

## سینتیک واجذب کادمیم در حضور کمپوست پوست نرم بادام و بیوچار آن در خاک آهکی

زهرا دیانت مهارلویی<sup>۱</sup>، مجید فکری<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۱)

### چکیده

کادمیم یکی از رایج‌ترین و خطرناک‌ترین آلودگی‌های محیط زیست می‌باشد. اثر کمپوست پوست نرم بادام و بیوچار آن بر سینتیک واجذب کادمیم در یک خاک آهکی در مزرعه دانشکده کشاورزی شهید باهنر کرمان بررسی شد. به همین منظور از کمپوست و بیوچار پوست نرم بادام در سه سطح (صفر، ۲ و ۴ درصد وزنی) استفاده شد که به خاک آهکی آلوده با سطوح صفر، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم افزوده گردید. نمونه‌برداری از خاک‌های تیمار شده، ۴۵ و ۹۰ روز بعد از آلوده شدن خاک‌ها با کادمیم، انجام شد. در دوره‌های زمانی مختلف از ۵ تا ۲۸۸۰ دقیقه به وسیله EDTA عصاره‌گیری شدند و غلظت کادمیم موجود در نمونه‌ها تعیین گردید. نتایج نشان داد که کاربرد کمپوست و بیوچار پوست بادام باعث کاهش واجذب کادمیم نسبت به تیمار شاهد شد، کمترین میزان واجذب کادمیم در خاک، در سطح ۴ درصد وزنی بیوچار و کمپوست رخ داد، در حالیکه بیوچار بیشترین کاهش را در میزان واجذب کادمیم در مقایسه با کمپوست داشت. براساس نتایج حاصل از آزمایش، واجذب کادمیم در تمامی تیمارها در زمان‌های اولیه بیشترین مقدار بود و با گذشت زمان کاهش یافت. به عبارت دیگر ۵۰ درصد واجذب کادمیم در ۲ ساعت اولیه رخ داد. در نمونه‌برداری‌های ۹۰ روزه در مقایسه با ۴۵ روزه، واجذب کادمیم از خاک بیشترین کاهش را نشان داد. براساس ضریب تبیین و خطای استاندارد بهترین معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله پیش‌بینی کننده روند سینتیک واجذب کادمیم در خاک مورد مطالعه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پوست نرم بادام، سینتیک واجذب، کادمیم، کمپوست، معادلات سینتیکی

دیانت مهارلویی ز.، فکری م. ۱۳۹۹. سینتیک واجذب کادمیم در حضور کمپوست پوست نرم بادام و بیوچار آن در خاک آهکی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۳. صفحه: ۶۸-۸۲.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. (مکاتبه کننده)

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

\* پست الکترونیک: [zahradianat@agr.uk.ac.ir](mailto:zahradianat@agr.uk.ac.ir)

## مقدمه

است که در تمام نقاط ایران وجود دارد، کشاورزان پس از برداشت میوه بادام، پوست نرم آن را جدا می‌نمایند و به صورت ضایعات بلا استفاده به مقدار زیادی جمع‌آوری می‌کنند.

هدف از این پژوهش استفاده از کمپوست و بیوجار پوست نرم بادام و استفاده بهینه از این بهسازها به‌عنوان جاذب برای به حداقل رساندن آلودگی خاک‌ها به کادمیم و در نهایت پاک‌سازی محیط زیست می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

جهت انجام این آزمایش، مقدار کافی خاک از افق سطحی صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک از مزرعه دانشکده کشاورزی شهید باهنر کرمان جمع‌آوری شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک دو میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (Bouyoucos, 1962)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع (توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Rhoades, 1996) *et al.*، pH در خمیر اشباع (توسط دستگاه pH-متر (Thomas, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با روش جاننشینی کاتیون‌ها با استات سدیم (Chapman & Pratt, 1965)، همچنین، مقدار ماده آلی با روش اکسایش مرطوب (Nelson & Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی به وسیله اسید کلریدریک (Allison & Moodie, 1965)، فسفر قابل استفاده با روش بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار در pH ۸/۵ (Olsen *et al.*, 1954)، نیتروژن کل با روش کلدال (Bremner, 1996)، پتاسیم قابل استخراج توسط استات آمونیوم مولار خنثی (Helmake & Sparks, 1996) و عناصر کم مصرف و کادمیم با روش عصاره‌گیری با DTPA و تعیین غلظت با دستگاه جذب اتمی (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

برای تهیه کمپوست پوست نرم بادام (C) از روش ویندرو استفاده شد. جهت تهیه بیوجار (B) از کمپوست تهیه شده از پوست نرم بادام موجود در باغ بادام در شهرستان شیراز (استان فارس) استفاده شد. کمپوست پس از هوا خشک شدن، آسیاب و سپس در ورقه‌های آلومینیومی بسته‌بندی گردید، تا فرایند اکسیژن رسانی به آن محدود شود. سپس به مدت چهار ساعت در دمای ۵۰۰

امروزه آلودگی خاک با فلزات سنگین به دلیل اثرات مضر اکولوژیکی، تبدیل به یک نگرانی زیست محیطی شده است. این عناصر به سبب سمیت برای ریزجانداران خاک، گیاهان و در نهایت انسان، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Akoto *et al.*, 2009). منبع و منشأ این نوع از آلودگی‌ها می‌تواند از منابع صنعتی، کودهای شیمیایی، کودهای حیوانی، لجن‌های فاضلاب، علف‌کش‌ها و آبیاری با پساب فاضلاب باشد (Khan *et al.*, 2008). یکی از موثرترین راه‌کارها برای کاهش میزان فلزات سنگین در محصولات کشاورزی، استفاده از بقایا و بیوجار به عنوان منبعی از مواد آلی، جهت کاهش غلظت این عناصر در محلول خاک می‌باشد، تا از جذب و انتقال این عناصر به گیاهان جلوگیری شود این ترکیبات آلی، به طور مستقیم یا غیرمستقیم وضعیت فلزات سنگین خاک را از طریق اثر بر حلالیت و یا سینتیک تفکیک آنها تغییر می‌دهد (Karaca, 2004). بیوجار به عنوان یک ماده آلی نیمه سوخته و زغال شده معرفی می‌شود که جهت بهبود ویژگی‌های خاک و ترسیب کربن مورد استفاده قرار می‌گیرد تولید بیوجار بوسیله فرایند حرارتی (تغییرات شیمیایی مواد آلی در نتیجه حرارت) و تحت شرایط کم اکسیژن یا بدون اکسیژن انجام می‌شود (Lehmann & Joseph, 2012).

کریشنامورفی و همکاران (Krishnamurti *et al.*, 1999) بیان کردند که جذب و واجذب عناصر از خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تاثیرگذار بر رفتار آنها در خاک است بنابراین، قابلیت دسترسی و پتانسیل سمیت آنها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین اطلاع از سرعت واجذب عناصر از خاک می‌تواند تغییر و تبدیل، قابلیت دسترسی و تحرک این عناصر را در خاک پیش‌بینی نماید و در نتیجه، به تعیین زمان و ماندگاری این عناصر در خاک کمک می‌کند.

