استفاده از هم‌دماهای جذب سطحی در تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری و نیاز استاندارد فسفر برخی خاک‌های آهکی استان اصفهان

مهران شیروانی و حسین شریعتمداری[1]

چکیده

فرایند جذب سطحی فسفر در خاک یکی از شاخص‌های مهم قدرت بافری، و در نتیجه قابلیت استفادهٔ این عنصر برای گیاه به شمار می‌رود، و خود تابع ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. به منظور بررسی این فرایند در خاک‌های آهکی استان اصفهان، از افق سطحی هشت نقطهٔ مختلف این استان نمونه تهیه شد و پس از هواخشک کردن و گذراندن از الک دو میلی‌متری، نمونه‌های سه گرمی از این خاک‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای $25 \pm 1^{\circ}C$ در تعادل با ۶۰ میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار حاوی صفر تا ۳۳ $\mu g\ P/ml$ قرار گرفت. تفاوت غلظت P در محلول‌های اولیه و نهایی به عنوان مقدار جذب سطحی شده در نظر گرفته شد، و ارتباط آن با غلظت تعادلی فسفر به وسیله چهار مدل لانگ‌مویر، فروندلیچ، تمکین و ون‌های برازش داده شد.

هر چهار معادله به خوبی این ارتباط را توصیف نمودند، ولی ضرایب هم‌بستگی مربوط به مدل ون‌های در شش خاک از هشت خاک مورد بررسی بیشترین مقدار را نشان داد. شماری از شاخص‌های بافری فسفر با استفاده از هم‌دماهای جذب محاسبه گردید. این شاخص‌ها با یکدیگر و با ویژگی‌های خاک روابط معنی‌داری نشان دادند، که در این میان درصد رس با ضریب هم‌بستگی ۰/۷۷۱ تا ۰/۹۴۹ مهم‌ترین عامل مؤثر بر قدرت بافری این خاک‌ها بود. درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) و ظرفیت تبادل کاتیونی در درجات بعدی اهمیت قرار داشتند. نیاز استاندارد فسفر (SPR) که در واقع میزان جذب فسفر در خاک در غلظت تعادلی ۰/۳ $\mu g\ P/ml$ است نیز از معادله ون‌های محاسبه گردید. این شاخص هم‌بستگی معنی‌داری با شاخص‌های ظرفیت بافری (۰/۹۹۰ تا ۰/۸۰۷ =r)، درصد رس خاک (۰/۹۶۰ =r) و درصد CCE (۰/۸۰۹=r) نشان داد. به طور کلی جذب سطحی و قابلیت استفاده فسفر در خاک‌های مورد بررسی به شدت تحت تأثیر میزان رس و آهک این خاک‌ها بوده، و این عوامل در مراحل عملی آزمون خاک برای فسفر باید مد نظر قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: *هم‌دماهای جذب سطحی فسفر، ظرفیت بافری فسفر، نیاز استاندارد فسفر*

---

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

مقدمه

غلظت فسفر در محلول خاک، و در نتیجه قابل استفاده بودن این عنصر غذایی برای گیاه، ارتباط نزدیکی با فرایندهای جذب سطحی فسفر به وسیله اجزای خاک از جمله کانی‌های رسی، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم، کربنات کلسیم و مواد آلی دارد. این ارتباط دینامیک را می‌توان به وسیله هم‌دماهای جذب توصیف کرد، که در میان آنها معادله‌های لانگ‌مویر (Langmuir)، فروندلیچ (Freundlich) و تمکین (Temkin) معروف‌تر از بقیه می‌باشند.

