دانشکده مهندســـی

پایان‌نامه دکتری در رشته مهندسی عمران (آب و محیط زیست)

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی حذف یون نیترات ازآب آلوده به روش فرایند تبادل یونی

به وسیله:
علی اکبر حکمت زاده

اساتید راهنما:

دکتر ناصرطالب بیدختی
دکترایوب کریمی جشنی

خرداد ۹۱

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب علی اکبر حکمت زاده (۸۵۳۷۱۲) دانشجوی رشته مهندسی عمران گرایش آب و محیط زیست دانشکده‌ی مهندسی اظهار می‌کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: علی اکبر حکمت زاده

تاریخ و امضاء:

به نام خدا

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی حذف یون نیترات ازآب آلوده به روش فرایند تبادل یونی

به کوشش

علی اکبر حکمت زاده

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی

از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه دکتری

در رشته‌ی:

مهندسی عمران-آب و محیط زیست

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته‌ی پایان نامه با درجه: عالی

دکتر ناصر طالب بیدختی، استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست (رئیس کمیته).....

دکتر ایوب کریمی جشنی، استادیار بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست (رئیس کمیته).....

دکتر منصور طاهری، استاد دانشکده مهندسی شیمی، نفت گاز و پتروشیمی (استاد مشاور) .....

دکتر قاسم حبیب آگهی، استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست (استاد مشاور) .....

خرداد ۹۱

سپاسگزاری

در اتمام این رساله دکتری اساتید گرانقدرم کمکهای فراوانی به اینجانب کرده اند. وظیفه خویش می‌دانم از زحمات و رهنمودهای بسیار ارزنده استادان گرانقدر آقای دکتر کریمی جشنی و آقای دکتر طالب بیدختی به عنوان اساتید راهنما و آقای دکتر حبیب آگهی و آقای دکتر طاهری به عنوان اساتید مشاور که با صبر و حوصله وصف‌ناپذیری در کلیه مراحل تحقیق و تدوین این رساله، از هیچ کوشش و راهنمایی فروگذار نکرده‌اند، سپاسگزاری نمایم.

همچنین از استادان بزرگوار آقای دکتر علوی مقدم و آقای دکتر نوشادی به عنوان داور که با نظرات اصلاحی خود موجبات تکمیل و پربارتر شدن این پژوهش را فراهم آورده‌اند صمیمانه تشکر می‌نمایم. در اینجا لازم می‌دانم از شرکت آب و فاضلاب که از این رساله حمایت مالی کردند و همچنین از مسئولان آزمایشگاه محیطزیست بخش مهندسی عمران که مرا در انجام تحقیق یاری نمودند، تقدیر و سپاسگزاری نمایم. در انتها لازم می‌دانم که از زحمات آقای Klove که در طول دوره‌ی فرصت مطالعاتی زحمات فراوانی برای اینجانب متحمل شدند کمال تشکر را بنمایم.

علی اکبر حکمت زاده

بهار ۱۳۹۱

چکیده:

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی حذف یون نیترات ازآب آلوده به روش فرایند تبادل یونی

به کوشش

علی اکبر حکمت زاده

هدف از این تحقیق بررسی حذف نیترات از آب آلوده به کمک رزین انتخاب‌گر نیترات در آزمایشهای Batch و پیوسته می‌باشد. آزمایشهای مختلفی شامل آزمایشهای تعادل جذب، آزمایشهای کینتیک جذب و آزمایشهای ستون انجام شد. همچنین یک پایلوت مدل آب زیرزمینی ساخته شد تا نقش دیوار نفوذپذیر فعال در حذف نیترات بررسی گردد.

