

بررسی روش‌های حذف یون نیتрат از آب آشامیدنی

احمد شیرانی تک‌آبی^۱، سعید اسدپور^{۲*} و ابوالفضل سمنانی^۳

چکیده

مقدار بالای نیترات در آب آشامیدنی، یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های عمومی حوزه بهداشت است؛ از این رو سازمان بهداشت جهانی و سازمان ملی استاندارد ایران، مقدار مجاز نیترات در آب شرب را به ترتیب ۴۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر تعیین کرده‌اند. حذف نیترات از آب آشامیدنی به منظور اطمینان یافتن از تأمین آب شرب سالم، بهداشتی و پیشگیری از شیوع انواع بیماری‌های متأثر از مقدار بالای نیترات ضروری است. در بدن انسان نیترات به نیتريت‌هایی که با هموگلوبین ترکیب می‌شوند، کاهش می‌یابد و منجر به تشکیل متاموگلوبین شده که این ماده برای نوزادان کشنده است. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض نیترات و نیتريت منجر به تشکیل ترکیبات سرطان‌زای نیتروسامین می‌شود. از طرفی نیترات بر روی اندازه و عملکرد غده تیروئید اثرگذار است. مهم‌ترین روش‌های کاهش نیترات آب، عبارت‌اند از: تبادل یونی، اسمز معکوس، جذب سطحی، الکترودیالیز، شیمیایی و روش زیستی. هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و نقایص هستند که روش مناسب براساس شرایطی از جمله توجه اقتصادی، کاربرد در مقیاس صنعتی، راندمان حذف، عملکرد گزینشی و عدم آلاینده‌گی زیست‌محیطی انتخاب می‌شود. در این مطالعه تلاش شد تا با معرفی انواع روش‌های حذف نیترات، مکانیسم روش، نمونه مطالعات صورت گرفته، انعکاس ویژگی‌ها و نهایتاً مقایسه مختصر روش‌ها، یک پایه مطالعاتی برای ورود و نوآوری در تکنیک‌های کاهش نیترات ارائه شود. درک صحیح از ابعاد روش‌های مورد استفاده، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه، بهبود نتایج و تحقق استاندارد سازمان بهداشت جهانی می‌شود. در این پژوهش، مکانیسم و ویژگی‌های روش‌های متداول حذف نیترات مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در بین تکنیک‌های مورد مطالعه، تبادل یونی، اسمز معکوس و الکترودیالیز بهترین شرایط حذف نیترات در مقیاس صنعتی را فراهم می‌کنند. کارایی بالا، سهولت تکنیک، رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و استفاده در مقیاس صنعتی، از مهم‌ترین ویژگی‌های مطلوب و مشترک این روش‌ها است.

واژه‌های کلیدی: آب آشامیدنی، تصفیه آب، روش‌های حذف نیترات، یون نیترات.

ارجاع: شیرانی تک‌آبی ا.، اسدپور س. و سمنانی ا. ۱۴۰۱. بررسی روش‌های حذف یون نیترات از آب آشامیدنی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۴: ۶۳-۷۸.
DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10113.2363>

۱- دانشجوی دکترای شیمی تجزیه، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد.

۳- استاد گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: s.asadpour@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

مقدمه

در سطح بین‌المللی، سازمان بهداشت جهانی وظیفه تضمین کیفیت مواد خوراکی و آشامیدنی را برعهده دارد. از سویی آب، پرمصرف‌ترین نوشیدنی جهان به شمار می‌رود و یون‌های متنوعی مانند: نیترات، نیتريت، فلورید، سولفات، کلرید، کلسیم، منیزیم و ... در آن وجود دارد. تعیین مقدار مجاز پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب برعهده سازمان بهداشت جهانی است. این سازمان در آخرین نسخه از راهنمای منتشرشده خود در سال ۲۰۱۷ با عنوان «راهنمای WHO برای کیفیت آب آشامیدنی»، مقادیر استاندارد را تعیین کرده است (راهنمای کیفیت آب سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۲۱) که در جدول ۱ به مقادیر استاندارد برخی پارامترهای شیمیایی آب، طبق استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و سازمان ملی استاندارد ایران، اشاره شده است.

جدول ۱- مقادیر استاندارد برخی پارامترهای شیمیایی آب

ردیف	فاکتور	استاندارد WHO (mg/l)	استاندارد ملی ایران (mg/l)
۱	نیترات	۴۵	۵۰
۲	نیتريت	۳	۳
۳	کلرور	۲۵۰	۲۵۰
۴	سولفات	۲۵۰	۲۵۰
۵	کلسیم	۷۵	۳۰۰
۶	منیزیم	۵۰	۳۰
۷	سدیم	۲۰۰	۲۰۰

(بورتال سازمان ملی استاندارد، ۱۳۸۸؛ راهنمای کیفیت آب سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۲۱).

نیترات با جرم مولکولی ۶۲ g/mol، با ازدست‌رفتن یک پروتون از اسید نیتريك به‌وجود می‌آید. یون نیترات به‌عنوان بخشی از چرخه نیتروژن به شمار می‌رود که در آب‌های سطحی و زیرزمینی وجود دارد. متداول‌ترین منبع نیترات در آب، فعالیت‌های کشاورزی، شامل کودهای معدنی، فاضلاب و پسماندهای محصولات نیتروژنی صنعتی است. سرعت حرکت نیترات در آب‌های زیر زمینی بالاست و قابلیت احیا به نیتريت و نیتروژن را دارد (هی و همکاران، ۲۰۱۸). آب یکی از منابع انتقال نیترات به انسان است. در بدن انسان، نیترات به نیتريت‌هایی که با هموگلوبین ترکیب می‌شوند کاهش می‌یابد و منجر به تشکیل متاهموگلوبین^۱ شده که این ماده برای نوزادان

کشنده است. قرارگرفتن طولانی مدت در معرض نیترات و نیتريت منجر به تشکیل ترکیبات سرطان‌زای نیتروسامین^۲ می‌شود. از طرفی نیترات برروی اندازه و عملکرد غده تیروئید اثرگذار است (لی و همکاران، ۲۰۱۰). مطالعه صورت‌گرفته در کلرادوی امریکا نشان‌دهنده اثر غلظت نیترات آب بر دیابت نوع ۱ است. حذف نیترات از آب آشامیدنی به‌منظور اطمینان‌یافتن از تأمین آب شرب سالم، بهداشتی و پیشگیری از شیوع انواع بیماری‌های متأثر از مقدار بالای نیترات ضروری است (کوسترابا و همکاران، ۱۹۹۲). مهم‌ترین روش‌های کاهش نیترات آب، عبارت‌است از: تبادل یونی، اسمز معکوس، جذب سطحی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و روش زیستی. هرکدام از این تکنیک‌ها دارای مزیت‌ها و نقایصی هستند که شرایط، تعیین‌کننده روش انتخابی است (باتنگار و سیلانپا، ۲۰۱۰؛ پرووینس، ۲۰۱۴).

روش‌ها

براساس کیفیت اولیه آب، سطح مقیاس کاربرد، شرایط دسترسی به مواد و تجهیزات، قیمت تمام‌شده روش و نوع کاربرد آب خروجی روش‌های مختلفی برای نیترات‌زدایی استفاده می‌شود. شکل ۱ خلاصه دسته‌بندی روش‌های حذف نیترات از آب را نشان می‌دهد.