معادلهٔ لانگ‌مویر برای اولین بار به وسیلهٔ اولسن و واتانابه (۱۶) به منظور توصیف جذب فسفر در خاک به کار گرفته شد، و تا کنون در پژوهش‌های فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی معادلهٔ لانگ‌مویر این است که می‌توان حداکثر جذب فسفر را به وسیله آن تخمین زد. مهادی و همکاران (۱۲) از جذب حداکثر به دست آمده از این معادله به منظور پیش‌بینی میزان فسفر مورد نیاز گندم استفاده نموده، و نشان دادند که خاک‌های دارای حداکثر جذب بالاتر نیاز به کود فسفری بیشتری دارند. وودراف و کامپرات (۲۴) در پژوهش‌های خود نتیجه گرفتند که برای رسیدن به عملکرد بهینه در خاک‌های با توانایی جذب زیاد P ، درجهٔ اشباع پایین‌تری کافی خواهد بود، ولی در خاک‌های با توانایی جذب کم، اشباع کامل خاک با فسفر ضروری است. آگبنین و تیسن (٤) از معادله لانگ‌مویر در برازش داده‌های جذب فسفر استفاده کرده، و روابط معنی‌دار آماری میان پارامترهای این معادله و ویژگی‌های خاک، مانند درصد رس، کربن آلی، و هم‌چنین Fe و Al قابل عصاره‌گیری با DCB (Dithionate-Citrate-Bicarbonate) به دست آوردند. آنجیونونی و همکاران (٦) نیز میزان اکسیدهای آهن آزاد در خاک را تنها عامل دارای رابطه معنی‌دار با حداکثر جذب فسفر تعیین شده از مدل لانگ‌مویر دانستند. خادمی و همکاران (۲) نیز با استفاده از مدل لانگ‌مویر در توصیف هم‌دماهای جذب فسفر در خاک‌های خوزستان، میزان رس، اکسیدهای آهن و آلومینیوم، مواد آلی و فسفر اولیه موجود در خاک را از عوامل مؤثر بر حداکثر جذب فسفر به وسیله این خاک‌ها برشمردند.

معادله فروندلیچ قدیمی‌ترین معادله مورد استفاده در بررسی جذب فسفر در خاک بوده (۷)، و بر پایهٔ آن انرژی پیوند (Binding energy) با افزایش میزان جذب به طور نمایی کاهش می‌یابد (۷). برتری معادلهٔ فروندلیچ نسبت به معادلهٔ لانگ‌مویر آن است که افزون بر ساده بودن، بر فرض‌های واقعی‌تری بنیان نهاده شده است. انگوتی و نگارستان (۱) در بررسی جذب سطحی فسفر در خاک‌های منطقه شهریار، از دو معادله لانگ‌مویر و فروندلیچ استفاده کرده و ضرایب تبیین معنی‌داری برای هر دو مدل به دست آوردند، ولی معادله فروندلیچ دارای ضرایب تبیین (R^2) بالاتری بود. فکری و همکاران (۳) نیز مدل فروندلیچ را نسبت به مدل‌های لانگ‌مویر و تمکین، در توصیف هم‌دماهای جذب فسفر در سه خاک آهکی اصفهان برتر دانستند. نتایج مشابهی به وسیله پولی‌زوپولوس و همکاران (۱۸) در مورد خاک‌های آلفی‌سول یونان گزارش شده است. سولیس و تورنت (۲۱) با بررسی جذب فسفر در خاک‌های آهکی اسپانیا از معادله فروندلیچ، به دلیل داشتن ضرایب تبیین بالاتر نسبت به معادلهٔ لانگ‌مویر استفاده نمودند.

در معادلهٔ تمکین، که جذب فسفر در خاک به عنوان تابعی از لگاریتم غلظت تعادلی آن در محلول در نظر گرفته می‌شود، انرژی پیوند با افزایش مقدار جذب به طور خطی کاهش می‌یابد. این معادله نیز به طور گسترده در برازش داده‌های جذب فسفر مورد استفاده قرار گرفته است (۳، ۸، ۹ و ۱۸).

معادلهٔ ون‌های (Van Huay) یکی دیگر از معادلاتی است که در توصیف هم‌دماهای جذب سطحی فسفر به کار می‌رود، و در آن جذب فسفر به عنوان تابعی از جذر غلظت تعادلی P در محلول رسم می‌گردد. یاژبرینی و لچ (۱۱) از این مدل در بررسی خاک‌های مجارستان استفاده کرده، و نشان دادند که روند جذب فسفر در این خاک‌ها از مدل ون‌های پیروی می‌کند.

در ایران، پژوهش‌های جذب و رهاسازی فسفر در برخی استان‌ها انجام پذیرفته (۱، ۲ و ۳)، ولی به کاربرد هم‌دماها در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری فسفر خاک‌ها کمتر توجه شده است.

اهداف این پژوهش عبارتنداز:

الف) بررسی جذب سطحی فسفر در برخی خاک‌های آهکی استان اصفهان، با استفاده از هم‌دماهای جذب و تعیین روابط موجود میان پارامترهای معادلات جذب سطحی و ویژگی‌های خاک

ب) تعیین برخی شاخص‌های ظرفیت بافری، و نیاز استاندارد فسفر با استفاده از معادلات جذب سطحی

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک از هشت نقطه مختلف استان اصفهان تهیه گردید، و پس از انتقال به آزمایشگاه هواخشک شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های خاک‌ها شامل درصد رس و سیلت به روش پیپت (۱۰)، درصد کربن آلی به روش واکلی و بلک (۲۳)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم (۲۰)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (۵)، وpH در سوسپانسیون ۲/۵ :۱خاک به آب به وسیله pH متر مدل متراهم ۶۲۰ اندازه‌گیری شد.