آزمایشهای تعادل جذب با استفاده از نمونه‌ی آب زیرزمینی شیراز و محلولهای مصنوعی با غلظتهای مختلف نیترات و حضور یونهای کلراید و سولفات در محلول، انجام پذیرفتند. داده های آزمایشهای تعادل با ایزوترمهای تجربی جذب سطحی و ایزوترم بقای جرم بخوبی توصیف گردیدند. اما ضرایب ایزوترمهای جذب سطحی با تغییر پارامترهای آزمایشگاهی تغییر می‌کنند. در حالیکه توصیف تعادل جذب با یک رابطه‌ی نسبتا ثابت ایزوترم بقای جرم امکان پذیر می‌باشد. بعلاوه، آزمایشهای کینتیک جذب به کمک محلولهای مصنوعی با غلظتهای مختلف

نیترات و جرمهای مختلف رزین انجام گردیدند. بدین ترتیب کینتیک جذب در شرایط مختلف آزمایشگاهی، با مدلهای مختلف تجربی و استدلالی مورد ارزیابی قرار گرفت. ترمهای واکنش شیمیایی، دیفیوژن لایه‌ای و دیفیوژن ذره‌ای بطور همزمان و جداگانه در مدلهای کینتیک استدلالی مختلف در نظر گرفته شدند. مدلهای استدلالی داده‌های کینتیک جذب را بخوبی توصیف می‌کنند. اما کینتیک جذب ابتدا توسط فرایند انتقال جرم خارجی کنترل می‌گردد و سپس دیفیوژن ذره‌ای کنترل کننده فرایند جذب می‌باشد. همچنین تفاوت نسبی مقادیر تخمینی پارامترهای مدلهای استدلالی بسیار کمتر از تخمینهای حاصل از مدلهای کینتیک تجربی می‌باشد. بنابراین مدلهای استدلالی در توصیف داده‌های کینتیک جذب بیشتر قابل اعتماد می‌باشند.

در ادامه‌ی تحقیق، چندین آزمایش ستون تک جذبی و چند جذبی برای بررسی فرایند جذب انجام گردیدند. این آزمایشها با دبی‌های مختلف جریان، غلظت‌های اولیه نیترات مختلف و حضور یونهای رقابت کننده در محلول ورودی انجام گردیدند. به منظور پیش‌بینی منحنی شکست تستهای ستون، معادله‌ی انتقال جرم و جذب در محیط متخلخل هم به روش تحلیلی و هم به روش عددی حل شد. هر دو فرض تعادل موضعی و تئوری دیفیوژن ذره در معادله‌ی انتقال جرم و جذب بطور جداگانه در مدل سازی فرایند جذب در ستونها مد نظر قرار گرفتند و منحنی‌های شکست آزمایشگاهی و محاسباتی با یکدیگر کاملا منطبق بودند. همچنین پارامترهای ایزوترم جذب که از آزمایشهای ستون برآورد گردیدند توسط نتایج محاسباتی حاصل از آزمایشهای تعادل جذب تایید گردیدند. در نتیجه می‌توان رفتار ستون‌های جذب را با استفاده از نتایج آزمایشهای تعادل جذب و بکارگیری ایزوترم بقای جرم پیش‌بینی کرد. اما در صورت استفاده از روش تحلیلی و با کمک نتایج آزمایشهای Batch، نقطه‌ی شکست ستون و شیب منحنی شکست دست بالا تخمین زده می‌شود.

بعلاوه، تاثیر رزین تعویض یونی در تصفیه‌ی درجای آب آلوده در یک پایلوت مدل آب زیرزمینی بررسی گردید. حجم زیادی رزین در اطراف چاه آزمایشگاهی به عنوان لایه‌ی نفوذپذیر فعال ریخته شد و فرایند جذب با موفقیت در آن صورت پذیرفت. در اضافه، معادله‌ی انتقال جرم و جذب در دستگاه استوانه‌ای به روش عددی حل گردید. منحنی‌های شکست

آزمایشگاهی بخوبی توسط جوابهای مدل سازی با هر دو فرض تعادل موضعی و تئوری دیفیوژن ذره توصیف گردیدند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- مقدمه ۲۱