قاسمی فسایی و جراح (Ghasemi-Fasaei & Jarrah, 2013) در بررسی سینتیک جذب روی و کادمیم در ده خاک آهکی نشان دادند که الگوی جذب هر دو عنصر در ابتدای جذب (دو ساعت ابتدایی) سریع بوده و بعد از آن کاهش نشان داده است. همچنین آنان معادله تابع توانی را به عنوان بهترین معادله جهت پیش‌بینی جذب کادمیم در خاک‌های آهکی معرفی کردند. بادام یکی از گیاهانی

۳۰، ۶۰، ۲۴۰، ۱۲۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه) با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه تکان داده شد.

پس از اتمام هر زمان تکان دادن، لوله‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه گریز از مرکز قرار داده شد و سپس محلول زلال رویی از کاغذ صافی عبور و سپس غلظت کادمیم، عصاره‌گیری شده توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، الویج ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی سهموی جهت توصیف سینتیکی واجذب عناصر ذکر شده، مورد استفاده قرار گرفت معادلاتی که دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطا استاندارد هستند به عنوان بهترین معادلات پیش‌بینی کننده سینتیک واجذب کادمیم در خاک انتخاب گردید سپس ضرایب مربوط به معادلات با قدرت پیش‌بینی بالا محاسبه و میانگین این ضرایب بین تیمارهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۳).

پس از به دست آوردن داده‌های حاصل از تجزیه آزمایشگاهی و گلخانه‌ای، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد و Excel تجزیه و تحلیل شد.

خطای استاندارد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SE = \left( \frac{(\sum (Mt - Mt^*))^2}{n - 2} \right)^{0.5} \quad (1)$$

که در این رابطه  $Mt$  مقدار فلز آزاد شده ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) در زمان  $t$  (ثانیه)،  $Mt^*$  مقدار فلز برآورد شده ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) از معادلات سرعت در زمان  $t$  (ثانیه)، و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

## نتایج و بحث

### سینتیک واجذب کادمیم در خاک

در شکل (۱، ۲، ۳ و ۴) اثر افزودن بیوچار و کمپوست پوست نرم بادام به خاک بر واجذب کادمیم در زمان‌های مختلف عصاره‌گیری نسبت به سطح شاهد نشان داده شده است. تغییرات بوجود آمده از اثر دوره‌های زمانی مختلف (۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه) بر واجذب کادمیم در خاک‌های تیمار شده، ۴۵ و ۹۰ روز بعد از خوابانیدن می‌باشد.

درجه سلسیوس در داخل کوره قرار دادند تا بیوچار تولید گردد (Hall et al., 2008). این پژوهش شامل فاکتور نیترا کادمیم در سه سطح (۰، ۴۰ و ۸۰ میلی-گرم بر کیلوگرم خاک)، فاکتور بیوچار (B) و کمپوست پوست نرم بادام (C) در سه سطح (۰، ۲ و ۴ درصد وزنی) در سه تکرار انجام شد. پس از آسیاب کردن کمپوست و بیوچار و عبور از الک ۰/۵ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های شیمیایی مانند pH، ماده آلی و قابلیت هدایت الکتریکی اندازه‌گیری گردید.

جهت انجام تجزیه‌های شیمیایی کمپوست و بیوچار، یک گرم از کمپوست و بیوچار پوست نرم بادام در کوره الکتریکی به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر و سپس در اسید کلریدریک دو نرمال حل شد و پس از عبور از کاغذ صافی، با آب مقطر به حجم رسانده شد. غلظت عناصر آهن، منگنز، روی، مس و کادمیم موجود در بیوچار و کمپوست با دستگاه جذب اتمی، غلظت فسفر به روش آمونیوم مولیبدات و انادات (Chapman & Pratt, 1961) و مقدار نیتروژن کل به روش کدال (Bremner, 1996) اندازه‌گیری شدند (جدول ۲).

جهت انجام آزمایش، یک کیلوگرم خاک را درون گلدان‌هایی ریخته سپس دو تیمار کمپوست پوست نرم بادام و بیوچار آن در سه سطح (صفر، دو و چهار درصد وزنی) به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد و به مدت ۲ ماه در شرایط رطوبت مزرعه‌ای در دمای  $25 \pm 5$  درجه سلسیوس در گلخانه خوابانیده شد بعد از ۲ ماه خوابانیدن، کادمیم در سه سطح (صفر، ۴۰ و ۸۰ میلی-گرم بر کیلوگرم) از نمک نیترا کادمیم به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد و سپس در شرایط مانند قبل (شرایط رطوبت مزرعه‌ای در دمای  $25 \pm 5$  درجه سلسیوس) به مدت ۳ ماه دیگر نگهداری گردید. در فاصله زمانی سه ماهه، جهت مطالعات سینتیکی در دو زمان ۴۵ روز و ۹۰ روز پس از خوابانیدن از شروع اضافه کردن کادمیم به خاک، نمونه‌های ۵ گرمی خاک در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و سپس ۲۵ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر EDTA ۰/۰۱ مولار (Dang et al., 1994) به نمونه‌ها افزوده و در دستگاه تکان‌دهنده به صورت جداگانه و برای دوره‌های زمانی مختلف (۵، ۱۵،

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش  
Table 1. Some physical and chemical properties of the soil tested

Property	Unit	Value
Soil texture	-----	Sandy loam
sand	(%)	75.56
silt	(%)	16
clay	(%)	8.44
OM	(%)	0.69
CCE	(%)	8.32
Ec	(dS m <sup>-1</sup> )	2.39
pH	-----	7.50
CEC	(Cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	8.93
N	(%)	0.03
K	(mg kg <sup>-1</sup> )	433
P	(mg kg <sup>-1</sup> )	14
Mn	(mg kg <sup>-1</sup> )	1.74
Cu	(mg kg <sup>-1</sup> )	0.5
Fe	(mg kg <sup>-1</sup> )	1.52
Zn	(mg kg <sup>-1</sup> )	0.72
Cd	(mg kg <sup>-1</sup> )	Insignificant

