

جذب BTEX از آب‌های آلوده، با استفاده از کربن فعال تهیه‌شده از لجن تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کارخانه‌ی چوب و کاغذسازی

احسان اقدم^۱، بهنوش امین‌زاده^۲، مجید بغدادی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست-آب و فاضلاب، دانشکده‌ی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

ehsan.aghdam67@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، تأثیر تغییرات pH، زمان ماند، غلظت جاذب، غلظت BTEX و قدرت یونی بر میزان جذب BTEX از آب زیرزمینی آلوده توسط کربن فعال حاصل از پیرولیز لجن اولیه‌ی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب کارخانه‌ی چوب و کاغذسازی بررسی شد. نمودار جذب-واجذب و معادلات اعمال‌شده (D-R، BET) بیان‌گر ساختار تخلخلی بینابینی میکرو-مزوپور (قطر میانگین=۴,۱۸ نانومتر) و سطح ویژه (۶۱۳ مترمربع بر گرم) و حجم حفرات (۰,۶۵ سانتیمتر مکعب بر گرم) این کربن‌فعال است. با انجام آزمایش FTIR وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند گروه‌های کربوکسیلیک، آلکیل، و آلیفاتیک در سطح جاذب تأیید شد. آزمایش‌های جذب، حاکی از تأثیر ناچیز تغییرات pH و قدرت یونی محلول بر میزان جذب، زمان تعادل نسبتاً کوتاه حدوداً ۲ ساعت و انطباق داده‌های جذب، با معادلات ایزوترم فروندلیچ و لانگمیر، بود. در اغلب موارد، بازده‌حذف BTEX (با غلظت اولیه‌ی ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر) از آب توسط جاذب (با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بیش از ۹۰٪ به دست آمد. در عین حال در تمامی موارد بیشترین میزان جذب مربوط به زایلن و بعد از آن به ترتیب اتیل بنزن، تولوئن و بنزن بود.

کلمات کلیدی: BTEX، جذب، لجن، کربن فعال، معادلات ایزوترم

۱- مقدمه

BTEX بیان‌گر چهار ترکیب آروماتیک نفتی بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلین است. این ترکیبات، به طور گسترده‌ای در عملیات صنعتی به عنوان حلال به کار می‌روند [۱]. همه ساله، مقادیر زیادی از این ترکیبات در اثر نشت لوله‌های حامل مواد نفتی، تانکرهای زیرزمینی بنزین، سرریز مخازن نفتی، فاضلاب‌های پتروشیمی وارد منابع آب می‌شود [۲]. از آنجایی که این ترکیبات به عنوان ترکیبات قابل اشتعال، سمی، سرطان‌زا و منجر به جهش ژنتیکی شناخته می‌شوند، حضور آنها در محیط‌های آبی، حتی با غلظت‌های کم نیز خطرناک و غیر مجاز اعلام شده‌است. لذا، حذف آنها از محیط‌زیست، برای تضمین سلامتی انسان‌ها و موجودات زنده، ضروری است [۳]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای در راستای حذف این ترکیبات از آب، صورت گرفته‌است، و روش‌های متعددی پیشنهاد شده‌است، مانند هوادهی، روش‌های بیولوژیکی، اکسیداسیون پیشرفته، و جذب. از میان این روش‌ها، روش جذب، به دلیل مزایای قابل توجهه، با استقبال گسترده‌ای مواجه شده‌است. برای جذب BTEX از محیط‌های آبی، از جاذب‌های متعددی استفاده شده‌است، مانند کربن فعال، نانوتیوب‌های کربن، رس‌های آلی، و رزین‌ها. کربن فعال، بنابر ویژگی‌های منحصر به فرد خود، در فرآیندهای جذب، کاربرد فراوانی دارد. با توجه به نیاز روزافزون صنایع به کربن فعال، تحقیقات گسترده‌ای در راستای تبدیل مواد گوناگون به کربن فعال، انجام شده‌است. لجن فاضلاب‌های شهری و صنعتی، زائدات کشاورزی، پوست میگو، و ذغال، از جمله‌ی این مواد اولیه و ارزان‌قیمت هستند. لجن فاضلاب صنایع چوب و کاغذ، به دلیل دارا بودن مقادیر بالای مواد آلی، جزء بهترین مواد خام اولیه برای تهیه‌ی کربن فعال است. علاوه بر این، استفاده‌ی دوباره از لجن صنعتی، موجب حذف هزینه‌های ناشی از تصفیه و دفع لجن (که هزینه‌برترین بخش عملیات تصفیه‌ی فاضلاب است) می‌شود [۴]. در این تحقیق، لجن فاضلاب صنایع چوب و کاغذسازی، طی فعال‌سازی شیمیایی و پیرولیز، به کربن فعال تبدیل شده‌است، و تأثیر چندین عامل فیزیکی و شیمیایی، بر میزان جذب هیدروکربن‌های آروماتیک نفتی از آب آلوده توسط این جاذب، بررسی شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

