

## شبیه‌سازی جذب پتاسیم توسط مدل باربر-کوشمن در گیاه ذرت تحت تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و کود دامی

حسین شیرانی<sup>۱</sup>، محمدعلی حاج‌عباسی<sup>۲</sup>، مجید افیونی<sup>۳</sup> و عباس همت<sup>۴</sup>

### چکیده

استفاده از مدل‌ها، می‌تواند درک فرآیند جذب عناصر توسط گیاه را آسان‌تر نماید. اگر تطابق خوبی بین پیش‌بینی مدل و روند اندازه‌گیری شده جذب وجود نداشت، مدل‌ها می‌توانند برای تشخیص علل این اختلاف مفید باشند. این تحقیق به منظور پیش‌بینی جذب پتاسیم در مراحل مختلف رشد ذرت توسط مدل کوشمن و تحت سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و تیمارهای کود دامی انجام شد. تیمارهای خاک‌ورزی شامل شخم با دیسک سطحی + دو دیسک سطحی به عنوان کم‌خاک‌ورزی (عمق شخم ۱۵ سانتی‌متر) و شخم با گاوآهن برگردان‌دار + دو دیسک سطحی به عنوان خاک‌ورزی مرسوم (عمق شخم ۳۰ سانتی‌متر) بودند. هم‌چنین، تیمارهای کود دامی در سه سطح ۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار اعمال گردیدند. تیمارها در قالب طرح بلوک‌های خرد شده با سه تکرار و تحت کشت ذرت به مدت دو سال اعمال شدند. نتایج نشان داد، جذب پتاسیم پیش‌بینی شده در گیاه با استفاده از مدل کوشمن، همبستگی زیادی با جذب پتاسیم اندازه‌گیری شده داشت، ولی بسیار کمتر از جذب اندازه‌گیری شده بود. با افزایش کود دامی، انحراف مدل از داده‌های مشاهده‌ای جذب افزایش یافت. هم‌چنین، در سیستم کم‌خاک‌ورزی انحراف مدل در پیش‌بینی جذب نسبت به سیستم خاک‌ورزی مرسوم کمتر بود.

کلمات کلیدی: جذب پتاسیم، خاک‌ورزی، ذرت، کود دامی و مدل باربر-کوشمن.

تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۱۰

۱- استادیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان (نویسنده مسئول).

۲- دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

E-mail : [Shirani379@yahoo.com](mailto:Shirani379@yahoo.com)

## مقدمه و بررسی منابع

نماید. دو دسته اصلی از مدل‌های جذب در دسترس می‌باشند. اولین دسته مدل‌های تجربی<sup>۲</sup> هستند که بر اساس مفاهیم و رگرسیون‌های آماری قابل توصیف هستند (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰). این مدل‌ها اغلب به نام مدل‌های جعبه سیاه<sup>۳</sup> معروف می‌باشند، زیرا فقط همبستگی بین ورودی و خروجی را توصیف می‌کنند، بدون این که مکانیسم‌های اساسی داخل فرآیند را در نظر بگیرند. این قبیل مدل‌ها اغلب به طور موفقیت‌آمیزی برای مقاصد عملی به کار می‌روند، زیرا آن‌ها معمولاً با یک تعداد پارامترهایی که به راحتی بدست می‌آیند، کار می‌کنند و نتایج آن‌ها برای استفاده‌های عملی مفید و کافی می‌باشد. دسته دیگر مدل‌های مکانیکی<sup>۴</sup> را شامل می‌شوند که معمولاً یک پدیده را توسط مفاهیم اساسی بیوفیزیکی، بیوشیمیایی و مکانیسم‌های فیزیولوژیکی توصیف می‌کنند. این مدل‌ها عمدتاً بر اساس فرایندهای مفهومی ایجاد می‌شوند و بنابراین برای مقاصد علمی مناسب می‌باشند (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰).

استفاده از روش‌های قدیمی توصیه کودی مثل روش‌های مبتنی بر آزمون خاک و تغذیه گیاه که وقت گیر هستند، نمی‌توانند پاسخگوی نیاز روزافزون علمی و اطلاعاتی در این زمینه باشد. بدین منظور استفاده از مدل‌های پیشرفته در زمینه جذب عناصر غذایی و توصیه‌های کودی، این امکان را به وجود می‌آورد تا بتوان در این رشته،

کارایی عناصر غذایی به صورت توانایی گونه‌ها یا واریته‌های گیاهی برای بدست آوردن عملکرد نسبی بالا در مقادیر کم عناصر غذایی در مقایسه با گیاهان غیر کارا<sup>۱</sup> تعریف می‌شود. چند آزمایش با کودهای پتاسیمی نشان داد که غلات نسبت به گیاهان دیگر کارتر هستند که احتمالاً دلیل آن، نسبت ریشه به ساقه بیشتر در غلات است (استینگراب و کلاسن، ۲۰۰۰). اندازه سیستم ریشه، فیزیولوژی جذب و توانایی گیاهان در افزایش حلالیت پتاسیم در منطقه ریزوسفر به عنوان مکانیسم‌های کارایی جذب معرفی می‌شوند. مطالعه انجام شده توسط استینگراب و کلاسن (۲۰۰۰) نشان داد که کشت در محلول غذایی، کارایی جذب پتاسیم در مورد گندم و چغندر قند بیشتر از سیب زمینی می‌باشد. علت آن سیستم ریشه‌ای بزرگ گندم و در مورد چغندر قند، فیزیولوژی جذب کارآمد بیان گردید. همچنین در خاک، بالا بودن کارایی جذب گندم، مربوط به سیستم ریشه‌ای بزرگ آن و در مورد چغندر قند مربوط به توانایی آن در حلالیت پتاسیم در ناحیه ریشه بود.