هم‌دماهای جذب فسفر

برای بررسی هم‌دماهای جذب فسفر، محلول کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار حاوی مقادیر صفر، ۲/۵، ٤، ۷/۵، ۱۲/۵، ۱۸، ۲۵ و ۳۳ میکروگرم P در میلی‌لیتر از ترکیب KH_2PO_4 ، به نمونه‌های سه گرمی خاک در سه تکرار افزوده، و به مدت ۲٤ ساعت در دمای C ° ۱± ۲۵ به وسیله دستگاه تکان دهندهٔ الکتریکی (Shaker) به هم زده شد. سپس محلول‌های تعادلی با سانتریفوژ کردن در ۳۰۰۰ rpm به مدت پنج دقیقه، و گذراندن از کاغذ صافی واتمن شماره ٤۲ از نمونه‌ها جدا گردید. غلظت فسفر در این محلول‌ها پس از تنظیم pH آن با معرف پارانیتروفنول (p. nitrophenol) به روش مورفی و رایلی (۱٤)، و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر هیتاچی مدل ۲۰-۲۰۰ اندازه‌گیری شد. مقدار فسفر جذب شده در نمونه از طریق تفاوت فسفر در محلول‌های اولیه و نهایی اندازه‌گیری، و داده‌های حاصل به وسیلهٔ هم‌دماهای جذب لانگ‌مویر، فروندلیچ، تمکین و ون‌های برازش داده شد، و مورد مقایسه قرار گرفت.

هم‌دماهای جذب لانگ‌مویر به شکل زیر می‌باشد:

$$X = \frac{KAC}{1+KC} \qquad [۱]$$

ثابت‌های A و K به ترتیب بیانگر حداکثر جذب فسفر (بر حسب میکروگرم P بر گرم خاک) و انرژی جذب (بر حسب میلی‌لیتر بر میکروگرم P) می‌باشند، که از طریق برازش فرم خطی آن (معادله ۲) بر داده‌ها تعیین گردید :

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{KA} + \frac{C}{A} \qquad [۲]$$

که در آنها:

X مقدار جذب فسفر بر حسب میکروگرم بر گرم خاک و C غلظت تعادلی فسفر در محلول بر حسب میکروگرم بر میلی‌لیتر می‌باشد.

هم‌دماهای جذب فروندلیچ، تمکین و ون‌های نیز به ترتیب در معادله‌های ۳، ۵ و ٦ نشان داده شده است. ثابت‌های a و b مدل فروندلیچ با استفاده از برازش فرم خطی آن (معادلهٔ ٤) و نیز ثابت‌های k_1 و k_2 معادلهٔ تمکین و n و m معادلهٔ ون‌های به وسیله برازش مدل‌های مربوطه بر داده‌های جذب فسفر تعیین گردید.

$$X = aC^b \qquad [۳]$$

$$\ln X = \ln a + b \ln C \qquad [٤]$$

$$X = k_1 \ln (k_2 C) \qquad [۵]$$

$$X = m + n\sqrt{C} \qquad [٦]$$

که در همه آنها X و C همانند اجزای معادله لانگ‌مویر تعریف می‌شوند. سرانجام ارتباط پارامترهای این معادلات با ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت.

با برازش داده‌های جذب فسفر به وسیله معادلهٔ لانگ‌مویر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

سه شاخص بافری شامل ضریب K ، ظرفیت بافری حداکثر (Maximum Buffering Capacity) (MBC) و ظرفیت بافری استاندارد(Standard Buffering Capacity) (SBC) تعیین گردیدند. MBC و SBC به ترتیب عبارتند از شیب حداکثر معادلهٔ لانگ‌مویر (٤، ۲۱ و ۲۲)، و شیب این معادله در غلظت ۰/۳ میکروگرم P در میلی‌لیتر (٤). شاخص‌های بافری دیگر، شامل ظرفیت بافری تعادلی(Equilibrium Buffering Capacity) (EBC) که عبارتست از شیب معادلهٔ فروندلیچ در غلظت فسفر عصاره‌گیری شده با کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار (۲۱)، ضریب k_1 معادله تمکین (٦، ۸ و ۹)، و ضریب n معادله ون‌های (۱۱)، نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مقدار فسفر جذب شده به وسیله خاک در غلظت ۰/۳ µg P/ml از هم‌دماهای جذب ون‌های استخراج شده، و نیاز استاندارد فسفر(Standard P Requirement) (SPR) نامیده شد (۱۷)، و هم‌بستگی آن با شاخص‌های بافری و ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

خاک‌های مورد بررسی دارای دامنه‌ای از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بودند که در جدول ۱ شماری از آنها ارائه گردیده است.