ماده‌ی اولیه برای آماده‌سازی جاذب، از حوضچه‌ی ته‌نشینی اولیه‌ی تأسیسات تصفیه‌ی فاضلاب کارخانه‌ی چوب و کاغذ چوکا واقع در استان گیلان، تهیه شده‌است. برای فعال‌سازی شیمیایی، از کلرید روی، استفاده شده‌است. مرحله‌ی پیرولیز، در کوره‌ی پیرولیز پژوهشکده‌ی مواد و انرژی، واقع در مشکین‌شهر استان البرز، انجام شده‌است. کلیه‌ی آزمایش‌ها در آب زیرزمینی انجام شده‌اند، که مشخصات آن در جدول ۱. بیان شده‌است. جداسازی و اندازه‌گیری BTEX، توسط دستگاه (TEKMAR) Purge&Trap (کوپل شده با GC/MS (مدل -6895N Agilent) بنابر روش مندرج در Standard Methods انجام شده‌است.

۲-۱- تعیین ویژگی‌های شیمیایی سطح جاذب

گروه‌های عاملی سطح جاذب، توسط اسپکترومتر مادون قرمز تبدیل فوریه FTIR مشخص شده‌است. ساختار تخلخلی، سطح و حجم حفرات، با اعمال معادله‌ی BET بر داده‌های حاصل از نمودارهای جذب-واجذب به دست آمده‌است.

جدول ۱. مشخصات آب زیرزمینی مورد استفاده

نیترات	سولفات	سختی کل	قلیائیت	فسفات	دما	کل جامدات محلول	pH	یون کلسیم	یون منیزیم
۵۷ میلی گرم بر لیتر	۱۱۶ میلی گرم بر لیتر	۳۲۴ میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم	۲۷۶ میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم	۰/۰۳ میلی گرم بر لیتر	۲۸ درجه سانتیگراد	۳۹۹ میلی گرم بر لیتر	۶/۸-۷	۳۱۰ میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم	۱۴ میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم

۲-۲- آماده سازی جاذب

برای تهیه کربن فعال از لجنفاضلاب کارخانه‌ی کاغذساز یاز روش معرفی شده توسط خلیلی [۴] استفاده شد. پس از خشک شدن نسبی لجن در برابر آفتاب، لجن نیمه خشک، به مدت ۲۴ ساعت در آن در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شود و کاهش وزن ناشی از خشک شدن نداشته باشد. لجن خشک، پس از پودر شدن و عبور از الک مش ۳۰، طی اختلاط با کلریدروی ($ZnCl_2$) با نسبت جرمی برابر به مدت ۸ ساعت، فعال سازی شیمیایی شد. سپس، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا کاملاً خشک گردد. محصول به دست آمده با هاون پودر شد. پودر به دست آمده، در کوره، تحت جریان نیتروژن ۷۰ میلی لیتر بر دقیقه قرار گرفت. نرخ افزایش دمای کوره ۲۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه، دمای نهایی ۸۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ماند در این دما برابر ۲ ساعت بود. پودر پیرولیز شده در ۵۰۰ میلی لیتر محلول اسید کلریدریک ۱/۲ مولار شست و شو داده شد. سپس، چندین بار با آب مقطر شسته تا pH آن به مقدار ثابتی برسد. سپس، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد در آن خشک شد. نهایتاً، کربن فعال به دست آمده، برای انجام آزمایش های جذب، در ظروف شیشه‌ای دربسته نگهداری می شد.

۲-۳- محلول های BTEX

برای ساخت محلول های استوک BTEX، از هر کدام از چهار ترکیب بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و پی-زایلین، بنابر چگالی آنها، حجم معینی در بالن ۲۵ میلی لیتریدر متانول، به حجم رسانده شد، به طوری که غلظت هر کدام از آنها برابر ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر شود. جهت جلوگیری از تبخیر BTEX، بالن حاوی محلول استوک، با نوار پارافین، سیل (seal) شد، و طی روزهای آزمایش، در یخچال، نگهداری می شد.

۳- آزمایش ها

۳-۱- تأثیر pH

نمونه‌های آب زیرزمینی با pHهای ۱۱،۹،۷،۵،۳ در ارلن‌مایره‌های درب‌دار ۱۰۰ میلی‌لیتری آماده شد. برای تنظیم pH از محلول اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم استفاده می‌شد. ابتدا، در هر کدام از آن‌ها با استفاده از سرنگ میکرولیتر مقدار معینی BTEX تزریق شد تا غلظت هر کدام آن‌ها (بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن، زایلین) به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برسد. هر کدام از محلول‌ها به وسیله پمپ مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شدند تا BTEX کاملاً در آن‌ها حل و کاملاً همگن شود، سپس مقدار معینی جاذب در هر کدام از ارلن‌ها ریخته شد، تا غلظت جاذب در هر محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر شود. پس از دو ساعت اختلاط، مخلوط‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در حالت سکون ماندند تا کربن فعال در آن‌ها ته‌نشین شود. سپس مایع رویی با دستگاه GC/MS آنالیز شد.

