19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بررسی استفاده از بنتونیت، پامیس و زئولیت اصلاح‌شده در حذف اوره، نیترات و آمونیوم از آب

مهری برومند[1*]، محمدعلی بهمنیار[2]، مهدی قاجار سپانلو[2]، سید مصطفی عمادی[2]

۱- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری * **(Email: Mehri_boroumand@yahoo.com)**
۲- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

چکیده

آلودگی منابع آب با ترکیبات نیتروژن‌دار مانند نیترات، آمونیوم و اوره از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی به شمار می‌رود. در این پژوهش، کارایی سه جاذب معدنی شامل بنتونیت، پامیس و زئولیت در حذف این آلاینده‌ها بررسی شد. هر جاذب در سه حالت: ساده، اصلاح‌شده با اسید کلریدریک، و اصلاح‌شده با کلرید آهن (III) در دو pH مختلف (۲ و ۶) آماده‌سازی گردید. برای ارزیابی عملکرد جاذب‌ها، محلول‌هایی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از هر آلاینده تهیه، و میزان حذف پس از ۹۰ دقیقه تماس با نیم گرم جاذب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد پامیس اصلاح‌شده با آهن در pH=2 در حذف نیترات کارآمدتر بود. برای حذف اوره، زئولیت‌های آهن‌دار و بنتونیت اسیدی عملکرد مطلوب‌تری داشتند. زئولیت اصلاح‌شده با اسید نیز توانست بیش از ۹۲ درصد آمونیوم را جذب کند. به‌طور کلی، اصلاح جاذب‌های معدنی با اسید یا آهن موجب بهبود ظرفیت جذب آن‌ها در حذف ترکیبات نیتروژن‌دار گردید. با توجه به قیمت پایین، در دسترس بودن و کارایی مناسب، این جاذب‌ها می‌توانند گزینه‌هایی مؤثر برای کاهش آلاینده‌های نیتروژن‌دار از منابع آبی به شمار روند.

واژگان کلیدی : اصلاح شیمیایی، ترکیبات نیتروژنه، جاذب های معدنی، جذب سطحی.

مقدمه

دسترسی به آب آشامیدنی سالم یکی از نیازهای اساسی بشر است که همچنان در بسیاری از مناطق جهان با چالش‌هایی جدی مواجه است. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، حدود ۱۱ درصد از جمعیت جهان به آب تمیز و سالم دسترسی ندارند و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۲۵، نیمی از مردم جهان ممکن است در مناطقی با کمبود منابع آبی زندگی کنند (WHO, 2018). در این میان، یکی از مهم‌ترین تهدیدهای کیفیت منابع آبی، آلودگی با ترکیبات نیتروژن‌دار از جمله نیترات، نیتریت و آمونیوم است که به دلایل مختلف از جمله کشاورزی و فاضلاب وارد چرخه آب می‌شوند (Ward et al., 2018). حذف ترکیبات نیتروژن‌دار از آب، به دلیل اثرات نامطلوب آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. روش‌های متعددی برای کاهش این آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به فرآیندهای بیولوژیکی، تبادل یونی، جذب سطحی، رسوب‌دهی شیمیایی، انعقاد الکتریکی و استفاده از غشاها اشاره کرد (Bhanvase et al., 2017). در میان این روش‌ها، جذب سطحی به دلیل سادگی، هزینه پایین و راندمان مناسب، به‌ویژه با استفاده از جاذب‌های معدنی طبیعی یا اصلاح‌شده، کاربرد گسترده‌تری یافته است (Yin et al., 2017) .