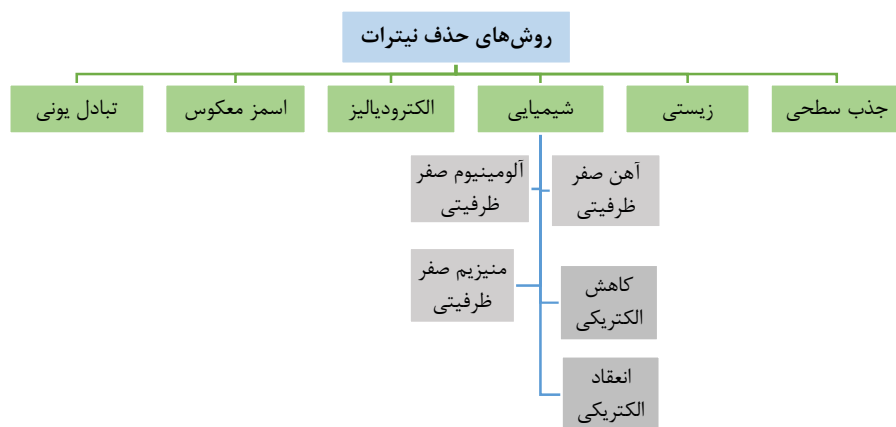
تبادل یونی

روش تبادل یونی یک روش مؤثر، ساده و با هزینه نسبتاً کم است که بازدهی مناسبی به‌خصوص برای منابع آب با حجم کم دارد. این روش شامل عبوردادن آب حاوی نیترات از بستر رزینی متشکل از رزین‌های مبادله‌کننده آنیون است که طی آن، یون نیترات با کلرید مبادله می‌شود (شکل ۲) و بازدهی حذف بیش از ۹۰ درصد دارد (نوجیک و همکاران، ۲۰۱۷) رزین‌های تبادل‌کننده آنیونی معمولاً حاوی گروه‌های عاملی تری‌متیل آمین و پلی‌اکریلیک هستند. رزین‌های آنیونی استاندارد، سولفات‌های دوظرفیتی آب‌دوست را به نیترات تک‌ظرفیتی آب‌گریز ترجیح می‌دهند. ترجیح سولفات بر نیترات در رزین‌های تبادل آنیونی استاندارد به ظرفیت پایین جذب سطحی نیترات، خوردگی بیشتر و اثرات منفی بر سلامتی انسان با مقدار کلرید بیشتر در آب محصول

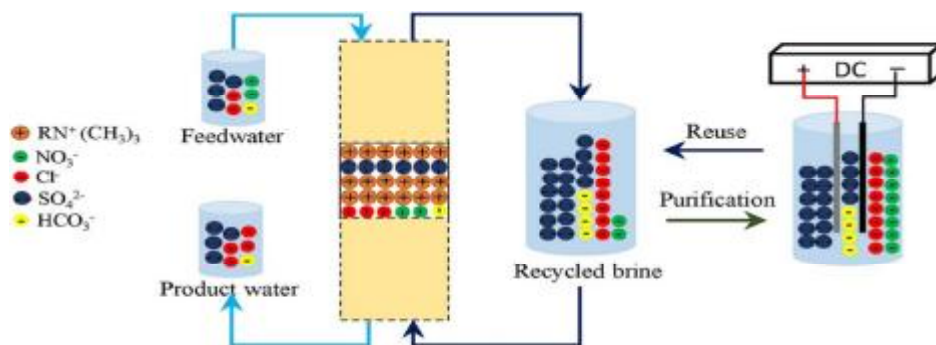
نزدیک به ۱۰۰ درصد را نشان داد (دهقانی و همکاران، ۱۳۸۷).

ماتر و همکاران در سال ۲۰۱۳ با بهره‌گیری از نانوفیبرهای سلولزی اصلاح‌شده با تری‌متیل آمونیوم موفق به کاهش نیترات آب با راندمان ۹۰ درصد شدند (ماتر و همکاران، ۲۰۱۶). حجت انصاری و بصیری پارسا در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که کاهش یون نیترات به میزان ۸۷ درصد با هدایت پلی‌آنیلین، از طریق تغییر الکتریکی روش تبادل یونی امکان‌پذیر است. مندو و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از کاتالیست Pd-Cu و رزین تبادل یونی طی دو مرحله تبادل یون نیترات و بازیابی کاتالیست، نیترات را کاهش دادند (نوجیک و همکاران، ۲۰۱۷).

منجر می‌شود. از سال ۱۹۸۰ تعدادی از رزین‌های تبادل آنیونی استاندارد گزینش‌پذیر با زنجیره طولانی‌تر گروه عاملی تری‌اتیل آمین و پلی‌استیرن شامل پرولیت ۵۲۰A-E، آمبرلیت ۹۹۶IRA، ۲NDP-، ۵NDP-، دولیت ۱۹۶A برای غلبه بر نقاط ضعف فوق استفاده می‌شوند (دان و همکاران، ۲۰۲۰). در مهم‌ترین مطالعات قبلی رزین‌های تبادل یونی گزینش‌پذیر در حذف نیترات، از سولفات به‌عنوان آنیون رقیب استفاده می‌شد؛ البته اثر نامطلوب بی‌کربنات بر جذب نیترات نیز گزارش شده‌است (چو و همکاران، ۲۰۱۵). استفاده از رزین Amberject 4200 Cl برای حذف نیترات از چاه‌های آب شرب شیراز، بازدهی



شکل ۱- انواع روش‌ها برای حذف یون نیترات از آب آشامیدنی



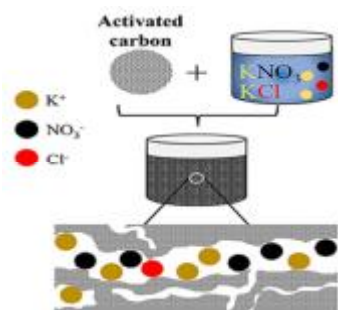
شکل ۲- مکانیسم تبادل یونی برای حذف یون نیترات از آب (دان و همکاران، ۲۰۲۰)

توانایی حذف مواد جامد معلق، مواد آلی، کلئیدها، باکتری‌ها و ویروس‌ها را نیز دارد. برای تولید فشار اسمز معکوس به پمپ آب نیاز است. وقتی فشار برابر با فشار اسمزی طبیعی محلول باشد، حلال جریان نمی‌یابد. اگر

اسمز معکوس

در این روش مولکول‌های آب از میان غشا اسمز معکوس متراکم عبور داده می‌شود تا حلال و حل‌شونده از هم جدا شوند (شکل ۳). این فناوری علاوه بر نمک‌ها و یون‌ها،

شده است که طی آن کربن‌های ریز متخلخل نیترات از کلرید جدا می‌شود. یک جاذب مناسب باید قیمت پایین، ظرفیت جذب بالا و گزینش‌پذیری مناسب داشته باشد؛ از این رو می‌توان زئولیت، کیتوسان، کربن فعال و پسماندهای کشاورزی را جاذب‌های قابل‌اتکا در حذف نیترات از آب دانست (محرابی و همکاران، ۲۰۱۵).



