19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بررسی مدل سنتیکی کورس‌مایر–پیاس در ارزیابی مکانیسم رهایش فسفر از کود کندرهای استروویت/بیوچار

مرضیه پیری*[۱]، ابراهیم سپهر[۲]

۱- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، بخش تحقیقات خاک و آب، ارومیه، ایران (piri.ma@yahoo.com*)

۲- گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ایران؛

چکیده

مدیریت مؤثر فسفر یکی از عوامل کلیدی در کشاورزی پایدار است، زیرا استفاده بیش از حد یا نادرست از کودهای فسفری می‌تواند منجر به آلودگی محیط زیست شود. کودهای کندرهای مبتنی بر استروویت و بیوچار به دلیل توانایی آزادسازی کنترل‌شده عناصر غذایی و ویژگی‌های دوست‌دار محیط زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این مطالعه سنتیک رهاسازی فسفر از استروویت و کامپوزیت استروویت (۲۵%)/ لئوناردیت (۷۵٪) در زمان‌های ۲۴ ساعت، ۳، ۵، ۱۰، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۸۴ روز در آب مقطر، اسید سیتریک (۲۰ g/L) و HCl (۰/۵ مولار) بررسی شد، سپس نتایج بر روی معادلات سنتیک برازش داده شدند بعلاوه حلالیت نمونه‌ها نیز بررسی شد. حلالیت و سرعت رهاسازی عناصر فسفر، منیزیم و نیتروژن با افزایش زمان تماس نمونه‌ها با آب، اسید سیتریک و HCL افزایش یافت. بررسی سینتیک رهایش فسفر در محیط مورد مطالعه نشان داد که داده‌های به‌دست‌آمده برازش بهتری با مدل کورس‌مایر-پیاس (R^2= 0.99) داشته‌اند. همچنین مقدار n به‌دست‌آمده از مدل کورس‌مایر-پیاس نشان داد که مکانیسم رهایش فسفر از کود کندرهای استروویت/ بیوچار بر پایه فرایند نفوذ فیکی (n < 0.45) انجام می‌شود، بنابراین بررسی مدل‌های سنتیکی در ارزیابی رفتار کودهای کندرهای فسفاته ضروری می‌باشد.

واژگان کلیدی: فسفر، کود کند رها، اسید سیتریک، مدل‌های سنتیکی، مدل کورس‌مایر-پیاس

مقدمه

فسفر یکی از عناصر پرمصرف و ضروری برای رشد و نمو گیاهان است که در فرآیندهای حیاتی نظیر انتقال انرژی، سنتز اسیدهای نوکلئیک و تشکیل غشاهای زیستی نقش دارد (Schachtman et al., 1998) . با وجود اهمیت حیاتی این عنصر، منابع فسفر معدنی تجدیدناپذیر بوده و پیش‌بینی می‌شود در دهه‌های آینده با محدودیت جدی در عرضه مواجه شوند (Cordell et al., 2009). همچنین، بهره‌وری مصرف فسفر در سامانه‌های زراعی بسیار پایین است و بخش قابل‌توجهی از کود فسفره مصرفی از طریق شست‌وشو و رواناب به منابع آبی منتقل شده و سبب بروز یوتروفیکاسیون می‌شود (Sharpley et al., 2013). در چنین شرایطی، توسعه کودهای کندرها (slow-release) که بتوانند فسفر را به‌صورت تدریجی و همگام با نیاز گیاه آزاد کنند، به‌عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش کارایی مصرف فسفر و کاهش تلفات زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است (Trenkel, 2010).