جذب عناصر غذایی، شامل حرکت و انتقال عناصر غذایی در خاک به طرف ریشه، انتقال از غشاهای ریشه و انتقال به ساقه می‌باشد. این پدیده یک فرآیند پیچیده می‌باشد که به پارامترهای متعددی بستگی دارد. استفاده از مدل‌های جذب عناصر در گیاه، می‌تواند درک این فرآیند را آسان‌تر

2. Empirical models
3. Black-box models
4. Mechanistic models

## 1. Non-efficient plant

واقعی توسط ذرت برای ۴ نوع خاک، همبستگی خوبی ( $r^2=0.78$ ) وجود داشت. جذب پتاسیم توسط گیاه بستگی به مرفولوژی ریشه دارد، به عنوان مثال هر چه شعاع ریشه بیشتر باشد، مقدار جذب پتاسیم نیز بیشتر است. هم چنین هر چه طول و حجم ریشه بیشتر باشد، جذب بیشتری صورت می گیرد. جذب پتاسیم بستگی به عوامل دیگری نیز از قبیل درجه حرارت خاک، نوع گیاه، سن گیاه و مقدار پتاسیم قابل جذب در خاک دارد (کلاسن و باربر، ۱۹۷۶). در مطالعه‌ای دیگر کلاسن و باربر (۱۹۷۷)، شدت جذب پتاسیم در ریشه‌های ذرت و اثرات متقابل آن با ازت، فسفر، کلسیم و منیزیم را بررسی کردند. ذرت در این مطالعه از ۷ تا ۱۷ روز در نسبت‌های متغیر سیستم ریشه‌ای تیمار شده با پتاسیم رشد داده شد. نتایج نشان داد که یک همبستگی غیر خطی معکوس بین درصد پتاسیم در ساقه و حداکثر شدت جریان پتاسیم<sup>۱</sup> در داخل ریشه وجود داشت ( $r^2 = -0.74$ ). هم چنین مقایسه شدت جریان پتاسیم در ریشه‌های تحت تیمار پتاسیم و ریشه‌های بدون تیمار پتاسیم، نشان داد که سطح پتاسیم در ساقه، تأثیر زیادتری بر شدت جریان پتاسیم در مقایسه با سطح پتاسیم در ریشه داشت. افزایش شدت جریان منیزیم باعث کاهش غلظت پتاسیم در گیاه شد. بات و همکاران (۱۹۷۹) جذب نترات توسط گیاه و پیش‌بینی مقدار جذب با مدل باربر را مورد مطالعه قرار دادند. گیاهان در یک محیط ثابت به مدت ۲۴ روز در یک خاک لوم شنی رشد داده

همانگ با سایر علوم پیشرفت نمود و نیازها را بر طرف کرد (الفتی، ۱۳۷۵). کاربرد مدل‌های پیش‌بینی کننده جذب، در تخمین جذب عناصر غذایی توسط گیاهان، مزایای زیادی دارد، از جمله این که هر ساله هزینه‌های زیادی صرف تحقیقات در زمینه نیاز غذایی محصولات مختلف و به‌روش‌های نه چندان پیشرفته می‌گردد. در صورتی که اگر بتوان از مدل‌های مناسب بهره گرفت، هم در هزینه‌ها صرفه‌جویی به‌عمل آمده و هم اطلاعاتی دقیق‌تر و سریع‌تر بدست خواهد آمد. از مدل‌های جذب عناصر می‌توان در توسعه مدل‌های توصیه کودی بهره فراوان گرفت و در تعیین مقدار کود، زمان و روش مصرف آن با توجه به خواص خاک، نوع گیاه و نوع کود از آن‌ها استفاده مناسبی به‌عمل آورد (ولف و همکاران، ۱۹۸۷).

برای یون‌های پرتحرک مثل نترات، فضای مؤثری که ریشه گیاه می‌تواند این عناصر را جذب نماید، خیلی بیشتر از یون‌های کم‌تحرک از قبیل پتاسیم و فسفر جذب سطحی شده توسط خاک می‌باشد. در اثر جذب عناصر توسط ریشه گیاه، غلظت آن در نزدیکی سطح ریشه کاهش یافته و این امر موجب ایجاد شیب غلظت شده و پخشیدگی از این مرحله آغاز می‌شود. بنابراین، عوامل گیاهی بایستی مورد توجه قرار گیرند (باربر، ۱۹۸۴).

مطالعه انجام شده توسط کلاسن و باربر (۱۹۷۶) نشان داد که بین تخمین مقدار پتاسیم جذب شده توسط مدل باربر-کوشمن و جذب