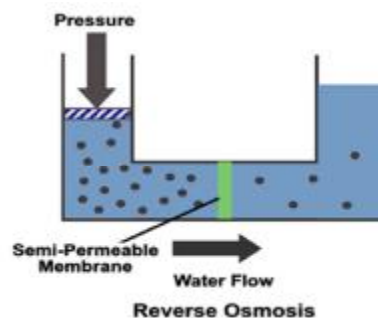
شکل ۴- مکانیسم جذب سطحی انتخابی نیترات نسبت به کلرید با استفاده از کربن‌های ریزمتخلخل

هفشجانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ از تفاله نیشکر به‌عنوان یک جاذب طبیعی در حذف نیترات از آب آشامیدنی استفاده کردند. در این فرایند، از بین یون‌های موجود در آب، کربنات و کلراید به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را نشان دادند. کالاروبان و همکاران در سال ۲۰۱۶ a با ادغام دو روش جذب سطحی و الکتروشیمیایی موفق شدند کارایی حذف نیترات را افزایش دهند. کارتیکیان و میناکشی در سال ۲۰۲۰ با استفاده از کربن فعال و هیدروکسیدهای دولایه Zn-Fe، یک سیستم جذب نیترات از آب آشامیدنی طراحی کردند. در pH ۴/۸، استفاده از ۳/۷۵ گرم گرانول فریک هیدروکسید می‌تواند نیترات را تا ۹۸/۸ درصد کاهش دهد (دهقانی و همکاران، ۲۰۱۵). اصلاح سطح کربن فعال گرانوله، امکان کاهش نیترات با ظرفیت جذب ۱۵/۳۴ میلی‌گرم بر گرم را فراهم می‌کند (مزرچی و همکاران، ۱۳۹۴).

نانومواد در نیترات‌زدایی جذب سطحی

نانوذرات به‌واسطه ویژگی‌های مطلوب گرمایی، مکانیکی، نوری، ساختاری و ریخت‌شناسی، امکان استفاده در محیط‌های مختلف را دارند. از فناوری نانو برای بهبود کیفیت آب، از جمله حذف نیترات استفاده می‌شود. محصولات براساس نوع نانومواد استفاده‌شده، تشکیل

فشار کمتر از فشار اسمزی طبیعی محلول باشد، حلال از محلول رقیق به غلیظ جریان می‌یابد. درغیراین‌صورت حلال از غشا اسمز معکوس عبور می‌کند؛ به‌طوری‌که در طرف مقابل محلول رقیق تشکیل شده و در سمت فشار، محلول غلیظ‌تری تشکیل می‌شود (رضایی و همکاران، ۲۰۰۸). واحدهای اسمز معکوس در محدوده فشار ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ psi می‌توانند یون‌های نیترات آب را حذف کنند. غشاهای مورد استفاده در این فرایند معمولاً از جنس استات سلولز، پلی‌آمیدها و مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند (آرچنا و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۳- مکانیسم اسمز معکوس برای مولکول‌های آب (اسماعیلیون، ۲۰۲۰)

پیرصاحب و همکاران (۲۰۱۶) با مقایسه عملکرد دو روش اسمز معکوس و الکترودیالیز در حذف نیترات از ۱۸ نمونه آبی مربوط به گلشهر مشهد، دریافتند که روش اسمز معکوس با کارایی ۹۰ درصد عملکرد بهتری دارد. فنتس و وانگ (۲۰۲۱) امکان کاهش کاتالیتیکی نیترات با استفاده از Pd-Cu در سیستم اسمز معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده حذف حداکثری و حدود ۹۲ درصدی نیترات بود. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) رفتار اوزون/کربن فعال زیستی را در فرایند اسمز معکوس و حذف نیترات و سایر آلاینده‌ها و امکان استفاده مجدد از آن‌ها را بررسی کردند.

جذب سطحی

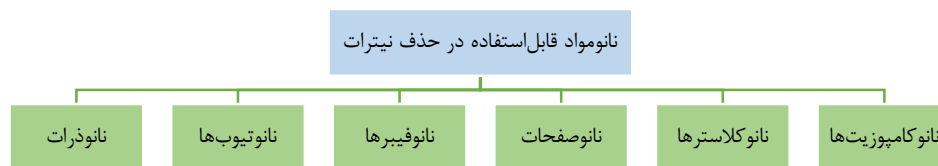
برای حذف مقادیر کم آلاینده‌ها و یون‌های موجود در آب، از بستر جامد به عنوان جاذب، استفاده می‌شود. سهولت کار و طراحی غیرپیچیده، جذب سطحی را به یک روش مقرون به صرفه برای حذف نیترات مبدل ساخته‌است. در شکل ۴ نمونه مکانیسم جذب سطحی انتخابی نیترات ارائه

شیمیایی

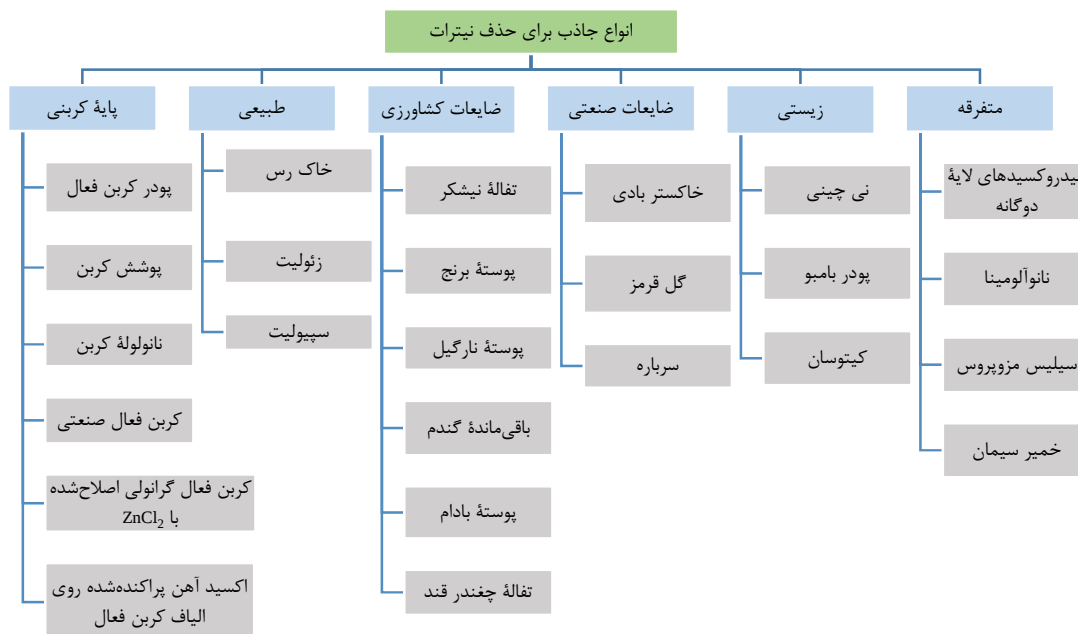
فرایند کاهش شیمیایی براساس رفتار الکترون‌دهندگان غیرآلی، جذابیت و کارایی بالایی نشان می‌دهد. عوامل متداول کاهنده در حذف نیتрат عبارت‌اند از: فلزات فعال، آمونیاک، بوروهیدرید، فرمات، هیدرازین، هیدروکسیل آمین، هیدروژن و آهن. کاهش نیترات از طریق روش‌های مختلف مانند الکتروشیمیایی، گرمایی و فوتوکاتالیست صورت می‌گیرد؛ اما واکنش‌های ساده کاهش شیمیایی نیترات، کارایی لازم را ندارند. طی کاهش نیترات؛ آمونیاک، نیتروژن و نیتريت آزاد می‌شوند. ترکیبات شیمیایی مختلف برای کاهش نیترات آب استفاده می‌شود. متداول‌ترین این ترکیبات که کارایی بالا و سیستم کاهش ساده دارند، عبارت‌اند از آهن، آلومینیوم و منیزیم صفر ظرفیتی (پرووینس، ۲۰۱۴).

