تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۳، مرداد ۱۳۹۸ (ص۵۹۱-۵۸۱) DOI: 10.22059/ijswr.2018.266487.668018

Sensitivity Analysis and Evaluation of Physical and Experimental Models of Root Water Uptake in Tomato

HADI DEHGHAN[1*], AMIN ALIZEDEH[2], KAZEM ESMAILI[3], MOHAMMAD NADERIANFAR[4]

1. Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran
2. Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3. Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4. Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

(Received: Oct. 25, 2018- Revised: Dec. 6, 2018- Accepted: Dec. 18, 2018)

ABSTRACT

Root water uptake is considered as a major factor for predicting plant transpiration and the product yield. In general, the water root uptake models are divided into two macro- (experimental) and micro- (physical) groups. The physical models require more hydraulic parameters, while empirical models are simpler and require less input data. The aim of this study was to compare the performance of two empirical models and a physical model to predict the root water uptake of tomato under greenhouse conditions. Hence, the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) was used to calibrate the models (hydraulic parameters of soil and root water uptake). The results of the sensitivity analysis of different models showed that the root water uptake is more sensitive to soil hydraulic conditions than the root characteristics. The results indicated that among the soil hydraulic parameters, the root water uptake shows more susceptibility to the coefficients of shape (λ) and the saturation moisture content (Θ_s). Among the root characteristics, the most sensitive parameter is the longitudinal density of the root. The results also revealed that the Van Genuchten model combined with the GLUE method has well simulated the root water uptake, as the parameters of R^2, NS, NRMSE, MAE, ME, and d were 0.79, 0.69, 14.12, 0.75, 0.69, 0.86, respectively. The integration of root water uptake models as a sub-model in the agro-hydrological models appears to be a useful tool for predicting the plant transpiration, the product yield as well as water management in the field.

Keywords: Soil Hydrological Parameters, Root Characteristics, Tomato, Model

*Corresponding Author's Email: h.dehghan@kashmar.ac.ir

تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل‌های فیزیکی و تجربی جذب آب ریشه در گیاه گوجه‌فرنگی

هادی دهقان[1*]، امین علیزاده[2]، کاظم اسماعیلی[3]، محمد نادریان فر[4]

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۹/۱۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۹/۲۷)

چکیده

جذب آب توسط ریشه عامل مهمی در پیش‌بینی تعرق گیاه و عملکرد محصول به شمار می‌رود. به طور کلی مدل‌های جذب آب ریشه به دو گروه کلان (تجربی) و خرد (فیزیکی) تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های فیزیکی به پارامترهای هیدرولیکی بیشتری نیاز دارند، در حالی که مدل‌های تجربی ساده‌تر و به اطلاعات ورودی کمتری نیاز دارند. هدف از این پژوهش مقایسه عملکرد دو مدل تجربی و یک مدل فیزیکی برای پیش‌بینی جذب آب ریشه در گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای می‌باشد. بدین ترتیب از روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) برای واسنجی مدل‌ها (پارامترهای هیدرولیکی خاک و جذب آب ریشه) استفاده شده است. نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های مختلف نشان داد جذب آب ریشه به شرایط هیدرولیکی خاک حساس‌تر از خصوصیات ریشه می‌باشند. نتایج نشان داد از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، جذب آب ریشه نسبت به ضرایب شکل λ و درصد رطوبت اشباع (θ_s) حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. از بین خصوصیات ریشه، حساس‌ترین پارامتر تراکم طولی ریشه می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد مدل ون‌گنوختن در ترکیب با روش GLUE به خوبی توانسته است جذب آب ریشه را شبیه‌سازی کند، به طوری که آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ضریب کارایی نش- ساتکلیف (N.S)، میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، کارایی مدل‌سازی (ME) و شاخص توافق (d) به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۶۹، ۱۴/۱۲، ۰/۷۵، ۰/۶۹، ۰/۸۶ به دست آمد. تلفیق مدل‌های جذب آب ریشه به عنوان زیر مدل در مدل‌های اگروهیدرولوژیک، ابزاری مفید برای پیش‌بینی تعرق گیاه، عملکرد محصول و همچنین مدیریت آب در مزرعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، خصوصیات ریشه، گوجه‌فرنگی، مدل

مقدمه

شدت تعرق گیاه به عوامل زیادی از جمله تقاضای اتمسفر، شکل و ویژگی‌های مرز بین گیاه و اتمسفر، سیستم ریشه گیاه و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و گیاه بستگی دارد (Santos *et al.*, 2017). مدل‌های زیادی در دهه‌های اخیر با هدف رسیدن به یک معادله کمی مناسب برای جذب رطوبت خاک توسط گیاه توسعه داده شده است. این مدل‌ها به طور گسترده در هدف، ساختمان و سطح جزئیات متفاوت هستند. بعضی از این معادلات تجربی و بعضی دیگر روش‌های فیزیکی هستند که ترکیبی از پارامترهای خاک، گیاه و آب را در نظر می‌گیرند. روش مدل‌سازی معرفی شده توسط Gardner (1960) که در واقع از آن به عنوان مدل فیزیکی یا خرد (microscopic) یاد می‌شود (Raats, 2007) به علت ضعف در توصیف عملکرد نسبی و عملیات پیچیده سیستم ریشه و همچنین تعامل پیچیده آن با خاک به آسانی قابل کاربرد نمی‌باشد (Passioura, 1988). با این حال، از این دیدگاه برای توسعه مدل‌های فیزیکی، تلاش زیادی صورت گرفته است (Raats, 2007; De Jong Van Lier *et al.*, 2008). جدیدترین مدل در این زمینه توسط De Jong Van Lier *et al.* (2008) مطرح شده است. این مدل برخلاف مدل‌های ارائه شده قبلی، پارامترهای تجربی کمتری نیاز دارد. با این حال، عملکرد نتایج تابع کاهشی آن‌ها در مقایسه با آزمایشات طولانی مدت از آلمان و کانادا رضایت‌بخش بود. با این وجود ارزیابی بیشتر مدل تحت شرایط مختلف رطوبتی در منطقه ریشه لازم است.

