی ابزارهای ارزشمندی هستند که علوم کشاورزی را به عصر اطلاعات منتقل می‌نمایند. در حال حاضر رسیدن به خودکفایی نیازمند افزایش تولید گندم در داخل کشور است. از آن جایی که ایران جزء کشورهای خشک و نیمه خشک جهان محسوب می‌شود آب در تولید محصولات کشاورزی حائز اهمیت می‌باشد و با توجه به محدودیت‌روز افزون منابع آب موجود می‌توان با برنامه ریزی صحیح و درست راندمان مصرف را بالا برد. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفاده بهینه از آب در مناطق مختلف، به خصوص مناطق خشک و نیمه خشک؛ با کاربرد مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر است. در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌ها به عنوان ابزاری مدیریتی و تحقیقی روز به روز در حال توسعه است. مدل‌های ریاضی روند حرکت آب و املاح در سیستم خاک- گیاه و اتمسفر را به‌صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند. مدل نرم افزاری HYDRUS-1D به منظور شبیه سازی یک بعدی حرکت آب، حرارت و املاح در محیط متخلخل و شرایط مختلف رطوبتی ایجاد شده و توسعه یافته است(سیمونک و همکاران^۱، ۱۹۹۸). این مدل در مطالعات فراوان آزمایشگاهی و مزرعه ای برای شبیه سازی و یا برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (وانگ و همکاران^۲، ۲۰۰۶). بشارت و همکاران

3- Assouline
4- Gardenas et al.
5- Lazarovitch et al.
6- Vogel et al.

1- Simunek et al.
2- Wang et al.

جدول ۱- میانگین ماهانه آمار هواشناسی ایستگاه اهواز طی مدت زمان اجرای طرح (۸۵-۱۳۸۴)

آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
۱۱/۹۱	۸/۱۶	۱۰/۳	۱۱/۹۳	۱۷/۴۵	۲۴
درجه حرارت حداقل (°C)					
۲۴/۹۱	۱۷/۸۳	۱۸/۴۶	۲۵/۹۶	۳۰/۹	۳۸/۲۹
درجه حرارت حداکثر (°C)					
۱۷/۴۱	۱۳/۰۳	۱۴/۴۵	۱۸/۹۱	۲۴/۱۷	۲۳/۱
درجه حرارت متوسط (°C)					
۲۲/۲	۴۸/۱	۱۰۲/۶	۱/۵	۱۱/۲	۱۳
میزان بارندگی (mm)					
۷۴/۹۶	۵۱/۶۸	۷۲/۹	۱۵۸	۲۴۱/۶	۳۶۱/۲۶
تخیر از تشنگ (mm)					

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق (سانتی متر)	بافت	نیترژن (درصد)	pH	CEC (سانتی مول بر کیلوگرم)	EC (دسی زیمنس بر متر)	C (درصد)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)
۰-۳۰	رس سیلتی	۰/۰۵۹	۷/۲	۱۷/۲۵	۱/۶	۰/۶۷	۲۳۴/۵	۱۱/۰۲
۳۰-۶۰	رس سیلتی	۰/۰۲۳	۷/۲	۱۶/۳۵	۲/۸	۰/۳۵	۱۸۴/۵	۶/۸
۶۰-۹۰	رس	۰/۰۱۷	۷/۷	۱۸	۴/۴	۰/۱۸	۱۸۷	۴/۳۵
۹۰-۱۲۰	رس	۰/۰۱۶	۷/۸	۱۸/۷	۵/۱	۰/۱۱	۱۹۰	۴/۰۹

جدول ۳- زمان و مقدار آب مصرف شده در عملیات های آبیاری مربوط به تیمارهای مختلف

روز بعد از کاشت	تاریخ آبیاری	روز سال *	تیمارهای آبیاری (mm)
اولین آبیاری بعد از کاشت	۸۴/۹/۲۰	۳۴۵	I ₁ ۵۰
۲۴	۸۴/۱۰/۱۴	۴	I ₂ ۵۰
۷۹	۸۴/۱۲/۹	۵۹	I ₃ ۸۱
۹۰	۸۴/۱۲/۲۰	۷۰	-
۹۸	۸۴/۱۲/۲۸	۷۸	I ₁ ۱۲۵
۱۱۴	۸۵/۱/۱۵	۹۴	I ₂ ۱۸۵
تعداد دفعات آبیاری در هر تیمار			I ₃ ۵
جمع مقدار آب مصرف شده در هر تیمار (میلی متر در هکتار)			۴۶۶
جمع مقدار آب صرفه جویی شده در هر تیمار (میلی متر در هکتار)			۱۲۵

* روز سال که اصطلاحاً معادل ژولین - دی می باشد. تعداد روزی که از اول ژانویه گذشته است تعریف می شود.

گندم چمران که از ارقام مناسب و مرسوم در منطقه است انتخاب شد. به لحاظ امکان عملی کردن تیمارها و کاهش خطاهای آزمایش، میزان آب با سه سطح به عنوان فاکتور اصلی (MP) این آزمایش انتخاب گردید. میزان نیترژن نیز با پنج سطح به عنوان فاکتور فرعی (SP) انتخاب شد. با وجود سه تیمار آبیاری و پنج تیمار نیترژن در سه تکرار، این آزمایش در ۴۵ کرت آزمایشی به اجرا درآمد. سطح خالص هر کرت فرعی ۹ متر مربع (۵×۱/۸) و فاصله بین دو کرت اصلی ۲ متر انتخاب گردید. با احتساب فاصله ۳ متر بین هر دو تکرار در مجموع آزمایش در سطحی بالغ بر ۸۸۲ متر مربع (۴۲×۲۰) پیاده شد. در هر کرت فرعی بذرها در نه خط با فاصله ۲۰ سانتی متر از یکدیگر با ماشین خطی کار و با در نظر داشتن تراکم ۴۰۰ بذر بر متر مربع کشت شدند. از این نه خط، خط شماره یک و نه به عنوان خطوط حاشیه و خط ۲ و ۸ به عنوان ردیف های نمونه برداری انتخاب شدند. از آنجا که محدودیت آب در پایان دوره رسیدگی گندم از مهمترین

برای تعیین وضعیت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه پیش از شروع آزمایش یک پروفیل در مزرعه تحقیقاتی حفر و نمونه هایی از اعماق مختلف خاک به ضخامت ۳۰ سانتی متر برداشت شد. میزان نیترژن، فسفر، پتاس، EC، pH، CEC مواد آلی و بافت نمونه های یاد شده در آزمایشگاه خاکشناسی تعیین شد. نتایج این اندازه گیری ها در جدول (۲) آورده شده است. برای اندازه گیری رطوبت از دستگاه TDR مدل ۳۰۰۰ استفاده شد. در طی دوره رشد اندازه گیری رطوبت خاک در فواصل زمانی معین (معمولاً هر یک تا سه روز) در لایه های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی متری انجام گرفت. به منظور فراهم کردن شرایط لازم جهت مقایسه کمی تاثیر حاصل از تنش آبی و میزان نیترژن در روند رشد و نمو گندم طرح آزمایشی به صورت اسپیلت پلات با طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. در این آزمایش رقم

$$k(\psi) = K_s S_e^n \left[1 - \left(1 - S_e \frac{\lambda-1}{\lambda} \right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \right]^2 \quad (4)$$