می‌شوند. جذب سطحی، دیگر مکانیسم مورد استفاده در حذف نیترات با بهره‌گیری از نانومواد است. در این روش یون نیترات از طریق جذب فیزیکی یا شیمیایی به سطح یک جاذب متصل می‌شود. نانومواد به‌کاررفته در این روش باید دارای دو ویژگی ممتاز باشند: سطح داخلی و عملکرد خارجی. سطح زیاد، فعالیت جذب، عدم مقاومت در برابر نفوذ داخلی و انرژی اتصال سطح بالا، عواملی هستند که توانایی جذب سطحی نانومواد را تعیین می‌کنند (خاچه و همکاران، ۲۰۱۳). نانومواد قابل‌استفاده در حذف نیترات عبارت‌اند از: نانوکامپوزیت‌ها، نانوکلاسترها، نانوصفحات، نانوفیبرها، نانوتیوب‌ها و نانوذرات (شکل ۵).

جاذب‌های متنوعی برای نیترات‌زدایی از آب استفاده می‌شود. براساس ویژگی‌ها و ساختار، می‌توان این جاذب‌ها را به شش گروه پایه کربنی، طبیعی، ضایعات کشاورزی، ضایعات صنعتی، زیستی و متفرقه دسته‌بندی کرد. در شکل ۶، این دسته‌بندی و نمونه‌هایی از هریک آورده شده و در جدول ۲ نیز جاذب‌های مختلف با ظرفیت جذب گوناگون ارائه شده‌است.



شکل ۵- انواع نانومواد برای حذف یون‌های نیترات از آب آشامیدنی



شکل ۶- انواع جاذب مورد استفاده برای حذف نیترات

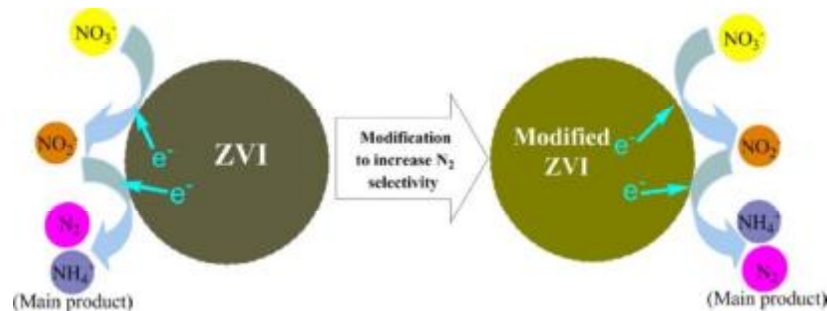
جدول ۲- جاذب‌های مورد استفاده برای حذف نیترات

رردیف	جاذب	ظرفیت جذب	منبع
۱	کربن فعال گرانولی نارگیل - اصلاح نشده	۱/۷	باتنگار و همکاران (۲۰۰۸)
۲	کربن فعال گرانولی اصلاح شده با $ZnCl_2$	۱۰/۲	باتنگار و همکاران (۲۰۰۸)
۳	نی چینی با اتصال متقاطع و چهارگانه	۷/۵۵	ناماسیوم و هل (۲۰۰۵)
۴	کربن فعال تجاری	۱/۲۲	میشرا و پاتل (۲۰۰۹)
۵	زغال کاه گندم	۱/۱	میشرا و پاتل (۲۰۰۹)
۶	زغال کاه خردل	۱/۳	میشرا و پاتل (۲۰۰۹)
۷	نانوآلومینا	۴	باتنگار و همکاران (۲۰۰۸)
۸	پوسته برنج اصلاح شده	۵۵/۵۵	کتال و همکاران (۲۰۱۲)
۹	زغال غیرفعال شده باقی مانده ذرت	۱۱/۷۷	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۰	زغال فعال شده شیمیایی باقی مانده ذرت	۱۳/۳۳	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۱	زغال غیرفعال تراشه‌های چوب کاج	۳/۴۹	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۲	زغال فعال شده شیمیایی تراشه‌های چوب کاج	۱۳/۲۲	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۳	زغال غیرفعال سبزه	۱۱/۸۷	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۴	زغال فعال شده شیمیایی سبزه	۱۵/۱۹	چینتالا و همکاران (۲۰۱۳)
۱۵	نانوذرات آهن صفر	۲۰/۹۵	وانگ و همکاران (۲۰۱۴)
۱۶	نانوذرات Fe_3O_4	۲/۴۴	وانگ و همکاران (۲۰۱۴)
۱۷	پلی‌تولونیدین زیرکونیوم (IV) اتیلن دی‌آمین	۲۰/۰۹	رحمان و خان (۲۰۱۵)
۱۸	Fe^{+2} کمپلکس گرانول کیتوسان	۸/۳۵	هو و همکاران (۲۰۱۵)
۱۹	تفاله نیشکر	۲/۱۳	هفشجانی و همکاران (۲۰۱۶)
۲۰	زغال اصلاح شده تفاله نیشکر	۲۸/۲۱	هفشجانی و همکاران (۲۰۱۶)
۲۱	چغندر قند اصلاح شده شیمیایی	۲۷/۵۵	دمیرال و قندوزوگلو (۲۰۱۰)
۲۲	زغال پودر بامبو	۱/۲۵	میزوتا و همکاران (۲۰۰۴)
۲۳	هیدروکسید لایه دوگانه	۳۵	حسینی و اسراسرا (۲۰۰۸)
۲۴	هیدروبیدهای کیتوسان	۹۲/۱	چاترجی و همکاران (۲۰۰۹)
۲۵	دانه‌های کیتوسان	۹۰/۷	چاترجی و همکاران (۲۰۰۹)
۲۶	دانه‌های کیتوسان با اتصال متقاطع	۱۰۴	چاترجی و همکاران (۲۰۰۹)
۲۷	پوست بادام آغشته به کربن فعال	۱۷	رضایی و همکاران (۲۰۰۸)
۲۸	مغز چغندر قند با پوشش Zr	۶۳	حسن و همکاران (۲۰۱۰)
۲۹	سیپولیت فعال شده با HCl	۳۸/۱۶	اوزترک و بکتاش (۲۰۰۴)
۳۰	سیلیس عامل دار شده با آمونیوم	۴۶	حمودی و همکاران (۲۰۰۷)
۳۱	رزین Dowex	۱۸/۶	کالاروبان و همکاران (۲۰۱۶b)
۳۲	رزین Dowex-Fe	۳۱/۴	کالاروبان و همکاران (۲۰۱۶b)
۳۳	چوب ذرت متصل به آمین	۱۵/۳	کالاروبان و همکاران (۲۰۱۶b)
۳۴	نارگیل متصل به آمین	۱۸/۶	کالاروبان و همکاران (۲۰۱۶b)

آهن صفر ظرفیتی

نیترات و آهن صفر ظرفیتی با هم واکنش اکسایش کاهش می‌دهند، خروجی واکنش نیتريت، نیتروژن و آمونیوم است که باعث کاهش نیترات می‌شوند (شکل ۷). دامنه کارایی حذف نیترات در این روش به pH، اندازه نانوذرات، روش تولید نانوذرات، دوز نانوذرات به نیترات، زمان تماس بین ذرات و آلاینده‌ها بستگی دارد (کسایی و همکاران، ۲۰۱۱). مزایای نیترات زدایی با استفاده از آهن صفر ظرفیتی عبارت است از: فراوانی آهن، در دسترس و کم هزینه بودن آن و آسان بودن مکانیسم کاهش. در این