۱-۱- کلیات ۲۱

۱-۲- بیان موضوع ۲۴

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق: ۲۷

۱-۴- اهداف تحقیق: ۳۱

۱-۵- نوآوری تحقیق: ۳۲

۲- مرور منابع ۳٤

۲-۱- مقدمه ۳۴

۲-۲- روش نیترات زدایی بیولوژیکی یا BD : ۳۵

۲-۳- روش‌های فیزیکی-شیمیایی ۴۲

۲-۳-۱ روش اسمز معکوس یا RO ۴۲

۲-۳-۲-روش الکترو دیالیز یا ED : ۴۴

۲-۳-۳- روش احیا کاتالیستی یا CR: ۴۶

۲-۳-۴- روش جذب سطحی : ۴۹

۲-۳-۵- روش تعویض یونی یا IE : ۵۳

۲-۴- تئوری‌ها ۵۸

۲-۴-۱- مدل‌های ایزوترم تعادل ۵۸

۲-۴-۱-۱- مدلهای ایزوترم جذب سطحی ۵۸

۲-۴-۱-۲- مدل ایزوترم قانون بقای جرم ۶۱
۲-۴-۲- مدل‌های کینتیک جذب ۶۳
۲-۴-۲-۱- مدل‌های کینتیک تجربی ۶۴
۲-۴-۲-۲- مدل‌های کینتیک استدلالی ۶۶
۲-۴-۲-۲-۱- مدل‌های کینتیک استدلالی ساده شده ۶۸
۲-۴-۲-۲-۲- مدلهای کینتیک دیفیوژن ذره ۷۰
۲-۴-۳- مدل ریاضی جذب بر روی بستر رزینی ۷۲
۲-۴-۳-۱- خصوصیات فیزیکی بستر ۷۲
۲-۴-۳-۲- موازنه جرم ماده جذب شونده درون ستون ۷۳
۲-۴-۳-۲-۱- تئوری تعادل موضعی: ۷۶
۲-۴-۳-۲-۲- تئوری کینتیک انتقال جرم: ۷۷
۲-۴-۳-۳- معادله حاکم بر انتقال جرم ماده ردیاب درون ستون ۷۸
۲-۴-۳-۴- موازنه جرم ماده جذب شونده درون پایلوت آب زیرزمینی ۷۸
۲-۴-۴- حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر انتقال جرم و جذب درون ستون ۸۰
۲-۴-۴-۱- حل تحلیلی معادلات انتقال جرم و جذب ۸۰
۲-۴-۴-۱-۱- حل معادله انتقال جرم در ستون ۸۰
۲-۴-۴-۱-۲- حل معادله انتقال جرم و جذب در ستون ۸۱
۲-۴-۴-۲- حل عددی معادلات انتقال جرم ۸۳
۲-۴-۵- روش آنالیز گشتاور (Moment Analysis) ۸۵
۲-۴-۶- توابع خطا ۸۹
۲-۵- تخمین منحنی شکست در آزمایشهای ستون ۸۹
۲-۶- نتیجه‌ی مرور منابع: ۹۲
۳- روش انجام تحقیق ۹۴
۳-۱- مقدمه ۹۴
۳-۲- مواد مورد استفاده ۹۵
۳-۲-۱- جاذب‌های مورد استفاده(Adsorbents) ۹۵
۳-۲-۲- محلولهای مورد استفاده ۹۸
۳-۳ روش اندازه گیری یونها ۹۹
۳-۴- روش انجام آزمایشها ۱۰۰