۳-۲- تأثیر زمان ماند

به نمونه‌های آب زیرزمینی با غلظت BTEX برابر ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر آماده شد. میزان معینی جاذب در هر کدام از مخلوط‌ها ریخته شد تا غلظت جاذب در هر نمونه ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر شود. مدت زمان اختلاط نمونه‌ها به ترتیب برابر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ساعت بود. پس از اختلاط و ۱۵ دقیقه سکون، مایع رویی با استفاده از دستگاه GC/MS آنالیز شد.

۳-۳- تأثیر غلظت کربن فعال

به نمونه‌های آب زیرزمینی با غلظت BTEX برابر ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر مقدار معینی جاذب اضافه شد تا غلظت جاذب در آن‌ها بهترتیب برابر ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر شود. پس از ۲ ساعت اختلاط و به دنبال آن ۱۵ دقیقه سکون برای ته‌نشین شدن کربن فعال، مایع رویی با دستگاه GC/MS آنالیز شد.

۳-۴- تأثیر غلظت BTEX بر میزان جذب

به نمونه‌های آب زیرزمینی با غلظت مجموع ترکیبات BTEX برابر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر مقدار معینی کربن فعال اضافه شد تا غلظت جاذب در هر نمونه به ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برسد. پس از ۲ ساعت اختلاط و سپس ۱۵ دقیقه سکون، مایع رویی با دستگاه GC/MS آنالیز شد، و با استفاده از داده‌های به دست آمده، ثوابت ایزوترم‌های جذب تعیین شدند.

۳-۵- تأثیر قدرت یونی

برای تنظیم غلظت یون کلسیم، از محلول کلرید کلسیم استفاده شد. غلظت یون کلسیم Ca^{2+} در آب زیرزمینی مورد استفاده، برابر ۱۲۴ میلی‌گرم بر لیتر بود. سه نمونه آب زیر زمینی با غلظت‌های مختلف یون کلسیم ۱۲۴، ۳۰۰، ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آماده شد. غلظت BTEX در هر کدام از نمونه‌ها برابر ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. پس از ۱۵ دقیقه اختلاط، در هر یک از نمونه‌ها مقدار معینی کربن فعال ریخته شد تا غلظت جاذب در هر نمونه ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر شود. پس از ۲ ساعت اختلاط، و ۱۵ دقیقه سکون، مایع رویی با دستگاه GC/MS آنالیز شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ویژگی‌های کربن فعال

نمودار جذب-وا جذب نیتروژن، بیان‌گر وجود مقادیر قابل توجهی حفرات مزوپور و میکروپور در ساختار کربن فعال است (جدول ۲)

جدول ۲. مقادیر برخی از ویژگی‌های فیزیکی جاذب، که از معادلات BET به دست آمده‌اند

مترمربع بر گرم	۶۱۳/۳۸	مساحت سطح ویژه
سانتیمتر مکعب بر گرم	۰/۶۴۲۲	کل حجم حفرات
نانومتر	۴/۱۸۸	میانگین قطر حفرات
سانتیمتر مکعب بر گرم	۰/۲۷۷	حجم حفرات میکروپور
سانتیمتر مکعب بر گرم	۰/۳۶۵	حجم حفرات مزوپور

۴-۲- تحلیل سیگنال‌های طیف مادون قرمز:

بررسی سیگنال‌های به دست آمده از آنالیز FTIR بیان‌گر وجود انواع گروه‌های عاملی مانند گروه‌های کربوکسیلیک (-COOH)، گروه‌های آلکیل، گروه‌های آلیفاتیک، گروه‌های الکلی و کربوهیدرات‌ها، در سطح کربن فعال است. این گروه‌های عاملی، در سطح داخلی و خارجی جاذب حضور دارند، و قطبیت سطح را افزایش می‌دهد [۵]. ثابت شده‌است که، ناهمسانی سطح (surface heterogeneity) یا وجود گروه‌های عاملی، و طیف وسیعی از اندازه‌ی حفرات در سطح کربن‌های فعال، در جذب بسیاری از ترکیبات، نقشی اساسی ایفا می‌کند. این امر، به ویژه در مورد ترکیبات آروماتیک محلول، صدق می‌کند.

۴-۳- بررسی نتایج آزمایش‌های جذب

۴-۳-۱- تأثیرات تغییرات pH بر جذب

نمودار درصد جذب بر حسب pH، بیان‌گر تأثیر اندک تغییرات pH بر میزان جذب است (شکل ۱). این امر می‌تواند بیان‌گر پایداری زیاد کربن فعال در گستره‌ی وسیعی از pH باشد [۶]. با توجه به نتایج این آزمایش و آزمایش‌های بعدی، ترتیب میزان جذب شدن ترکیبات BTEX به صورت مقابل است: زایلن < اتیل‌بنزن < تولوئن < بنزن. این ترتیب، می‌تواند به دلیل ترتیب وزن مولکولی ترکیبات، ترتیب نقطه‌ی جوش آن‌ها و ترتیب میزان انحلال‌پذیری آن‌ها باشد که به صورت زیر است [۷]:

