

مقایسه جاذبه‌های کربن فعال، خاک اره، پوسته فندق و پوسته بادام در حذف نیکل از محیط آبی

مسلم محمدی گله زن^۱ شایان شامحمدی^۲

(دریافت ۹۱/۱/۳۰ پذیرش ۹۱/۵/۱۲)

چکیده

در حال حاضر یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست، پسابهای صنعتی حاوی فلزات سنگین هستند. نیکل یکی از این فلزات سمی است که غلظت بالای آن باعث حساسیت پوستی، بیماری‌های قلبی، انواع سرطان‌ها و غیره می‌شود، بنابراین حذف نیکل از پسابهای صنعتی ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق مقایسه سینتیک و ایزوترم جذب نیکل توسط کربن فعال، خاک اره، پوسته فندق و پوسته بادام بود. برای این کار ابتدا جاذبه‌ها تهیه شد و برای حذف نیکل از محلول با غلظت‌های ۲/۵ تا ۱۲۵ میلی‌گرم در لیتر استفاده شد. نتایج آزمایش‌های pH نشان داد که برای جاذبه‌های کربن فعال، خاک اره، پوسته فندق و پوسته بادام حداکثر مقدار جذب، به ترتیب در pH ۶، ۶، ۷ و ۷ به دست آمد. آزمایش‌های سینتیک جذب نشان داد که حداکثر زمان تعادل در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر برای جاذبه‌های کربن فعال، پوسته فندق، خاک اره و پوسته بادام به ترتیب برابر ۶۰، ۷۵، ۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه است. نتایج برآزش مدل‌های سینتیک نشان داد که برای جاذبه‌های پوسته فندق و خاک اره، مدل لاگرگرن و برای جاذبه‌های کربن فعال و پوسته بادام مدل هو و همکاران، در سطح ۹۵ درصد اعتماد دارای کمترین فاکتور خطا و بیشترین ضریب همبستگی است و سرعت جذب سطحی نیکل به صورت پوسته بادام > خاک اره > پوسته فندق > کربن فعال است. مطالعه ایزوترم جذب نشان داد که با توجه به فاکتور خطا و ضریب همبستگی برای تمامی جاذبه‌ها، به ترتیب مدل‌های ردلیچ پترسون و لانگمیر داده‌های ایزوترم را بهتر توصیف می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر زمان تعادل تابع توانی از ظرفیت جاذب است.

واژه‌های کلیدی: جذب، کربن فعال، پوسته فندق، پوسته بادام، خاک اره

Comparison of Active Carbon, Sawdust, Almond Shell and Hazelnut Shell Absorbent in Removal of Nickel from Aqueous Environment

Moslem Mohammadi Galehzan¹

Shayan Shamohammadi²

(Received April 18, 2012 Accepted Aug. 02, 2012)

Abstract

The most important environmental pollutants are heavy metals in industrial wastewater effluents. Nickel is one of the toxic heavy metals which its high concentration causes skin allergy, heart disease and various cancers. So removal of this element from industrial effluent is of prime concern and necessary. The main purpose of this study is to compare kinetics and isotherms of nickel uptake by activated carbon (AC), sawdust (SD), hazelnut shell (SH) and almond shells (AH). Adsorbents are initially prepared to remove nickel from solutions with concentrations 2.5 to 125 mg/l. pH test results showed that maximum absorption using AC, SH, SD and AH obtained at pH 6, 6 and 7 respectively. Kinetics experiments showed that maximum absorption equilibrium time at concentration of 5 mg/l of AC, SH, SD and AH occur at 60, 75, 120 and 150 minutes respectively. Kinetic models fitting results showed that for sawdust and hazelnut shells, Lagergren model and for activated carbon and peanut shell Ho et al. model are suitable and have the lowest error and highest correlation coefficient at 95 percent confidence level. The results also revealed that rate of Nickel adsorption follows this order: AH < SD < SH < AC. Adsorption isotherms studies showed that according to error factor and correlation coefficient for all of the adsorbents, Redlich Peterson and Langmuir isotherms described data better than the others. The results also showed that equilibrium time is an exponential function of the absorption capacity.

Keywords: Adsorption, Activated Carbon, Hazelnut Crust, Shell Peanuts, Sawdust.

1. M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Zabol University, Zabol
2. Assoc. Prof. of Water Eng., Shahrekord University, Shahrekord
(Corresponding Author) (+98 381) 2226975 Shayan1962@gmail.com

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه زابل، زابل
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد (نویسنده مسئول)
Shayan1962@gmail.com (۰۳۸۱) ۲۲۲۶۹۷۵

نیکل از محیط آبی بود. همچنین در این تحقیق علاوه بر مطالعه تأثیر غلظت اولیه محلول بر زمان تعادل جذب، رابطه "زمان تعادل حداکثر" با "ظرفیت جذب" نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

۱-۲- تهیه محلول و جاذب

محلول ذخیره یون نیکل (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) با استفاده از تیترازول Ni ساخت کارخانه مرک^۶ آلمان با آب مقطر تهیه گردید. کربن فعال پودری، که ماده اولیه آن از چوب خام است از شرکت مرک آلمان خریداری شد. پوسته فندق و پوسته بادام، نیز تهیه گردید. همچنین خاک اره از کارگاههای محلی تهیه گردید. اندازه ذرات جاذبهای خاک اره، پوسته فندق و پوسته بادام بین ۳۲۵ تا ۴۲۵ میکرون انتخاب شد. سپس جاذبها توسط مواد شوینده کاملاً شسته و در آن در درجه حرارت ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت خشک شدند [۲۲].

۲-۲- آزمایش‌های ناپیوسته^۷

آزمایش‌های ناپیوسته برای تعیین pH، تعیین زمان تعادل، تعیین ظرفیت جاذبها و انتخاب بهترین مدل‌های تعادلی و غیرتعادلی جذب انجام شد.