از میان مواد نوظهور برای تولید کودهای کندره، استروویت ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) و بیوچار به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ویژه، زیست‌سازگاری بالا و قابلیت تولید از منابع پسماندی، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. استروویت محصول رسوبی بازیافت فسفر از جریان‌های فاضلاب و پساب است که حلالیت پایین و رفتار رهایشی تدریجی دارد و می‌تواند به‌طور مؤثری به‌عنوان منبع

فسفر در کشاورزی عمل کند (Le Corre et al., 2009). بیوچار نیز به‌عنوان یک ماده کربنی متخلخل حاصل از پیرولیز زیست‌توده، ظرفیت بالایی برای جذب فسفات و فراهم کردن بستری پایدار برای بارگذاری و تثبیت استرووایت دارد و می‌تواند سرعت رهایش فسفر را تعدیل و ویژگی‌های کودهای کندره را بهبود بخشد (Li et al., 2024).

ارزیابی رفتار رهایش فسفر از این ترکیبات کندره مستلزم استفاده از مدل‌های سینتیکی است، زیرا این مدل‌ها با تحلیل داده‌های تجربی امکان شناسایی مکانیزم‌های کنترل‌کننده فرآیند و استخراج پارامترهای طراحی را فراهم می‌کنند (Ho and Mckay, 1999). در این زمینه، مدل‌های مرتبه اول (pseudo-first-order) و مرتبه دوم (pseudo-second-order) بیشترین کاربرد را داشته‌اند و معمولاً برازش بهتر داده‌ها با مدل مرتبه دوم گزارش شده است که نشان‌دهنده غالب بودن فرآیندهای شیمیایی سطحی مانند تبادل یونی یا تشکیل پیوندهای شیمیایی است (Morais et al., 2023). علاوه بر این، مدل الویچ برای توصیف سیستم‌های ناهمگن و واکنش‌های سطحی پیچیده و همچنین مدل نفوذ درون‌ذره‌ای برای بررسی نقش مقاومت نفوذی در ساختارهای متخلخل بیوچار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rahman et al., 2021).

در کنار این مدل‌ها، مدل کورس‌مایر-پپاس نیز برای تحلیل داده‌های رهایش فسفر به‌ویژه در سیستم‌های پلیمری یا ماتریس‌های مرکب متخلخل کاربرد دارد و با استفاده از ضریب رهایش (n) می‌تواند نوع مکانیزم انتقال (نفوذ فیکی، نفوذ غیر فیکی یا انتقال موردکنترل توسط فرسایش) را مشخص نماید (Korsmeyer et al., 1983) . به کارگیری این مدل در بررسی کودهای استرووایت/بیوچار می‌تواند درک بهتری از رفتار چندمرحله‌ای و ترکیبی رهایش فسفر فراهم آورد و مکمل سایر مدل‌های سینتیکی باشد.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در کودهای مرکب استرووایت/بیوچار، رهایش فسفر تحت تأثیر هم‌زمان چندین عامل از جمله حلالیت ذاتی استرووایت، ویژگی‌های تخلخل و گروه‌های عاملی بیوچار، و همچنین شرایط محیطی نظیر pH ، حضور سایر یون ها قرار دارد(Li et al., 2024). در محیط‌های خاکی، این ترکیبات معمولاً الگوی رهایش چندمرحله‌ای از خود نشان می‌دهند که شامل یک فاز اولیه سریع ناشی از حل شدن سطحی و یک فاز کندتر کنترل‌شده به‌وسیله نفوذ درون‌ذره‌ای و برهم‌کنش‌های سطحی است (Rahman et al., 2021). از این رو، بهره‌گیری از مدل‌های سینتیکی چندگانه از جمله مدل کورس‌مایر-پپاس می‌تواند به درک دقیق‌تر رفتار رهایش فسفر از این سامانه‌ها و بهینه‌سازی طراحی کودهای فسفره کندرها کمک نماید. به طور کلی، بررسی و مقایسه مدل‌های سینتیکی مختلف در ارزیابی رهایش فسفر از کودهای استرووایت/بیوچار انگور نه تنها از منظر علمی اهمیت دارد بلکه می‌تواند در توسعه راهبردهای مدیریتی پایدار برای بازیافت و مصرف بهینه فسفر در کشاورزی نقشی اساسی ایفا کند.

