ORIGINAL ARTICLE

Efficiency of Iron Oxide Nanoparticles in Advanced Treatment of Secondary Effluent of Municipal Wastewater Treatment Plant

Mostafa Gharloghi[1],
Ahmadreza Yazdanbakhsh[2],
Akbar Eslami[2],
Ehsan Aghayani[3]

[1] MSc in Environmental Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2] Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[3] PhD Student in Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received August 19, 2015 Accepted January 3, 2015)

Abstract

Background and purpose: Municipal wastewater treatment plant effluents are amongst the main available water sources. Reuse of these effluents requires further standards beyond secondary standards. Therefore, removal of organic pollutants and some compounds such as nitrate and phosphate from effluents should be done at a greater extent. In this study, removal of these compounds from secondary effluent was examined using an absorbent of iron oxide nanoparticles (MNPs Fe_3O_4).

Materials and methods: The research was carried out using actual effluent of urban wastewater treatment plant in laboratory scale. The iron oxide nanoparticles (MNPs Fe_3O_4) was used for removal of target pollutants by investigating different parameters such as pH, initial concentration, contact time, and adsorbent dosage using optimization of one factor at a time. Afterwards, the optimum condition was determined by adsorption and kinetic isotherms.

Results: The average BOD_5, COD, nitrogen, and phosphorus in wastewater treatment plant effluent were found to be 25, 43, 63 and 8.6 mg /L, respectively. The optimum conditions for adsorption of these pollutants by Fe_3O_4MNPs were obtained at pH 3, 15 min contact time and absorbent dosage of 1 g/l. Removal of PO_4^{3-}, NO^-_3, BOD_5 and COD in the optimum condition was obtained to be 54, 11.5, 56, and 75%, respectively, and the maximum adsorption capacities for target pollutants were 4.7, 1.6, 14, and 32 mg/g. The results showed the adsorption by Fe_3O_4 followed the Freundlich model and pseudo first-order kinetic for COD and PO_4^{3-} and pseudo second-order kinetic for BOD_5 and NO^-_3 removal.

Conclusion: Iron oxide nanoparticles (MNPs Fe_3O_4) is suitable for removal of some pollutants (COD, BOD_5 and PO_4^{3-}) from the secondary effluent, but this absorbent is not effective for nitrate removal.

Keywords: Fe_3O_4MNPs, organic compound, COD, BOD_5, nitrate, phosphate, advanced treatment, effluent

J Mazandaran Univ Med Sci 2015; 26(135): 130-143 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و ششم شماره ۱۳۵ فروردین سال ۱۳۹۵ (۱۴۳-۱۳۰)

بررسی کارائی نانوذرات اکسید آهن جهت تصفیه پیشرفته پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری

مصطفی قارلقی[۱]
احمد رضا یزدانبخش[۲]
اکبر اسلامی[۲]
احسان آقایانی[۳]

چکیده

سابقه و هدف: یکی از منابع عظیم آبی قابل استفاده، پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری است. استفاده مجدد از این پسآب نیازمند استانداردهایی فراتر از استانداردهای ثانویه می‌باشد و نیاز است تا آلاینده‌های آلی و بعضی از ترکیبات مانند نیترات و فسفات موجود در پسآب به میزان بیشتری حذف گردند. در این تحقیق حذف این ترکیبات از پساب ثانویه با استفاده از جاذب نانو ذرات اکسید آهن (مگنتیت) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در سیستم آزمایشگاهی و روی پسآب واقعی یکی از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری انجام گرفت و نانو ذرات اکسید آهن برای حذف آلاینده‌های مورد نظر استفاده شد و اثر pH، زمان تماس و غلظت جاذب روی حذف این آلاینده ها به روش بهینه سازی عامل در واحد زمان مورد بررسی قرار گرفت. سپس ایزوترم و کینتیک جذب در شرایط بهینه متغییرها تعیین گردید.

یافته‌ها: میانگین (BOD_5) Biochemical oxygen demand ، (COD) chemical oxygen demand، نیترات و فسفات در پسآب تصفیه‌خانه به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۳، ۶۳ و ۸/۶ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. شرایط بهینه برای جذب این آلاینده‌ها توسط جاذب نانو ذرات اکسید آهن در pH برابر ۳، زمان تماس ۱۵ دقیقه و دوز جاذب ۱g/l به‌دست آمد. در شرایط بهینه میزان حذف فسفات، نیترات، BOD_5 و COD به ترتیب ۵۴، ۱۱/۵، ۵۶ و ۷۵ درصد و ظرفیت جذب به ترتیب (mg/g) ۴/۷، ۱/۶، ۱۴و۳۲ به دست آمد. نتایج نشان داد جذب توسط Fe_3O_4 از مدل فروندلیج و کینتیک درجه اول برای COD و فسفات و برای BOD_5 و نیترات از کینتیک درجه دوم پیروی می‌کند.

استنتاج: نانوذرات اکسید آهن پتانسیل نسبتاً مناسبی برای حذف فسفر، BOD_5 و COD از پساب تصفیه ثانویه دارد ولی جهت حذف نیترات کارائی مناسب ندارد.

واژه های کلیدی: $Fe_3O_4MNP_s$، تر کیبات آلی (BOD_5 ,COD)، NO^-_3 و PO_4^{3-}، تصفیه پیشرفته پساب

مقدمه

با توجه به قرار گرفتن در بحران کم آبی، یکی از منابع عظیم آبی قابل استفاده، پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است که از جمله منابع آلوده‌کننده آب‌های سطحی و زیر زمینی می‌باشد. مهم‌ترین آلایندهای موجود در این

مولف مسئول: احمدرضا یزدانبخش– تهران، اوین، بلواردانشجو، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت E-mail: yazdanbakhsh@sbmu.ac.ir
۱. کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، تهران
۲. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، تهران
۳. دانشجوی دکترای مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
تاریخ دریافت : ۱۳۹۴/۵/۲۸ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۳۹۴/۶/۱۶ تاریخ تصویب : ۱۳۹۴/۱۰/۱۳

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

پساب، بار بالای Biochemical oxygen demand (BOD_5)، chemical oxygen demand (COD) نیترات و فسفات می‌باشد که اثرات زیان‌باری بر سلامت و اکوسیستم دارند(۱، ۲). نتایج حاصل از مطالعات فیضی (۱۳۸۵)، ابدی (۱۳۸۰)، یار قلی (۱۳۸۷)، وثوقی (۱۳۷۴)، عادل (۱۳۷۵)، خرقانی (۱۳۷۶)، در گزارش ۵۳۵ وزارات نیرو نشان داده است که تخلیه پساب ثانویه تصفیه خانه فاضلاب به رودخانه‌ها منجربه افزایش ترکیبات آلی، فسفر و نیترات در این منابع شده است و حاکی از آلودگی منابع آب، خاک زراعی و محصولات پرورشی با پساب فاضلاب تصیفه‌خانه شهری است(۳). افزایش این ترکیبات نرخ مصرف اکوسیستم را افزایش می‌دهد و مشکلات ناشی از افزایش ترکیبات نیتروژن، فسفر و ترکیبات آلی ظاهر می‌گردد. هر چه منابع آبی کوچک‌تر باشد اثرات این مشکلات بزرگتر خواهد بود و بنابراین شرایط بحرانی‌تر خواهد شد(۴). فرایندهای مانند اکسیداسیون با ازن، جذب با کربن فعال، رس و دیگر جاذب‌ها(۵)، کواگولاسیون و فلوکولاسیون، فیلتراسیون، ترسیب(۶) و تعویض یون فرایندهای متداولی هستند که برای حذف فسفر، نیترات و مواد آلی استفاده شده‌اند(۷). حذف کامل این مواد با برخی از این فرایند ها مشکل و با برخی غیر ممکن می‌باشد. از جمله مشکلات ناشی از این فرایندها حجم زیاد لجن تولیدی در فرایند کواگولاسیون و فلوکولاسیون می‌باشد که در صورت استفاده از آلوم و آهک به جای نمک آهن حجم لجن افزایش می یابد. دشوار بودن تعیین دوز صحیح مواد شیمیایی به دلیل تغییر شرایط مانند pH، قلیاییت و واکنش‌های رقابتی متفاوت، ایمنی اپراتور هنگام کار با موادشیمیایی خورنده، قیمت بالای پلیمر مصرفی و باقی ماندن فسفر در لجن از دیگر معایب این روش می‌باشد(۵،۸،۹).