که در آن θ_s : مقدار رطوبت اشباع، θ_r : مقدار رطوبت باقیمانده، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، α : عکس مقدار ورود هوا، λ : شاخص توزیع اندازه منافذ، n : پارامتر شکل منحنی و S_e : مقدار رطوبت مؤثر که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (5)$$

تحلیل حساسیت مدل

تحلیل حساسیت، روشی است که جهت بررسی تأثیر نتایج یک مدل نسبت به تغییرات داده‌های ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین حساسیت مدل، ابتدا مقادیر ضرایب ورودی پایه ۲۵ درصد کم و زیاد گردیدند و مدل اجرا شد. ضرایب شامل k_s (هدایت هیدرولیکی اشباع)، $r\theta$ (رطوبت حجمی باقیمانده خاک)، $s\theta$ (مقدار آب خاک در حالت اشباع)، α (عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک در منحنی رطوبتی)، n (پارامتر تجربی در شکل منحنی رطوبتی که بیانگر اتصال خلل و فرج می‌باشد) و I (پارامتر تورجستی در تابع جریان) می‌باشند. با توجه به مقادیر خروجی نیترات از نیمرخ خاک در زمان‌های مختلف، تحلیل حساسیت صورت گرفت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد افزایش میزان ضریب n در معادله ون گنوختن تأثیر بیشتری از K_s بر حرکت نیترات و خروج آن از خاک داشته است. ضریب $s\theta$ (مقدار آب خاک در حالت اشباع) نیز تأثیر به سزایی بر حرکت نیترات در خاک نسبت به هر دو ضریب n و K_s نشان داد. در صورت افزایش ضریب $s\theta$ مقادیر نیترات خروجی از خاک افزایش یافته و در صورت کاهش ضریب $s\theta$ غلظت نیترات در زه‌آب کاهش یافت. به این معنا که ضریب $s\theta$ با غلظت نیترات خروجی از خاک نسبت مستقیم دارد. در نتیجه نرم‌افزار نسبت به ضریب $s\theta$ بیش از دیگر ضرایب حساسیت نشان داد و با تغییر جزئی مقادیر این ضریب تغییرات به سزایی در خروجی‌های مدل مشاهده شد. کمترین تأثیر مربوط به ضرایب α ، I و $r\theta$ بود که افزایش و کاهش مقدار آن‌ها، بر میزان نیترات خروجی از خاک مورد مطالعه حداقل تأثیر را داشت و با تغییر جزئی این ضرایب خروجی نرم‌افزار بدون هیچگونه تغییری باقی ماند.

واستجی مدل

برخی خصوصیات فیزیکی خاک نظیر جرم مخصوص ظاهری، بافت خاک، مقادیر رطوبت اولیه، مقادیر آبیاری و تبخیر از تشتک، اندازه‌گیری و بدون هیچ گونه تعدیلی در مدل استفاده شدند. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به برخی از داده‌های ورودی، ضرایب هدایت هیدرولیکی اشباع (k_s)، رطوبت حجمی باقیمانده خاک (θ_r)، مقدار آب خاک در حالت اشباع ($s\theta$)، عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک در منحنی رطوبتی (α)، پارامتر تجربی در شکل منحنی رطوبتی که بیانگر اتصال خلل و فرج می‌باشد (n) و همچنین

چالش‌های موجود در مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود، در همین راستا تیمارهای سه گانه آبیاری مطابق با مراحل مختلف رشد و نمو گندم تنظیم گردید. به این ترتیب که آبیاری اول و دوم و سوم برای استقرار کامل گیاه به صورت کامل برای تمام تیمارها اعمال شد و اعمال تیمار آبیاری در آبیاری‌های چهارم و پنجم صورت گرفت. تیمارهای آبیاری شامل تیمار I_1 ، انجام آبیاری در شش نوبت بدون حذف آبیاری (بدون تنش آبیاری)، تیمار I_2 ، انجام آبیاری در پنج نوبت و حذف آبیاری در مرحله ظهور سنبله و تیمار I_3 ، انجام آبیاری در پنج نوبت و حذف آبیاری در مرحله شیری شدن دانه‌ها و تیمار نیتروژن به عنوان فاکتور فرعی (SP) شامل پنج سطح N_1 ، N_2 ، N_3 ، N_4 و N_5 به ترتیب بدون مصرف و مصرف ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلو گرم نیتروژن خالص انتخاب شد. کود نیتروژن از منبع کود اوره با ۴۶ درصد نیتروژن تامین گردید. $\frac{1}{3}$ کود نیتروژن به صورت پایه، $\frac{1}{3}$ در مرحله پنجه زنی گیاه و $\frac{1}{3}$ در مرحله ساقه رفتن مصرف شد. میزان کود مورد نیاز پتاسیم و فسفر بر اساس توصیه کودی منطقه، قبل از کاشت مورد استفاده قرار گرفت. تاریخ و میزان آب مصرف شده برای هر تیمار در جدول (۳) آورده شده است.

مبانی مدل

در مدل HYDRUS-1D برای شبیه سازی جریان آب از حل عددی معادله ریچاردز طبق فرمول زیر استفاده می‌شود (هاتسون و وگنت، ۱۹۹۲):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \pm S \quad (1)$$

که در آن θ : درصد رطوبت حجمی ($L^3 L^{-3}$)، K : هدایت هیدرولیکی خاک ($L T^{-1}$)، ψ : افت فشار هیدرولیکی (L)، S : میزان جذب آب (T^{-1})؛ t : زمان یا طول دوره (T) و Z : عمق (L) می‌باشد. در این مدل، تابع نگهداری آب در خاک، $\theta(\psi)$ ، با مدل وان-گنوختن (۱۹۸۰) به صورت زیر توصیف شده است (هاتسون و وگنت، ۱۹۹۲):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha\psi|^\lambda \right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}}}; \psi > 0 \quad (2)$$

$$\theta(\psi) = \theta_s; \psi \leq 0 \quad (3)$$

این معادله با مدل معلم (۱۹۷۶) ترکیب شده و حاصل آن تابع هدایت هیدرولیکی به صورت زیر خواهد بود (هاتسون و وگنت، ۱۹۹۲):