جرم مولکولی: بنزن, ۷۸ g/mol > تولوئن, ۹۲ > اتیل‌بنزن, زایلن, ۱۰۶ گرم

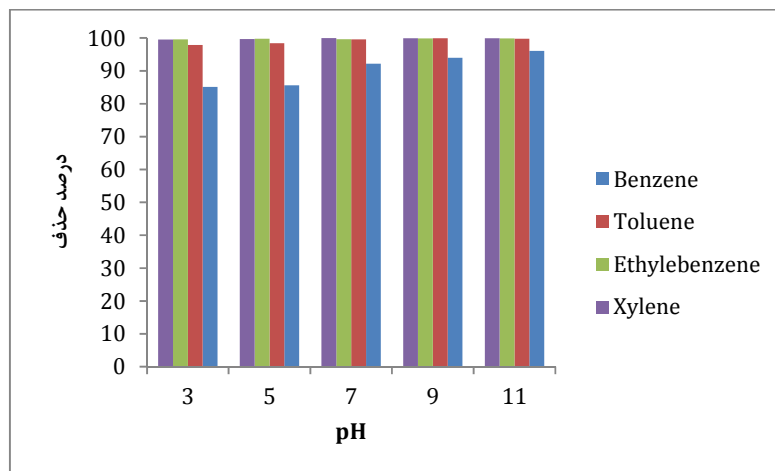
نقطه‌ی جوش: بنزن ۸۰/۱°C > تولوئن ۱۱۰/۷ > اتیل‌بنزن ۱۳۶/۲ > زایلن ۱۳۸

حلالیت: بنزن ۷۹۰ mg/lit > تولوئن ۵۳۰ < اتیل‌بنزن ۱۵۲ < زایلن ۱۵۰/۵

درجه‌ی آب‌گریزی ترکیبات نیز، عامل مؤثر دیگری بر میزان جذب آن ماده توسط جاذب است. هرچه درجه‌ی آب‌گریزی یک ماده (بر حسب لگاریتم عدد اکتانول یا $\log K_{ow}$) بیشتر باشد، میزان جذب آن توسط جاذب، بیشتر خواهد شد [۱]

بنزن, ۲ < تولوئن, ۲/۶۹ < اتیل‌بنزن, زایلن, ۳/۱۵

شکل ۱. تأثیر تغییرات pH بر درصد جذب BTEX از آب زیرزمینی



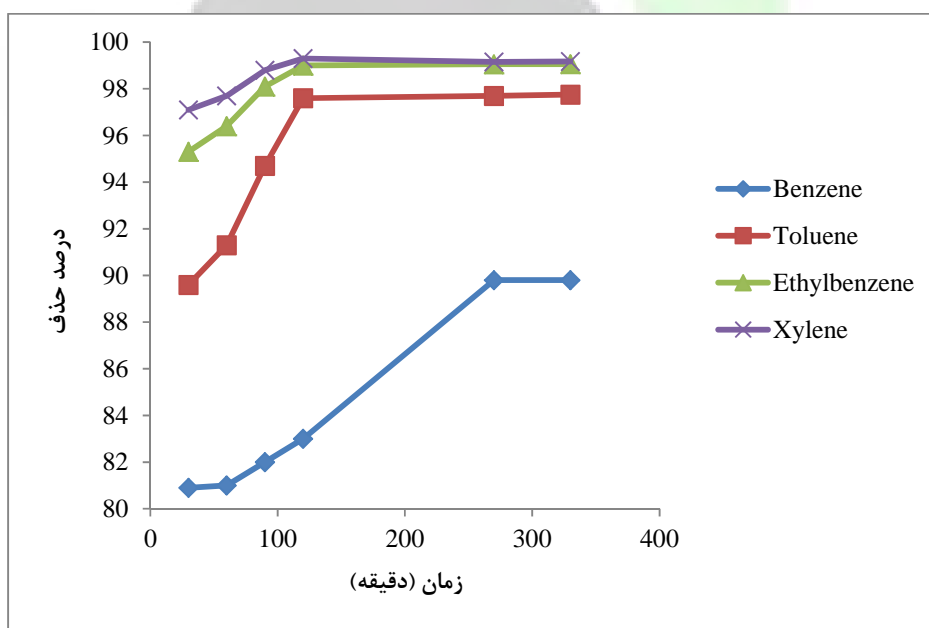
۴-۳-۲- تأثیرات تغییر زمان ماند بر جذب BTEX

باتوجه به شکل ۲، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان ماند از ۵/۵ ساعت تا ۲ ساعت، با فواصل زمانی ۵/۵ ساعت، میزان جذب، افزایش می‌یابد، ولی پس از ۲ ساعت، با افزایش زمان ماند، تغییر محسوسی در میزان جذب، مشاهده نمی‌شود، و واکنش به حالت تعادل می‌رسد. سرعت بالای فرآیند جذب در دقایق اولیه، به دلیل وجود فضاهای در دسترس برای جذب است. با پرشدن این فضاها، نرخ جذب، کاهش می‌یابد.