به طور کلی، هر چهار مدل جذب به خوبی ارتباط فسفر محلول و فسفر جذب سطحی شده را توصیف می‌کنند. ضرایب هم‌بستگی و پارامترهای مربوط به این معادله در جدول ۲ ارائه گردیده است. ضرایب هم‌بستگی برای مدل لانگ‌مویر به غیر از خاک ۱ که در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار است، در خاک‌های دیگر در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشند، که نشان دهنده تناسب این مدل در برازش داده‌های جذب فسفر است. ضرایب هم‌بستگی مربوط به مدل فروندلیچ همه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بوده، و به غیر از خاک‌های ٤، ۷ و ۸ ، از ضرایب مدل لانگ‌مویر بزرگ‌تر می‌باشند. معادلهٔ تمکین نسبت به دو معادلهٔ پیش ضرایب هم‌بستگی کوچک‌تری داشته و غیر از خاک ۱ که در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بود، در دیگر خاک‌ها در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شدند. ارتباط مقدار فسفر جذب شده با فسفر محلول در خاک‌های مورد بررسی به وسیلهٔ مدل ون‌های نیز بررسی گردید، و نشان داده شد که این مدل در شش خاک از هشت خاک مورد بررسی دارای بالاترین ضرایب هم‌بستگی می‌باشد. یاژبرینی و لچ (۱۰) نیز با استفاده از مدل ون‌های نتایج مشابهی به دست آوردند.

ثابت A در معادلهٔ لانگ‌مویر که بیانگر حداکثر جذب سطحی فسفر می‌باشد، از ۲۷۰/۸ تا ٤٥٦/۱ میکروگرم بر گرم خاک متغیر بود. این پارامتر و ثابت a در معادلهٔ فروندلیچ به عنوان شاخص‌های کمیت جذب فسفر شناخته می‌شوند (۲۱)، و هر دو هم‌بستگی معنی‌داری با درصد رس، کربنات کلسیم معادل و CEC خاک نشان دادند (جدول ۳). تسادیلاس و همکاران (۲۲) نیز میان این دو پارامتر و میزان رس خاک‌های مورد مطالعه ارتباط معنی‌داری به دست آوردند. سولیس و تورنت (۲۱) با به کارگیری مدل فروندلیچ در توصیف هم‌دماهای جذب فسفر، به رابطه نزدیکی بین ضریب a این معادله و درصد رس و CEC خاک‌ها دست یافتند. ضریب a معادله فروندلیچ در واقع میزان جذب فسفر در غلظت تعادلی یک میکروگرم بر میلی‌لیتر بوده، و دارای هم‌بستگی نسبتاً زیادی با A معادله لانگ‌مویر بود (* ۰/۷۵ = r).

از مهم‌ترین کاربردهای هم‌دماهای جذب فسفر تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری (Buffering capacity indices) خاک‌هاست. ظرفیت بافری یک خاک عبارت است از پایداری آن در برابر تغییرات غلظت P محلول، و یکی از عوامل مهم کنترل کنندهٔ جذب فسفر به وسیله گیاه می‌باشد (۱۳، ۱۵ و ۱۹). شماری از شاخص‌های بافری و نیاز استاندارد فسفر در جدول ٤ نشان داده شده است. ثابت K و شاخص MBC معادلهٔ لانگ‌مویر با درصد رس، کربنات کلسیم معادل و CEC خاک هم‌بستگی معنی‌داری نشان دادند (جدول ٥)، که با نتایج دیگر پژوهشگران هم‌خوانی دارد (٤، ۱۳ و ۲۱).

