

تأثیر اسید سالیسیک بر ویژگی‌های جذب فسفر در خاک آهکی

ابراهیم سپهر^{۱*}، رقیه موسوی^۲

۱. دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۷/۸)

چکیده

اسید سالیسیک یکی از اسیدهای آلی مهم در ریزوسفر گیاهان است که در شرایط کمبود فسفر از ریشه‌های گیاهی ترشح می‌شود. به منظور بررسی رفتار جذبی فسفر در حضور اسید سالیسیک، آزمایشی در چهار غلظت اسید سالیسیک ۰ و ۲ و ۵ و ۱۰ میلی‌مول در لیتر به صورت دسته‌ای با غلظت‌های فسفر (۰ تا ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر) در خاکی آهکی انجام گرفت. نتایج نشان داد حضور اسید سالیسیک به کاهش جذب فسفر بر کلونیدهای خاک به سبب رقابت بر سر مکان‌های جذب منجر گردید؛ طوری که با افزایش غلظت اسید سالیسیک حداکثر جذب فسفر (q_{max}) از ۳۲۶ به ۲۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. همچنین مصرف اسید سالیسیک منجر به کاهش پارامترهای شدت جذب لانگمویر (K_L) از ۰/۲۰ به ۰/۱۴ لیتر بر میلی‌گرم، ظرفیت جذب فروندلیچ (K_F) از ۵۹ به ۴۶ لیتر بر کیلوگرم، شیب معادله تمکین (K_T) از ۶۲ به ۴۶، و عرض از مبدأ معادله تمکین از ۵۹ به ۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد. با افزایش غلظت اسید سالیسیک نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی‌گرم فسفر در لیتر توسط هر سه معادله به طور معناداری ($P < 0/01$) کاهش یافت؛ طوری که نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده با معادله فروندلیچ از ۳۱/۵ به ۲۴/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم تنزل پیدا کرد. در نتیجه می‌توان گفت کاربرد اسید سالیسیک یا اصلاح ژنتیکی گیاهان برای ترشح بیشتر این اسید می‌تواند باعث افزایش قابلیت دسترسی فسفر شود و نیاز به مصرف کود را کاهش دهد.

کلیدواژگان: اسید سالیسیک، اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین، فسفر، کمبود فسفر، هم‌دماهای جذب فسفر.

مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری برای تغذیه گیاهی است؛ که پس از نیتروژن بیشترین مصرف را در دنیا دارد. هرچند مقدار فسفر کل در لیتوسفر زیاد است، پایین بودن فراهمی آن اصلی‌ترین عامل محدودکننده محصولات کشاورزی است (Paul 2007). استفاده از کودهای شیمیایی یکی از روش‌های بسیار رایج مقابله با کمبود عناصر غذایی، نظیر فسفر است. اما فسفر به دلیل شیمی پیچیده‌ای که دارد در خاک‌های آهکی و قلیایی (به سبب Ca^{2+} و خاک‌های اسیدی (به سبب Fe^{3+} و Al^{3+}) به سختی جذب می‌شود؛ طوری که کارایی کودهای شیمیایی فسفوری در اغلب خاک‌ها در سال اول تقریباً ۱۰ تا ۲۵ درصد است (Khan et al, 2009; Sepehr et al., 2009). به عبارت دیگر، کمتر از ۲۰ درصد کودهای فسفات مصرفی جذب گیاه و بقیه در اثر واکنش با کاتیون‌های فلزی موجود در خاک انباشته و تثبیت می‌شود (Grotz and Guerinot, 2002). به طوری که تخمین زده می‌شود مصرف این کودها در سال ۲۰۴۰ به ۶۰

میلیون تن برسد. از طرفی منابع سنگ فسفات طی ۶۰ تا ۸۰ سال آینده به پایان می‌رسد (Vance et al, 2003) همچنین بالابودن انرژی لازم برای تولید کودهای شیمیایی (بالغ بر ۴ بلیون دلار برای نیاز سالانه کود فسفات) و مخاطرات زیست‌محیطی نیاز به جایگزینی مناسب راه، که به کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفات منجر شود، ایجاب می‌کند. استفاده از پتانسیل ژنتیکی گیاهان برای حصول بالاترین عملکرد و کارایی بهره‌وری از خاک و نیز استفاده از ریزوموجودات همزیست و همیار برای افزایش رشد و جذب عناصر غذایی از راهکارهای مهم جایگزین است که در جهت حفظ محیط زیست و صرفه اقتصادی توصیه می‌شود. استفاده از کودهای آلی، که قادرند تحرک فسفر تجمع‌یافته را در خاک افزایش دهند، نیز به منظور افزایش کارایی استفاده از فسفر پیشنهاد شده است (Toor and Bahl, 1997).

گیاهان می‌توانند با استفاده از استراتژی‌های مختلف بر کمبود فسفر فائق آیند که تشکیل همزیستی میکوریزی، اسیدی‌کردن ریزوسفر (مؤثر در رهاسازی عناصر غذایی از کانی‌های معدنی)، ترشح فسفات‌ها و اسیدهای آلی از مهم‌ترین

* نویسنده مسئول: e.sepehr@urmia.ac.ir

می‌کنند و بسته به تعداد گروه‌های کربوکسیل اسیدهای آلی شامل بارهای منفی متفاوت‌اند؛ به همین دلیل قادرند با کاتیون‌های فلزی محلول تشکیل کمپلکس دهند یا جایگزین آنیون‌ها در خاک شوند. مولکول‌های اسید آلی با تغییر بار سطحی سطوح خاک بر جذب سطحی عناصر مؤثرند و سبب مسدود شدن مکان‌های سطحی و کاهش تثبیت فسفر می‌شوند (Simeoni *et al*, 2003). در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر اسید سالیسیلیک بر رفتار جذب فسفر به وسیله ذرات خاک در شرایط آهکی، غلظت‌های مختلف اسید سالیسیلیک بر روند جذب فسفر در یک خاک آهکی در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