1. Maximum K influx ( $I_{max}$ )

در یک تحقیق مزرعه‌ای ۲ ساله، مدل باربر-کوشمن را برای شبیه‌سازی جذب فسفر توسط ذرت آزمون و تعدیل کردند. در این پژوهش ۴ تیمار فسفر (۰، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم بر هکتار) اعمال و مقدار جذب توسط ذرت در مراحل مختلف رشد، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که برآورد مدل، سازگاری و همبستگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری جذب داشت، به طوری که مدل توانست ۸۶ تا ۹۰ درصد جذب را به خوبی پیش‌بینی نماید. مطالعه انجام شده در آلمان نشان داد، پیش‌بینی جذب کادمیم توسط مدل، برای سه نوع محصول (سیب زمینی، چغندر قند و گندم) همبستگی خوبی با مقادیر واقعی جذب داشت و مقدار  $R^2$  خطی بین پیش‌بینی مدل و داده‌های اندازه‌گیری بین ۶۵ تا ۸۴ درصد متغیر بود (اینگورسن و استرک، ۲۰۰۵). پریگویی و همکاران (۲۰۰۸)، اثر ریزوسفر و فاکتورهای گیاهی را بر جذب کادمیم توسط ذرت، مورد مطالعه قرار دادند و برای پیش‌بینی جذب از مدل باربر-کوشمن استفاده کردند. آن‌ها با مقایسه مقادیر جذب پیش‌بینی شده توسط مدل و جذب اندازه‌گیری شده، نتیجه گرفتند که بین مقادیر برآورد شده جذب کادمیم توسط مدل و داده‌های مشاهده‌ای (جذب اندازه‌گیری شده)، رابطه خطی  $(y = 1.06x)$  با ضریب تبیین  $(R^2)$  ۷۵ درصد وجود داشت. هدف از این مطالعه، پیش‌بینی جذب پتاسیم توسط گیاه ذرت در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و کود دامی به وسیله مدل کوشمن بود.

شدند. غلظت نیترات در محلول خاک به مقدار  $10^{-2}$  \* ۱/۵۴ و  $10^{-3}$  \* ۳/۷۲ مولار در نظر گرفته شد. مقدار دیگر عناصر غذایی در سطوح ثابتی نگهداری شدند. مقادیر وزن خشک و نیترات گیاه با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در این مطالعه قابل مقایسه بود و همبستگی خوبی بین نیترات اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل در دوره‌های مختلف رشد گیاه وجود داشت. هم‌چنین این محققان گزارش کردند که وزن خشک و مقدار نیترات، حساسیت زیادی نسبت به سرعت رشد نسبی گیاه داشتند. اگر مدل پیش‌بینی خوبی از جذب ارائه نکرد و در واقع انحراف داده‌های مدل از جذب اندازه‌گیری شده زیاد بود، دلایل مختلفی می‌تواند داشته باشد که عبارتند از: (۱) فرضیات مورد نظر در مدل، از قبیل ثابت بودن درصد رطوبت حجمی در نصف فاصله بین دو ریشه و پارامترهایی مثل  $I_{max}$ ،  $K_m$  و  $C_{min}$  و هم‌چنین توزیع یکنواخت ریشه‌ها و ریشه‌های مویین ممکن است در یک تحقیق صادق نباشد که این موارد تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج مدل دارند. (۲) پارامترهای ورودی مورد استفاده ممکن است صحیح نباشند، زیرا به‌طور مستقیم یا دقیق اندازه‌گیری نشده‌اند. (۳) مدل ناقص است، به طوری که توانایی گیاهان در تأثیر بر ریزوسفر (ترشحات ریشه و میکرو ارگانیسم‌ها) و قابل جذب نمودن عناصر غذایی و در نتیجه جذب بیشتر عنصر غذایی توسط گیاه را در نظر نمی‌گیرد (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰). ماکاریولا و همکاران (۲۰۰۳)

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در قریه جوزدان (لورک) نجف‌آباد، در ۴۰ کیلومتری جنوب غربی اصفهان، انجام گردید. برخی ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اجرای طرح در جدول ۱ نشان داده شده است. این مطالعه در قالب طرح بلوک‌های خرد شده با سه تکرار و در دو سال متوالی انجام گردید.

جدول ۱- مشخصات خاک قبل از اجرای طرح

عمق (cm)	بافت خاک	OM (%)	EC <sub>e</sub> (dS/m)	pH	K محلول (mg/Li)	K تبدلی (mg/Kg)	درصد آهک
۰-۱۵	لوم رسی سیلتی	۰/۵۶	۳/۵	۷/۶	۱۲	۱۲۶	۱۲
۱۵-۳۰	لوم رسی سیلتی	۰/۳۶	۲/۸	۷/۵	۸	۱۰۰	۱۲
۳۰-۵۰	رسی سیلتی	۰/۲۰	۲/۵	۷/۵	-	-	-

دارای دانسیته خشک ۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مواد آلی ۶۲/۳ درصد، EC ۱۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر، ۳/۸ درصد پتاسیم و pH ۷/۵ بود. لازم به ذکر است که کشت ذرت حدود ۲ ماه پس از اعمال تیمارهای کودی انجام شد که دلیل آن تجزیه کود و آزادسازی بیشتر عناصر غذایی از جمله پتاسیم بود. این تحقیق در دو سال متوالی انجام شد که در سال دوم نیز تیمارها همانند سال اول در همان بلوک‌ها و کرت‌ها به طور یکسان اعمال گردید و کشت ذرت به صورت ردیفی انجام گرفت.

## مدل کوشمن

این مدل توسط کوشمن در سال ۱۹۸۱ ارائه گردید. در این مدل فرض شده است که عناصر غذایی به وسیله دو مکانیسم انتشار یا پخشیدگی و جریان توده‌ای در سطح ریشه جذب می‌شود.

در این تحقیق از عامل خاک‌ورزی در دو سطح و عامل کود آلی (گاوی) در سه سطح استفاده شد. تیمارهای خاک‌ورزی شامل: ۱- کم‌خاک‌ورزی<sup>۱</sup> شامل شخم سطحی توسط دیسک (عمق شخم ۱۵ سانتی‌متر) همراه با دو دیسک سطحی (سبک) پس از شخم به‌منظور تسطیح زمین و خردکردن کلوخه‌های خاک. ۲- خاک‌ورزی مرسوم<sup>۲</sup> شامل شخم عمیق توسط گاوآهن برگرداندار (عمق شخم ۳۰ سانتی‌متر) همراه با دو دیسک سبک به منظور تسطیح زمین و خرد کردن کلوخه‌های خاک. تیمارهای کودی شامل: ۱- تیمار شاهد، بدون افزودن کود گاوی.

