سینتیک آزاد شدن فسفر و هم‌بستگی ضرایب مدل‌های سینتیکی با برخی ویژگی‌های خاک و شاخص‌های گیاهی در تعدادی از خاک‌های همدان

فرزانه السادات بیابانکی[۱*] و علیرضا حسین پور[۲]

(تاریخ دریافت: ۸۴/۷/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۵/۹)

چکیده

در اکثر مناطق دنیا فسفر بعد از نیتروژن مهم‌ترین عنصر محدود کنندهٔ رشد محصولات کشاورزی می‌باشد. اطلاعات درباره سرعت آزاد شدن فسفر در خاک‌های همدان محدود است. هدف از این تحقیق مطالعه سرعت رهاسازی فسفر در ده نمونه از خاک‌های استان همدان به وسیله عصاره‌گیری مرحله‌ای با استفاده از بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار با pH=۸/۵ در مدت ۱۷۵۲ ساعت و هم‌بستگی ثابت‌های سرعت معادلات سینتیکی با خصوصیات خاک و شاخص‌های گیاه ذرت بود. نتایج این پژوهش نشان داد رهاسازی فسفر از خاک‌ها در ابتدا سریع و سپس به آهستگی ادامه یافت. بعد از گذشت ۱۷۵۲ ساعت مقدار فسفر آزاد شده در خاک‌ها بین ۵۸۶ - ۳۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. فسفر تجمعی آزاد شده به وسیله شش مدل سینتیکی ارزیابی شد. نتایج تجزیه‌های آماری نشان داد که رهاسازی فسفر توسط معادلات پخشیدگی پارابولیکی، مرتبه اول و تابع نمایی به خوبی قابل توصیف بود. نتایج مطالعات هم‌بستگی نشان داد که برخی ضرایب آزاد شدن فسفر از جمله شیب و عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، انتشار پارابولیکی، تابع نمایی، و نیز مقادیر فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و۱۷۵۲ ساعت با ویژگی‌های خاک مانند مقدار فسفر قابل دسترس اولیه، در صد کربنات کلسیم، شن و سلیت هم‌بستگی معنی‌داری دارند. نتایج ارتباط شاخص‌های گیاهی با ضرایب سرعت معادلات سینتیکی نشان داد شیب معادله مرتبه اول با شاخص‌های گیاهی هم‌بستگی معنی‌داری نداشت. ثابت‌های معادلات انتشار پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاهی داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد سرعت آزاد شدن فسفر در خاک‌ها متفاوت و فاکتور مهمی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فسفر، آزاد سازی، معادلات سینتیکی، ذرت، همدان

مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی پر نیاز موجودات زنده است (۱۲) که از نظر اهمیت غذایی در گیاهان پس از نیتروژن در درجه دوم قرار می‌گیرد. حلالیت و قابلیت جذب فسفر تابع عوامل بسیار متعددی است که آثار این عوامل همیشه توام می‌باشند به طوری‌که امکان مطالعه جداگانه آنها بسیار ضعیف است. فسفر در خاک واکنش‌های گوناگونی مانند جذب سطحی، رسوب، تثبیت و رهاسازی دارد. از جمله عوامل مؤثر بر واکنش‌های

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۲. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان و در حال حاضر دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: f_biabanaki@yahoo.com

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

فسفر در خاک زمان می‌باشد. برای درک اثرهای متقابل فسفر با ذرات خاک و پیش بینی سرنوشت آن، اطلاعاتی درباره سرعت واکنش اهمیت دارد (۲و۱۵). سرعت فراهم شدن فسفر برای گیاه از نظر تغذیه گیاه حائز اهمیت می‌باشد. بررسی سرعت واکنش‌ها وانجام مطالعات سینتیکی در خاک به سبب حضور انواع کانی‌ها وترکیبات پیچیده آنها به مراتب دشوارتر از سیستم‌های حاوی یک کانی مشخص می‌باشد. لذا این گونه مطالعات در خاک‌ها کمتر انجام شده‌اند. درک سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک‌ها می‌تواند در کاهش ورود فسفر به روان آب اهمیت داشته باشد (۲۴). غلظت پایین فسفر خاک به علت واکنش‌های قوی فسفات با تعدادی از فازهای جامد آلی وغیر آلی وکند بودن سرعت بسیاری از واکنش‌های آزاد سازی فسفر است. از این رو بررسی واکنش‌های جذب و رهاسازی فسفر در خاک در طی زمان برای تعیین تغییرات فسفرقابل استفاده گیاه در خاک دارای اهمیت است. وجود تعادل بین سطوح فسفر خاک برای کشاورزی و سطوح بی خطر فسفر برای محیط زیست الزامی می‌باشد. در این راستا شناخت کشاورز از سرعت و ظرفیت رهاسازی فسفر خاک اهمیت دارد چرا که نشان دهندهٔ فسفر قابل دسترس گیاه خواهد بود (۵). از فواید دیگر مطالعات سینتیک رهاسازی فسفر این می‌باشد که نشان می‌دهد تمامی فسفر موجود در خاک ممکن است در زمان ژئولوژیکی به محلول خاک راه یابند ولی همین مقدار فسفر در زمان محدودی مانند دوره رشد گیاه قادر به وارد شدن به محلول نمی‌باشد.

رهاسازی فسفر از کلوئیدهای خاک یکی از فرایندهای کنترل کننده جذب فسفر توسط ریشه‌ها ومؤثر در رشد گیاهان می‌باشد. بنابراین مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر از خاک وسیله بسیار خوبی برای بررسی وضعیت فسفر می‌باشد (۲۱). مطالعات انجام شده در مورد سرعت آزاد شدن فسفر از خاک به سال‌های گذشته مربوط می‌شود. در بررسی رهاسازی فسفر روش‌های گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که عصاره‌گیری یا بی‌کربنات در سال ۱۹۵۴ پایه‌گذاری شد (۲۰)، روش عصاره‌گیری با رزین در سال ۱۹۵۵ توسط آمر و همکاران (۱) و نیز در سال ۱۹۶۳ به وسیله کوک و هیسلوپ (۳) مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش‌ها چندین مطالعه در سال‌های بعد انجام شد تا این‌که در سال ۱۹۹۵ فریس و همکاران (۷) با استفاده از روش جدیدی سینتیک رهاسازی فسفات از خاک‌ها را مطالعه نمودند. این محققین از غشاهای دیالیزی لوله‌ای آغشته به اکسید آهن (فریک) واکسید آبدار (فری هیدرات) به عنوان مخزن جاذب فسفر با قدرت جذب نامحدود استفاده نمودند. لوکمن و همکاران (۱۶) به بررسی بلند مدت آزاد شدن فسفر با استفاده از اکسید آهن آبدار درون لوله‌های دیالیزی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که رهاسازی فسفر در ابتدا سریع و سپس به کندی انجام می‌شود. گارسیا و سوتزر (۸) به پیش بینی پارامترهای سینتیکی رهاسازی فسفر از خاک‌های شمال شرق اسپانیا اقدام نموده و در طی مطالعه خود به هم‌بستگی بین این پارامترها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دست یافتند. مک داول وشارپلی (۱۸) به بررسی هم‌بستگی سینتیک حلالیت ورهاسازی فسفر با غلظت فسفر آزمون خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هم‌بستگی معنی‌داری بین مقدار فسفر تجمعی آزاد شده از خاک وفسفر آزمون خاک وجود دارد.