محلول اسید آلی حاوی غلظت‌های ۲ و ۵ و ۱۰ میلی‌مول اسید سالیسیلیک (مرک آلمان) با محلول زمینه ۰/۰۱ مولار CaCl_2 برای آزمایش‌های هم‌دمای جذب تهیه شد. آزمایش به صورت دسته‌ای با هشت سطح فسفر ۰، ۳، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰ و ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر از منبع (KH_2PO_4) انجام شد. بدین صورت که ۲/۵ گرم نمونه خاک داخل لوله سانتریفیوژ ریخته و به هر یک از لوله‌ها ۲۵ میلی‌لیتر محلول اسید سالیسیلیک حاوی سری غلظتی معین افزوده شد. پس از ۲۴ ساعت تعادل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، با سانتریفیوژ ۳۰۰۰ دور در دقیقه، به مدت ۵ دقیقه، فاز محلول از فاز جامد جدا گردید و مقدار فسفر با روش رنگ‌سنجی مولیبدات آمونیوم با دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۸۸۰ نانومتر قرائت شد (Olsen *et al*, 1954). تفاوت غلظت فسفر در محلول‌های اولیه و تعادلی به‌منزله مقدار فسفر جذب‌شده در نظر گرفته شد. برای تعیین ویژگی‌های جذب فسفر سه معادله فروندلیچ و لانگمویر و تمکین به کار رفت:

معادله لانگمویر

$$q_e = (K_L C_e q_{\max}) / (1 + K_L C_e)$$

q_e : غلظت فسفر محلول تعادلی (mg/L)؛ q_{\max} : مقدار فسفر

جذب‌شده بر واحد وزن خاک (mg/kg)؛ K_L : ضریب لانگمویر و نشانگر انرژی پیوند، q_{\max} : حداکثر جذب تک‌لایه‌ای (mg/kg) (Xu and Ji, 2003).

معادله فروندلیچ

$$q_e = K_f C_e^{1/n}$$

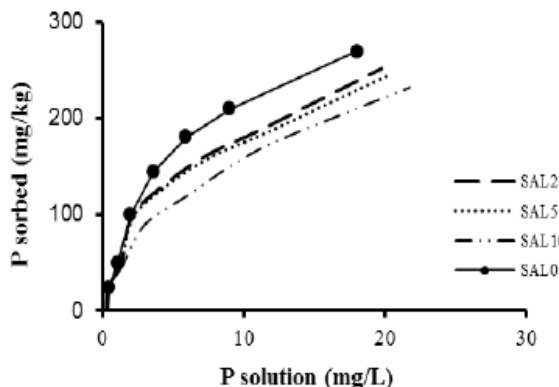
q_e : میزان ماده جذب‌شده در فاز جامد (mg/kg)؛ C_e :

غلظت تعادلی ماده جذب‌شونده در محلول (mg/L)؛ K_f و n : ضرایب معادله فروندلیچ که به ترتیب نمایانگر ظرفیت و شدت جذب‌اند (Xu and Ji, 2003).

$$q_e = A + K_T \ln C_e$$

معادله تمکین

آن‌ها می‌باشد (Dinkelaker *et al*, 1989; Ryan *et al*, 2001; Raghothama and Karthikeyan, 2005). مطالعات اخیر نشان داده است تراوش آنیون‌ها و اسیدهای آلی مکانیسم مهمی در جذب فسفر از خاک است (Jones *et al*, 2003; Strom *et al*, 2005). نخستین گزارش در زمینه افزایش حلالیت فسفر کم‌محلول و جذب فسفر در نتیجه اسیدهای آلی تراویده از ریشه گیاهان را Gardner *et al* (1982) ارائه کردند و دریافتند سیترات ترشح‌شده از ریشه گیاه *Lupinus albus* در آزادسازی فسفر از منابع نامحلول خاک و افزایش جذب فسفر مؤثر است. این اسیدها که شامل اسید سالیسیلیک، مالیک، سیتریک، فوماریک، اگزالیک، و غیره است به‌وسیله ریشه گیاهان، ریزموجودات خاک، یا طی تجزیه مواد آلی خاک تولید می‌شود. اسید سالیسیلیک یا اورتو هیدروکسی بنزوئیک اسید (SA) یکی از اسیدهای آلی با جرم مولکولی کم^۱ است که به گروهی از ترکیبات فنلی تعلق دارد (El-Taybe, 2005). این ماده به‌وسیله سلول‌های ریشه تولید می‌شود و همچون ماده‌ای شبه‌هورمونی نقشی مهم در تنظیم رشد و نمو گیاهان دارد (Kang and Wang, 2003). این اسید آلی نقشی محوری در تنظیم فرایندهای فیزیولوژیکی- نظیر جوانه‌زنی بذر، بسته‌شدن روزنه‌ها، مهار سنتز اتیلن گیاه، افزایش میزان فتوسنتز و محتوی کلروفیل، تولید میوه- ایفا می‌کند (El-Taybe, 2005; Popova *et al*, 2003). از طرفی اسیدهای آلی با جرم مولکولی کم در شرایط محدودیت عناصر غذایی، مانند کمبود فسفر، به ریزوسفر ترشح می‌شوند. مقادیر زیادی اسید سالیسیلیک در نمونه‌های خاک برداشت‌شده از ریزوسفر لوبیا و ذرت گزارش شده است (Raskin, 1992). غلظت اسیدهای آلی در خاک ریزوسفر یا محلول خاک بین ۰/۰۱ تا ۸۰ میکرومولار متغیر است (Strom *et al*, 2005). نوع و مقدار اسیدهای آلی به منبع کربن و گونه ریزموجودات خاک بستگی دارد. ماهیت اسیدهای آلی مترشحه نسبت به کمیت اسیدها اهمیت بیشتری دارد (Sperber, 1985). اسیدهای آلی با جرم مولکولی کم (LMWOAs) نقشی محوری در فرایندهای مختلف- شامل سهولت جذب عناصر غذایی، سمیت‌زدایی فلزی، هوازدگی مینرالی، جذب بیمارگرها- دارند (Hue *et al*, 1986; Bolan *et al*, 1994). اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم می‌توانند خصوصیات شیمیایی سطح کلونیدهای خاک‌های با بار متغیر را تغییر دهند و بر جذب سطحی K^+ و NO_3^- و Cl^- در این خاک‌ها مؤثر واقع شوند (Xu *et al*, 2003; Xu *et al*, 2004). این اسیدها گروه کربوکسیل و هیدروکسیل زیادی دارند. گروه کربوکسیل اسیدهای آلی بار منفی ایجاد