در بسیاری از مسائل یک و دو بعدی در محیط غیراشباع خاک، از روش‌های تجربی یا کلان (macroscopic) به عنوان ترم

* نویسنده مسئول: h.dehghan@kashmar.ac.ir

تخلیه در معادله ریچاردز (۱۹۳۱) استفاده شده است که در واقع وابستگی این روش‌ها بیشتر به مقدار رطوبت یا بار فشاری می‌باشد و با توابع تجربی ساده بیان می‌شوند (به عنوان مثال Feddes *et al*., 1978; Van Genuchten, 1987; Li *et al*., 2006). اکثر این مدل‌ها، از مدل Feddes *et al*. (1978) الگوبرداری شده است که در آن جذب آب ریشه با توجه به تراکم طولی ریشه و تابع کاهش تنش محاسبه می‌گردد.

Cai *et al*. (2017) در مطالعه‌ای عملکرد مدل‌های Feddes–Jarvis، Feddes غیر جبرانی و مدل فیزیکی Couvreur را در پیش‌بینی جذب آب ریشه بررسی کردند. مدل‌های جذب آب ریشه در مدل HYDRUS-1D اجرا شده و پارامترهای هیدرولیکی خاک با مدل‌سازی معکوس داده‌های رطوبت و پتانسیل خاک و توزیع ریشه گندم زمستانه بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد عملکرد مدل‌های Feddes–Jarvis و Couvreur در شبیه‌سازی الگوهای جذب آب ریشه و پتانسیل آب خاک مشابه می‌باشد و در نهایت پیشنهاد گردید پارامترهای بهینه‌سازی شده بین این دو مدل قابل انتقال می‌باشند.

Santos *et al*. (2017) در پژوهشی عملکرد مدل فیزیکی ارائه شده توسط De Jong Van Lier *et al*. (2008) و مدل‌های تجربی را در شرایط مختلف محیطی بررسی کردند. پارامترهای مدل‌های تجربی با مدل‌سازی معکوس داده‌های جذب آب ریشه با عمق تعیین شدند. نتایج نشان داد عملکرد مدل‌های تجربی بستگی به نوع سناریوی شبیه‌سازی دارد. به عنوان مثال عملکرد مدل Feddes در مقادیر پایین تراکم طولی ریشه و جذب جبرانی مناسب می‌باشد. در مقادیر بالای تراکم طولی ریشه مدل‌های فیزیکی الگوی جذب آب را خوب پیش‌بینی نکردند. مدل Jarvis در ترکیب با تابع کاهش Feddes (JMf) در سناریوی تراکم‌های طولی ریشه کم و متوسط نتایج خوبی نشان داد. به طور کلی نتایج شاخص‌های آماری نشان داد مدل Jarvis (2010) که در آن هیچ پارامتر تجربی وجود ندارد، بهترین مدل می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد مدل‌های تجربی پیشنهاد شده در این مطالعه نسبت به مدل‌های فیزیکی عملکرد بهتری داشتند.

Faria *et al*. (2010) در یک آزمایش لایسیمتری با گیاه سورگوم عملکرد مدل جذب آب ریشه خرد ارائه شده توسط De Jong Van Lier *et al*. (2008) را آزمون کردند. انتشار آب از ریشه‌ها به خاک در چندین نوبت در طول آزمایشات پیش‌بینی و مشاهده شد. این امر ممکن است به دلیل لحاظ نکردن مقاومت داخلی سیستم ریشه باشد. به استثنای این پیش‌بینی اشتباه در داده‌ها، شاخص‌های آماری نشان می‌دهد عملکرد مدل با کیفیت خوبی همراه می‌باشد.

Alizadeh *et al*. (2009) در یک مطالعه گلدانی بر روی گوجه‌فرنگی در منطقه کرج شش تابع کاهش جذب ماکروسکوپی با ۸ سطح شوری را مورد ارزیابی قرار دادند. سطوح آبی به صورت تغییرات پتانسیل ماتریک اعمال می‌شد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در شرایط عدم وجود تنش شوری همه مدل‌ها برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده میزان جذب آب توسط ریشه گیاه داشتند.

Ardalani *et al*. (2016) در مطالعه‌ای توابع کاهش جذب گوجه‌فرنگی رقم Solanum lycopersicum را در شرایط تنش هم‌زمان کم‌آبی و شوری بررسی کردند. آزمایش به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش سطح شوری و چهار سطح کمی آب آبیاری انجام شد. نتایج نشان داد در سطوح شوری کم، واکنش گیاه به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی جمع‌پذیر است و مدل جمع‌پذیر ون‌گنوختن به خوبی الگوی جذب آب را شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که در سطوح شوری بالاتر از ۴ دسیزیمنس بر متر مدل‌های ضرب‌پذیر برازش بهتری دارند و مدل Skaggs et al., (2006) و Homaee et al., (2002) بهترین برازش را با داده‌های گلخانه‌ای در گیاه گوجه‌فرنگی داشت.

با مروری بر مطالعات انجام شده، نتایج نشان می‌دهد بیشتر مطالعات جذب آب ریشه بر روی مدل‌های تجربی یا کلان متمرکز شده است و در خصوص مدل‌های فیزیکی جذب آب ریشه به ویژه در داخل کشور تاکنون مطالعه خاصی انجام نشده است. همچنین در کمتر مطالعه‌ای به بررسی حساسیت پارامترهای مدل‌های جذب آب پرداخته شده است. در حالی که جذب آب ریشه از پارامترهای کلیدی در توزیع آب در خاک و مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد و در واقع هر چقدر بتوان این پارامتر را دقیق پیش‌بینی کرد، به نوعی تعرق واقعی گیاه برآورد شده است. بنابراین هدف کلی این مطالعه بررسی توانایی برخی مدل‌های تجربی و یک مدل فیزیکی برای برآورد جذب آب ریشه در شرایط تنش خشکی می‌باشد. در این راستا پارامترهای تجربی مدل‌ها با استفاده از مدل‌سازی معکوس برآورد شده است. همچنین تحلیل حساسیت مدل‌های جذب آب نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک و مشخصات ریشه گیاه نیز بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی جذب آب در شرایط متغیر پتانسیل ماتریک، آزمایشی به صورت گلدانی در

قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و پنج تیمار بر روی گیاه گوجه‌فرنگی رقم CH فلات اجرا شد. آزمایش‌ها در سال ۱۳۹۳ در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. برای کاشت گیاه از گلدان‌های پلاستیکی به قطر بالای ۳۰ سانتی‌متر و قطر پایین ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر استفاده شد. در هر گلدان یک گیاه کاشته شد. برای حذف تبخیر از سطح گلدان‌ها، سطح آن‌ها با لایه‌ای از گراول پوشانده شد. در طول فصل رشد با آفات مگس مینوز و مگس سفید با کاربرد سموم مناسب مبارزه شد. تا مرحله گلدهی هیچ‌گونه تنشی به گیاه وارد نشد و آبیاری با دور زمانی سه روز انجام شد. روز قبل از آبیاری همه گلدان‌ها وزن شدند و مقدار آب آبیاری با توجه به ظرفیت گلدان در ظرفیت زراعی (FC) تعیین گردید. برای تعیین ظرفیت زراعی ابتدا گلدان‌ها اشباع شدند. همچنین سطح گلدان با پلاستیک پوشانده شد. برای تعیین وزن گلدان‌ها در ظرفیت زراعی، گلدان‌ها اشباع و اجازه داده شدند تا ۴۸ ساعت زهکشی انجام شود. بعد از این مدت گلدان‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت یک‌صدم گرم وزن شده و این وزن به عنوان وزن گلدان‌ها در FC در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری از مرحله گلدهی تا میوه‌دهی اعمال شد. از این مرحله به بعد وزن همهٔ گلدان‌ها هر روز (در یک ساعت مشخص، حدود ساعت ۲۱) با یک ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. تیمارهای اعمال شده شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی بود. بدین ترتیب از تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی برای محاسبه جذب پتانسیل، از تیمار ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی برای واسنجی مدل‌ها و از تیمارهای ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده گردید. در شکل (۱) نمایی از گلدان‌های طرح نشان داده شده است.

شکل ۱. نمایی از گلدان‌های مورد استفاده در طرح

بافت خاک لوم‌شنی و وزن خاک مورد استفاده ۲۲/۳۳ کیلوگرم بود. برای تعیین وزن خاک خشک، مقدار مشخصی از خاک مورد استفاده در گلدان‌ها در آون گذاشته و وزن خشک آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و بعد از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. وزن خاک خشک در گلدان‌ها با توجه به درصد رطوبت اولیه محاسبه گردید. رطوبت حجمی خاک، با استفاده از وزن گلدان‌ها، وزن خاک خشک، وزن گیاه و جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از رابطه ذیل محاسبه گردید:

$$\theta_v = \frac{(m_{wp} - m_p - m_b - m_s)}{m_s} \times \rho_b \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن m_{wp} وزن مرطوب گلدان در هر روز، m_p وزن گلدان خالی، m_b وزن بوته، m_s وزن خاک خشک و ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (۱/۵۵ $gr.cm^{-3}$) است. پس از اتمام فصل رشد، قسمت هوایی نهال‌ها قطع و ریشه گیاه به صورت یک جا خارج شد. به علت غیرممکن بودن اندازه‌گیری وزن روزانه بوته‌ها (قابل صرف‌نظر بودن تغییرات روزانه وزن بوته‌ها بعد از مرحله گلدهی) برای هر گلدان، وزن بوته در پایان آزمایش اندازه‌گیری شد و در محاسبات رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفت. ریشه‌های هر گلدان پس از چندین بار شستشو از خاک جدا شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه‌ها از روش توزین با ترازوی دیجیتالی دارای دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. برای این منظور ریشه‌ها درون پاکت قرار گرفتند و پاکت‌ها با قرار گرفتن در درون آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و وزن ریشه‌های خشک به دست آمد. طول ریشه نیز برحسب سانتی‌متر معادل ۸۹ درصد وزن ریشه برحسب میلی‌گرم تخمین زده شد (Alizadeh, 2005). قطر ریشه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. مقدار جذب روزانه با استفاده از اختلاف وزن گلدان‌ها در دو روز متوالی محاسبه شد. از داده‌های اندازه‌گیری شده برای واسنجی مدل‌های جذب آب ریشه استفاده گردید.

مدل‌های جذب آب

در این مطالعه دو مدل جذب آب تجربی (Feddes et al., 1978 و Van Genuchten, 1987) و یک مدل فیزیکی (De Jong Van Lier *et al*., 2008) با استفاده از داده‌های گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفتند.

مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸)

$$S_a = \left(\frac{h - h_4}{h_3 - h_4}\right) \times S_p \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

در این مدل، h بار فشاری آب خاک، h_3 مقدار آستانه بار فشاری آب خاک و h_4 بار فشاری آب خاک در نقطه پژمردگی می‌باشد. S_a جذب آب ریشه واقعی و S_p جذب آب ریشه پتانسیل می‌باشد. معادله بروکز و کوری (۱۹۶۴) برای توصیف رابطه بین بار فشاری آب خاک و مقادیر رطوبت به صورت زیر است:

$$\Theta = \left(\frac{h_b}{h}\right)^{\lambda} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

که در آن h_b مکش ورود هوا، λ فاکتور شکل و Θ اشباع نسبی با رابطه ذیل می‌باشد:

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

در معادله بالا θرطوبت حجمی خاک، θ_rرطوبت باقی‌مانده و θ_sرطوبت اشباع می‌باشد. با ترکیب معادلات ۴ و ۵:

$$h = \frac{h_b}{\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{\lambda}}} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

با ترکیب معادلات ۲ و ۵:

$$S_a = \left(\frac{\frac{h_b}{\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{\lambda}}} - h_4}{h_3 - h_4} \right) \times S_p \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

مدل ون گنوختن (۱۹۸۷)

$$S_a = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p}\right)} \times S_p \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

در این معادله h_{50} پتانسیل ماتریکی که به ازای آن میزان جذب آب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و p پارامتری تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است.