از جمله محدویت‌های فرایندهای بیولوژیکی قابلیت اطمینان، پایداری و کارایی کم‌تر، احتمال توقف فرایند در طی بهره برداری به دلیل کمبود نوترینت‌ها، بارش‌های شدید، ورود نیترات بیش از حد به ناحیه بی‌هوازی در سیستم‌های بی هوازی و اختلالات بیرونی است. معایب فرایندهای غشایی شامل انرژی مصرفی بالا، تولید زیاد لجن و افزایش هزینه بهره‌برداری و نگهداری است(۵،۹). فاضلاب تولید شده از منابع مختلف ترکیبات مختلفی دارند.

فرایندهای تصفیه مختلف سبب افزایش هزینه‌ها می‌شوند و از سوی کارآیی این فرایندها در شناسایی بیش‌تر آلایندهای ناشی از منابع مختلف با کاهش قابلیت دسترسی به منابع آب به چالش کشیده شده است. امروزه با توجه به هزینه پایین، سادگی و جداسازی سریع وعملکرد بالا، جذب به‌عنوان یک روش مناسب برای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شود که در این بین از جاذب‌های مگنتیکی به‌طور گسترده‌ای استفادهمی شود. این جاذب دارای پتانسیل بالای برای جذب و تجزیه موادآلی، فسفر و نیترات از فاضلاب می‌باشد و از نظر شیمیایی پایداراست، سمیت کم و قابلیت بازیافت عالیاز دیگر ویژگی‌های این جاذب است. از طرفی تغییر شکل آلاینده‌ها با نانو ذرات آهن محصولات جانبی کم خطری تولید می‌کنند و میزان لجن تولید آن بسیار ناچیز (در حدصفر) می‌باشد. از سویی جداسازی نانوذرات اکسیدآهن از طریق یک میدان مغناطیس خارجی به طور کامل به آسانی صورت می‌گیرد(۱۲-۱۰). این خصوصیت می‌تواند کاربرد این روش را برای حذف یون‌ها و ترکیبات آلی از آب و فاضلاب توسعه دهد(۹). در این راستا مطالعات زیادی برای جایگزین کردن جاذب‌های ارزان انجام شده است که برخی سودمند بوده و می‌تواند با سایر روش‌ها رقابت کند یکی از این موارد جاذب‌های مگنتیتی است. در این راستا Ramnath Lakshmanan و همکاران(۲۰۱۱) کارایی حذف کربن آلی با نانو ذره مگنتیت عامل دار شده را بررسی کردند(۱). I.de Vicente وهمکاران (۲۰۱۱) نیز نشان دادند که نانو ذرات مگنتیت توانایی بالایی در حذف فسفر دارد(۴). Erzsebet Gombos و همکاران (۲۰۱۲) اثربخشی حذف ترکیبات آلی و ترکیبات فسفات

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

واکنش‌گر از جریان ثانویه فاضلاب شهری با استفاده از یون فرات را نشان دادند(۱۳). غلامی وهمکاران (۱۳۹۴) کارایی بالای نانو لوله های کربنی مغناطیس شده با نانو ذرات اکسید آهن را مورد بررسی قرار دادند که در مطالعات آنها راندمان بیش از ۹۸ درصد حاصل شده است(۱۴).

Caterina Borghi و همکاران (۲۰۱۱) به کارایی بالایی نانو ذرات اکسیدآهن در حذف سورفاکتانت‌ها دست یافتند(۱۵).

Asya Drenkova و همکاران (۲۰۱۳) در حذف فسفات از فاضلاب با استفاده از ذرات سوپر مغناطیس اصلاح شده با تعویض کننده یونی لایه هیدروکسید دوگانه به کارایی بالای این ذرات در حذف فسفات کل دست یافتند(۸). در این مطالعات حذف همزمان این آلایندها و اثر مداخله آن‌ها بررسی نشده است، از سویی استفاده مجدد از این پساب نیازمند استانداردهائی فراتر از استانداردهای ثانویه می‌باشد. بنابراین هدف این پژوهش بررسی کارایی جاذب نانو ذرات اکسید آهن (مگنتیت) (Fe_3O_4 MNPs) به عنوان جاذبی برای حذف همزمان فسفر، نیترات و مواد آلی از جریان پساب ثانویه فاضلاب شهری و کاهش آلایندهای موجود در پساب تا حد استاندارد پیشرفته می‌باشد که بتوان این فرایند را همراه با سیستم‌های متداول به عنوان یک سیستم تکمیلی استفاده نمود.

مواد و روش ها

این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی در راکتور بسته (Batch) یک لیتری حاوی ۲۵۰ میلی لیتر نمونه انجام شد. نمونه پساب واقعی مورد استفاده در این کار قبل از واحد گندزدایی، از تصفیه خانه فاضلاب اکباتان به صورت نمونه برداری مرکب در مدت ۸ ساعت با دوره نمونه برداری ۲ ساعته به روش استاندارد تهیه شد و در ظروف نمونه‌برداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل گردید که مشخصات آن در جدول شماره ۱ بیان شده است. به منظور بررسی میانگین آلاینده‌ها در نمونه پساب و راندمان حذف آلاینده‌ها توسط جاذب در شرایط بهینه شده، آزمایشات تعیین نیتریت، نیترات، فسفر، BOD_5 و COD مطابق با روش‌های نیترات ($4500NO_3$-B)، نیتریت (4500-NO_2-Colorimetric Method)، فسفر (وانادات- مولیبدات) و COD و BOD_5 با روش ۵۲۱۰A و ۵۲۱۰B استاندارد متد انجام شد(۱۶). پس از تهیه جاذب، مطالعات جذب در چند بخش شامل تاثیر pH، زمان تماس و میزان جاذب بر فرایند حذف در سیستم بسته مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات به صورت یک عامل در زمان انجام گرفت. به منظور جلوگیری از تداخل کدورت پساب در نتایج آزمایش، نمونه پساب را قبل از انجام آزمایش با فیلتر صافی (۰/۴۵ میکرومتر) صاف شد. به منظور جلوگیری از تداخل آهن در نتایج COD بعد از جداسازی مغناطیسی کامل نانوذرات اکسیدآهن، باقیمانده آهن موجود در نمونه از طریق افزایش pH به ۱۰ به شکل هیدروکسید آهن تبدیل و از طریق فیلتراسیون میکروسپور از نمونه حذف شد(۱۶). کلیه مواد مورد استفاده در این مطالعه شامل محلول اسید هیدروکلرید، اسید فسفریک ۸۵ درصد، N-اتیلن دی آمین دی هیدرو کلراید، سولفانامید، اسید سولفوریک غلیظ، سولفات امونیم فروس، سولفات مگنز، پتاسیم دی‌کرومات، ۱و۱۰ فناترولین منوهیدرات، سولفات جیوه، آمونیم- مولیبدات، آمونیم متاوانادات، پتاسیم هیدروژن فتالات، نمک کلرید فریک و سولفات فروس، با درجه آزمایشگاه از شرکت مرک (نمایندگی ایران) خریداری شد. برای تنظیم pH از pH meter (Corning Model-En) و از دستگاه DR5000 به عنوان دستگاه رنگ‌سنجی به روش کلرومتریک استفاده شد. نانو ذرات اکسید آهن[1] (مگنتیت) Fe_3O_4 مورد استفاده در این روش از شرکت ژرفان پژووهان علم نو خریداری شد که دارای رنگ