معادلات متعددی برای توصیف سرعت رهاسازی عناصر در کانی‌های رسی و خاک استفاده شده است (۱۱و۱۳). این معادلات شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوویچ ساده، انتشار پارابولیک و تابع نمایی می‌باشند.

مطالعه هم‌بستگی بین پارامترهای آزاد سازی فسفر خاک‌ها با شاخص‌های گیاهی ویا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها می‌تواند در توصیف وضعیت فسفر قابل استفاده خاک‌ها مفید باشد. اهداف انجام تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

۱- مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر قابل دسترس از خاک‌ها

۲- مقایسه معادلات سینتیکی و انتخاب بهترین معادله جهت توصیف آزاد شدن فسفر از خاک‌ها

۳- مطالعه هم‌بستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با ثابت‌های معادلات سینتیکی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

جدول.۱. معادله‌های سینتیکی استفاده شده

مدل	معادله
معادله مر تبه صفر	$P_0-P_t = a - K_d. t$
معادله مرتبه اول	$\ln(P_0-P_t) = a- K_d. t$
معادله مرتبه دوم	$1/P_t = a + K_d. t$
معادله الوویچ ساده شده	$P_t = a + b\ln t$
معادله پخشیدگی پارابولیک	$P_t/P_0 = a + R. t^{0.50}$
معادله تابع نمایی	$\ln P_t = \ln a + b \ln t$

P_t: فسفر آزاد شده در زمان t P_0: فسفری که می‌تواند در حال تعادل آزاد شود.

b, R, K_d :ضرایب سرعت معادلات سینتیکی a: عرض ازمبدا معادلات t: زمان

۴- مطالعه هم‌بستگی بین شاخص‌های گیاه ذرت با ثابت‌های رهاسازی معادلات سینتیکی.

مواد و روش‌ها

در ابتدا بیست و سه نمونه خاک سطحی (عمق ۰تا۳۰سانتی‌متری) با بیشترین پراکنش جغرافیایی در استان همدان جمع آوری شدند. پس از هوا خشک کردن وگذراندن نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری درصد رس به روش هیدرومتر بایکاس (۹)، مقدارفسفر قابل استفاده به روش اولسن(۲۰) و درصدکربنات کلسیم به روش تیتراسیون برگشتی (۱۷) تعیین شدند. ده نمونه خاک که ازنظر ویژگی‌های مذکورمتنوع بودند، انتخاب شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتربایکاس با اعمال تصحیحات دمایی(۹)، pH خاک در عصاره ۲به۱خاک به آب مقطر به وسیله دستگاه pH متر مدل متراهم ۷۴۴ (۲۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره۲به۱خاک به آب مقطر با هدایت سنج مدل متراهم۷۱۲ (۲۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها به روش استات سدیم باpH =۷ (۲۵) در صد مواد آلی به روش اکسداسیون تر (۲۸)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۱۷)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن عصاره‌گیری شده (۲۰) وبه روش رنگ سنجی (۱۹) اندازه‌گیری شد. مطالعه سینتیک آزاد شدن فسفر به روش عصاره‌گیری متوالی (Successive extraction) انجام شد. به این منظور یک گرم از هر خاک در لوله سانتریفیوژ ریخته و ۲۰ میلی‌لیتر بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار که pH آن روی ۸/۵ تنظیم شده بود به آنها اضافه شد. نمونه‌ها برای ۲ تا ۱۷۵۲ ساعت در انکوباتور قرار داده شدند. در فواصل زمانی مشخص سوسپانسیون صاف و محلول رویی جمع آوری شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر محلول جدید اضافه و تکان دادن نمونه‌ها تکرار شد. فسفر نمونه‌ها به روش رنگ سنجی (۱۹) اندازه‌گیری شد. در پایان معادلات سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوویچ ساده، تابع نمایی و انتشار پارابولیکی (جدول ۱) بر مقدار تجمعی فسفر آزاد شده برازش و بر اساس ضرایب تشخیص و اشتباه استاندارد برآورد معادله یا معادلاتی که قادر به توصیف آزاد شدن فسفر بودند انتخاب و ضرایب آنها برآورد شد.

اشتباه استاندارد برآورد (SE) با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$SE = \left(\frac{\sum \left(P_t - P_t^*\right)^2}{n-2} \right)^{0.5}$$

که در آن:

P_t– غلظت فسفر آزادشده در زمان t بر حسب $mg\ kg^{-1}$.

P_t^* – غلظت فسفر برآوردشده از مدل در زمان t بر حسب $mg\ kg^{-1}$ و n تعداد نقاط آزمایشی است.

به منظور مطالعه هم‌بستگی بین ویژگی‌های سینتیکی آزاد شدن فسفر وشاخص‌های گیاهی مطالعه گلدانی انجام شد. این

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

آزمایش با استفاده از گیاه ذرت (*Zea mays*) واریته سینگل کراس ۷۰۴ انجام شد. قبل از کاشت، بذرهای ذرت به خوبی با قارچ کش بنومیل ضد عفونی شده وجهت جوانه زنی به مدت چند روز در رطوبت مناسب و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند. سه بذر جوانه زده در گلدان‌های پلاستیکی حاوی ۳ کیلوگرم خاک عبور یافته از الک ۸ میلی‌متری در عمق ۳ سانتی‌متری کشت شدند. قبل از ریختن خاک‌ها درون گلدان‌ها برای ایجاد تهویه وخروج آب اضافی منافذی در کف گلدان ایجاد و چند عدد سنگریزه در کف هر گلدان قرار داده شد. قبل از پرکردن گلدان‌ها کودهای لازم به خاک هر گلدان اضافه شدند. بدین منظورابتدا مقادیر کود با کمی خاک مخلوط و سپس مخلوط خاک و کود به خاک گلدان‌ها اضافه شد. در این آزمایش از دو تیمار صفر و۲۰۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک استفاده شد. نظر به این‌که خاک گلدان‌ها بایستی از نظر سایر عناصر غذایی کمبودی نداشته باشد ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم روی به صورت $ZnSO_4.H_2O$ ، ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پتاسیم به صورت K_2SO_4 و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم آهن به صورت سکوسترین آهن به خاک همه گلدان‌ها اضافه شد. کود نیتروژن در دو مرحله به ترتیب یک هفته پس از کاشت و شش هفته پس از کاشت بذرهای ذرت به مقدار ۵۰ و۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به خاک‌ها به صورت حل کردن در آب به گلدان‌ها افزوده شد. در طول فصل رشد مراقبت‌های لازم انجام شد. آبیاری با آب معمولی و یک روز در میان صورت گرفت. پس از گذشت ۹۰ روز اندام هوایی گیاهان از یک سانتی‌متری بالای خاک برداشت و به داخل پاکت انتقال داده شدند. سپس نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از توزین، نمونه‌ها آسیاب شده و غلظت فسفر در آنها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری فسفر در بافت گیاهی ابتدا یک گرم نمونه آسیاب شده در کروزه چینی ریخته شد و به مدت ۲ ساعت در کوره الکتریکی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر گردید. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک دو نرمال به این خاکستر اضافه و حرارت داده شد. سپس نمونه‌ها صاف گردید (۱۴). غلظت فسفر عصاره‌ها با استفاده از روش رنگ سنجی (۱۹) تعیین شد. سپس شاخص‌های گیاهی شامل فسفر جذب شده توسط اندام هوایی، عملکرد نسبی و پاسخ محصول به کود فسفره با استفاده از روابط زیر تعیین گردید.