با ترکیب معادلات ۵ و ۷:

$$S_a = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\frac{h_b}{\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{\lambda}}}}{h_{50}}\right)^{p}\right)} \times S_p \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

مدل دی جونگ ون لایر و همکاران (۲۰۰۸)

$$S = \rho \times (\overline{M} - M_o) \times W \qquad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن $\overline{M}$ متوسط پتانسیل فلاکس ماتریک خاک، M_o پتانسیل فلاکس ماتریک در سطح ریشه، W ضخامت لایه خاک و $\rho(m^{-2})$ فاکتور وزنی برای پتانسیل فلاکس ماتریک می‌باشد، که وابسته به جذب آب ریشه می‌باشد و تابعی از a، r_o و r_m با رابطه زیر است:

$$\rho = \frac{4}{r_o^2 - a^2 r_m^2 + 2(r_m^2 + r_o^2)\ln\left(\frac{a * r_m}{r_o}\right)} \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

در رابطه بالا r_o و r_m به ترتیب شعاع ریشه و شعاع ریزوسفر می‌باشند و a نسبت بین فاصله ریشه از متوسط رطوبت حجمی خاک و r_m می‌باشد که مقدار آن با توجه به آنالیزهای عددی و تحلیلی به طور تقریبی ۰/۵۳ ذکر شده است (De Jong Van Lier *et al.*, 2008). مقدار r_m با استفاده از رابطه زیر به تراکم طولی ریشه (R) مربوط می‌شود:

$$r_m = \sqrt{\frac{1}{\pi R}} \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

برای محاسبه متوسط پتانسیل فلاکس ماتریک خاک از رابطه زیر استفاده گردید:

$$\overline{M}(h) = -\frac{K_s h_b}{1+3\lambda}\left[\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{\frac{1}{\lambda}+3} - \left(\frac{h_b}{h_w}\right)^{1+3\lambda}\right] \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در این رابطه Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. برای محاسبه جذب آب ریشه ابتدا حداکثر میزان جذب آب ریشه با در نظر گرفتن Mo=0 به صورت زیر محاسبه شد:

$$S_m = \rho \times \overline{M} \times W \qquad \text{(رابطه ۱۳)}$$

با مقایسه S_m با S_p (جذب آب ریشه پتانسیل)، جذب آب ریشه واقعی (S_a) از یکی از رابطه‌های زیر محاسبه گردید. اگر S_m بزرگ‌تر یا مساوی S_p باشد، در نتیجه تعرق با تقاضای اتمسفر محدود می‌شود و مقدار Mo بزرگ‌تر از صفر می‌باشد و با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

(رابطه ۱۴)

$$If\ \ S_m \geq S_p \rightarrow S_a = S_p \rightarrow M_o = \frac{S_m - S_p}{\rho \times w} \rightarrow S_a = \rho(\overline{M} - M_o) \times W$$

اگر Sm کوچک‌تر از Sp باشد، در نتیجه تعرق با شرایط خاک محدود می‌شود و مقدار Mo صفر می‌باشد و جذب آب ریشه با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

(رابطه ۱۵)

$$If\ \ S_m \prec S_p \rightarrow\ S_a \prec S_p \rightarrow\ M_o = 0 \rightarrow\ S_a = \rho \times \overline{M} \times W$$

در این پژوهش برای برآورد پارامترهای تجربی مدل‌های جذب آب ریشه از روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) استفاده شده است (Ji *et al*., 2014; Shafiei *et al*., 2014). اولین گام برای کاربرد روش GLUE، تعیین محدوده‌ی تغییرات پارامترهای واسنجی مدل می‌باشد. در این پژوهش، برای تعیین دامنه اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک از اطلاعات ارائه شده توسط Rawls *et al*. (1982) بهره برده شد. Rawls *et al*. (1982) از داده‌های حدود ۱۳۲۳ نمونه خاک، پارامترهای معادله Brooks and Corey (1964) را برای ۱۱ کلاس بافتی مختلف ارائه کردند. برای تعیین دامنه هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) از اطلاعات ارائه شده توسط Sadeghi *et al*. (2011) استفاده شد. دامنه بارهای فشاری مورد استفاده (h_3 و h_4) در تابع Feddes *et al*. (1978) از بانک اطلاعاتی Taylor and Ashcroft (1972) استفاده گردید. برای تعیین دامنه P و h_{50} در معادله Van Genuchten (1987) نیز داده‌های ارائه شده توسط Homaee *et al*. (2002b) به کار گرفته شد. در جدول (۱) دامنه پارامترهای هیدرولیکی خاک ارائه شده است. در جدول (۲) دامنه پارامترهای مدل‌های جذب آب ریشه نشان داده شده است. دومین گام در کاربرد روش GLUE انتخاب تعداد N مجموعه پارامتر تصادفی بر اساس روش‌های مبتنی بر مونت‌کارلو است که در این پژوهش از روش نمونه‌گیری مربع لاتین (LHS) استفاده شده است. در واقع روش LHS با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر پارامتر (در این پژوهش به تعداد پارامترها) باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها می‌شود. در این پژوهش ۱۰۰،۰۰۰ نمونه یا به عبارتی مجموعه پارامتر در نظر گرفته شده است. در گام سوم مدل‌های جذب آب با استفاده از هر سری از پارامترهای تولیدشده در گام قبل، اجراشده و مقدار درستنمایی (L) بر اساس مقادیر شبیه‌سازی‌شده خروجی مورد نظر به وسیله مدل و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده آن محاسبه می‌شود. در این پژوهش از رابطه معکوس واریانس خطا (Beven and Binley, 1992) به عنوان معیار درستنمایی استفاده شده است.

$$L = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} \left(O_j - Y(S_i)\right)^2}{n-2} \right)^{-1} \qquad \text{(رابطه ۱۶)}$$

که در آن: S_i مجموعه i ام از پارامترها، O_j مقادیر اندازه‌گیری شده، $Y(S_i)$ خروجی مدل به ازای مجموعه i ام از پارامترها و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقادیر بزرگ‌تر درستنمایی نشان‌دهنده تطابق بیشتر بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده ($Y(S_i)$) و واقعی (O_j) است. در نهایت مجموعه پارامتری که بالاترین مقدار درستنمایی را دارا بود، جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های جذب آب ریشه مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

روش GLUE با استفاده از برنامه‌ای که در نرم‌افزار Matlab تهیه شد، به مدل‌های جذب آب ریشه متصل شده است. در این بخش، ابتدا نتایج آنالیز سیستم ریشه گیاهان مورد مطالعه ذکر شده است. در مرحله بعد نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های جذب آب نسبت به توابع هیدرولیکی خاک و خصوصیات ریشه ارائه شده است. در نهایت نتایج ارزیابی مدل‌ها در گیاه گوجه‌فرنگی ارائه و بحث شده است.