مطالعات پیشین مؤثر بودن جاذب‌های معدنی اصلاح‌شده را نشان داده‌اند. برای نمونه، دیندارلو و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از پامیس اصلاح‌شده با کلرید منیزیم توانستند بیش از ۶۶ درصد از نیترات موجود در آب را حذف کنند. آنان نشان دادند که در محیط اسیدی، نیترات توسط یون منیزیم احیا شده و به گاز نیتروژن و یون آمونیوم تبدیل می‌شود؛ فرآیندی که با افزایش

pHهمراه است و نیاز به تنظیم محیط با اسید دارد. همچنین دیانتی و همکاران (۱۳۹۱) استفاده از زئولیت طبیعی را برای حذف آمونیوم مقرون‌به‌صرفه دانسته و Kurama et al. (2002) نیز اثربخشی اصلاح شیمیایی زئولیت با اسید و آهک را در بهبود ظرفیت جذب آن گزارش کرده‌اند. از سوی دیگر، اسلامی و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند که استفاده از بنتونیت اصلاح‌شده با اسیدهای قوی نیز می‌تواند در حذف نیترات از آب آشامیدنی مؤثر واقع شود.

با توجه به ارزان‌قیمت بودن جاذب‌های طبیعی و تأثیر اصلاح شیمیایی در بهبود عملکرد آن‌ها، بررسی مقایسه‌ای عملکرد بنتونیت، پامیس و زئولیت (در حالت ساده و اصلاح‌شده) در حذف ترکیبات نیتروژن‌دار از آب می‌تواند راهکاری مؤثر و کاربردی برای ارتقاء کیفیت آب فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- جاذب‌های مورد استفاده و تیمارها

در این پژوهش، سه نوع جاذب معدنی شامل بنتونیت، پامیس و زئولیت مورد بررسی قرار گرفتند. هر جاذب در سه حالت ساده (خام)، اصلاح‌شده با اسید کلریدریک، و اصلاح‌شده با آهن (III) در دو pH مختلف (۲ و ۶) آماده‌سازی و مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع، ۱۲ تیمار در نظر گرفته شد:

- **بنتونیت** :ساده، اسیدی، آهن‌دار در$pH=2$ ، آهن‌دار در$pH=6$
- **پامیس** :ساده، اسیدی، آهن‌دار در$pH=2$ ، آهن‌دار در$pH=6$
- **زئولیت** :ساده، اسیدی، آهن‌دار در$pH=2$ ، آهن‌دار در$pH=6$

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر تیمار انجام شدند.

۲-۲- اصلاح جاذب‌ها با اسید

برای اصلاح اسیدی، جاذب‌ها (پامیس، زئولیت و بایوچار) با اسید کلریدریک ۱ مولار و نسبت حجمی ۱:۲۰ مخلوط شده و به مدت دو ساعت شیک شدند. پس از آن، نمونه‌ها سه مرتبه با آب مقطر شسته شده و در آون با دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. برای اصلاح اسیدی بنتونیت، نسبت حجمی ۱:۱۰ اسید به کار گرفته شد.

۲-۳- اصلاح جاذب‌ها با آهن

برای آماده‌سازی جاذب‌های اصلاح‌شده با آهن، ۵۰ گرم از هر جاذب با یک لیتر محلول کلرید آهن (III) با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مخلوط شده و به مدت ۲۴ ساعت شیک شدند. سپس نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند. به منظور بررسی اثر pH بر کارایی جذب، pHمحلول آهن با استفاده از HCl یا NaOH ۰/۱ مولار در مقادیر ۲ و ۶ تنظیم شد.

۲-۴-آزمایش حذف نیترات، آمونیوم و اوره

برای بررسی میزان حذف نیترات، ابتدا محلولی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات تهیه شد. سپس مقدار نیم گرم از هر جاذب به ۴۰ میلی‌لیتر از محلول اضافه گردید. نمونه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه در دستگاه شیکر قرار داده شدند. پس از آن، غلظت باقی‌مانده نیترات در محلول اندازه‌گیری شده و درصد حذف با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد :

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$ رابطه (۱):

در رابطه (۱) C_0 غلظت اولیه در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، C_e غلظت تعادلی در محلول (میلی‌گرم بر لیتر) و R درصد حذف می‌باشد. در ادامه جهت محاسبه درصد حذف اوره و آمونیوم از آب توسط جاذب‌ها، مراحل فوق با محلول‌های حاوی اوره و آمونیوم انجام شد و مقادیر حذف تعیین گردید.