= فسفر جذب شده توسط اندام هوایی گیاه

غلظت فسفر در گیاه × عملکرد خشک

= پاسخ گیاه به کود فسفره

عملکرد گیاه در تیمار کود داده نشده – عملکرد گیاه در تیمار کود داده شده

= عملکرد نسبی

۱۰۰×(عملکرد درتیمار کود داده شده / عملکرد در تیمار کود داده نشده)

در پایان ضرایب هم‌بستگی مقدار تجمعی فسفر رها شده، ضرایب معادلات سرعت با ویژگی‌های خاک و شاخص‌های گیاهی بااستفاده از نرم افزار SPSS تعیین گردید.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه دارای دامنه گسترده‌ای از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی می‌باشند (جدول۲). دامنه تغییرات درصد رس، سیلت و شن در خاک‌های مطالعه شده به ترتیب۵۳-۱۳، ۳۶-۱۱ و ۷۵-۱۴می‌باشد. بافت خاک‌ها از رسی تالوم رسی شنی متغیراست. خاک‌های مطالعه شده آهکی با دامنه pH بین۷/۷-۷/۱ می‌باشند. دامنه تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌ها ۰/۳۹-۰/۱۴دسی زیمنس بر متر، دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی۲۶-۱۱ سانتی‌مول بار در کیلوگرم، دامنه تغییرات ماده آلی۱/۷-۰/۶۳ درصد و دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک‌ها بین ۲۲/۲-۱/۳ درصد و دامنه تغییرات فسفر عصاره‌گیری شده با اولسن بین۴۹-۱۰ میلی‌گرم درکیلوگرم می‌باشد (جدول۲). بیشترین و کمترین مقدار فسفر قابل عصاره‌گیری با روش اولسن به ترتیب در خاک شماره۳ و خاک شماره ۱۰ می‌باشد.

در جدول ۳ مقدار فسفرآزادشده از خاک‌های مختلف به

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده

شماره خاک	محل نمونه برداری	قابلیت هدایت الکتریکی	پ–هاش	گنجایش تبادل کاتیونی	فسفر قابل استخراج	کربنات کلسیم معادل	ماده آلی	رس	سیلت	شن
		dsm^{-1}		$Cmol_c kg^{-1}$	$mgkg^{-1}$			%		
۱	موئی جین	۰/۱۴	۷/۱	۱۵/۹	۳۴/۹	۱/۵	۱/۲۵	۳۰/۱	۲۱/۲	۴۸/۷
۲	بهار	۰/۲۹	۷/۵	۱۹/۹	۴۹/۱	۹/۵	۱/۳۵	۲۸/۳	۲۱/۲	۵۰/۵
۳	گنج تپه	۰/۱۶	۷/۳	۲۱/۵	۴۴/۱	۲/۷	۰/۷۷	۱۶/۰	۱۶/۲	۶۷/۸
۴	سلیمان آباد	۰/۲۱	۷/۶	۲۴/۳	۲۳/۱	۱۲/۸	۱/۲۷	۳۶/۹	۲۳/۸	۲۹/۳
۵	دستجرد ۱	۰/۳۰	۷/۷	۲۶/۱	۳۰/۰	۱۵/۵	۱/۷۲	۴۹/۳	۳۶/۳	۱۴/۴
۶	دستجرد ۲	۰/۱۵	۷/۵	۱۹/۹	۱۰/۴	۶/۵	۰/۶۵	۳۱/۲	۲۶/۳	۴۲/۵
۷	دستجرد ۳	۰/۱۷	۷/۵	۱۹/۰	۱۷/۵	۱۰/۰	۰/۸۲	۳۱/۴	۳۱/۳	۳۷/۳
۸	لاله جین	۰/۳۴	۷/۷	۲۲/۰	۱۹/۲	۲۰/۰	۱/۰۱	۴۴/۸	۳۶/۳	۱۸/۹
۹	جاده غار علیصدر	۰/۲۴	۷/۷	۲۴/۰	۱۶/۶	۲۲/۲	۰/۸۹	۵۳/۱	۳۱/۳	۱۵/۶
۱۰	یکن آباد	۰/۳۹	۷/۴	۱۱/۰	۳۸/۲	۱/۳	۰/۶۳	۱۳/۰	۱۱/۳	۷۵/۷

جدول ۳ . فسفر عصاره‌گیری شده ازخاک‌های مورد مطالعه در زمان‌های مختلف (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

	زمان‌های عصاره‌گیری (ساعت)																				
خاک	۲	۴	۸	۲۴	۴۸	۹۶	۱۲۰	۱۴۴	۱۶۸	۲۴۰	۳۳۶	۴۰۸	۵۰۴	۵۷۶	۶۷۲	۷۴۴	۹۱۲	۱۰۸۰	۱۲۴۸	۱۴۱۶	۱۵۸۴	۱۷۵۲
۱	۲۸	۶۳	۸۵	۱۱۵	۱۴۴	۱۸۲	۱۹۲	۲۰۲	۲۱۰	۲۳۱	۲۵۳	۲۸۲	۳۰۵	۳۱۷	۳۲۵	۳۳۹	۳۵۷	۳۷۱	۳۹۷	۴۰۴	۴۲۱	۴۳۹
۲	۴۵	۷۸	۱۱۲	۱۱۵	۱۹۳	۲۳۷	۲۶۰	۲۲۷	۲۹۶	۳۱۶	۳۳۸	۳۶۷	۳۹۳	۴۱۳	۴۲۶	۴۴۰	۴۶۸	۴۹۰	۵۲۱	۵۳۷	۵۶۱	۵۸۶
۳	۲۸	۵۶	۷۷	۱۱۰	۱۴۲	۱۷۶	۱۹۰	۲۰۹	۲۳۰	۲۵۵	۲۸۷	۳۲۲	۳۵۴	۳۶۸	۳۷۸	۳۹۸	۴۲۱	۴۴۰	۴۶۳	۴۷۸	۴۹۸	۵۲۳
۴	۴۱۸	۳۶	۵۲	۷۳	۹۳	۱۲۰	۱۳۲	۱۸	۱۶۴	۱۸۳	۲۰۵	۲۳۲	۲۶۰	۲۷۳	۲۸۵	۳۰۱	۳۲۳	۳۳۹	۳۵۹	۳۶۹	۳۸۶	۴۱۰
۵	۱۱	۲۸	۴۰	۵۳	۷۳	۹۳	۱۰۲	۱۱۶	۱۳۷	۱۶۴	۱۹۶	۲۳۰	۲۵۴	۲۶۶	۲۸۰	۳۰۶	۳۳۰	۳۴۸	۳۷۳	۳۸۳	۴۰۱	۴۲۶
۶	۱۴	۲۳	۳۲	۴۳	۶۰	۷۴	۷۹	۹۰	۱۰۶	۱۲۵	۱۴۵	۱۷۰	۱۹۰	۱۹۷	۲۰۲	۲۲۲	۲۳۸	۲۵۱	۲۷۵	۲۸۲	۲۹۳	۳۰۹
۷	۷	۲۱	۳۲	۴۲	۶۳	۸۳	۹۲	۱۰۱	۱۲۱	۱۴۱	۱۶۳	۱۸۹	۲۰۰	۲۱۰	۲۱۵	۲۳۶	۲۵۴	۲۶۵	۲۸۸	۲۹۵	۳۰۸	۳۲۷
۸	۱۳	۲۶	۳۸	۵۳	۷۵	۹۶	۱۰۲	۱۱۵	۱۳۸	۱۶۶	۱۹۷	۲۲۹	۲۴۶	۲۵۸	۲۶۶	۲۸۲	۳۰۳	۳۱۸	۳۴۱	۳۵۱	۳۶۷	۳۸۹
۹	۵	۱۷	۲۶	۳۷	۵۶	۷۲	۷۸	۹۰	۱۰۵	۱۲۲	۱۴۷	۱۷۷	۱۹۱	۱۹۹	۲۰۷	۲۳۱	۲۴۹	۲۶۲	۲۷۹	۲۸۴	۲۹۷	۳۱۸
۱۰	۲۳	۴۴	۶۶	۹۷	۱۲۹	۱۶۱	۱۷۳	۱۹۰	۲۰۹	۲۳۳	۲۶۰	۲۹۱	۳۲۲	۳۳۵	۳۴۷	۳۷۱	۳۹۳	۴۱۲	۴۳۲	۴۴۱	۴۵۹	۴۸۱