جدول ۴- پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده مدل HYDRUS-1D

I	n	α	θ_s	θ_r	K_s
۰/۵	۱/۲	۰/۰۱۸	۰/۵۷	۰/۰۳	۱۴

جدول ۵- نتایج ارزیابی آماری مدل جهت پیش‌بینی مقادیر رطوبت

تیمار و عمق خاک (cm)	خطای متوسط (MBE)	میانگین کامل انحراف (AD)	خطای استاندارد (SE)	درصد خطای نسبی (RE)	ضریب تغییرات (CV) (درصد)	کارایی مدل (EF)	ضریب همبستگی (R^2)
I تیمار							
۰-۳۰	-۲/۲۶	۲/۲۶	۳/۲۴	۸/۸۹	۱۳	۰/۷	۰/۸۵
۳۰-۶۰	-۱/۶۹	۱/۸۹	۲/۰۱	۶/۱۹	۷	۰/۸۳	۰/۹۱
۶۰-۹۰	-۰/۵۵	۲/۱۷	۲/۸۱	۱/۷۹	۱۲	۰/۷۷	۰/۸۸
۹۰-۱۲۰	-۱/۷۷	۱/۷۷	۱/۹۵	۶/۰۴	۷	۰/۸۸	۰/۹۱
II تیمار							
۰-۳۰	-۱/۷۴	۱/۷۴	۱/۸۴	۸/۵۳	۸	۰/۸۶	۰/۹۸
۳۰-۶۰	-۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۴۶	۸/۳۰	۹	۰/۶۷	۰/۸۹
۶۰-۹۰	-۱/۸۹	۱/۸۹	۱/۹۹	۶/۵۶	۷	۰/۸۶	۰/۹۳
۹۰-۱۲۰	-۱/۸۶	۱/۸۶	۱/۹۷	۶/۳۲	۷	۰/۸۸	۰/۹۳
III تیمار							
۰-۳۰	-۱/۷۷	۱/۷۷	۱/۹۴	۸/۶۶	۹	۰/۹	۰/۹۸
۳۰-۶۰	-۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۸۶	۶/۵۶	۷	۰/۷	۰/۹۱
۶۰-۹۰	-۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۸۵	۶/۱۸	۷	۰/۸۲	۰/۹۲
۹۰-۱۲۰	-۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۲۵	۷/۴۴	۸	۰/۸۰	۰/۹۳

گرافیکی انتخاب شد. مقادیر خطای متوسط، درصد خطای نسبی و ضریب تغییرات در حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند برابر با صفر و مقدار کارایی مدل در این حالت برابر با یک می‌باشد. خطای متوسط شاخصی از مقایسه با مقادیر پایه است، به طوری که مقدار نزدیک به صفر آن بیان‌کننده آن است که متوسط مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده متشابه است. همچنین علامت مثبت و منفی آن نشان‌دهنده آن است که مدل مقادیر را به ترتیب بیشتر و کمتر از واقعیت پیش‌بینی می‌کند.

نتایج و بحث

جدول (۵) میزان شاخص‌های آماری رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل رطوبت حجمی شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود مقدار درصد خطای نسبی (RE) در تیمار I₁ بین ۱/۷۹ تا ۸/۸۹ درصد متغیر است و این پارامتر برای تیمار I₂ بین ۶/۳۲ تا ۸/۵۳ و برای تیمار I₃ بین ۶/۱۸ تا ۸/۶۶ درصد نوسان می‌کند. MBE منفی در تمام تیمارها نشان می‌دهد که مدل در تمام اعماق مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد می‌نماید. میزان این شاخص آماری در مورد رطوبت خاک از ۰/۵۵- تا ۲/۲۶- متغیر بود. در این رابطه درختان نژاد و همکاران (۲۰۱۱) نیز در تحقیقی با شرایط کشت نیشکر به شبیه‌سازی رطوبت در خاک در

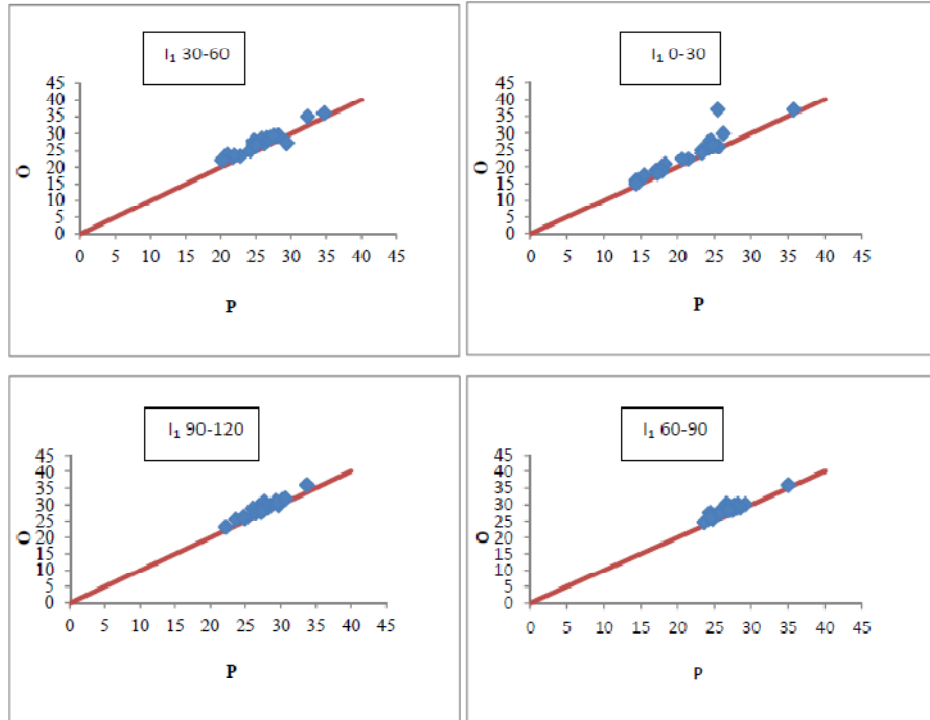
ضریب اعوجاج در تابع جریان (I) از جمله ضرایبی بودند که مقادیر آنها با استفاده از واسنجی مدل انتخاب و تخمین زده شدند. در این تحقیق از داده‌های صحرایی موجود در منطقه برای گیاه گندم به عنوان داده‌های مشاهده‌ای به منظور واسنجی نمودن ضرایب فوق استفاده شد. ضرایب فوق در یک دامنه مجاز پیشنهاد شده در منابع تغییر داده شدند. پس از اجرای مدل در دفعات مختلف، مقایسه غلظت نیترات کل شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده صورت گرفت. زمانی که میانگین خطا حداقل و ضریب همبستگی نسبتاً بالا به دست آمد اجرای مدل متوقف گردید. نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده‌اند. واسنجی مدل در شرایط بدون تنش آب صورت گرفت.