1- iron oxide nanoparticles (MNPs Fe_3O_4)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

سیاه، اندازه کریستال کم‌تر از ۴۰ نانو متر، خلوص ۹۹/۵ درصد، دانسیته ۵/۳۱g/cm^3 و مساخت سطح ویژه آن ۵۰ m^2/g می‌باشد. در نهایت برای تجزیه وتحلیل داده‌ها ازنرم‌افزار اکسل و ایزوترم‌های جذب فروندلیخ و لانگمویر وکینتیک جذب درجه اول و دوم استفاده گردید.

تعیین زمان تماس بهینه

برای تعیین تاثیر زمان تماس، در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ دقیقه، دوز جاذب ۰/۵ g/l و pH=۵ فرایند جذب در ۵ ارلن یک لیتری حاوی ۲۵۰ ml نمونه پساب با دور ۲۰۰ بار در دقیقه انجام شد. تمامی آزمایشات در دمای محیط (۲۰ ± ۲°C)انجام گرفته است.

تعیین pH

بعد از تعیین زمان بهینه با ثابت نگه داشتن سایر شرایط، اثر pH بر فرایند جذب با انجام آزمایشات در دامنه pH ۳ تا ۹، با دوزجاذب ۰/۵ g/L نانو ذرات اکسید آهن انجام گرفت. برای تنظیم pH از اسید سولفوریک ۰/۱ N و سود سوزآور ۰/۱ N استفاده شد.

تعیین pH_{ZPC}

برای تعیین این پارامتر از محلول کلرور سدیم ۰/۰۱ مولار به عنوان الکترولیت و از محلول‌های سود و اسید کلریدریک ۰/۱ مولار به‌عنوان کنترل‌کننده pH استفاده گردید. محلول در pH های ۲ تا ۱۲تنظیم و در هر محلول ۰/۲ گرم جاذب استفاده شد سپس به مدت ۴۸ ساعت بر روی شیکر با سرعت ۱۲۰ دور دقیقه قرار داده شدند و بعد سپری شدن زمان فوق pH نهایی محلول‌ها قرائت گردید(۱۷).

مقدار جاذب

بعد از تعیین زمان تماس وpH بهینه، مقدار جاذب نانو ذرات اکسید آهن Fe_3O_4 در مقادیر ۰/۱تا ۵ گرم در لیتر به ارلن‌های حاوی ۲۵۰ میلی لیتر نمونه پساب اضافه شد با ثابت نگه داشتن سایر شرایط غلظت بهینه در هر مرحله تعیین گردید.

تعیین ایزوترم جذب

در این پژوهش از مدل‌های ایزوترم لانگمویر وفروندلیخ و کینتیک درجه اول و دوم برای مدل‌سازی ریاضی فرایند جذب استفاده شد. این معادله‌ها در جدول شماره ۱ بیان شده است. شرح کامل این معادلات در مطالعه زوزولی و همکاران (۱۳۹۲) بیان گردیده است(۱۸).

جدول شماره ۱: معادلات و کینتیک های جذب

ایزوترم فروندلیخ	$q = kC_e q^{\frac{1}{n}}$
ایزوترم لانگمویر	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m b} + \frac{1}{q_m} C_e$
کینتیک درجه اول	$Ln(q_e - q_t) = Lnq_e - k_1 t$
کینتیک درجه دوم	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$

یافته ها

خصوصیات نانو ذره اکسید آهن

نانو ذره اکسید آهن مورد استفاده در این تحقیق دارای رنگ سیاه، اندازه کریستال کم‌تر از ۴۰ نانومتر، خلوص ۹۹/۵ درصد، دانسیته ۵/۳۱g/cm^3 و مساخت سطح ویژه آن ۵۰ m^2/g می‌باشد. حداقل، حداکثر و میانگین اندازه‌گیری شده غلظت آلاینده‌های موجود در نمونه پساب مورد آزمایش مطابق جدول شماره ۲ می‌باشد.

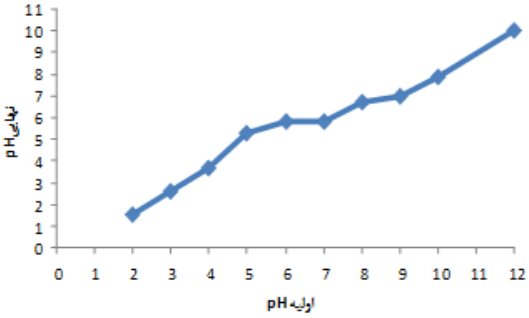
جدول شماره ۲: مشخصات پساب ثانویه تصفیه خانه فاضلاب

پارامتر	غلظت یا مقدار حداقل	غلظت یا مقدار میانگین	غلظت یا مقدار حداکثر
pH	۷	۷/۶	۸
BOD_5 (mg/l)	۱۸	۲۵	۳۸
COD(mg/l)	۳۲	۴۳	۶۵
NO_3^- (mg/l)	۵۴	۶۰	۷۴
PO_4^{3-}(mg/l)	۶/۴	۸/۶	۱۲/۹

تعیین H_{ZPC}

نتایج حاصل از مطالعات انجام شده جهت تعیین pH_{ZPC} در نمودار شماره ۱ ارائه شده است.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]



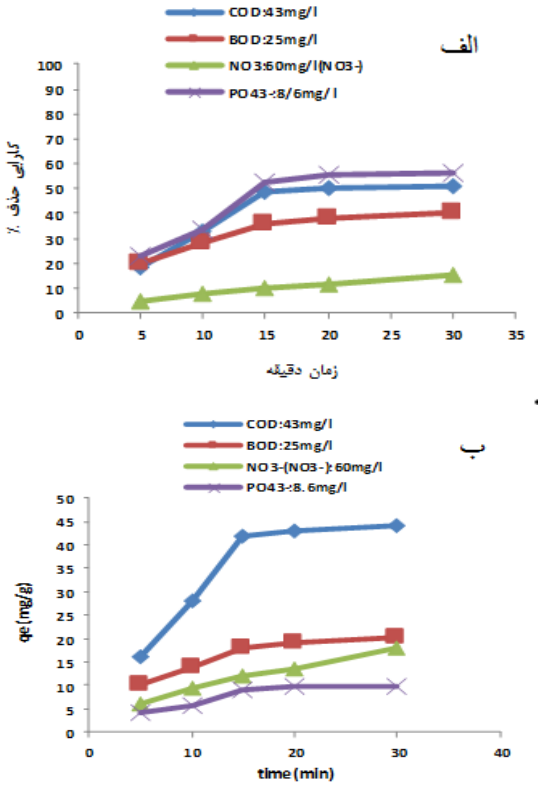
نمودار شماره ۱: منحنی تعیین pH_{ZPC} برای نانو ذرات اکسیدآهن