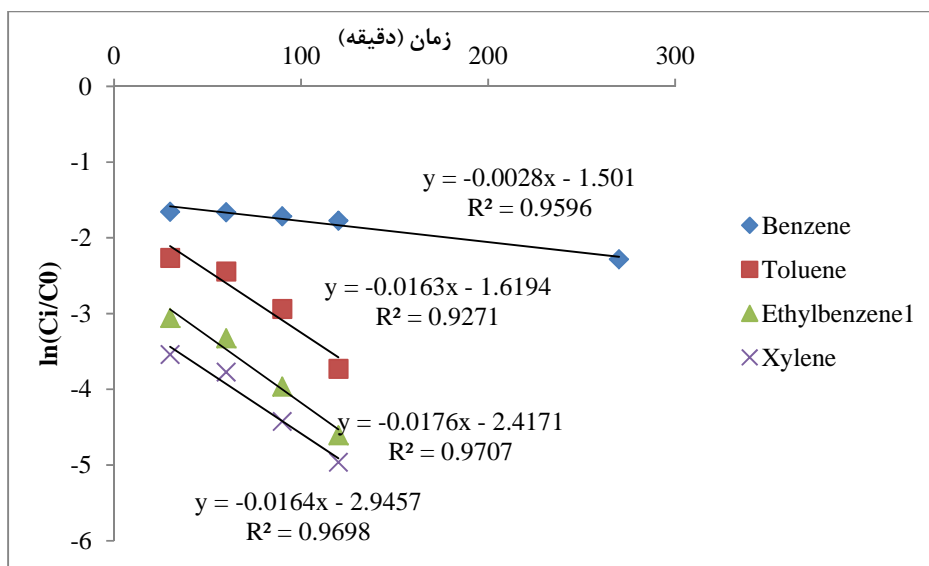
مدل‌های سینتیکی، برای تعیین مکانیزم جذب و کارایی جاذب‌ها برای حذف آلاینده‌ها، سودمند هستند. در این تحقیق، چندین مدل سینتیکی، برای انطباق داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، به کار گرفته‌شد، که با توجه به ضرایب رگرسیون به دست آمده، مدل سینتیکی شبه درجه یک (pseudo-first-order) (فرمول ۱) مناسب‌ترین مدل بود.

$$\ln(q_e/q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

شکل ۲. تغییر درصد جذب BTEX با گذشت زمان



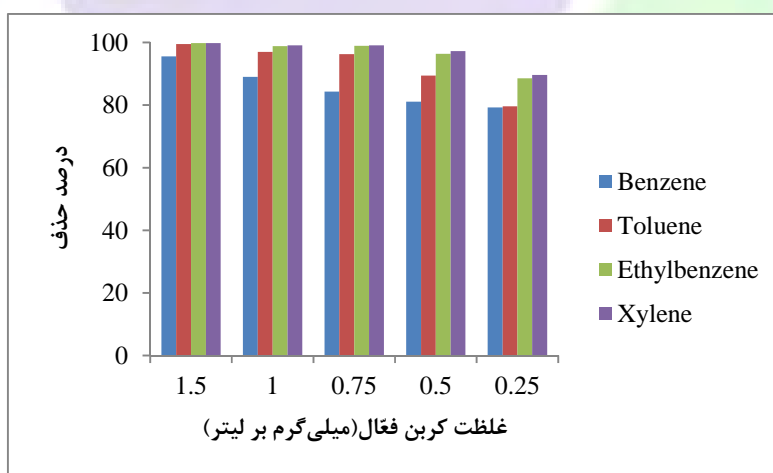
شکل ۳. نمودار معادله‌ی سینتیکی شبه درجه یک



۴-۳-۳- تأثیر غلظت جاذب

شکل ۴، بیان‌گر تأثیر غلظت جاذب بر میزان جذب است. با توجه به نمودار، با افزایش غلظت جاذب، میزان جذب هم بیشتر شده است، زیرا با افزایش میزان جاذب، کل سطح در دسترس و در نتیجه فضاهای جذب (adsorption sites) افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در تحقیقات دیگر به دست آمده است [۸]. در آزمایش‌های بعدی، غلظت جاذب ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

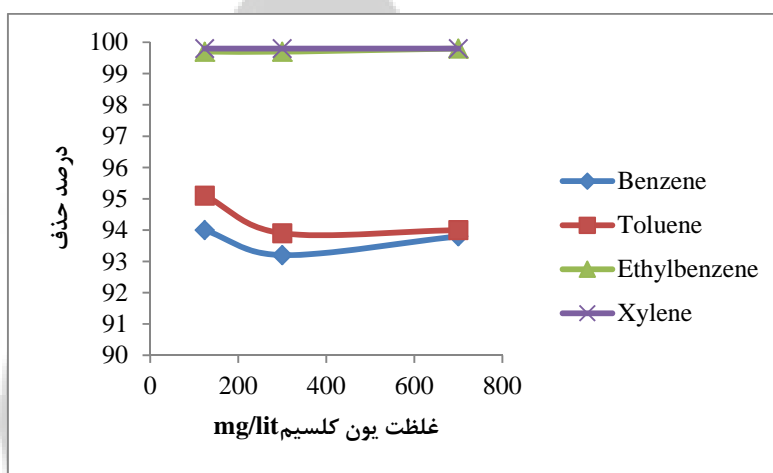
شکل ۴. نمودار تأثیر تغییرات غلظت جاذب بر درصد جذب BTEX