مواد و روش‌ها

مطالعه سنتیک آزاد سازی فسفر از کامپوزیت کندرها استرووایت ۲۵/بیوچار ۷۵

ویژگی های کامپوزیت کندرها استرووایت ۲۵/بیوچار ۷۵ سنتز شده در مقاله قبلی گزارش شده است (Piri and Sepehr, 2023). رهاسازی مواد مغذی طبق پروتکل استاندارد کود آهسته رهش انجام شد (GB 23348-2009). بر روی ۱۰ گرم نمونه کود ۲۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه ریخته و در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگه داشته شد. برای شبیه سازی محیط اسیدی اطراف ریشه، ۲۰۰ میلی لیتر محلول ۲۰ گرم بر لیتر اسید سیتریک بر روی ۱۰ گرم کامپوزیت استرووایت/بیوچار ریخته و در انکوباتور نگه داشته شد (Hu *et al.* 2017). بعلاه میزان رهاسازی در حضور ۰/۵ مولار HCl نیز بررسی شد بطوریکه بر روی ۱۰ گرم نمونه ۲۰۰ میلی لیتر محلول HCl نیم مولار ریخته شد. پس از آماده سازی تیمارها و قرار دادن در انکوباتور در زمان‌های ۲۴ ساعت، ۳، ۵، ۱۰، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۸۴ روز نمونه برداری شده غلظت فسفر، نیتروژن و منیزیم مطابق روش‌های ذکر شده

در بالا اندازه گیری شد. درصد تجمعی عناصر آزاد شده (cumulative release values) با استفاده از رابطه (۳) زیر مشخص شد :

(۱)

$$\%\ \text{Accumulative release} = \frac{C_t \times V}{M_{total}} \times 100$$

در معادله (۱) C_t غلظت فسفر، منیزیم و نیتروژن در زمان‌های مختلف است و M_{total} مقدار کل هر یک از عناصر می‌باشد. برای بررسی مکانسیم انتقال فسفر از نمونه‌های رسوب داده شده نتایج آزمایشات سنتیک بر روی معادلات غیر خطی درجه اول (۲)، درجه دوم (۳)، ایلوویچ (۴)، توانی (۵) و کورس‌مایر-پپاس (۶) برازش داده شد:

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad (۲)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (۳)$$

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \mathrm{Ln}(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \mathrm{Ln}t \quad (۴)$$

$$q_t = a t^b \quad (۵)$$

$$\log q = log K + n log\ t \quad (۶)$$

در معادلات بالا ثابت K_1 و K_2، سرعت مقدار تجمعی عناصر آزاد شده ،q_e و q_t به ترتیب درصد تجمعی عناصر آزاد شده در زمان تعادل و زمان t (میلی‌گرم بر گرم)، α و β، ثابت معادله ایلوویچ و a و b ثابت‌های معادله توانی می‌باشند. مهمترین پارامتر در این معادلا ثابت b می باشد که سرعت رهاسازی عناصر را نشان می دهد. از نرم افزار Excel برای ترسیم نمودارها و برازش داده‌ها بر روی معادلات استفاده شد و از پارامتر (R^2) برای مشخص کردن مدل بهتر در توصیف داده های سنتیک استفاده شد.

نتایج و بحث

حلالیت استرووایت و کامپوزیت (٪ ۲۵استرووایت : ۷۵٪بیوچار) در آب مقطر، ۲۰ g/L اسید سیتریک و ۰/۵ مولار HCl در جدول ۱ نشان داده شده است. حلالیت نمونه‌ها در اسید کلریدریک نیم مولار بیشتر از اسیدسیتریک و آب مقطر بدست آمد و از آنجا که مقدار عناصر فسفر، نیتروژن و منیزیم در استرووایت < ۲۵٪ استرووایت : ۷۵٪ بیوچار لذا این روند در مقدار عناصر عصاره‌گیری شده در حضور اسید کلریدریک، اسید سیتریک و آب مقطر مشاهده شد اما سرعت رهاسازی عناصر در حضور بیوچار افزایش یافت (جدول ۱).