روش عصاره‌گیری مرحله‌ای با بی کربنات سدیم با توجه به زمان نشان داده شده است. سرعت آزاد شدن فسفر در کلیه خاک‌ها تا مرحله نهم نمونه برداری (۱۶۸ ساعت پس از شروع آزمایش) بالا بوده و پس از این مرحله، رهاسازی با سرعت کمتری ادامه پیدا کرده است. مشابه این نتایج توسط پژوهشگران دیگر گزارش شده است (۶، ۱۰ و ۱۶). مقدار فسفر آزاد شده در مراحل اولیه عصاره‌گیری در خاک‌های مختلف متفاوت می‌باشد به طوری که ۱۶۸ ساعت پس از شروع آزمایش، بیشترین مقدار فسفر از خاک شماره ۲ (۲۹۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) وکمترین مقدار آن از خاک شماره ۹ (۱۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) آزاد شد (جدول ۳). تقریباً در تمام خاک‌ها تا مرحله نهم نمونه برداری به طور میانگین حدود۴۰ درصد از کل فسفر استخراج شده خارج شده است. اختلاف مقادیر فسفر رها شده ازخاک‌ها را می‌توان به تفاوت اشکال فسفر موجود در این خاک‌ها نسبت داد. فسفر در خاک به حالت‌های رسوب یافته، حبس شده توسط اکسیدها و هیدروکسیدها، جذب سطحی شده بر سطوح اکسیدها موجود می‌باشد(۱۲).

علاوه بر تفاوت فسفر آزاد شده در مراحل اولیه، مقدار فسفر آزاد شده در مراحل کند بعدی نیز متفاوت است (جدول ۳). مقدار تجمعی فسفر رها شده پس از ۱۷۵۲ ساعت نشان می‌دهد که در خاک‌هایی با کمترین فسفر قابل استفاده در ابتدای عصاره‌گیری فسفر آزاد شده س از ۱۷۵۲ ساعت نیز کمترین مقدار بوده است ولی در خاک‌هایی که فسفر قابل استفاده در ابتدای عصاره‌گیری بیشترین مقداربوده (خاک‌های ۲ و ۳) مقدار فسفر آزاد شده بیشترین مقدار نبوده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در قابلیت جذب فسفر علاوه بر مقدار فسفر قابل جذب، سرعت آزاد شدن فسفر را نیز باید در نظر گرفت. زمان لازم برای این‌که یون‌های فسفات فاز جامد را ترک کرده و وارد محلول خاک شوند به نوع خاک و ویژگی‌های آن بستگی دارد. دامنه تغییرات مقدار فسفر آزاد شده از این خاک‌ها پس از ۱۷۵۲ ساعت بین ۵۸۶-۳۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم است.

از نظرتئوری، همه فسفر موجود در خاک قابل رهاسازی می‌باشند. اما قسمتی از فسفر خاک آن چنان قوی پیوند شده است که عملاً به صورت غیر قابل برگشت وتثبیت شده می‌باشد. رهاسازی بلند مدت فسفر از خاک، با استفاده از دو مخزن در خاک توصیف می‌شود: مخزن اول قابل دسترس ومخزن دوم شدیداً تثبیت شده (۱۶). به عبارت دیگر، مخزن‌هایی با ظرفیت رهاسازی سریع و آهسته. رهاسازی سریع فسفر به پیوندهای اولیه فسفر در سطح ذرات که در معرض مستقیم فاز محلول می‌باشند، مربوط می‌شود. بسته به نوع خاک، درصد فسفر با رهاسازی سریع متفاوت است. در مطالعه‌ای که توسط لوکمن و همکاران (۱۶) انجام گرفت این معادل ۲۲ درصد به‌دست آمد. البته زمان تماس بین فسفر وخاک نیز نقش مهمی در رابطه با رهاسازی فسفر دارد. زمان طولانی تعادل بین فسفر وخاک، منجربه پخشیدگی فسفر به سمت اکسیدها وهیدروکسیدهای فلزی خواهد شد (۱۶).

شش معادله سینتیکی شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوویچ ساده شده، پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی برای بررسی توصیف رهاسازی فسفر مورد استفاده قرار گرفتند. ضرایب تشخیص وخطای استاندارد برآورد معادلات سینتیکی به کار گرفته شده برای توصیف سرعت آزاد شدن فسفر در جدول ۴ نشان داده شده است. معادلاتی که ضریب تشخیص بالا و خطای استاندارد برآورد کم داشته باشند سرعت آزاد شدن فسفر را بهتر توصیف می‌کنند. معادلات مرتبه صفر والوویچ ساده با وجود بالا بودن ضریب تشخیص به دلیل بالا بودن خطای استاندارد برآورد و معادله مرتبه دوم به دلیل کم بودن ضریب تشخیص نمی‌توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توضیح دهند. معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی به دلیل بالا بودن ضرایب تشخیص وپایین بودن خطای استاندارد برآورد می‌توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کنند (جدول ۴). ضرایب این معادلات در خاک‌های مطالعه شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

هم‌خوانی سرعت آزاد شدن فسفر با معادله مرتبه اول و پخشیدگی پارابولیک نشان می‌دهد که آزادشدن فسفر احتمالاً

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

جدول ۴. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد مدل‌های سینتیکی استفاده شده

شماره خاک	معادله مرتبه صفر		معادله مرتبه اول		معادله مرتبه دوم		معادله الوویچ ساده شده		معادله پخشیدگی پارابولیک		معادله تابع نمایی	
	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2
۱	۵۰/۹	۰/۸۳	۰/۱۱	۰/۹۸	۰/۰۰۶	۰/۲۳	۳۱/۰	۰/۹۳	۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۱۲	۰/۹۷
۲	۶۵/۸	۰/۸۲	۰/۱۳	۰/۹۷	۰/۰۰۴	۰/۲۷	۴۰/۰	۰/۹۳	۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۰۸	۰/۹۸
۳	۵۹/۹	۰/۸۵	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۰۰۶	۰/۲۵	۴۵/۹	۰/۹۱	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۹۸
۴	۴۳/۲	۰/۸۷	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۲۵	۴۱/۸	۰/۸۸	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۹۹
۵	۴۲/۱	۰/۹۰	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۰۱۷	۰/۲۱	۵۴/۳	۰/۸۴	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۹۸
۶	۳۰/۱	۰/۹۰	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۰۱۳	۰/۳۰	۳۸/۱	۰/۸۴	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۰۷	۰/۹۹
۷	۳۴/۹	۰/۸۸	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۰۲۷	۰/۱۷	۳۶/۵	۰/۸۷	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۱۵	۰/۹۷
۸	۴۲/۹	۰/۸۸	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۰۱۵	۰/۲۴	۴۴/۸	۰/۸۷	۰/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۹۹
۹	۳۳/۲	۰/۸۹	۰/۰۵۶	۰/۹۹	۰/۰۳۹	۰/۱۴	۳۹/۲	۰/۸۵	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۹۷
۱۰	۵۶/۰	۰/۸۵	/۰۸۳	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۲۴	۴۳/۲	۰/۹۱	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۰۹	۰/۹۸