ظرفیت بافری تعادلی(EBC) با میزان رس و CEC خاک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد بررسی

شماره خاک	محل نمونه‌برداری	رس (٪)	سیلت (٪)	کربنات‌کلسیم معادل(٪)	CEC (cmol / kg)	کربن آلی (٪)	pH_w (۱: ۲/۵)	گروه بزرگ
۱	عسگران	۱۳/٦	۲۹/۹	۱۸/۷	۹/۲	۰/٦٤	۷/٦	Calcixerepts
۲	تندران	۲۲	٥٥/۲	۲۸/۲	۱۱/۲	۰/۹۳	۷/۹	Xerofluvents
۳	تندران	۲٤/٤	٤٦/۱	۲۷	۱۲/۹	۱/۱٦	۸/۱	Xerofluvents
٤	پل شهرستان	۲۷/۸	٤٦/۳	۳۳	۱٤/۹	۰/۸٥	۷/۸	Haplocambids
٥	عسگران	۲۸/٤	٥۳/۷	۲٥/۲	۱۷/٦	۰/۹۹	۷/۸	Calcixerepts
٦	عسگران	۲۹/۲	٤۷/۳	۲۷	۱۷/٤	۱/۱٦	۷/۸	Calcixerepts
۷	کروچ	۳۸	٥۱/۸	۳٦/٥	۱۷/٤	۰/۸۸	۷/۹	Haplocambids
۸	جوجیل	٤۲	٤۹/٦	۳٤	۱۹/۲	۰/۸۷	۷/۸	Haplocambids

جدول ۲. پارامترها و ضرایب هم‌بستگی مربوط به چهار مدل برازش شده بر داده‌های جذب فسفر

	شماره خاک	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
معادلهٔ لانگمویر	A	۲۷۰/۸	۳۰٥/۳	٤۰۹/۳	٤۲۷/۲	٤۳۰/٤	۳۷۷/۱	٤۳۰/۹	٤٥٦/۱
	K	۰/۱٥	۰/۳۸	۰/۳٤	۰/۳۳	۰/۳٦	۰/٤٦	۰/۹۱	۰/۹۱
	r	۰/۸۲٥*	۰/۹۱٦**	۰/۹۱۱**	۰/۹۲۷**	۰/۹۰٥**	۰/۹۳۸**	۰/۹۸٥**	۰/۹۷٥**
معادلهٔ فروندلیچ	a	۱٤/۹	٤۸/۲	٦٥/٦	٤۸/٤	٦٦/٦	۷۸/٤	۱۲۱/۱	۸٦/۳
	b	۰/۹۳	۰/۷٦	۰/۷۷	۰/۹۹	۰/۸٦	۰/٦۸	۰/۷۲	۰/٤٦
	r	۰/۹۷٤**	۰/۹۲۷**	۰/۹۷٥**	۰/۹۱٦**	۰/۹۷۰**	۰/۹۷٥**	۰/۹۲٦**	۰/۹۳٥**
معادلهٔ تمکین	k_1	۳۰/٥	٤۳/۸	٤۹/۳	۷٤/٥	٥۸/٤	٤۲/٤	٥۸/٦	۷۷/٥
	k_2	۲۲/٦	۳۱/۲	۳۹/٤	۳۰/٦	۳۹/٦	٤۳/۸	٥۳/۳	٤۲/۹
	r	۰/۸۲۷*	۰/۸۹٥**	۰/۸٦٦**	۰/۹٤۰**	۰/۸٦٦**	۰/۸٦٥**	۰/۹٤۹**	۰/۸٥۳**
معادلهٔ وزنهای	m	-۱۱/۷	۰/٤	-۱٦/۱	-۲٤/٦	-۱۷/٦	-۰/۸	۲۰/٤	۱٦/۱
	n	٥۰/٦	۷۱/۸	۱۰٤/٦	۱۱۲/٦	۱۱۷/۲	۹۷/۲	۱۲٥/۳	۱۳٦/۸
	r	۰/۹٦۳**	۰/۹٦۳**	۰/۹۷۳**	۰/۹۸٥**	۰/۹٦۲**	۰/۹۸۲**	۰/۹۹۱**	۰/۹۹٥**

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۰/۰٥ و ۰/۰۱

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

جدول ۳. ضرایب هم‌بستگی شاخص‌های کمیت جذب (A و a) و برخی ویژگی‌های خاک

ویژگی	A لانگ‌مویر	a فروندلیچ
درصد رس	۰/۸٤۲**	۰/۹٦٦**
درصد کربنات کلسیم معادل	۰/۷۲۲*	۰/۷۸۰*
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۸٥٦**	۰/۸۳۹**
درصد کربن آلی	۰/۳۷۰ns	۰/۲٦۱ns