شکل ۱. تاثیر اسید سالیسیلیک بر مقدار جذب فسفر

در خاک‌های آهکی جذب فسفر عمدتاً تحت تأثیر کربنات کلسیم است؛ اما اسیدهای آلی در نتیجه رقابت بر سر سایت‌های جذبی در خاک بر واکنش‌های رسوب و جذب فسفوری تأثیر می‌گذارند و فراهمی فسفر را افزایش می‌دهند. افزایش قابلیت استفاده فسفر به سبب اثر مطلوب اسیدهای آلی در افزایش حلالیت فسفر از سنگ فسفات در نتیجه کاربرد اسیدهای آلی (سیتریک، اگزالیک، EDTA) در خاک گزارش شد (Marschner Xu et al et al., 1995) (2003) افزایش مقدار فسفر قابل استفاده با رزین و فراهمی فسفر در نتیجه آنیون‌ها و اسیدهای آلی مترشحه از ریشه گیاهان در خاک لومی شنی را گزارش کردند. Moradi et al (2011) کاهش پتانسیل جذب فسفر را در سه نوع خاک آهکی از ردهٔ اینسپتی‌سول‌ها، در حضور اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم، گزارش دادند. Hue et al (2008) گزارش کردند مصرف هیومیک اسید حلالیت فسفر را بیش از ۷۰ درصد افزایش می‌دهد که بیانگر کاهش جذب فسفر به وسیلهٔ خاک در حضور اسید هیومیک است.

تأثیر اسید سالیسیلیک بر ضرایب معادلات جذب و نیاز استاندارد فسفر

معادلهٔ جذب لانگمویر

نخستین بار Olsen and Watanabe (1957) معادلهٔ لانگمویر را برای توضیح جذب فسفات در خاک به کار برد. این معادله با فرض ثابت بودن انرژی پیوند، بدون توجه به مقدار فسفر جذب شده، ارائه شد. مزیت اصلی معادلهٔ لانگمویر این است که می‌توان حداکثر جذب فسفر را به وسیلهٔ آن تخمین زد. پارامترهای معادلهٔ جذب لانگمویر، که نشان‌دهندهٔ ویژگی‌های جذب فسفر در خاک مطالعه شده است، در جدول ۲ می‌آید. مقدار ضریب تبیین (R^2) معادله نشان داد این مدل می‌تواند ارتباط بین مقدار فسفر جذب سطحی شده با غلظت تعادلی

Ce و qe: مشابه رابطهٔ فوق، K_T و A: ضرایب معادلهٔ تمکین که به ترتیب شیب و عرض از مبدأ معادله‌اند (Xu and Li, 2004).

با استفاده از هم‌دماهای جذب، شماری از شاخص‌های جذب سطحی و بافوری فسفر خاک به صورت زیر محاسبه گردید: ظرفیت بافوری حداکثر^۱ که از حاصل ضرب شدت و حداکثر مقدار جذب محاسبه شد عبارت است از شیب حداکثر معادلهٔ لانگمویر (Holford, 1979):

$$MBC_L = K_L * q_{max}$$

ظرفیت بافوری استاندارد^۲: شیب هم‌دماهای جذب در غلظت ۰/۳ میلی‌گرم فسفر در لیتر (Holford, 1979).

نیاز استاندارد فسفر^۳: مقدار فسفر جذب شده به وسیلهٔ خاک در غلظت ۰/۳ میلی‌گرم فسفر در لیتر محلول خاک از هم‌دماهای جذب لانگمویر و فروندلیچ و تمکین استخراج شد (Holford, 1979).

برای آنالیز آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار EXCEL استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

نتایج تجزیهٔ خاک نشان داد خاک مطالعه شده با ۵۵ درصد رس و با میزان کربنات کلسیم معادل (CCE) ۲۱ درصد جزء خاک‌های رسی-آهکی است. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک استفاده شده در آزمایش در جدول ۱ می‌آید.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی خاک مطالعه شده

واکنش کربن آلی خاک	کربنات کلسیم معادل %	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol/kg)	فسفر اولسن (mg/kg)	
			رس	کاتیونی
۲	۲۱	۲۹	۵۵	<۵

مقدار فسفر جذب شدهٔ خاک مورد مطالعه با افزایش غلظت فسفر در محلول تعادلی افزایش یافت؛ اما در حضور اسید سالیسیلیک افزایش میزان فسفر جذب سطحی شده با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک کاهش یافت. منحنی جذب فسفر در هر سه غلظت اسید سالیسیلیک، به ویژه در غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر، به طور معناداری پایین آمد که مبین تأثیر اسید سالیسیلیک در کاهش جذب سطحی فسفر و اهمیت اسید مطالعه شده در افزایش فراهمی فسفر است (شکل ۱). واژهٔ جذب فسفر در اینجا به همهٔ فرایندهایی گفته می‌شود که باعث حذف فسفر از محلول خاک شود (Castro and Torrent, 1998).