معیارهای ارزیابی مدل

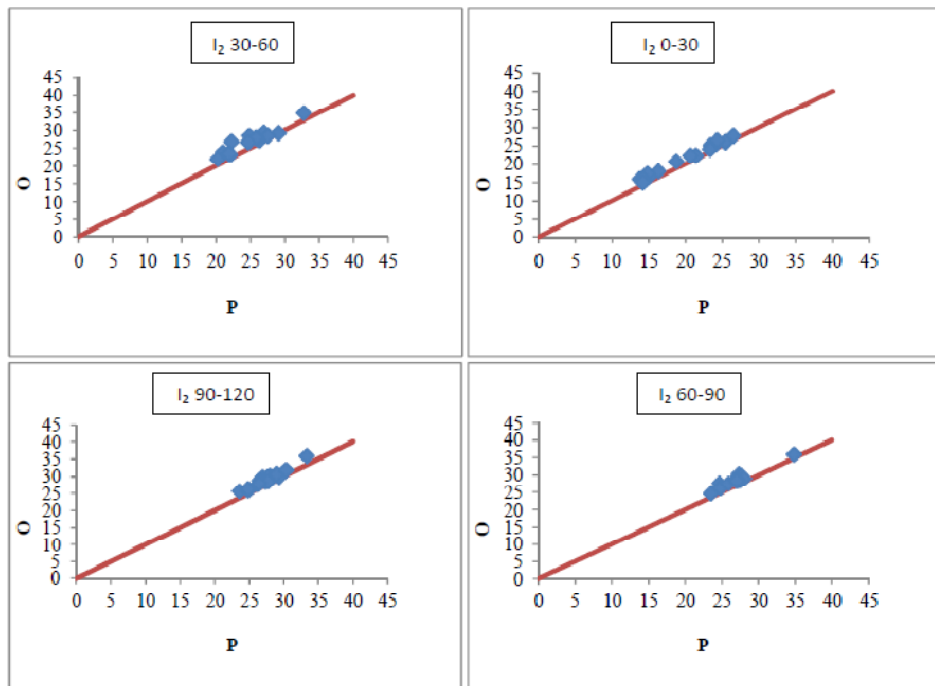
برای ارزیابی نتایج و به منظور بهره‌گیری از یک مدل برای شبیه‌سازی، نتایج آن باید با مشاهدات مزرعه‌ای مقایسه گردد. برای این کار از شاخص‌های آماری و نموداری استفاده می‌شود. در این مورد شاخص‌های معنی‌دار بودن میانگین اختلاف‌ها (MBE)، میانگین کامل انحراف (AD)، خطای استاندارد (SE)، درصد خطای نسبی (RE)، ضریب تغییرات (CV)، کارایی مدل (EF) و ضریب همبستگی (R^2) مورد استفاده قرار گرفت و رسم مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده روی یک نمودار با مقیاس (۱:۱) به عنوان روش

چگونگی برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد بین ۰/۶۷ تا ۰/۹۹ متغیر بود. در شکل‌های (۱) الی (۳) مقادیر مشاهده شده و برآورد شده رطوبت در تیمارهای مختلف با مقیاس مساوی (۱:۱) نشان داده شده است. نتیجه‌ای که از این شکل‌ها گرفته می‌شود آن است که بین مقادیر اندازه‌گیری شده (O) و پیش‌بینی شده (P) در تمام تیمارها همبستگی نسبتاً خوبی وجود دارد.

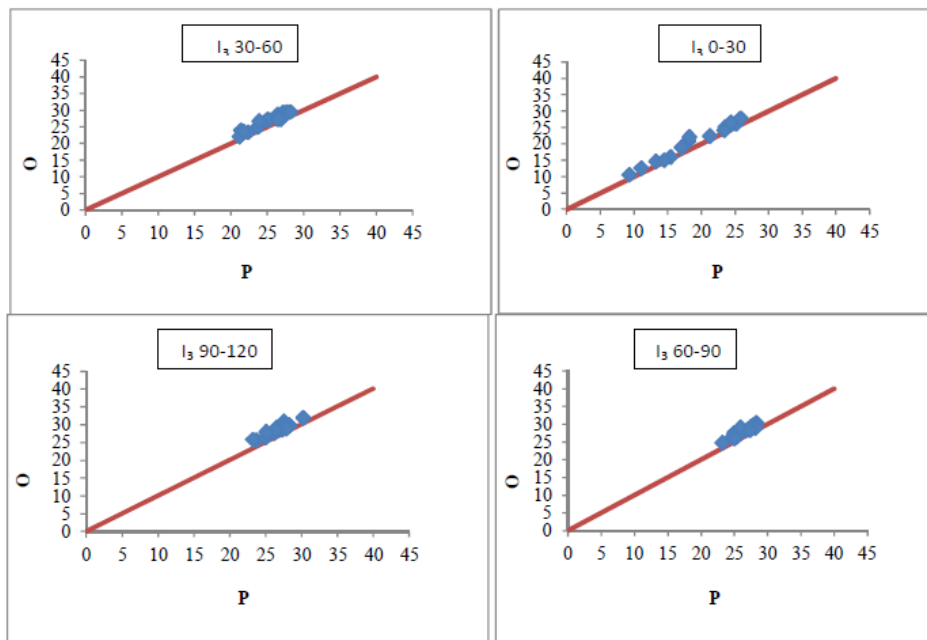
زمان‌های مختلف با مدل HTDRUS-1D پرداختند و نتایج آن تحقیق نشان داد که مدل مقادیر کمتری را نسبت به واقعیت برآورد می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین همبستگی در تمام تیمارها ۰/۹۸ مربوط به عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر در تیمار I₂ و کمترین همبستگی مربوط به عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر در تیمار I₁ می‌باشد. مقبلی دامنه و دلفاردی (۱۳۸۸) ضریب همبستگی را بین ۰/۷۳ تا ۰/۹۱ در تیمارهای مختلف گزارش نموده است. مقدار کارایی مدل که نشان دهنده کیفیت و



شکل ۱- مقادیر مشاهده شده (O) و برآورد شده (P) درصد رطوبت در عمق‌های مختلف در تیمار I₁



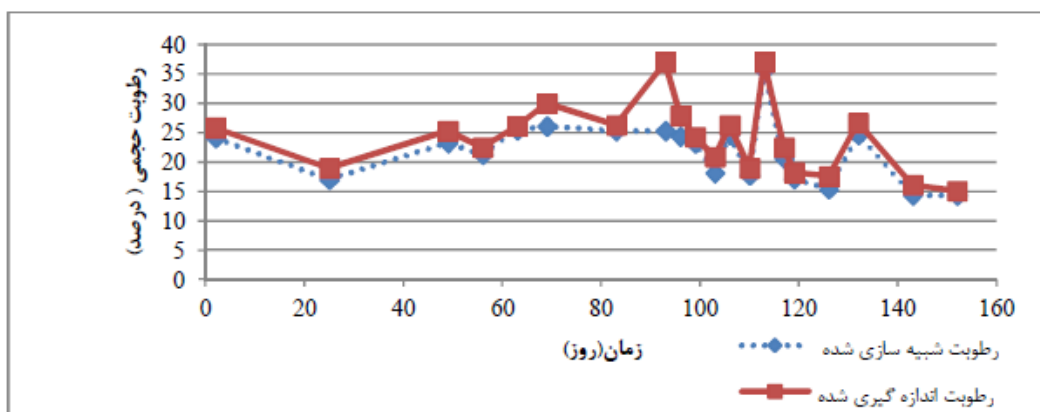
شکل ۲- مقادیر مشاهده شده (O) و برآورد شده (P) درصد رطوبت در عمق‌های مختلف در تیمار I₂



