

حذف گاز NO₂ به وسیله برخی جاذب‌های طبیعی با استفاده از روش جذب سطحی

حسین دشتی خویدکی^{۱*}

dashti@abru.ac.ir

راضیه جعفری^۲

موسی سلیمانی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: نیتروژن دی اکسید (NO₂) یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست است. NO₂ در غلظت‌های بالا قطعاً سبب ایجاد آسیب‌های ریوی می‌شود. مجاورت با مقادیر متوسط آن (۵۰ ppm) در یک دوره کوتاه مدت، سوزش چشم، بینی و گلو، سرفه، خلط خونی، تنگی نفس و درد سینه را ایجاد می‌کند و تماس با غلظت‌های بالای آن (بالتر از ۱۰۰ ppm) می‌تواند به ادم ریوی و نهایتاً مرگ منجر شود. بنابراین، حذف این آلاینده از هوا اهمیت به سزایی برای محیط زیست دارد. این مطالعه با هدف حذف گاز NO₂ به وسیله برخی جاذب‌های طبیعی با استفاده از روش جذب سطحی انجام گرفته است.

روش بررسی: در این کار، حذف گاز NO₂ به روش جذب سطحی، بر روی برخی جاذب‌های طبیعی شامل پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اثر برخی شرایط تجربی بر جذب سطحی شامل طول ستون جاذب و مقدار NO₂ اولیه بررسی شده است.

یافته‌ها: مطلوب‌ترین درصد جذب با طول ستون جاذب ۵۰ سانتی‌متر و مقدار NO₂ اولیه ۶/۳ میلی‌مول به دست می‌آید. علاوه بر این، دانه گیاه رازیانه و پوسته تخم مرغ می‌توانند به ترتیب ۹۶/۸٪ و ۹۲/۱٪ از گاز NO₂ را در شرایط بهینه جذب نمایند.

بحث و نتیجه‌گیری: از میان جاذب‌های استفاده شده، مناسب‌ترین جاذب‌ها برای فرایند جذب سطحی، دانه گیاه رازیانه و پوسته تخم مرغ می‌باشند. همچنین، داده‌های تعادلی با ایزوترم‌های جذب سطحی لانگمویر، فروندلیش، تمکین و هارکین-جورا برازش شدند و نتایج حاصل نشان داد که ایزوترم هارکین-جورا بهتر از سایر ایزوترم‌ها، نتایج تجربی را توصیف می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های محیط زیست، جذب سطحی، گاز NO₂، جاذب‌های طبیعی، ایزوترم‌های جذب سطحی.

۱ - استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد، ایران. * (مسوول مکاتبات)

۲ - کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد، ایران.

۳ - استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد، ایران.

The removal of NO₂ gas by some natural adsorbents by using the adsorption method

Hossein Dashti Khavidaki^{1*}

dashti@abru.ac.ir

Raziyeh Jafari²

Mousa Soleymani³

Admission Date: October 2, 2019

Date Received: May 13, 2019

Abstract

Background and Objective: Nitrogen dioxide (NO₂) is one of the most dangerous pollutants in the environment. NO₂ certainly causes lung damage at high concentrations. Exposure to its moderate levels (50 ppm) for a short period may produce irritation of the eyes, nose, and throat, cough, hemoptysis, dyspnea, and chest pain and contact to its high concentrations (> 100 ppm) can result in pulmonary edema, which can be fatal. Therefore, it is very important for environment the removing of the pollutant from air. The aim of this study has been the removal of NO₂ gas by some natural adsorbents by using the adsorption method.

Material and Methodology: In this work, it has been investigated the removal of NO₂ gas by adsorption on different natural adsorbents including eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw. It was also studied the effect of some experimental conditions including adsorbent column length and initial NO₂ amount on the adsorption percentage.

Findings: The most desirable adsorption percentage obtained with adsorbent column length 50 cm and initial NO₂ amount 6.3 mmol. In addition, Fennel seed and eggshell can adsorb 96.8 and 92.1% of NO₂ gas in the optimum conditions, respectively.

Discussion and Conclusion: Among the used adsorbents, the most appropriate adsorbents are fennel seed and eggshell for the adsorption process. In addition, it was correlated the equilibrium data with the adsorption isotherms such as the Langmuir, Freundlich, Temkin, and Harkin-Jura and the results showed that Harkin-Jura isotherm describes the experimental results better than the other isotherms.

Key words: Environmental pollutants, Adsorption, NO₂ gas, Natural adsorbents, Adsorption isotherms.

1- Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. * (Corresponding Author)

2- MSc, Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

مقدمه

کربن فعال یکی از مهم‌ترین گروه جاذب‌هایی است که برای جذب گاز NO₂ مورد استفاده قرار گرفته است و از آن میان، می‌توان یک نوع کربن فعال تجاری (۹) و کربن‌های فعال حاصل از زغال سنگ (۱۰)، خاک اره کاج (۱۱)، هسته خرما (۱۲ و ۱۳) و ضایعات لاستیک (۱۴) را نام برد. برخی از مواد معدنی نظیر زئولیت‌ها (۱۵ و ۱۶)، آلومینیوم اکسید (۱۷) و تیتانیم دی اکسید (۱۸) نیز برای جذب گاز NO₂ به‌کاربرده شده‌اند. علاوه بر این، گاز NO₂ از هوا به وسیله برخی جاذب‌های طبیعی مانند مواد پسماند صنعت قهوه‌سازی (۱۹)، پودر پوست درخت چریش (نوعی درخت سنجد) (۲۰) و خاک اره (۲۱) نیز حذف شده است.

هدف اصلی ما در این کار تحقیقاتی، حذف گاز سمی NO₂ از منابع تولید کننده آن مانند آگروز اتومبیل‌ها و دودکش کارخانجات به روش جذب سطحی و به وسیله جاذب‌های طبیعی مختلف بوده است.

بخش تجربی

مواد و واکنشگرها

سدیم هیدروکسید (NaOH) و هیدروژن پروکسید (H₂O₂) با خلوص تجزیه‌ای از شرکت مرک آلمان خریداری شدند.