1. Maximum Buffering Capacity
2. Standardized Buffering Capacity
3. Standard P Requirement

جدول ۲. برازش داده‌های جذب فسفر با معادله لانگمویر و محاسبه ضرایب آن و نیاز استاندارد فسفر بر اساس معادله لانگمویر (SPR_L)

SPR_L (mg P/kg)	R^2 (%)	K_L (L/kg)	q_{max} (mg/kg)	SAL (mmol/L)
۱۶,۴a	۰,۹۹	۰,۲۰a	۳۲۶a	۰
۱۴,۲b	۰,۹۸	۰,۱۸ba	۳۱۹b	۲
۱۳,۸c	۰,۹۹	۰,۱۶b	۳۰۸c	۵
۱۳,۲d	۰,۹۸	۰,۱۴bc	۲۴۶d	۱۰
۳۲	۶	۷	۲۴	CV
۰,۰۹	۰,۰۱۳	۰,۰۳	۱,۴	LSD

SAL: غلظت اسید سالیسیلیک، q_{max} حداکثر جذب فسفر لانگمویر، K_L : انرژی جذب لانگمویر، R^2 : ضریب تبیین معادله لانگمویر، SPR_L : نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده بر اساس معادله لانگمویر

معادله جذب فروندلیچ

معادله فروندلیچ قدیمی‌ترین معادله استفاده شده در بررسی جذب فسفر در خاک است (Barrow, 1978) و بر پایه آن انرژی پیوند^۱ با افزایش میزان جذب به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. ساده بودن و پایه‌گذاری بر اساس فرض‌های واقعی‌تر علت برتری این معادله است. ضریب تبیین (R^2) معادله نشان داد معادله فروندلیچ نیز می‌تواند به‌خوبی جذب فسفر را توصیف کند (جدول ۳ و شکل ۲). در اغلب مطالعات معادله فروندلیچ توانایی بالایی در توصیف جذب فسفر در خاک‌های آهکی داشت. ظرفیت جذب فروندلیچ (K_f)، که میزان جذب فسفر در غلظت تعادلی یک میلی‌گرم فسفر بر لیتر است، در حضور اسید آلی از ۵۹ به ۴۶ لیتر در کیلوگرم کاهش یافت که بیانگر افزایش تحرک فسفر و کاهش تعداد مکان‌های جذب فسفر در حضور اسید سالیسیلیک است. این نتایج با نتایج (Moradi et al, 2011) مطابقت دارد. حداکثر جذب سطحی فسفر (q_{max}) و ظرفیت جذب فروندلیچ (K_f) شاخص‌های کمیت جذب فسفر شناخته می‌شوند (Solis and Torrent, 1989). کاهش این پارامترها بیانگر کاهش مقدار تثبیت و اشغال شدن سایت‌های جذب سطحی به‌وسیله اسید است. پارامتر n نشان‌دهنده شدت جذب است. برخلاف اغلب مطالعات، که روندی کاهشی و معناداری برای n در حضور مواد آلی گزارش کرده‌اند، در این مطالعه اسید سالیسیلیک تأثیری در مقدار n نداشت. برخی مطالعات نشان می‌دهند دقت هم‌دم‌های جذب در پیش‌گویی نیاز کودی فسفر به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از روش عصاره‌گیری خاک با استفاده از بیکربنات سدیم ۰,۵ مولار است (Samadi and Sepehr, 2013). نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده با معادله

فسفر را به‌خوبی توصیف کند (شکل ۲). با مصرف اسید سالیسیلیک پارامترهای معادله لانگمویر کاهشی معنادار یافت. حداکثر جذب فسفر لانگمویر (q_{max}) با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۳۲۶ به ۲۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش پیدا کرد (جدول ۲). در اغلب مطالعات بین حداکثر جذب فسفر (q_{max}) و میزان رس، کربنات کلسیم، ماده آلی، و اکسیدهای آهن و آلومینیوم خاک همبستگی مثبت و معنادار گزارش شده است (Borggard et al, 1990; Yuan and Lavkulich, 1994; Zhang et al, 2005; Sanyal et al, 1993). از این رو کاهش حداکثر جذب فسفر در حضور اسید سالیسیلیک بیانگر اشغال سایت‌های تثبیت‌کننده فسفر به‌وسیله اسید آلی و افزایش فراهمی فسفر است؛ که خود دلیلی بر اهمیت اسیدهای آلی در کاهش مصرف کودهای فسفاته است. Mehadi et al (1990) از حداکثر جذب فسفر به‌دست‌آمده از معادله لانگمویر برای پیش‌بینی نیاز فسفوری گندم استفاده کردند و نشان دادند خاک‌هایی که q_{max} بیشتری دارند به کود فسفاته بیشتری نیازمندند. Masayuki et al (2010) نیز تأثیر اسید سیتریک را در کاهش حداکثر جذب سطحی فسفر (q_{max}) در خاک‌های اندی‌سول معنادار گزارش کردند. آن‌ها شاهد ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش جذب سطحی فسفر در حضور اسید سیتریک بودند. Khorshid et al (2008) تأثیر لجن فاضلاب را در کاهش حداکثر جذب فسفر در برخی از خاک‌های آهکی معنادار ($P < 0.01$) گزارش کردند. ثابت انرژی پیوند لانگمویر (K_L)، که نشان‌دهنده قدرت نگهداری فسفر به‌وسیله ذرات خاک است، در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک از ۰,۲۰ به ۰,۱۴ لیتر در میلی‌گرم کاهش یافت. کاهش K_L با افزایش غلظت اسید آلی بیانگر این واقعیت است که با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک یون‌های فسفر با قدرت کمتری (نیروهای الکترواستاتیکی) جذب خاک می‌شوند. یکی از موارد کاربرد ایزوترم‌های جذب برآورد نیاز کودی خاک‌هاست (Samadi and Sepehr, 2013). گیاهان از لحاظ نیاز به غلظت فسفر در محلول خاک برای رسیدن به حداکثر رشد متفاوت‌اند (Fox and Kamprath, 1970). در این پژوهش با استناد به نتایج Holford (1979) از غلظت ۰,۳ میلی‌گرم فسفر در لیتر محلول خاک استفاده شد. نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده از طریق معادله لانگمویر (SPR_L) با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۱۶,۴ به ۱۳,۲ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافت که مشابه نتایجی است که Sepehr and Zabardast (2013) برای خاک‌های آهکی با کاربرد اسید هومیک گزارش کردند. کاهش SPR به معنی افزایش فسفر قابل استفاده گیاه و کاهش نیاز کودی است.