جدول ۵ . ثابت‌های معادلات سینتیکی در خاک‌های مطالعه شده

شماره خاک	معادله مرتبه اول		معادله پخشیدگی پارابولیک		معادله تابع نمایی	
	a	$Kd\times10^{3}$	a	$R\times10^{2}$	Lna	b
۱	۵/۸۰	۱/۷	۰/۱۶۷	۲/۱۲	۳/۵۴	۰/۳۴
۲	۶/۰۹	۱/۶	۰/۱۷۱	۲/۰۸	۳/۸۸	۰/۳۳
۳	۶/۰۴	۱/۶	۰/۱۱۲	۲/۲۴	۳/۳۹	۰/۳۹
۴	۵/۸۵	۱/۶	۰/۰۷۳	۲/۳۰	۲/۹۰	۰/۴۲
۵	۵/۹۸	۱/۶	۰/۰۰۹	۲/۴۴	۲/۴۱	۰/۴۹
۶	۵/۶۵	۱/۷	۰/۰۲۹	۲/۴۰	۲/۴۱	۰/۴۴
۷	۵/۶۷	۱/۶	۰/۰۳۵۲	۲/۳۹	۲/۱۶	۰/۴۹
۸	۵/۸۴	۱/۶	۰/۰۳۵	۲/۴۱	۲/۴۸	۰/۴۷
۹	۵/۶۷	۱/۶	۰/۰۰۸	۲/۴۶	۱/۸۵	۰/۵۳
۱۰	۵/۹۸	۱/۷	۰/۱۰۲	۲/۲۹	۳/۱۹	۰/۴۰

یک فرایند پخشیدگی می‌باشد. دامنه تغییرات ضریب سرعت رهاسازی فسفر در معادله مرتبه اول بین $1/6\times10^{-3}$ تا $1/7\times10^{-3}$ برساعت می‌باشد. خاک‌های ۱، ۶ و ۱۰ دارای بیشترین ضریب سرعت رهاسازی هستند. ضریب سرعت رهاسازی معادله پخشیدگی پارابولیک از $2/08\times10^{-2}$ تا $2/46\times10^{-2}$ بر مجذور ساعت متغیر بود. خاک شماره ۹ بیشترین وخاک شماره ۲ کمترین ضریب سرعت را نشان می‌دهند. دامنه تغییرات ضریب سرعت معادله تابع نمایی بین ۰/۵۳ -۰/۳۳ برساعت می‌باشد که بیشترین مقدار در خاک شماره ۹ وکمترین در خاک شماره ۲ می‌باشد.

معادلات مرتبه صفر، مرتبه دوم و الوویچ ساده شده برای تفسیر داده‌های رهاسازی فسفر مناسب نبودند. از این رو برای استفاده از این معادلات برای توصیف رهاسازی فسفر، داده‌ها به دو بخش تقسیم شدند: بخش اول شامل فسفر آزاد شده تا ۱۶۸

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

جدول ۶. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد معادلات سینتیکی دوبخشی در خاک‌های استفاده شده

شماره خاک	بخش اول						بخش دوم					
	معادله مرتبه صفر		معادله مرتبه دوم		معادله الوویچ ساده شده		معادله مرتبه صفر		معادله مرتبه دوم		معادله الوویچ ساده شده	
	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2
۱	۲۴/۹	۰/۸۷	۰/۰۰۸	۰/۴۱	۷/۰	۰/۹۹	۱۴/۹	۰/۹۵	۰/۰۰۲	۰/۸۴	۵/۶	۰/۹۹
۲	۲۹/۴	۰/۹۰	۰/۰۰۴	۰/۵۰	۱۲/۷	۰/۹۸	۱۳/۳	۰/۹۷	۰/۰۰۱	۰/۸۹	۱۰/۸	۰/۹۸
۳	۲۱/۰	۰/۹۲	۰/۰۰۷	۰/۴۸	۱۲/۵	۰/۹۷	۱۹/۷	۰/۹۴	۰/۰۰۲	۰/۸۱	۶/۴	۰/۹۹
۴	۱۲/۸	۰/۹۴	۰/۰۱۱	۰/۴۴	۱۱/۵	۰/۹۵	۱۶/۴	۰/۹۴	۰/۰۰۴	۰/۸۰	۵/۵	۰/۹۹
۵	۱۰/۰	۰/۹۵	۰/۰۲۱	۰/۴۰	۱۱/۷	۰/۹۳	۱۹/۱	۰/۹۴	۰/۰۰۵	۰/۷۷	۵/۹	۰/۹۹
۶	۷/۶	۰/۹۴	۰/۰۱۴	۰/۵۵	۸/۷	۰/۹۳	۱۲/۸	۰/۹۵	۰/۰۰۶	۰/۷۹	۵/۶	۰/۹۹
۷	۸/۸	۰/۹۵	۰/۰۳۵	۰/۳۵	۱۰/۹	۰/۹۳	۱۱/۵	۰/۹۶	۰/۰۰۵	۰/۸۲	۶/۶	۰/۹۸
۸	۱۰/۲	۰/۹۵	۰/۰۱۷	۰/۴۷	۱۱/۶	۰/۹۳	۱۵/۴	۰/۹۵	۰/۰۰۴	۰/۷۹	۵/۸	۰/۹۹
۹	۸/۱	۰/۹۵	۰/۰۵۳	۰/۳۲	۹/۲	۰/۹۳	۱۵/۵	۰/۹۳	۰/۰۰۷	۰/۷۵	۷/۴	۰/۹۹
۱۰	۱۹/۶	۰/۹۲	۰/۰۰۹	۰/۴۷	۱۱/۶	۰/۹۷	۲۰/۰	۰/۹۳	۰/۰۰۳	۰/۸۱	۵/۱	۰/۹۹

جدول۷. ثابت‌های معادلات سینتیکی دو بخشی در خاک‌های مطالعه شده

شماره خاک	بخش اول				بخش دوم			
	معادله مرتبه صفر		معادله الویچ ساده شده		معادله مرتبه صفر		معادله الویچ ساده شده	
	K_d	a	b	a	K_d	a	b	a
۱	۰/۹۵۹	۳۶۸	۰/۰۲۳	۲۷	۰/۱۲۵	۲۰۷	۰/۰۰۹	۴/۷
۲	۱/۳۴۱	۴۹۴	۰/۰۱۹	۴۰	۰/۱۲۰	۲۸۶	۰/۰۰۶	۴/۴
۳	۱/۰۶۱	۴۶۰	۰/۰۲۳	۲۹	۰/۱۶۰	۲۶۶	۰/۰۰۷	۳/۱
۴	۰/۷۷۰	۳۶۹	۰/۰۲۶	۱۸	۰/۱۳۸	۲۲۹	۰/۰۰۸	۳/۲
۵	۰/۶۴۱	۳۵۹	۰/۰۳۱	۱۳	۰/۱۴۲	۲۳۵	۰/۰۰۸	۲/۲
۶	۰/۴۷۹	۲۷۷	۰/۰۴۵	۱۱	۰/۰۹۹	۱۶۵	۰/۰۱۲	۱/۶
۷	۰/۵۹۲	۳۰۵	۰/۰۳۵	۱۱	۰/۱۰۵	۱۷۶	۰/۰۱۱	۱/۹
۸	۰/۶۴۸	۳۵۹	۰/۰۲۹	۱۲	۰/۱۳۲	۲۱۹	۰/۰۰۸	۲/۰
۹	۰/۵۲۲	۲۹۹	۰/۰۴۵	۸	۰/۱۱۷	۱۹۳	۰/۰۰۹	۱/۳
۱۰	۰/۹۸۳	۴۲۷	۰/۰۲۶	۲۳	۰/۱۵۲	۲۴۷	۰/۰۰۶	۲/۵