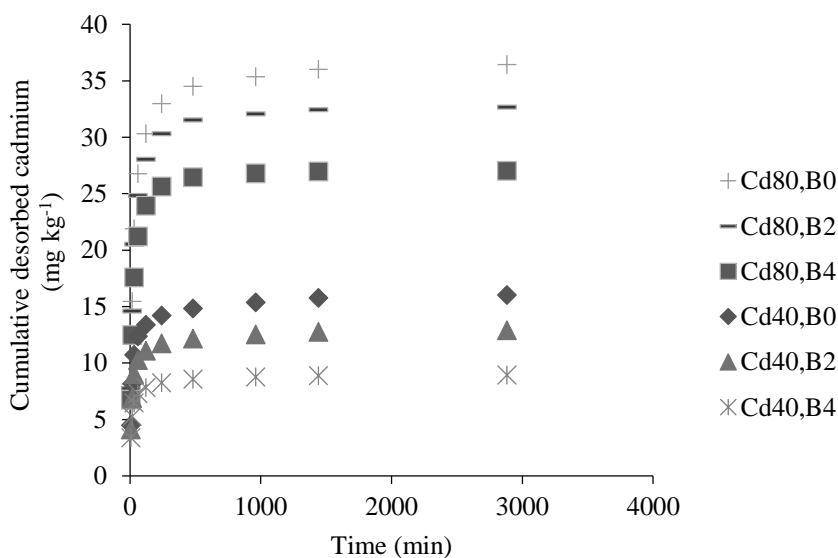
جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی کمپوست و بیوچار مورد آزمایش  
Table 2. Some of the chemical properties of the compost and biochar tested

Property	Unit	Soft almond husk biochar	Soft almond husk compost
pH	-----	11.61	4.83
EC	(dS m <sup>-1</sup> )	7.93	1.61
N	(%)	0.68	0.55
P	(%)	0.14	0.13
K	(%)	0.63	0.42
Fe	(mg kg <sup>-1</sup> )	140	90
Zn	(mg kg <sup>-1</sup> )	28.06	12.24
Cu	(mg kg <sup>-1</sup> )	8.03	4.08
Mn	(mg kg <sup>-1</sup> )	13.27	8.67
Cd	(mg kg <sup>-1</sup> )	Insignificant	Insignificant

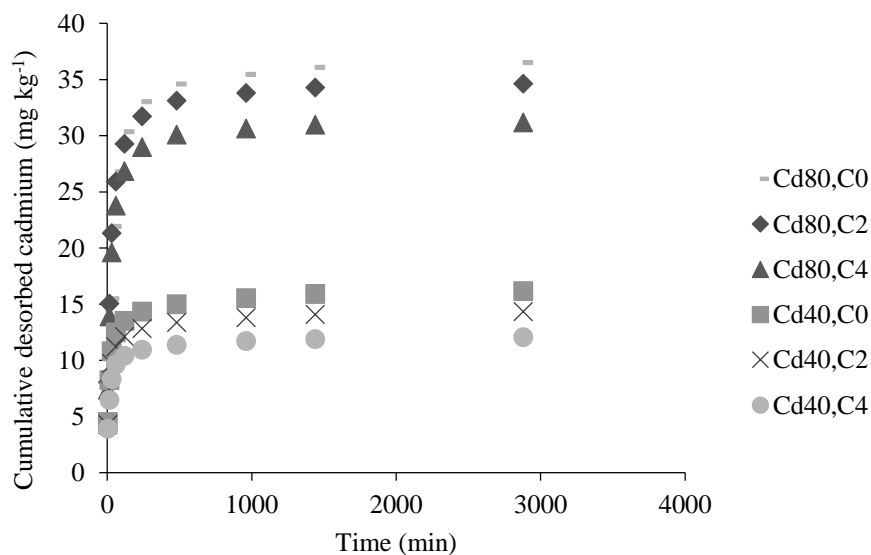
جدول ۳- معادله سینتیک مورد استفاده در آزمایش  
Table 3. The kinetic equation used in the experiment

Equation number	Kinetic model	Equations	Coefficients
(1)	Zero order	$q_t = q_0 - k_0 t$	$k_0$ , desorption rate constant (mg kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
(2)	first order	$\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$	$k_1$ , desorption rate constant (s <sup>-1</sup> )
(3)	second order	$1/q_t = 1/q_0 - k_2 t$	$k_2$ , desorption rate constant [(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ]
(4)	Third order	$1/q_t^2 = 1/q_0^2 - k_3 t$	$k_3$ , desorption rate constant [(mg kg <sup>-2</sup> ) s <sup>-2</sup> ]
(5)	Parabolic diffusion	$q_t = q_0 - k_p t^{1/2}$	$K_p$ , desorption rate constant [(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup> ]
(6)	Elovich	$q_t = 1/\beta \ln(\alpha_s \beta_s) + (1/\beta_s) \ln t$	$\alpha_s$ , (mg kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ), $\beta_s$ [(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ], Equations constants
(7)	two-constant rate equations	$q_t = a t^b$	$a$ , (mg kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ), $b$ [(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ], Equations constants

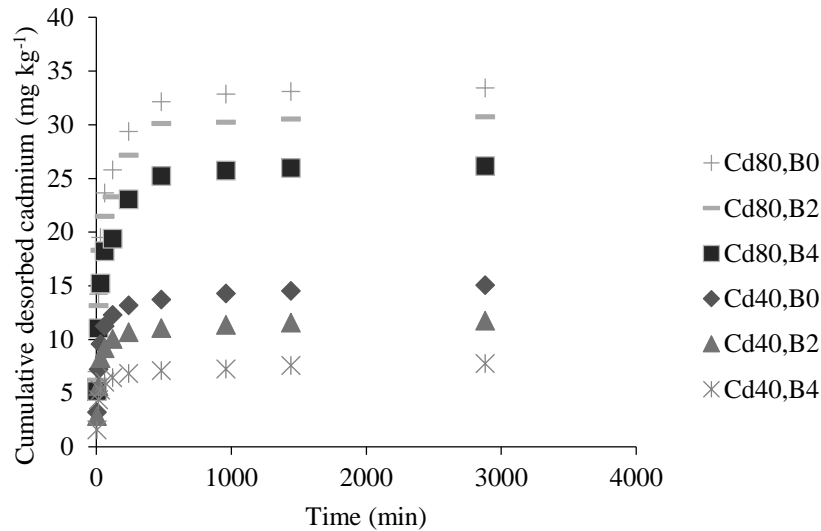
$q_t$ : The amount of element desorbed at time  $t$  (s)  $q_0$ : The amount of element desorbed at startup



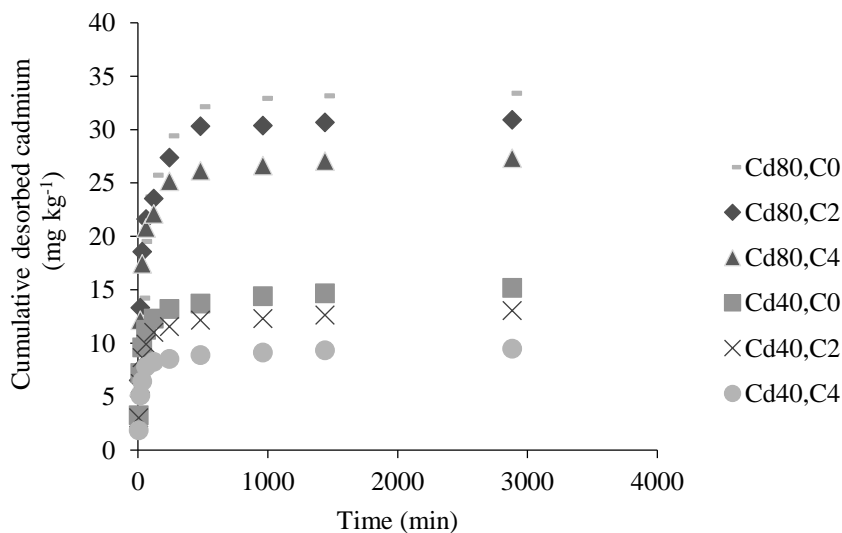
شکل ۱- واجذب کادمیم (تجمعی) با گذشت زمان با کاربرد ۲ و ۴ درصد بیوجار پوست نرم بادام (B)، ۴۵ روز بعد از خوابانیدن  
 Figure 1. Cadmium desorption (Cumulative) over time with the application of 2 and 4% almond soft husk biochar 45 days after incubation