عرض از مبدأ معادله تمکین (A) از ۵۹ به ۵۲ میلی گرم در کیلوگرم کاهش یافت که بیانگر کاهش جذب سطحی فسفر در واحد غلظت فسفر و افزایش قابلیت استفاده فسفر برای گیاهان است. شیب معادله تمکین (K_T) در حضور اسید سالیسیلیک از ۶۲ به ۴۶ کاهش یافت. از این رو، اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین فاکتوری بسیار مهم در کاهش پتانسیل جذب فسفر و افزایش فراهمی فسفر برای گیاهان اند. با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک، مقدار فسفری که باید به وسیله خاک مورد مطالعه جذب شود تا غلظت ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر محلول خود ایجاد کند از ۲۰۶ به ۱۵۲ میلی گرم در لیتر کاهش یافت.

محاسبه شاخص های بافری (حداکثر ظرفیت بافری خاک، ظرفیت بافری تعادلی، ظرفیت بافری استاندارد)

از کاربردهای بسیار مهم هم‌دهماهای جذب فسفر تعیین شاخص های ظرفیت بافری^۱ خاک هاست. ظرفیت بافری فسفر (PBC) یک خاک عبارت است از پایداری آن در برابر تغییرات غلظت فسفر در فاز محلول که یکی از عوامل بسیار مهم کنترل جذب به وسیله گیاه است (Probert and Moody, 1998). به عبارت دیگر، شیب هم‌دهماهای جذب نشان‌دهنده ظرفیت بافری و شیب های تند بیانگر ظرفیت بافری بالاست (Ozanne and Shaw, 1968). با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک گنجایش بافری از ۵۸/۳ به ۲۲/۲ میلی لیتر بر گرم کاهش یافت. ظرفیت بافری بیانگر تغییرات فاکتور کمیّت (فسفر قابل جذب و ذخیره شده در خاک) به ازای واحد تغییرات در فاکتور شدت (فعالیت فسفر در فاز محلول که به وسیله آب یا کلرید کلسیم تعیین می شود (Fox and Kamprath, 1970)) است. بنابراین، کاهش این شاخص نشان‌دهنده کاهش مقدار جذب سطحی فسفر است. ظرفیت بافری حداکثر (MBC_L) با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۵۷/۶ به ۴۶/۵ میلی لیتر بر گرم خاک کاهش یافت. این نتایج با نتایج (Moradi et al, 2011)، Sepehr and Zabardast (2013) و (Moazed et al, 2010) مطابقت دارد. در خاک هایی با فسفر قابل استفاده یکسان پایین بودن MBC بیانگر بالا بودن شدت فسفر در محلول خاک است. با کاهش حداکثر ظرفیت بافری در حضور اسید آلی پایداری فسفر خاک در برابر تغییرات فسفر افزایش می یابد. به عبارت دیگر، پس از خارج شدن فسفر از فاز محلول جایگزینی فسفر خارج شده و افزایش فسفر در فاز محلول به مقدار اولیه به راحتی انجام می گیرد. شاخص بافری دیگری که در پیش بینی قابلیت استفاده

فروندلیج (SPR_F) با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۳۱/۵ به ۲۴/۷ میلی گرم در لیتر کاهش یافت. معادله فروندلیج نیاز استاندارد فسفر را در همه غلظت های اعمال شده اسید سالیسیلیک دو برابر معادله لانگمویر محاسبه کرد؛ با این تفاوت که میزان کاهش نیاز استاندارد فسفر با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک در این مدل بیشتر بود.

جدول ۳. برازش داده های جذب فسفر با معادله فروندلیج و محاسبه ضرایب آن و نیاز استاندارد فسفر بر اساس معادله فروندلیج (SPR_F)

SPR_F (mg P/kg)	R^2 (%)	K_F (L/kg)	$1/n$	SAL (mmol/L)
۳۱,۵a	۰,۹۸	۵۹a	۰,۵۲	۰
۲۸,۳b	۱,۰۰	۵۳b	۰,۵۰b	۲
۲۷,۹c	۰,۹۹	۵۲c	۰,۵۰b	۵
۲۴,۷d	۰,۹۸	۴۶d	۰,۵۰b	۱۰
۱۴	۶	۱	۲,۳	CV
۰,۰۹	۰,۰۱۲	۱,۱	۰,۰۲	LSD