روش، pH فاکتور مهمی است. به دلیل واکنش خوب آهن با محلول‌های اسیدی، حذف قابل قبول نیترات در این روش در pH پایین رخ می‌دهد؛ اما در pH‌های بالاتر، محصولات خوردگی آهن مانند اکسیدهای آهن و هیدروکسیدها، سطح آهن صفر را می‌پوشاند و فرایند کاهش نیترات را تضعیف می‌کنند (چو و همکاران، ۲۰۰۴). نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در pH ۳ و حضور اسید هیومیک، بیش از ۸۵ درصد نیترات را به آمونیوم احیا کرده و مواد آلی محلول در آب را حذف می‌کند (شاگری و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۷- مکانیسم حذف نیترات با آهن صفر ظرفیتی

منیزیم صفر ظرفیتی

استفاده از منیزیم صفر ظرفیتی برای نیترات زدایی سابقه طولانی چندین ساله دارد. فاکتورهای مؤثر بر حذف نیترات در این مکانیسم عبارتند از: رخ دادن شرایط تعادل در مدت زمان کوتاه، زمان تماس، غلظت اولیه نیترات، نسبت منیزیم به نیترات و دوز منیزیم (پرووینس، ۲۰۱۴). هزینه پایین، فراوانی، در دسترس و غیرسمی بودن، سازگار با محیط زیست و حذف مؤثر آلاینده‌ها از ویژگی‌های ممتاز منیزیم صفر ظرفیتی است که با پتانسیل کاهش بالاتر نسبت به آهن صفر ظرفیتی تعیین می‌شود (کومار و چاکرابورتی، ۲۰۰۶؛ لی و پارک، ۲۰۱۳). ترکیبات منیزیم حاصل از واکنش، برای سیستم‌های آب مضر نیستند، مشکلی برای سلامتی ایجاد نمی‌کنند و به راحتی حذف می‌شوند. منیزیم صفر ظرفیتی برای هر دو شرایط هوازی و بی‌هوازی قابل استفاده است (لی و پارک، ۲۰۱۳). نیاز به دوز بالا، زمان طولانی واکنش و شرایط غیرهوازی از جمله محدودیت‌های روش‌های شیمیایی (آهن و آلومینیوم) حذف نیترات هستند (آراجو و همکاران، ۲۰۱۶). منیزیم صفر ظرفیتی نسبت به آهن صفر ظرفیتی دارای مزایایی است؛ مانند پتانسیل کاهش بالاتر، حلالیت بیشتر، عملکرد بهتر در pHهای مختلف، امکان کاربرد در هر دو حالت هوازی و بی‌هوازی، فراوانی طبیعی و تولید محصولات سازگار با محیط زیست (گاتام و سورش، ۲۰۰۷؛ آن و همکاران، ۲۰۰۸). مطالعه ایلری و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای کاهش نیترات با استفاده از ذرات منیزیم در حضور امواج فراصوت تأیید کرد که ترکیب دو روش برای حذف کارایی را به میزان ۹۰ درصد افزایش داد. میرآبی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با منیزیم صفر و کربن فعال، نیترات آب را کاهش دادند. این سیستم ترکیبی در pH پایین کارایی بیشتری نشان داد.

آلومینیوم صفر ظرفیتی

محصول اصلی کاهش نیترات به این روش؛ آمونیاک با مقداری نیتريت و نیتروژن است. در واکنش نیترات و آلومینیوم، pH اهمیت ویژه‌ای دارد. این ممکن است به دلیل تأثیر pH بالا در از بین بردن لایه متراکم و چسبنده اکسید آلومینیوم موجود روی سطح پودر آلومینیوم باشد که از رخ دادن واکنش جلوگیری می‌کند. ذرات کوچک آلومینیوم نسبت به ذرات بزرگ‌تر، تأثیر بیشتری بر حذف نیترات دارند. ذرات بزرگ‌تر آلومینیوم نسبت به ذرات کوچک‌تر مدت زمان واکنش بیشتری برای کاهش نیترات نیاز دارند (اصفهانی و همکاران، ۲۰۲۰). لوک و ینگ در سال ۲۰۰۲ نشان دادند که پودر آلومینیوم در حذف نیترات در pH ۱۰/۷ به میزان ۶۲ درصد مؤثر است. دسای و همکاران در سال ۲۰۱۰ بیان کردند ۵ گرم از گرانول آلومینیوم در دمای اتاق، pH ۱۲ و زمان ۳۰ دقیقه قادر به کاهش ۵۵ درصدی نیترات از آب است.

کاهش الکتریکی

در این روش نیترات به نیتروژن بی‌ضرر تبدیل شده که این فرایند، کارایی و شرایط عملیاتی مناسبی دارد (سو و همکاران، ۲۰۱۷). محصولات کاهش الکتریکی نیترات عمدتاً شامل نیتروژن، نیتريت و آمونیوم است. مکانیسم این روش به نوع ماده کاتد، پتانسیل کاتد و pH وابسته است (ماتسونگا و یاسوهارا، ۲۰۰۵؛ آنگلادا و همکاران، ۲۰۰۹). مواد الکترود عمدتاً به الکترودهای فلزی و غیرفلزی تقسیم می‌شود. الکترود فلزی با مقاومت کم و فعالیت بالا استفاده می‌شود (جورجد و همکاران، ۲۰۱۱). گزینش پذیری، سهولت، ایمنی و سازگاری با محیط زیست از ویژگی‌های ممتاز این روش است (داس و چادهاری، ۲۰۰۵). با این وجود محدودیت اصلی آن، تولید محصولات جانبی مانند آمونیوم و نیتريت به شمار می‌رود. نیترات در

پیکربندی سل را بررسی کردند و دریافتند که حذف نیترات با سلول دومحفظه نسبت به سلول تک‌محفظه بیشتر است. یاو و همکاران در سال ۲۰۱۹ کاهش الکتروشیمیایی غیرمستقیم نیترات با بهره‌گیری از آند تیتانیوم صفر ظرفیتی را به میزان ۸۳ درصد نشان دادند. چن و همکاران در سال ۲۰۲۰ نشان دادند که کاهش الکتروشیمیایی نیترات به آمونیاک، با استفاده از کاتالیست مولکولی جامد مس صورت می‌گیرد. مجموعه‌های الکتروشیمیایی متنوعی برای کاهش نیترات استفاده می‌شود که در جدول ۳ به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

فرایند کاهش الکتروشیمیایی در کاتد کاهش می‌یابد (شکل ۸). یک الکتروود مؤثر و گزینش‌پذیر نقش معناداری در حذف الکتروشیمیایی نیترات دارد. فلزات پیش‌برنده (Sn, In, Cu) تنها می‌توانند نیترات را به نیتريت تبدیل کنند؛ اما به‌منظور کاهش بیشتر نیتريت به اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، N_2 و NH_4^+ استفاده از Pd ضروری است؛ بنابراین در این فرایند از الکترودهای کاتدی دو فلزی مانند (Pd/Sn, Pd/In, Pd/Cu) استفاده می‌شود (شای و همکاران، ۲۰۱۲). دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ حذف نیترات از طریق کاهش الکتریکی با تمرکز بر نقش کاتد و