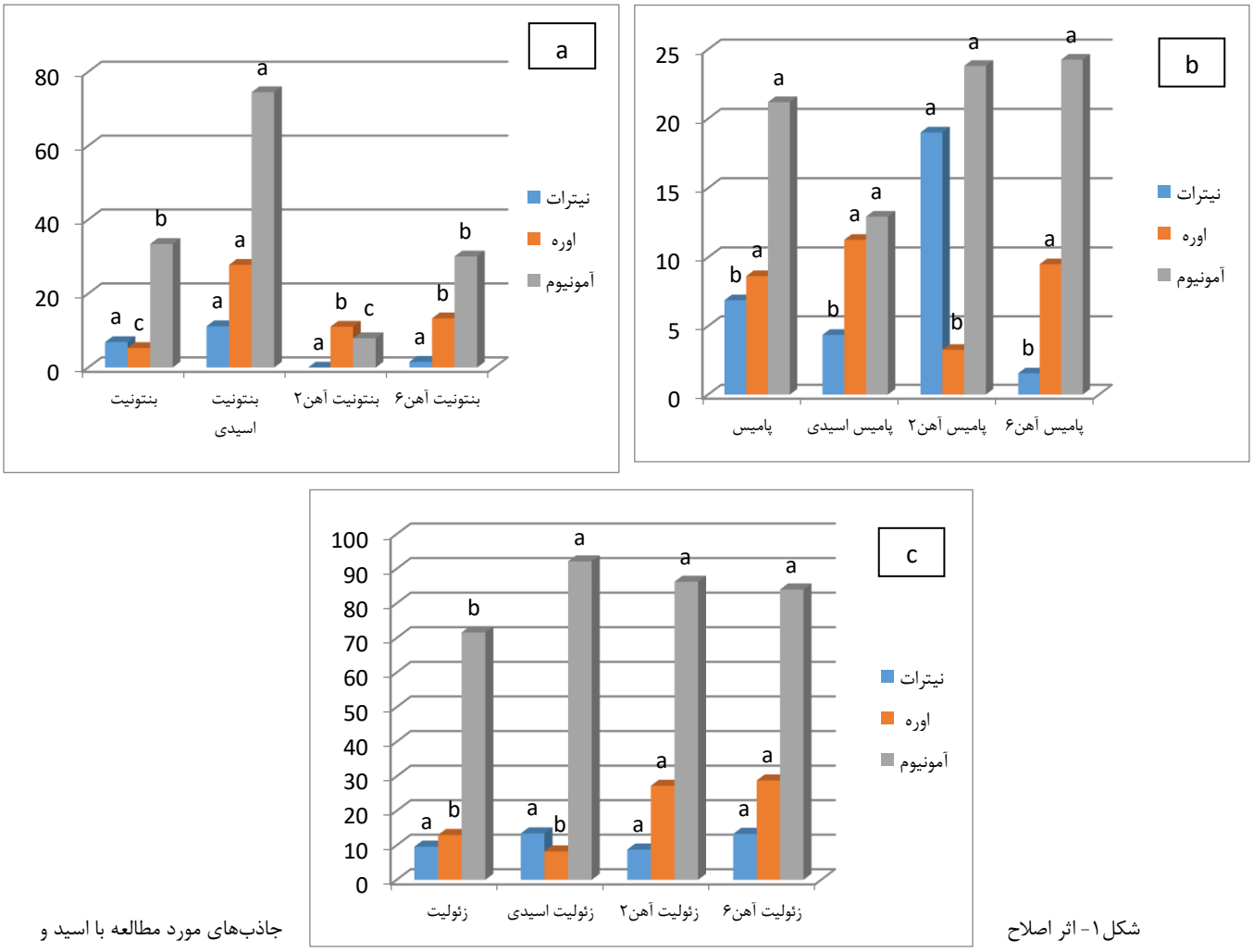
۲-۵- تحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای **SPSS** و **Excel** مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. تحلیل واریانس (ANOVA) برای بررسی تفاوت معنی‌دار بین تیمارها انجام شد و نمودارهای مقایسه‌ای با کمک Excel ترسیم شدند.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-اثر اصلاح جاذب‌ها با اسید و آهن:

نتایج نشان داد که اصلاح اسیدی بنتونیت تأثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت جذب نیترات، اوره و آمونیوم دارد. مطابق با شکل ۱a، این تیمار بهترین عملکرد را در میان نمونه‌های بنتونیتی از خود نشان داد. در مورد پامیس، اصلاح با آهن در pH=2 (پامیس آهن۲) توانست میزان حذف نیترات از حدود ۷ درصد به ۱۹ درصد افزایش دهد، در حالی‌که برای اوره اوره، نمونه اسیدی‌شده کارایی بالاتری داشت (شکل۱b). زئولیت نیز پس از اصلاح اسیدی، عملکرد بسیار مطلوبی در جذب آمونیوم از خود نشان داد، به‌طوری که راندمان جذب تا حدود ۹۲/۵ درصد افزایش یافت(شکل ۱c).



شکل۱- اثر اصلاح جاذب‌های مورد مطالعه با اسید و آهن در pHهای ۲ و ۶ بر میزان جذب نیترات، اوره و آمونیوم: a) بنتونیت b)پامیس c) زئولیت (اعداد ۳۰۰ و ۶۰۰ در شکل‌ها بیانگر دمای تولید بایوچارها برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد)

این یافته‌ها با گزارش Kurama et al. (2002) همسو است که اعلام کرده بودند اصلاح زئولیت با HCl و آهک می‌تواند اندازه ذرات و سطح ویژه آن را افزایش داده و در نتیجه ظرفیت جذب را بهبود بخشد. عربی و عسگری (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای با استفاده از زئولیت اصلاح شده مشاهده نمودند که با افزایش زمان تماس و غلظت جاذب راندمان حذف افزایش یافت در حالی که با افزایش غلظت نیترات راندمان حذف کاهش پیدا کرد و حداکثر جذب برای نیترات ۸۷ درصد به دست آمد. آنان اعلام کردند که زئولیت اصلاح شده با توجه به استخراج زئولیت از معادن کشور و تاثیر بسزای آن درحذف نیترات از منابع آبی می‌تواند به عنوان یک روش کم هزینه و کارآمد استفاده شود.

۳-۳-۲- تعیین بهترین جاذب معدنی:

بررسی عملکرد تیمارهای مختلف نشان داد که در میان جاذب‌های اصلاح‌شده، پامیس تیمار شده با آهن در pH=2 (پامیس آهن۲) بیشترین راندمان را در حذف نیترات از محلول آبی داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که فرایند اصلاح با آهن در محیط اسیدی می‌تواند ظرفیت تبادل یونی و جذب سطحی پامیس را به‌طور مؤثری افزایش دهد.

در مورد حذف اوره، سه تیمار شامل زئولیت اصلاح شده با آهن درpH=2 (زئولیت آهن۲)، زئولیت اصلاح شده با آهن در pH=6 (زئولیت آهن۶) و بنتونیت اسیدی عملکرد نسبتاً بالاتری نسبت به سایر تیمارها از خود نشان دادند. این امر نشان می‌دهد که نوع جاذب و روش اصلاح آن اثر قابل توجهی بر جذب ترکیبات آلی مانند اوره دارد.

در ارتباط با حذف آمونیوم، نتایج نشان داد که زئولیت اسیدی با راندمان حذف حدود ۹۲ درصد، بالاترین کارایی را در میان تمام تیمارهای آزمایش‌شده داشت (جدول ۱). این یافته با توجه به ساختار متخلخل زئولیت و ظرفیت بالای آن در تبادل یون‌های آمونیوم قابل تبیین است.

یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش میرزاده اهری و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد. آنان با بررسی زئولیت‌های استخراج‌شده از معادن فیروزکوه و گرمسار به این نتیجه رسیدند که زئولیت ظرفیت جذب بالایی برای آمونیوم داراست. همچنین مطابق با نتایج گزارش‌شده توسط حسینی و بخشندگان مقدم (۱۴۰۳)، پامیس به‌عنوان جاذبی اقتصادی و در دسترس، توانایی مناسبی برای جذب نیترات از آب دارد.