۲- تیمار ۳۰ تن کود گاوی در هکتار. ۳- تیمار ۶۰ تن کود گاوی در هکتار. در این طرح از کود گاوی پوسیده، خرد و سرند شده استفاده گردید. این کود

1. Reduced tillage
2. Conventional tillage

مقدار  $b$  از رابطه  $dc/dc_{li}$  محاسبه می شود. در این رابطه  $C_s$  عبارت است از غلظت پتاسیم در فاز تبادل که در آزمایشگاه تعیین می شود (نادسون و همکاران، ۱۹۸۲).  $C_{li}$  غلظت اولیه عنصر در محلول خاک در زمان  $t=0$  می باشد. مقادیر  $C_s$  و  $C_{li}$  به ترتیب بر حسب میکرومول بر  $1000$  سانتی متر مکعب خاک و میکرومول در لیتر تعیین می شوند. برای تعیین مقدار  $b$  بایستی بین  $C_s$  و  $C_{li}$  در تیمارهای مختلف، یک رگرسیون جبری توان دار (رگرسیون با معادله درجه ۲) بدست آورد و سپس از آن مشتق گرفت و مقدار  $C_{li}$  را در معادله بدست آمده قرار داد تا  $b$  بدست آید (باربر، ۱۹۸۴).

۲-  $C_{min}$  غلظتی از عنصر در محلول خاک است که کمتر از آن، جریان عنصر غذایی به داخل ریشه متوقف می گردد (بر حسب میکرومول در لیتر). مقدار آن برای پتاسیم در دمای خاک ۲۹ درجه سانتی گراد برابر  $0.89$  میکرومول در لیتر می باشد. با توجه به این که عمده فصل رشد ذرت در تابستان است، در این تحقیق همین مقدار  $0.89$  میکرومول در لیتر برای  $C_{min}$  در نظر گرفته شد (باربر، ۱۹۸۴).

۳-  $K_m$  غلظت عنصر در محلول خاک منهای  $C_{min}$  موقعی که  $I_n$  (سرعت جذب) نصف  $I_{max}$  (حداکثر سرعت جذب) باشد. مقدار آن در دمای خاک ۲۹ درجه سانتی گراد برای پتاسیم برابر ۲۸ میکرومول در لیتر است (باربر، ۱۹۸۴).

معادله ریاضی برآوردکننده جذب، به صورت زیر است:

$$T = 2\pi r_0 L_0 \int_0^m J_r(r_0, S) dS + 2\pi r_0 \int_0^m \frac{df}{dt} \int_0^{m-t} J_r(r_0, S) dS dt$$

$$T = \text{کل جذب در زمان } t_m$$

$$L_0 = \text{طول اولیه ریشه}^1$$

$$J_r(r_0, S) = \text{شدت جریان در سطح ریشه یا}$$

$$\text{سطح } S$$

$$\frac{df}{dt} = \text{سرعت رشد ریشه.}$$

$$\Gamma_0 = \text{میانگین شعاع ریشه}$$

پارامترهای مدل که اندازه گیری آنها برای پیش بینی مقدار جذب توسط مدل لازم است، به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند:

الف - پارامترهای مربوط به خاک:

۱-  $D_e$  ضریب پخشیدگی یا انتشار مؤثر برای عنصر غذایی مورد نظر در خاک بر حسب سانتی متر مربع در ثانیه که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D_e = D_1 \theta f_1 / b$$

$D_1$  = ضریب پخشیدگی عنصر در آب که مقدار آن برای پتاسیم  $10^{-5} \times 1/98$  سانتی متر مربع در ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد است (باربر، ۱۹۸۴).

$\theta$  = رطوبت حجمی خاک در شرایط ظرفیت مزرعه

$f_1$  = فاکتور مربوط به اعوجاج<sup>۲</sup> در خاک که به

صورت زیر محاسبه می شود:

$$f_1 = 1.6 \theta - 0.172$$

$b$  = قدرت بافری عنصر روی فاز جامد

1. Initial root length

2. Tortuosity

۸-  $L_0$  طول اولیه ریشه بر حسب سانتی متر که در آزمایشگاه تعیین می شود. در این تحقیق طول ریشه در مرحله ۳ برگی می باشد.

۹-  $K$  سرعت رشد ریشه بر حسب سانتی متر در ثانیه که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}$$

برای تعیین  $K$  در دو زمان معین (دو مرحله از رشد گیاه) طول ریشه اندازه گیری شده که اختلاف آنها تقسیم بر مدت زمان رشد ریشه، مقدار  $K$  را تعیین می کند (باربر، ۱۹۸۴).

در نهایت داده های واقعی اندازه گیری شده در مراحل مختلف رشد با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، مقایسه و برازش گردید. داده های اندازه گیری شده جذب و پیش بینی شده توسط مدل، مربوط به مراحل ۵، ۷، ۹ و ۱۱ برگی می باشد و مرحله سه برگی به عنوان نقطه شروع یا زمان  $t=0$  در نظر گرفته شد. لازم به یادآوری است که پارامترهای مربوط به خاک (تعیین پتاسیم محلول و تبادلی خاک) فقط یکبار در مرحله سه برگی اندازه گیری می شوند و در مراحل بعدی رشد، فقط پارامترهای مربوط به گیاه (مرفولوژی ریشه و مقدار پتاسیم در گیاه) تعیین گردیدند.