شکل ۲- واجذب کادمیم (تجمعی) با گذشت زمان با کاربرد ۲ و ۴ درصد کمپوست پوست نرم بادام (C)، ۴۵ روز بعد از خوابانیدن  
 Figure 2. Cadmium desorption (Cumulative) over time with the application of 2 and 4% almond soft husk compost 45 days after incubation



شکل ۳- واجذب کادمیم (تجمعی) با گذشت زمان با کاربرد ۲ و ۴ درصد بیوچار پوست نرم بادام (B) ۹۰ روز بعد از خوابانیدن  
Figure 3. Cadmium desorption (Cumulative) over time with the application of 2 and 4% almond soft husk biochar 90 days after incubation



شکل ۴- واجذب کادمیم (تجمعی) با گذشت زمان با کاربرد ۲ و ۴ درصد کمپوست پوست نرم بادام (C) ۹۰ روز بعد از خوابانیدن  
Figure 4. Cadmium desorption (Cumulative) over time with the application of 2 and 4% almond soft husk compost 90 days after incubation

کادمیم دارد. گزارشات متعددی نشان داده است که بیشترین قابلیت دسترسی عناصر بلافاصله پس از افزودن آن عنصر به خاک بدست می‌آید و با گذشت زمان از میزان قابلیت دسترسی آن عنصر کم می‌شود (Jalali & Rostaii, 2011). کندپال و همکاران (Kandpal *et al.*, 2005) با مطالعه واجذب فلزات سنگین از خاک‌های آلوده بیان کردند که الگوی واجذب به صورت کلی با یک واکنش اولیه سریع که به وسیله یک واکنش کندتر ادامه می‌یابد، مشخص می‌شود.

در هر چهار نمودار مقدار کادمیم واجذب شده به وسیله عصاره‌گیر در خاک مورد مطالعه، با گذشت زمان (۵ تا ۲۸۸۰ دقیقه) به صورت تجمعی افزایش داشت. سرعت واجذب در ابتدا و در زمان‌های اولیه (۲ ساعت اولیه) سریع بوده و سپس با گذشت زمان واجذب با سرعت کمتری (۸ ساعت) و در نهایت رسیدن به تعادل در نمونه‌های تیمار شده و نمونه شاهد مشاهده گردید. افزایش زمان خوابانیدن تا ۹۰ روز در مقایسه با نمونه‌های ۴۵ روز خوابانیده شده، نشان از کاهش واجذب

۹۰ روز به ترتیب ۴/۶ و ۱۳/۶ درصد، ۸ و ۱۹ درصد کاهش یافت. لاگاناتان و همکاران ( Loganathan *et al.*, 2012) گذشت زمان را یکی از عوامل مهم در کاهش واجذب کادمیم معرفی کردند. میزان کادمیم جمعی آزاد شده از خاک‌های تیمار شده نشان می‌دهد که با افزایش سطوح بیوچار و کمپوست میزان واجذب کادمیم کاهش بیشتری نشان داده است که این کاهش در بیوچار بیشتر از کمپوست می‌باشد. مینداز و همکاران (Mendez *et al.*, 2014) در بررسی اثر بیوچار ضایعات کاغذ سازی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در سطح ۵ درصد وزنی بر تثبیت فلزات سنگین در خاک‌های آلوده نشان دادند که کاربرد بیوچار سبب کاهش تحرک و قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک شده است. پیلیرا و گیداراکوس (Pellera & Gidaracos, 2015) در بررسی اثر بیوچار (تولید شده در دمای ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس) حاصل از پوسته زیتون بر تحرک کادمیم در خاک، نشان دادند که کاربرد بیوچار سبب افزایش جذب و کاهش واجذب این عناصر در خاک شد، که این کاهش واجذب در نتیجه کاربرد بیوچار تولید شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس موثرتر بود. این پژوهشگران همچنین بیان کردند که کاربرد بیوچار سبب افزایش pH خاک و احتمالاً نه تنها سبب جذب این عنصر بر روی سطوح خاک شد، بلکه بر اثر افزایش pH تشکیل رسوب این عناصر نیز صورت گرفته است. در طی تولید بیوچار، مواد آلی پیرولیز و مقدار کربنات افزایش می‌یابد و دامنه وسیعی از گروه‌های عاملی همانند  $\text{COO}^-$  و  $\text{O}^-$  در سطح بیوچار ایجاد می‌شود (Kim *et al.*, 2015). بنابراین پس از پیرولیز، بیوچارها به مواد قلیایی تبدیل می‌شوند که با اضافه شدن به خاک pH خاک را افزایش می‌دهند و بارهای سطحی منفی ایجاد می‌شود که کاتیون‌ها می‌توانند جذب شوند (Yuan *et al.*, 2011). اثر بیوچار روی تثبیت فلزات سنگین در خاک ممکن تحت تاثیر شرایط پیرولیز و مقادیر کاربرد بیوچار قرار گیرد. از آنجایی که بیشتر بیوچارها دارای سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل، pH بالا و برخی از نمک‌های محلول هستند، آنها می‌توانند به طور قابل توجهی حلالیت فلزات سنگین در خاک را از طریق جذب سطحی و رسوب کاهش دهند (Zhang *et al.*, 2013). علت اصلی افزایش pH خاک با کاربرد بیوچار مربوط به