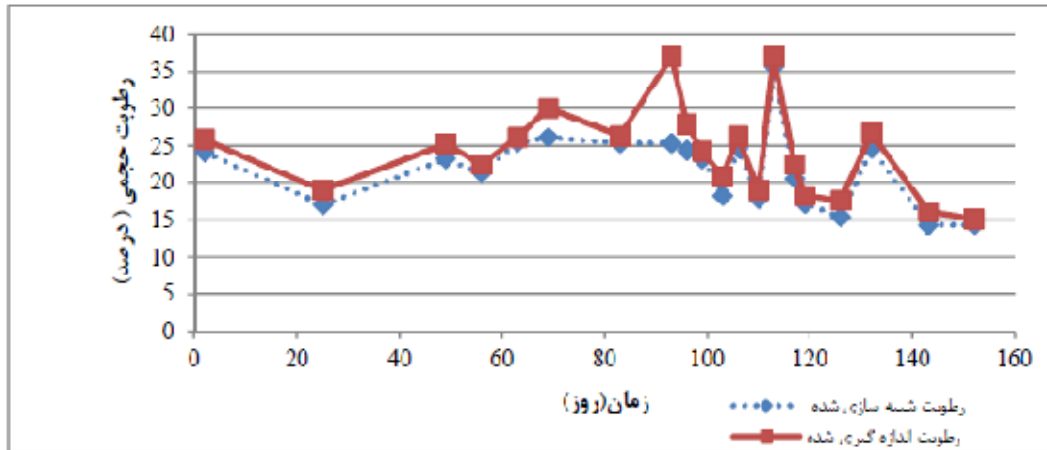
شکل ۳- مقادیر مشاهده شده (O) و برآورد شده (P) درصد رطوبت در عمق‌های مختلف در تیمار I₃

مشاهده شد که میزان رطوبت خاک بلافاصله بعد از آبیاری‌های اولیه در لایه اول و دوم تقریباً به یک اندازه نیم‌رخ خاک را خیس نموده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود میزان رطوبت خاک قبل از آبیاری در روز ۱۲۶، ۲۲/۱۲ درصد است. به عبارتی مقدار آب تخلیه و جذب شده توسط گیاه در بین دو آبیاری بجای ۵۵ درصد رطوبت قابل دسترسی ۸۹ درصد رسیده است و گیاه در این مقطع زمان تحت تنش می‌باشد ولی خارج از این محدوده زمانی گیاه هیچ گونه تنشی ندیده است. در عمق‌های ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر رطوبت بالاتر از ۲۶ درصد حجمی است. در تمام عمق‌ها مشاهده می‌شود که مدل مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد می‌نماید.

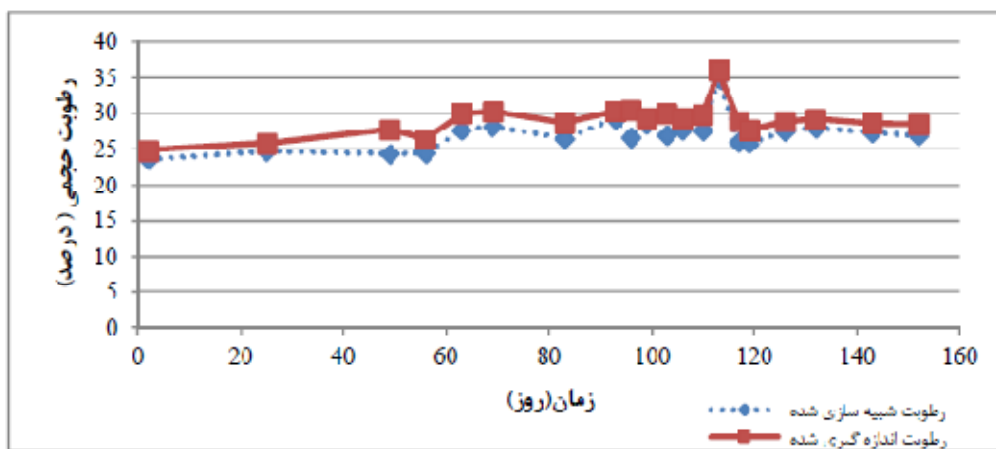
شکل‌های (۴) الی (۱۵) وضعیت رطوبتی خاک را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. در تیمار I₁ یا تیمار بدون تنش مشاهده می‌شود که در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری در اکثر مواقع در روزهای قبل از آبیاری مقدار رطوبت از مقدار ۲۶/۵۹ درصد کمتر بود و کمترین مقدار آن در روز ۱۲۶ یعنی قبل از آخرین آبیاری به میزان ۱۷/۵۹ درصد مشاهده شد. به عبارتی مقدار آب تخلیه و جذب شده توسط گیاه در بین دو آبیاری پنجم و ششم به جای ۵۵ درصد رطوبت قابل دسترسی به حدود ۹۸ درصد رسیده است. این نکته بیان‌کننده این واقعیت است که قریب ۱۰۰ درصد آب قابل دسترسی در این لایه صرف تبخیر و تعرق (عمدتاً تبخیر از سطح خاک) شده است. در لایه دوم (۶۰-۳۰)



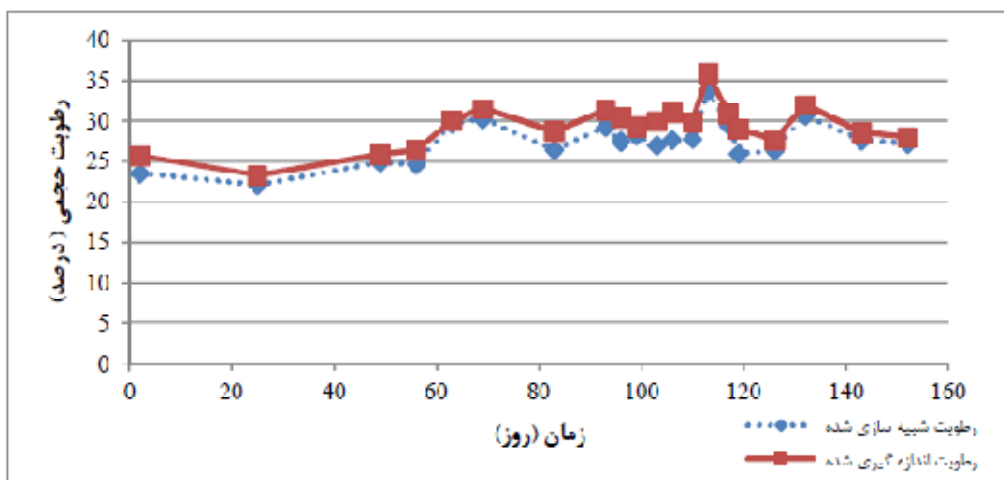
شکل ۴- روند تغییرات رطوبت در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر تیمار I₁



شکل ۵- روند تغییرات رطوبت در عمق ۳۰-۶۰ سانتی متر تیمار I₁



شکل ۶- روند تغییرات رطوبت در عمق ۶۰-۹۰ سانتی متر تیمار I₁



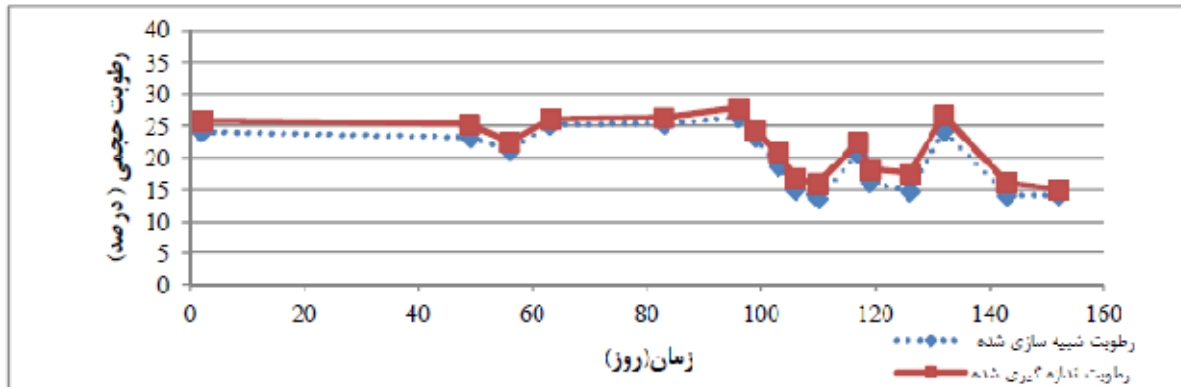
شکل ۷- روند تغییرات رطوبت در عمق ۹۰-۱۲۰ سانتی متر تیمار I₁