اندازه گیری پتاسیم محلول و تبادلی در خاک و پتاسیم اندام های هوایی گیاه

پتاسیم محلول در خاک به روش آزمایشگاه شوری ایالات متحده آمریکا (ریچاردز، ۱۹۵۴) و پتاسیم تبادلی (نادسون و همکاران، ۱۹۸۲) و پتاسیم

ب- پارامترهای مربوط به گیاه:

$I_{max}$  حداکثر جریان عنصر غذایی به داخل گیاه در غلظت زیاد عنصر غذایی (بر حسب میکرومول بر سانتی متر مربع در ثانیه) مقدار آن در دمای خاک ۲۹ درجه سانتی گراد و برای عنصر پتاسیم و تحت کشت ذرت برابر ۱۱۲ نانومول بر متر مربع در ثانیه می باشد (باربر، ۱۹۸۴).

۵-  $v_0$  میانگین شدت جریان آب<sup>۱</sup> به داخل ریشه که برای گیاه ذرت در دمای خاک ۲۹ درجه سانتی گراد  $10^{-6} \times 1/25$  سانتی متر در ثانیه می باشد (باربر، ۱۹۸۴).

۶-  $r_1$  نصف فاصله بین محور ریشه بر حسب سانتی متر که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$r_1 = \frac{1}{\sqrt{L_v \pi}}$$

$L_v$  = دانسیته طولی ریشه که برابر است با:

$$L_v = \text{حجم خاک} / \text{طول ریشه}$$

۷-  $r_0$  = میانگین شعاع ریشه<sup>۲</sup> بر حسب سانتی متر که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$r_0 = \sqrt{\frac{w}{\rho L \pi}}$$

$w$  = وزن ریشه تازه

$L$  = طول ریشه

$\rho$  = وزن مخصوص ریشه ها که برای ذرت برابر

یک گرم بر سانتی متر مکعب می باشد.

1. Mean water influx  
2. Mean root radius

ضرب نماییم، طول ریشه بر حسب سانتی متر بدست می آید (باربر، ۱۹۸۴).

دانشیته طولی ریشه از تقسیم طول ریشه بر حجم خاک نمونه برداری شده که محتوی ریشه می باشد، بدست می آید. همان طور که گفته شد، نمونه برداری توسط یک سیلندر به قطر ۱۲ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر انجام شد. بنابراین، اگر طول ریشه محاسبه شده در تیمارهای مختلف، تقسیم بر عدد ۲۲۶۱ (حجم سیلندر) شود، دانشیته ریشه بر حسب سانتی متر در سانتی متر مکعب خاک، به دست می آید. لازم به ذکر است طول و دانشیته ریشه در ۵ مرحله از رشد گیاه (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ برگگی) اندازه گیری شد (جدول ۱).

جدول ۲- طول ریشه (بر حسب سانتی متر) در عمق ۲۰-۰ سانتی متر از سطح پشته و تحت دو سیستم خاک ورزی در مراحل مختلف رشد گیاه.

سیستم خاک ورزی	مرحله رشد گیاه				
	۱۱ برگگی	۹ برگگی	۷ برگگی	۵ برگگی	۳ برگگی
کم خاک ورزی	۲۰۳۵/۴	۱۵۷۰/۳	۸۰۵	۳۰۹/۷	۵۵/۹
خاک ورزی مرسوم	۱۴۳۷/۹	۱۱۸۲/۲	۶۶۷/۶	۳۵۳/۹	۵۹

## نتایج و بحث

برای ارزیابی مدل در پیش بینی مقادیر جذب شده پتاسیم توسط گیاه، از ضریب تبیین ( $R^2$ ) و مجموع مجذور انحرافات از میانگین ( $SSQ$ ) استفاده شد. به طور کلی مقدار جذب پیش بینی شده توسط مدل، بسیار کمتر از جذب واقعی یا مشاهده شده در گیاه بود. در این مطالعه مقدار  $F$  محاسبه

موجود در اندام های گیاهی به روش خشک سوزانی اندازه گیری گردید.

## اندازه گیری طول و دانشیته ریشه

برای اندازه گیری طول و دانشیته ریشه، دو نمونه در هر کرت از ریشه گیاه همراه با خاک محتوی ریشه و در هر مرحله از رشد (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ برگگی)، توسط یک سیلندر درپوش دار به قطر ۱۲ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر از روی پشته گرفته شد. به طوری که ابتدا گیاه کفبر و سپس سیلندر به طور عمودی از روی ریشه ها به داخل خاک فرو برده شد و تمام ریشه ها در عمق ۲۰-۰ سانتی متر همراه با خاک جدا گردید. سپس ریشه ها به آزمایشگاه منتقل و ذرات خاک چسبیده به آن، کاملاً شسته و از ریشه جدا شد. پس از این مرحله، وزن ریشه های تازه توسط ترازو تعیین گردید.