واجذب اولیه سریع فلزات سنگین از خاک مشخص-کننده واجذب این فلزات از اجزای محلول در آب و همچنین از سایت‌های جذبی با انرژی پیوندی ضعیف است در حالیکه واجذب کند فلزات مشخص کننده واجذب فلزات از سایت‌های با انرژی پیوند نسبتاً بالا در مقایسه با فرم‌های تبادلی و دیگر گونه‌های شیمیایی در موازنه دینامیکی با فرم‌های تبادلی است. افزودن بیوچار و کمپوست پوست نرم بادام به خاک منجر به کاهش واجذب کادمیم در تمام زمان‌های عصاره‌گیری نسبت به شاهد شده است، در حالیکه بیوچار در مقایسه با کمپوست پوست نرم بادام باعث کاهش بیشتری در واجذب کادمیم نسبت به خاک شاهد شده است. بیشترین میزان واجذب کادمیم مربوط به خاک بدون تیمار با بیوچار و کمپوست بوده است، در حالیکه کمترین میزان واجذب کادمیم در خاک به همراه بیوچار و کمپوست در سطح ۴ درصد وزنی می‌باشد، در حالیکه بیوچار در مقایسه با کمپوست کاهش بیشتری را نشان داد، این روند در خاک‌های تیمار شده، ۴۵ و ۹۰ روز بعد از خوابانیدن یکسان می‌باشد. برای مثال در نمونه شاهد به ترتیب (۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، بدون کاربرد بیوچار و کمپوست) افزایش زمان از ۴۵ روز به ۹۰ روز سبب کاهش ۷/۵ و ۷ درصدی میزان کادمیم واجذب شده بعد از ۹۶۰ دقیقه از خاک شده است. نتایج نشان داد کاربرد بیوچار در سطح ۲ و ۴ درصد وزنی در تیمار ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم نسبت به سطح شاهد در دوره زمانی ۴۵ روز، میزان کادمیم واجذب شده بعد از ۹۶۰ دقیقه از خاک ۱۸/۵ و ۴۳ درصد کاهش یافت، اما در دوره زمانی ۹۰ روز، ۲۰/۵ و ۵۰ درصد کاهش یافت. در حالیکه با کاربرد کمپوست در سطح ۲ و ۴ درصد وزنی در تیمار ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در دوره زمانی ۴۵ و ۹۰ روز به ترتیب ۱۱ و ۲۴/۵ درصد، ۱۵ و ۳۶/۵ درصد کاهش یافت. همچنین کاربرد بیوچار در سطح ۲ و ۴ درصد وزنی در تیمار ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم نسبت به سطح شاهد در دوره زمانی ۴۵ روز، میزان کادمیم واجذب شده بعد از ۹۶۰ دقیقه از خاک ۹/۵ و ۲۴/۵ درصد کاهش یافت، اما در دوره زمانی ۹۰ روز، ۸ و ۲۲ درصد کاهش یافت. در حالیکه با کاربرد کمپوست در سطح ۲ و ۴ درصد وزنی در تیمار ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در دوره زمانی ۴۵ و

کادمیم از خاک‌ها با معادله پخشیدگی سهموی نشان می‌دهد که به دلیل ضریب تبیین پایین و خطای استاندارد برآورد نسبتاً بالا، این معادله نمی‌تواند معادله مناسبی برای توصیف واجذب کادمیم از خاک‌های مورد مطالعه باشد، بر اساس مقادیر بدست آمده از ضریب تبیین و خطای استاندارد برآورد، معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله سینتیک واجذب کادمیم معرفی شد (جداول ۵، ۶، ۷ و ۸) هر چند که معادله الوویچ ساده دارای ضریب تبیین مشابه با تابع توانی می‌باشد اما بدلیل خطای استاندارد برآورد بالا نتوانست به عنوان معادله مناسب جهت بررسی سینتیک واجذب کادمیم استفاده شود. ایسفنبدود و همکاران (Esfandbod *et al.*, 2010) در بررسی واجذب کادمیم در ۱۵ خاک آلوده شده به کادمیم نشان دادند که معادلات پخشیدگی سهموی، تابع توان و الوویچ ساده توانایی خوبی برای پیش‌بینی واجذب کادمیم در این خاک‌ها را دارند. مقادیر ثابت‌های سرعت  $\alpha_s$  و  $\beta_s$  معادله الوویچ در خاک تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (جداول ۵، ۶، ۷ و ۸). افزایش مقدار  $\beta_s$  و کاهش مقدار  $\alpha_s$  نشان‌دهنده کاهش سرعت واجذب کادمیم می‌باشد با افزایش  $\beta_s$  سرعت واجذب کاهش پیدا می‌کند مقدار  $\alpha_s$  در خاک‌هایی که واجذب کمتری دارند مقدار کمتری را نشان می‌دهد ثابت  $\alpha_s$  پارامتر مفیدی برای پیش‌بینی قابلیت دسترسی عناصر در خاک می‌باشد این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد سطوح بالاتر بیوچار و کمپوست در خاک سبب کاهش قابلیت دسترسی کادمیم در خاک می‌شود. دنگ گزارش کردند کاهش مقدار ضریب  $\beta_s$  و افزایش مقدار ضریب  $\alpha_s$  نشان‌دهنده افزایش در میزان سرعت واجذب عناصر در خاک می‌باشد (Dang *et al.*, 1994). در تابع توانی با کاربرد بیوچار و کمپوست ضرایب  $a$  و  $b$  نسبت به شاهد کاهش یافت بنابراین سرعت واجذب کادمیم در خاک نیز کاهش یافت. که احتمالاً افزایش در مقدار ضریب  $a$  در معادله تابع توان نشان‌دهنده افزایش در میزان واجذب عناصر در خاک می‌باشد (Dang *et al.*, 1994). مقادیر ثابت‌های  $K_p$  و  $q_0$  از معادله پخشیدگی سهموی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش واجذب کادمیم در نمونه‌های تیمار شده با بیوچار و کمپوست نسبت به تیمار شاهد می‌باشد.

کربنات‌های عناصر قلیایی موجود در آن می‌باشد (Song & Guo, 2012). مصرف بیوچار علاوه بر افزایش pH خاک، میزان کربن آلی خاک را نیز افزایش می‌دهد افزایش pH خاک با مصرف بیوچار به دلیل وجود فلزات قلیایی مانند پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در بخش خاکستر بیوچار است که به راحتی در محلول خاک حل شده و باعث افزایش pH خاک می‌شوند (Gul *et al.*, 2015). افزایش pH خاک در نتیجه افزودن بیوچار باعث افزایش برخی از گروه‌های عاملی اکسیژن و یا سطوح فسفر که دلیل اصلی تشکیل لیگاندها به منظور غیرمتحرک شدن فلزات سمی در خاک می‌باشند، می‌شود (Cao *et al.*, 2011). می‌توان گفت که احتمالاً افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و توانایی تشکیل کمپلکس‌های درونی می‌تواند دلیلی بر این روند کاهش واجذب باشد. ماده آلی نقش مهمی در واکنش‌های فلزات به وسیله فراهم کردن بار منفی وابسته به pH، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و مهمتر از آن گرایش فلزات برای تشکیل کمپلکس‌های محلول با لیگاندهای آلی می‌باشد. بطور کلی نتایج حاصل از اثر بهسازهای مختلف در تثبیت کادمیم در خاک مورد مطالعه، نشان از اثر مثبت بیوچار نسبت به کمپوست می‌باشد.