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

جدول ٤. برخی شاخص‌های بافری و نیاز استاندارد فسفر(SPR) خاک‌های مورد بررسی

شاخص / خاک	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
MBC (ml g^{-1})	٤۰/٤	۱۱۷/٦	۱۳۸/۳	۱٤۲/٦	۱٥٤/۷	۱۷۳/٥	۳۹۳/۹	٤۱٥
SBC (ml g^{-1})	۳۷	۹٤/٥	۱۲٥/٥	۱۲۹/٦	۱۲٦	۱٥۲/٤	۳۰۹/٤	۳۲٦
EBC (ml g^{-1})	۱۸/۲	۸۸	۱٤٥/۷	٤۸/٥	۱۰۲/۱	۳۱۱/۹	۳۳۷	۳۹٦/۹
SPR (mg P kg^{-1})	۱٦	۳۹/۷	٤۱/۲	۳۷/۱	٤٦/٦	٥۲/٤	۸۹	۹۱

ارتباط داشته ولی با درصد CCE هم‌بستگی معنی‌داری نشان نداد (جدول ٥). این شاخص با کلیه شاخص‌های بافری محاسبه شده از معادلهٔ لانگ‌مویر نیز دارای هم‌بستگی معنی‌دار بود (جدول ٦).

ضریب k_1 (شیب) معادلهٔ تمکین نیز به عنوان ظرفیت بافری به کار رفته است (٦، ۸ و ۹). این شاخص ارتباط ضعیف ولی معنی‌داری با درصد رس و CEC خاک (جدول ٥) نشان داد، ولی بجز ضریب n ون‌های، با دیگر شاخص‌های ظرفیت ذکر شده هم‌بستگی نداشت (جدول ٦). هیچ یک از شاخص‌های ظرفیت بافری ارتباط معنی‌داری با درصد کربن آلی موجود در خاک‌ها نشان نداد.

ضریب n (شیب) معادلهٔ ون‌های دیگر شاخص بافری است که رابطه قوی با درصد رس و CEC خاک نشان داد، ولی با درصد CCE ارتباط معنی‌داری نداشت (جدول ٥). این پارامتر هم‌بستگی نسبتاً زیادی با MBC و SBC و k_1 نشان داد (جدول ٦). با توجه به نتایج این پژوهش، از هر یک از شاخص‌های بافری فوق می‌توان در پیش‌بینی قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه استفاده نمود. بهترین شاخص بافری برای خاک‌ها می تواند از طریق تعیین درجه هم‌بستگی این شاخص‌ها با جذب گیاهی تعیین شود.

با توجه به وقت‌گیر و مشکل بودن تعیین شاخص‌های بافری خاک به وسیله هم‌دماهای جذب و رهاسازی فسفر، می‌توان با به کارگیری مدل‌های رگرسیون چند متغیره، آنها را از روی ویژگی‌های خاک برآورد کرد. بدین منظور، رابطه شاخص‌های ظرفیت بافری فسفر و ویژگی‌های خاک به وسیله نرم‌افزار آماری SPSS بررسی گردید. استفاده از روش رگرسیون گام به گام نشان داد که شاخص‌های K , EBC , SBC , MBC و n را می‌توان با دقت زیاد به وسیله میزان رس خاک تخمین زد (جدول ۷). وارد کردن ویژگی‌های دیگر خاک در این رگرسیون افزایش معنی‌داری در ضرایب تبیین ایجاد نکرد، بنابراین این ویژگی‌ها وارد مدل‌های مربوط نشدند. برای برآورد k_1 معادلهٔ تمکین نیز از رگرسیون گام به گام

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

جدول ۵. ضرایب هم‌بستگی شاخص‌های ظرفیت بافری و برخی ویژگی‌های خاک‌ها

ویژگی خاک	شاخص ظرفیت بافری					
	معادله لانگ‌مویر			معادله فروندلیچ	معادله تمکین	معادله ون‌های
	K	MBC	SBC	EBC	k_1	n
درصد رس	۰/۹۲۸**	۰/۹۴۹**	۰/۶۷۳^{ns}	۰/۸۵۷**	۰/۷۷۱*	۰/۹۱۹**
درصد کربنات کلسیم معادل	۰/۸۱۶*	۰/۸۱۶*	۰/۸۳۱*	۰/۶۱۸^{ns}	۰/۷۸۱*	۰/۴۳۷^{ns}
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۷۳۱*	۰/۷۶۷*	۰/۷۸۴*	۰/۷۶۶*	۰/۶۸۷^{ns}	۰/۸۹۸**
درصد کربن آلی	۰/۰۴۸^{ns}	۰/۰۳۲^{ns}	۰/۰۷۱^{ns}	۰/۳۱۱^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۳۲۸^{ns}