درصد تجمعی عناصر آزاد شده (٪cumulative release values) از نمونه‌ها بصورت مقابل است ۲۵٪ استرووایت : ۷۵٪ بیوچار < استرووایت (St). از آنجا که بیوچار انگور دارای سطح ویژه بالا است لذا جذب و رهاسازی عناصر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار تجمعی فسفر آزاد شده در آب مقطر در نمونه های استرووایت و ٪ ۲۵استرووایت : ۷۵٪ بیوچار به ترتیب ۵/۵۷ و ۹/۴۴ درصد بدست آمد و در اسید سیتریک ۲۰ g/L به ترتیب ۸۴ و ۹۴ درصد بدست آمد و در HCl نیم مولار نیز به ترتیب ۸۷ و ۹۹ درصد بدست آمد. مقدار تجمعی نیتروژن و منیزیم آزاد شده از آن نمونه‌ها همان روند را نشان دادند. همانگونه که مشاهده می‌شود درصد تجمعی عناصر آزاد شده در HCl نیم مولار (pH=۰/۳) بیشتر از آب مقطر و ۲۰ g/Lاسید سیتریک (pH ~ ۳).

جدول ۱- حلالیت نمونه ها (استرووایت، ۲۵٪ استرووایت: ۷۵% بیوچار) در آب مقطر، ۲۰ g/L اسید سیتریک و ۰/۵ مولار اسید کلرید ریک

%Struvite:% biochar	solution	P(g L^{-1})	Dissolution (٪) rate	N(g L^{-1})	Dissolution (٪) rate	Mg (g L^{-1})	Dissolution (٪) rate
	water	۱/۳۵	۱/۰۶	۰/۰۴۶	۵/۵۰	۰/۰۰۹۶	۱/۴۵
٪۷۵ بیوچار: ٪۰ استروویت	citric acid	۷۷/۸۸	۶۱/۴۳	۰/۱۷	۲۰/۴۱	۰/۴۴۶۴	۶۷/۷۱
	HCl	۱۰۴/۰۵	۸۲/۰۸	۰/۲۳	۲۷/۳۲	۰/۶۴۸	۹۸/۳۰
	water	۰/۸۳	۱/۳۳	۰/۵۰	۱۰/۷۸	۰/۰۰۹۶	۲/۹۴
٪۷۵ استروویت: ٪۲۵ بیوچار	citric acid	۵۴/۹۴	۸۷/۵۵	۰/۱۹	۴۵/۳۲	۰/۲۵۴۴	۷۷/۹۰
	HCl	۵۷/۱۲	۹۱/۰۳	۰/۲۸	۵۹/۹۰	۰/۳۲	۱۰۰

نتایج برازش داده‌های سنتیک رهاسازی فسفر در آب، اسید سیتریک و هیدروکلریک اسید بر روی معادلات درجه اول (First-order)، درجه دو (Second-order)، تابع توانی (Fractional power) ، ایلوویچ (Elovich) و کورس‌مایر-پپاس (Korsmeyer-peppas) در جدول۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد داده‌های سنتیک رهاسازی فسفر در آب، اسید سیتریک و اسید کلریدریک با مدل کورس‌مایر-پپاس (R^2=۰/۹۹) برازش بهتری نشان داد. فاکتور K به عنوان شاخصی از سرعت رهاسازی فسفر است و مطابق معادلات درجه اول و درجه دو در جدول ۲ بیشترین سرعت رهاسازی فسفر در HCl نیم مولار و سپس در اسید سیتریک و آب بدست آمد.