جدول ۱- مقایسه میانگین اثرات اصلاح کننده های معدنی بر درصد جذب نیترات ، اوره و آمونیوم

اصلاح کننده ها	درصد جذب نیترات	درصد جذب اوره	درصد جذب آمونیوم
بنتونیت	6.8892^{ab}	5.2812^{c}	33.4367 ^{d}
بنتونیت اسیدی	11.1800 ^{ab}	27.7952^{a}	74.5088 ^{bc}
بنتونیت آهن۲	0.000 ^{b}	11.0414^{b}	7.9367 ^{f}
بنتونیت آهن۶	1.5511 ^{b}	13.3116^{b}	30.059 ^{d}
پامیس	6.9462 ^{ab}	8.6437^{bc}	21.198 ^{de}
پامیس اسیدی	4.3618 ^{b}	11.2676^{b}	12.94 ^{ef}
پامیس آهن۲	19.0156 ^{a}	3.2715^{d}	23.8143 ^{de}
پامیس آهن۶	1.5511 ^{b}	9.5046^{bc}	24.2663 ^{de}
زئولیت	9.6009 ^{ab}	13.0029^{b}	71.5940 ^{c}
زئولیت اسیدی	13.4559 ^{ab}	8.2326^{bc}	92.109 ^{a}
زئولیت آهن۲	8.774 ^{ab}	27.2525^{a}	86.2413 ^{ab}
زئولیت آهن۶	13.3185 ^{ab}	28.7940^{a}	83.997 ^{ab}

خلاصه نتیجه تجزیه واریانس			
اصلاح کننده‌ها	**	**	**

** بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ بوده و در هر ستون میانگین‌های دارای حرف یا حروف مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن ندارد (اعداد ۲و ۶ نشان دهنده اصلاح با آهن در pHهای ۲ و ۶ و اعداد ۳۰۰ و ۶۰۰ بیانگر دمای تولید بایوچارها برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند)

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که اصلاح جاذب‌های معدنی با اسید و آهن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افزایش کارایی آن‌ها در حذف آلاینده‌های نیتروژن‌دار از آب داشته باشد. در میان جاذب‌های مورد بررسی، پامیس اصلاح‌شده با آهن در pH= ۲ بیشترین راندمان را در حذف نیترات از خود نشان داد. این نتیجه بیانگر آن است که فرآیند اصلاح با آهن در محیط اسیدی موجب افزایش قابلیت تبادل یونی و ظرفیت جذب سطحی این جاذب می‌شود.

در مورد حذف اوره، تیمارهایی مانند زئولیت اصلاح‌شده با آهن در pH= ۲ و pH= ۶و بنتونیت اصلاح‌شده با اسید عملکرد بالاتری نسبت به سایر تیمارها داشتند. از سوی دیگر، زئولیت اصلاح‌شده با اسید با راندمان حذف حدود ۹۲ درصد، بالاترین اثربخشی را در جذب آمونیوم از محلول آبی نشان داد که آن را به گزینه‌ای بسیار مناسب برای حذف این ترکیب تبدیل می‌کند.

با توجه به در دسترس بودن، هزینه پایین و قابلیت اصلاح آسان جاذب‌های معدنی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از زئولیت، پامیس و بنتونیت اصلاح‌شده می‌تواند راهکاری مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای حذف ترکیبات نیتروژن‌دار از منابع آبی باشد. توسعه این روش‌ها می‌تواند در تصفیه‌خانه‌های آب، سامانه‌های فاضلاب کشاورزی و حتی تصفیه غیرمتمرکز منابع آلوده کاربرد داشته باشد.

منابع:

۱. اسلامی، ا.، یزدانبخش، ا.، اسدی، ع.، و قدیمی، م. (۱۳۹۳). حذف نیترات از آب آشامیدنی با استفاده از خاک‌های رس طبیعی اصلاح‌شده. *مجله آب و فاضلاب، ۲۵*(۹۱)، بدون شماره صفحه.

۲. عربی، ف.، و عسگری، ق. (۱۳۹۲). بررسی فرایند حذف نیترات از محلول آبی از طریق زئولیت اصلاح‌شده با سورفاکتانت هگزادسیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌بروماید. *شانزدهمین همایش ملی بهداشت محیط ایران، تبریز*. دریافت از https://civilica.com/doc/237392

۳. دیانتی‌تیلکی، ر.، کاهه، د.، و زرولی، م. (۱۳۹۱). بررسی کارایی زئولیت کلینوپتیلولایت در حذف آمونیوم از آب‌های آلوده. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۲۲*(۹۷)، ۲۵۰-۲۵۶.