جدول ۳- کاهش الکتریکی نیترات با کاتدهای مختلف

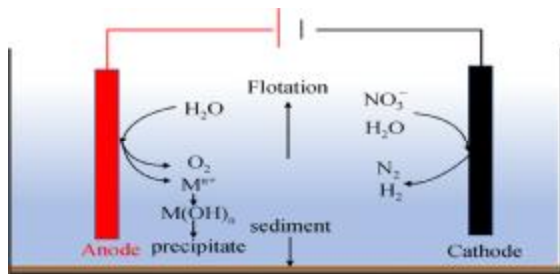
کاتد	نیترات mg/l	الکتروولت mg/l	$X_{\text{NO}_3^-}$ (%)	K^+ (min^{-1})	S_{N_2} (%)	پتانسیل اولیه (v)	منبع
پوشش گرافیت	۱۷۰	-	۷۰	-	-	-۰/۸	دینگ و همکاران (۲۰۱۵)
Pt	۴۲۵۰	۳۷۲۵ (KCl)	۳۱/۲	$1/5 \times 10^{-3}$	۱۳/۵	-	کوای و همکاران (۲۰۱۶)
Fe	۱۰۰	۵۰۰ (Na_2SO_4)	۹۳	-	-	-	لی و همکاران (۲۰۱۶)
Ti	۱۷۰	-	۸	-	-	-۱/۰	دینگ و همکاران (۲۰۱۵)
CO_2/Ti	۱۰۰	۷۱۰۰ (Na_2SO_4)	۶۵	-	-	-	سو و همکاران (۲۰۱۷)
Si/BDD	۹/۷۴	-	۱۰۰	-	-	-	قزوناوی و همکاران (۲۰۱۷)
گرافیت/Cu	۸۵۰۰	۵۸۵۰۰ (NaCl)	-	$1/25 \times 10^{-6}$	-	-۰/۹	قدبانه و همکاران (۲۰۰۸)
گرافیت/Pd-Cu	۸۵۰۰	۴۰۰۰۰ (NaOH)	-	$3/73 \times 10^{-6}$	۹۰	-۰/۷	قدبانه و همکاران (۲۰۰۸)
Cu/Pt	۴۲۵۰	۳۷۲۵ (KCl)	۶۶	$4/88 \times 10^{-3}$	۱۲	-	کوای و همکاران (۲۰۱۶)
Cu/Ni	۱۷۰	-	۵۸	-	-	-۱/۳	دینگ و همکاران (۲۰۱۵)
Sn-Cu/Pt	۵۲۵۰	۳۷۲۵ (KCl)	۹۹	$4/96 \times 10^{-3}$	۹۳/۸	-	دینگ و همکاران (۲۰۱۵)

* ثابت سرعت واکنش و $X_{\text{NO}_3^-}$ انتخاب‌پذیری نسبت به نیتروژن است.

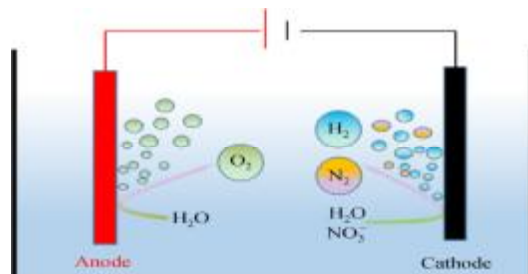
انعقاد الکتریکی

روش انعقاد الکتریکی شامل اعمال جریان الکتریکی به سلول حاوی آند و کاتد کمکی است که در آن جریان، یک گونهٔ انعقادی درجا در آند تولید می‌کند. گونه‌های تشکیل‌شده با آلاینده‌ها یک مجموعه را تشکیل می‌دهند و سپس رسوب می‌کنند (حکیزمانا و همکاران، ۲۰۱۷). شکل ۹ این فرایند را تشریح کرده و ساختار ساده یک رآکتور انعقاد الکتریکی شامل سلول الکترولیتیک همراه با یک کاتد و آند است که آند تولیدکننده یون‌های فلزی برای سیستم و کاتد مسئول آزادکردن گاز هیدروژن است. معمولاً جنس الکترودهای به‌کاررفته در این فرایند از نوع آهن و آلومینیوم است. وقتی آهن و آلومینیوم به‌عنوان آند استفاده می‌شوند Fe^{3+} یا Al^{3+} تشکیل‌شده با OH کاتدی واکنش می‌دهد، هیدروکسید فلزی (MxOH_y) تشکیل‌شده منجر به جذب آلاینده می‌شود (آمارین و همکاران، ۲۰۲۰).

pH، زمان، جنس الکتروود، جریان الکتریکی، هدایت و ویژگی‌های هیدرودینامیکی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سیستم انعقاد الکتریکی هستند (حکیزمانا و همکاران، ۲۰۱۷). ساده‌بودن، امکان تنظیم خودکار، کارایی بالا و صرفهٔ اقتصادی از مهم‌ترین مزیت‌های انعقاد الکتریکی است (الازوی و همکاران، ۲۰۱۷). قنبری و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان دادند حذف نیترات به روش انعقاد الکتریکی شامل استفاده از آندهای آهن و آلومینیوم منجر به حذف ۸۱/۵ درصدی نیترات می‌شود. مجلسی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از الکتروود تک‌قطبی عمودی در سیستم انعقاد الکتریکی، حذف نیترات به میزان ۹۶ درصد را ثبت کردند. آمارین و همکاران در سال ۲۰۲۰ از روش انعقاد الکتریکی و الکترودهای آلومینیومی برای کاهش نیترات آب منطقهٔ کازابلانکای مراکش استفاده کردند. این مطالعه روی ۴ نمونه صورت گرفت. نتایج نشان‌دهندهٔ بازهٔ مناسب حذف ۸۸ تا ۹۴ درصد بود. الکترودهای مختلفی برای انعقاد الکتریکی نیترات استفاده می‌شود که در جدول ۴ به بخشی از آن‌ها اشاره شده است.



شکل ۹- مکانیسم حذف نیترات با روش انعقاد الکتریکی (ژو و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۸- مکانیسم کاهش الکتروشیمیایی نیترات (ژو و همکاران، ۲۰۱۸)

جدول ۴- انعقاد الکتریکی نیترات با الکترودهای مختلف

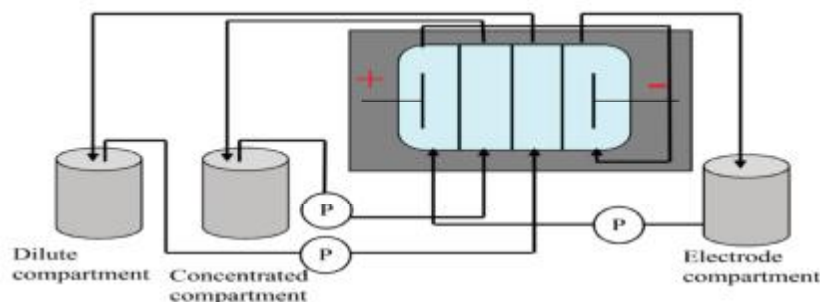
منبع	حذف (%)	غلظت نیترات (mg/L)	زمان الکترولیز (min)	pH	دانسیتة جریان (mA/cm ²)	آند-کاتد
واسودوان و همکاران (۲۰۱۰)	۸۳/۳۳	۵۰۰	-	۷	۱	Mg-Mg
واسودوان و همکاران (۲۰۱۰)	۹۰/۲۷	۵۰۰	-	۷	۱/۵	Mg-Mg
واسودوان و همکاران (۲۰۱۰)	۹۲/۹	۵۰۰	-	۷	۲/۵	Mg-Mg
واسودوان و همکاران (۲۰۱۰)	۹۳/۴۳	۵۰۰	-	۷	۵	Mg-Mg
واسودوان و همکاران (۲۰۱۰)	۹۳/۸۷	۵۰۰	-	۷	۷/۵	Mg-Mg
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۵۲	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Al-Al
ملکوتیان و همکاران (۲۰۱۱)	۷۲	۱۵۰	۶۰	۵	-	Al-Al
ملکوتیان و همکاران (۲۰۱۱)	۷۸	۱۵۰	۶۰	۷	-	Al-Al
قنبری و همکاران (۲۰۱۴)	۶۲/۸	۱۰۰	۴۰	۵	۳/۵۷	Al-Al
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۸۷	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Al-Gr
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۴۱	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Al-Fe
قنبری و همکاران (۲۰۱۴)	۸۱/۵	۱۰۰	۴۰	۵	۳/۵۷	Al-Fe
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۴۷	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Fe-Fe
قنبری و همکاران (۲۰۱۴)	۷۱/۲	۱۰۰	۴۰	۵	۳/۵۷	Fe-Fe
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۷۳	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Fe-Al
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۵۸	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Fe-Gr
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۸۱	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Gr-Gr
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۸۱	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Gr-Al
گویندان و همکاران (۲۰۱۵)	۸۰	۱۰۰	۶۰	۷	۲۵	Gr-Fe