۳-۴-۱- روش انجام آزمایشهای ناپیوسته (Batch Tests) ۱۰۰
۳-۴-۲- آزمایشهای پیوسته یا Column Tests ۱۰۲
۳-۴-۳- ساخت پایلوت مدل آب زیرزمینی با دیوار نفوذ پذیر فعال (PRB): ۱۰۶
۳-۵- روش انجام مطالعات تئوری..... ۱۱۰
۴- نتایج و بحث: ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
۴-۱- مقایسه‌ی کارایی جاذبهای مختلف در حذف نیترات از آب ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۴-۲- نتایج آزمایشهای تعادل (BATCH EQULILIBRIUM TESTS) بر روی رزین NSSR..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۴-۲-۱: اثر غلظت محلول نیترات و وجود یونهای رقابت کننده بر ایزوترم جذب..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۲-۲: تاثیر دما و pH بر ظرفیت جذب ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۲-۳: مدل سازی ایزوترم جذب..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۳- نتایج آزمایشهای کینتیک جذب ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۴-۳-۱- اثر جرم رزین و غلظت اولیه نیترات و حضور سولفات در کینتیک جذب: ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۳-۲- نتایج مدل سازی با مدلهای کینتیک تجربی ... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۳-۳- نتایج مدلهای استدلالی ساده شده: ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۳-۴- نتایج مدلهای دیفیوژن ذره ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۲-۴- مدل سازی فرایند چند جذبی ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴- نتایج آزمایشهای ستون ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۴-۴-۱- آزمایشهای ردیابی در ستونهای جاذب ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲- آزمایشهای حذف نیترات در ستونهای جاذب... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲-۱- تاثیر دبی، غلظت اولیه نیترات، حضور یونهای رقابت کننده و ارتفاع بستر **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲-۲- بررسی فرایند چند جذبی (Multi Component Adsorption) .... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲-۳- مدل سازی رفتار ستونهای جذب با استفاده از روشهای تحلیلی ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲-۴- مدل سازی رفتار ستونهای جذب با فرض تعادل موضعی. **Error! Bookmark not defined.**

۴-۴-۲-۵- مدل سازی رفتار ستونهای جذب با روشهای کینتیک دیفیوژن ذره ..... **Error! Bookmark not defined.**
۴-۴-۲-۶- مدل سازی فرایند چند جذبی در ستونها **Error! Bookmark not defined.**
۴-۵- نتایج آزمایشهای پایلوت آب زیرزمینی ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۴-۶- احیا رزین ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۱
۵-۱- نتیجه گیری: ۱۱۱
۵-۲- پیشنهادات ۱۱۶
۶- منابع ۱۱۸
۷- پیوست ۱۳٤

فهرست جدول‌ها

عنوان و شماره **صفحه**

جدول ۳-۱: مشخصات رزین IND NSSR ۹۶

جدول ۳-۲: مشخصات رزین PUROLITE A400 ..... ۹۶

جدول ۳-۳ : مشخصات فیزیکی شیمیایی آب زیرزمینی شیراز ۹۸

جدول ۳-۴: مشخصات فیزیکی بستر رزین IND NSSR ۱۰۶

جدول ۴-۱: مقایسه آزمایشهای پیوسته بر روی رزین و کربن ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲: مشخصات آزمایشهای ستون بر روی رزینهای NSSR و A400 ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۳: مشخصات محلولهای آزمایشهای تعادل ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۴: داده‌های آزمایشهای تعادل با محلولهای مصنوعی .... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۵: داده‌های آزمایشهای تعادل با نمونه‌ی آب زیرزمینی شیراز ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۶: پارامترهای ایزوترم MASS ACTION برای حذف نیترات با رزین IND NSSR . ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۷: پارامترهای ایزوترم LANGMUIR برای حذف نیترات با رزین IND NSSR..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۸: پارامترهای ایزوترم FREUNDLICH برای حذف نیترات با رزین IND NSSR ... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۹: پارامترهای ایزوترم REDLICH-PETERSON برای حذف نیترات با رزین IND NSSR

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.....