تعیین زمان تماس بهینه برای جذب

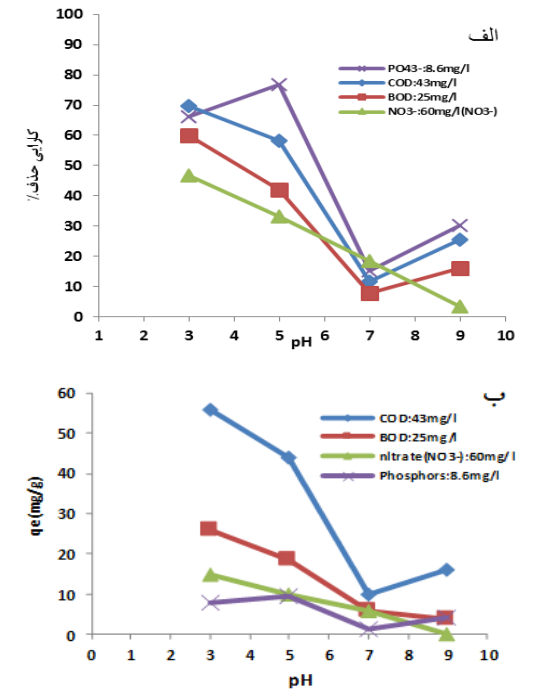
نمودار شماره ۲ نمودار اثر زمان تماس در دامنه (۵ تا ۳۰ دقیقه) با استفاده از جاذب نانو ذرات اکسیدآهن در حذف آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش زمان تماس از ۵ به ۳۰ دقیقه، نرخ جذب COD ,BOD_5 ,PO_4^{3-},NO_3^-افزایش یافت و در۱۵ دقیقه برای غلظت اولیه NO_3^- ,BOD_5 ,COD و PO_4^{3-} به تعادل رسید. در این دوره زمانی جذب کامل شد به دلیل این‌که ظرفیت جذب ثابت باقی ماند با افزایش زمان تماس از ۵ به ۳۰ دقیقه ظرفیت جذب برای PO_4^{3-} ,NO_3^- ,BOD_5 و COD از (mg/g) ۴، ۶، ۱۰، و ۱۶ به ترتیب (mg/g) ۹/۶، ۱۸، ۲۰ و ۴۴ رسید. بیش‌ترین بازده حذف برای COD,BOD_5، نیترات و فسفات در pH برابر با ۵، زمان تماس ۱۵دقیقه توسط نانوذرات اکسید آهن برابر ۴۸، ۳۶، ۱۰و۵۲ درصد به‌دست آمد. بنابراین ۱۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه برای جاذب نانوذرات اکسید آهن انتخاب شد.

تعیین pH بهینه

نمودار شماره ۳ نمودار اثر pH برای جذب آلاینده‌ها توسط جاذب نانو ذرات اکسید آهن را نشان می‌دهد. بیش‌ترین بازده حذف برای نیترات، COD BOD_5در pH برابر با ۳، زمان تماس ۱۵دقیقه توسط نانو ذرات اکسید آهن برابر ۱۲/۵، ۵۲ و۶۴ درصد به دست آمد. اما برای فسفات بیش‌ترین میزان حذف در pH=۵ برابر ۵۶ درصد به‌دست آمد. بنابراین pH=۳ برای حذف نیترات، BOD_5 ,COD و pH= ۵ برای حذف فسفات به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.



نمودار شماره ۲: تاثیر زمان تماس (الف)بر فرآیند جذب PO_4^{3-}, NO_3^- ,COD,BOD_5 و (ب) ظرفیت جذب با Fe_3O_4 MNPs (مقدار جاذب به ترتیب :g/l ۰/۵، زمان : متغیر، pH= ۵)

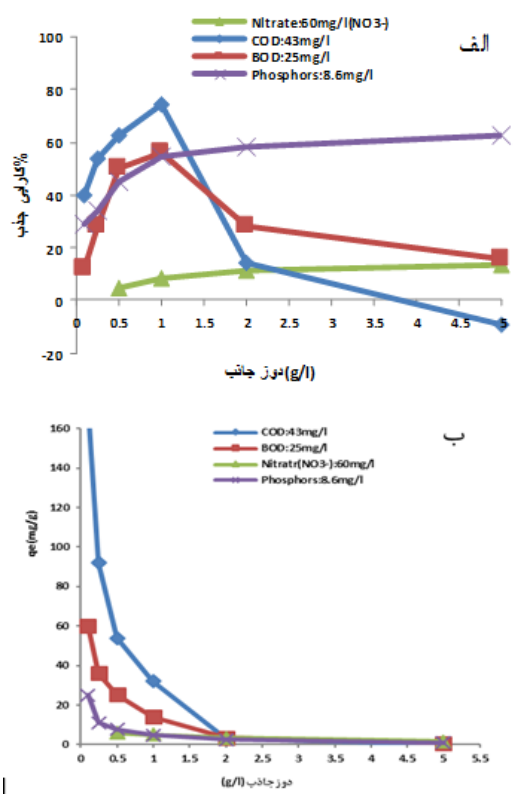


نمودار شماره ۳: تاثیر pH بر (الف) فرآیند جذب PO_4^{3-}, NO_3^- ,COD,BOD_5 و(ب) ظرفیت جذب با Fe_3O_4 MNPs (مقدار جاذب: g/l ۰/۵ ، زمان :min۱۵، متغیر:pH)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

غلظت بهینه جاذب

نمودار شماره ۴ نمودار اثر تعیین غلظت بهینه جاذب با استفاده از جاذب نانو ذرات اکسید آهن را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص گردید که میزان جذب در دوز بیش‌تر از ۱ گرم در لیتر تقریبا یکنواخت می‌باشد. اما در مورد COD,BOD_5 افزایش دوز نانو ذرات Fe_3O_4 تا دوز ۱ گرم در لیتر باعث افزایش جذب شد و در مقدار بیش‌تر از ۱ گرم در لیتر جاذب به حالت تعادل رسید به‌طوری‌که در بیش‌تر از این مقدار میزان جذب کاهش یافت. بیش‌ترین بازده حذف برای COD و BOD_5، نیترات و فسفات در pH و زمان تماس بهینه با دوز ۱ گرم در لیتر نانو ذرات اکسید آهن برابر ۵۴، ۱۱،۵۶/۵ و ۷۴ درصد به‌دست آمد. به دلیل این‌که بیش‌ترین میزان حذف با این مقدار دوز جاذب به دست آمد این مقادیر به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.



نمودار شماره ۴: تاثیر دوز جاذب بر (الف) فرآیند جذب PO_4^{3-}, NO_3^-, COD,BOD_5 و(ب) ظرفیت جذب با Fe_3O_4 MNPs (مقدار جاذب: متغیر، زمان:۱۵min، pH=۳)