جاذب‌ها

جاذب‌های استفاده شده، پسماندهای مواد طبیعی و بنابراین ارزان و در دسترس بودند. این جاذب‌ها شامل پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم بودند. دانه گیاه رازیانه نیز به عنوان یک جاذب نسبتاً گران‌قیمت مورد استفاده قرار گرفت.

تهیه جاذب‌ها

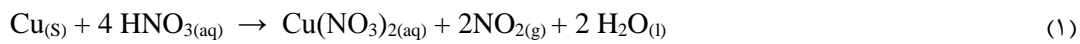
جاذب‌ها پس از جمع‌آوری ریز ریز شده، با آب مقطر شسته شده و به مدت چند روز در دمای اتاق خشک شدند. نمونه جاذب‌های خشک شده به جز دانه گیاه رازیانه، به وسیله یک آسیاب برقی خرد شدند. سپس، جاذب‌های آسیاب شده برای به دست آوردن ذرات جاذب ریز و یکنواخت از الک شماره ۸ با

از میان آلاینده‌های گازی در هوای اتمسفری، نیتروژن دی اکسید (NO₂) یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌هاست. NO₂ در غلظت‌های پایین، گازی بی‌رنگ یا زردرنگ است اما در غلظت‌های بالا قهوه‌ای به نظر می‌رسد. این گاز بویی شبیه به سفیدکننده دارد اما تندی کمتری دارد و بهتر از بوی گاز کلر است. استنشاق آن احساس سوزاننده‌ای شبیه به استنشاق آمونیاک دارد. NO₂ بدون ایجاد نشانه خطر آنی، سبب ایجاد زخم تاخیری می‌شود. مکان‌های اولیه آسیب پس از استنشاق آن، نایژک‌های انتهایی و حفره‌های مجاور آن می‌باشند. NO₂ موجب صدمات اکسایشی شده و رادیکال‌های آزادی تولید می‌کند که می‌توانند آمینواسیدها در بافت‌های پروتئینی را اکسید نمایند. آن، همچنین، پروکسیداسیون لیپید در اسیدهای چرب چندغیراشباعی در غشای سلول‌های ریوی را آغاز می‌کند. NO₂ در غلظت‌های بالا قطعاً سبب ایجاد آسیب‌های ریوی می‌شود. مجاورت با مقادیر متوسط آن (۵۰ ppm) در یک دوره کوتاه مدت، سوزش چشم، بینی و گلو، سرفه، خلط خونی، تنگی نفس و درد سینه را ایجاد می‌کند و تماس با غلظت‌های بالای آن (بالتر از ۱۰۰ ppm) می‌تواند به ادم ریوی و نهایتاً مرگ منجر شود (۵-۱).

NO₂ در باران اسیدی و مه‌دود فوتوشیمیایی یافت می‌شود. علاوه بر این، این گاز می‌تواند در فرایندهای شیمیایی تولیدکننده نیتریک اسید و کودهای شیمیایی، سولفوریک اسید و مشتقات نیتریک اسید در سنتزهای آلی وجود داشته باشد. البته، بیش از ۹۰ درصد تمام نیتروژن دی اکسید مصنوعی وارد شده به اتمسفر به وسیله سوختن سوخت‌های مختلف تولید می‌شود (۶).

به‌طور کلی، سه روش برای حذف NO₂ از هوا وجود دارد: احیای کاتالیزوری (انتخابی و غیر انتخابی)، جذب توده‌ای (اسیدی و قلیایی) و جذب سطحی (۱ و ۷). از میان این روش‌ها، جذب سطحی به‌خاطر هزینه پایین، سهولت دسترسی به جاذب، آسان بودن عملکرد و زمان کم عملیات یک روش موثر برای حذف آلاینده‌هاست (۸).

رازیانه که یک جاذب طبیعی و نسبتاً گران‌قیمت بود، پسماندهای مواد طبیعی، ارزان قیمت و فراوان هستند. طرح ۱ نمودار شماتیک دستگاه طراحی شده برای آزمایش‌های جذب سطحی گاز NO₂ بر روی جاذب‌های مورد نظر را نشان می‌دهد (۲۲). این دستگاه که ساخت آن آسان و ارزان قیمت است، شامل سه بخش می‌باشد: بخش تولید گاز، بخش جذب سطحی و بخش آنالیز. در ابتدا، گاز NO₂ به وسیله واکنش سیم مسی بدون روکش با نیتریک اسید غلیظ در یک ارلن سه دهانه به عنوان ظرف واکنش (۲) تولید شد (بخش تولید گاز). این واکنش به صورت معادله (۱) نشان داده شده است.



درصد جذب سطحی (% Adsorption) به صورت معادله (۶) به دست می‌آید که در آن، n_i و n_f به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی NO₂ بر حسب میلی‌مول هستند.

$$\% \text{Adsorption} = \frac{n_i - n_f}{n_i} \times 100 \quad (6)$$

ظرفیت جذب سطحی (q_e)، مقدار تعادلی گاز NO₂ جذب شده (میلی‌مول) به ازای واحد طول ستون جاذب (سانتی‌متر) است که توسط معادله (۷) محاسبه می‌شود که در آن، n_i و n_f به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی NO₂ بر حسب میلی‌مول و L طول ستون جاذب بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

$$q_e = \frac{n_i - n_f}{L} \quad (7)$$

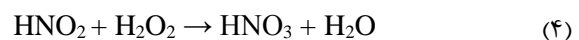
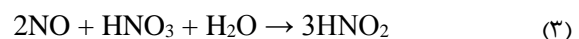
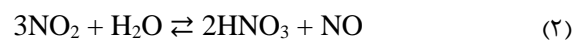
در این مطالعه، اثر نوع جاذب، طول ستون جاذب و تعداد مول اولیه گاز NO₂ بر درصد جذب سطحی آن بررسی شده و مناسب‌ترین جاذب با شرایط مناسب برای حذف گاز NO₂ ارائه شده است.

میانگین اندازه حفره ۲/۳۶ mm عبور داده شدند. دانه گیاه رازیانه بدون آسیاب کردن و الک کردن به کار برده شد.