۲-۲-۱- تعیین pH بهینه

در ۸ ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری، مقدار ۱ گرم در لیتر از جاذب کربن فعال ریخته شد. سپس محلول فلزی با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به هر یک از ارلن‌ها اضافه گردید. pH های مختلف (۲ تا ۸) مورد تحقیق قرار گرفت. محلولها به مدت ۱۲ ساعت در سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه و در دمای کنترل شده روی شیکر گذاشته شدند و اندازه‌گیری pH توسط دستگاه pH متر مدل PTR 79 انجام گرفت. این آزمایش برای جاذبهای SH، SD، و AH نیز تکرار شد [۲۳ و ۲۴].

۲-۳- اندازه‌گیری سطح ویژه

برای اندازه‌گیری سطح ویژه جاذب از روش جذب متیلن بلو استفاده شد. در این روش ابتدا غلظتهای ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از متیلن بلو به منظور تهیه نمودار کالیبراسیون تهیه شد و غلظت آنها توسط دستگاه طیف سنجی اسپکتروفوتومتر جنوی^۸ در طول موج بیشینه ۶۶۰ نانومتر اندازه‌گیری و ثبت گردید. سپس ۰/۱ گرم

روشهای مختلفی برای حذف فلزات سنگین از پساب وجود دارد، ولی در سالهای اخیر روش جذب سطحی از طریق کاربرد مواد زائد کشاورزی مورد توجه کلیه محققان و مهندسان صنعت آب قرار گرفته است [۱-۳]. فلز نیکل که سهم بسزایی در آلودگی آبهای سطحی دارد، در غلظتهای پایین یعنی ۰/۱۳ تا ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر، باعث بروز مشکلات فراوانی از جمله مشکلات تنفسی، افزایش حساسیت‌های پوستی، افزایش بروز ناهنجاری و سقط جنین در انسان و حیوانات می‌شود [۴]. غلظتهای بالای آن یعنی ۱۵ میلی‌گرم در لیتر، ممکن است شریان‌های قلب را مسدود نماید [۵]. حد مجاز آلاینده آن در تخلیه به آبهای سطحی و همچنین مصارف کشاورزی و آبیاری برابر با ۲ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است [۶]. همچنین بیشینه آلودگی فلز سنگین نیکل و سمیت‌های ناشی از آن توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده^۱ ۰/۲ و سازمان حفاظت از محیط زیست هنگ کنگ بین ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است [۷-۹].

در سالهای اخیر ضایعات کشاورزی به عنوان یکی از منابع غنی تأمین جاذبهای ارزان قیمت، به منظور حذف فلزات سنگین از پساب مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. خاک اره یکی از ارزان‌ترین و فراوان‌ترین جاذبها است که توانایی جذب فلزات سنگین از آب و پساب را دارد. کاتیون‌های فلزی به گروههای عاملی خاک اره مانند کربوکسیل (COOH) و هیدروکسیل (OH) می‌چسبند و H⁺ آزاد می‌گردد [۱۱]. پوسته فندق^۲ و بادام^۳ دارای گروههای قطبی آلدئید، کتون (ترکیبی مرکب از الکل و استون)، اسید، تانن، لیگنین و دیگر ترکیبات فنولیک است که این گروهها در این جاذبها می‌توانند رد و بدل کننده کاتیون‌ها باشند [۱۲]. مطالعات نشان می‌دهد که گروههای کربوکسیل در سطح جاذب پوسته فندق و بادام باعث جذب نیکل از محیط آبی می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. همچنین نتایج مطالعات حذف کروم و مس توسط پوسته فندق، نیکل و سرب توسط جاذب پوسته بادام و فندق، مس و روی توسط کربن فعال^۴ شده از پوسته گردو، فندق و بادام و کادمیم توسط خاک اره، نیکل توسط کربن پوسته بادام و کادمیم توسط کربن پوسته فندق و بادام، نشان می‌دهد که پوسته فندق و بادام و خاک اره^۵ از قابلیت مناسبی در جذب فلزات سنگین برخوردار هستند [۱۵-۲۱].

هدف اصلی از این تحقیق مقایسه سینتیک و ایزوترم جذب جاذبهای کربن فعال، خاک اره، پوسته فندق و بادام در حذف فلز

¹ US. Environmental Protection Agency

² Hazelnuts Shell (SH)

³ Almond Shell (AH)

⁴ Activated Carbon (AC)

⁵ Sawdust (SD)

⁶ Merck

⁷ Batch Sorption

⁸ Jenway

از جاذب داخل محلول ۱۷/۸ میلی‌گرم در لیتر متیلن بلو ریخته شد و بر روی شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه قرار گرفت. بعد از مدت ۶۰ دقیقه محلول باقیمانده داخل ظروف مخصوص ریخته شد و به مدت ۱۰ دقیقه داخل دستگاه سانتریفوژ با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه به منظور انجام عمل ته‌نشینی قرار داده شد. سپس محلولها از دستگاه خارج شده و توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، غلظت نهایی آنها اندازه‌گیری و سطح ویژه جاذب محاسبه گردید [۲۵ و ۲۶].

سطح ویژه SH، SD، AC، AH به ترتیب برابر با ۱۲/۶، ۱۰/۸۵، ۱۱/۸۵۱ و ۹/۸۷ مترمربع بر هر گرم به دست آمد.

۲-۴- آزمایش‌های سینتیک جذب

یکی از مطالعات مهم فرایند جذب، مطالعه سینتیک جذب است که به خواص فیزیکی و شیمیایی ماده جاذب بستگی دارد و مکانیسم جذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۷ و ۲۸]. آزمایش‌های ناپیوسته به منظور تعیین زمان تعادل و کارایی جذب نیکل در غلظتهای ۲/۵، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۲۵ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. در کلیه آزمایش‌ها حجم محلول مورد استفاده در ارلن مایرهای ۱۰۰ میلی‌لیتری، ۵۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. ظروف با اسید و سپس با آب بدون یون شسته شدند. کلیه محلولها از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ گذرانده شد. اندازه‌گیری جذب یون توسط دستگاه اسپکتروکوانت ساخت کارخانه مرک آلمان انجام گرفت. دمای اتاق در کلیه آزمایش‌ها در محدوده ۲۳±۱ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شد.