بحث

تاثیر زمان تماس

با افزایش زمان تماس میزان جذب فسفات، نیترات، COD, BOD_5 افزایش و در ۱۵ دقیقه میزان جذب به تعادل رسید. دراین دوره زمانی جذب کامل وظرفیت جذب ثابت باقی مانده است (نمودار شماره ۲). میزان حذف آلاینده‌های مذکور برای جاذب نانو ذرات اکسیدآهن تا n ۱۵ دقیقه اول سریع و بعد کند می‌شود. با توجه به بیش‌ترین راندمان حذف آلاینده‌ها در این زمان و عدم تغییر اساسی در میزان حذف بعد از زمان مذکور، بنابراین زمان تماس اپتیمم برای جاذب min ۱۵ انتخاب شد. کاهش میزان جذب بعد از ۱۵ دقیقه توسط جاذب می‌تواند به دلیل کاهش مکان‌های جذب، کاهش غلظت آلاینده‌ها در محلول(گرادیان غلظت)، تشکیل لایه ای از یون های آلاینده های مذکور در سطح جاذب و یا بازجذب آلاینده‌ها باشد(۱۹). زمان‌های تعادل متفاوتی در دامنه ۱۵ تا ۳۰۰ دقیقه برای جذب ترکیبات مختلف مانند آنالین (۲۱)، مواد آلی، ترکیبات فنلی(۲۰)، سورفاکتانت‌ها(۱۵)، اسید هیومیک، رنگ‌های اسیدی (۲۱،۱)، ترکیبات فسفر (۲۳،۲۲،۸) نیتروژن کل(۱)، آمونیاک(۷)، نیترات(۲۴،۱۹) و کربن آلی کل(۲۶،۲۵،۱) با استفاده از نانو ذرات اکسیدآهن یا ترکیب نانو ذرات اکسیدآهن با جاذب‌های مختلف (کربن فعال، کیتوزان، زئولیت و بنتونیت، آهن صفر ظرفیتی و ...) توسط سایر محققین به‌دست آمده است. دلیل متفاوت بودن این زمان‌ها را می‌توان به ساختار جاذب، درجه واکنش‌پذیری آلاینده با جاذب، حلالیت جذب شونده، گرادیان غلظت، درجه اشباع شدن سطح، هموژن یا غیر هموژن بودن جذب و برگشت پذیر بودن یا نبودن فرایند جذب مرتبط دانست، هم‌چنین جاذب نانو باعث افزایش سطح قابل دسترس در نتیجه افزایش واکنش‌پذیری ترکیبات و کاهش زمان تماس می‌شود(۲۷-۳۵،۲۳،۱۵).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

تاثیر pH بر میزان جذب ترکیبات

این بررسی نشان داد کارایی حذف نیترات، BOD_5 و COD با تغییر شرایط به حالت اسیدی افزایش می یابد و بیش‌ترین حذف در pH=۳ و پایین‌ترین میزان جذب در pH= ۷ به‌دست آمد (نمودار شماره ۳). در pH< pH_{pzc} گروه‌های مثبت بر سطح جاذب نانو ذرات اکسید آهن نسبت به گروه‌های منفی غالب می‌باشند که تولید نیروی الکترواستاتیک مثبت می کنند که بارهای منفی سطح جاذب را جذب می کند و منجر به افزایش ظرفیت جذب ملکول‌های مواد آلی می‌شود. از سوی دیگر در شرایط قلیایی کاهش جذب COD و BOD_5 به دلیل حضور گونه‌های هیدروکسید اضافی و مولکول‌های الی برای سایت‌های جذب می‌باشد که تولید نیروی الکترواستاتیک شارژه شده منفی روی سطح جاذب و مولکول آلی می کند(۳۶،۲۶). با این وجود تحت شرایط قلیایی هنوز مقداری کمی جذب موادآلی وجود دارد که نشان‌دهنده حضور موادآلی داری بار مثبت می‌باشد. کارایی حذف گونه‌های فسفات در pH پایین با افزایش pH از ۳ به ۵، از ۴۵ درصد به ۵۶ درصد افزایش یافت و سپس کارایی جذب در pH بالاتر از ۵ کاهش و به ۲۴ درصد رسید که به دلیل تشکیل گونه های تک ظرفیتی فسفات در pH کم‌تر از pH_{pzc} (pH_{pzc}=۶-۷) جاذب می‌باشد. در حالت خنثی گونه فسفات دو ظرفیتی (HPO_4^{2-}) شایع هستند که دلیل سرعت واکنش آهسته در pH=۷-۸ هستند(۴). در pH بالا پیش‌بینی می‌شود که ذرات به صورت منفی شارژ شوند با این وجود هنوز مقداری جذب فسفر وجود دارد که به دلیل جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با گونه‌های فسفر و تشکیل کمپلکس‌های سطحی بین مداری در سطح اکسید می‌باشد(۴). بنابراین جذب فسفردر دامنه گسترده ای از pH انجام می گیرد که امکان استفاده از این جاذب در شرایط مختلف را میسر می‌سازد. این در حالی است که بیش‌ترین جذب در pH اسیدی رخ می‌دهد. در شرایط خنثی میزان جذب همه این ترکیبات کاهش یافت که به دلیل خنثی شدن بار سطح جاذب است. Hong و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعاتی شرایط اسیدی و خنثی را شرایط مطلوبی برای حذف آنالین با استفاده از نانو ذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) بیان کرده‌اند(۳۳).

Saha و همکاران (۲۰۱۱) در جذب تقویت شده رنگ‌های مختلف با نانو ذرات اکسید آهن، بیش‌ترین ظرفیت جذب را در pH=۴-۵ به دست آوردند که با افزایش pH کاهش یافت آمد(۳۷) که مطابق با نتایج این تحقیق می‌باشد. Drenkova-Tuhtan و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای حذف فسفات از فاضلاب را با استفاده از ذرات سوپر مغناطیس اصلاح شده بررسی کردند، سریع‌ترین کینتیک جذب در pH=۴-۵ به دست آمد که ۹۰ درصد کل فسفات در ۴۵ دقیقه نخست حذف شد(۸). مکانیسم حذف نیترات را می‌توان به دو صورت واکنش مستقیم با یون صفرظرفیتی و واکنش غیر مستقیم توسط اتم هیدروژن یا H_2 تشریح کرد. در رابطه نانو ذرات اکسید آهن به دلیل عدم استفاده از نانو ذرات یون صفر ظرفیتی و درصد حذف پایین آن مکانیسم دوم محتمل‌تر می‌باشد. در این مطالعه بیش‌ترین میزان حذف نیترات در شرایط اسیدی pH=۳ به دلیل تولید پروتون‌های مثبت رخ داده است که مطابق مکانیسم زیر می‌باشد و پایین‌ترین میزان حذف در pH=۹ به‌دست آمد.

$$2NO^{+}_2 + 8H^{+} + 6e \rightarrow N_2 + 4H_2O \quad (۶)$$

$$NO^{+}_2 + 8H^{+} + 6e \rightarrow NH^{+}_4 + 2H_2O \quad (۷)$$

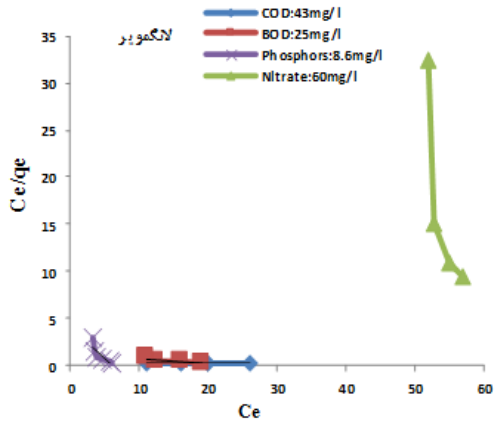
مطالعه Liao و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که بیشترین حذف نیترات با پودر آهن درpH=۳ و اندازه ذرات ۱۰ میکرومتر در ۱۰ دقیقه به دست آمده است و در pH بزرگتر از ۵ به دلیل عدم خوردگی آهن و تولید پروتون هیچ گونه اثر حذف نیترات مشاهده نشد که مطابق با نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌باشد(۳۸).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