ساعت پس از شروع آزمایش و بخش دوم ۱۶۸ تا ۱۷۵۲ ساعت پس از شروع آزمایش را شامل می‌شوند. ضرایب تشخیص وخطای استاندارد برآورد این معادلات در دو بخش در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که معادلات مرتبه صفر والوویچ در بخش اول و بخش دوم می‌توانند برای توصیف آزاد شدن فسفر استفاده شوند. ضرایب این معادلات در جدول ۷ نشان داده شده است. دربخش اول (تا ۱۶۸ساعت پس از شروع آزمایش)، ثابت سرعت رهاسازی معادله مرتبه صفر از ۰/۴۷ تا۱/۳۴ برساعت متغیر می‌باشد. کمترین مقدار آن در خاک شماره ۶ وبیشترین مقدارآن در خاک شماره ۲ می‌باشد (جدول ۷). در بخش دوم، ثابت سرعت رهاسازی از ۰/۰۹ تا ۰/۱۶ بر ساعت متغیر می‌باشد که نشان می‌دهد سرعت رهاسازی در بخش دوم

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

نسبت به بخش اول کمتر می‌باشد. در این بخش کمترین و بیشترین ثابت سرعت به ترتیب در خاک شماره ۶ وشماره ۳ وجود دارد. در بخش اول، ثابت سرعت در معادله الوویچ از ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۴۵ متغیر می‌باشد. کمترین مقدار آن درخاک شماره ۲ و بیشترین مقدار آن در خاک‌های شماره ۹ و۶ می‌باشد (جدول ۷). در بخش دوم، ثابت سرعت در معادله الوویچ از ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۱۲ متغیر می‌باشد. در این بخش کمترین ثابت سرعت در خاک‌های شماره ۲ و ۱۰ وبیشترین مقدار آن در خاک شماره ۶ وجود دارد.

ضرایب هم‌بستگی بین ثابت‌های معادلات سینتیکی و ویژگی‌های خاک در جدول ۸ نشان داده شده است. بین اجزای معادلات مربوط به آزاد شدن فسفر با درصد رس هم‌بستگی معنی‌داری و جود نداشت(جدول۸). علت این امر ممکن است تفاوت در نوع کانی‌های کنترل کننده حلالیت فسفر در این خاک‌ها باشد. دالال در مطالعه خود دریافت که ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی مؤثر برتثبیت فسفر مانند درصد سلیت، رس و مقدار ماده آلی هم‌بستگی معنی‌داری با مقدار فسفر آزاد شده خاک‌ها نداشت (۴). هم‌بستگی معنی‌داری بین درصد سیلت خاک‌های مورد مطالعه و ثابت سرعت معادله الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی مشاهده شد. هم‌بستگی معنی‌داری بین درصد شن و شیب معادله مرتبه صفر در بخش اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی وعرض از مبدأ معادلات تابع نمایی وپخشیدگی پارابولیک وجود داشت. pH این خاک‌ها با شیب وعرض از مبدأ معادلات پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. بین قابلیت هدایت الکتریکی و ضرایب معادلات آزاد سازی فسفررابطه معنی‌داری وجود نداشت. بین گنجایش تبادل کاتیونی وثابت سرعت رهاسازی معادله مرتبه اول رابطه معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۸). درصد ماده آلی با هیچ کدام از ثابت‌های معادلات رهاسازی فسفر هم‌بستگی معنی‌دار پنداشت. این نتایج اثرکم ماده آلی را در تامین فسفر قابل جذب بیان می‌کند. مقدار کربنات کلسیم معادل هم‌بستگی معنی‌داری با عرض از مبدأ معادلات پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی وشیب معادلات مرتبه اول و تابع نمایی دارد (جدول ۸). شارپلی گزارش نمود که هم‌بستگی معنی‌داری بین مقدار کربنات کلسیم با ثابت‌های رهاسازی معادلات سینتیکی وجود دارد (۲۳) وی هم‌چنین بیان داشت که مقادیر کربنات کلسیم، کربن آلی و رس خاک شاخصی از سطح ویژه واکنش پذیر با فسفر می‌باشد. گارسیا واستورز گزارش کردند که شیب معادله مرتبه اول هم‌بستگی معنی‌داری با هیچ کدام از ویژگی‌های خاک نداشت (۸). در تحقیق حاضر نیز شیب معادله مرتبه اول فقط با گنجایش تبادل کاتیونی ودرصد کربنات کلسیم معادل هم‌بستگی معنی‌داری داشت (جدول ۸). مقدار فسفر قابل استفاده اولیه با شیب معادلات تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، مرتبه صفر در بخش اول رهاسازی و عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفردر هر دو بخش اول و دوم و ثابت‌های معادله الوویچ ساده و مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری دارد (جدول ۸).

نتایج کشت گلدانی در جدول ۹ نشان داده شده است. در تیمار شاهد عملکرد خشک اندام هوایی ذرت در بین خاک‌های مورد مطالعه از ۱۵ تا ۲۴ گرم در گلدان و در تیمار کود داده شده از ۲۳ تا ۳۱ گرم در گلدان تغییر می‌کند. در تمامی خاک‌ها عملکرد خشک بخش هوایی در تیمار کود داده شده نسبت به تیمار شاهد بیشتر می‌باشد. تأثیر کوددهی فسفر بر افزایش عملکرد به عوامل گوناگونی از جمله مقدار فسفر قابل استفاده برای گیاه بستگی دارد. دامنه تغییرات غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه ذرت در تیمار شاهد در خاک‌های مختلف بین ۶۳۰ تا ۱۷۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ودر تیمار کود داده شده بین ۷۳۶ تا ۱۸۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد. فسفر جذب شده توسط گیاه ذرت در تیمار شاهد از ۹ تا ۴۱ میلی‌گرم در گلدان و تیمار کود داده شده از ۱۲ تا ۵۱ میلی‌گرم در گلدان متغیر می‌باشد (جدول ۹).