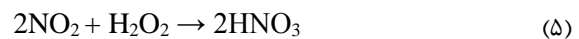
دستگاه و روش

در این کار، ما از جاذب‌های طبیعی مختلف استفاده کرده‌ایم و در هر مورد، بازده جذب سطحی را به دست آورده و بهترین جاذب با بالاترین بازده جذب را گزارش داده‌ایم. جاذب‌های مختلف استفاده شده برای جذب گاز NO₂ شامل پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم بودند. این جاذب‌ها، به جز دانه گیاه

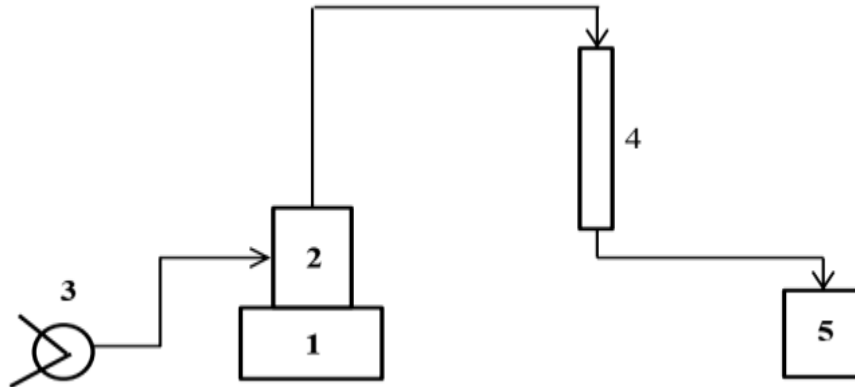
سپس، جریانی از هوا با شار جرمی ثابت به وسیله یک پمپ دمنده (۳) به داخل ظرف واکنش دمیده شد تا گاز NO₂ تولید شده را به ستون جذب سطحی انتقال دهد (بخش جذب سطحی). خروجی ستون به ارلنی محتوی محلول هیدروژن پروکسید ۱۰٪ (۵) متصل شد. گاز NO₂ با این محلول به صورت معادلات ۲-۴ واکنش کرده و سپس نیتریک اسید تولید شده به وسیله تیتراسیون با محلول هیدروژن پروکسید با غلظت ۰/۱ mol.L⁻¹ در حضور شناساگر فنل‌فتالین آنالیز شد (بخش آنالیز).



و واکنش کلی به صورت معادله (۵) می‌باشد.



پس، یک مول NO₂ معادل یک مول HNO₃ و نیز یک مول NaOH می‌باشد.



طرح ۱- نمودار شماتیک دستگاه تجربی برای جذب سطحی گاز NO₂ بر روی برخی جاذب‌های طبیعی. ۱- هیتر ۲- ظرف واکنش ۳- پمپ دمنده ۴- ستون جاذب طبیعی ۵- ارلن محتوی محلول هیدروژن پروکسید ۱۰٪.

Scheme 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for the adsorption of NO₂ gas onto some natural adsorbents. 1.Hitter 2. Reaction flask 3. Air blower pump, 4. Natural adsorbent column, 5. Flask containing the solution of hydrogen peroxide 10%.

نتایج و بحث

آنالیز گاز NO₂

نسبتاً مطلوب است. در ضمن، مقادیر NO₂ تجربی اولیه به عنوان مرجع برای محاسبه درصد جذب در آزمایش‌های جذب سطحی در نظر گرفته شده است نه مقادیر نظری اولیه آن. بنابراین، مقادیر NO₂ تجربی متناظر با ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۰ گرم مس به ترتیب با ۱/۵۵، ۳/۰، ۴/۵۰ و ۶/۳ میلی‌مول برابر بودند.

در ابتدا، آنالیز گاز NO₂ برای به دست آوردن تعداد مول‌های آن ضروری است. این آنالیز بر اساس منبع (۲۳) و پس از بهینه‌سازی شرایط انجام شد. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، یک اختلاف منطقی بین نتایج تجربی و نظری وجود دارد، زیرا میزان خطاهای نسبی آنها

جدول ۱- نتایج مربوط به آنالیز مقادیر گاز NO₂ برای جرم‌های مختلف مس

Table 1. The results relevant to the analysis of NO₂ amounts for different copper masses

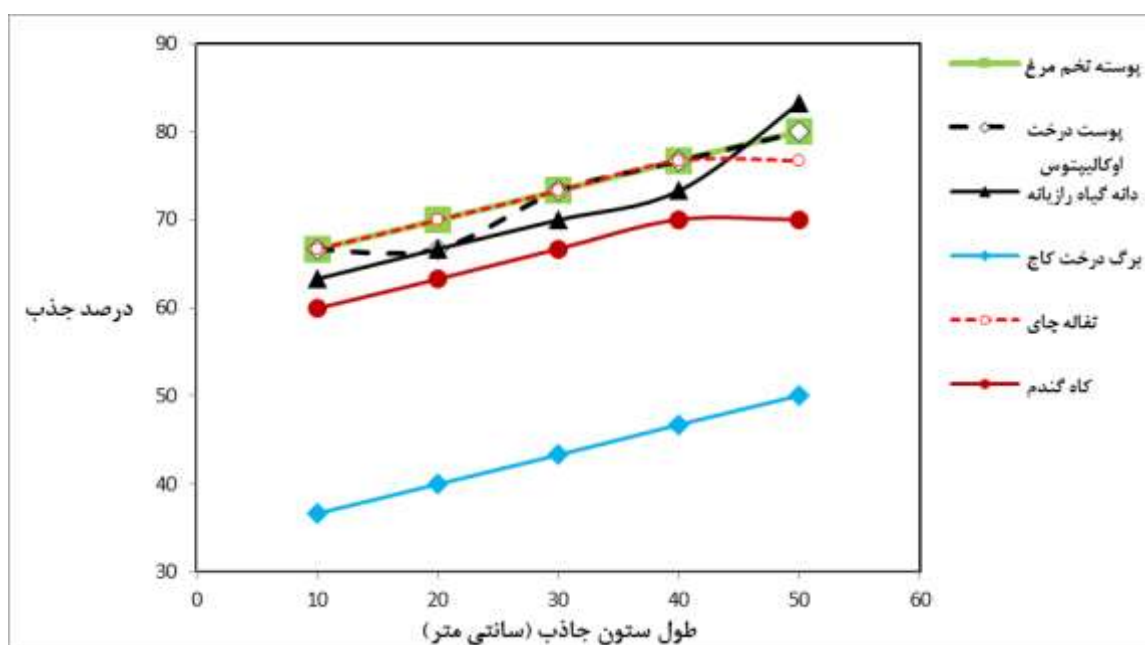
جرم مس (گرم)	مقدار NO ₂ نظری (میلی‌مول)	مقدار NO ₂ تجربی (میلی‌مول)	درصد خطای نسبی
۰/۰۵۲	۱/۶	۱/۵	۶/۲
۰/۰۵۳	۱/۷	۱/۶	۵/۹
۰/۰۹۵	۳/۰	۳/۰	۰/۰
۰/۱۰۱	۳/۲	۳/۱	۳/۱
۰/۰۹۸	۳/۱	۳/۰	۳/۲
۰/۰۹۸	۳/۱	۳/۰	۳/۲
۰/۱۵۱	۴/۸	۴/۵	۶/۲
۰/۱۴۸	۴/۷	۴/۴	۶/۴
۰/۱۴۸	۴/۷	۴/۵	۴/۳
۰/۱۵۰	۴/۷	۴/۶	۲/۱