جدول ۴-۱۰: پارامترهای ایزوترم SIPS برای حذف نیترات با رزین IND NSSR ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۱: پارامترهای ایزوترم بقای جرم در فرایند چند جذبی. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۲: نتایج آزمایشهای تعادل در فرایند چند جذبی ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۳: پارامترهای معادله‌ی کینتیک مدل شبه درجه اول. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۴: پارامترهای معادله‌ی کینتیک مدل شبه درجه دوم . ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۵: پارامترهای معادله‌ی کینتیک مدل ELOVICH.... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۶: پارامترهای مدل واکنش شیمیایی درجه دو مدل شبه وانش شیمیایی..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۷: پارامترهای مدل دیفیوژن لایه‌ای ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۸: پارامترهای مدل SDM ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۱۹: پارامترهای مدل PVDM..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۰: پارامترهای مدل PVSDM..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جد.ل ۴-۲۱: مشخصات آزمیشهای ردیابی و نتایج حل تحلیلی... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۲: مشخصات آزمایشهای پیوسته با محلول نیترات .... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۳: مشخصات آزمایشهای پیوسته با محلولهای نیترات وسولفات و کلراید..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۴: مقادیر تخمینی پارامترهای حلهای تحلیلی برای آزمایشهای ستون با محلول نیترات.... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۵: پارامترهای مدل ریاضی ستونها با فرض تعادل موضعی برای آزمایشهای ستون با محلول نیترات. ..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۶: پارامترهای مدل ریاضی ستونها با فرض تعادل موضعی برای آزمایشهای ستون با محلول نیترات به همراه یونهای رقابت کننده. ..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۷: پارامترهای معادله انتقال جرم در ستون با محلول نیترات بر مبنای مدل کینتیک دیفیوژن ذره ..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۸: پارامترهای معادله انتقال جرم چند جذبی در ستون با محلول نیترات و سولفات ..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

بر مبنای مدل دیفیوژن ذره ..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول ۴-۲۹: مشخصات آزمایشهای پایلوت آب زیرزمینی..... !ERROR BOOKMARK NOT DEFINED.

جدول پیوست ۱: مقادیر پیشنهادی طراحی ستون جذب بر اساس METCALF & EDDY, 2003 ..... ۱۳٤

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱: مخزن الکترودیالیز (BANASIAK ET AL., 2007) ۴۴

شکل ۲-۲: مکانیزم انتقال جرم در ذره رزین ۶۷

شکل ۲-۳: شمای یک جزء حجمی از ستون ۷۳

شکل ۲-۴: رآکتور فرضی در ستون ۸۷

شکل ۳-۱: دستگاه SPECTROPHOTOMETER برای اندازه گیری یون نیترات ۱۰۰

شکل ۳-۲ : دستگاه شیکر دورانی با قابلیت کنترل درجه دما ۱۰۲

شکل ۳-۳: (الف) نمای شماتیک آزمایشهای ستون (ب) آزمایش ستون با رزین تعویض یونی ۱۰۴

شکل ۳-۴: آزمایش ردیابی ستون ۱۰۵

شکل ۳-۵: جزئیات آزمایش‌های ردیابی ستون ۱۰۵

شکل ۳-۶: آکواریم در حال ساخت ۱۰۷

شکل ۳-۷: (الف) لوله سوراخ دار به قطر خارجی ۶۳ میلی متر و صفحه تفلونی زیر آن (ب) لوله سوراخ دار به قطر داخلی ۱۵۵ میلی متر که لوله ۶۳ میلی متر را در بر گرفته است. (پ) لوله ۶۳ و ۱۵۵ که بر روی صفحه تفلونی قرار گرفته اند. ۱۰۸