ns ، * و ** : به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

جدول ٦. ضرایب هم‌بستگی میان شاخص‌های ظرفیت بافری

شاخص	K	MBC	SBC	EBC	n	k_1
K	–	۰/۹۹**	۰/۸٦**	۰/۸۹**	۰/۷٤*	۰/۵۷^{ns}
MBC		–	۰/۹۹**	۰/۸۸**	۰/۸۰*	۰/٦٤^{ns}
SBC			–	۰/۸۹**	۰/۸۰*	۰/٦۸^{ns}
EBC				–	۰/٦۵^{ns}	۰/٤۷^{ns}
n					–	۰/۸٦**
k_1						–

ns ، * و ** : به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

استفاده شد، که تنها درصد کربنات کلسیم معادل وارد مدل گردید.

غلظت P مورد نیاز برای رشد گیاه در محلول خاک برای گونه‌های مختلف گیاهی متفاوت است. غلظت ppm ۰/۲ به وسیله برخی پژوهشگران به عنوان میزان فسفر لازم برای حداکثر رشد گیاه پیشنهاد گردیده است (۸ و ۹). در حالی‌که مهادی و همکاران (۱۲) مقادیر ۰/۳۱ و ۰/۴۵ ، و اوزان و شاو (۱۷) مقدار µg P/ml ۰/۳ را به عنوان غلظت مناسب فسفر به منظور رشد بهینه گیاه گندم تعیین نمودند. در پژوهش حاضر نیز غلظت µg P/ml ۰/۳ به عنوان شدت مناسب فسفر در محلول خاک در نظر گرفته شد، و محاسبه شاخص SPR (نیاز استاندارد فسفر) بر پایه آن و با استفاده از معادله ون‌های صورت گرفت (جدول ٤). نیاز استاندارد فسفر در واقع نشان دهندهٔ مقدار فسفری است که باید به وسیله یک خاک جذب شود تا غلظت µg P/ml ۰/۳ را در محلول خود ایجاد کند. مقدار این شاخص به شدت تحت تأثیر میزان رس، آهک و ظرفیت بافری خاک است. به سخن دیگر، خاک‌های با درصد رس و CCE زیادتر، به منظور نگهداری غلظت فسفر در محلول در یک حد مطلوب برای تغذیه گیاه، نیاز به افزودن فسفر بیشتری به ازای واحد وزن خاک دارند. چنین خاک‌هایی دارای توانایی جذب فسفر زیاد بوده و حداکثر جذب (A) و انرژی پیوند (K) بیشتری نیز دارند. ضرایب هم‌بستگی میان SPR و ویژگی‌های خاک و پارامترهای جذب فسفر در جدول ۸ مشاهده می‌گردد. ارتباط SPR با K لانگ‌مویر و درصد رس در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

جدول ۷. معادلات رگرسیون گام به گام به منظور برآورد شاخص‌های بافری از روی ویژگی‌های خاک

شاخص بافری	معادله رگرسیون	R^2
MBC	۱٤/۳۰۷ = ۲۰٦/۰۲۳- (درصد رس)	۰/۹۰۲**
SBC	۱۰/۹۷۸ = ۱٤٦/۷- (درصد رس)	۰/۹۲۱**
EBC	۱٤/۰۲٤ = ۲۱٤/۰۷۲- (درصد رس)	۰/۷۳٤**
K	۰/۰۲۹۱ = ۰/۳۳۹- (درصد رس)	۰/۸٦۱**
n	۲/۹٤۳ = ۱۹/۱۲٤+ (درصد رس)	۰/۸٤٥**
k_1	۲/۲۲۲ (CCE%) -۹/٤۲۳ =	۰/٦۱۰*

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

جدول ۸ ضرایب هم‌بستگی میان *SPR* و برخی شاخص‌های کمیت، ظرفیت بافری و ویژگی‌های خاک

شاخص	A	a	MBC	SBC	K	EBC	n	درصد رس	CCE%
SPR	۰/٦۹۹ns	۰/۹۰۹**	۰/۹۸۹**	۰/۹۸۸**	۰/۹۹۰**	۰/۹۱۰**	۰/۸۰۷*	۰/۹٦۰**	۰/۸۰۹*

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

پژوهش‌های دیگر نیز به اثبات رسیده است (٤ و ۲۲).