۲-۵- آزمایش‌های ایزوترم

ایزوترم‌های جذب، خواص جذبی و داده‌های تعادلی هستند که به توصیف چگونگی واکنش آلاینده‌ها با مواد جاذب پرداخته و در بهینه‌سازی مصرف جاذب، نقش اساسی را ایفا می‌کنند [۲۹]. آزمایش‌های ایزوترم برای تعیین حداکثر ظرفیت جذب و انتخاب بهترین مدل تعادلی، در غلظت محلول (۲/۵ میلی‌گرم در لیتر) انجام گرفت. مقادیر ۳ تا ۱۰ گرم در لیتر جاذب کربن فعال توزین شده و pH محلول روی pH بهینه تنظیم شد و بر روی شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس در زمان تعادل تعیین شده، نمونه‌ها از روی شیکر برداشته شد و فیلتر گردید و مقدار نیکل باقیمانده در محلول اندازه‌گیری شد. این آزمایش برای جاذبهای خاک اره، پوسته فندق و پوسته بادام نیز تکرار گردید. با استفاده از نرم‌افزار Data fit ورژن ۹/۲، نسخه آمریکایی و نرم‌افزار Curve Expert نسبت به برازش مدل‌های غیرخطی سینتیک و ایزوترم جذب اقدام شد.

¹ Spectroquant

۲-۶- مدل‌های سینتیک و ایزوترم جذب

مدل‌های سینتیک جذب لاگ‌گرن^۲، هو و همکاران^۳ و IPD و همچنین مدل‌های ایزوترم دو پارامتری لانگمیر، فروندلیچ و سه پارامتری ردلیچ پترسون^۴ در جدول ۱ و ضرایب آنها در جدول ۲ معرفی شده است [۳۰-۳۴].

جدول ۱- مدل‌های تعادلی و غیر تعادلی جذب

مدل‌های سینتیک	
$q_t = \frac{K_s q_e^2 t}{1 + q_e K_s t}$	هو و همکاران
$q_t = q_e - q_e \exp(-k_1 t)$	لاگ‌گرن
$R = k_1 (t)^\alpha$	IPD
مدل‌های ایزوترم	
$q_e = q_{\max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	لانگمیر
$q_e = K_F C_e^{1/n}$	فروندلیچ
$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^\beta}$	ردلیچ پترسون

جدول ۲- ضرایب مدل‌های تعادلی، غیر تعادلی جذب و تابع خطا

پارامتر	معرفی پارامتر
q_t و q_e	مقدار یون ماده جذب شده در زمان t و حالت تعادلی (میلی‌گرم بر گرم)
C_t و C_0	غلظت اولیه و غلظت محلول یون فلزی در زمان t (میلی‌گرم در لیتر)
k_2	ثابت سرعت جذب (g/mg.min)
k_1	ثابت جذب (1/min)
k_L	ثابت تعادل جذب مدل لانگمیر
n	قدرت و درجه جذب ماده جذب شونده (مدل فروندلیچ)
k_{RP} و β a_{RP}	پارامترهای ردلیچ پترسون
R	کارایی جذب (درصد)
V و m	وزن جاذب (گرم)، حجم محلول (لیتر)
K_F	ضریب مدل فروندلیچ در شاخص ظرفیت جذب عناصر
q_{\max}	حداکثر جذب عنصر توسط جاذب
q_i experimental	مقدار جذب به دست آمده از آزمایش
P	تعداد آزمایش‌ها
q_i model	مقدار به دست آمده از برازش مدل
α و k_1	توصیف کننده مکانیسم جذب و ثابت مدل IPD

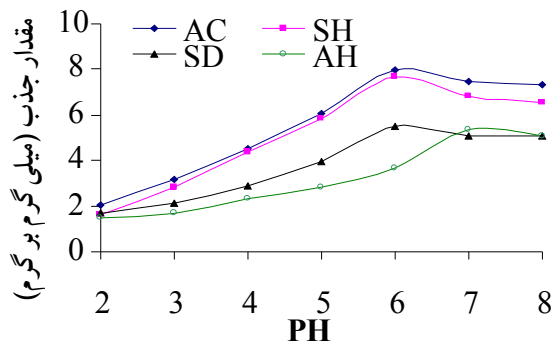
q_t مقدار جذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم، با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید [۳۵]

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} \times v \quad (1)$$

² Lagergerm

³ Ho et al

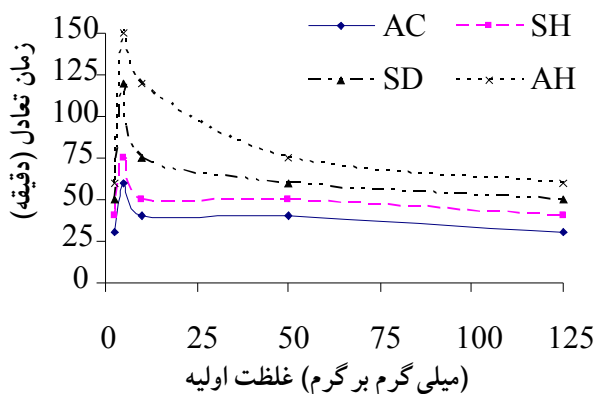
⁴ Rdlych Peterson



شکل ۱- تأثیر pH بر مقدار جذب نیکل توسط جاذبهای AC و SH، SD، AH

۳-۲- تأثیر غلظت اولیه بر زمان تعادل

زمان تعادل یکی از پارامترهای مهم فرایند سینتیک جذب است زیرا از این طریق می توان سرعت جذب مواد جذب شونده را بر روی سطح جاذب به دست آورد [۳۹]. شکل ۲ تغییرات زمان تعادل با غلظت اولیه را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش غلظت اولیه محلول از ۲/۵ میلی گرم در لیتر به ۵ میلی گرم در لیتر، زمان تعادل جذب افزایش می یابد، به طوری که در غلظت ۵ میلی گرم در لیتر زمان تعادل جذب در جاذبهای کربن فعال، پوسته فندق، خاک اره و پوسته بادام به حداکثر مقدار خود رسیده و به ترتیب برابر ۶۰، ۷۵، ۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه است. این در حالی است که با افزایش غلظت از ۵ میلی گرم در لیتر به ۱۲۵ میلی گرم در لیتر، زمان تعادل برای هر چهار جاذب به ترتیب برابر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه بوده و کاهش می یابد. تغییرات زمان تعادل با غلظت اولیه محلول با نتایج مطالعات جمالی و شاه محمدی هماهنگی دارد [۳۹ و ۴۰].