طول ریشه به روش جدا کردن خطی<sup>۱</sup> که توسط تنانت (۱۹۷۵) ارائه گردید، اندازه گیری شد. در این روش ریشه ها روی یک صفحه با شبکه مربعی پخش می شوند، به طوری که ابتدا یک صفحه کاغذ بزرگ را به شبکه های مربعی با ابعاد ۱ سانتی متر تقسیم کرده و سپس یک صفحه شیشه ای روی آن قرار داده می شود. پس از پخش نمودن ریشه ها روی این صفحه، تعداد محل های تقاطع ریشه ها با خطوط افقی و عمودی شمارش می شوند. در حالی که ابعاد هر مربع ۱ سانتی متر باشد، اگر تعداد محل های تقاطع را در کسر ۱۱/۱۴

1. Line-intercept procedure



است در شرایط این مطالعه صحیح نباشند. هم‌چنین، پارامترهای مذکور در مدل ثابت در نظر گرفته شده‌اند که بستگی به عواملی مانند درجه حرارت دارند (باربر، ۱۹۸۴). پارامترهایی مثل درصد حجمی رطوبت و  $I_{max}$  می‌توانند توسط آنالیز حساسیت تعیین گردند، ولی ارزیابی یکنواختی یا غیر یکنواختی توزیع ریشه و ریشه‌های موین امکان‌پذیر نیست (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰). از طرفی تحقیقات نشان داده که در مورد جذب پتاسیم، رشد ریشه‌های موین دارای اهمیت زیادی هستند که در مدل نیز نقش آنها در نظر گرفته شده است (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰). ولی در این تحقیق، رشد ریشه‌های موین اندازه‌گیری نشد و در مدل لحاظ نگردید که می‌تواند یکی از علل مهم انحراف زیاد مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده جذب (پیش‌بینی خیلی کمتر جذب در مقایسه با جذب مشاهده شده) باشد.

با توجه به مطالب فوق اگر داده‌های مدل را در یک ضریب ۱۰۰ ضرب نماییم، انحراف مدل از داده‌های اندازه‌گیری به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، اگرچه هنوز مقدار جذب پیش‌بینی شده کمتر از جذب واقعی می‌باشد. شکل‌های ۱ و ۲ رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده را به ترتیب در حالت‌های بدون ضریب و با ضریب در تیمار کودی شاهد نشان می‌دهد. مقدار  $R^2=0.91$  گویای همبستگی زیاد بین داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده می‌باشد و مقدار  $SSQ$  زیاد در شکل ۱ بیانگر

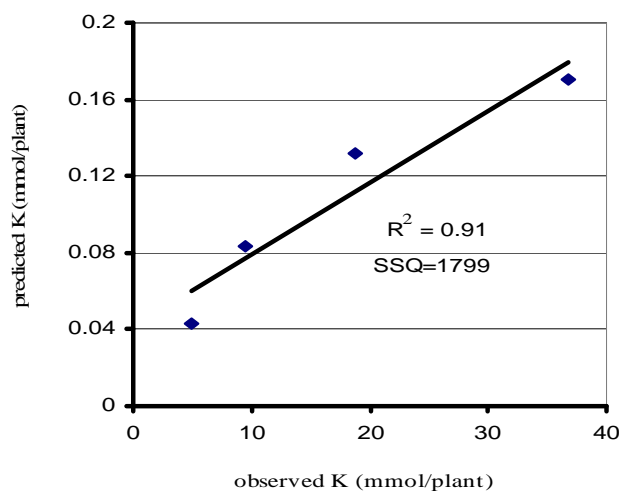
شده برابر ۲۶/۵۷ است که بزرگ‌تر از  $F$  جدول در سطح ۰/۰۵ (۱۸/۵۱) بوده و بنابراین مقدار  $R^2$  معنی‌دار است و از طرفی مقدار  $R^2$  تعدیل شده نیز برابر ۰/۸۹۵ می‌باشد که نشان می‌دهد، مدل دارای کارایی بالایی است. با وجود  $R^2$  زیاد بین داده‌های مدل و داده‌های اندازه‌گیری، انحراف پیش‌بینی مدل از جذب واقعی توسط گیاه در مراحل مختلف رشد، بسیار زیاد بود. علت آن ممکن است مربوط به دقت کم ورودی‌های مدل بویژه آن‌هایی که اندازه‌گیری نشد و به‌صورت تخمینی از منابع استخراج گردید، باشد. الفتی (۱۳۷۵) نشان داد که پیش‌بینی مدل در جذب فسفر توسط گیاه کمتر از مقدار واقعی جذب فسفر بود و ضریبی برای کاهش انحراف مدل از داده‌های واقعی به کار برد. نتایج تحقیقات استینگراب و کلاسن (۲۰۰۰) نشان داد که در گیاه چغندر قند، جذب پیش‌بینی شده پتاسیم توسط مدل، کمتر از جذب اندازه‌گیری شده در گیاه بود، ولی در مورد گندم، پیش‌بینی مدل کمی بیشتر از جذب اندازه‌گیری شده بود.

اگر همبستگی و قرابت خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده جذب و پیش‌بینی مدل وجود داشته باشد، بدین معنی است که مکانیسم‌های پخشیدگی، جریان توده‌ای یا روان و فیزیولوژی جذب، تأثیر مهمی در جذب عنصر داشته و این مکانیسم‌ها به خوبی توسط مدل توصیف شده‌اند (کلاسن و استینگراب، ۲۰۰۰). در این تحقیق پارامترهای مهمی مثل  $D_1$ ،  $I_{max}$ ،  $K_m$  و  $C_{min}$  به‌طور تخمینی از منابع دیگر استخراج شدند که ممکن