در این تیمار در تمام زمان‌ها مقدار رطوبت قبل از آبیاری‌ها کمتر از حد رطوبت آبیاری (۲۶/۵۹) بوده و این به‌خاطر تبخیر از سطح این لایه است. در عمق ۳۰-۶۰ بعد از اعمال تنش مدل رطوبت را ۲۰/۱۳ درصد نشان می‌دهد. در صورتی که مقدار مشاهده شده رطوبت در مزرعه ۲۲/۱۲ درصد می‌باشد و این مقدار بیان‌کننده ۵۸ درصد تخلیه

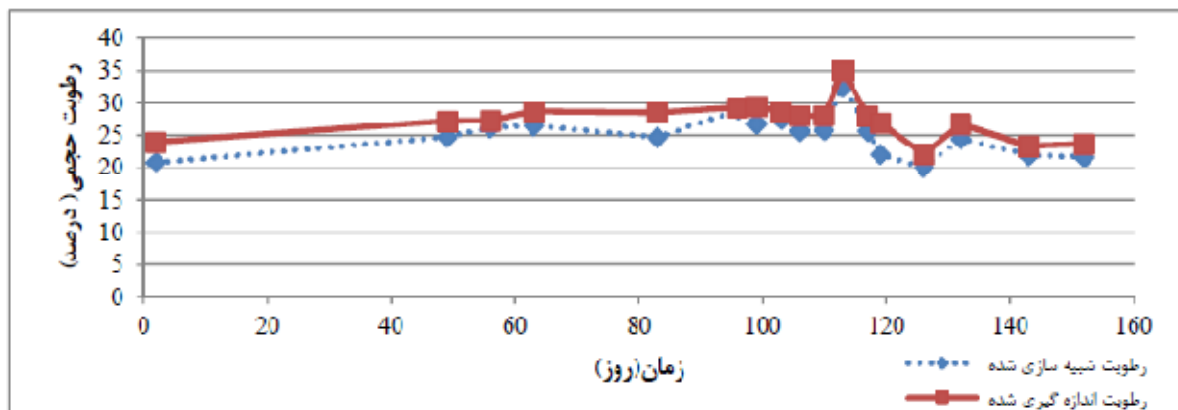
در تیمار I₂ آبیاری چهارم حذف شده است یعنی طول دوره تنش ۱۹ روز می‌باشد. شکل‌های (۸) الی (۱۱) وضعیت رطوبت در این تیمار را نشان می‌دهد. بعد از اعمال تنش مدل رطوبت را در عمق ۳۰-۶۰ ، ۱۳/۶۵ درصد نشان می‌دهد. این مقدار بیان‌کننده ۱۰۰ درصد تخلیه رطوبت می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در لایه ۳۰-۶۰

تغییرات رطوبت در لایه‌ی چهارم نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نکته‌ی حائز اهمیت در این است که رطوبت هیچ گاه به رطوبت زمان آبیاری نمی‌رسد و همواره از آن بزرگتر است. به عبارت دیگر تنش آبیاری بر این عمق هیچ گونه تأثیری ندارد. در این تیمار نیز در اعماق ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر مدل مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد می‌نماید.

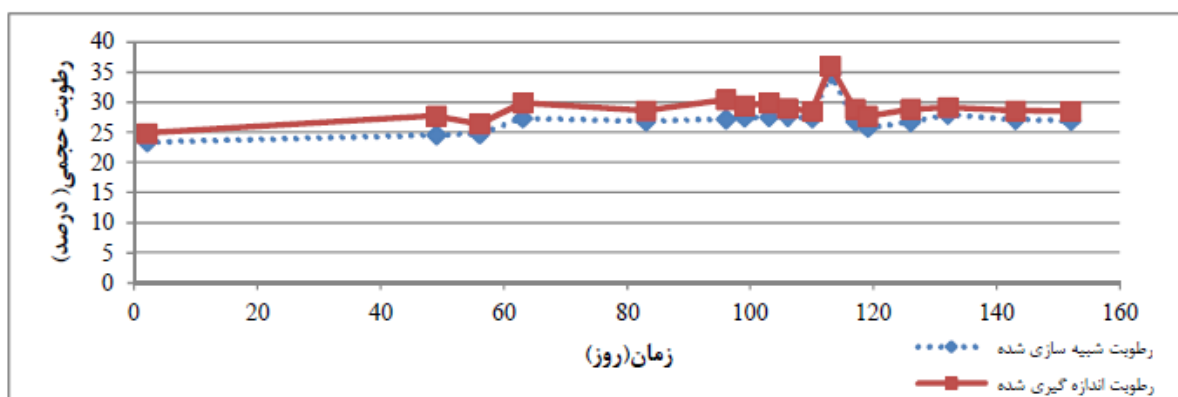
رطوبت می‌باشد. درصد رطوبت خاک در لایه‌ی سوم (۶۰-۹۰) در تیمار تنش I₂ قبل از آبیاری و قطع تنش ۲۸/۵۰ اندازه‌گیری شده است. به عبارتی از کل آب قابل دسترسی در این لایه ۴۶/۹ درصد توسط گیاه جذب شده است. در اینجا نیز همانند تیمارهای آبی دیگر، رطوبت خاک در آبیاری‌های آخر فصل به دلیل افزایش حجم آب داده شده افزایش چشمگیری داشته و مجدداً به یک حالت ثابت می‌رسد. روند



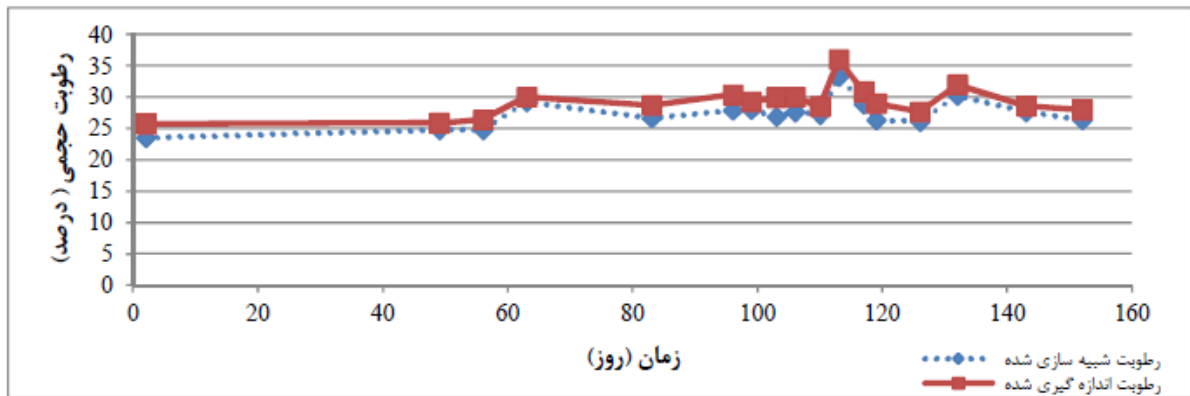
شکل ۸- روند تغییرات رطوبت در عمق ۰-۳۰ سانتیمتر تیمار I₂