اثرات دوز جاذب

با افزایش دوز جاذب نانوذرات اکسیدآهن، کارایی جذب فسفات، نیترات، BOD_5 و COD افزایش و در دوز بهینه نانوذرات اکسیدآهن (1 g/l) به ترتیب میزان حذف به ۴۵، ۱۱/۵، ۵۶ و۷۵ درصد رسید اما ظرفیت جذب کاهش یافت (نمودار شماره ۵). بیش‌ترین ظرفیت جذب با نانو ذرات اکسید آهن برای فسفات، نیترات، BOD_5 و COD به ترتیب (mg/g)۴/۷، ۱/۶، ۱۴و۳۲ به دست آمد. میزان جذب آلاینده‌ها در مقدار ۱ گرم در لیتر جاذب به حالت تعادل رسیده به طوری که در بیش‌تر از این مقدار میزان جذب کاهش یافت. این امر با نتایج حاصل از مطالعات Lakshmananl و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد(۱). اگر چه ظرفیت جذب در غلظت‌های پایین‌تر جاذب، بیش‌تر از غلظت‌های بالاتر است. با افزایش دوز جاذب تعداد سایت‌های فعال، مساحت سطح جاذب و قابلیت دسترسی مولکول‌ها به سطح جاذب افزایش خواهد یافت. بنابراین کارایی جذب افزایش خواهد یافت اما به دلیل غیر اشباع ماندن برخی از نقاط فعال موجود در سطح جاذب، میزان جذب در واحد جرم جاذب کاهش می‌یابد(۳۹). دلیل متفاوت بودن جذب BOD_5 با COD متفاوت بودن زنجیره کربنی و درجه حلالیت مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها و کشش آن‌ها به سطح جاذب می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که با سنگین‌تر شدن مولکول‌ها، پیوند ایجاد شده بین ماده مورد جذب و نقاط جذب بسیار پایدارتر است. از سوی دیگر با افزایش طول زنجیره کربنی مواد آلی و شاخه‌ای شدن آن‌ها، حلالیت این مواد در آب کاهش یافته و گرادیان غلظت به سمت فاز جامد تسریع می‌گردد. هم‌چنین ترکیبات و موادی که کم‌تر تجزیه می‌شوند، امکان جذب با سرعت و شدت بیش‌تری دارند(۲۷). در مطالعه Sasha (۲۰۱۱) جذب تقویت شده بعضی از رنگ‌ها، با نانوذرات اکسید آهن با افزایش دوز جاذب ظرفیت جذب کاهش یافت که به دلیل مساحت سطح بیش‌تر موجود برای مقدار ماده جذب شونده است(۳۷).

مطالعه Lakshmanan و همکارن (۲۰۱۴) برای حذف کربن آلی و نیتروژن کل با نانو ذره مگنتیت عامل دار شده، نشان داده است که در دوز بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار TOC کاهش یافت که به دلیل توده‌های بزرگی است که بیرون از محلول تشکیل و رسوب کرده است که مانع واکنش با اکثر آلاینده‌ها موجود در فاضلاب می‌باشد. هم‌چنین برخورد بین نانو ذرات ناشی از غلظت بالاتر می‌تواند فاکتور دیگری باشد که بر کاهش جذب موثر است.



نمودار شماره ۵: ایزوترم های جذب آلاینده ها از نمونه پساب با Fe_3O_4MNPs در غلظت اولیه آلاینده، pH=۵، دما ۲۰C

در مطالعه Gmbos و همکاران (۲۰۱۳) جهت حذف ترکیبات آلی از جریان ثانویه فاضلاب شهری، میزان حذف COD و TOC به ترتیب برابر ۴۰ و ۲۰ درصد حاصل شده است که با افزایش دوز جاذب حذف به طور خطی افزایش یافته است(۱۳). بررسی Drenkova و همکاران (۲۰۱۳) جهت حذف فسفات از فاضلاب با استفاده از ذرات سوپر مغناطیس اصلاح شده میزان حذف فسفات با دوز جاذب تا غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر رابطه خطی داشته ولی بیش‌تر از این تاثیری بر حذف فسفات نداشته است. در این بررسی ظرفیت جذب در حالت اسیدی ۳۵ mg/g به دست آمد(۸). در مطالعه امین و همکاران (۲۰۱۱) از نانوذرات مغناطیسی Fe2O3 برای حذف As(III) از فاضلاب سینتتیک

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

جدول شماره ۳: ضرایب مدل های ایزوترم برای حذف PO_4^{3-}, NO_3^- , BOD_5 و COD با Fe_3O_4MNPs

Adsorbent	parameter	Langmuir				Freundlich	
		q_m [mg g^{-1}]	b [L mg^{-1}]	q_m[mg g^{-1}]	R_L	R^2	K_F [mg g^{-1}]	n	R^2
Fe_3O_4MNPs	COD	۳۲	۰/۰۲	۸۰	۰/۴۷	۰/۹۷	۱/۴	۰/۵۳	۰/۹۷
	BOD	۱۴	۰/۰۳	۲۵	۰/۵۷	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۴۳	۰/۹۵
	PO_4^-	۴/۷	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۴	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۹۵
	NO_3^-	۵	۰/۰۶	۱/۴	۰/۱۹	۰/۸۲	×۱۰$^{-۳۲}$	۰/۱	۰/۹۳

استفاده شده است. در این مطالعه در pH=۷ راندمان حذف ارسنیک ۸۲ درصد و ظرفیت جذب نانوذرات ۲۳/۸ mg/g گزارش شده است(۴۰).

بررسی ایزوترم‌های جذب

پارامترهای حاصل از ایزوترم‌های جذب فسفات، نیترات، BOD_5 و COD در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده میزان حذف COD با استفاده از جاذب نانو ذرات اکسید آهن از هر دو ایزوترم لانگمیر، و فرندلیخ با R^2 برابر با ۰/۹۷پیروی می‌کند. اما حذف فسفات، نیترات و BOD_5 بهترین همبستگی را با ایزوترم فروندلیخ به ترتیب با R^2 برابر با ۰/۹۲، ۰/۸۲ و ۰/۹۵ نشان می‌دهد. مقادیر b و q_{max} برای فسفات، نیترات، BOD_5 و COD به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۰۶، ۰/۰۳ و ۰/۰۲ و (mg/g)۴/۷، ۵، ۱۴ و ۳۲ به دست آمد. در این معادلات مقدارb نیز نشان دهنده آنتالپی فرآیند جذب یعنی همان پایداری جذب و تمایل فسفات، نیترات، BOD_5 و COD به سایت‌های تبادلی است که بیش‌ترین مقدار آن مربوط فسفات بود و بالاترین مقادیر q(max) مربوط به COD بود. بیشترین مقدار n و K به ترتیب مربوط به COD، BOD_5، فسفات و نیترات به‌دست آمده است که هر چه بیش‌تر باشد جذب مطلوب‌تر است. Drenkova و همکاران (۲۰۱۳) در حذف فسفات از فاضلاب با استفاده از ذرات سوپر مغناطیس اصلاح شده ظرفیت تعادل در حالت اسیدی را ۳۵ mg/g به‌دست آوردند(۸). در مطالعه امین و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده نانوذرات مغناطیسی Fe_2O_3 برای حذف As(III) از فاضلاب راندمان حذف ۸۲ درصد و ظرفیت جذب نانوذرات ۲۳/۸ mg/g حاصل شده است و معادله جذب از ایزوترم فروندلیخ پیروی کرده است. در مطالعه کاکاوند و همکاران (۲۰۱۳) در حذف آنالین با نانوذرات مغناطیسی‌کربن فعال مشخص شده است حذف آنالین از مدل جذب لانگمویر و واکنش درجه دوم پیروی و ظرفیت جذب در pH=۶ ۹۰(mg/g) به دست آمده است(۳۹). براساس نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که یک مدل واحدی نمی‌توان برای جذب آلاینده‌ها توسط جاذب‌ها ارائه نمود و مدل جذب قابل ارائه تابعی از نوع آلاینده و جاذب مورد استفاده و روش اصلاح ساختار آن می‌باشد.