شکل ۲- تأثیر غلظت اولیه محلول بر زمان تعادل جذب نیکل توسط جاذبهای AC و SH، SD، AH (جرم جاذب: ۱ گرم در لیتر)

اگرچه تغییرات زمان تعادل با افزایش غلظت اولیه محلول برای تمامی جاذبها مشابه است ولی همواره زمان تعادل جاذبها به صورت

برای ارزیابی مدلها علاوه بر ضریب همبستگی از تابع خطا (F_{error}) نیز استفاده می شود [۳۶]

$$F_{error} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\frac{Q_i \text{ model} - Q_i \text{ experimental}}{Q_i \text{ experimental}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{p-1} \right)} \quad (2)$$

همچنین مشخصه اساسی ایزوترم لانگمیر توسط ثابت بی بعدی به نام پارامتر تعادل (R_L) که برای بررسی قابلیت استفاده از آن مدل به کار برده می شود به صورت رابطه ۳ ارائه شده است. توضیحات پارامتر تعادل در جدول ۳ ارائه شده است [۵]

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L \times C_0)} \quad (3)$$

جدول ۳- مقادیر پارامتر تعادل و کارایی مدل لانگمیر

مقدار پارامتر تعادل	توضیحات
$R_L=0$	مدل ناکارآمد و برگشت ناپذیر
$R_L>1$	مدل ناکارآمد و برگشت ناپذیر
$R_L=1$	استفاده از حالت خطی مدل مناسب است
$0<R_L<1$	مدل مناسب و مطلوب

۳- نتایج و بحث

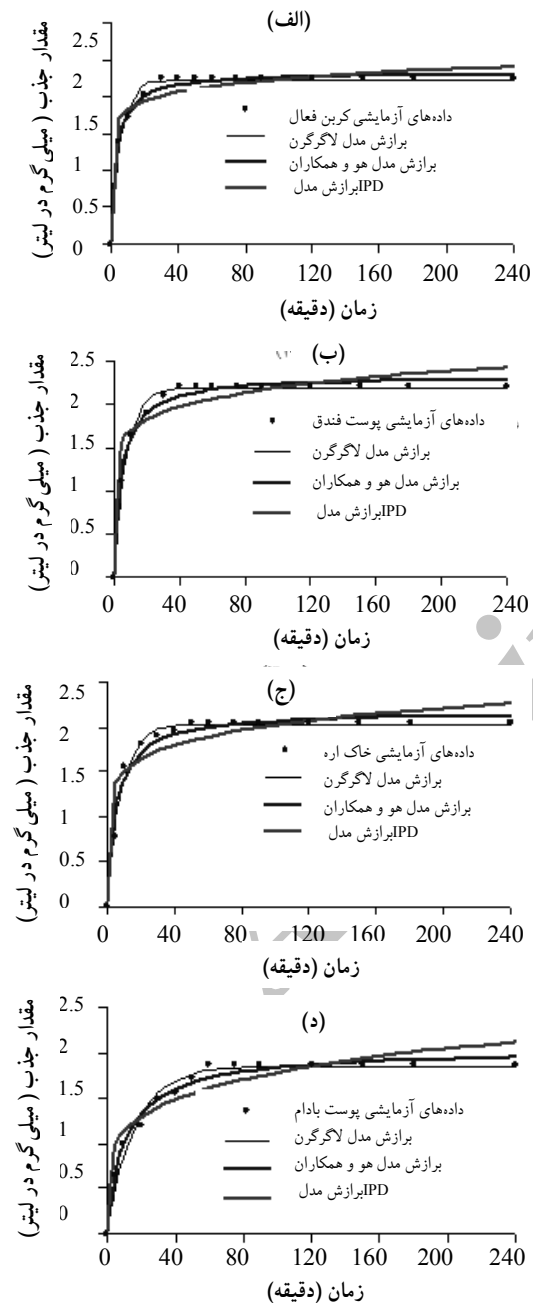
۳-۱- تعیین pH بهینه جذب

در فرایند جذب، pH محلول نقش مهمی در حذف فلزات سنگین دارد [۲۹]. شکل ۱ تأثیر pH بر کارایی جذب نیکل را نشان می دهد. حداکثر مقدار جذب در pH برابر با ۶ به ترتیب برای کربن فعال، ۷/۹۲ میلی گرم بر گرم، برای پوسته فندق ۷/۶۸ میلی گرم بر گرم و برای خاک اره ۵/۴۷ میلی گرم بر گرم به دست آمد، در حالی که برای پوسته بادام حداکثر مقدار جذب در pH برابر ۷، ۵/۳۴ میلی گرم بر گرم به دست آمد. شدت جذب نیکل برای جاذبهای کربن فعال و پوسته فندق از pH برابر ۲ تا pH برابر ۶ با شیب تقریباً ثابتی افزایش و از pH برابر ۶ به بعد کمی کاهش یافت. برای جاذب خاک اره شدت جذب از pH برابر ۲ تا pH برابر ۴ نسبتاً زیاد بود ولی از pH برابر ۴ تا pH برابر ۶ با شیب بیشتری افزایش یافت. شدت جذب برای این جاذب از pH برابر ۶ به بعد ابتدا کمی کاهش و سپس تقریباً ثابت ماند. برای جاذب پوسته بادام نیز شدت جذب از pH برابر ۲ تا pH برابر ۶ با شیب کم، ولی از pH برابر ۶ تا pH برابر ۷ با شیب بیشتری افزایش یافت. شدت جذب برای این جاذب از pH برابر ۷ به بعد ابتدا کمی کاهش و سپس تقریباً ثابت می ماند. کاهش مقدار جذب در pH برابر ۶ با نتایج مطالعات حبیب و همکاران و پهلویان و همکاران^۱ و کاهش مقدار جذب در pH برابر ۷ با نتایج مطالعات کومار^۲ هماهنگی دارد [۳۷، ۳۸ و ۳۹].

¹ Pehlivan et al.
² Kumar

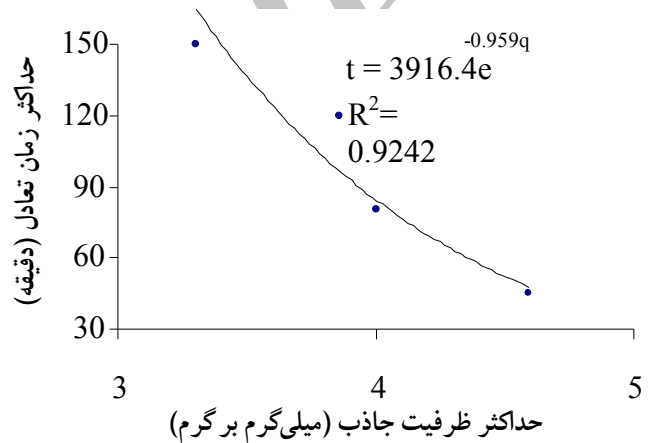
جاذب K_1 به ترتیب $AC > SH > SD > AH$ افزایش یافته است که می تواند نشان دهنده افزایش ظرفیت جذب جاذبها باشد [۳۲].

همچنین مقایسه ضرایب مدل هو و همکاران برای چهار جاذب کربن فعال (k_1 برابر $1/135 \text{ min}^{-1}$)، خاک اره (k_1 برابر $1/0.81 \text{ min}^{-1}$)، پوسته فندق (k_1 برابر $1/0.9 \text{ min}^{-1}$) و پوسته بادام (k_1 برابر $1/0.721 \text{ min}^{-1}$) نشان می دهد که سرعت جذب سطحی نیکل به صورت $AC > SH > SD > AH$ است.



شکل ۴- برازش مدل‌های سینتیک بر داده‌های جذب (الف-AC، ب-SH، ج-SD و د-AH)

$AC > SH > SD > AH$ ، نسبت به هم تغییر می نمایند. به عبارت دیگر سرعت جذب در جاذبها به صورت $AC > SH > SD > AH$ است. همچنین حداکثر اختلاف زمان تعادل در غلظت ۵ میلی گرم در لیتر اتفاق می افتد که نقطه اوج زمان تعادل به شمار می رود. از طرفی مقایسه حداکثر ظرفیت جذب جاذبها به صورت $SH > SD > AH > AC$ کربن فعال است (جدول ۴). بنابراین به نظر می رسد جاذبهایی که دارای ظرفیت جذب بیشتری هستند، سرعت جذب آنها به دلیل کاهش زمان تعادل، افزایش می یابد [۳۹ و ۴۰]. این موضوع در شکل ۳ به صورت رابطه بین حداکثر زمان تعادل و ظرفیت جذب جاذب (q_{max}) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش ظرفیت جذب، حداکثر زمان تعادل با ۹۰ درصد اطمینان به صورت رابطه توانی کاهش می یابد.



شکل ۳- رابطه ظرفیت جذب جاذبها با حداکثر زمان تعادل

۳-۳- مدل‌های جذب سینتیک

شکل ۴ برازش مدل‌های سینتیک بر داده‌های جذب نیکل در غلظت ۲/۵ میلی گرم در لیتر، توسط جاذبهای پوسته بادام، خاک اره، پوسته فندق و کربن فعال و همچنین جدول ۴ نتایج برازش مدل‌های لاگرگرن و هو و همکاران بر داده‌های جذب سینتیک نیکل نشان می دهد.

همان طور که مشاهده می شود هر دو مدل در سطح اعتماد ۹۵ درصد داده‌های فرایند جذب را به خوبی توصیف می کنند. در جاذبهای SH و SD، مدل لاگرگرن و در جاذبهای AC و AH، مدل هو و همکاران دارای کمترین فاکتور خطا و بیشترین ضریب همبستگی در برازش داده‌ها بوده و به عنوان مدل برتر در توصیف سینتیک جذب نیکل توسط جاذبهای ذکر شده هستند.

همچنین نتایج مدل IPD در جدول ۵ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، میزان پخشیدگی و نفوذ نیکل به داخل لایه‌های

جدول ۴- پارامترهای مدل‌های سینتیک جذب جاذبه‌های AH، SD، SH و AC

جاذب	هو و همکاران				لاگرگرن			
	F _{error}	R ²	K _S	q _e	F _{error}	R ²	K _F	q _e
AC	۰/۰۲۷۲	۰/۹۹	۰/۱۳۵	۲/۳۳	۰/۰۳۶۹	۰/۹۹	۰/۱۶۹	۲/۲۲
SH	۰/۰۳۸	۰/۹۸۹	۰/۰۹	۲/۳۳	۰/۰۲۸۵	۰/۹۹۳	۰/۱۳۳	۲/۱۹
SD	۰/۱۱	۰/۹۶۸	۰/۰۸	۲/۱۷	۰/۰۵۹۲	۰/۹۸۸	۰/۱۱	۲/۰۳
AH	۰/۰۴۷	۰/۹۸۶	۰/۰۷۲	۱/۷۷	۰/۰۹۸	۰/۹۸۷	۰/۰۸	۱/۶۳

جدول ۵- پارامترهای مدل IPD

نوع جاذب	R ²	K _I	α
AC	۰/۹۳	۵۹/۶۹	۰/۰۸۷
SH	۰/۹۱۱	۵۲	۰/۱۱
SD	۰/۸۶	۴۴	۰/۱۲۹
AH	۰/۹۲	۲۸/۰۵	۰/۲

جدول ۶- پارامترهای مدل‌های ایزوترم جذب جاذبه‌های AH، SD، SH و AC

نوع جاذب	فروندلیچ				لانگمیر				ردلیچ پترسون				
	F _{error}	R ²	n	K _F	F _{error}	R ²	K _L	q _{max}	F _{error}	R ²	β	a _{RP}	K _{RP}
AC	۰/۰۲۰۵	۰/۹۸۶	۱/۱۲	۲/۸۱	۰/۰۲۲	۰/۹۸۱	۰/۸۵	۴/۵۹	۰/۰۲۰۳	۰/۹۹۵	۰/۳۵	۰/۹	۵/۰۶
SH	۰/۰۳۳	۰/۹۸۵	۱/۱۴	۲/۴۷	۰/۰۳۱	۰/۹۹۱	۰/۸۹	۴/۰۰	۰/۰۲۹	۰/۹۹۲	۱۳/۱۲	۰/۹۳	۳/۱۹
SD	۰/۰۱۹۲	۰/۹۸۱	۱/۱۳	۱/۴۳	۰/۰۱۶۲	۰/۹۹۵	۰/۴۹	۳/۸۶	۰/۰۱۵	۰/۹۹۸	۱/۹۵	۰/۷۴	۱/۷۹
AH	۰/۰۳۰۲	۰/۹۷۲	۱/۱۴	۱/۰۱	۰/۰۱۷۱	۰/۹۸۱	۰/۴	۳/۳۰	۰/۰۱۵	۰/۹۹۹	۴/۶۳	۱/۴۳	۱/۱۹

ذرات است که تأثیر مستقیم بر سطح ویژه و در نتیجه تأثیر زیادی بر ظرفیت جاذب دارد. در جدول ۷ ظرفیت تعدادی از جاذبه‌های مورد مطالعه در جذب نیکل با نتایج مطالعات حاضر مقایسه شده است.

جدول ۷- مقایسه ظرفیت جاذبه‌های مطالعه حاضر با سایر جاذبه‌ها در جذب نیکل

مرجع	ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر گرم)	جاذب (اندازه ذرات بر حسب میکرون)
[۴۲]	۴/۶	خاک اره (پودری)
[۱۷]	۳/۸۳	پوسته فندق (۵۰۰)
[۱۷]	۳/۱۱	پوسته بادام (۴۲۵-۶۲۵)
[۴۳]	۱/۴-۶/۹	کائولین (-)
[۴۴]	۲	کربن فعال (دانه‌ای)
[۲۰]	۷/۱۷	پوسته بادام (پودری)
[۴۵]	۶/۸	پوسته موز (۵۰۰)
[۱۶]	۱۰/۱۱	کربن فعال شده از پوسته فندق (پودری)
[۴۶]	۱۲	ضایعات نیشکر (پودری)
[۱۳]	۹/۵	پوسته نارگیل (پودری)
مطالعه حاضر	۴/۵۹	کربن فعال چوب (پودری)
مطالعه حاضر	۴	پوسته فندق (۳۷۵)
مطالعه حاضر	۳/۸۶	خاک اره (۳۷۵)
مطالعه حاضر	۳/۳	پوسته بادام (۳۷۵)

۳-۴- مدل‌های ایزوترم جذب

در جدول ۶ نتایج برازش مدل‌های ایزوترم جذب نیکل توسط جاذبه‌های AH، SD، SH و AC نشان داده شده است. همه مدل‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد داده‌ها را به خوبی توصیف نموده‌اند. مقایسه بین جاذبه‌ها نشان می‌دهد که به ترتیب مدل‌های ردلیچ پترسون و لانگمیر دارای کمترین فاکتور خطا و بیشترین ضریب همبستگی، برای توصیف ایزوترم جذب نیکل توسط جاذبه‌های ذکر شده بودند.

شاخص مطلوبیت جذب (n) در مدل فروندلیچ برای جاذبه‌های مختلف در این تحقیق در محدوده ۱ تا ۱۰ قرار داشت که نشان دهنده مطلوبیت جذب در هر چهار جاذب است [۷، ۱۶، ۳۸] و [۴۱]. همچنین R_L نشان می‌دهد که مدل لانگمیر برای تمامی جاذبه‌ها از کارایی مناسبی برخوردار است. زیرا مقدار پارامتر تعادل برای جاذبه‌های AH، SD، SH و AC به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۴۵، ۰/۳۱ و ۰/۳۲ است. این نتیجه با نتایج دمیرباس و همکاران^۱ و پهلوان هم‌انگهی دارد [۱۶ و ۳۸].

تا کنون مطالعات متعددی در زمینه حذف نیکل از محیط آبی انجام شده است. اگر چه عوامل متعددی می‌توانند در ظرفیت جاذب مؤثر باشند ولی یکی از عوامل مهم مؤثر بر ظرفیت جذب، قطر

¹ Demirbas et al.