شکل ۹- روند تغییرات رطوبت در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متر تیمار I₂



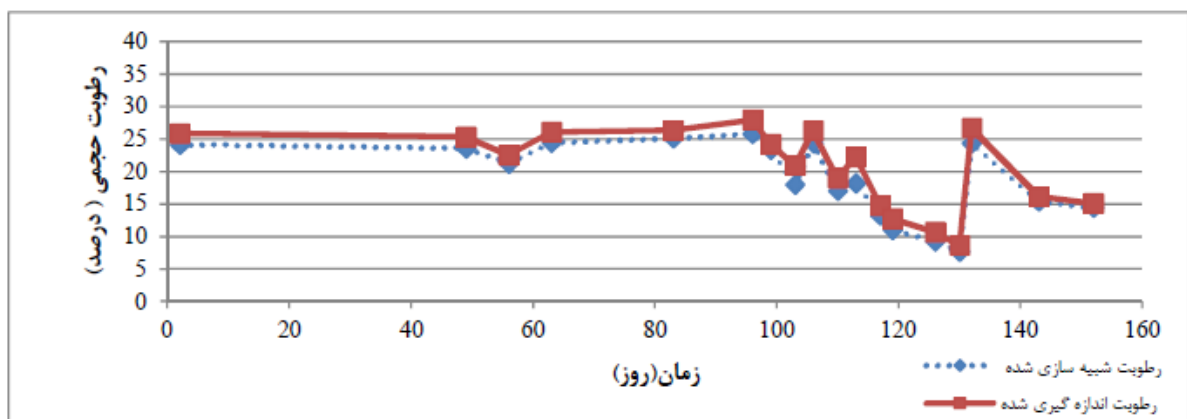
شکل ۱۰- روند تغییرات رطوبت در عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متر تیمار I₂



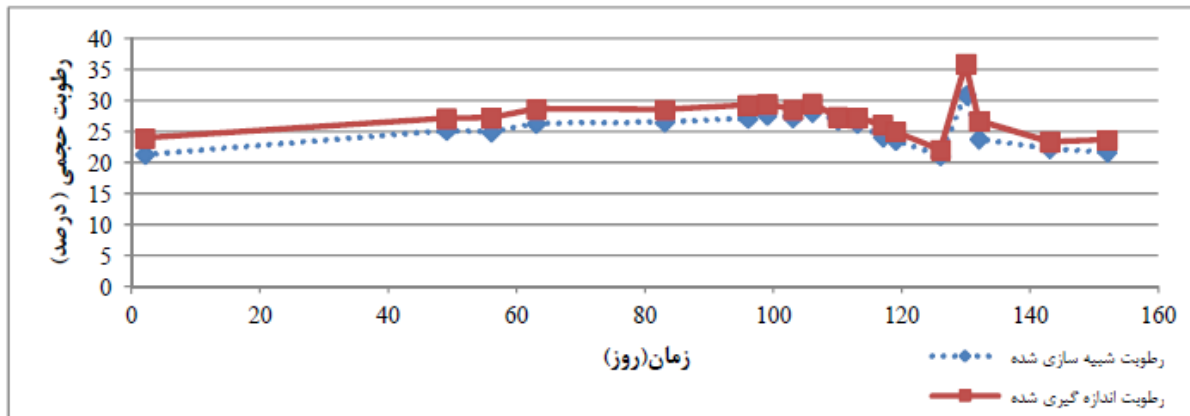
شکل ۱۱- روند تغییرات رطوبت در عمق ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر تیمار_۲

است، بنابراین مقدار رطوبت به تنهایی نمی‌تواند بیان‌کننده وضعیت رطوبتی خاک باشد. از آنجایی که حرکت آب از یک نقطه به نقطه دیگر و از خاک به طرف گیاه تحت تأثیر اختلاف پتانسیل ماتریک آب خاک و ریشه می‌باشد و خاک‌های متفاوت با داشتن مقادیر یکسان رطوبت دارای پتانسیل ماتریک متفاوت می‌باشند لذا بررسی وضعیت رطوبتی خاک با استفاده از مقادیر پتانسیل ماتریک به همراه رطوبت می‌تواند نتایج مفیدتری را داشته باشد. درصد رطوبت خاک در لایه سوم (۹۰-۶۰) در تیمار تنش I₃ قبل از آبیاری و قطع تنش ۲۶ درصد اندازه‌گیری شده است که در مقایسه با تیمار I₂ مقدار ۲/۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. به عبارتی از کل آب قابل دسترس در این لایه ۶۲ درصد توسط گیاه جذب شده است. با مقایسه جذب آب از عمق ۹۰-۶۰ تیمار I₂ و I₃ مشاهده می‌شود که گیاه در زمانی که تبخیر و تعرق بیشتر صورت می‌گیرد آب را از اعماق پایین‌تر بیشتر جذب می‌نماید. روند تغییرات رطوبت در لایه چهارم نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در تمام مواقع رطوبت بیشتر از رطوبت زمان آبیاری است و این عمق هیچگاه دچار تنش نشده است.

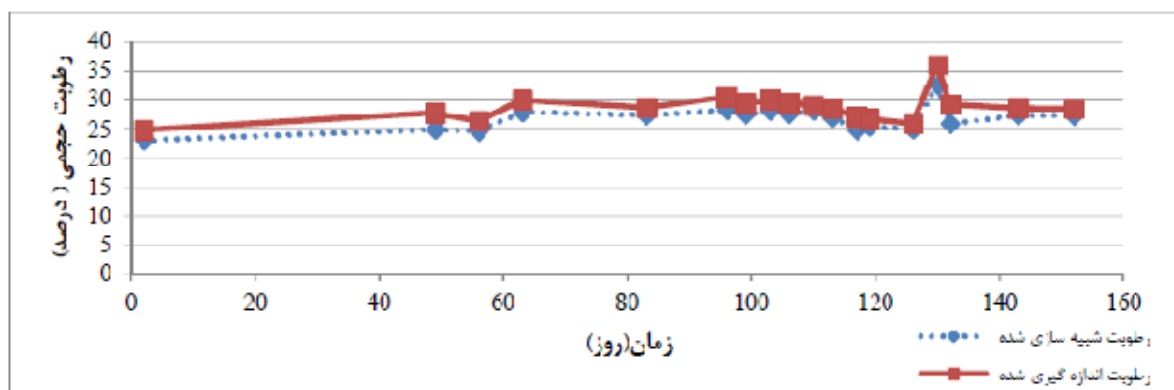
در تیمار I₃ آبیاری پنجم حذف شده است به عبارتی طول دوره تنش در این تیمار ۲۴ روز می‌باشد. شکل‌های (۱۲) الی (۱۵) وضعیت رطوبت در این تیمار را نشان می‌دهد. در این تیمار نیز در لایه اول در تمام زمانها مقدار رطوبت قبل از آبیاری‌ها کمتر از حد رطوبت آبیاری (۲۶/۵۹) است. در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر بعد از اعمال تنش مدل رطوبت را ۲۱/۱۳ درصد نشان داد در صورتی که مقدار مشاهده شده ۲۲/۱۲ درصد است و این مقدار بیان‌کننده ۸۹ درصد تخلیه رطوبت می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این می‌باشد که با مقایسه رطوبت موجود در این لایه در پایان دوره تنش مشاهده می‌شود که رطوبت در تیمار I₃ به میزان ۵/۱۹ درصد نسبت به زمان تنش I₂ کاهش یافته است این در حالی است که مقدار پتانسیل ماتریک در این حالت از ۶۱۹/۳۹- به ۱۰۶۱/۸- کیلو پاسکال تنزل یافته است. ملاحظه می‌گردد که با وجود اینکه اختلاف درصد رطوبت حجمی در دو تیمار I₂ و I₃، ۵/۱۹ درصد است، مقدار پتانسیل ماتریک حدود ۴۴۲ کیلوپاسکال با هم تفاوت دارند. این ثابت می‌کند که در شرایط خشک‌تر، کاهش اندک در مقدار رطوبت خاک باعث افزایش قابل توجهی در مقدار پتانسیل ماتریک می‌شود. به عبارتی تغییرات خطی درصد رطوبت با تغییرات نمایی مکش همراه