آنالیز سیستم ریشه

شعاع ریشه r_o یکی از پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه جذب آب ریشه در مدل‌های خرد می‌باشد. گرچه روش‌های مختلفی برای تعیین آن پیشنهاد شده، ولی بهدست آوردن یک مقدار متوسط اغلب سخت است. نتایج اندازه‌گیری قطر ریشه با استفاده از کولیس در تیمارهای مختلف این مطالعه نشان داد متوسط قطر ریشه گوجه‌فرنگی ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد و در آنالیزها نیز از این مقادیر استفاده گردید. De Jong Van Lier *et al*. (2013) دامنه متوسط قطر ریشه گیاهان سالانه را بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر ذکر کردند. متوسط قطر ریشه به دست آمده در این مطالعه در دامنه پیشنهادی سایر محققین می‌باشد. گرچه همان‌طور که نتایج آنالیز حساسیت و همچنین مطالعات مختلف (De Jong Van Lier *et al*. 2008) نشان داد مدل جذب آب ریشه خرد استفاده شده در این مطالعه حساسیت کمی به مقدار r_o دارد، با این حال یکی از اشکالات مدل‌های خرد جذب آب ریشه نیاز به پارامترهای ریز و جزئی ریشه می‌باشد، به همین دلیل اکثر محققان به مدل‌های تجربی و کلان روی آورده‌اند. متوسط تراکم طولی ریشه برای گیاه گوجه‌فرنگی ۵۹۳۲ متر بر مترمکعب محاسبه گردید.

نتایج تحلیل حساسیت مدل‌ها

برای بررسی آنالیز حساسیت مدل‌ها، هر یک از پارامترهای ورودی در دامنه ۱۰± درصد (با گام‌های ۵ درصد) تغییر داده شدند (Ji *et al*., 2014) و میزان تغییر در جذب آب ریشه با استفاده از شاخص میانگین مجذور مربعات خطای نرمال

(NRMSE) محاسبه گردید. در نهایت متوسط شاخص NRMSE با توجه به تغییرات خروجی مدل‌ها با تغییر پارامترهای ورودی به میزان ۱۰-، ۵-، ۵ و ۱۰ درصد محاسبه گردید و به عنوان معیار آنالیز حساسیت مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل (۲) به عنوان نمونه نتایج آنالیز حساسیت مدل Feddes *et al.* (1978) برای گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک و جذب آب ریشه نشان داده شده است. نتایج نشان داد که جذب آب ریشه بیشتر به پارامتر شکل λ و درصد رطوبت اشباع (θ_s) حساس می‌باشد. *et al.* Hupet (2003) در مطالعه‌ای پارامترهای جذب آب ریشه را با استفاده از مدل‌سازی معکوس داده‌های رطوبت خاک با استفاده از مدل SWAP به دست آوردند. در مطالعه مذکور برای شبیه-سازی جذب آب ریشه از مدل Feddes *et al.* (1978) و برای تغییرات آب خاک از مدل Van Genuchten (1980) استفاده شده بود. نتایج نشان داد که مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده بیشتر به پارامترهای θ_s و n (ضریب تجربی) حساس می-باشند. حساسیت به پارامترهای جذب آب ریشه کم بود. آن‌ها گزارش کردند که حساسیت بسیار پایین پارامترهای جذب آب ریشه در مدل SWAP نسبت به تغییرات رطوبت در خاک به دلیل اثر جبرانی جریان عمودی غیراشباع آب در خاک است (Hupet *et al.*, 2003). در این پژوهش نیز پارامترهای جذب آب ریشه (h_3 و h_4) حساسیت کمی بر میزان جذب آب شبیه‌سازی شده داشتند. نتایج این پژوهش با مطالعه Hupet *et al.* (2003) همخوانی دارد. با این حال در این مطالعه به دلیل استفاده از جذب آب ریشه در آنالیز حساسیت نتایج قابل اطمینان‌تر است (در مطالعه Hupet *et al.* (2003) از داده‌های رطوبت خاک جهت آنالیز حساسیت استفاده شده بود). نتایج مطالعه Durigon *et al.* (2012) نشان داد تغییر بار فشاری در نقطه پژمردگی (h_4) هیچ تغییر خاصی بر عملکرد مدل نداشت. نتایج مطالعه Homaee *et al.* (2002) نشان داد که حساسیت مدل فدس به h_3 بیشتر است. نتایج این مطالعه نشان داد جذب آب ریشه به پارامتر h_4 بیشتر حساس است.

نتایج آنالیز حساسیت مدل De Jong Van Lier *et al.* (2008) نشان داد پارامتر θ_s بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشته است. در بین پارامترهای هیدرولیکی خاک λ از نظر حساسیت در جایگاه دوم قرار گرفته است. از بین پارامترهای جذب آب ریشه (R، r_o، a، h_w)، حساس‌ترین پارامتر تراکم طولی ریشه می‌باشد. تراکم طولی ریشه بین گیاهان مختلف و لایه‌های خاک بسیار تغییرپذیر است. مقدار آن در لایه‌های سطحی خاک، از ۰/۲ سانتی‌متر بر سانتی‌متر مکعب در گیاهان جو، سویا و لوبیا تا ۴۰ سانتی‌متر بر سانتی‌متر مکعب در گونه‌های چمنی متفاوت می‌باشد (De Willigen and Noordwijk, 1987). هر دو پارامتر تراکم طولی ریشه و شعاع ریشه بین لایه‌های خاک متغیرند، اما برخلاف تراکم طولی ریشه، شعاع ریشه گرچه متغیر است (Materechera *et al.*, 1992)، اما به‌ندرت اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مطالعه De Jong Van Lier *et al.* (2008) نیز نشان داد حساسیت مدل نسبت به تراکم طولی ریشه بیشتر از شعاع ریشه است و در نتیجه در مطالعه خود شعاع ریشه را ثابت فرض کردند. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد مدل De Jong Van Lier *et al.* (2008) به شرایط هیدرولیکی خاک نسبت به پارامترهای توزیع ریشه از حساسیت بیشتری برخوردار است. نتایج مطالعه Durigon *et al.* (2012) نیز نشان داد جذب آب ریشه محاسبه شده با این مدل به شار پتانسیل حساس‌تر از تراکم طولی ریشه می‌باشد.