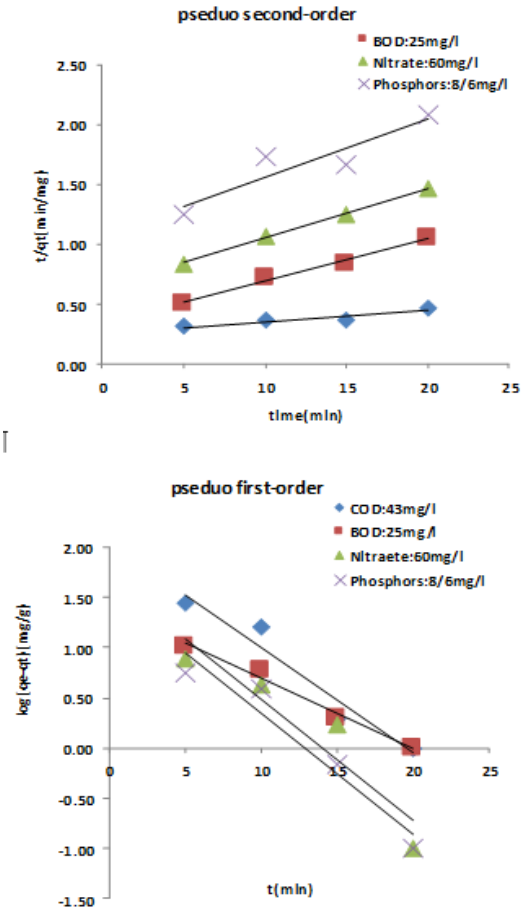
کینتیک جذب

به منظور بررسی کینتیک جذب فسفات، نیترات، BOD_5 و COD از دو مدل مدل کینتیکی درجه اول و دوم استفاده شد (نمودار شماره ۶). اثرات غلظت اولیه و زمان برای محاسبه ضرایب ثابت K_1 وK_2 واکنش درجه اول و دوم استفاده شد. پارامترهای کینتیکی و ضریب همبستگی در ۲۰ درجه سانتیگراد در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد در جذب با استفاده از نانو ذرات اکسید آهن کینتیک جذب COD و فسفات از کینتیک درجه اول با ۰/۹۴و۰/۹۳=R^2 و برای BOD_5 و نیترات از سنتییک درجه دوم با ضریب ۰/۹۸ و ۰/۹۹=R^2 پیروی می‌کند. با توجه به اینکه جذب BOD_5 و نیترات از کینتیک درجه دوم پیروی کرده است و مقدار q_{cal} نزدیک به مقدار q_{exp} بود می‌توان نتیجه گرفت جذب این دو از طریق شیمیایی کنترل می‌گردد.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

جدول شماره ۴: پارامترهای کینتیک جذب برای حذف PO_4^{3-} ,NO_3^- , BOD_5 و COD با Fe_3O_4MNPs

Freundlich		Langmuir					parameter	Adsorbent
R^2	k_2 [g mg^{-1}min^{-1}]	$q_{e,cal}$ [mg g^{-1}]	R^2	k_1 [min^{-1}]	$q_{e,cal}$ [mg g^{-1}]	$q_{e,exp}$ [mg g^{-1}]		
۰/۸۲	۰/۰۰۰۱	۱۱۱	۰/۹۴	۰/۲۳	۱۰۰	۴۴	COD	Fe_3O_4MNPs
۰/۹۸	۰/۰۰۲۷	۳۳	۰/۹۸	۰/۱۵	۱۹	۱۹	BOD	
۰/۸۵	۰/۰۲۵	۲۵	۰/۹۳	۰/۲۷	۳۱	۹/۶	PO_4^-	
۰/۹۹	۰/۰۲۵	۲۵	۰/۸۷	۰/۲۷	۵۰	۱۳/۶	NO_3^-	



نمودار شماره ۶: کینتیک های جذب درجه اول و دوم برای حذف COD,BOD، نیترات و فسفات از پساب تصفیه ثانویه با استفاده از Fe_3O_4MNPs

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این مطالعه برای بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدآهن و کاربرد آن به عنوان یک جاذب برای فسفات، نیترات، BOD_5 و COD از پساب ثانویه انجام شد. با بررسی نتایج حاصل از این مطالعه مشخص گردید بیش‌ترین میزان حذف برای فسفات، نیترات، BOD_5 و COD از پساب در شرایط اسیدی و در مدت زمان کوتاهی حاصل شد که به دلیل واکنش سریع آلایندها با جاذب در مقیاس نانو می‌باشد. میزان حذف فسفات، نیترات، BOD_5 و COD از پساب با افزایش مقدار جاذب افزایش یافت، که نشان می‌دهد میزان حذف به میزان دسترسی به سایت‌های فعال بستگی دارد. بر اساس نتایج برای حذف با نانو ذرات اکسید آهن، ایزوترم فروندلیخ همبستگی مناسبی با داده‌ها نشان داد اما حذف COD همبستگی بهتری با ایزوترم لانگمویر داشت. کینتیک واکنش برای COD و فسفات از درجه اول و برای BOD_5 و نیترات از کینتیک درجه دوم پیروی کرد. پس از انجام آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که مگنتیت دارای پتانسیل مناسبی برای حذف فسفات، BOD_5 و COD از فاضلاب بوده است اما در حذف نیترات کارایی بسیار پایینی داشته است. گرچه مطالعات بیش‌تر با توجه به جنبه‌های اقتصادی و زیست محیط کاربرد نانوذرات لازم است ولی این تکنولوژی می‌تواند به عنوان یک روش پاک برای حذف آلایندها از پس آب فاضلاب شهری برای استفاده‌های مجدد مطرح باشد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد و طرح تحقیقاتی مصوب شماره ۱۲۰۸۰-۸۵-۱-۱۳۹۳ معاونت تحقیقات دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی با عنوان بررسی کارایی نانو ذرات اکسید آهن بار گذاری شده برکلینوپتیلولایت برای تصفیه‌پیشرفته پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است. ازحمایت معاونت پژوهشی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی شهید بهشتی و مسئولین آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت تشکر و قدردانی می نماید.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