شکل ۳-۸: چاه ساخته شده در وسط آکواریم ۱۰۹

شکل۳-۹: مدل آب زیرزمینی با PRB در آکواریم ۱۰۹

شکل۳-۱۰: پلان شماتیک پایلوت آب زیرزمینی.....۱۱۰

شکل ۴-۱: منحنی‌های کینتیک جذب نیترات به جاذبهای مختلف **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲: ایزوترم جذب (الف) برای رزین انتخاب کننده نیترات (ب) کربن فعال دانه‌ای (پ) کربن فعال پودری .....**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳: منحنی شکست آزمایش ستون (الف) با رزین IND NSSR (ب) با GAC ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴: داده‌های ایزوترم جذب بر روی رزین NSSR و رزین A400. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵: منحنیهای شکست آزمایشهای ستون بر روی رزینهای NSSR و A400 ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۶: داده‌های ایزوترم جذب با محلولهای حاوی نیترات. ... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۷: داده‌های ایزوترم جذب با محلولهای مختلف حاوی نیترات، سولفات و کلراید. .. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۸: تاثیر مقدار رزین در حذف نیترات از محلول‌های نیترات ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۹: تاثیر PH در ظرفیت جذب ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۰: تاثیر دما در ظرفیت جذب ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۱: ایزوترم جذب (الف) LANGMUIR (ب) FREUNDLICH (پ) REDLICH-PETERSON (ت) SIPS (ث) MASS ACTION مربوط به محلول مصنوعی شماره‌ی ۲. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۲: مقایسه‌ی مدلهای LANGMUIR و بقای جرم بر روی نتایج آزمایشهای تعادل محلولهای مصنوعی ۱ و ۴ (الف) برای ایزوترم LANGMUIR (ب) برای ایزوترم بقای جرم. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۳: شکل خطی ایزوترم بقای جرم برای کلیه داده‌های آزمایشهای تعادل..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۴: تاثیر غلظت در منحنی‌های آزمایشگاهی حذف نیترات بر حسب زمان ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۵: تاثیر غلظت در منحنی‌های آزمایشگاهی میزان جذب نیترات بر حسب زمان. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۶: تاثیر جرم رزین در منحنی‌های آزمایشگاهی حذف نیترات بر حسب زمان .... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۱۷: تاثیر جرم رزین در منحنی‌های آزمایشگاهی میزان جذب نیترات بر حسب زمان **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**.....

شکل ۴-۱۸: تاثیر حضور یونهای سولفات در منحنی آزمایشگاهی حذف نیترات بر حسب زمان **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**.....