SAL: غلظت اسید سالیسیلیک، $1/n$: شدت جذب فسفر فروندلیج، K_F : ظرفیت جذب فروندلیج، R^2 : ضریب تبیین معادله فروندلیج، SPR_F : نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده بر اساس معادله فروندلیج

جدول ۴. برازش داده های جذب فسفر با معادله تمکین و محاسبه ضرایب آن و نیاز استاندارد فسفر بر اساس معادله تمکین (SPR_T)

SPR_T (mg P/kg)	R^2 (%)	K_T	A (mg/kg)	SAL (mmol/L)
۲۰,۶a	۱,۰۰	۶۲a	۵۹a	۰
۱۸,۴b	۰,۹۹	۵۵b	۵۹a	۲
۱۸,۰c	۰,۹۹	۵۴c	۵۷a	۵
۱۵,۲d	۰,۹۲	۴۶d	۵۲b	۱۰
۴,۲	۱۲	۸	۳,۴	CV
۳,۲	۰,۰۰۲	۰,۹۵	۳,۸	LSD

SAL: غلظت اسید سالیسیلیک، A: عرض از مبدأ معادله تمکین، K_T : شیب معادله تمکین، R^2 : ضریب تبیین معادله تمکین، SPR_T : نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده بر اساس معادله تمکین

معادله جذب تمکین

در معادله تمکین، جذب فسفر در خاک تابعی از لگارتیم غلظت تعادلی آن در محلول خاک در نظر گرفته می شود. انرژی پیوند با افزایش مقدار جذب به طور خطی کاهش می یابد. بالا بودن ضریب تبیین (R^2) این معادله بیانگر معتبر بودن این معادله در توصیف ارتباط بین فسفر جذب شده و فسفر تعادلی در خاک مطالعه شده است (شکل ۲). پارامترها و ضرایب همبستگی این معادله در جدول ۴ می آید. با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک،

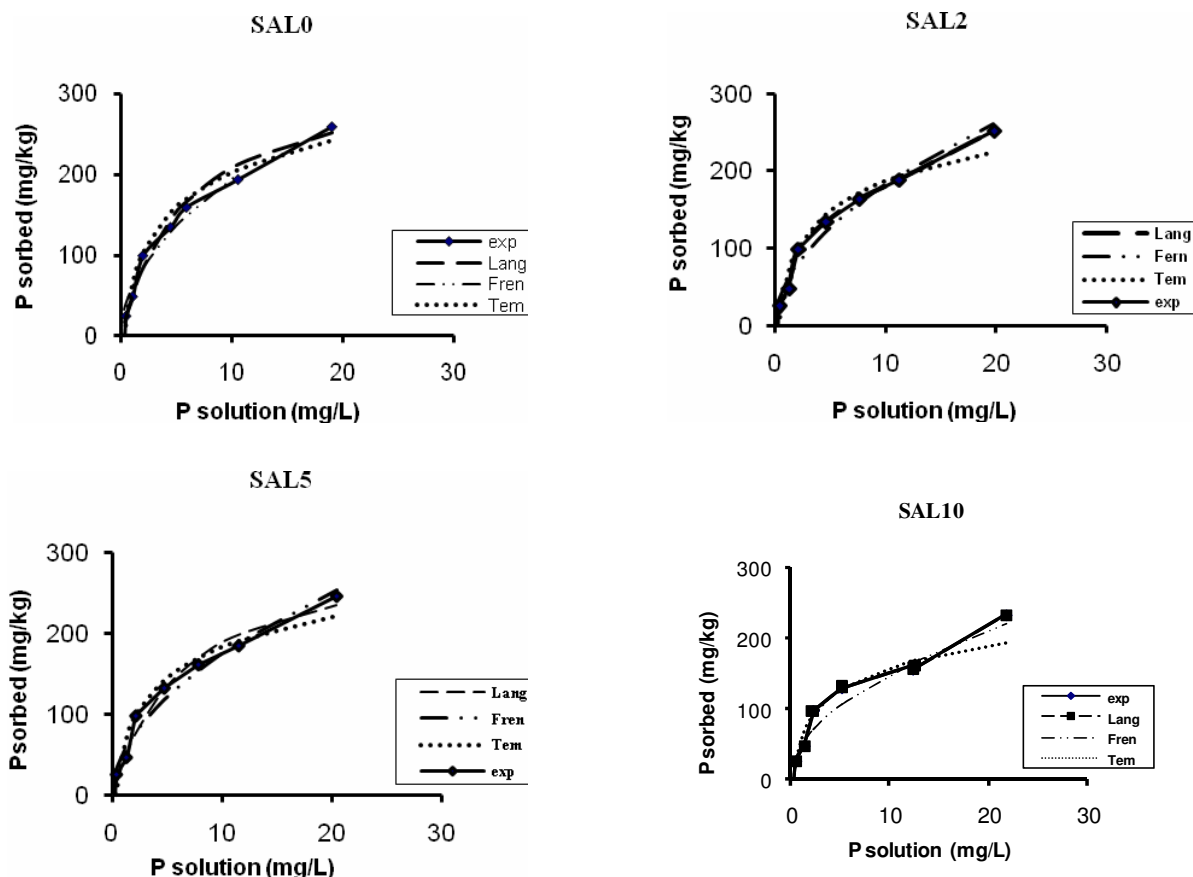
شاخص بافری برای خاک‌ها می‌تواند از طریق تعیین درجه همبستگی این شاخص‌ها با جذب گیاهی تعیین شود.