#### مقایسه معادلات سینتیک واجذب کادمیم

مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد (SE) حاصل از برازش داده‌های واجذب کادمیم با معادلات سینتیک برای خاک ۴۵ و ۹۰ روز بعد از خوابانیدن تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده در (جداول ۵، ۶، ۷ و ۸) نشان داده شده است. تعیین بهترین معادله سینتیک معمولاً بر اساس ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد (SE) صورت می‌گیرد، به عبارت دیگر معادلاتی که ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد کم داشته باشند به عنوان معادلاتی که سرعت واجذب کادمیم را بهتر توصیف می‌کنند، انتخاب می‌شود. نتایج بدست آمده از این معادلات برای خاک در دوره زمانی ۴۵ و ۹۰ روز بعد از خوابانیدن تحت تاثیر تیمارهای بیوچار و کمپوست پوست نرم بادام نشان می‌دهد که معادلات سینتیک مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، و مرتبه سوم به دلیل پایین بودن مقادیر ضریب تبیین قادر به پیش‌بینی قابل قبولی از واجذب کادمیم در نمونه‌های خاک نمی‌باشد. برازش داده‌های واجذب



جدول ۵- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی واجذب کادمیم در خاک تیمار شده با بیوچار پوست نرم بادام ۴۵ روز بعد از خوابانیدن

Table 5. Fixed coefficients, coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of cadmium desorption in treated soil with of almond soft husk biochar 45 days after incubation

		Cd <sub>40</sub> B <sub>0</sub> R	Cd <sub>40</sub> B <sub>2</sub> R	Cd <sub>40</sub> B <sub>4</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>0</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>2</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>4</sub> R
Zero order	q <sub>0</sub>	11.01	9.21	6.65	23.89	22.17	18.88
	k <sub>0</sub>	4×10 <sup>-5</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	9×10 <sup>-5</sup>	7×10 <sup>-5</sup>
	R <sup>2</sup>	0.37	0.34	0.33	0.35	0.33	0.30
	SE	3.17	2.49	1.59	8.29	7.51	6.28
first order	q <sub>0</sub>	2.33	2.16	1.85	3.08	3.01	2.85
	k <sub>1</sub>	4×10 <sup>-6</sup>	3×10 <sup>-6</sup>	3×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>
	R <sup>2</sup>	0.26	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23
	SE	0.36	0.33	0.28	0.44	0.43	0.42
second order	q <sub>0</sub>	0.11	0.12	0.17	0.05	0.06	0.07
	k <sub>2</sub>	-4×10 <sup>-7</sup>	-4×10 <sup>-7</sup>	-5×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>
	R <sup>2</sup>	0.18	0.18	0.20	0.17	0.16	0.16
	SE	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03
Third order	q <sub>0</sub>	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
	k <sub>3</sub>	-9×10 <sup>-8</sup>	-1×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-8</sup>	-3×10 <sup>-8</sup>	-4×10 <sup>-8</sup>
	R <sup>2</sup>	0.12	0.13	0.15	0.11	0.11	0.11
	SE	0.11	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Parabolic diffusion	q <sub>0</sub>	9.33	7.94	5.84	19.52	18.37	15.80
	k <sub>P</sub>	0.02	0.02	0.01	0.06	0.05	0.04
	R <sup>2</sup>	0.58	0.55	0.55	0.58	0.55	0.52
	SE	2.58	2.05	1.31	6.70	6.16	5.22
Elovich	α <sub>s</sub>	3.01	1.52	0.15	12.62	9.89	7.2
	β <sub>s</sub>	0.82	1.30	1.70	3.14	3.87	4.43
	R <sup>2</sup>	0.90	0.88	0.88	0.90	0.88	0.86
	SE	1.29	1.07	0.68	3.24	3.16	2.81
two-constant rate equations	a	0.93	0.88	0.75	1.38	1.35	1.26
	b	0.17	0.15	0.13	0.21	0.20	0.19
	R <sup>2</sup>	0.89	0.89	0.90	0.91	0.88	0.87
	SE	0.20	0.18	0.15	0.24	0.24	0.24

جدول ۶- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی واجذب کادمیم در خاک تیمار شده با کمپوست پوست نرم بادام ۴۵ روز بعد از خوابانیدن

Table 6. Fixed coefficients, coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of cadmium desorption in treated soil with of almond soft husk compost 45 days after incubation

		Cd <sub>40</sub> C <sub>0</sub> R	Cd <sub>40</sub> C <sub>2</sub> R	Cd <sub>40</sub> C <sub>4</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>0</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>2</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>4</sub> R
Zero order	q <sub>0</sub>	11.12	10	8.62	23.93	23.11	21.19
	k <sub>0</sub>	4×10 <sup>-5</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-5</sup>
	R <sup>2</sup>	0.36	0.36	0.34	0.35	0.34	0.32
	SE	3.21	2.80	2.31	8.31	7.90	7.18
first order	q <sub>0</sub>	2.34	2.24	2.10	3.08	3.05	2.96
	k <sub>1</sub>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	3×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>
	R <sup>2</sup>	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.24
	SE	0.37	0.35	0.33	0.44	0.44	0.43
second order	q <sub>0</sub>	0.11	0.12	0.18	0.05	0.05	0.06
	k <sub>2</sub>	-4×10 <sup>-7</sup>	-4×10 <sup>-7</sup>	-4×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>
	R <sup>2</sup>	0.17	0.18	0.19	0.17	0.17	0.16
	SE	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03
Third order	q <sub>0</sub>	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	k <sub>3</sub>	-9×10 <sup>-8</sup>	-1×10 <sup>-7</sup>	-1×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-8</sup>	-3×10 <sup>-8</sup>	-3×10 <sup>-8</sup>
	R <sup>2</sup>	0.12	0.13	0.13	0.11	0.11	0.11
	SE	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Parabolic diffusion	q <sub>0</sub>	9.43	8.54	7.43	19.54	19.02	17.55
	k <sub>p</sub>	0.02	0.02	0.02	0.06	0.05	0.05
	R <sup>2</sup>	0.58	0.57	0.56	0.58	0.56	0.54
	SE	2.62	2.29	1.90	6.71	6.43	5.89
Elovich	α <sub>s</sub>	3.04	2.25	1.37	12.68	11.17	9.42
	β <sub>s</sub>	1.21	1.49	1.72	3.70	4.15	4.44
	R <sup>2</sup>	0.89	0.89	0.88	0.90	0.89	0.88
	SE	1.31	1.16	0.98	3.24	3.21	3.04
two-constant rate equations	a	0.93	0.89	0.83	1.37	1.35	1.31
	b	0.17	0.16	0.15	0.21	0.20	0.20
	R <sup>2</sup>	0.90	0.89	0.89	0.90	0.89	0.87
	SE	0.20	0.19	0.18	0.24	0.23	0.24

جدول ۷- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی واجذب کادمیم در خاک تیمار شده با بیوچار پوست نرم بادام ۹۰ روز بعد از خواباندن

Table 7. Fixed coefficients, coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of cadmium desorption in treated soil with of almond soft husk biochar 90 days after incubation