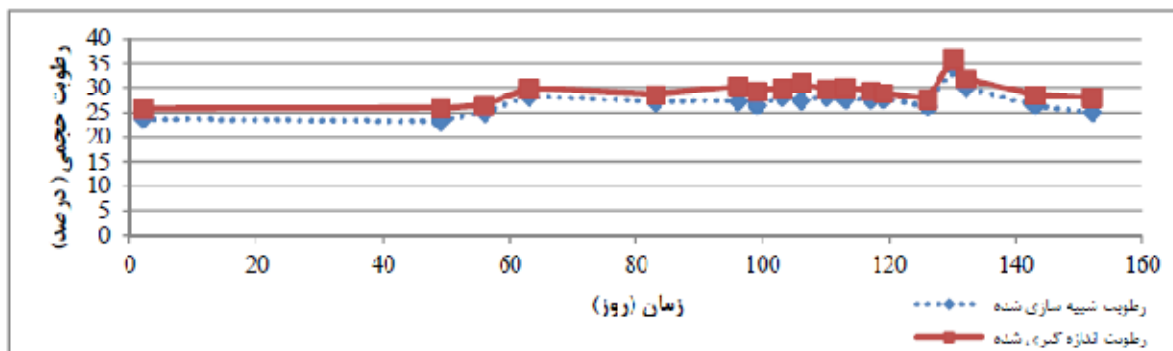
شکل ۱۲- روند تغییرات رطوبت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر تیمار_۳



شکل ۱۳- روند تغییرات رطوبت در عمق ۳۰-۶۰ سانتی متر تیمار I₃



شکل ۱۴- روند تغییرات رطوبت در عمق ۶۰-۹۰ سانتی متر تیمار I₂



شکل ۱۵- روند تغییرات رطوبت در عمق ۹۰-۱۲۰ سانتی متر تیمار I₁

است. میزان این شاخص آماری در مورد رطوبت خاک از ۰/۵۵- تا ۲/۲۶- متغیر بود. بیشترین همبستگی در تمام تیمارها ۰/۹۸ مربوط به عمق ۰-۳۰ سانتی متر در تیمار I₂ و کمترین همبستگی مربوط به عمق ۰-۳۰ سانتی متر در تیمار I₁ بود. مقدار کارایی مدل که نشان دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده است بین ۰/۶۷ تا ۰/۹ متغیر بود که این امر با نتایج تحقیقات دیگران مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از: نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل نسبت به ضریب رطوبتی خاک در حالت اشباع (θ_s) بیش از دیگر ضرایب حساس است و با تغییر جزئی مقادیر این ضریب تغییرات به سزایی در خروجی‌های مدل مشاهده شد. کمترین تأثیر مربوط به ضرایب α ، I و θ_r بود. منفی بودن میانگین انحراف ها (MBE) در تمام اعماق و در تمام تیمارها نشان داد که مدل مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد کرده

منابع

- ۱- اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUD-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۱): ۱-۱۴.
- ۲- بشارت، س.، ناظمی، ا.، صدرالدینی، ع. و ش. صداقت. ۱۳۹۰. استفاده از نرم افزار HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک و ارائه نرم افزار SWMRUN. دانش آب و خاک، ۲۱(۴): ۱۳۷-۱۲۱.
- ۳- پارسایی قادر آبادی، ن.، صیاد، غ. و ا. لندی. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی حرکت کلراید در خاکی با بافت سیلتی کلی لوم در شمال خوزستان. مجموعه مقالات سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز.
- ۴- تقوی، ه.، حسینی نیا، م.، کریمی گوغری، ش. و م. ایراندوست. ۱۳۹۱. توانایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۶، ۶۱: ۶۹-۵۹.
- ۵- صیاد، غ.، موسوی، ف.، عباسپور، ک. و م. افیونی. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی حرکت کادمیم، مس، سرب و روی در یک خاک دست نخورده آهکی تحت کشت گندم و گلرنگ با استفاده از مدل انتقال املاح HYDRUS-1D. فصلنامه علوم کشاورزی ایران، سال سی و نهم، ۱۰: ۲۰۰-۱۸۷.
- ۶- مقبلی دامنه، ا. و ص. دلفارادی. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک (مطالعه موردی: جیرفت). مجموعه مقالات همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.
- 7- Assouline, S. 2002. The effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. Soil Science Society of America Journal, 66: 1630-1636.
- 8- Derakhshan Nejad, Z., Sayyad, G., Jafarnejad, A. and A. Assareh. 2011. Application of equilibrium and nonequilibrium solute movement equations to simulate nitrate movement in soil by HYDRUS-1D model. International Conference on Agricultural Engineering (TSAE2001).
- 9- Gardenas, A., Hopmans, J. W., Hanson, B. R. and J. Simunek. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural Water Management, 74: 219-42.
- 10- Hutson, J. L. and R. J. Wagenet. 1992. LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in unsaturated zone. Version 3. Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY.
- 11- Lazarovitch, N., Warrick, A. W., Furman, A. and J. Simunek. 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. Vadose Zone Journal, 6: 116-123.
- 12- Simunek, J., Sejan, M. and M. Th. Van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Research report No. 144, U. S. Salinity Lab., USDA, Riverside, California.
- 13- Wang, F. X., Kang, Y. and S. P. Liu. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. Agricultural Water Management, 79: 248-264.
- 14- Van Genuchten, M. Th. 1982. A comparison of numerical solution of the one dimensional unsaturated-saturated flow and mass transport equations. Advances in Water Resource, 5: 47-55.
- 15- Vogel, T., Huang, R. and M. Th. Van Genuchten. 1996. The HYDRUS code for simulation one-dimensional water flow, solute transport, and heat movement in variably-saturated media. Version 5.0 Res. Rep. 140. U. S. Salinity Lab., Riverside, CA.