۴/۸	۶/۰	۶/۳	۰/۲۰۰
۹/۱	۶/۰	۶/۶	۰/۲۱۰
۴/۳	۶/۶	۶/۹	۰/۲۲۰
۳/۰	۶/۴	۶/۶	۰/۲۱۰
۵/۸	۶/۵	۶/۹	۰/۲۲۰

اثر جاذب بر درصد طول ستون جذب سطحی

جاذب‌های استفاده شده شامل مواد و پسماندهای طبیعی و عبارت از پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم بودند. طول ستون جاذب از ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر داده شد، درحالی‌که مقدار اولیه NO_2 ثابت نگه داشته شد (۳/۰ میلی‌مول NO_2 معادل با ۰/۱۰ گرم مس) و آزمایش‌های جذب سطحی انجام شدند. نتایج در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، درصد جذب با افزایش طول ستون

جاذب افزایش می‌یابد و جذب مناسب‌تر با طول ستون ۵۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. این امر می‌تواند به علت افزایش مساحت سطح جاذب و دسترسی به مکان‌های جذبی بیشتر برای جذب گاز NO_2 باشد. علاوه بر این، از میان جاذب‌های مختلف استفاده شده، دانه گیاه رازیانه با طول ستون جاذب ۵۰ سانتی‌متر درصد جذب بالاتری نشان داد و پس از آن، پوسته تخم مرغ و پوست درخت اوکالیپتوس برای جذب سطحی گاز NO_2 مناسب‌تر بودند.



شکل ۱- اثر طول ستون جاذب بر درصد جذب سطحی گاز NO_2 برای جاذب‌های مختلف (پوسته تخم مرغ، پوست درخت

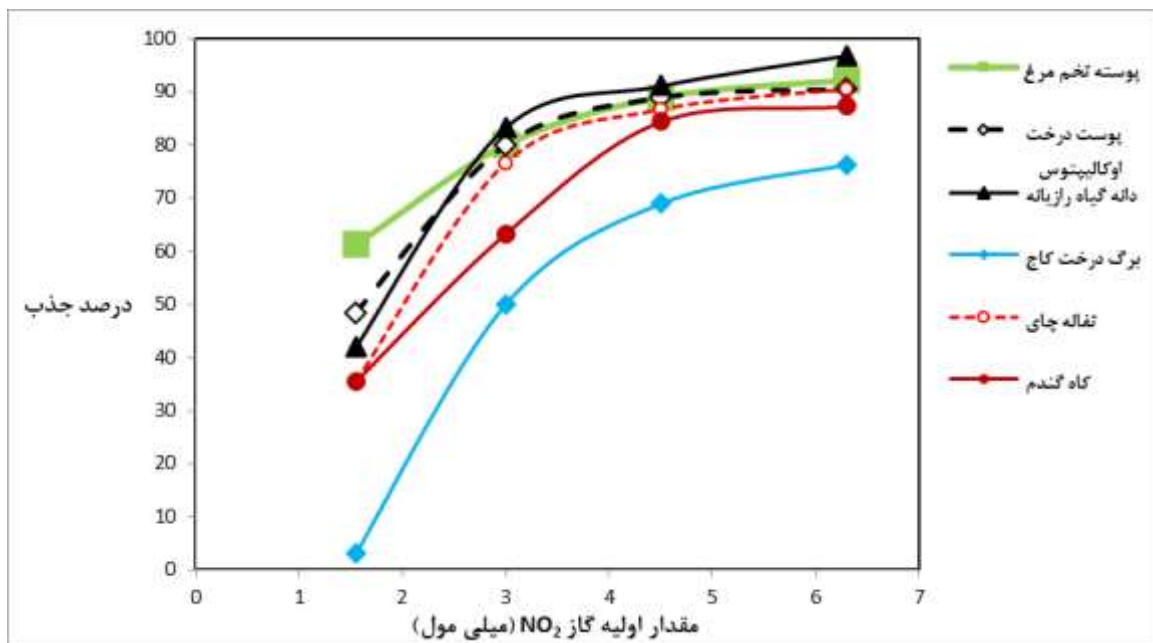
اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (مقدار اولیه NO_2 : ۳/۰ میلی‌مول).

Figure 1. The effect of the adsorbent column length on the adsorption percentage for different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (initial NO_2 amount= 3.0 mmol).