		Cd <sub>40</sub> B <sub>0</sub> R	Cd <sub>40</sub> B <sub>2</sub> R	Cd <sub>40</sub> B <sub>4</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>0</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>2</sub> R	Cd <sub>80</sub> B <sub>4</sub> R
Zero order	q <sub>0</sub>	9.88	8.12	5.28	21.32	19.62	16.48
	k <sub>0</sub>	4×10 <sup>-5</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	9×10 <sup>-5</sup>	8×10 <sup>-5</sup>
	R <sup>2</sup>	0.37	0.32	0.33	0.39	0.38	0.39
	SE	3.19	2.56	1.62	7.55	7.04	5.96
first order	q <sub>0</sub>	2.20	2.01	1.57	2.96	2.87	2.71
	k <sub>1</sub>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>
	R <sup>2</sup>	0.24	0.23	0.21	0.27	0.27	0.27
	SE	0.44	0.42	0.45	0.45	0.46	0.47
second order	q <sub>0</sub>	0.13	0.15	0.24	0.06	0.07	0.08
	k <sub>2</sub>	-5×10 <sup>-7</sup>	-6×10 <sup>-7</sup>	-1×10 <sup>-6</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>
	R <sup>2</sup>	0.15	0.15	0.12	0.17	0.16	0.17
	SE	0.07	0.08	0.15	0.03	0.04	0.05
Third order	q <sub>0</sub>	0.02	0.03	0.09	0.01	0.01	0.01
	k <sub>3</sub>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-6×10 <sup>-7</sup>	-4×10 <sup>-8</sup>	-4×10 <sup>-8</sup>	-6×10 <sup>-8</sup>
	R <sup>2</sup>	0.10	0.11	0.08	0.11	0.10	0.10
	SE	0.03	0.04	0.12	0.01	0.01	0.01
Parabolic diffusion	q <sub>0</sub>	8.21	6.86	4.48	17.13	15.73	13.14
	k <sub>p</sub>	0.02	0.02	0.01	0.05	0.05	0.04
	R <sup>2</sup>	0.58	0.53	0.53	0.62	0.61	0.63
	SE	2.60	2.13	1.37	5.95	5.55	4.67
Elovich	α <sub>s</sub>	4.19	2.62	1.60	13.11	12.32	10.88
	β <sub>s</sub>	0.83	1.30	1.71	3.33	3.88	4.19
	R <sup>2</sup>	0.89	0.86	0.85	0.93	0.92	0.93
	SE	1.32	1.17	0.79	2.60	2.48	2.03
two-constant rate equations	a	0.56	0.47	0.001	1.16	1.05	0.85
	b	0.21	0.19	0.18	0.22	0.22	0.22
	R <sup>2</sup>	0.91	0.87	0.83	0.94	0.91	0.92
	SE	0.25	0.24	0.29	0.23	0.24	0.24

جدول ۸- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی واجذب کادمیم در خاک تیمار شده با کمپوست پوست نرم بادام ۹۰ روز بعد از خوابانیدن

Table 8. Fixed coefficients, coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of cadmium desorption in treated soil with of almond soft husk compost 90 days after incubation

		Cd <sub>40</sub> C <sub>0</sub> R	Cd <sub>40</sub> C <sub>2</sub> R	Cd <sub>40</sub> C <sub>4</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>0</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>2</sub> R	Cd <sub>80</sub> C <sub>4</sub> R
Zero order	q <sub>0</sub>	9.92	8.78	6.61	21.35	19.85	18.32
	k <sub>0</sub>	4×10 <sup>-5</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	9×10 <sup>-5</sup>	8×10 <sup>-5</sup>
	R <sup>2</sup>	0.38	0.34	0.31	0.38	0.38	0.34
	SE	3.19	2.78	2.15	7.55	7.01	6.24
first order	q <sub>0</sub>	2.21	2.09	1.78	2.96	2.89	2.80
	k <sub>1</sub>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-6</sup>
	R <sup>2</sup>	0.25	0.24	0.19	0.27	0.27	0.24
	SE	0.43	0.42	0.48	0.45	0.45	0.45
second order	q <sub>0</sub>	0.13	0.14	0.21	0.11	0.11	0.12
	k <sub>2</sub>	-5×10 <sup>-7</sup>	-5×10 <sup>-7</sup>	-8×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>	-3×10 <sup>-7</sup>
	R <sup>2</sup>	0.15	0.15	0.12	0.17	0.17	0.15
	SE	0.07	0.08	0.13	0.03	0.04	0.04
Third order	q <sub>0</sub>	0.02	0.03	0.06	0.05	0.06	0.07
	k <sub>3</sub>	-2×10 <sup>-7</sup>	-2×10 <sup>-7</sup>	-4E-07	-4×10 <sup>-8</sup>	-4×10 <sup>-8</sup>	-5×10 <sup>-8</sup>
	R <sup>2</sup>	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10
	SE	0.03	0.03	0.09	0.01	0.01	0.01
Parabolic diffusion	q <sub>0</sub>	8.22	7.37	5.59	17.16	15.99	15.02
	k <sub>p</sub>	0.02	0.02	0.01	0.05	0.05	0.04
	R <sup>2</sup>	0.59	0.55	0.49	0.62	0.61	0.56
	SE	2.58	2.30	1.82	5.95	5.53	5.10
Elovich	α <sub>s</sub>	4.30	3.20	2.21	13.06	11.94	8.77
	β <sub>s</sub>	1.05	1.50	1.70	3.27	3.86	4.18
	R <sup>2</sup>	0.91	0.89	0.83	0.93	0.92	0.89
	SE	1.28	1.21	1.07	2.61	2.47	2.58
two-constant rate equations	a	0.57	0.51	0.15	1.17	1.11	1.10
	b	0.20	0.20	0.19	0.22	0.21	0.20
	R <sup>2</sup>	0.91	0.87	0.85	0.94	0.91	0.90
	SE	0.25	0.24	0.31	0.23	0.23	0.25

### نتیجه‌گیری کلی

بررسی مقدار کادمیم واجذب شده با عصاره‌گیر EDTA در زمان‌های مختلف نشان داد که مقدار واجذب کادمیم در خاک‌های تیمار شده با مواد آلی (کمپوست و بیوجار پوست نرم بادام) کاهش یافت. زمان خوابانیدن از ۴۵ به ۹۰ روز، نشان داد که در همه نمونه‌های تیمار شده و شاهد مقدار واجذب کادمیم کاهش یافت. با افزایش سطح (۴ درصد وزنی) در تیمارهای کمپوست و بیوجار مقدار واجذب کادمیم کاهش بیشتری را نشان داد که این کاهش در تیمار بیوجار نسبت به کمپوست بیشتر می‌باشد. و این می‌تواند دلیلی بر موثر بودن بیوجار

نسبت به کمپوست باشد. بررسی برآزش داده‌های واجذب کادمیم از خاک مورد مطالعه با معادلات مختلف سینتیکی نشان داد که داده‌های واجذب کادمیم، برآزش خوبی با معادله تابع توانی داشت. در این مطالعه می‌تواند گفت که معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله توصیف کننده واجذب کادمیم در نمونه‌های خاک ۴۵ و ۹۰ روز بعد از خوابانیدن معرفی شود. در مطالعات بعدی می‌توان اثرات بیوجار پوست نرم بادام در دماهای مختلف و همچنین بیوجار مهندسی شده با مواد اولیه مختلف را مورد بررسی قرار داد.