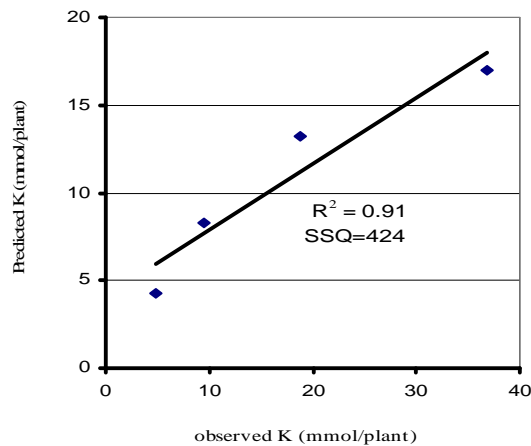
(برای حالت بدون اعمال ضریب  $SSQ = 3709$ ) در مقایسه با تیمار شاهد بیشتر است، ولی مقدار  $R^2$  تقریباً در هر دو تیمار مشابه است. در این تیمار با اعمال ضریب  $100$  در مدل، مقدار  $SSQ$  حدود  $6$  برابر کاهش می‌یابد. در تیمار  $60$  تن در هکتار کود دامی بیشترین انحراف مدل از داده‌های واقعی دیده می‌شود و پس از اعمال ضریب در مدل مقدار  $SSQ$  حدود  $7$  برابر کاهش نشان می‌دهد (برای حالت بدون اعمال ضریب  $SSQ = 3778$ ). شکل  $4$  رابطه بین جذب پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را در تیمار  $60$  تن در هکتار کود دامی با اعمال ضریب نشان می‌دهد.

اختلاف زیاد پیش‌بینی مدل با جذب مشاهده شده است. با در نظر گرفتن ضریب  $100$  در مدل مقدار  $SSQ$  حدود  $4$  برابر کاهش می‌یابد و در واقع جذب پیش‌بینی شده توسط مدل به مقادیر جذب واقعی نزدیک می‌شود. در سایر تیمارهای کودی و خاک‌ورزی، رابطه رگرسیونی فقط با اعمال ضریب آورده شده است و برای حالت بدون اعمال ضریب، مقدار  $SSQ$  گزارش شده است.

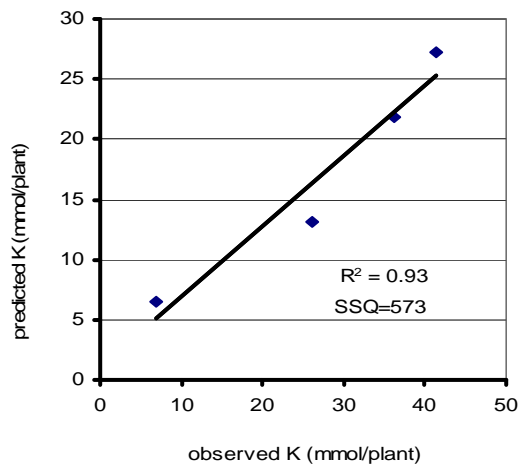
رابطه بین جذب پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در تیمار  $30$  تن در هکتار کود دامی با اعمال ضریب در شکل  $3$  آورده شده است. انحراف مدل از داده‌های اندازه‌گیری با توجه به مقدار  $SSQ$



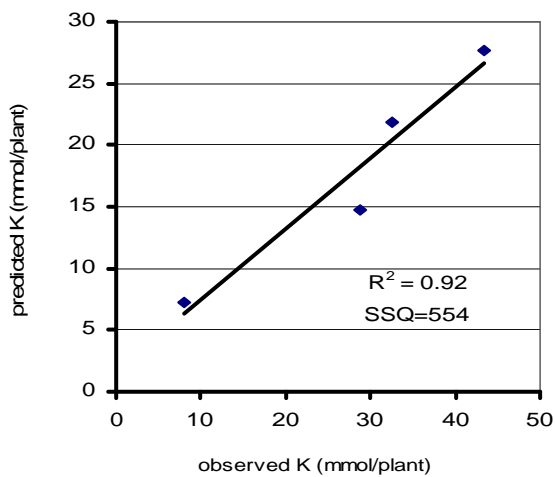
شکل ۱- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار  $60$  تن در هکتار کود دامی



شکل ۲- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار ۰ تن در هکتار کود دامی پس از اعمال ضریب در مدل



شکل ۳- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار ۳۰ تن در هکتار کود دامی پس از اعمال ضریب در مدل



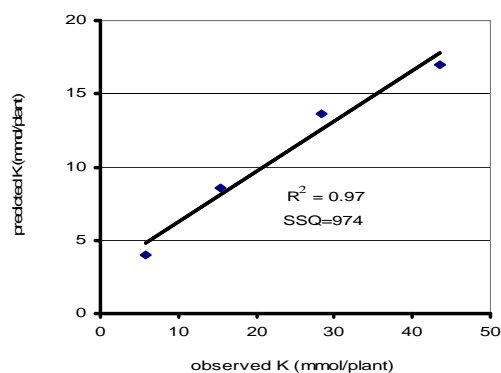
شکل ۴- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار ۶۰ تن در هکتار کود دامی پس از اعمال ضریب در مدل

اعمال ضریب  $SSQ = 2950$ ). تیمار خاک‌ورزی مرسوم، حداقل مقدار  $R^2$  را در بین تیمارهای مختلف دارا می‌باشد. شکل ۶ گویای این مطلب هست و با اعمال ضریب در مدل مقدار  $SSQ$  حدود ۳ برابر کاهش یافته است (برای حالت بدون اعمال ضریب  $SSQ = 3077$ ).