۴-۳-۴- تأثیر قدرت یونی بر میزان جذب

شکل ۵، بیانگر تأثیر میزان یون کلسیم بر قدرت یونی بر میزان جذب است. قدرت یونی (Y) یکی از ویژگی‌های عمومی محلول‌ها است، که تمایل (affinity) بین ماده‌ی حل‌شونده و فاز آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان قدرت یونی، با افزودن کلرید کلسیم به آب زیرزمینی تنظیم شده‌است. باتوجه به نتایج به دست آمده، تغییر قدرتیونی، تغییر محسوسی در میزان جذب ایجاد نکرده‌است. تأثیر اندک تغییر قدرت یونی بر میزان جذب، بیانگر پایداری بالای جاذب مورد استفاده در گستره‌ی وسیعی از مقادیر قدرت یونی است [۱]

شکل ۵. نمودار تأثیر تغییرات قدرت یونی بر درصد جذب BTEX



۴-۳-۵- تأثیر غلظت BTEX بر میزان جذب

باتوجه به نمودارها، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت BTEX در محلول، راندمان جذب، کاهش می‌یابد. این، در حالی است که با افزایش غلظت BTEX، مقدار جذب بر واحد جرم جاذب (q_e) افزایش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش نیروی رانشی ناشی از گرادیان غلظت است [۸].

رابطه‌ی تعادلی میان مقدار ماده‌ی جذب‌شده بر واحد جرم جاذب و غلظت حالت تعادل آن در فاز مایع، در دمای ثابت، ایزوترم جذب نامیده می‌شود. معادلات و مدل‌های متعددی برای توضیح این رابطه، پیشنهاد شده‌اند. نتایج آزمایش‌های batch را برای تعیین میزان انطباق آنها با ایزوترم‌های جذب، بررسی می‌کنیم. ایزوترم‌های جذب، یکی از مهم‌ترین پارامترها، برای پی‌بردن به مکانیزم جذب است. یافتن ایزوترم جذب، برای طراحی هر سیستم جذب، ضروری است.

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \Rightarrow \ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_f \quad (2)$$

پارامتر K اساساً با ظرفیت جذب جذب‌شونده توسط جاذب، مرتبط است. وقتی غلظت فاز مایع در حالت تعادل برابر ۱ میکروگرم بر لیتر باشد، پارامتر K بیان‌گر ظرفیت جذب (بر حسب میلی‌گرم بر گرم) است. $1/n$ هم تابعی از ناهمسانی (heterogeneity) است.

جاذب‌های همسان (homogenous) (یا به عبارت دیگر، جاذب‌هایی که اندازه‌ی حفرات آنها و شیمی سطح آنها یکنواخت است)، دارای مقدار $n=1$ هستند. مقدار $\frac{1}{n}$ برای کربن فعال، نوعاً کمتر از ۱ است، که بیان‌گر توزیع گسترده‌ی انرژی‌های مکان‌های جذب است. خاصیت ناهمسانی، اغلب، ناشی از تعدد اندازه‌ها و شکل‌های حفرات کربن فعال است. بیشتر بودن مقدار n ، به معنای قوی‌تر بودن پیوند جذب میان جاذب و جذب‌شونده (adsorbate) است. [۹]

$$q_e = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \Rightarrow \frac{1}{q_e} = \frac{1}{ab} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (3)$$

با توجه به تفسیری که از مقدار ثوابت ارائه می‌شود، به این نتایج زیر می‌رسیم:

۱. در تمامی موارد، شیب نمودار ایزوترم فروندلیچ، $\frac{1}{n} < 1$ یا $n > 1$. این امر، بیان‌گر این است که، داده‌های به دست‌آمده مطابق با تشکیل چند لایه از جذب‌شونده‌ها در جاذب است.