## References

- Akoto O., Ephraim J.H., and Darko G. 2009. Heavy metals pollution in surface soils in the vicinity of abundant railway servicing workshop in Kumasi, Ghana. *International Journal of Environmental Research*, 2: 359-364.
- Allison L.E., and Moodie C.D. 1965. Carbonate. In: Page C.A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, part 2, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1379-1396.
- Bremner J.M. 1996. Nitrogen Total. In: Page D.L. Sparks et al., (Eds), *Methods of Soil Analysis*, part 3-American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1085 – 1122
- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
- Cao X., Ma L., Liang Y., Gao B., and Harris W. 2011. Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar. *Environmental Science and Technology*, 45: 4884-4889.
- Chapman H.D., and Pratt P.F. 1961. *Method of Analysis for Soils, plants and waters*, University of California, Division of Agricultural Sciences, pp. 60- 68.
- Chapman H.D., and Pratt P.F. 1965. *Methods of Analysis for Soils, plants, and waters*, University of California, Division of Agriculture Science, pp. 56-61.
- Dang Y.P., Dalal R.C., Edwards D.G., and Tiller K.G. 1994. Kinetics of zinc desorption from vertisols. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1392-1399.
- Esfandbod M., Adhami E., Rashti M.R., and Esfandbod M. 2010. Kinetics of cadmium desorption from some soils of Iran. In: 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Australia, Brisbane, 235p.
- Ghasemi-Fasaei R., and Jarrah M. 2013. Adsorption kinetics of cadmium and zinc as influenced by some calcareous soil properties. *International journal of agriculture and crop sciences*, 5: 479-483.
- Gul S., Whalen J.K., Thomas B.W., Sachdeva V., and Deng H. 2015. Physicochemical properties and microbial responses in biochar amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 206: 46-59.
- Hall G., Woodborne S., and Scholes M. 2008. Stable carbon isotope ratios from archaeological charcoal as palaeoenvironmental indicators. *Chemical Geology*, 247: 384-400.
- Helmke P.A., and Sparks D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical properties*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 551-574.
- Jalali M., and Rostaii L. 2011. Cadmium distribution in plant residues amended calcareous soils as a function of incubation time. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57: 137-148.
- Kandpal G., Srivastava P.C., and Ram B. 2005. Kinetics of desorption of heavy metals from polluted soils: Influence of soil type and metal source, *Water, Air, and Soil Pollution*, 161: 353-363.
- Karaca A. 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil, *Geoderma*, 122: 297-303.
- Khan M.S., Zaidi, A. Oves, M. and Wani P.A. 2008. Heavy metal toxicity to legumes. In: Samuel EB, William CW (Eds) *Heavy metal pollution*. Nova Science, Hauppauge, pp. 197 – 225.
- Kim H.S., Kim K.R., Kim H.J., Yoon J.H., Yang J.E., Ok Y.S., Owens G., and Kim K.H. 2015. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil. *Environmental Earth Science*, 74:1249–1259.
- Krishnamurti G.S.R., Huang P.M., and Kozak L.M. 1999. Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: Influence of phosphate. *Journal of Soil Science*, 164: 888-898.
- Lehmann J., and Joseph S. 2012. *Biochar for environmental management: science and technology*, (Eds.). Routledge, 944p.
- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 421-428.
- Loganathan P., Vigneswaran S., Kandasamy J., and Naidu R. 2012. Cadmium sorption and desorption in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42: 489-533.

- Mendez A., Paz-Ferreiro J., Araujo F., and Gascó G. 2014. Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107: 46-52.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. 3<sup>rd</sup> Ed. In: Sparks, D.L., et al., (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3- chemical methods and microbiological properties*. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp. 961-1010.
- Olsen S.R.C., Cole V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Cir, US Govern printing office, Washington, DC, 939 p.
- Pellera F.M., and Gidarakos E. 2015. Effect of dried olive pomace-derived biochar on the mobility of cadmium and nickel in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 87: 38-45.
- Rhoades J.D., Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., and Sumner M.E. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*, pp. 417-435.
- Song W., and Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94: 138-145.
- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: D.L. Sparks et al., (Eds) *Methods of Soil Analysis. part 3-American Society of Agronomy.*, Madison. WI, pp. 475- 490.
- Yuan J.H., Xu R.K., and Zhang H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102:3488–3497.
- Zhang X., Wang H., He L., Lu K., Sarmah A., Li J., Bolan N.S., Pei J., and Huang H. 2013. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science Pollution Research*, 20:8472–8483.

## Cadmium Desorption Kinetics in the Presence of the Soft Almond Husk Compost and Biochar in a Calcareous Soil

Zahra Dianat Maharluei<sup>1\*</sup>, Majid Fekri<sup>2</sup>

(Received: November 2018 Accepted: December 2019)

### Abstract

Cadmium (Cd) is one of the most common and dangerous environmental contaminants. The effect of soft almond husk compost and its biochar was studied in the kinetic of cadmium desorption on a calcareous soil in the field of Shahid Bahonar Agricultural College, Kerman. For this purpose, compost and biochar of soft almond husk were used in three Levels (0, 2 and 4 % w/w) and were added to calcareous soil contaminated with three levels of cadmium (0, 40 and 80 mg kg<sup>-1</sup>). Sampling from treated soils was carried out 45 and 90 days after the contamination of soils with cadmium. Samples from treated soils were extracted by EDTA in 5 to 2880 minutes in different periods of time and the concentrations of cadmium were measured. The results showed that the application of compost and soft almond husk biochar reduced the desorption of cadmium compared to the control. The lowest amount of cadmium desorption occurred at level 4% w/w biochar and compost, while biochar had the highest reduction amount in the desorption of cadmium compared to the soft almond husk compost. Based on the experimental results, the cadmium desorption was highest in all treatments at initial times and decreased over the time. In other words, 50% of cadmium desorption occurred in the first 2 hours. In 90-day sampling compared to 45-day one, cadmium desorption from soil showed the highest decrease. Based on the determination of coefficient and standard error, the power function equation is considered as the best predictor of the cadmium release kinetics trend in the studied soil.

**Keywords:** Almond soft skin, Desorption kinetics, Cadmium, Compost, kinetic equation

Dianat Maharluei Z., and Fekri M. 2020. Cadmium Desorption Kinetics in the presence of the soft Almond Husk Compost and Biochar in a Calcareous Soil. *Applied Soil Research*. 8(3): 68-82.

1. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

\* Corresponding Author Email: [zahradianat@agr.uk.ac.ir](mailto:zahradianat@agr.uk.ac.ir)