الکترودیالیز

در این روش با استفاده از جریان مستقیم الکتریکی، یون‌ها از طریق غشا از محلول رقیق‌تر به محلول غلیظ‌تر منتقل می‌شوند. الکترودیالیز با حذف گزینشی یون‌های غیرمطلوب از طریق یک غشا نیمه‌تراوا، آب را تصفیه می‌کند (شکل ۱۰). این سیستم نیازمند آب تحت فشار ۵۰-۷۵ psi با پیش‌تصفیه است (آرچنا و همکاران، ۲۰۱۲). معمولاً دستگاه الکترودیالیز از واحد غشایی و سه محفظه الکترود رقیق، غلیظ و الکترودها با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تشکیل می‌شود. در قسمت غشایی، ۱۰ جفت غشای تبادل کاتیون و آنیون با سطح ۵۵ سانتی‌مترمربع برای هریک قرار دارد.

هرباکوا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از فرایند الکترودیالیز توانستند غلظت محلول‌های مدل $NaNO_3$ و

$NaNO_3$ همراه با $NaCl$ حاوی غلظت تقریبی ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات را به ناحیه استاندارد زیر ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برسانند. پارک و همکاران در سال ۲۰۱۷، تأثیر ولتاژ و غلظت الکترولیت به‌کاررفته در فرایند الکترودیالیز حذف نیترات را بررسی کردند. جریان بهینه ۲۰ ولت و غلظت ۵۰۰ میلی‌مولار الکترولیت منجر به افزایش قابل‌توجه حذف نیترات شد (نوجیک و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه الرحمان و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان داد که کاهش غلظت نیترات با روش الکترودیالیز به‌شدت به جریان اعمال‌شده بستگی دارد و افزایش میزان جریان مقدار نیترات عبوری از غشا را به‌صورت خطی افزایش می‌دهد. غلظت اولیه خوراک، در میزان حذف نیترات به‌عنوان تابعی از سطح غشا تأثیری ندارد.

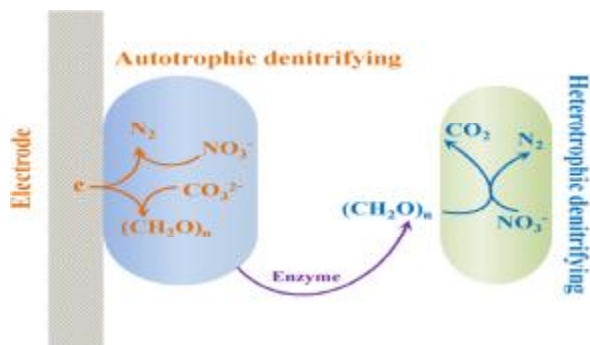


شکل ۱۰- دستگاه الکترودیالیز (الرحمان و همکاران، ۲۰۱۷)

ژاو و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش‌های هتروتروفیک و اوتوتروفیک در یک رآکتور الکتروکاتدی، نیترات را به صورت مؤثر از آب حذف کردند. این مطالعه، نسبت کربن به نیتروژن و جریان الکتریکی، ارزیابی و تغییرات pH بررسی شد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) توانستند در حضور آهن صفر ظرفیتی و میکروارگانسیم‌ها، کاهش زیستی نیترات را انجام دهند. حضور هم‌زمان آن‌ها، کارایی حذف بیشتری را نسبت به شرایطی نشان می‌داد که صرفاً میکروارگانسیم یا آهن صفر ظرفیتی استفاده می‌شد. هورتادو مارتینز و همکاران در سال ۲۰۲۱ حذف بیولوژیکی نیترات از آب‌های زیرزمینی را با استفاده از یک فناوری هوازی گرانول، بررسی کردند. باکتری‌های رشد یافته بر بستر کربن فعال اصلاح‌شده با گوگرد عنصری، نیترات آب آشامیدنی را تا ۹۸ درصد کاهش می‌دهد (صیدمحمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

زیستی

این روش مبتنی بر استفاده از میکروب‌های فاقد نیترات است که از نیترات به عنوان الکترون گیرنده پایانی، از مواد آلی و معدنی به عنوان الکترون دهنده و منبع انرژی برای حفظ رشد میکروبی استفاده می‌شود (غفاری و همکاران، ۲۰۰۸). نیترات‌زدایی زیستی به دو نوع هتروتروفیک و اوتوتروفیک است. در روش اوتوتروفیک از ترکیبات هیدروژن، آهن یا گوگرد به عنوان منبع انرژی و ترکیبات معدنی کربن مانند دی‌اکسید کربن و بی‌کربنات به عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند (کاراناسیوس و همکاران، ۲۰۱۰). در نیترات‌زدایی هتروتروفیک از ترکیبات آلی به عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند (ون ریچ و همکاران، ۲۰۰۶). روش هتروتروفیک نسبت به اوتوتروفیک، اقتصادی‌تر، با مقیاس بزرگ‌تر و امکان کاهش نیترات به گاز نیتروژن با گزینش‌پذیری بالاتر است (شاپیر و همکاران، ۲۰۱۰). شکل ۱۱ مسیر کاهش نیترات در یک کاتد زیستی به روش اوتوتروفیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- مسیر کاهش نیترات در یک کاتد زیستی (ژیانو و همکاران، ۲۰۱۵)

که شرایطی از جمله توجیه اقتصادی، کاربرد در مقیاس صنعتی، راندمان حذف، عملکرد گزینشی و عدم آلاینده‌ی زیست‌محیطی، تعیین‌کننده روش انتخابی است.

بحث و نتایج

ضرورت کاهش نیترات از آب، موجب نوآوری و به‌روزرسانی تکنیک‌های حذف نیترات شده است. هرکدام از تکنیک‌های حذف نیترات دارای مزیت‌ها و نقایصی هستند

مقایسه کوتاه روش‌های کاهش نیترات

در جدول ۵، مقایسه کوتاه روش‌های نیترات‌زدایی در قالب معرفی روش، امکان کاربرد صنعتی، میانگین راندمان

حذف، مزایا و معایب ارائه شده‌است. این مقایسه امکان دریافت نگاه اجمالی به مقوله نیترات‌زدایی از آب آشامیدنی را فراهم می‌سازد.