معادله	آب			اسید سیتریک			اسیدکلریدریک		
درجه اول	q_0	b	R^2	q_0	b	R^2	q_0	b	R^2
٪۱۰۰ استروویت	۰/۰۳	۵/۹۱	۰/۹۷	۰/۸۱	۹۲/۳۷	۰/۸۹	۰/۹۳	۸۲/۴۲	۰/۹۴
٪۲۵ استروویت: ٪۷۵ بیوچار	۰/۰۵	۱۰/۵۲	۰/۹۸	۱/۲۳	۹۷/۳۹	۰/۹۷	0.77	92.05	۰/۹۶
	آب			اسید سیتریک			اسیدکلریدریک		
درجه دو	K_2	q_e	r^2	K_2	q_e	r^2	K_2	q_e	r^2
٪۱۰۰ استروویت	۰/۰۱	۸/۱۳	۰/۹۶	۱/۰۱	۹۶/۳۳	۰/۹۶	۰/۰۶	۸۷/۲۶	۰/۹۱
٪۲۵ استروویت: ٪۷۵ بیوچار	۰/۰۴	۱۴/۷۶	۰/۹۷	۱/۶۲	۱۰۱/۲۵	۰/۹۶	۰/۸۸	۹۷/۷۵	۰/۹۸
	آب			اسید سیتریک			اسیدکلریدریک		
تابع توانی	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
٪۱۰۰ استروویت	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۹۷	۳۹/۵۹	۰/۳۷	۰/۸۸	۴۹/۳۰	۰/۱۹	۰/۶۹
٪۲۵ استروویت: ٪۷۵ بیوچار	۲/۶۲	۰/۳۸	۰/۹۷	۵۴/۶۱	۰/۲۲	۰/۸۱	۵۵/۵۱	۰/۲۴	۰/۷۹
	آب			اسید سیتریک			اسیدکلریدریک		
ایلوویچ	α	β	r^2	α	β	r^2	α	β	r^2
٪۱۰۰ استروویت	۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۹۱	۴/۷۴	۶/۱۳	۰/۹۹	۳/۵۴	۵/۱۲	۰/۹۴
٪۲۵ استروویت: ٪۷۵ بیوچار	۱/۱۸	۰/۷۳	۰/۹۰	۶/۷۱	۸/۵۲	۰/۹۹	۴/۶۷	۶/۲۱	۰/۹۰
	آب			اسید سیتریک			اسیدکلریدریک		

کورس‌مایر-پیاس	n	k	R^2	n	k	R^2	n	k	R^2
۱۰۰٪ استرووایت	۰/۲۷	۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۱۸	۵۱/۳۵	۰/۷۰	۰/۲۷	٤۰/۰۸	۰/۹۹
۲۵٪ استرووایت: ۷۵٪ بیوچار	۰/۳۸	۲/۵۳	۰/۹۹	۰/۲۲	۷۵/۷۰	۰/۸۰	۰/۳۲	٥٤/۹۲	۰/۹۹

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که ارزیابی رهایش فسفر از کودهای کندرها استرووایت و استرووایت/بیوچار با مدل‌های سینتیکی مختلف، امکان درک دقیق‌تری از سازوکار آزادسازی این عنصر را فراهم می‌سازد. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که مدل کورس‌مایر-پیاس برازش بهتری با روند رهایش فسفر در محیط‌های مورد مطالعه داشته و بالاترین ضریب تعیین (R^2= 0.99) را در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی ارائه کرده است. همچنین، مقدار n به‌دست‌آمده از این مدل کمتر از ۰/۴۵ بود که بیانگر آن است که فرایند رهایش فسفر عمدتاً تحت کنترل نفوذ فیکی انجام می‌شود. این امر نشان می‌دهد که حرکت تدریجی یون‌های فسفات از درون ساختار متخلخل بیوچار و بلورهای استرووایت به محیط اطراف، عامل اصلی تعیین‌کننده سرعت رهایش است و واکنش‌های شیمیایی نقش کمتری در این فرایند دارند. در مجموع، این نتایج تأکید می‌کنند که استفاده از بیوچار به‌عنوان بستر تثبیت استرووایت می‌تواند ضمن کنترل سرعت رهایش فسفر، امکان طراحی و توسعه کودهای فسفره کندره با عملکرد پایدارتر و کارایی بالاتر را فراهم آورد.