با توجه به نتایج این پژوهش، چنین برداشت می‌شود که هم‌دماهای جذب می‌توانند اطلاعات مفیدی در مورد توانایی خاک‌ها در جذب فسفر و عوامل مؤثر بر آن و شاخص‌های ظرفیت بافری به ما بدهند. البته هنگامی که هدف ارزیابی قابلیت جذب فسفر برای گیاه باشد، مطالعات رهاسازی و شاخص‌های ظرفیت حاصل از آن را نیز باید مورد بررسی قرار داد. در نظر گرفتن چنین شاخص‌هایی در مراحل عملی آزمون خاک، و بررسی هم‌بستگی آنها با پاسخ‌های گیاهی، کمک شایانی در بهینه نمودن شرایط تغذیه‌ای گیاهان و رسیدن به تولید مناسب خواهد نمود.

منابع مورد استفاده

۱. انگوتی، م. و ع. نگارستان. ۱۳۷۳. مطالعه جذب سطحی فسفر در سه سری خاک منطقه شهریار با استفاده از هم‌دماهای جذب. خلاصه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. خادمی، ز. ، م. دهدشت و ع. ر. افتخار. ۱۳۷۰. طرح مطالعه فسفر مورد نیاز خاک‌های خوزستان با استفاده از ایزوترم جذب و رها شدن فسفر. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران.

۳. فکری کوهبنانی، م. ، م. کلباسی و ش. حاج رسولیها. ۱۳۷۳. مقایسه معادلات لانگ‌مویر یک سطحی و دو سطحی، فروندلیچ و تمکین به منظور توصیف هم‌دماهای جذب سطحی فسفر در بعضی خاک‌های منطقه اصفهان. خلاصه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

4. Agbenin, J. O. and H. Tiessen. 1994. The effects of soil properties on the differential phosphate sorption by semiarid soils from northeast Brazil. Soil Sci. 157: 36-45.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]

5. Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1962. Carbonates. PP 1379-1396. *In:* C. A. Black et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Am. Soc. Agron. , Madison, WI.
6. Anghiononi, I. , V. C. Baligar and R. J. Wright. 1996. Phosphorus sorption isotherm characteristics and availability parameters of Appalachian acidic soils. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 27: 2033-2048.
7. Barrow, N. J. 1978. The description of phosphate adsorption curves. J. Soil Sci. 29: 447-462.
8. Beckwith, R. S. 1964. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of phosphate needs to soils. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. 5: 52-58.
9. Fox, R. L. and E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 402-407.
10. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1, Monograph No. 9, Am. Soc. Agron.
11. Jaszberenyi, I. and J. Loch. 1996. Soil phosphate adsorption and desorption in 0.01 M calcium chloride electrolyte. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 27: 1211-1225.
12. Mehadi, A. A., R. W. Taylor and J. W. Shuford. 1990. Prediction of fertilizer phosphate requirement using the Langmuir adsorption maximum. Plant Soil 122: 267-270.
13. Moughli, L., D. G. Westfall and A. Boukhial. 1993. Use of adsorption and buffer capacity in soil testing for phosphorus. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 24: 1959-1974.
14. Murphy, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta 27: 31-36.
15. Nair, K. P. P. and K. Mengel. 1984. Importance of phosphate buffer power for phosphate uptake by rye. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 92-95.
16. Olsen, S. R. and F. S. Watanabe. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21: 144-149.
17. Ozanne, P. G. and T. C. Shaw. 1968. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate. Int. Cong. Soil Sci. Trans. 2: 273-280.
18. Polyzopoulos, N. A., V. Z. Keramidas and H. Kiosse. 1985. Phosphate sorption by some Alfisols of Greece as described by commonly used isotherms. Soil Sci. Am. J. 49: 81-84.
19. Probert, M. E. and P. W. Moody. 1998. Relating phosphorus quantity, intensity and buffer capacity to phosphorus uptake. Aust. J. Soil Res. 36: 389-393.
20. Rhoads, J. W. 1986. Cation exchange capacity. PP. 149-158. *In*: A. C. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Monograph No 9, Am. Soc. Agron.
21. Solis, P. and J. Torrent. 1989. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 456-459.
22. Tsadilas, C. D. , V. Samaras and D. Dimoyiannis. 1996. Phosphate sorption by red Mediterranean soils from Greece. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 27: 2279-2293.
23. Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examinaion of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. Soil Sci. 79: 459-465.
24. Woodruff, J. R. and E. J. Kamprath. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29: 148-150.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1381.6.1.3.0]