References

1. Lakshmanan R, Sanchez-Dominguez M, Matutes- Aquino JA, Wennmalm S, Kuttuva Rajarao G. Removal of Total Organic Carbon from Sewage Wastewater Using Poly (ethylenimine)-Functionalized Magnetic Nanoparticles. Langmuir 2014; 30(4): 1036-1044.
2. Zazouli MA, Alam Gholilou M. Survey of chemical quality (Nitrate, Flouride, Hardness, Electrical Conductivity) of driking water in Khoy city. J Mazandaran Univ Med Sci 2013; 22(2): 80-84.
3. Islamic Republic of Iran, Ministry of Energy, Vice Presidency for strategic planning and supervision, Brureau of water and wastewater, Criteria of treated wastewater and return flow reuse, 2006, No. 535 (Persian). Available from: http://bpms.mporg.ir/tecfiles/Code535.pdf. Acessed May 2, 2015.
4. deVicentea I, Merino-Martos A, Guerreroc F, Amoresa V, Vicented Jd. Chemical interferences when using high gradient magnetic separation for phosphate removal: Consequences for lake restoration. J Hazard Mater 2011; 192(3): 999-1001.
5. Panasiuk O. Phosphorus Removal and Recovery from Wastewater using Magnetite. Master of Science Thesis, STOCHOLM, Royal Institute of Technology, 2010.
6. Mažeikiene A, Valentukevičiene M, Rimeika M, Matuzevičius AB, Dauknys R. Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite). Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 2008; 16(1): 38-44.
7. Liu H, Peng S, Shu L, Chen T, Bao T, Frost RL. Effect of Fe3O4 addition on removal of ammonium by zeolite NaA. J Colloid Interface Sci 2013; 390(1): 204-210.
8. Drenkova-Tuhtan A, Mandel K, Paulus A, Meyer C, Hutter F, Gellermann C, et al. Phosphate recovery from wastewater using engineered superparamagnetic particles modified with layered double hydroxide ion exchangers. Water research. 2013; 47(15): 5670-5677.
9. Rybicki SM. New technologies of phosphorus removal from wastewater. Proc Of a Polish-Swedish Seminar, Joint Polish Swedish Reports, Report, No3; 1998.
10. Stone V, Nowack B, Baun A, van den Brink N, Kammer F, Dusinska M, et al. Nanomaterials for environmental studies: classification, reference material issues, and strategies for physico-chemical characterisation. Sci Total Environ 2010; 408(7): 1745-1754.
11. Zhang L, Fang M. Nanomaterials in pollution trace detection and environmental improvement. Nano Today 2010; 5(2): 128-142.
12. Mohanraj V, Chen Y. Nanoparticles-a review. Tropical Journal of Pharmaceutical Research 2007; 5(1): 561-73.
13. Gombos E, Barkács K, Felföldi T, Vértes C, Makó M, Palkó G, et al. Removal of organic matters in wastewater treatment by ferrate (VI)-technology. Microchemical Journal 2013; 107: 115-120.
14. Yegane badi M, Azari A, Esrafili A, Ahmadi E, Gholami M. Performance Evaluation of Magnetized Multiwall Carbon Nanotubes by Iron Oxide Nanoparticles in Removing Fluoride from Aqueous Solution. J Mazandaran Univ Med Sci 2015; 25(124): 128-142.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

15. Borghi CC, Fabbri M, Fiorini M, Mancini M, Ribani PL. Magnetic removal of surfactants from wastewater using micrometric iron oxide powders. Sep Purif Technol 2011; 83: 180-188.
16. Rand M, Greenberg AE, Taras MJ. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14th ed. Washington DC, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 1976.
17. Smiciklas I, Milonjic S, Pfendt P, Raicević S. The point of zero charge and sorption of cadmium (II) and strontium (II) ions on synthetic hydroxyapatite. Separation and Purification Technology 2000; 18(3): 185-194.
18. Zazouli MA, Belarak D, Karimnezhad F, Khosravi F. Removal of Fluoride from Aqueous Solution by Using of Adsorption onto Modified Lemna Minor: Adsorption Isotherm and Kinetics Study. J Mazandaran Univ Med Sci 2014; 23(109): 195-204.
19. Mesdaghi nia A, Mohammadi AA, Mahvi AH, Naseri S, Shekarriz M, AliMohammadi M. Study of Nitrate Reduction from Water Using Nanosized Iron. Iranian Journal of Health and Environment 2011; 4(3): 313-320 (Persian).
20. Rima J, Aoun E, Hanna K, Li Q. Degradation of phenol, into mineral compounds, in aqueous solutions using Zero-Valent Iron Powder (ZVIP). J Phys IV 2005; 124: 81-89.
21. Alpat SK, Özbayrak Ö, Alpat Ş, Akçay H. The adsorption kinetics and removal of cationic dye, Toluidine Blue O, from aqueous solution with Turkish zeolite. J Hazard Mater 2008; 151(1): 213-220.
22. Zhang G, Liu H, Liu R, Qu J. Removal of phosphate from water by a Fe–Mn binary oxide adsorbent. J Colloid Interface Sci 2009; 335(2): 168-174.
23. Foroughi M, Hajian Nejad M, Mehdi Amin M, Pourzamani HR, Vahid Dastjerdi M. Urban runoff treatment using sand columns coated with magnetic iron oxide nanoparticles with and without magnetic field. Health Sysrem Research 2010; 7(6): 1-13 (Persian).
24. Naeej O, Mohseni Bandpi A, Jonidi Jafari A, Esrafili A, Kalantary R. Removal of Nitrate from Water using Supported Zero-Valent Nano Iron on Zeolite. IJHE 2012; 5(3): 343-354 (Persian).
25. de Vicente I, Merino-Martos A, Cruz-Pizarro L, de Vicente J. On the use of magnetic nano and microparticles for lake restoration. J Hazard Mater 2010; 181(1): 375-381.
26. Kallel M, Belaid C, Mechichi T, Ksibi M, Elleuch B. Removal of organic load and phenolic compounds from olive mill wastewater by Fenton oxidation with zero-valent iron. Chem Eng J 2009; 150(2): 391-395.
27. Consultants I, Code. American Water Works Association (AWWA). Fire Flow Water Consumption in Sprinklered and Unsprinklered Buildings, An Assessment of Community Impacts. Philadelphia, Springer Science & Business Media. 2012.
28. Metcalf L, Eddy HP, Tchobanoglous G. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. New York: McGraw-Hill; 1972.
29. Foo K, Hameed B. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chem Eng J 2010; 156(1): 2-10.
30. Fan X, Guan X, Ma J, Ai H. Kinetics and corrosion products of aqueous nitrate reduction by iron powder without reaction

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]

conditions control. J Environ Sci 2009; 21(8): 1028-1035.

31. Huang YH, Zhang TC. Kinetics of nitrate reduction by iron at near neutral pH. J Environ Eng 2002; 128(7): 604-611.
32. Hwang YH, Kim DG, Shin HS. Mechanism study of nitrate reduction by nano zero valent iron. J Hazard Mater 2011; 185(2): 1513-1521.
33. Zheng H1, Liu D, Zheng Y, Liang S, Liu Z. Sorption isotherm and kinetic modeling of aniline on Cr-bentonite. J Hazard Mater 2009; 167(1): 141-147.
34. Choy KK, McKay G. Sorption of cadmium, copper, and zinc ions onto bone char using Crank diffusion model. Chemosphere 2005; 60(8): 1141-1150.
35. Rahmani AR, Ghafari HR, Samadi MT, Zarabi M. Synthesis of Zero Valent Iron Nanoparticles (nZVI) and its Efficiency in Arsenic Removal from Aqueous Solutions. Water and Wastwater 2011; 22(77): 35-41 (Persian).
36. Ma L, Zhang W-x. Enhanced biological treatment of industrial wastewater with bimetallic zero-valent iron. Environ Sci Technol 2008; 42(15): 5384-5389.
37. Saha B, Das S, Saikia J, Das G. Preferential and enhanced adsorption of different dyes on iron oxide nanoparticles: a comparative study. J Phys Chem C 2011; 115(16): 8024-8033.
38. Liao C-H, Kang S-F, Hsu Y-W. Characteristics of reductive removal of nitrate by suspended zero-valent iron powder. J Chin Inst Environ Eng 2003; 13(4): 251-261.
39. Kakavandi B, Jafari AJ, Kalantary RR, Nasseri S, Ameri A, Esrafily A. Synthesis and properties of Fe3O4-activated carbon magnetic nanoparticles for removal of aniline from aqueous solution: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. Iranian J Environ Health Sci Eng 2013; 10(1): 10-19 (Persian).
40. Khodabakhshi A, Amin M, Mozaffari M. Synthesis of magnetite nanoparticles and evaluation of its efficiency for arsenic removal from simulated industrial wastewater. Iranian J Environ Health Sci Eng 2011; 8(3): 189-200 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-22]