اثر مقدار اولیه NO₂ بر درصد جذب سطحی

جاذب‌های استفاده شده، مناسب‌ترین جاذب برای جذب سطحی گاز NO₂، دانه گیاه رازیانه است. این جاذب می‌تواند ۹۶٪/۸ از گاز NO₂ را در شرایط بهینه با طول ستون ۵۰ سانتی‌متر و مقدار اولیه NO₂ برابر با ۶/۳ میلی‌مول جذب نماید، اما چون دانه گیاه رازیانه نسبتاً گران‌قیمت است، استفاده از پوسته تخم مرغ به عنوان جاذب برای جذب گاز NO₂ مقرون به صرفه‌تر است. این جاذب بعد از دانه گیاه رازیانه، بیشترین درصد جذب (۹۲٪/۱) را دارد.

اکنون، طول ستون جاذب در مقدار بهینه آن (۵۰ سانتی‌متر) ثابت نگه داشته شد و مقدار اولیه NO₂ از ۱/۵۵ میلی‌مول (معادل با ۰/۰۵ گرم مس) تا ۶/۳ میلی‌مول (معادل با ۰/۲۰ گرم مس) تغییر داده شد و آزمایش‌های جذب سطحی انجام شدند. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، درصد جذب سطحی با افزایش مقدار اولیه NO₂ افزایش می‌یابد و جذب مطلوب‌تر در مقدار اولیه ۶/۳ میلی‌مول مشاهده می‌شود. این امر می‌تواند به خاطر افزایش تولید گاز NO₂ و جذب بیشتر آن در مکان‌های جذبی کافی برای جذب باشد. سرانجام، از میان



شکل ۲- اثر مقدار اولیه گاز NO₂ بر درصد جذب سطحی برای جاذب‌های مختلف (پوسته تخم مرغ، پوست درخت

اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی‌متر).

Figure 2. The effect of the initial NO₂ amount on the adsorption percentage for different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).

ایزوترم‌های تعادلی جذب سطحی

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{q_m K_L} \right) \frac{1}{n_e} \quad (8)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log n_e \quad (9)$$

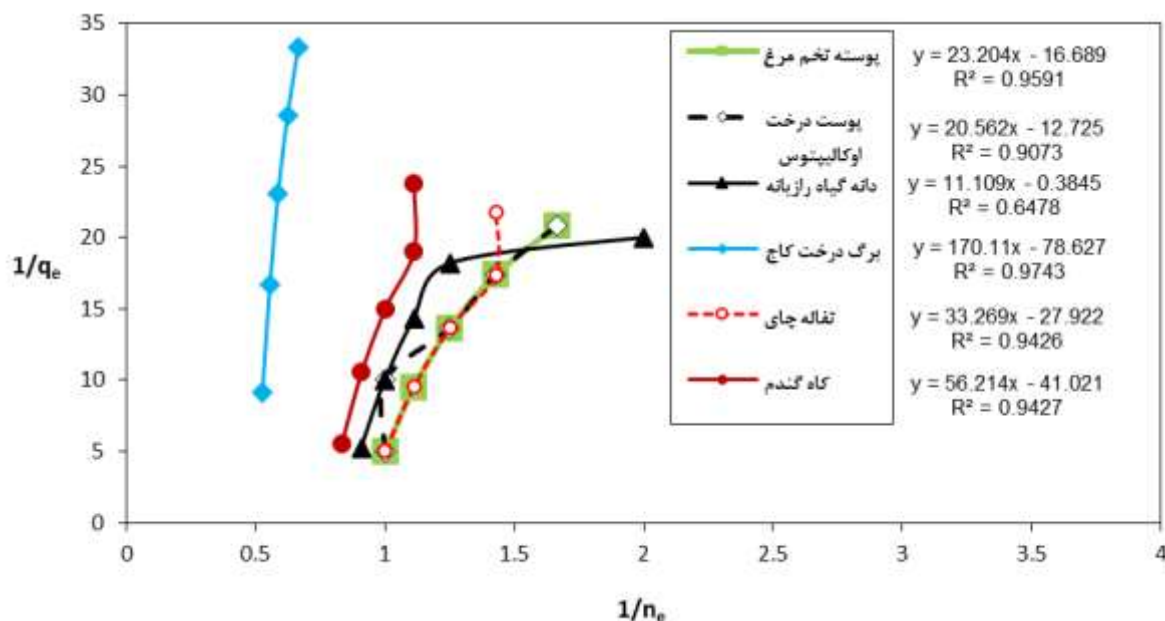
برای یافتن مدل مناسب جهت جذب سطحی گاز NO₂ بر روی جاذب‌های مختلف، نتایج تعادلی جذب سطحی بر اساس فرم‌های خطی ایزوترم‌های لانگمویر (معادله ۸)، فروندلیش (معادله ۹)، تمکین (معادله ۱۰) (۲۵ و ۲۴) و هارکین-جورا (معادله ۱۱) (۲۶) تجزیه و تحلیل شدند.

منحنی‌های ایزوترمی در شکل‌های ۳-۶ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، گرچه برازش داده‌های تجربی با معادلات لانگمویر و فروندلیش خوب است، به‌خاطر منفی بودن عرض از مبدأ آنها، پارامترهای این معادلات مقادیری منفی دارد. بنابراین، داده‌های تجربی با این ایزوترم‌ها مطابقت ندارند. برازش داده‌های تجربی با معادله تمکین چندان خوب نیست اما پارامترهای آن برای جاذب‌های مختلف به جز برگ درخت کاج، مقادیری مثبت دارد، اما در معادله ایزوترم هارکین-جورا، هم میزان برازش مناسب است و هم پارامترهای آن برای جاذب‌های مختلف به جز تفاله چای، مقادیری مثبت دارد که در جدول ۲ ارائه شده است. بنابراین، ایزوترم هارکین-جورا نتایج تجربی را بهتر از سایر ایزوترم‌ها توصیف می‌کند. بر اساس فرضیات ایزوترم هارکین-جورا (۲۶)، جذب سطحی گاز NO_2 بر روی سطوح جاذب‌های استفاده شده، یک جذب چند-لایه‌ای است و نیز سطح جاذب‌ها توزیع تخلخل ناهمگن دارد.