۴. دیندارلو، ک.، شیخ‌محمدی، ح.، و جمالی، ح. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی حذف نیترات از منابع آب آشامیدنی توسط پامیس اصلاح‌شده با کلرید منیزیم با بکارگیری روش طراحی باکس بنکن. *مجله طب پیشگیری، ۱۸(۴)۵۶-۶۸.*

۵. حسینی، پ.، و بخشندگان مقدم، ف. (۱۴۰۳). تأثیر میدان مغناطیسی بر جذب نیترات از محلول نیتراته آزمایشگاهی توسط پومیس. *نشریه آبخوان (علمی-ترویجی)، ۱۶*(۱)، بدون شماره صفحه.

۶. میرزاده اهری، ش.ش.، محوی، ا.، جلیل‌زاده ینگجه، ر.، دادبان شهامت، ی.، و تکدستان، ا. (۱۴۰۰). روشی جدید در حذف آمونیوم از آب آشامیدنی با استفاده از روش تلفیقی زئولیت‌های اصلاح‌شده به همراه ازن‌زنی کاتالیزوری. *طلوع بهداشت*، ۲۰(۲)، ۸۹-۱۰۴. https://sid.ir/paper/1002349/fa

7. Bhanvase, B. A., Ugwekar, R. P., & Mankar, R. B. (2017). *Novel water treatment and separation methods: Simulation of chemical processes*. Apple Academic Press. https://doi.org/10.1201/9781315225395
8. Kurama, H., Zimmer, A., & Reschetilowski, W. (2002). Chemical modification effect on the sorption capacities of natural clinoptilolite. *Chemical Engineering & Technology, 25*(3), 301–305.
9. Ward, M. H., Jones, R. R., Brender, J. D., De Kok, T. M., Weyer, P. J., Nolan, B. T., Villanueva, C. M., & Van Breda, S. G. (2018). Drinking water nitrate and human health: An updated review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*, 1557. https://doi.org/10.3390/ijerph15081557
10. WHO. (2018). *Drinking-water*. World Health Organization. https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water

11. Yin, Q., Zhang, B., Wang, R., & Zhao, Z. (2017). Biochar as an adsorbent for inorganic nitrogen and phosphorus removal from water: A review. *Environmental Science and Pollution Research, 24*, 26297–26309. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0338-y

Evaluation of Modified Mineral Adsorbents in the Removal of Urea, Nitrate, and Ammonium from Water

Mehri Boroumand1*, Mohammad Ali Bahmanyar[2], Mehdi Qajar Sepanlou[2], Seyed Mostafa Emadi[2]

1- Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources * (Email: Mehri_boroumand@yahoo.com)

2- Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Abstract

Contamination of water resources with nitrogenous compounds such as nitrate, ammonium, and urea is among the most serious environmental challenges. In this study, the efficiency of three mineral adsorbents—bentonite, pumice, and zeolite—was evaluated for the removal of these pollutants. Each adsorbent was prepared in three forms: raw, acid-modified using hydrochloric acid, and iron (III) chloride-modified at two different pH levels (2 and 6). For performance evaluation, 50 mg/L solutions of each pollutant were prepared, and the removal efficiency was measured after 90 minutes of contact with 0.5 grams of adsorbent. Results indicated that pumice modified with iron at pH=2 showed the highest nitrate removal efficiency. For urea, iron-modified zeolite and acid-treated bentonite exhibited better performance. Moreover, acid-modified zeolite removed over 92% of ammonium from aqueous solution. Overall, chemical modification of mineral adsorbents with acid or iron significantly improved their adsorption capacity for nitrogenous compounds. Considering their low cost, availability, and satisfactory performance, these materials can serve as effective options for the removal of nitrogen pollutants from water resources.

Keywords: Adsorption, Chemical modification, Inorganic adsorbents, Nitrogenous compounds