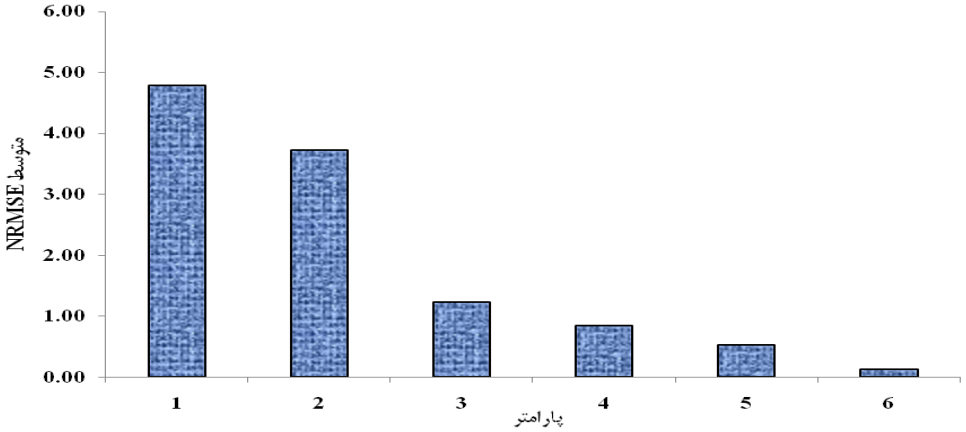
نتایج آنالیز حساسیت مدل Van Genuchten (1987) نشان داد از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، مانند مدل‌های قبلی λ و θ_s حساس‌ترین پارامترها می‌باشند. از بین پارامترهای جذب آب ریشه نیز P حساس‌ترین پارامتر می‌باشد. P ضریب تجربی است که Van Genuchten (1987) مقدار آن را ۳ پیشنهاد کرد.

به طور کلی از آن‌جا که پارامترهای مدل‌های رطوبتی مانند بروکز و کوری و ون‌گنوختن- معلم پارامترهایی هستند که با برازش بر منحنی رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع به دست می‌آیند، مقادیر اندازه‌گیری شده مانند رطوبت اشباع یا هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش-های مرسوم اندازه‌گیری مستقیم یا غیرمستقیم نمی‌توانند بیانگر مقدار آن‌ها باشند. از سویی، چون این پارامترها به صورت برازش بر منحنی رطوبتی به دست می‌آیند، ثابت فرض کردن یک یا چند پارامتر به علت وجود همبستگی بین برخی پارامترها می‌تواند موجب خطا در برآورد سایر پارامترها شود (Shafiei *et al.*, 2014). به طور مثال در بیشتر مطالعات، پارامتر λ در معادله ون گنوختن- معلم اغلب ۰/۵ یا ۱- و ثابت فرض شده است (Schaap *et al.*, 2001). Scharnagl *et al.* (2011) نیز تأکید کرده‌اند که ثابت فرض کردن یک یا چند پارامتر هیدرولیکی خاک (مانند λ و θr) می‌تواند موجب خطا در برآورد سایر پارامترها شود. Shafiei *et al.* (2014) نیز در مطالعه خود برای واسنجی SWAP شش پارامتر معادله ون‌گنوختن- معلم را

واسنجی کردند. پارامترهای مربوط به رشد گیاه و جذب آب ریشه SWAP با توجه به مقادیر متوسط ارائه شده در تحقیقات پیشین در نظر گرفته شد (Shafiei *et al.*, 2014). در مطالعه حاضر علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی خاک، به طور همزمان پارامترهای مرتبط با جذب آب ریشه نیز واسنجی شده است.

نتایج ارزیابی مدل‌ها

در این بخش نتایج پارامترهای واسنجی شده و همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها ارائه شده است. نتایج واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک و جذب آب ریشه برای مدل‌های فدس، ون-لایر و ون‌گنوختن در جدول (۳) ارائه شده است



شکل ۲. آنالیز حساسیت مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک و جذب آب ریشه: ۱- λ، ۲- θ_s، ۳- h_b، ۴- h_4، ۵- h_3، ۶- θ_r

جدول ۱. مقدار متوسط و دامنه اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک بر مبنای مدل بروکز و کوری

پارامتر	$\theta_r(cmcm^{-1})$	$\theta_s(cmcm^{-1})$	$\lambda(-)$	$h_b(m)$	$K_s(m/d)$
حد پایین	۰	۰/۲۸۳	۰/۱۴	-۰/۶۴۰۱	۰/۲۴۹۶
حد بالا	۰/۱۰۶	۰/۵۴۱	۰/۶۱۶	۰	۳/۵۰۲

جدول ۲. دامنه پارامترهای مدل‌های جذب آب ریشه

پارامتر	حد پایین	حد بالا
h_3 (m)	-۱۵	-۸
h_4 (m) یا h_w	-۱۵۰	-۵۰
P	۱	۳
h_{50}	-۲۰	-۱۲

جدول ۳. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک و جذب آب ریشه در مدل‌های مختلف