ضرایب هم‌بستگی بین ویژگی‌های آزاد شدن فسفر و برخی شاخص‌های گیاهی در جدول ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی ارتباط بین ثابت‌های معادلات آزاد شدن فسفر و شاخص‌های گیاهی می‌توان به اثر رهاسازی فسفر در رشد گیاه پی‌برد. عملکرد خشک اندام هوایی با عرض از مبدا معادلات مرتبه اول،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۸. ضرایب هم‌بستگی بین ثابت‌های معادلات سینتیکی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده

ویژگی‌های خاک	معادله مرتبه اول		پخشیدگی پارا بولیکی		معادله تابع نمایی		معادله مرتبه صفر		معادله الوویچ ساده شده		فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت	فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت
	بخش اول											
	a	b	a	R	a	b	a	b	a	b		
رس	−۰/۴۳^{ns}	−۰/۳۶^{ns}	−۰/۵۶^{ns}	۰/۴۹^{ns}	−۰/۵۹^{ns}	۰/۵۸^{ns}	−۰/۵۶^{ns}	−۰/۶۲^{ns}	−۰/۱۷^{ns}	−۰/۵۸^{ns}	−۰/۵۷^{ns}	−۰/۵۳^{ns}
	−۰/۴۳^{ns}	−۰/۵۴^{ns}	−۰/۷۰*	۰/۶۲^{ns}	−۰/۶۸*	−۰/۶۶*	−۰/۵۹^{ns}	−۰/۷۱*	−۰/۳۰^{ns}	−۰/۶۹*	−۰/۶۷*	−۰/۵۸^{ns}
شن	۰/۴۵^{ns}	۰/۵۸^{ns}	−۰/۷۶**	−۰/۶۹*	−۰/۷۶*	−۰/۷۷*	۰/۶۰^{ns}	۰/۷۳*	۰/۳۹^{ns}	−۰/۷۰*	۰/۶۹*	−۰/۶۰^{ns}
پ-هاش	−۰/۱۶^{ns}	−۰/۵۹^{ns}	−۰/۷۷**	۰/۷۲*	−۰/۶۷*	۰/۷۳*	۰/۳۴^{ns}	−۰/۵۶^{ns}	−۰/۵۰^{ns}	−۰/۵۵^{ns}	−۰/۶۷^{ns}	−۰/۳۸^{ns}
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۴۵^{ns}	−۰/۰۹^{ns}	−۰/۱۰^{ns}	۰/۱۴^{ns}	۰/۲۳^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۰/۳۴^{ns}	۰/۱۱^{ns}	۰/۳۶^{ns}	۰/۱۶^{ns}	۰/۶۰^{ns}	۰/۶۰^{ns}
	−۰/۰۸^{ns}	−۰/۷۴*	−۰/۵۰^{ns}	۰/۴۴^{ns}	−۰/۴۳^{ns}	۰/۴۷^{ns}	۰/۳۴^{ns}	۰/۴۵^{ns}	−۰/۱۰^{ns}	−۰/۴۰^{ns}	−۰/۵۳^{ns}	−۰/۲۴^{ns}
ماده آلی	۰/۳۸^{ns}	−۰/۳۷^{ns}	۰/۰۹^{ns}	−۰/۱۸^{ns}	۰/۱۷^{ns}	−۰/۱۱^{ns}	−۰/۲۰^{ns}	−۰/۰۳^{ns}	۰/۲۷^{ns}	۰/۱۷^{ns}	−۰/۳۷^{ns}	۰/۲۹^{ns}
کلسیم معادل	−۰/۲۹^{ns}	−۰/۶۵*	−۰/۶۸*	۰/۶۳^{ns}	−۰/۶۷*	۰/۷۲*	−۰/۴۰^{ns}	−۰/۵۴^{ns}	−۰/۴۳^{ns}	−۰/۵۴^{ns}	۰/۱۸^{ns}	−۰/۴۴^{ns}
	۰/۹۰**	−۰/۰۳^{ns}	۰/۸۱**	−۰/۷۹**	−۰/۸۷*	−۰/۷۵*	−۰/۹۵**	−۰/۸۹**	−۰/۴۱^{ns}	۰/۹۵**	۰/۹۴**	۰/۹۷**

جدول ۹. شاخص‌های های گیاه ذرت در خاک‌های مطالعه شده*

شماره خاک	عملکرد خشک ($g\ pot^{-1}$)		غلظت فسفر در اندام هوایی ($mg\ kg^{-1}$)		فسفر جذب‌شده ($mg\ pot^{-1}$)	
	کود داده شده	شاهد	کود داده شده	شاهد	کود داده شده	شاهد
1	۳۱^{b}	۲۱^{a}	۱۴۲۰^{a}	۹۷۳^{b}	۴۴^{b}	۱۹^{a}
۲	۲۸^{a}	۲۴^{a}	۱۸۳۵^{a}	۱۷۱۲^{a}	۵۰^{a}	۴۱^{a}
۳	۳۰^{b}	۲۲^{a}	۱۸۳۵^{b}	۱۳۶۳^{a}	۵۱^{b}	۳۰^{a}
۴	۲۶^{b}	۱۸^{a}	۱۲۹۶^{b}	۸۰۹^{a}	۳۳^{b}	۱۴^{a}
5	۲۶^{b}	۱۹^{a}	۱۳۷۸^{b}	۹۴۸^{a}	۳۶^{b}	۱۶^{a}
6	۲۳^{b}	۱۵^{a}	۷۶۳^{a}	۶۳۰^{a}	۱۲^{a}	۹^{a}
7	۲۷^{b}	۱۶^{a}	۱۱۹۹^{b}	۷۵۸^{a}	۳۴^{b}	۱۱^{a}
8	۲۵^{b}	۱۷^{a}	۱۲۰۴^{b}	۷۶۸^{a}	۳۲^{b}	۱۲^{a}
9	۲۸^{b}	۱۶^{a}	۹۶۶^{b}	۷۰۷^{a}	۲۷^{b}	۱۱^{a}
10	۲۸^{b}	۲۲^{a}	۱۷۶۳^{b}	۱۲۵۰^{a}	۵۱^{b}	۳۱^{a}

* : در مورد هر شاخص حروف مشابه نشان دهنده معنی دارنبودن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۱۰. ضرایب هم بستگی بین شاخص‌های گیاهی و ضرایب سرعت معادلات سینتیکی در خاک‌های مطالعه شده

شاخص‌های گیاهی	معادله پخشیدگی								بخش اول				بخش دوم				فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت	فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت
	معادله مرتبه اول		پارابولیکی		معادله تا بع نمایی		معادله مرتبه صفر		معادله الوویچ		معادله مرتبه صفر		معادله الوویچ					
	K_d	a	R	a	b	a	K_d	a	b	a	K_d	a	b	a				
عملکرد خشک	۰/۰۶^{ns}	۰/۸۸**	−۰/۸۱**	۰/۸۳**	−۰/۷۹**	۰/۹۰**	۰/۹۶**	۰/۹۶**	−۰/۸۷**	۰/۸۴**	۰/۶۹*	۰/۸۹**	−۰/۸۴**	۰/۷۶*			۰/۹۷**	۰/۹۵**
غلظت فسفر	−۰/۰۸^{ns}	۰/۸۸**	−۰/۷۶**	۰/۷۶**	−۰/۷۲**	۰/۸۴**	۰/۹۵**	۰/۹۵**	−۰/۷۶**	۰/۸۵**	۰/۵۳^{ns}	۰/۸۹**	−۰/۷۸**	۰/۶۶*			۰/۹۶**	۰/۹۵**
	۰/۵۴^{ns}	۰/۸۵**	−۰/۷۵**	۰/۷۷**	−۰/۷۴**	۰/۸۴**	−۰/۰۱^{ns}	−۰/۰۸^{ns}	۰/۲۸^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۰/۳۵^{ns}	۰/۱۶^{ns}	۰/۳۳^{ns}	۰/۰۶^{ns}			۰/۹۵**	۰/۰۳^{ns}
	−۰/۰۸^{ns}	۰/۹۲**	−۰/۶۵**	۰/۶۶**	−۰/۷۲**	۰/۸۳**	۰/۸۳**	۰/۸۹**	۰/۷۹**	۰/۷۶**	۰/۶۵*	۰/۸۸**	۰/۷۹**	۰/۶۰^{ns}			۰/۹۲**	۰/۸۳**
	−۰/۰۵^{ns}	−۰/۸۳**	−۰/۴۸^{ns}	−۰/۴۷^{ns}	۰/۵۹^{ns}	−۰/۶۷**	−۰/۶۸**	−۰/۷۸**	۰/۶۰^{ns}	−۰/۶۷*	۰/۴۹^{ns}	−۰/۷۹**	−۰/۶۸**	−۰/۴۱^{ns}			−۰/۷۸**	−۰/۶۹**

پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، هم‌بستگی معنی‌داری داشت. این شاخص با ضریب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و معادله مرتبه صفر در بخش اول و دوم رهاسازی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. هم‌چنین این شاخص با عرض از مبدا معادلات مرتبه صفر و الوویچ ساده شده در بخش‌های اول و دوم رهاسازی و فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری داشت. غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه ذرت با عرض از مبدا معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفر و الوویچ ساده شده در هر دو بخش رهاسازی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. این شاخص با ضریب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، معادله فسفر در بخش اول و معادله الوویچ ساده شده در بخش اول و دوم رهاسازی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. هم‌چنین این شاخص با فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری داشت. فسفر جذب شده با عرض از مبدا معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. این شاخص هم چنین با ضرایب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری داشت. عملکرد نسبی با عرض از مبدا معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی مرتبه صفر در بخش اول و دوم رهاسازی و معادله الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. این شاخص با شیب معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری داشت. پاسخ گیاه به کود با عرض از مبدا معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفر در هر دو بخش رهاسازی و الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی و ضریب سرعت معادله الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. هم‌چنین این شاخص با فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری داشت. در مواردی که هم‌بستگی معنی‌داری بین شاخص‌های گیاهی و ضرایب معادلات آزاد سازی فسفر می‌باشد بیانگر نقش سینتیک آزاد شدن فسفر در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌باشد. تور و باهل در مطالعه خود دریافتند که رابطه معنی‌داری بین شیب معادله الوویچ و مقدار جذب فسفر توسط گیاه سویا وجود دارد که نشان می‌دهد سرعت رهاسازی فسفر پارامتر مفیدی در پیش بینی مقدار فسفر قابل استفاده گیاه می‌باشد (۲۷).

نتیجه‌گیری

مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت عصاره‌گیری متوالی یا بی کربنات سدیم در خاک‌های مختلف متفاوت است. معادلات سینتیکی مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کردند. معادلات مرتبه صفر والوویچ ساده شده دو قسمتی نیز آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کردند. ضرایب معادلات آزاد شدن فسفر با برخی ویژگی‌های خاک نظیر درصد سلیت، شن، کربنات کلسیم، pH و مقدار فسفر قابل استفاده و نیز با برخی شاخص‌های گیاهی مانند عملکرد ماده خشک اندام هوایی، غلظت فسفر در اندام هوایی ذرت، عملکرد نسبی و پاسخ گیاه به کود هم‌بستگی معنی‌داری دارند. هم‌بستگی معنی‌داری که بین شاخص‌های گیاهی با مقادیر فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و۱۷۵۲ ساعت وجود دارد، می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که عملکرد گیاه با افزایش فسفر رها شده در دوره رشد افزایش می‌یابد که این رابطه مثبت تا حدودی می‌تواند به سرعت رها شدن فسفر به محلول خاک مربوط باشد. در پایان پیشنهاد می‌شود در مطالعات آزمون خاک فسفر سرعت آزاد سازی فسفر به محلول خاک نیز در نظر گرفته شود.

منابع مورد استفاده

1. Amer, F.D., R. Boulden, C.A. Black and F.R. Duke. 1955. Characterization of soil phosphorus by anion-exchange resin adsorption and ^{32}P-equilibration. Plant Soil 6:391-408.
2. Barrow, N.J. 1979. The effects of temperature on the reactions between inorganic phosphate and soil. J. Soil Sci. 30: 271-279.
3. Cooke, I.J. and J. Hislop. 1963. Use of anion-exchange resin for the assessment of available soil phosphate. Soil Sci. 96: 308-312.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]

4. Dalal, R.C. 1974. Desorption of soil phosphate by anion exchange resin. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 5: 531-538.
5. Elkhatib, E.A. and J.L. Hern. 1988. Kinetics of phosphorus desorption from appalachian soils. Soil Sci. 145: 222-229.
6. Evans, R.L. and J.J. Jurinak. 1976. Kinetics of phosphate release from a desert soil. Soil Sci. 121: 205-211.
7. Freese, D.R. Lookman, R. Merckx and W.H. Van Riemsdijk. 1995. New method for assessment of long-term phosphate desorption from soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 59: 1295-1300.
8. Garcia, R.I., and F. Gilsotres. 1997. Prediction of parameters describing phosphorus-desorption kinetics in soils of Galicia. J. Environ. Qual. 26: 1363-1369.
9. Gee,G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Physical and Mineralogical Methods. SSSA. Madison, WI.
10. Hansen, J.C. and D.G. Strawn. 2003. Kinetics of phosphorus release from manure-amended alkaline soils. Soil Sci. 168: 869-879.
11. Havlin, J.L. and D.G. Westfall. 1985. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49: 366-370.
12. Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soil. Soil Biol. Biochem. 24: 389-395.
13. Jardine, P.M. and D.L. Sparks. 1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system. I: Kinetics. Soil Sci. Soc. Amer. J. 47: 39-45.
14. Kalra, Y.P. 1997. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. Soil and Plant Analysis Council Inc. Athens, Georgia.
15. Kuo, S. and E.G. Lotse. 1972. Kinetics of phosphate adsorption by calcium carbonate and Ca-kaolinite. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36: 725-729.
16. Lookman, R. D., F. R. Merckxer and H. Van Riemsdijk. 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. Environ. Sci. Technol. 29: 1569-1575.
17. Loeppert, R.H. and D.L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. *In*: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
18. Mcdowell, R.W. and A.N. Sharpley. 2003. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. Geoderma 112: 143-154.
19. Murphy, J. and J.P. Riley. 1952. A modified single solution method for determination of phosphate uptake by rye. Soil Sci. Soc. Amer. J. 48: 31-36.
20. Olsen, S.R., C.N. Cole, F.S. Watanabe and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939. U. S. Government printing office, Washington, DC.
21. Olsen, S.R. and F.E. Khasawneh. 1980. Use and limitations of physical -chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. ASA. Madison, WI.
22. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *In*: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
23. Sharpley, A.N. 1983. Effect of soil properties on the kinetics of phosphorus desorption. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 462-469.
24. Sharpley, A.N., L. R. Ahuja and R.G. Menzel. 1981. The release of soil phosphorus to runoff in relation to the kinetics of desorption J. Environ. Qual. 10: 386-391.
25. Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *In*: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
26. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: D.L. Sparks (ed.), Methods of Soil Analysis. part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
27. Toor, G.S. and G.S. Bahl. 1999. Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. Biores. Technol. 69: 117-121.
28. Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.41.0]