جدول ۵- معرفی و مقایسه انواع روش‌های حذف نیترات از آب آشامیدنی

روش	معرفی	مزایا	معایب
تبادل یونی	عبور آب حاوی نیترات از بستر رزین است. پس از تماس رزین با نیترات، کلرید در سطح جایگزین نیترات شده و حذف نیترات صورت می‌گیرد. بازیابی رزین با محلول کلرید سدیم یا بی‌کربنات سدیم انجام می‌شود. میانگین راندمان حذف آن ۹۷/۹-۹۹ درصد است.	• کارایی مناسب • فعالیت در غلظت‌های مختلف • سیستم فعالیت ساده • هزینه نسبتاً پایین • استفاده در سیستم‌های کوچک و بزرگ • امکان حذف انتخابی نیترات • دما و pH اهمیت زیادی ندارند • دارای کاربرد صنعتی	• فعالیت کلرید و سولفات به‌عنوان یون‌های مزاحم • حساسیت رزین به آهن، منگنز، ذرات جامد معلق و مواد آلی
اسمز معکوس	عبور آب از غشا نیمه‌تراوا با فشار بالا، بدون دخالت مواد شیمیایی، عبور مولکول‌های کوچک‌تر از غشا. غشا از مواد کامپوزیتی، پلی‌آمید و سلولز استات ساخته می‌شود. میانگین راندمان حذف آن ۸۵ درصد است.	• کارایی حذف بالا • کیفیت مطلوب آب خروجی • امکان فعالیت خودکار • حذف چندگانه • دارای کاربرد صنعتی	• هزینه بالا • شرایط نگهداری اختصاصی • خرابی و گرفتگی منافذ به مرور زمان • حساسیت به آهن، منگنز، سیلیکا و کلرین
جذب سطحی	جذب یون نیترات روی بستر جاذب جامد. جاذب‌های پایه کربنی، خاکستر (clay)، زئولیت‌ها، chiston با گروه‌های عاملی آمینو و هیدروکسیل، جاذب‌های کشاورزی (نفاله) نیشکر، پوسته برنج، زغال کاه گندم) ازجمله جاذب‌های مطرح برای نیترات‌زدایی است. میانگین راندمان حذف آن ۹۰ درصد است.	• سادگی فرایند • صرفه اقتصادی • امکان حذف چند نوع آلاینده آلی و معدنی از آب • دارای کاربرد صنعتی	• بازیابی جاذب • جذب پایین برخی جاذب‌ها
زیستی	استفاده از یک باکتری برای حذف نیترات است؛ مثل باکتری هتروتروف از طریق احیای نیترات به گاز نیتروژن. استفاده از یک منبع کربن آلی مانند اتانول، متانول یا استیک اسید برای رشد سلول و تأمین انرژی ضروری است. اولین بار در سال ۱۹۸۱ از این روش استفاده شد. میانگین راندمان حذف آن نزدیک به ۱۰۰ درصد است.	• هزینه پایین • قدرت حذف بالا • بازیابی بالای آب • ضایعات لجنی کم • محصول نهایی، گاز نیتروژن بی‌ضرر است • محدودسازی استفاده از مواد شیمیایی	• سرعت پایین فرایند • ایجاد مواد میکروبی محلول • حساس به شرایط محیط • پیچیدگی بیشتر نسبت به سایر روش‌ها • فاقد کاربرد صنعتی
الکترودیالیز	یک فرایند نمک‌زدایی است که از طریق اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود باردار مخالف کار می‌کند. قطبیت الکترودها دو تا چهار بار در ساعت معکوس می‌شود تا جهت حرکت یون تغییر یابد. میانگین راندمان حذف آن ۹۵ درصد است.	• محدود به استفاده شیمیایی نیست • حذف انتخابی گونه‌ها • غشاهای ماندگار • انعطاف در سرعت حذف متناسب با کنترل ولتاژ • بازیابی مناسب با حداقل هدر رفت آب • کاربرد خودکار • دارای کاربرد صنعتی	• هزینه نگهداری بالا • قیمت بالا • احتمال ته‌نشینی همزمان با افزایش بازیابی • پیچیدگی سیستم • وابستگی به هدایت
شیمیایی (کاهش الکتریکی)	نیترات در فرایند کاهش الکتروشیمیایی در کاتد کاهش می‌یابد. محصولات کاهش الکتریکی نیترات عمدتاً شامل نیتروژن، نیتريت و آمونیوم است. مکانیسم این روش به نوع ماده کاتد، پتانسیل کاتد و pH وابسته است.	• کارایی بالا • شرایط عملیاتی مناسب • گزینش‌پذیری • سهولت • ایمنی • سازگاری با محیط‌زیست	• تولید محصولات جانبی مضر مانند آمونیوم و نیتريت
شیمیایی (انعقاد الکتریکی)	شامل اعمال جریان الکتریکی به سلول حاوی آند و کاتد کمکی است که در آن جریان، یک گونه انعقادی درجا در آند تولید می‌کند. گونه‌های تشکیل‌شده با آلاینده‌ها یک مجموعه را تشکیل می‌دهند و سپس رسوب می‌کنند. محدوده حذف در این روش ۸۵ تا ۹۶ درصد است.	• ساده‌بودن • امکان تنظیم خودکار • کارایی بالا • صرفه اقتصادی • ترکیب اکسیداسیون، انعقاد و رسوبدهی • کاهش ریسک آلاینده ثانویه • تولید لجن کم • امکان استفاده از انرژی خورشیدی	• نیاز به نگهداری • انفعال الکترود در طول زمان • نیاز به هدایت بالای آب • فاقد کاربرد صنعتی
شیمیایی (آهن صفر)	نیترات و آهن صفر ظرفیتی با هم واکنش اکسایش کاهش می‌دهند، خروجی واکنش نیتريت، نیتروژن و آمونیوم است که باعث کاهش نیترات می‌شوند. دامنه کارایی حذف نیترات در این روش به pH اندازه نانوذرات، روش تولید نانوذرات، دوز نانوذرات به نیترات، زمان تماس بین ذرات و آلاینده‌ها بستگی دارد.	• فراوانی آهن • در دسترس و کم‌هزینه بودن آن • مکانیسم آسان کاهش • سطح فعال بالا • سطح ویژه بالا • کاربرد در مقیاس صنعتی	• نیاز به دوز بالا • زمان طولانی واکنش • کاهش راندمان به علت تولید اکسید و هیدروکسید آهن در pH بالا • شرایط غیرهوازی

ادامه جدول ۵- معرفی و مقایسه انواع روش‌های حذف نیترات از آب آشامیدنی

روش	معرفی	مزایا	معایب
شیمیایی (منیزیم صفر)	استفاده از منیزیم صفر ظرفیتی برای نیترات‌زدایی سابقه طولانی چندین ساله دارد. فاکتورهای مؤثر بر حذف نیترات از این مکانیسم عبارتند از: رخ دادن شرایط تعادل در مدت زمان کوتاه، زمان تماس، غلظت اولیه نیترات، نسبت منیزیم به نیترات و دوز منیزیم بستگی دارد.	• هزینه پایین • فراوانی و در دسترس بودن • غیرسمی بودن • سازگار با محیط‌زیست • حذف مؤثر آلاینده‌ها • ترکیبات منیزیم حاصل از واکنش، برای سیستم‌های آب مضر نیستند و به راحتی حذف می‌شوند • امکان استفاده در شرایط هوایی و بی‌هوایی.	• موردی گزارش نشده است.
شیمیایی (آلومینیوم صفر)	محصول اصلی کاهش نیترات به این روش؛ آمونیاک با مقداری نیتريت و نیتروژن است. در واکنش نیترات و آلومینیوم، pH اهمیت ویژه‌ای دارد. این روش در محلول‌های قلیایی با $pH > 10$ قابل استفاده است. بازدهی حذف در این روش بین ۶۰ تا ