

## بررسی عوامل مؤثر بر حذف جیوه از فاز مایع به روش جذب سطحی بر روی جاذب‌های کربنی

محمد ذیحی<sup>۱</sup>، علی احمدپور<sup>۲\*</sup>، علی حقیقی اصل<sup>۱</sup>

۱- سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

۲- مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: ahmadpour@um.ac.ir

### چکیده

امروزه بشر با دستیابی به علم و فناوری‌های جدید اگرچه ابزار زندگی بهتری را برای خود فراهم نموده است، لیکن از سوی دیگر باعث تخریب و به خطر انداختن محیط زندگی خود نیز شده است. یکی از آلودگی‌های محیط زیست که همواره بشر و دیگر موجودات زنده را تهدید می‌کند آلودگی ناشی از یون جیوه است که در این مقاله به بررسی جذب سطحی این ماده سمی و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده که مهمترین آن‌ها عبارت‌اند از: تغییرات دما و pH محیط، اثر غلظت اولیه مادر آب و مواد تلقیح‌دهنده جاذب. از مؤثرترین روش‌های حذف این یون سمی از فازهای گاز و مایع، تکنیک جذب سطحی توسط جامدهای متخلخل است که در این میان، جاذب‌های کربنی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. با توجه به اهمیت موضوع مذکور، در مقاله حاضر، عوامل مؤثر در حذف جیوه از فاز مایع توسط جاذب‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در میان این عوامل، اندازه کوچکتر ذرات جاذب، روزه‌های ریز زیاد در ساختار آن، بالا بودن pH محیط و افزایش غلظت اولیه جیوه، باعث بالا رفتن میزان جذب جیوه از فاز مایع می‌شوند.

کلمات کلیدی: جذب سطحی، جیوه، کربن فعال، فاز مایع

### ۱- مقدمه

انتشار یون جیوه مربوط به کشور آمریکا است که در حدود ۳۰٪ از سهم آلودگی با این یون را در جهان به خود اختصاص داده است [۲]. در سال‌های اخیر از طریق سازمان جهانی علوم، تحقیقات بسیار فراوانی بر روی آلودگی ناشی از جیوه در مورد ماهی‌ها و چرخه غذایی بشر صورت گرفته است. بر اساس همین تحقیقات، مشاهده شده است که منابع طبیعی انتشار جیوه عامل اصلی نفوذ جیوه به داخل آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌هاست که از طریق میکرو ارگانیسم‌های آب و

تاکنون برای حذف جیوه و سم‌زدایی آن یون، شرکت‌ها و سازمان‌های بسیار زیادی توانایی‌های خود را برای حذف این یون خطرناک به کار گرفته‌اند که از این قبیل سازمان‌ها می‌توان به سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا EPA و شرکت NETL<sup>۱</sup> اشاره کرد [۱]. بیشترین میزان

1. Department of Energy's National Energy Technology Laboratory

خاک، این عنصر به مواد بسیار سمی تبدیل می‌شوند به طوری که مرگ موجودات زنده را به همراه خواهند داشت [۳]. بر اساس مصوبات سازمان ISI<sup>۱</sup>، میزان مجاز یون جیوه در آب‌های زیرزمینی  $1 \mu\text{g/l}$  و در آب‌های آشامیدنی  $1 \mu\text{g/l}$  است [۴]. برای حذف جیوه، از جاذب‌های بسیار زیادی استفاده شده است که اغلب آنها جاذب‌های کربنی می‌باشند. این جاذب‌ها خود از پایه‌های گوناگونی ساخته شده اند که در این مقاله به بررسی برخی از این جاذب‌ها و پایه‌های آن‌ها اشاره می‌شود. از مواد پایه استفاده شده جهت ساخت جاذب‌های کربنی (کربن فعال) می‌توان به بادام هندی [۴]، چیتوسان [۵]، جلبک‌های دریایی [۶-۸]، هسته زردآلو [۹]، رزین [۱۰]، خاک گل رس (مرکاپتازل) [۱۱]، تفاله نیشکر [۱۲]، فورفورال [۱۳ و ۱۴]، آنتی بیوتیک [۱۵]، خاکستر حاصل از احتراق سوخت‌ها [۱۶]، خاک رس [۱۷]، ضایعات پلاستیک [۱۸]، زغال سنگ [۱۹]، سیمان [۲۰]، ضایعات لاستیک [۲۱]، کنول و اکریلیک [۲۲] و مواردی دیگر اشاره کرد. بررسی‌های به عمل آمده در این زمینه نشان می‌دهند که جاذب‌های کربنی با پایه مواد کشاورزی و گیاهی بهترین گزینه‌ها هستند و اقتصادی ترین نتیجه را جهت حذف یون جیوه از فاز مایع به دنبال دارند.

## ۲- طریقه ساخت کربن فعال

کربن فعال به عنوان یک جاذب با ظرفیت جذب بالا و قیمت پایین، کاربردهای بسیار فراوانی را در فرآیندهای جذب از فاز گاز و یا فاز مایع یافته است. از جمله کاربردهای این ماده در جذب از فاز مایع می‌توان به رنگ‌زدایی از محلول شکر، تصفیه آب آشامیدنی و تصفیه پساب و در جذب از فاز گاز، به استفاده از گاز در ماسک‌های گاز و سیستم‌های بازیافت حلال اشاره کرد. مواد اولیه مختلفی را می‌توان به عنوان ماده خام برای تولید این محصول به کار گرفت که از میان آنها مواد خام سلولوزی نظیر پوست نارگیل، هسته میوه‌ها و سایر ضایعات کشاورزی و همچنین مواد خام کربنی نظیر زغال سنگ، کک نفتی و قیر قطران زغال سنگ و مواد خام پلیمری شامل ضایعات انواع لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها کاربرد زیادی داشته‌اند. استفاده از مواد خام سلولوزی برای جذب از فاز مایع خصوصا در مواقعی که هدف از کاربرد محصول نهایی استفاده از آن در فرآیندهای صنایع غذایی باشد، به علت وجود

1. Indian Standards Institution

ناخالصی کمتر در آنها، مناسب‌تر است.

تولید کربن با استفاده از دو روش فعال‌سازی فیزیکی و شیمیایی امکان پذیر است. هدف از فعال‌سازی ایجاد یک ساختار متخلخل کربنی با سطح آزاد زیاد است. در روش فعال‌سازی فیزیکی، ماده خام، نخست در محیطی بدون حضور هوا کربونیزه می‌شود تا پایه کربنی اولیه تشکیل گردد. در این شرایط ترکیبات سلولوزی و پلیمری موجود در ماده خام به زغال تبدیل می‌شوند و مواد خامی نظیر زغال سنگ ترکیبات فرار خود را از دست می‌دهند. سپس ماده بدست آمده در معرض یک عامل فعال‌ساز در دمای بالا قرار می‌گیرد. عامل فعال‌ساز معمولا بخار آب، دی اکسید کربن، اکسیژن و یا مخلوطی از آنهاست. این عامل، کربن موجود در ماده را به صورت مونوکسید یا دی اکسید کربن از آن، خارج می‌کند که در نتیجه یک ماده متخلخل به دست می‌آید. در روش شیمیایی که یک روش تک مرحله‌ای به شمار می‌آید ماده خام با یک محلول غلیظ از ماده فعال‌ساز مخلوط می‌شود و سپس در کوره در تماس با یک گاز بی اثر قرار می‌گیرد. از مواد فعال‌ساز در این روش می‌توان به هیدروکسید پتاسیم، کربنات پتاسیم، کلرید منیزیم، اسید فسفریک، اسید سولفوریک، کلرید روی، کلرید آلومینیم و... اشاره کرد [۲۳]. انتخاب روش فعال‌سازی، چگونگی تخلخل محصول را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان مثال، مشخص شده است که فعال‌سازی فیزیکی روزه‌های بوجود آمده در جاذب را مخروطی و فعال‌سازی شیمیایی این روزه‌ها را بطری شکل می‌سازد [۲۴]. در این مقاله، کلیه مطالعاتی که در خصوص تولید کربن‌های فعال از مواد متنوع خام به عمل آمده اند در جدول (۱) خلاصه شده است. همچنین طرح اجمالی سیستم تهیه کربن فعال در شکل (۱) به تفصیل ارائه گردیده است.

## ۳- بررسی اثر عوامل مؤثر بر حذف جیوه از فاز مایع

در این بخش از مقاله به بررسی اثرات عوامل متفاوت از قبیل pH، غلظت اولیه محلول، ساختار کربن فعال تولید شده برای حذف جیوه از فاز مایع و اثر مواد تلقیح دهنده مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱ بررسی اثر pH

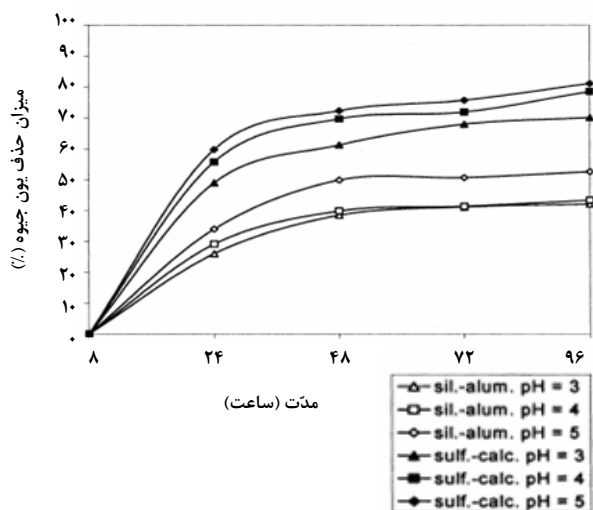
در تحقیقات مختلفی که در مورد حذف جیوه توسط جاذب‌های کربنی متفاوت صورت گرفته سه روند کلی مشاهده شده است. در مورد اول با

نشان‌دهنده افزایش جذب سطحی جیوه با افزایش pH می‌باشد مربوط به کارهای صورت گرفته توسط ضایعات آنتی بیوتیک است [۱۵]. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد با افزایش pH میزان حذف به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد.

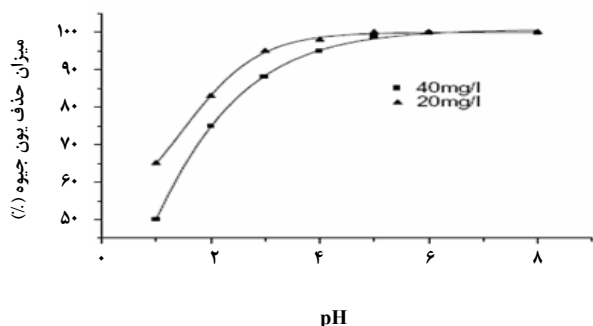
افزایش pH محیط میزان حذف جیوه افزایش یافته است [۴۷]. در حالت دوم افزایش حذف تا pH معینی ادامه داشته و سپس ثابت باقی مانده [۴۸] و حالت سوم یک روند افزایشی تا یک pH خاص را نشان می‌دهد و پس از آن مقدار حذف کاهش می‌یابد [۴۹]. نمونه‌های از پژوهش‌های انجام شده در خصوص مورد اول که

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های ساخت جاذب کربنی با پایه‌های متفاوت

مرجع	ماده شوینده بعد از کربونیزاسیون	سطح فعال (m <sup>2</sup> /g)	سرعت حرارت دهی (°C/min)	مدت کربونیزاسیون (h)	دمای کربونیزاسیون (°C)	ماده تلقیح دهنده	ماده اولیه
[۱۵]	آب مقطر داغ	۱۲۶۰	۱۰	-	۵۰۰-۹۵۰	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ضایعات آنتی بیوتیک
[۲۳]	آب مقطر داغ	۴/۶	-	-	-	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	بادام هندی
[۲۲]	آب مقطر داغ	۸۴۸-۱۲۲۰	-	۱-۴	۶۰۰-۸۰۰	S(solid) H <sub>2</sub> S	کربن فعال فیبری
[۱۴]	آب مقطر داغ	-	-	۱	۶۰۰	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	فورفورال
[۲۵]	HCl	-	-	۱/۲۵	۴۵۰-۴۶۵	ZnCl <sub>2</sub>	ضایعات پارچه
[۲۶]	آب مقطر داغ	۱۳۱۹	-	۴	۵۰۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	خرما
[۲۷]	آب مقطر داغ	-	۱۰	۱/۵	۷۸۰	KOH	جوب درخت صنوبر
[۲۸]	HCl	۱۶۰۰-۱۷۰۰	۱۰	۲	۳۵۰-۸۰۰	ZnCl <sub>2</sub>	پوسته پسته
[۲۹]	آب مقطر داغ	-	-	۱	۸۰۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	هسته خرما
[۳۰]	HCl	-	۱۰	۱	۷۰۰	KOH	چوب
[۳۱]	آب مقطر داغ	۱۰۹۲	-	۱-۴	۶۵۰-۸۵۰	S	هسته زرد آلو
[۳۲]	-	۲۴۵۱	-	۱	۶۰۰-۸۰۰	KOH	پوست نارگیل
[۳۳]	آب مقطر داغ	۱۳۰۵	۱۰	۲	۴۰۰-۶۵۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	زغال سنگ گرافیت
[۳۴]	-	۱۴۸۴	۱۰	۱	۸۴۰	KOH	هسته زیتون
[۳۵]	-	-	۱۰	۲	۵۰۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	پوسته پسته
[۳۶]	-	۷۸۳	۵	۴	۳۰۰-۶۰۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	چوب بلوط
[۳۷]	-	۱۳۶	۸	۲	۳۵۰-۵۵۰	-	زغال
[۳۸]	HCl	۳۲۹۳	-	۱	۸۰۰	KOH	زغال
[۳۹]	آب مقطر داغ	۱۳۶۰	۳	۱	۶۰۰	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	چوب درخت غوشه
[۴۰]	آب مقطر داغ	۱۰۰۰	۱۰	۱	۵۰۰-۹۰۰	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	زغال
[۴۱]	HCl	۲۴۰۰	۱۰	۱	۸۰۰	ZnCl <sub>2</sub>	مواد سلولوزی
[۴۲]	HCl	۱۹۹۷	۸	۱	۴۰۰-۷۳۰	KOH	زغال نفتی
[۴۳]	آب مقطر داغ	۱۱۷۰	۱۰	۲	۸۰۰	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	پوسته خرما
[۴۴]	-	۱۱۸۳	۱۰	۱-۳	۴۵۰-۷۵۰	KOH	پوست نشاسته
[۴۵]	-	-	-	-	۵۰۰-۹۰۰	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	زغال ترکیه
[۴۶]	-	۱۳۵۰	-	۱/۲۵	۴۶۵	ZnCl <sub>2</sub>	خاکه اره، سیوس
[۱۸]	-	۱۶۹۰	۱۰۰	۱-۳	۸۰۰	KOH	ضایعات پلاستیک

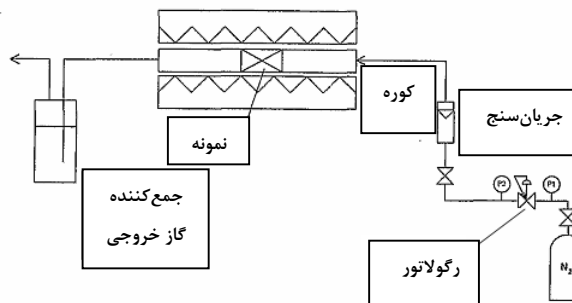


شکل ۲- جذب سطحی جیوه با دو نوع خاکستر silico-aluminous و sulfo-calcic [۱۶]

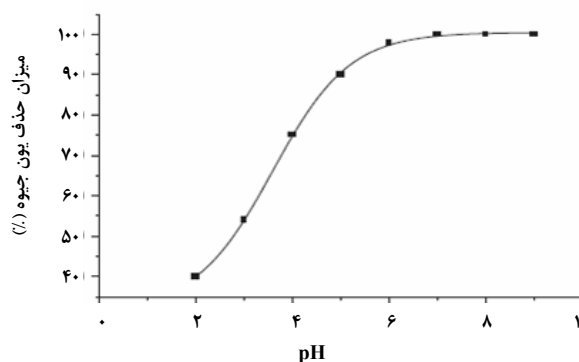


شکل ۴- جذب سطحی جیوه توسط کربن فعال با پایه فورفورال در غلظت‌های اولیه متفاوت محلول جیوه [۱۴]

ضمناً در مطالعه‌ای که بر روی کربن فعال توسط ژانگ و همکارانش با پایه لجن فاضلاب [۴۸] صورت گرفته است افزایش حذف با افزایش pH گزارش شده است. به طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در pHهای پایین می‌توان اثر غلظت اولیه (مادر آب) را نادیده گرفت ولی با افزایش pH غلظت اولیه نقش مهمی را در حذف ایفا می‌کند. نکته بسیار جالب در این بررسی آن است که با افزایش pH اثر غلظت اولیه محلول حالت عکس گرفته که با افزایش آن، میزان حذف جیوه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱- سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در ساخت کربن فعال

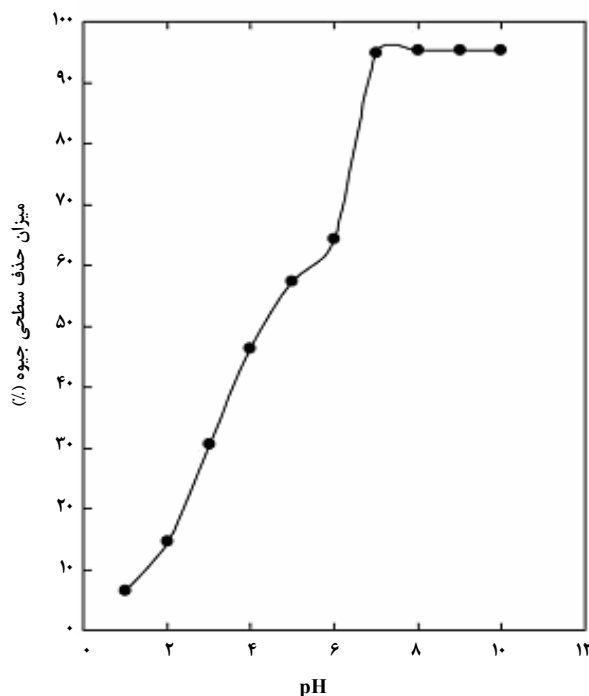


شکل ۲- اثر pH در حذف جیوه توسط ضایعات آنتی بیوتیک با غلظت اولیه ۴۰ ppm [۱۵]

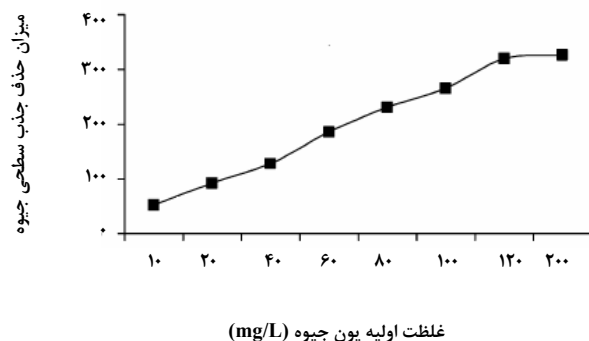
همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، در حذف جیوه با استفاده از خاکستر حاصل از احتراق [۱۶] با افزایش pH افزایش در میزان حذف را خواهیم داشت به گونه‌ای که این افزایش در فاصله pH=۴-۵ خود را بیشتر نشان می‌دهد. یعنی هر اندازه از محیط اسیدی فاصله گرفته و به محیط خنثی نزدیک شویم میزان جذب سطحی جیوه بر روی این جاذب کربنی افزایش می‌یابد. دلیل این امر زیاد شدن یون  $\text{OH}^-$  در محیط عمل است بطوری که پیوند شیمیایی قوی بین یون  $\text{Hg}^{++}$  برقرار می‌گردد. در این حالت اتصال گروه‌های به وجود آمده به جاذب کربنی با سرعت و قدرت بیشتری صورت می‌گیرد.

در بررسی به عمل آمده توسط یاردیم و همکارانش بر روی جاذب کربنی با پایه فورفورال [۱۴] مشاهده شده است که با افزایش pH میزان جذب نیز افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در محیط خنثی اثر pH بر اثر غلظت اولیه غلبه می‌کند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، هر دو منحنی در حالت خنثی بر یکدیگر منطبق شده‌اند و اثر pH یک عامل کنترل کننده محسوب می‌گردد.

شده است که با افزایش غلظت اولیه جیوه، میزان حذف بیشتری خواهیم داشت که در این بخش از مقاله به بعضی از این نتایج اشاره می‌شود. در مطالعه‌ای که بر روی حذف این یون از فاز مایع توسط کربن حاصل از لجن‌های فاضلاب انجام گرفته [۴۸] میزان حذف با غلظت اولیه (مادرآب) رابطه مستقیمی را نشان داده است (شکل (۷)).

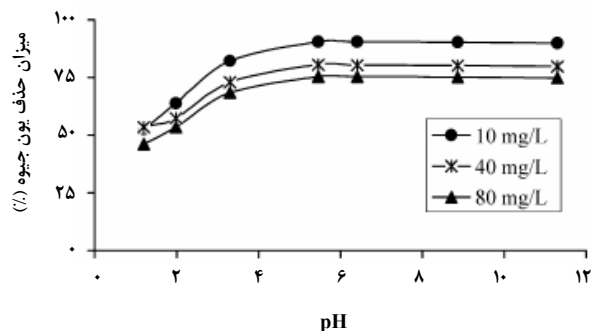


شکل ۵- بررسی اثر pH در حذف جیوه از فاز مایع با کربن فعال حاصل از ضایعات فاضلاب [۴۸]



شکل ۶- اثر pH بر حذف جیوه از فاز مایع با کربن فعال از پایه بادام هندی [۴]

شکل ۷- اثر غلظت اولیه محلول در حذف جیوه توسط کربن فعال حاصل از لجن فاضلاب [۴۸]



شکل ۲- بررسی اثر pH در حذف جیوه با باسیل‌های غیر قابل رشد

در بررسی دیگری که توسط رویز در مورد حذف جیوه صورت گرفته است از باسیل‌های غیر قابل رشد [۴۹] استفاده شده است. نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهند که با افزایش pH تا میزان ۶ افزایش حذف جیوه ادامه می‌یابد ولی با افزایش بیشتر این روند معکوس می‌گردد. بنابراین در این نوع جاذب طبیعی، بهترین حالت حذف در pH حدود ۶ رخ می‌دهد.

جدول ۲- بررسی اثر pH در حذف جیوه با باسیل‌های غیر قابل رشد

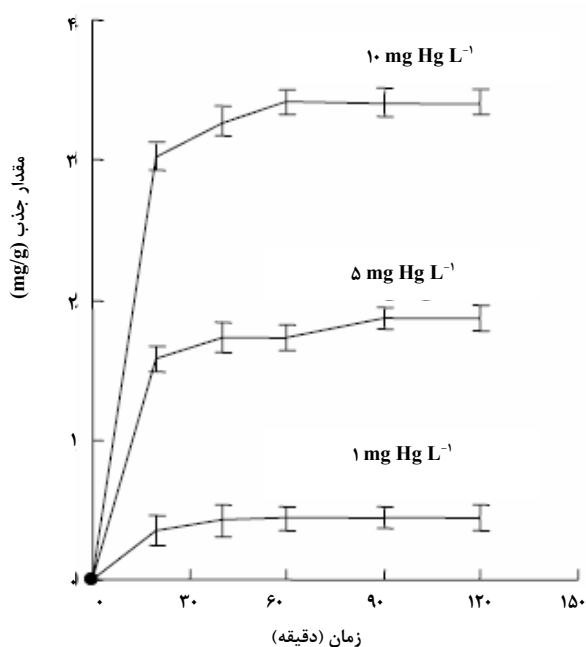
میزان حذف جذب سطحی جیوه	pH
۳۱/۴	۳
۶۸/۳	۴/۵
۸۸/۱	۶
۱۵/۹	۷/۵
۱۲/۹	۹

در مطالعه دیگری که توسط اینباراج و سولوتاناج بر روی بادام هندی [۴] در ساخت کربن فعال صورت گرفته مشاهده شده است که با افزایش pH تا میزان ۷ افزایش جذب وجود داشته است. از pH حدود ۷ به بعد این روند، همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

#### ۴- اثر غلظت اولیه جیوه

در تحقیقات به عمل آمده در مورد حذف جیوه از فاز مایع مشاهده

میزان تلقیح مورد نیاز جهت کسب سطح مشخصی از جاذب تولیدی جهت جذب یون‌های مختلف متفاوت است به طوری که یک مقدار بهینه را بایستی معین کرد تا بالاترین بازدهی را در این راستا داشته باشد. در جذب سطحی جیوه به روش شیمیایی از فاز مایع، آزمایش‌های گوناگونی انجام شده است. ویزوات و همکاران [۲۱] مشاهده کردند که با عمل تلقیح ماده خام با مواد شیمیایی  $H_2SO_4$  و  $HNO_3$  و یا مخلوطی از این دو، سرعت جذب سطحی جیوه از فاز مایع بسیار افزایش یافته است. ماده اولیه در این تحقیق، از ضایعات پلاستیک بوده و حداکثر میزان جذب  $211 \text{ mg.g}^{-1}$  حاصل شده است.

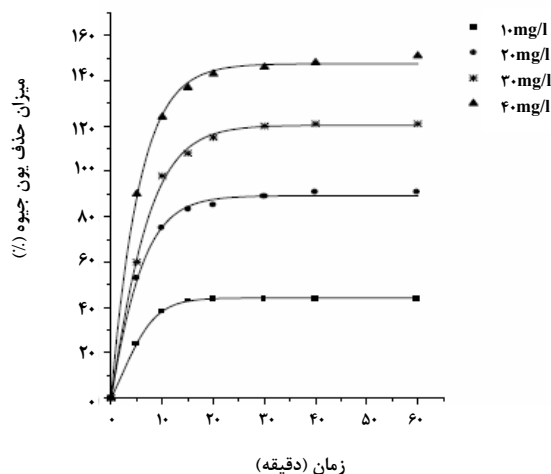


شکل ۹- اثر غلظت اولیه محلول در حذف جیوه در  $pH=6$  [۴۹]

#### ۶- اثر دمای کربونیزاسیون

ویزوات و همکاران [۲۱] در مطالعه خود مشاهده کردند که بهترین میزان جذب جیوه مربوط به کربن فعالی است که در محدوده دمایی  $400$  تا  $900$  درجه سانتیگراد کربونیزه شده است. در مطالعه دیگری که توسط بودینووا و همکاران [۱۵] انجام گرفت بالاترین مقدار عدد یدی که نشان‌دهنده میزان سطح فعال کربن می‌باشد برای نمونه‌های کربونیزه شده در دمای حدود  $900^\circ C$  حاصل گردید.

در تحقیق دیگری که در مورد حذف جیوه توسط کربن فعال توسط اینباراج و سولوتاناج با پایه پوست بادام هندی صورت گرفته مشاهده شده است که با افزایش غلظت اولیه از  $5$  تا  $60 \text{ mg/l}$  میزان حذف طبق یک رابطه مستقیم از  $67/21$  تا  $32/85 \text{ mg/g}$  تغییر کرده است [۴]. در کار مشابهی که بر روی کربن فعال با پایه فورفورال انجام گرفته نتیجه یکسانی حاصل شده است [۱۴]. نتایج مربوط به میزان جذب بر حسب زمان در  $pH=5/5$  و در غلظت‌های متفاوت مادر آب را می‌توان در شکل (۸) مشاهده کرد.



شکل ۸- حذف جیوه در  $pH=5/5$  در غلظت‌های متفاوت مادر آب توسط کربن فعال با پایه فورفورال [۱۴]

نتیجه مشابه دیگری در مطالعه انجام شده بر روی میکرو ارگانیسم‌ها مشاهده شده است که این موضوع در شکل (۹) ارائه گردیده است. با توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که همواره امکان افزایش میزان حذف جیوه از فاز مایع با افزایش غلظت مادر آب وجود دارد.

#### ۵- اثر تلقیح با مواد شیمیایی

همانطور که توضیح داده شد در روش شیمیایی برای تهیه کربن فعال، ماده اولیه را با مواد شیمیایی مختلف تلقیح می‌کنند که بر اثر این تلقیح، سطح بزرگی از ماده خام توسط این مواد اشغال می‌گردد. ولی از طرفی مشاهده شده است که با انجام عمل تلقیح، میزان جذب عنصر هدف توسط کربن فعال تولیدی افزایش یافته که در نتیجه، بازدهی بالاتری خواهیم داشت. البته باید به این نکته توجه شود که

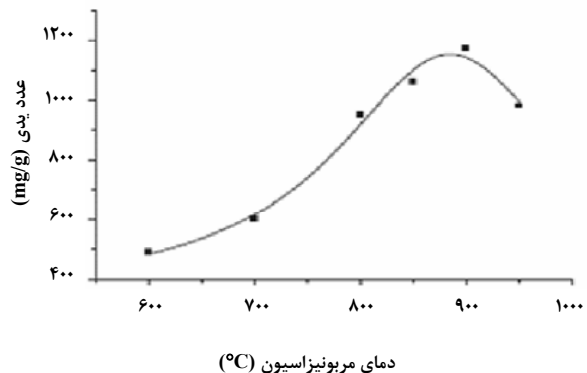
روزنه‌های ریز به علت حجم و سطح بسیار زیاد خود بیشترین اهمیت را در عمل جذب دارند. حداقل (۹۵-۰.۹۰٪) سطح کل یک کربن فعال را روزنه‌های ریز آن تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب، بهترین جاذب، ماده‌ای است که دارای بیشترین ریز روزنه‌های متناسب با مولکول جذب شده باشد. به صورت تئوری در حین عمل جذب، روزنه‌های ریز به تدریج اشباع شده و روزنه‌های متوسط پس از آن عمل جذب را انجام می‌دهند. روزنه‌های درشت عملاً در جذب نقشی نداشته و تنها به عنوان یک شاهراه عمل می‌کنند و عمل انتقال مولکول‌های جذب شونده به روزنه‌های دیگر را به عهده دارند.

میزان جذب مولکول‌ها توسط جاذب کربنی را می‌توان توسط مدل‌های تئوری و تجربی بسیار زیادی مورد بررسی قرار داد. مدل‌های مذکور مقدار جذب را بر حسب غلظت جذب شونده (در فاز مایع) در یک دمای معین بیان می‌کنند و به تکدماهای جذب معروف می‌باشند. از میان تکدماهای مختلف، دو تکدمای فروندلیچ<sup>۵</sup> و لانگمویر<sup>۶</sup> کاربرد فراوانی را در مدل‌سازی جذب از فاز مایع بر عهده دارند. معادلات زیر به ترتیب معرف نمودارهای تکدمای فروندلیچ و لانگمویر می‌باشند [۵۰]. با استفاده از خطی‌سازی می‌توان پارامترهای مدل‌های مذکور را بدست آورد.

$$\log(q_e) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (1)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{Q^0 b}\right) + \left(\frac{1}{Q^0}\right) C_e \quad (2)$$

پارامترهای n, k به دما وابسته می‌باشند. پارامتر n معمولاً از یک بزرگتر است. مقادیر زیادتر n، نمودار تکدمای جذب را ناخطی می‌کند و رفتار تکدما از حالت خطی شدیداً انحراف پیدا می‌کند. اگر مقدار n به حدود ۱۰ برسد رفتار نمودارهای تکدما از حالت خط راست انحراف بسیار بیشتری پیدا کرده و به حالت نمودار تکدمای بازگشت ناپذیر می‌رسد (یعنی منحنی دفع و جذب بر روی هم منطبق می‌شوند). معادله فروندلیچ عموماً در توصیف جذب مواد معدنی از جریانهای آبدار به داخل کربن فعال به کار می‌رود. در مدل لانگمویر<sup>۶</sup> حداکثر میزان جذب سطحی و b میزان انرژی جذب سطحی را بیان می‌کند.



شکل ۱۰- اثر دمای کربونیزاسیون بر جذب جیوه توسط کربن فعال حاصل از ضایعات آنتی بیوتیک [۱۵]

## ۷- اثر ساختار جاذب کربنی

کربن فعال معمولاً دارای کریستال‌های (ساختار کربنی شبیه گرافیت)<sup>۱</sup> می‌باشد. کریستال گرافیت مشتمل بر لایه‌های هگزاگونال است که به وسیله نیروی ضعیف واندروالس با فاصله ۰/۳۵۵ نانومتر به یکدیگر پیوند دارند. فاصله پیوند کربن-کربن در هر لایه ۰/۱۴۲ نانومتر است. لایه‌های کربن، بسیار مرتب هستند و نیمی از اتم‌های کربن در هر مکان در مرکز هگزاگونال، بلافاصله در لایه زیری قرار گرفته اند. درجه بی نظمی ساختار کریستال‌های کربن زیاد است. ساختار حلقه‌ای در لبه سطح معمولاً هترو کریستال است که ناشی از طبیعت مواد اولیه به کار رفته است. ترتیب منظم بندهای کربن در سطوح کریستال‌ها در طی فرایند فعال‌سازی و تبدیل ظرفیت‌های خالی که بسیار فعال هستند از بین می‌رود، لیکن کریستال‌ها به طور وسیعی با همدیگر پیوند برقرار می‌کنند. در طی فرایند فعال‌سازی فضای بین کریستال‌ها از مواد آلی تخلیه می‌شود و در همان زمان بخشی از مولکول‌های کربن نیز در کریستال‌ها جا به جا می‌شوند. طبق دسته بندی آیوپاک روزنه‌های موجود در کربن‌های فعال به سه دسته عمده زیر تقسیم می‌شوند:

- روزنه‌های ریز<sup>۲</sup> با قطر یا عرض کوچکتر از ۲ nm

- روزنه‌های متوسط<sup>۳</sup> با قطر یا عرض بین ۲ تا ۵۰ nm

- روزنه‌های درشت<sup>۴</sup> با قطر یا عرض بزرگتر از ۵۰ nm

1. Turbostratic
2. Micropore
3. Mesopore
4. Macropore

5. Freundlich  
6. Langmuir

در انتها خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از بررسی‌های فوق در حذف جیوه از فاز مایع در جدول (۳) ارائه شده است [۵۱].

### ۸- بحث و نتیجه‌گیری

با بررسی عوامل مختلف مؤثر بر جذب سطحی جیوه از فاز مایع توسط جاذب‌های متخلخل، مشخص می‌گردد که در تمامی مطالعات با در اختیار داشتن ساختاری از کربن با ریز روزنه‌های زیاد، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش pH محیط در فاز مایع، میزان

جذب بیشتری را می‌توان انتظار داشت، لیکن این یک شرط همیشگی نیست و بسته به نوع جاذب ممکن است تغییر کند. با افزایش غلظت اولیه جیوه، میزان جذب آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین، هر چه اندازه ذرات جاذب متخلخل ریزتر باشد سطح تماس آن بیشتر است و میزان جذب جیوه از فاز مایع بیشتر می‌شود. به همین دلیل، در فاز مایع معمولاً از جاذب پودری شکل استفاده می‌شود. از سوی دیگر، نمودارهای تکدمای فروندلیچ و لانگمویر بهترین مدل‌های ممکن برای بررسی جذب سطحی جیوه از فاز مایع می‌باشند.

جدول ۳- خلاصه‌ای از مطالعات جذب سطحی جیوه در فاز مایع توسط جاذب‌های کربنی

دما (°C)	pH	اندازه ذرات ( $\mu\text{m}$ )	میزان حذف جیوه (mg/g)	سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	نمودار تکدما	ماده تلقیح دهنده	پایه کربن فعال
۳۰	۳/۸	-	۲۱۱	۲-۲/۳	فروندلیچ	$\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{HNO}_3$ or $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$	ضایعات تایر
۳۰	۶/۷	۱۰	۱۱۰	۱۲۰-۱۴۰	فروندلیچ	-	خاک رس
دمای اتاق	۵/۵	-	۱۲۹	۱۲۵۰	لانگمویر	$\text{K}_2\text{CO}_3$	ضایعات آنتی بیوتیک
۲۰	۵/۵	۲۰۰	۱۷۴	۱۱۰۰	لانگمویر	$\text{H}_2\text{SO}_4$	فورفورال

activated carbon's oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption", Fuel 82 (2003) 451-457.

- [4] B. Stephen Inbaraj, N. Sulochana, "Mercury adsorption on a carbon sorbent derived from fruit shell of terminalia catappa", Hazardous Materials B133 (2006) 283-290.
- [5] C. Jeon, W. H. H.oll, "Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal", Water Research 37 (2003) 4770-4780.
- [6] R. Herrero, P. Lodeiro, C. R. Castro, T. Vilarin, M. E. S. d. Vicente, "Removal of inorganic mercury from aqueous solutions by biomass of the marine macroalga *Cystoseira baccata*", Water Research 39 (2005) 3199-3210.

### مراجع

- [1] C. Senior, C.J.Bustard, M. Durham, K. Baldrey, D. Michaud, "Characterization of fly ash from full-scale demonstration of sorbent injection for mercury control on coal-fired power plants", Fuel Processing Technology 85 (2004) 601-612.
- [2] T. D. Brown, D. N. Smith, W. J. ODowd, R. A. Hargis Jr., "Control of mercury emissions from coal-fired power plants: a preliminary cost assessment and the next steps for accurately assessing control costs", Fuel Processing Technology 65-66 (2000) 311-341.
- [3] Y. H. Li, C. W. Lee, B. K. Gullett, "Importance of



- [7] E. Romera, F. González, A. Ballester, M. L. Blázquez, J. A. Muñoz, "Comparative study of biosorption of heavy metals using different types of algae", *Bioresource Technology* 39 (2007) 5540–5557.
- [8] A. E. Sikaily, A. E. Nembr, A. Khaled, O. Abdelwehab, "Removal of toxic chromium from wastewater using green alga *Ulva lactuca* and its activated carbon", *Hazardous Materials* 148 (2007) 216–228.
- [9] E. Ekinici, T. Budinova, F. Yardim, N. Petrov, M. Razvigorova, V. Inkova, "Removal of mercury ion from aqueous solution by activated carbons obtained from biomass and coals", *Fuel Processing Technology* 77–78 (2002) 437–443.
- [10] S. Chiarle, M. Ratto, M. Rovatti, "Mercury removal from water by ionexchange resins adsorption", *Fuel Processing Technology* 43 (2000) 44–55.
- [11] D. M. Manohar, K. A. Krishnan, T. S. Anirudhan, "Removal of mercury(II) from aqueous solutions and chlor-alkali industry wastewater using 2-mercaptobenzimidazole-clay", *Water Research* 36 (2002) 1609–1619.
- [12] K. A. Krishnan, T. S. Anirudhan, "Removal of mercury(II) from aqueous solutions and chlor-alkali industry effluent by steam activated and sulphurised activated carbons prepared from bagasse pith: kinetics and equilibrium studies", *Hazardous Materials B92* (2002) 161–183.
- [13] T. Budinova, D. Savova, N. Petrov, M. Razvigorova, V. Minkova, N. Ciliz, E. Apak, and E. Ekinici, "Mercury Adsorption by Different Modifications of Furfural Adsorbent", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, (2003) 2223–2229.
- [14] M. F. Yardim, T. Budinova, E. Ekinici, N. Petrov, M. Razvigorova, V. Minkova, "Removal of mercury (II) from aqueous solution by activated carbon obtained from furfural", *Chemosphere* 52 (2003) 835–841.
- [15] T. Budinova, N. Petrova, J. Parrab, V. Baloutzov, "Use of an activated carbon from antibiotic waste for the removal of Hg(II) from aqueous solution", *Environmental Management* 55 (2007) 547–556.
- [16] S. Rio, A. Delebarre, "Removal of mercury in aqueous solution by fluidized bed plant fly ash", *Fuel* 82 (2003) 153–159.
- [17] J. U. K. Oubagaranadin, N. Sathyamurthy, Z. V. P. Murthy, "Evaluation of Fuller's earth for the adsorption of mercury from aqueous solutions: comparative study with activated carbon", *Hazardous Materials* 142 (2007) 165–174.
- [18] G. Skodras, Ir. Diamantopoulou, A. Zabaniotou, G. Stavropoulos, G. P. Sakellaropoulos, "Enhanced mercury adsorption in activated carbons from biomass materials and waste tires", *Fuel Processing Technology* 88 (2007) 749–758.
- [19] H. Yang, Z. Xua, M. Fan, A. E. Bland, R. R. Judkins, "Adsorbents for capturing mercury in coal-fired boiler flue gas", *Hazardous Materials* 66 (2007) 165–174.
- [20] J. Zhang, P. L. Bishop, "Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using reactivated carbon and Portland cement", *Hazardous aterials B92* (2002) 199–212.
- [21] E. MVizuete, A. M. Garc, A. NGisbert, C. F. Gonz, V. G. Serrano, "Adsorption of mercury by carbonaceous adsorbents prepared from rubber of tyre wastes", *Hazardous Materials B119* (2005) 231–238.
- [22] J. V. Nabais, P. J. M. Carrott, M. M. L. R. Carrott, M. Belchior, D. Boavida, T. Dially, I. Gulyurtlu, "Mercury removal from aqueous solution and flue gas by adsorption on activated carbon fibres", *Applied Surface Science* 252 (2006) 6046–6052.
- [۲۳] مجید عابدین زادگان عبدی، محمد مهدیارفر، علیمراد رشیدی، علی احمدپور، "تهیه کربن فعال از مواد خام سلولزی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران (۱۳۸۰).
- [24] R. C. Bansal, J. B. Donnet, F. Stoeckli, *Active carbon*, Marcel Dekker Inc (1998).
- [25] M. M. Karim, A. Kumar Das, S. H. Lee, "Treatment of colored effluent of the textile industry in Bangladesh using zinc chloride treated indigenous activated carbons", *Power Sources* (2006) 1056–1066.
- [26] M. A. Al-Zahrani, S. Nesaratnam, M. H. Essa, "Preparation of phosphoric acid-activated carbon using palm date pits: Physico-chemical and adsorptive properties", *The Open University, Walton Hall, Milton Keynes, United Kingdom Congress*.
- [27] F-C. Wu, R-L. Tseng, C-C. Hu, C-C. Wang, "The capacitive characteristics of activated carbons comparisons of the activation methods on the pore structure and effects of the pore structure and electrolyte on the capacitive performance", *Power Sources* (2006) 1532–1542.
- [28] T. Yang, A. C. Lua, "Textural and chemical properties of zinc chloride activated carbons prepared from pistachio-nut shells", *Materials Chemistry and Physics* 44 (2006) 1256–1268.
- [29] N. M. Haimour, S. Emeish, "Utilization of date stones for production of activated carbon using phosphoric acid", *Waste Management* (2006) 651–660.
- [30] L. Khezami, A. Chetouani, B. Taouk, R. Capart, "Production and characterisation of activated carbon from wood components in powder: Cellulose, lignin, xylan", *Powder Technology* (2005) 48–56.
- [31] Ç. Ş. Shalaby, "Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis/activation from apricot stones", *Microporous and Mesoporous Materials* (2006) 126–134.
- [32] Z. Hu, M. P. Srinivasan, "Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell", *Microporous and Mesoporous Materials* (1999) 11–18.
- [33] V. Fierro, V. T. Fernández, A. Celzard, "Kraft lignin as a precursor for microporous activated carbons prepared