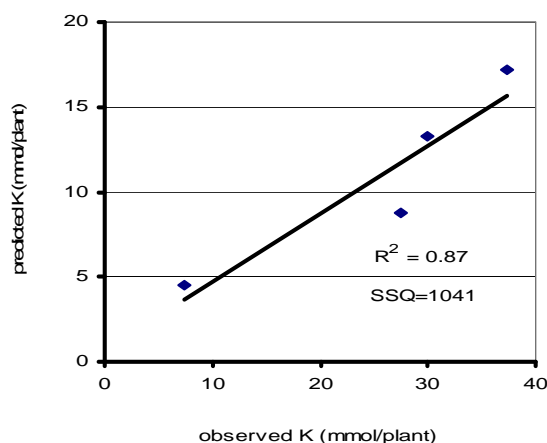
انحراف مدل از داده‌های واقعی جذب پتاسیم در سیستم کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم کمتر است. بدین معنی که در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مدل، پیش‌بینی کمتری از جذب نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی نموده است و داده‌های مدل در تیمار دیسک سطحی به داده‌های اندازه‌گیری جذب نزدیک‌تر است. علت این امر، می‌تواند مربوط به مقدار بیشتر پارامترهای محاسبه شده مربوط به ریشه از قبیل طول و سرعت رشد ریشه در سیستم کم‌خاک‌ورزی باشد. لازم به ذکر است که طول ریشه در یک حجم مشخصی از خاک تعیین شد (نه طول کل ریشه) و این مقدار در سیستم کم‌خاک‌ورزی بیشتر بود (جدول ۲).

همان‌طور که ذکر شد، با افزایش کود دامی به خاک، انحراف داده‌های مدل از داده‌های اندازه‌گیری جذب زیاد می‌شود. دلیل آن شاید مربوط به عدم حساسیت لازم مدل به افزایش مقدار پتاسیم در محلول خاک در این تحقیق باشد. با افزودن کود دامی به خاک، با توجه به این که حاوی مقدار قابل توجهی پتاسیم می‌باشد، انتظار می‌رود که غلظت پتاسیم در محلول خاک افزایش یافته و جذب آن توسط گیاه بیشتر شود. بنابراین، همراه با افزایش پارامتر  $C_{ii}$  (غلظت در محلول خاک) در مدل، مقدار جذب پیش‌بینی شده چندان افزایش پیدا نکرد و انحراف بیشتری را از جذب واقعی نشان داد.

شکل ۵ رابطه بین جذب اندازه‌گیری شده پتاسیم در گیاه و پیش‌بینی شده توسط مدل را در تیمار کم‌خاک‌ورزی پس از اعمال ضریب ۱۰۰ در مدل نشان می‌دهد. مقدار  $R^2$  زیاد است، به طوری که حداکثر مقدار را در بین تمام تیمارها شامل می‌شود. با اعمال ضریب در مدل، مقدار  $SSQ$  حدود ۳ برابر کاهش یافته است (برای حالت بدون



شکل ۵- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار کم‌خاک‌ورزی پس از اعمال ضریب در مدل



شکل ۶- رابطه بین جذب واقعی و پیش‌بینی شده پتاسیم در تیمار خاک‌ورزی مرسوم پس از اعمال ضریب در مدل

### منابع مورد استفاده

- ✓ الفتی، م. ۱۳۷۵. اثر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و رطوبت خاک بر تثبیت فسفر و راندمان کود سوپر فسفات در خاک‌های آهکی استان کرمانشاه و تهیه مدل کامپیوتری جذب فسفر توسط گیاه ذرت. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ✓ کلباسی، م. ۱۳۷۰. دستورالعمل آزمایش‌های خاک‌شناسی عمومی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- ✓ S. A. Barber. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach, John Willey and Sons, New York, pp. 114- 134.
- ✓ Bhat. K. K. S., A. J. Brereton and P. H. Nye. 1979. The possibility of predicting solute uptake and plant growth response from independently measured soil and plant characteristics. *Plant and Soil, Sci.* 53: 169- 191.
- ✓ Claassen. N. and S. A. Barber. 1976. Simulation model for nutrient uptake from soil by growing plant root system. *Agron. J.* 68: 691- 964.
- ✓ Claassen. N. and S. A. Barber. 1977. Potassium influx characteristics of corn roots and interaction with N, P, Ca and Mg influx. *Agronomy J.* 69: 860- 864.
- ✓ Claassen. N. and B. Steingrobe. 2000. Mechanistic simulation models for better understanding of nutrient uptake from soil. pp. 327- 367. In Z. Rangel, Mineral nutrition of crops, Food products press, New York.
- ✓ Knudson. D., G. A. Peterson and P. T. Pratt. 1982. Lithium, sodium and potassium. In: A. L. Page et al (ed.). *Method of soil analysis. Part 2, 2 ed.*, Am. Soc. Agron., Madison, WI. 9: 225- 146.
- ✓ Ingwersen. J. and Th. Streck. 2005. A regional-scale study on the crop uptake of cadmium from sandy soils. *J. Environ. Qual.* 34: 1026- 1035.
- ✓ Macariola-See. N., H. J. Woodard and T. Schumacher. 2003. Field verification of the Barber-Cushman mechanistic phosphorus uptake model for maize. *J. Plant Nutr.* 26: 139- 158.

- ✓ Perriguet, J., T. Sterckeman and J. L. Morel. 2008. Effect of rhizosphere and plant related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.). Environ. and Exp. Bot. 63: 333- 341.
- ✓ L. A. Richards. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA handbook, No. 60, Washington, D. C. U.S.A.
- ✓ Steingrobe. B. and N. Claassen. 2000. Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops. J. plant Nutr. Soil Sci. 163: 101- 106.
- ✓ Wolf. J., C. T. Dewit, B. H. Jansson and D. Y. Lathwel. 1987. Modeling long-term crop response to fertilizer phosphorus. I. The model 1. Agron. J. 79: 445- 451.