۴- نتیجه گیری

نتایج نشان داد که حداکثر زمان تعادل جذب نیکل توسط جاذبه‌های پوسته بادام، خاک اره، پوسته فندق و کربن فعال در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج برازش مدل‌های سینتیک نشان داد که برای جاذبه‌های پوسته فندق و خاک اره، مدل لاگرگرن و برای جاذبه‌های کربن فعال و پوسته بادام مدل هو و همکاران از برازش بهتری برخورداراند. سرعت جذب سطحی نیکل توسط جاذبه‌های کربن فعال، خاک اره، پوسته بادام و پوسته فندق به صورت $AC > SH > SD > AH$ است. مطالعه ایزوترم جذب نشان داد که برای تمامی جاذبه‌ها، به ترتیب مدل‌های ردلیچ پترسون و لانگمیر داده‌های ایزوترم را بهتر توصیف می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر زمان تعادل، تابع توانی از ظرفیت جذب است.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری‌های آقای دکتر مصطفی خواجه عضو هیئت علمی گروه شیمی دانشگاه زابل و خانم مهندس برخوردار کارشناس آزمایشگاه قدردانی می‌نمایند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود پوسته فندق و پوسته بادام در مطالعات آنادورای و همکاران^۱ از ظرفیت جذب کمتری نسبت به جاذبه‌های مشابه در مطالعه حاضر دارند [۴۵]. دلیل آن را می‌توان بزرگ‌تر بودن قطر ذرات جاذب در مطالعات آنادورای و همکاران نسبت به مطالعه حاضر دانست [۴۵]. در صورتی که همین استدلال مبنای قضاوت قرار گیرد، افزایش ظرفیت جاذب پوسته بادام در مطالعات هاسار^۲ نسبت به مطالعات حاضر نیز توجیه پذیر خواهد بود [۲۰]. همچنین افزایش ظرفیت جاذب کربن فعال پودری در مطالعات حاضر نسبت به ظرفیت جاذب کربن فعال دانه‌ای در مطالعات شیم و همکاران^۳ نیز می‌تواند تابع همین منطق باشد [۴۴]. کربن فعال شده از پوسته فندق از ظرفیت بسیار بالایی (۱۰/۱۱ میلی‌گرم بر گرم) نسبت به ظرفیت کربن فعال در مطالعه حاضر برخوردار است که احتمالاً ناشی از ماده اولیه کربن و درجه خلوص آن است [۱۶]. افزایش ظرفیت جاذب خاک اره در مطالعات بوزی و همکاران^۴ نسبت به مطالعه حاضر احتمالاً علاوه بر قطر ذرات به نوع چوب هم بستگی دارد [۴۲].

¹ Annadurai et al.

² Hasar

³ Shim et al.

⁴ Bozi et al.

۶- مراجع

- 1- Shahmohammadi, Z. (2010). "Lead removal from aqueous solutions using low-cost adsorbents." *J. of Water and Wastewater*, 75, 45-50. (In Persian)
- 2- Ramakrishnan, K. (1996). *Dye removal using peat*, American Dyestuff Reporter, Saskatchewan, Canada.
- 3- Yeddou, N., and Bensmaili, A. (2005). "kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by clay-wood sawdust mixture." *J. of Desalination*, 185, 499-508.
- 4- Dorris, K.L., Yu, B., Shukla, S.S., Zhang, Y., and Shukla, A. (2000). "The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption-removal of copper." *J. of Hazardous Materials*, 80, 33-42.
- 5- Goyer, R. (1991). "Toxic effects of metals." Amdur, M.O., Doull, J.D., and Klaassen, C.D. (Eds.) *Casarett and doulls toxicology*, 4th Ed., Pergamon Press, New York.
- 6- Tavakoli, M., and Tabatabaee, M. (1998). "Irrigation with treated wastewater." *Conference Proceedings Environmental Aspects of Wastewater Use in Irrigation*, 28, 1-26. (In Persian)
- 7- dos Santos, W.L., dos Santos, C.M.M., Costa, J.L.O., Andrade, H.M.C., and Ferreira, S.L.C. (2004). "Multivariate optimization and validation studies in on-line pre-concentration system for lead determination in drinking water and saline waste from oil refinery." *J. of Microchem*, 77, 123-129.
- 8- Gunay, A., Arslankaya, E., and Tosun, I. (2007). "Lead removal from aqueous solution by tatural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics." *J. of Hazardous Materials*, 146, 362-371.
- 9- Santelli, R.E., Bezerra, M.A., SantAna, O.D., Cassella, R.J., and Ferreira, S.L.C. (2006). "Multivariate technique for optimization of digestion procedure by focussed microwave system for determination of Mn, Zn and Fe in food samples using FAAS." *J. of Talanta*, 68, 1083-1088.
- 10- Kumar, U. (2006). "Agricultural products and by-products as low cost adsorbent for heavy metal removal from water and wastewater: A review." *J. of Scientific Research and Essay*, 1(2), 33-37.