فهرست منابع

Cordell, D., Drangert, J. O., White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 19(2), 292–305.

Ho, Y. S., and McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34(5), 451–465.

Hu, Y., Yuan, B., Cheng, F., and Hu, X. (2019). NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy. Composites Part B: Engineering. 178: 107478.

Korsmeyer, R. W., Gurny, R., Doelker, E., Buri, P., Peppas, N. A. (1983). Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers. International Journal of Pharmaceutics, 15(1), 25–35.

Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Parsons, S. A. (2009). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 39(6), 433–477.

Li, Y., Chi, D., Sun, Y., Wang, X., Tan, M., Guan, Y., Wu, Q., Zhou, H. (2024). Synthesis of struvite-enriched slow-release fertilizer using magnesium-modified biochar: Desorption and leaching mechanisms. Science of The Total Environment, 912, 168527.

Morais, E., Jindo, K., Silva, C. (2023). Biochar-based phosphate fertilizers: Synthesis, properties, kinetics of P release and recommendation for crops. Agronomy, 13(5), 1312.

Piri, M., and Sepehr, E. (2022). Biochar-Based Phosphate Fertilizers: Synthesis, Properties, Kinetics of P Release and Recommendation for Crops Grown in Oxisols. Agronomy, 13 (2): 326.

Rahman, M.A., Lamb, D., Kunhikrishnan, A., Rahman, M.M. (2021). Kinetics, isotherms and adsorption–desorption behavior of phosphate on modified biochars. Water, 13(5), 699.

Schachtman, D. P., Reid, R. J., Ayling, S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. Plant Physiology, 116(2), 447–453.

Sharpley, A., Jarvie, HP., Buda, A., May, L., Spears, B., Kleinman, P. (2013). Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to improve soil and water quality. Journal of Environmental Quality, 42(5), 1308–1326.

Silva, M., Baltrusaitis, J. (2020). A review of phosphate adsorption on Mg-containing materials: Kinetics, isotherms and mechanisms. Environmental Science and Pollution Research, 27, 26532–26551.

Trenkel, M. E. (2010). Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA).

19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

Study of the Kursmeyer-Peppas kinetic model in evaluating the mechanism of phosphorus release from struvite/biochar fertilizers

Marziyeh Piri[1], Ebrahim Sepehr[2]

1- West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Soil and Water Research Department, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran, 2- Department of Soil Science; Urmia University; Urmia, Iran

Abstract

Effective phosphorus management is one of the key factors in sustainable agriculture, because excessive or improper use of phosphorus fertilizers can lead to environmental pollution. Struvite and biochar-based fertilizers have attracted much attention due to their ability to release nutrients in a controlled manner and their environmentally friendly properties. In this study, the kinetics of phosphorus release from struvite and struvite (25%)/leonardite (75%) composites were investigated at 24 h, 3, 5, 10, 14, 28, 42, 56 and 84 days in distilled water, citric acid (20 g/L) and HCl (0.5 M). Then, the results were fitted to kinetic equations. In addition, the solubility of the samples was also investigated. The solubility and release rate of phosphorus, magnesium and nitrogen elements increased with increasing contact time of samples with water, citric acid and HCL. The investigation of the kinetics of phosphorus release in the studied environment showed that the obtained data had a better fit with the Korsmeyer-Peppas model (R^2 = 0.99). Also, the value of n obtained from the Korsmeyer-Peppas model showed that the mechanism of phosphorus release from struvite/biochar fertilizers is based on the Fickian diffusion process (n < 0.45), therefore, the investigation of kinetic models is necessary to determine the behavior of phosphate fertilizers.

Keywords: Phosphorus, Slow-release fertilizer, Citric acid, Kinetic models, Korsmeyer-Peppas model