$$q_e = B_1 \ln n_e + B_1 \ln K_T \quad (10)$$

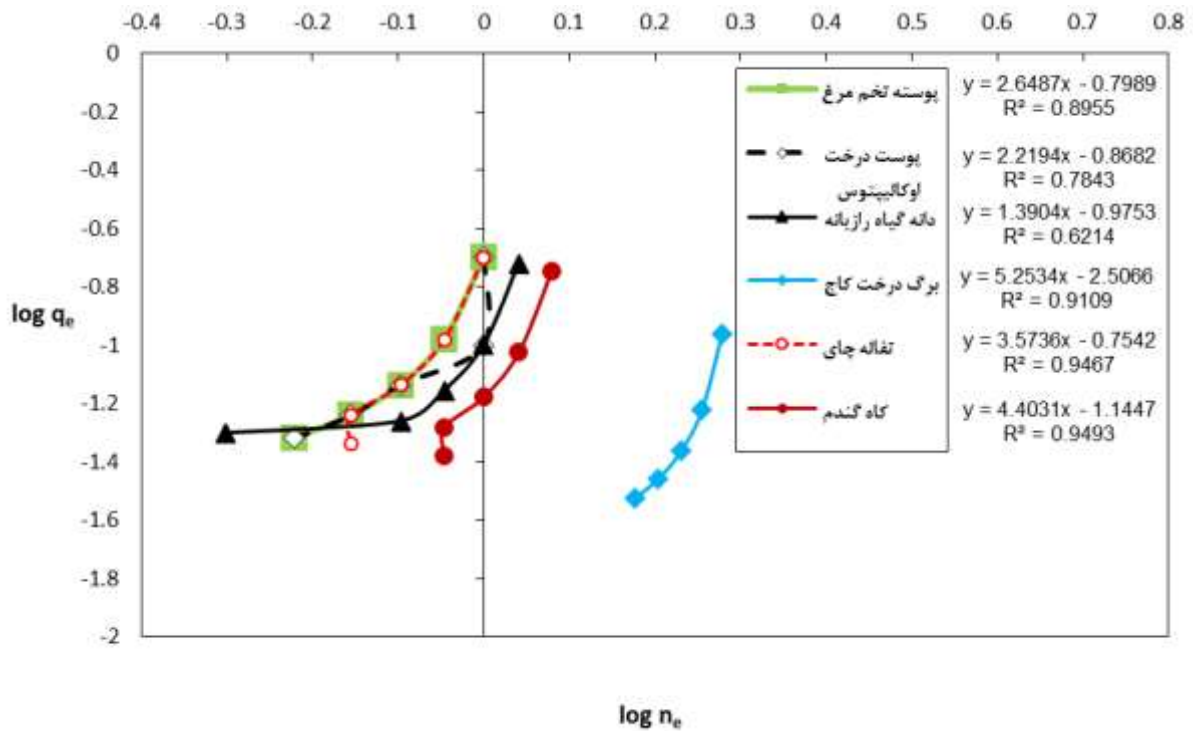
$$\frac{1}{q_e^2} = \frac{B}{A} - \left(\frac{1}{A}\right) \log n_e \quad (11)$$

که در آن، n_e و q_e به ترتیب مقدار NO_2 (بر حسب mmol) و ظرفیت جذب سطحی آن (بر حسب mmol cm^{-1}) در حالت تعادلی هستند. K_L ثابت ایزوترم لانگمویر بر حسب mmol^{-1} و q_m بیشینه ظرفیت جذب بر اساس ایزوترم لانگمویر بر حسب mmol cm^{-1} است. K_F ثابت ایزوترم فروندلیش بر حسب $\text{mmol}^{1-(1/n)} \text{cm}^{-1}$ و n فاکتور ناهمگنی می‌باشد. B_1 ثابتی است که به گرمای جذب سطحی بستگی دارد و K_T ثابت ایزوترم تمکین بر حسب cm^{-1} است. A و B ثابت‌های ایزوترم هارکین-جورا می‌باشند. به این نکته باید توجه داشت که در تمام موارد، تعداد مول‌های جذب‌شونده (NO_2) جایگزین غلظت آن شده است.



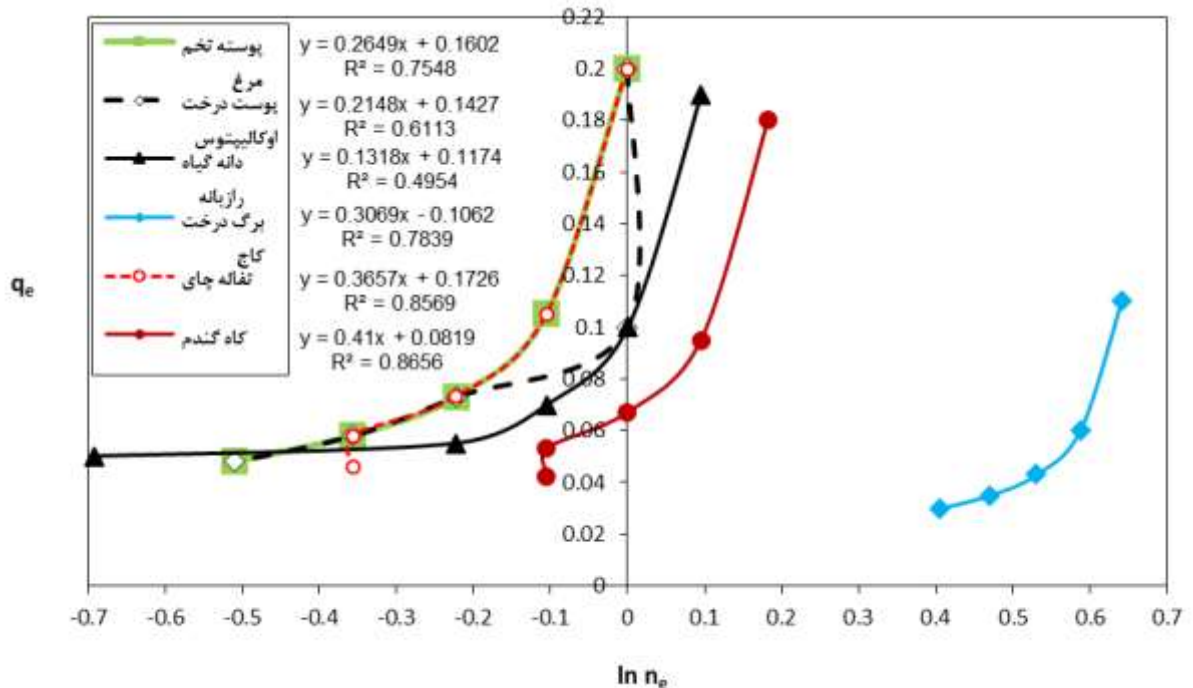
شکل ۳- ایزوترم لانگمویر برای جذب سطحی گاز NO_2 بر روی جاذب‌های مختلف (پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی‌متر).