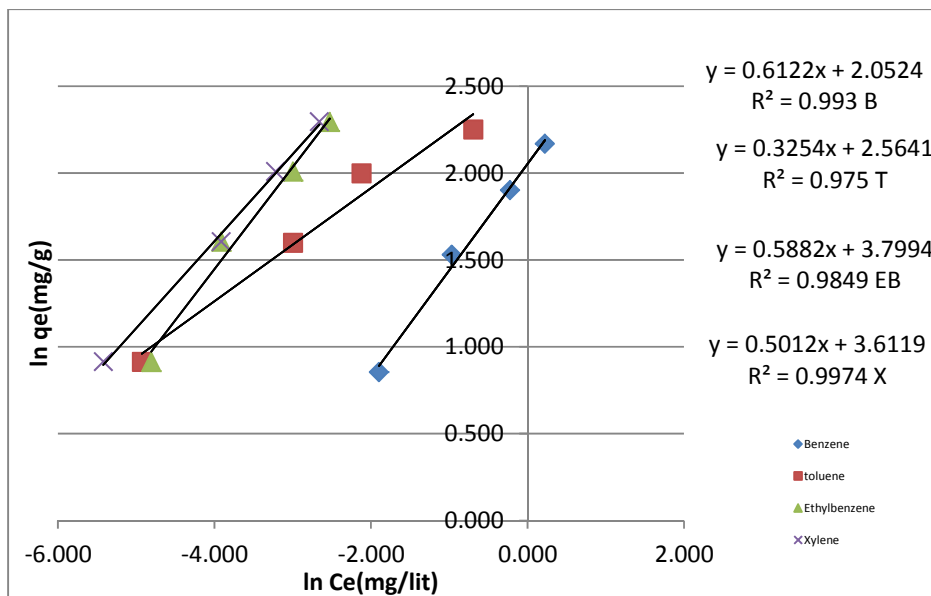
افزایش ab یا کاهش $\frac{1}{ab}$ ، بیانگر ظرفیت بیشتر جاذب برای نگهداری جذب‌شونده است. در تمام موارد مقادیر $\frac{1}{ab}$ یا شیب نمودار ایزوترم لانگمیر، برای جذب‌شونده‌ها به صورت زیر است:

بنزن < تولوئن < زایلن < اتیل‌بنزن

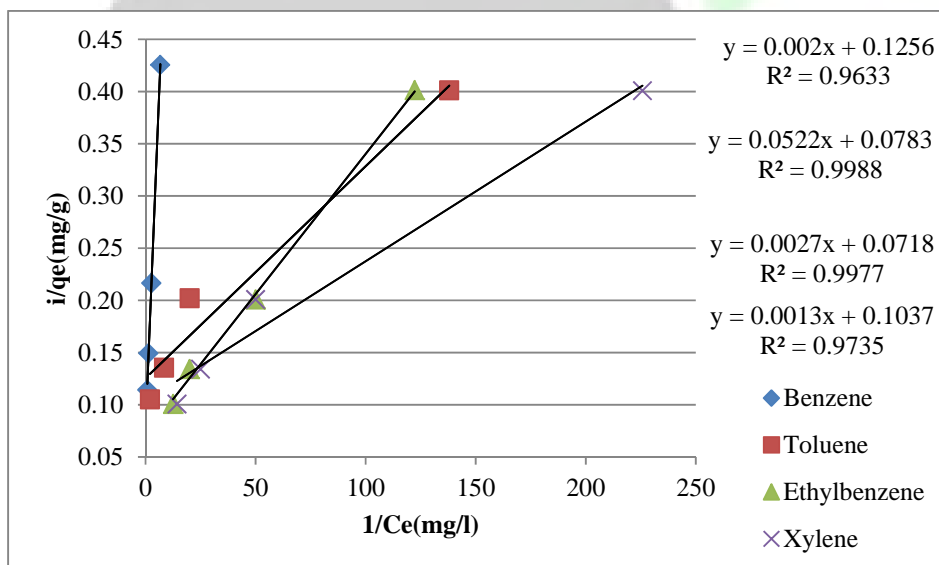
در این مورد، شیب نمودار ایزوترم لانگمیر یا $\frac{1}{ab}$ برای بنزن، چندین برابر مقادیر شیب نمودار جذب‌شونده‌های دیگر است.

جذب آلاینده‌های آلی بر روی جاذب لجن‌بنیاد، طی مکانیزم‌های متعددی که همزمان عمل می‌کنند، به وقوع می‌پیوندد. مهم‌ترین این مکانیزم‌ها عبارت‌اند از: اندرکنش‌های آب‌گریزی، پیوندهای $\pi - \pi$ ، اندرکنش‌های الکترواستاتیکی، و پیوندهای هیدروژنی. با توجه به نتایج آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های جاذب، و اثبات وجود گروه‌های عاملی سطحی حاوی اکسیژن می‌توان مکانیزم جفت‌شدن الکترون‌های $\pi - \pi$ (الکترون‌های آلاینده‌ها و الکترون‌های اتم اکسیژن کربوکسیلیکی سطحی) را مکانیزم اصلی جذب BTEX روی سطح جاذب، دانست. نتایج مشابهی نیز، در تحقیقات دیگران ارائه شده‌است [۱۰].