جدول ۵. تأثیر اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های بافری

SBCT	SBCF	SBCL	PBC ₁	MBC	غلظت اسید سالیسیلیک (mM)
۱۹۸a	۵۴,۵a	۵۱,۹a	۵۸,۳a	۵۷,۶a	۰
۱۹۸a	۴۰,۹b	۴۷,۲b	۲۹,۳b	۴۹,۴b	۲
۱۹۱,۷b	۴۸,۶c	۴۳,۹c	۳۹,۳c	۴۸,۲c	۵
۱۷۲,۴d	۴۱,۹d	۴۱,۶d	۲۲,۲d	۴۶,۵d	۱۰
۲۴	۱۲	۸,۴	۱,۲	۲,۳	CV (%)
۰,۲۷	۴,۵	۱,۱۵	۰,۱۲	۰,۳۳	LSD

MBC- حداکثر ظرفیت بافری، PBC₁: ظرفیت بافری فسفر در غلظت تعادلی ۱ میلی‌گرم فسفر در لیتر، SBC_L و SBC_F و SBC_T: به ترتیب ظرفیت بافری استاندارد محاسبه‌شده با معادلات لانگمویر و فروندلیچ و تمکین

فسفر خاک برای گیاه استفاده می‌شود ظرفیت بافری استاندارد (SBC) است که شیب معادلات جذب فسفر را در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی‌گرم فسفر در لیتر نشان می‌دهد. با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک شیب معادله لانگمویر در غلظت ۰/۳ از ۵۱/۹ به ۴۱/۶ میلی‌لیتر در گرم کاهش یافت و ظرفیت بافری استاندارد محاسبه‌شده با معادله فروندلیچ از ۵۴/۵ به ۴۱/۹ و با معادله تمکین از ۱۹۸ به ۱۷۲/۴ میلی‌گرم در گرم کاهش یافت. کاهش این پارامتر به معنی کاهش جذب فسفر در نتیجه بلوکه‌شدن مکان‌های جذب به وسیله اسید آلی است که با نتایج Sepehr & Zabardast (2013) مشابهت دارد (جدول ۵). ظرفیت بافری استاندارد با استفاده از معادلات لانگمویر و فروندلیچ تقریباً در یک محدوده محاسبه شد. اما معادله تمکین مقدار این شاخص را بیشتر برآورد کرد. با توجه به اینکه معادلات جذب و شاخص‌های بافری متعددی در پیش‌بینی قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه وجود دارد، بهترین



شکل ۲. برازش داده‌های جذب با ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ و تمکین

نتیجه‌گیری
نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد اسید سالیسیلیک در خاک آهکی باعث تغییر ویژگی‌های جذب فسفر و فسفر قابل استفاده می‌شود. با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک میزان جذب فسفر به‌وسیله ذرات خاک و نیاز استاندارد فسفر (SPR) به‌طور معنادار کاهش یافت. بنابراین مصرف اسید سالیسیلیک همراه کودهای فسفره یا اصلاح ژنتیکی گیاهان برای ترشح بیشتر

اسیدهای آلی از ریشه می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر را بالا برده و کارایی مصرف کود را افزایش دهد. همچنین ترشح این اسید به ریزوسفر کارایی گیاه را در جذب فسفر و توانایی گیاهان را در استفاده از فسفر بومی خاک افزایش می‌دهد. این وضعیت به کاهش مصرف کودهای فسفره و در نتیجه کاهش اثرات زیست‌محیطی آن‌ها منجر می‌گردد.

REFERENCES

- Barrow, N. J. (1978). Description of phosphate adsorption curves, *Journal Soil Science*, (29), 447-462.
- Bolan, N. S., Naidu, R., Mahimairaja, S., and Baskaran, S. (1994). Influence of low molecular – weight organic acids on the solubilization of phosphate, *Biology and Fertility of Soils*, (18), 311-319.
- Borggaard, O. K., Jorgensen, S. S., Moberg, J. P., and Raben-Lange, B. (1990). Influence of organic matter on phosphate retention by aluminum and iron oxides in sandy soils, *Journal Soil Science*, (41), 443-449.
- Castro, B., and J. Torrent. (1998). Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols as evaluated from extended P-sorption curves. *European Journal Soil Science*. (49), 661-667.
- Dinkelaker, B., Romheld, V., and Marschner, H. (1989). Critic acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.), *Plant Cell & Environment*, 12 (3), 285-292.
- El- Tayba, M. A. (2005). Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid, *Journal Soil Science*, 12 (53), 654-668.
- Fox, R. L., and Kamprath, E. J. (1970). Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils. *Soil Science Society of America Proceeding*, (34), 902-907.
- Gardner, WK., Parbery, DG., and Barber, DA. (1982). The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L.II: the effect of varying phosphorus supply and soil type on some characteristics of the soil-root interface, *Plant Soil*, (68), 33-41.
- Grotz, N., and Guerinot, M. L. (2002). Limiting nutrients: An old problem with new solutions, Guerinot, *Plant Biology*, (5), 158-163.
- Halford, I. C. R. (1979). Evaluation of Soil Phosphate Buffering Indices, *Australian Journal Soil Research*, (17), 495-504.
- Hua, Quan-Xian, Li Jian-Yun, Zhou Jian-min, Wang Huo-Yan, Du Chang-Wen and Chen Xiao-Qin. (2008). Enhancement of Phosphorus Solubility by Humic Substances in Ferrosols, *Soil Science Society of China*, 18 (4), 533-538.
- Jones, D. L., Dennis, P. G., Owen, A. G. & Hees, P. A. W. (2003). Organic acid behavior in soils – misconceptions and knowledge gaps. *Plant and Soil*, (248), 31-41.
- Khan, A. A., Jilani, G., Akhtar, M. S., Naqvi S. M. S., and Rasheed., M. (2009). Phosphorus solubilizing bacteria: Occurrence, mechanisms and their role in crop production, *Journal Agricultural Biological Science*, 1 (1), 48-58.
- Kang, C., Wang, Ch. (2003) Salicylic acid changes activities of H₂O₂ metabolizing enzymes and increases the chilling tolerance of banana seedlings. *Environment and Experimental Botany*, 9-15.
- Khorshid, M., Hosseinpour, A. s., And Oustan, Sh. (1387). Impacts of sewage sludge on phosphorus sorption characteristics and availability in some calcareous soils, *Journal of Science and Technology Agriculture and Natural Resources*, 7 (46), 791-802, (In Farsi).
- Marschner, H. (1995). "Mineral Nutrition of Higher Plants", 2nd ed. Academic press, London.
- Masayuki, Tani., Kunimoto, A., Taku K., and Masanori, K. (2010). Effect of organic ligands on phosphate and availability in Andisols of eastern Hokkaido, *Japan Soil Science*, 2 (32), 56-71.
- Mehadi, A. A., Taylor R. W., and Shuford J. W. (1990). Prediction of fertilizer phosphate requirement using the Langmuir adsorption maximum, *Plant Soil*, (122), 267-270.
- Moradi, N., and Rasouli Sadaghiani, H., Sepehr, E., Abdollahi, B. (1390). Effects of low-molecular weight organic acids on phosphorus sorption in some calcareous soils, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2 (42), 233-239, (In Farsi).
- Moazed, H., Hoseini, Y., Naseri, A. A., and Abbasi, F., (2010). Determining Phosphorus adsorption isotherm in soil and its relation to soil characteristics. *International Journal of Soil Science*, 5(3), 131-139.
- Olsen, S. R., and Watanabe, F. S. (1957). A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the langmuir isotherm, *Soil Science Society of America Proceeding*, (21), 144-149.
- Ozanne, P. G., and Shaw, T. C. (1968). Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate, In: Transactions of the 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, *Australia International Society of Soil Science*, (2), 273-280.