- by impregnation with ortho-phosphoric acid: Synthesis and textural characterization", *Microporous and Mesoporous Materials* (2006) 243-250.
- [34] R.U. Pérez, F. C. Marín, D. F. Jiménez, C. M. Castilla, "Granular and monolithic activated carbons from KOH-activation of olive stones", *Microporous and Mesoporous Materials* (2006) 64-70.
- [35] T. Yang, A. C. Lua, "Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by potassium hydroxide activation", *Microporous and Mesoporous Materials* (2003) 113-124.
- [36] V. G. Serrano, E. M. C. Correa, M. C. F. González, M. F. A. Franco, A. M. García, "Preparation of activated carbons from chestnut wood by phosphoric acid-chemical activation. Study of microporosity and fractal dimension", *Materials Letters* (2005) 846-853.
- [37] G. Chattopadhyaya, D. G. Macdonald, N. N. Bakhshi, J. S. Soltan Mohammadzadeh, A.K. Dalai, "Preparation and characterization of chars and activated carbons from Saskatchewan lignite", *Fuel Processing Technology* (2006) 11-18.
- [38] G. G. Stavropoulos, "Precursor materials suitability for super activated carbons production", *Fuel Processing Technology* (2005) 1165-1173.
- [39] T. Budinova, E. Ekinc, F. Yardim, A. Grimm, E. Björnbom, V. Minkova, M. Goranova, "Characterization and application of activated carbon produced by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and water vapor activation", *Fuel Processing Technology* (2006) 50-56.
- [40] J. Hayashi, A. Kazehaya, K. Muroyama, A. Watkinson, "Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation", *Carbon* (2000) 1873-1878.
- [41] Z. Hu, M. P. Srinivasan, N. Yaming, "Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous activated carbons", *Carbon* (2001) 877-886.
- [42] L. Chunlan, X. Shaoping, G. Yixiong, L. Shuqin, L. Changhou, "Effect of pre-carbonization of petroleum cokes on chemical activation process with KOH", *Carbon* (2005) 2295-2301.
- [43] D. Adinata, W. M. Ashri, W. Daud, "Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>", *Bioresource Technology* (2007) 145-147.
- [44] Y. Sudaryanto, S. B. Hartono, W. Irawaty, H. Hindarso, S. Ismadji, "High surface area activated carbon prepared from cassava peel by chemical activation", *Bioresource Technology* (2006) 734-739.
- [45] F. Karacan, U. Ozden, S. Karacan, "Optimization of manufacturing conditions for activated carbon from Turkish lignite by chemical activation using response surface methodology", *Applied Thermal Engineering* (2006).
- [46] M. M. Karim, A. K. Das, S. H. Lee, "Treatment of colored effluent of the textile industry in Bangladesh using zinc chloride treated indigenous activated carbons", *Analytica Chimica Acta* 576 (2006) 37-42.
- [47] M. Velicu, H. Fua, R. P. S. Suri, K. Woods, "Use of adsorption process to remove organic mercury thimerosal from industrial process wastewater", *Hazardous Materials* (2007).
- [48] F. S. Zhang, J. O. Nriagu, H. Itoh, "Photocatalytic removal and recovery of mercury from water using TiO<sub>2</sub>-modified sewage sludge carbon", *Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 167 (2004) 223-228.
- [49] C. G. Ruiz, "Mercury (II) removal from aqueous solutions by nonviable bacillus sp. from a tropical estuary", *Bioresource Technology* 97 (2006) 1907-1911.
- [50] D. Mohan, V. K. Gupta, S. K. Srivastava, S. Chander, "Kinetics of mercury adsorption from wastewater using activated carbon derived from fertilizer waste", *Physicochemical and Engineering Aspects* 177 (2001) 169-181.
- [51] M. Zabihi, A. Haghghi Asl, A. Ahmadpour, "Investigating methods and effective parameters in the adsorption of mercury from aqueous solutions", *The 5th International Chemical Engineering Congress* (2008).