شکل ۶. نمودار ایزوترم فروندلیچ



شکل ۷. نمودار ایزوترم لانگمیر



جدول ۳. مقادیر ثوابت فروندلیچ

ضرایب فروندلیچ جذب BTEX از آب زیرزمینی						
آلاینده	شیب	عرض از مبدأ	K_f	$1/n$	r^2	n
بنزن	۰/۶۱	۲/۰۵	۷/۷۹	۰/۶۱	۰/۹۵	۱/۶۳۳
تولوئن	۰/۳۳	۲/۹۷	۱۹/۴۹	۰/۳۳	۰/۹۷	۳/۰۷۳
اتیل بنزن	۰/۵۹	۲/۵۶	۱۲/۹۴	۰/۵۹	۰/۹۸	۱/۷
زایلن	۰/۵	۳/۶۱	۳۶/۹۷	۰/۵	۰/۹۸	۲

جدول ۴. مقادیر ثوابت لانگمیر

ضرایب لانگمیر جذب BTEX از آب زیرزمینی					
آلاینده	شیب	عرض از مبدأ	a	b	r^2
بنزن	۰/۰۵۲	۰/۰۷۸	۱۲/۷۷	۱/۵	۰/۹۷۴
تولوئن	۰/۰۰۲	۰/۱۲۶	۷/۹۶	۵۹/۸۱	۰/۹۵
اتیل بنزن	۰/۰۰۳	۰/۰۷۲	۱۳/۹۳	۲۶/۵۹	۰/۹۹۴
زایلن	۰/۰۰۱	۰/۱۰۴	۹/۶۴	۷۹/۷۷	۰/۹۶۶

۵- نتیجه گیری

کربن فعال تهیه شده از لجن فاضلاب صنایع چوب و کاغذ، به دلیل دارا بودن سطح ویژه ۶۱۳ مترمربع بر گرم، ساختار تخلخلی میکرو-مزوپور و حضور گروه‌های عامل اکسیژن دار مانند گروه‌های کربوکسیلیک و آلفاتیک، قابلیت بالایی برای جذب BTEX از آب زیرزمینی آلوده، در فرایندهای batch دارد. پایداری بالای این جاذب، موجب تأثیر اندک تغییرات pH (در گستره‌ی ۳ تا ۱۱) و قدرت یونی بر میزان جذب BTEX است. زمان تعادل کوتاه (۲ ساعت)، و درصد حذف بیشتر از ۹۰٪ BTEX، از دیگر مزایای این نوع کربن فعال است. همچنین، داده‌های حاصل از آزمایش‌های جذب، حاکی از تطابق این داده‌ها با معادلات ایزوترم‌های فروندلیچ و لانگمیر بود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از امکانات آزمایشگاه دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران به انجام رسید. بدینوسیله از مسئولین آزمایشگاه بویژه سرکار خانم امینی تشکر و قدردانی میشود.

۶- معرفی علایم و متغیرها

q_e : میزان BTEX جذب شده بر واحد جرم جاذب در حالت تعادل (میلی گرم بر گرم)

q_t : میزان BTEX جذب شده بر واحد جرم جاذب زماندر t (میلی گرم بر گرم)

K_1 : ثابت معادله‌ی شبه درجه یک (hr^{-1})

C_e : غلظت BTEX در حال تعادل (میلی گرم بر لیتر)

n : ثابت فروندلیچ (بدون واحد)

منابع و مأخذ

۱. FengshengSu, Chungsyng Lu, Suhkai Hu, Adsorption of benzene, toluene, ethylbenzene and p-xylene by NaOCl-oxidized carbon nanotubes, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 353 (2010) 83–91
۲. Sheng H. Lin, Cheng Y. Huang, Adsorption of BTEX from aqueous solution by macroreticular resins, Journal of Hazardous Materials A70 1999 21–37.
۳. N. Wibowo, L. Setyadi, D. Wibowo, J. Setiawan, S. Ismadji, Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: Influence of surface chemistry on adsorption, Journal of Hazardous Materials 146 (2007) 237–242.
۴. Nasrin R. Khalili, Production of micro- and mesoporous activated carbon from paper mill sludge I. Effect of zinc chloride activation, Carbon 38 (2000) 1905–1915
۵. Fei YU, Jie MA, Yanqing WU, Adsorption of toluene, ethylbenzene and xylene isomers on multi-walled carbon nanotubes oxidized by different concentration of NaOCl, Front. Environ. Sci. Engin. China DOI 10.1007/s11783-011-0340-4
۶. H. Nourmoradi, Mehdi Khiadani, M. Nikaeen, Multi-component Adsorption of Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene from Aqueous Solutions by Montmorillonite Modified with TetradecylTrimethyl Ammonium Bromide, Journal of Chemistry, Volume 2013, Article ID 589354.
۷. N. Calace, A. Di Muro, E. Nardi, B. M. Petronio, M. Pietroletti, Adsorption Isotherms for Describing Heavy-Metal Retention in Paper Mill Sludges, Ind. Eng. Chem. Res. 2002, 41, 5491-5497
۸. A. Méndez, S. Barriga b, J.M. Fidalgo a, G. Gascó, Adsorbent materials from paper industry waste materials and their use in Cu(II) removal from water, Journal of Hazardous Materials 165 (2009) 736–743
۹. Wen-Hong Li, Preparation and utilization of sludge-based activated carbon for the adsorption of dyes from aqueous solutions, Chemical Engineering Journal 171 (2011) 320–327
۱۰. American Water Works Association, Water Quality and Treatment, Sixth Edition, 2012

1. A. Ros , M.A. Lillo-Ródenas, E. Fuente, M.A. Montes-Mora, M.J. Martín , A. Linares-Solano, High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors, *Chemosphere* 65 (2006) 132–140