- Probert, M. E., and Moody, P. W. (1998). Relating phosphorus quantity, intensity and buffer capacity to phosphorus uptake, *Australia Journal Soil Research*, (36), 389- 393.
- Popova, L., Ananieva, V., Hristova, V., Christov, K., Georgieva, K., Alexieva, V., and stoinova, Zh. (2003), Salicylic acid- and Methyl jasmonate-induced protection on photosynthesis to paraquat oxidative stress. *Bulgarian Journal Plant Physiology Special Issue*, 133-152.
- Paul, E.A., (2007). Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. 3ed Edition. Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Raghothama, K. G., Karthikeyan, A. S. (2005). Phosphate acquisition, *Plant Soil*, 274(1), 37-49.
- Ryan, P., Delhaize, E., and Jones, D. (2001). Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots, *Annual Review Plant Biology*, (52), 527-560.
- Raskin, I. (1992) Role of salicylic acid in plants. *Annual Review Plant Physiology*, 439-463.
- Samadi, A. and E. Sepehr. (1392). Validation of a regression model obtained from phosphorous adsorption isotherms for P fertilizer recommendation in cereals. *Journal of Science and Technology*, 17 (65): 173-184, (In Farsi).
- Sanyal, S. K., Datta, D. e., and Chan, P. Y. (1993). Phosphate sorption– desorption behavior of some acidic soils of South and Southeast Asia, *Soil Science Society American Journal*, (57), 937–945.
- Sepehr, E., and R. Zabardast. (1392). Effect of Humic Acid on Adsorption Behavior of P in a Calcareous Soil. *Journal of Water and Soil*. 27, (4): 720-731, (In Farsi).
- Sepehr, E., Malakouti, M.J., Kholdbarin, B., Karimian, N.J., and Samadi, A. (2009). Genotypic Variation in P efficiency of selected Iranian cereals. *International Journal of Plant Production*. 3(3): 17-28.
- Sperber J. I, (1985). Incidence of apatite solubilizing organisms in the rhizosphere. *Australian Journal Agricultural Research*, (9), 778-781.
- Sperber, J. I. (1998). The incidence of apatite solubilizing organisms in the rhizosphere and soil, *Australian Journal of Agricultural Research*, (9), 778-781.
- Simeoni, M. A., Batts, B. D., and McRae, C. (2003). Effect of groundwater fulvic acid on the adsorption of Arsenate by ferrihydrite and gibbsite, Apple, *Geochemistry*, (18), 1507-1515.
- Solis, P., and Torrent, J. (1989). Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain, *Soil Science Society American Journal*, (53), 456-459.
- Ström, L., Owen, A. G., Godbold, D. L., and Jones, D. L. (2005). Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling, *Soil Biology and Biochemistry*, 37 (11), 2046-2054.
- Toor, G. S., and Bahl, G. S. (1997). Effect of solitary and integrated use of poultry manure and fertilizer phosphorus on the dynamics of P availability in different soils. *Bioresource Technology*, (62), 25-28.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., and Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource, *New Phytologist*, (157), 423-447.
- Xu, R. K., Zhao, A. Z., and Ji, G. L. (2003). Effect of anions of low molecular weight organic anions on surface charge of variable charge soils, *Journal of Colloid and Interface Science*, (264), 322-326.
- Xu, R. K., Yang, M. L., Wang, Q. S., & Ji, G. L. (2004). Effect of low molecular weight organic acids on the adsorption of Cl⁻ by variable charge soils. *Pedosphere, Journal of Colloid and Interface Science*, (14), 405–408.
- Yuan, G., and Lavkulich, L. M. (1994). Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminum in Spodosols, *Soil Science Society American Journal*, (58), 343–346.
- Zhang, H., Schroder, J. L., Fuhrman, J. K., Basta, N. T., Storm, D., and Payton, M. E. (2005). Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity as affected by soil properties, *Soil Science Society American Journal*, (69), 96–106.