Figure 3. Langmuir isotherm for adsorption of NO_2 gas on different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).



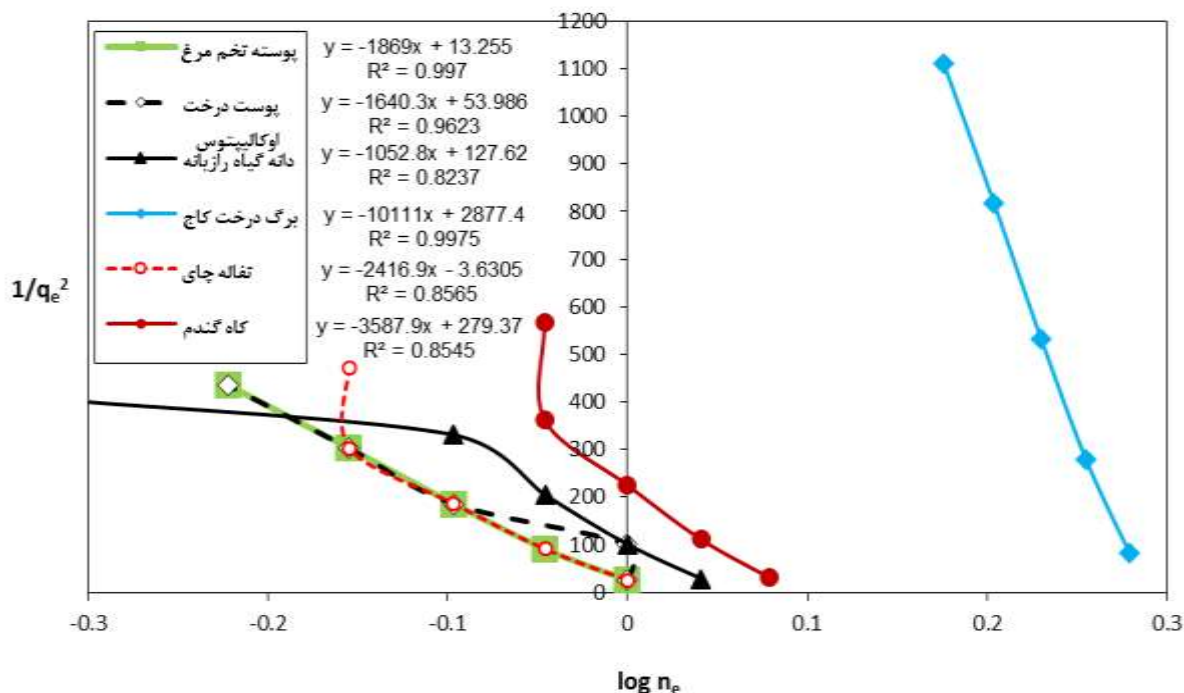
شکل ۴- ایزوترم فروندلیش برای جذب سطحی گاز NO₂ بر روی جاذب‌های مختلف (بوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی‌متر).

Figure 4. Freundlich isotherm for adsorption of NO₂ gas on different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).



شکل ۵- ایزوترم تمکین برای جذب سطحی گاز NO₂ بر روی جاذب‌های مختلف (بوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی‌متر).

Figure 5. Temkin isotherm for adsorption of NO₂ gas on different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).



شکل ۶- ایزوترم هارکین- جورا برای جذب سطحی گاز NO_2 بر روی جاذب‌های مختلف (پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی‌متر).
Figure 6. Harkin-Jura isotherm for adsorption of NO_2 gas on different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).

جدول ۲- پارامترهای ایزوترم هارکین- جورا برای جذب سطحی گاز NO_2 بر روی جاذب‌های مختلف (پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم) (طول بهینه ستون جاذب: ۵۰ سانتی-متر).

Table 2. The parameters of Harkin-Jura isotherm for adsorption of NO_2 gas on different adsorbents (eggshell, eucalyptus bark, fennel seed, pine leaf, tea waste, and wheat straw) (optimum adsorbent column length= 50 cm).

B ($\times 10^{-2}$)	A ($\times 10^{-4}$)	جاذب
۰/۷۱	۵/۳۵	پوسته تخم مرغ
۳/۳	۶/۱۰	پوست درخت اوکالیپتوس
۱۲/۱	۹/۵۰	دانه گیاه رازیانه
۲۸/۵	۰/۹۹	برگ درخت کاج
-۰/۱۵	۴/۱۴	تفاله چای
۷/۸	۲/۷۹	کاه گندم

نتیجه‌گیری

جاذب‌های مختلف استفاده شده برای جذب گاز NO_2 شامل پوسته تخم مرغ، پوست درخت اوکالیپتوس، دانه گیاه رازیانه، برگ درخت کاج، تفاله چای و کاه گندم بودند. این جاذب‌ها، به

فرایند جذب سطحی به‌خاطر هزینه پایین، سهولت دسترسی به جاذب، آسان بودن عملکرد و زمان کم عملیات یک روش موثر برای حذف آلاینده‌های محیط زیست نظیر گاز NO_2 است.