- 11- Asadi, F., Shariatmadari, H., and Mirghaffari, N. (2008). "Modification of rice hull and sawdust sorptive characteristics for remove heavy metals from synthetic solutions and wastewater." *J. of Hazardous Materials*, 154, 451-458.
- 12- Dorris, K.L., Yu, B., Zhang, Y., Shukla, S.S., and Shukla, A. (2000). "The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption-removal of copper." *J. of Hazardous Materials*, 80, 33-42.
- 13- Ewecharoen, A., Thiravetyan, P., and Nakbanpote, W. (2008). "Comparison of nickel adsorption from electroplating rinse water by coir pith and modified coir pith." *J. of Chemical Engineering*, 137, 181-188.
- 14- Sen Gupta, B.M., Curran, S., and Hasan, T.K. (2009). "Ghosh, adsorption characteristics of Cu and Ni on Irish peat moss." *J. of Environ. Manage.*, 90, 954-960.
- 15- Kobya, M. (2004). "Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: Kinetic and equilibrium studies." *J. of Biores Technol*, 91, 317-321.
- 16- Demirbas, E., Kobya, M., Oncel, S., and Sencan, S. (2002). "Removal of Ni(II) from aqueous solution by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: Equilibrium studies." *J. of Biores. Technol.*, 84, 291-293.
- 17- Bulut, Y., and Tez, Z. (2007). "Adsorption studies on ground shells of hazelnut and almond." *J. of Hazardous Material*, 149, 35- 41.
- 18- Kazemi pour, M., Ansari, M., Tajrobehkar, S., Majdzade, M., and Kermani, H. (2008). "Removal of lead, cadmium, zinc and copper from industrial wastewater by carbon developed from walnut, hazelnut, almond, pistachio shell and apricot ston." *J. of Hazardous Materials*, 150, 322-327.
- 19- Semerjian, L. (2009). "Equilibrium and kinetics of cadmium adsorption from aqueous solutions using untreated pinus halepensis sawdust." *J. of Hazardous Materials*, 156, 245-257.
- 20- Hasar, H. (2003). "Adsorption of nickel (II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from almond husk." *J. of Hazardous Materials*, 97, 49-57.
- 21- Saeedi, M., Jamshidi, A., and Bayat, J. (2009). "Water-soluble cadmium absorbed by the charcoal made from walnut and almond shells and comparison with granular activated carbon." *J. of Water and Wastewater*, 70, 16-22. (In Persian)
- 22- Memon, S.Q., Memon, N., Khuhawar, M.Y., and Bhanger, M. I. (2007). "Sawdust-A green and economical sorbent for the removal of cadmium(II) ions." *J. of Hazardous Materials*, 139, 116-121.
- 23- Babel, S., and Kurniawan, T.A. (2003). "A research study on Cr (VI) removal from contaminated wastewater using natural zeolite." *J. of Ion Exchange*, 14, 289-292.
- 24- Aydin, H., Bulut, Y., and Yerlikaya, C. (2008). "Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low- cost adsorbents." *J. of Environment Management*, 87, 37-45.
- 25- Gregg, S.J., and Sing, K.S.W. (1982). *The physical adsorption of gases by nonporous solids: The type II isotherm, in adsorption, surface area and porosity*, Academic Press, London.
- 26- Hequet, E., Abidi, N., and Gourlot, J.P. (1998). "Application of methylene blue adsorption to cotton fiber specific surface area measurement: Part 1 methodology." *J. of Cotton Science*, 2, 164-173.
- 27- Low, M.J.D. (1960). "Kinetics of chemisorption of gases on solids." *J. of Chem. Rev.*, 60, 267-312.
- 28- Pahlavanzadeh, H., Keshtkarb, A.R., Safdarib, J., and Abadi, Z. (2010). "Biosorption of nickel(II) from aqueous solution by brown algae: Equilibrium, dynamic and thermodynamic studies." *J. of Hazardous Materials*, 175, 304-310.
- 29- Crini, G., and Badot, P.M. (2008). "Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature." *J. of Prog. Polym. Sci.*, 33, 399-447.

- 30- Lagergren, S. (1898). "About the theory so-called adsorption of soluble substances." *J. of Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1-39.
- 31- Ho, Y.S., Wase, D.A., and Forster, C.F. (1996). "Kinetic studies of competitive heavy metal adsorption by sphagnum moss peat." *J. of Environment Technology*, 17, 71-77.
- 32- El-Halwany, M.M. (2010). "Study of adsorption isotherms and kinetic models for methylene blue adsorption on activated carbon developed from Egyptian rice hull (part II)." *J. of Desalination*, 250, 208-213.
- 33- Langmuir, I. (1916). "The constitution and fundamental properties of solids and liquids." *J. of Am. Chem. Soc.*, 38, 2221-2295.
- 34- Freundlich, H.M. (1906). "Über die adsorption in lasungen." *J. of Z. Phys. Chem.*, 57, 385-470.
- 35- Box, G.E.P., Hunter, W.G., and Hunter, J.S. (1997). *Statistics for Experimenters*, Wiley, New York.
- 36- Royer, B., Cardoso, N., Lima, E., Vaghetti, J., Simon, N., Calvete, T., and Veses, R. (2009). "Applications of Brazilian pine-fruit shell in natural and carbonized forms as adsorbents to removal of methylene blue from aqueous solutions-kinetic and equilibrium study." *J. of Hazardous Materials*, 164, 1213-1222.
- 37- Habib, A., Islam, N., Islam, A., and Shafiqul Alam, A.M. (2007). "Removal of copper from aqueous solution using orange peel, sawdust and bagasse." *pak. J. of Anal. Environ. Chem.*, 8(1-2), 21-25.
- 38- Pehlivan, E., and Altun, T. (2008). "Biosorption of chromium (VI) ion from aqueous solutions using walnut, hazelnut and almond shell." *J. of Hazardous Materials*, 155, 378-384.
- 39- Jamali Armandi, H., and Shahmohammadi, Z. (2010). "Concentration effect on the efficiency of absorption of lead time and the balance of the water environment by the shell grain." *J. of Environmental Science and Technology*, 12(1), 31.
- 40- Shahmohammadi, Z., and Jamali armandi, H. (2010). "Convergence time of balance and efficiency of lead absorption by grain crust and low concentrations of active carbon." *J. of Environmental Studies*, 54, 19-21. (In Persian)
- 41- Taffarel, S.R., and Rubio, J. (2009). "On the removal of Mn^{+2} ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites." *J. of Minerals Engineering*, 22, 336-343.
- 42- Bozi, C., Stankovi, C., Gorgievski, M., Bogdanovi, C., and Kovacevi, R. (2009). "Adsorption of heavy metal ions by sawdust of deciduous trees." *J. of Hazardous Materials*, 171, 684-692.
- 43- Cristina, Q., Zélia, R., Bruna, S., Bruna, F., Hugo, F., and Teresa, T. (2009). "Removal of Cd (II), Cr (VI), Fe (III) and Ni (II) from aqueous solutions by an *E. colibiofilm* supported on kaolin." *J. of Chemical Engineering*, 149, 319-324.
- 44- Shim, J., Park, S., and Ryu, S. (2001). "Effect of modification with HNO_3 and $NaOH$ by pitch-based activated carbon fibers." *J. of Carbon*, 39, 1635-1642.
- 45- Annadurai, A., Juang, R., and Lee, D. (2002). "Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels." *J. of Water Sci. Technol.*, 47(1), 185-190.
- 46- Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Shahram, M., and Saini, V.K. (2003). "Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste." *J. of Water Research*, 37(16), 4038-4044.