مدل	پارامترهای واسنجی‌شده					
فدس	$\theta_r(cmcm^{-1})$	$\theta_s(cmcm^{-1})$	$\lambda(-)$	$h_b(m)$	$h_3(m)$	$h_4(m)$
	۰/۰۰۶۷	۰/۴۹۳۱	۰/۳۳۳۲	-۰/۶۲۴۴	-۹/۰۱	-۱۳۷/۹۷
دی‌جونگ ون‌لایر	$\theta_r(cmcm^{-1})$	$\theta_s(cmcm^{-1})$	$\lambda(-)$	$h_b(m)$	$K_s(m/d)$	$h_w(m)$
	۰/۰۰۰۶	۰/۳۴۳۵	۰/۵۲۶۵	-۰/۰۰۰۴۱	۱/۲۵۴۴	-۸۲/۲۶
ون‌گنوختن	$\theta_r(cmcm^{-1})$	$\theta_s(cmcm^{-1})$	$\lambda(-)$	$h_b(m)$	$P(-)$	$h_{50}(m)$
	۰/۰۰۲۴	۰/۴۲۶۷	۰/۵۷۶۴	-۰/۶۳۴۲	۱/۱۲۲۳	-۱۸/۱۴

مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک برای مدل‌های مختلف جذب آب ریشه متغیر است، که در واقع اثر جذب آب ریشه بر این پارامترها را نشان می‌دهد. اثر مدل‌های جذب آب ریشه بر پارامترهای θ_s و λ مشهودتر است که به دلیل حساسیت بیشتر مدل‌ها نسبت به این پارامترها را نشان می‌دهد.

به طور کلی نتایج نشان داد از بین مدل‌های مختلف جذب آب ریشه، مدل ون گنوختن بالاترین دقت را داشت. به طوری که مقدار ضریب تعیین و شاخص N.S این مدل به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۷۰ محاسبه گردید. در مدل فدس مقدار شاخص‌های ضریب تعیین و N.S به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۶۱ می‌باشد. با توجه به شاخص‌های محاسبه شده، معادله فدس در جایگاه دوم قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های فدس و ون‌گنوختن از نظر عملکرد نسبتاً مشابه هستند. مدل ون‌لایر از نظر دقت در جایگاه آخر قرار گرفت، به طوری که مقدار ضریب تعیین و شاخص N.S این مدل، به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۰۵- محاسبه گردید. در جدول (۴) شاخص‌های آماری محاسبه شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای مدل‌های مختلف ارائه شده است. توانایی یک مدل جذب آب ریشه در شرایط مختلف رطوبتی یکی از ویژگی‌های مهم آن است که در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مانند برنامه‌ریزی آبیاری بسیار کارآمد خواهد بود. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، مدل ون‌گنوختن با ضریب تعیین بالاتر نسبت به سایر مدل‌ها (R^2=0.79) مقدار جذب آب ریشه را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. همچنین مقادیر شاخص‌های آماری نیز مؤید این نکته است. به طور کلی عملکرد مدل‌ها با توجه به شاخص‌های آماری در دوره صحت‌سنجی نسبت به دوره واسنجی کاهش یافته است. با این حال عملکرد مدل‌های فدس و ون‌گنوختن مانند دوره واسنجی نسبتاً مشابه است. نتایج سایر محققین از جمله Homaee *et al.* (2002b) نیز نشان داد در دوره صحت‌سنجی عملکرد مدل‌ها کاهش یافته است. همچنین نتایج محاسبه شاخص NRMSE نشان می‌دهد عملکرد مدل فدس در دوره واسنجی عالی و در دوره صحت‌سنجی خوب بوده است. مدل ون‌گنوختن مشابه با مدل فدس با کمی دقت بالاتر بود، اما عملکرد مدل ون‌لایر در واسنجی خوب و در صحت‌سنجی ضعیف می‌باشد. دلیل اصلی عملکرد بهتر مدل ون‌گنوختن را می‌توان به ماهیت غیرخطی (سیگموئیدی) مدل مرتبط دانست. با توجه به اینکه جذب آب توسط ریشه به خصوصیات هیدرولیکی خاک حساس می‌باشد و از طرفی رابطه پتانسیل آب خاک با میزان رطوبت خاک به صورت غیرخطی می‌باشد، لذا به نظر می‌رسد ماهیت غیرخطی تغییرات پتانسیل آب خاک با جذب آب ریشه مدل ون گنوختن در این حالت یکی از دلایل عمده عملکرد بهتر این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. تغییرات پتانسیل آب خاک با جذب آب ریشه در مدل فدس به صورت خطی می‌باشد.

جدول ۴. شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی جذب آب ریشه در طول مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

مدل	تیمار	R^2	N.S	NRMSE	MAE	ME	d
فدس	واسنجی	۰/۷۵۳	۰/۶۱	۹/۷۵	۰/۷۳	۰/۶۱	۰/۸۲
	صحت‌سنجی	۰/۶۸۱	۰/۵۹	۱۶/۲۳	۰/۸۷	۰/۵۹	۰/۸۱
دی‌جونگ ون‌لایر	واسنجی	۰/۵۰۹	-۰/۰۵	۱۶/۱۲	۱/۱۳	-۰/۰۵	۰/۶۶
	صحت‌سنجی	۰/۳۷۰	-۰/۹۳	۳۵/۲۹	۱/۹۱	-۰/۹۳	۰/۵۸
ون گنوختن	واسنجی	۰/۹۰۲	۰/۷	۸/۴۶	۰/۷	۰/۷۱	۰/۸۶
	صحت‌سنجی	۰/۷۸۷	۰/۶۹	۱۴/۱۲	۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۸۶

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل‌های فیزیکی و تجربی در برآورد جذب آب ریشه گوجه‌فرنگی تحلیل و ارزیابی شد. نتایج تحلیل حساسیت مدل Feddes *et al.* (1978) نشان داد که جذب آب ریشه بیشتر به پارامتر شکل λ و درصد رطوبت اشباع (θ_s) حساس می‌باشد. پارامترهای جذب آب ریشه در این مدل (h_3 و h_4) حساسیت کمی بر میزان جذب آب شبیه‌سازی شده داشتند. نتایج آنالیز حساسیت مدل De Jong Van Lier *et al.* (2008) نشان داد پارامتر θ_s بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشته است. در بین پارامترهای هیدرولیکی خاک λ از نظر حساسیت در جایگاه دوم قرار گرفته است. از بین پارامترهای جذب آب ریشه (R، r_o، a، h_w)، حساس‌ترین پارامتر تراکم طولی ریشه می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت مدل Van Genuchten (1987) نشان داد از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، مانند مدل‌های

قبلی λ و θ_s حساس‌ترین پارامترها می‌باشند. از بین پارامترهای جذب آب ریشه نیز P حساس‌ترین پارامتر می‌باشد. نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد عملکرد مدل فدس در دوره واسنجی عالی و در دوره صحت‌سنجی خوب بوده است. مدل ون‌گنوختن مشابه با مدل فدس با کمی دقت بالاتر بود، اما عملکرد مدل ون‌لایر در واسنجی خوب و در صحت‌سنجی ضعیف می‌باشد. یکی از محدودیت‌های کاربرد مدل‌های فیزیکی یا خرد اندازه‌گیری جزئیات ریشه می‌باشد. همان‌طور که نتایج نشان داد این مدل‌ها نسبت به شرایط هیدرولیکی خاک حساس‌تر از پارامترهای ریشه می‌باشند. بنابراین اگر بتوان خصوصیات ریشه را به نوعی به اندام هوایی گیاه مرتبط کرد، مشکل جزئیات ریشه در این مدل‌ها مرتفع شده است. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی رابطه بین اندام هوایی و زیرزمینی گیاه بررسی گردد و در صورت به دست آوردن رابطه دقیق در این مورد از آن در مدل‌های جذب آب ریشه استفاده گردد. در نهایت با تلفیق بهترین مدل جذب آب ریشه در مدل‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک، می‌توان با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک و مشخصات گیاهی، بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بیشتر، بهترین مدیریت آبیاری در مزرعه جهت حداکثر رشد گیاه را تعیین کرد.

REFERENCES

Alizadeh, A. (2005). Soil, Water, Plant Relationship. (5th ed.). Imam Reza University Press. (In Farsi).

Alizadeh, H. A., Liaghat, A. M. and Noorimohamadeh, M. (2009). Evaluating water uptake reduction functions under salinity and water stress conditions. *Journal of Water and Soil.* 23 (3), 88-97. (In Farsi).

Ardalani, H., Babazadeh, H. and Ebrahimi, H. (2016). Evaluation of tomato (Solanum lycopersicum) water uptake reduction function under simultaneous salinity and water stresses. *Journal of Water and Irrigation Management*. 6 (1), 149-161. (In Farsi).

Beven, K. and Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3):279-298.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. In: Hydrology. Colo. State University, Fort Collins, 27 p.

Cai, G., Vanderborght, J., Couvreur, V., Mboh, C. M. and Vereecken, H. (2017). Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation. *Vadose Zone Journal*.

De Jong Van Lier, Q., Van Dam, J. C., Metselaar, K., De Jong, R. and Duijnisveld, W. H. M. (2008). Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. *Vadose Zone Journal*, 7(3), 1065-1078.

De Jong Van Lier, Q., Van Dam, J. C., Durigon, A., Dos Santos, M. A. and Metselaar, K. (2013). Modeling water potentials and flows in the soil–plant system comparing hydraulic resistances and transpiration reduction functions. *Vadose Zone Journal*, 12(3).

De Willigen, P. and Van Noordwijk, M. (1987). Roots, plant production, and nutrition use efficiency. Ph.D. diss. Agricultural Univ., Wageningen, the Netherlands.

Durigon, A., Alex dos Santos, M., de Jong van Lier, Q. and Metselaar, K. (2012). Pressure heads and simulated water uptake patterns for a severely stressed bean crop. *Vadose Zone Journal*, 11(3).

Faria, L. N., Da Rocha, M. G., Van Lier, Q. D. J. and Casaroli, D. (2010). A split-pot experiment with sorghum to test a root water uptake partitioning model. *Plant and soil*, 331(1-2), 299-311.

Feddes, R., Kowalik, P. and Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

Gardner, W. R. (1960). Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci*, 89:63–73.

Homaee, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. (2002). A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1764-1772.

Homaee, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. (2002b). Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57 (2), 111-126.

Hupet, F., Lambot, S., Feddes, R. A., Van Dam, J. C. and Vanclooster, M. (2003). Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resources Research*, 39(11).

Jarvis, N. (2010). Comment on "Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach". *Vadose Zone Journal*, 9(2), 499-502.

Ji, J., Cai, H., He, J. and Wang, H. (2014). Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 144, 1-10.

Li, K. Y., De Jong, R., Coe, M. T. and Ramankutty, N. (2006). Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. *Earth Interactions*, 10(14), 1-22.

Materechera, S. A., Alston, A. M., Kirby, J. M., and Dexter, A. R. (1992). Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and soil*, 144 (2), 297-303.

Passioura, J. B. (1988). Water transport in and to roots.

Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 39(1), 245-265.

Raats, P. A. C. (2007). Uptake of water from soils by plant roots. *Transport in porous media*, 68(1), 5-28.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. and Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. Trans. *ASAE* 25, 1316–1320.

Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318-333.

Sadeghi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Hasheminia, S. M. and Reichardt, K. (2011). Scaling to generalize a single solution of Richards' equation for soil water redistribution. *Scientia Agricola*, 68(5), 582-591.

Santos, M. A. D., Van Lier, J., Dam, J. C. V. and Freire Bezerra, A. H. (2017). Benchmarking test of empirical root water uptake models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 473-493.

Schaap, M. G., Leij, F. J., and Van Genuchten, M. T. (2001). Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*. 251(3-4), 163-176.

Scharnagl, B., Vrugt, J., Vereecken, H. and Herbst, M. (2011). Inverse modelling of in situ soil water dynamics: investigating the effect of different prior distributions of the soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 3043–3059.

Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Davary, K. and Vazifedust, M. (2014). Calibration and Uncertainty Analysis of SWAP Model by using GLUE Method. *Water Research in Agriculture Journal*. 28 (2), 477- 488. (In Farsi).

Skaggs, T.H., Shouse, P.J. and Poss, J.A. (2006). Irrigation of forage crops with saline drainage waters: 2. Modeling root uptake and drainage. Vadose Zone Journal. 5:824–837.

Taylor, S.A. and Ashcroft, G.M. (1972). Physical Edaphology. Freeman and Co., San Francisco, CA, pp. 434–435.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*. 44(5), 892-898.

Van Genuchten, M. Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. U. S. Salinity Laboratory. USDA, ARS, Riverside, CA.