شکل ۴-۱۹: تاثیر حضور یونهای سولفات در منحنی آزمایشگاهی میزان جذب نیترات..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۰: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل شبه درجه اول..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۱: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل شبه درجه اول..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۲: منحنی‌های آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل واکنش شیمیایی درجه دو برای (الف) جرمهای مختلف رزین (ب) غلظتهای مختلف نیترات. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۳: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل شبه واکنش شیمیایی برای تعدادی از آزمایشهای کینتیک..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۴: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با FDM برای (الف) جرمهای مختلف رزین (ب) غلظتهای مختلف نیترات. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۵: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل SDM (الف) برای جرمهای مختلف رزین (ب) برای غلظتهای مختلف. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۶: تغییرات مدل SDM به (الف) پارامتر KF (ب) پارامتر DS **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۷: منحنیهای آزمایشگاهی و مدل سازی شده با مدل PVDM (الف) برای جرمهای مختلف رزین (ب) برای غلظتهای مختلف. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۸: تغییرات مدل PVDM به (الف) پارامتر KF (ب) پارامتر DS **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۲۹: منحنی‌های آزمایشگاهی و مدل سازی شده‌ی نیترات و سولفات با SDM .... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۰: منحنی آزمایشگاهی غلظت نمک خروجی آزمایش ردیابی ۳۶ و حل تحلیلی با تابع بهینه یابی RMSE ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۱: منحنی آزمایشگاهی غلظت نمک خروجی آزمایش ردیابی ۳۶ و حل تحلیلی با تابع بهینه یابی MAE. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۲: ضریب پخش محوری در مقابل سرعت ظاهری برای ستونهای مختلف به طولهای ۲۰/۳ ، ۳۰/۴۵ و ۳۸/۲۵. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۳: ضریب تخلخل در مقابل EBCT..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۴: مقایسه‌ی ضرایب پخش محوری دو روش تحلیلی و آنالیز گشتاور برای ستون با طول ۲۰/۳ CM. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۵: منحنی‌های شکست نیترات برای (الف) دبی‌های مختلف (ب) غلظتهای مختلف نیترات (پ) حضور یونهای سولفات و نیترات. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۶: منحنی‌های شکست نیترات برای RUN1 و RUN14. **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۷: منحنی‌های شکست نیترات برای آب زیرزمینی (RUN8) و محلول مصنوعی نیترات (RUN5)..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۸: منحنی‌های شکست نیترات و سولفات در آزمایش ستون با محلول مصنوعی حاوی نیترات و سولفات (RUN6)..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۳۹: منحنی‌های شکست نیترات و سولفات در آزمایش ستون با آب زیرزمینی برای (الف) RUN8 (ب) RUN9..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۰: منحنی‌های شکست نیترات و سولفات در آزمایش ستون با آب زیرزمینی برای (الف) RUN10 (ب) RUN11. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۱: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و منحنی‌های محاسباتی با ضرایب ناشی از آزمایشهای BATCH و آزمایشهای ستون برای (الف) RUN1 (ب) RUN3 (پ) RUN5... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۲: تاثیر پارامتر K_{CH} بر منحنی شکست ستون بر اساس مشخصات تست RUN5. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۳: منحنهای شکست نیترات (الف) برای مقادیر مختلف دبی (ب) برای غلظتهای اولیه مختلف نیترات (پ) در حضور یونهای سولفات (ت) برای ارتفاع‌های مختلف. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۴: منحنهای شکست نیترات برای آزمایشهای ستون با آب زیرزمینی با دبی‌های مختلف. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۵: منحنهای شکست نیترات برای آزمایشهای ستون RUN10 و RUN11 ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۶: تاثیر تغییرات در پارامترهای مدل ریاضی بر روی شکل منحنی شکست تست RUN1 (الف) ضریب پخش محوری (ب) ثابت ظاهری تعادل (ج) ماکزیمم ظرفیت جذب..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۷: نمودارهای مدل سازی شده‌ی شکست نیترات با مدل دیفیوژن ذره (الف) برای دبی‌های مختلف (ب) برای غلظتهای اولیه مختلف (پ) برای حضور کلراید در محلول نیترات..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۸: تاثیر تغییرات در پارامترهای مدل ریاضی دیفیوژن ذره بر روی شکل منحنی شکست (الف) تغییرات K_F (ب) تغییرات D_P. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۴۹: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN6 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۰: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN8 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۱: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN9 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۲: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN10 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۳: منحنی‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN11 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۴: تاثیر ضرایب انتقال جرم خارجی نیترات و سولفات بر روی منحنی‌های شکست نیترات و سولفات تست RUN6 (الف) $K_{F\,NO3}$ (ب) $K_{F\,SO4}$.... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۵: تاثیر ضرایب انتخاب شوندگی نیترات و سولفات بر روی منحنی‌های شکست نیترات و سولفات تست RUN6 (الف) K_{NO3} (ب) K_{SO4} ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۶: منحنی‌های داده‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و منحنی‌های مدل سازی شده با فرض تعادل موضعی در تستهای RUN12 و RUN13. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۷: منحنی‌های داده‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN12 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. . **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۸: منحنی‌های داده‌های آزمایشگاهی شکست نیترات و سولفات تست RUN13 و منحنی‌های مدل سازی شده با روش دیفیوژن ذره. . **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۵۹: نمودار احیا رزین بر حسب غلظت نمک. ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۶۰: نمودار کینتیک احیا رزین ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل ۴-۶۱: آزمایش پیوسته احیا رزین‌های اشباع شده در ستون RUN1 ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

شکل پیوست ۱: منحنی آزمایشگاهی غلظت نمک خروجی آزمایش ردیابی شماره ۴ و حل تحلیلی (الف) با تابع بهینه یابی RMSE (ب) با تابع بهینه یابی MAE..... ۱۳۵

شکل پیوست ۲: ضریب پخش محوری در مقابل سرعت ظاهری برای ستونهای مختلف. (الف) ستون با طول ۲۰/۳ CM (ب) ستون با طول ۳۰/۴۵ CM (پ) ستون با طول ۳۸/۲۵ CM. ۱۳۶

شکل پیوست ۳: مقایسه‌ی ضریب پخش محوری حاصل از روش تحلیلی و روش آنالیز گشتاور. (الف) ستون با طول ۳۰/۴۵ CM (ب) ستون با طول ۳۸/۲۵ CM. ۱۳۷