- pollution. Medical Clinics of North America, Vol. 76, pp. 935-952.
6. Li, W., Wu, C., Fang, H. L., Shi, Y., Lei, L. C., 2006. Study on NO₂ absorption by ascorbic acid and various chemicals. Journal of Zhejiang University Science B, Vol. 7, pp. 38-42.
 7. EPAU.S Environmental Protection Agency, 1991. Alternative Control Technques Document-Nitric and Adipic Acid, EPA Publication, No. 450/3-91-026.
 8. Dabrowski, A., 2000. Adsorption-from theory to practice. Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 93, pp. 135-224.
 9. Gray, P. G., 1993. A Fundamental Study on the Removal of Air Pollutants (Sulfur Dioxide, Nitrogen Dioxide and Carbon Dioxide by Adsorption on Activated Carbon. Gas Separation and Purification, Vol. 7, pp. 213-224.
 10. Pietrzak, R., 2009. Active Carbons Obtained from Bituminous Coal for NO₂ Removal under dry and wet conditions at room temperature. Energy Fuels, Vol. 23, pp. 3617-3624.
 11. Nowicki, P., Pietrzak, R., 2010. Carbonaceous adsorbents prepared by physical activation of pine sawdust and their application for removal of NO₂ in dry and wet conditions. Bioresource Technology, Vol. 101, pp. 5802-5807.
 12. Belala, Z., Belhachemi, M., Jeguirim, M., 2014. Activated carbon prepared from date pits for the retention of NO₂ at low temperature. International Journal of Chemical Reactor and Engineering, Vol. 12, pp. 717-726.

جز دانه گیاه رازیانه که یک جاذب طبیعی و نسبتاً گران‌قیمت است، پسماندهای مواد طبیعی و ارزان‌قیمت هستند. نتایج نشان داد که از میان جاذب‌های استفاده شده، مناسب‌ترین جاذب‌ها برای این فرایند جذب سطحی، دانه گیاه رازیانه و پوسته تخم مرغ هستند. این جاذب‌ها تحت شرایط بهینه طول ستون جاذب ۵۰ سانتی‌متر و مقدار اولیه گاز NO₂ برابر با ۶/۳ میلی‌مول، می‌توانند به ترتیب ۹۶/۸ و ۹۲/۱٪ از گاز NO₂ را جذب نمایند. علاوه‌براین، برازش داده‌های تجربی با ایزوترم‌های جذب سطحی نظیر ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیش، تمکین و هارکین- جورا نشان داد که ایزوترم هارکین- جورا، نتایج تجربی را بهتر از سایر ایزوترم‌ها توصیف می‌کند. بنابراین، بر اساس فرضیات ایزوترم هارکین- جورا، جذب سطحی گاز NO₂ بر روی سطوح جاذب‌های استفاده شده، یک جذب چندلایه‌ای است و نیز سطح جاذب‌ها توزیع تخلخل ناهمگن دارد.

References

1. Douglas, W. W., Hepper, N. G., Colby, T. V., 1989. Silo-filler's disease. Mayo Clinic Proceedings, Vol. 64, pp. 291-304.
2. Chang, L., Mercer, R. R., Stockstill, B. L., 1988. Effects of low levels of NO₂ on terminal bronchial cells and its relative toxicity compared to oxygen. Toxicology and Applied Pharmacology, Vol. 90, pp. 451-64.
3. Freeman, G., Crane, S. C., Furiosi, N. J., 1972. Covert reduction in ventilatory surface in rat during prolonged exposure to subacute nitrogen dioxide. The American Review of Respiratory Disease, Vol. 106, pp. 563-79.
4. Rosenstock, L., 1987. Occupational medicine: state of the art reviews. Hanley & Belfus, Philadelphia, pp. 303-305.
5. Fernandez-Caldas, E., Fox, R. W., 1992. Environmental control of air

- B: Environmental, Vol. 142, pp. 196–204.
19. Nowicki, P., Skibiszewska, P., Pietrzak, R., 2013. NO₂ removal on adsorbents prepared from coffee industry waste materials, *Adsorption*, Vol. 19, pp. 521–528.
20. Arthisree, S. R., Sirisha, D., Gandhi, N., 2013. Adsorption of Aqueous solution of NO₂ by Neem Bark Dust. *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 5, pp. 450-455.
21. Sirisha, D., Saritha, P., Gandhi, N., Asthana, S., 2016. Controlling of NO₂ by Adsorption Technique using Natural Adsorbent. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, Vol. 4, pp. 74-81.
22. Barbooti, M. M., Ibraheem, N. K., Ankosh, A. H., 2011. Removal of nitrogen dioxide and sulfur dioxide from air streams by absorption in urea solution. *Journal of environmental protection*, Vol. 2, pp. 175-185.
23. Streuli, G. A., Averell, P. R., 1970. *The Analytical Chemistry of Nitrogen and its Compounds, Part I*. John Wiley and Sons Inc., New York. atlas.com/en/iran/yazd-climate#daylight_sunshine (accessed Jul. 12, 2020).
13. Belhachemi, M., Jeguirim, M., Limousy, L., Addoun, F., 2014. Comparison of NO₂ removal using date pits activated carbon and modified commercialized activated carbon via different preparation methods: effect of porosity and surface chemistry. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 253, pp. 121-129.
14. Hofman, M., Pietrzak, R., 2011. Adsorbents obtained from waste tires for NO₂ removal under dry conditions at room temperature. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 170, pp. 202-208.
15. Mortazavi, S. B., Yarahmadi, R., Omidkhan, M. R., Asilyan, H., Moridi, M., 2008. Treatment of Nitrogen Oxides in Air Using Modified ZSM-5 Zeolite. *Journal of environmental science and technology*, Vol. 11, pp. 61-75 (In Persian)
16. Olsson, L., Sjövall, H., Blint, R. J., 2009. Detailed Kinetic Modeling of NO_x Adsorption and NO Oxidation over Cu-ZSM-5. *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 87, pp. 200– 210.
17. Apostolescu, N., Schröder, T., Kureti, S., 2004. Study on the Mechanism of the Reaction of NO₂ with Aluminium Oxide. *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 51, pp. 43–50.
18. Sivachandiran, L., Thevenet, F., Gravejat, P., Rousseau, A., 2013. Investigation of NO and NO₂ Adsorption Mechanisms on TiO₂ at Room Temperature. *Applied Catalysis*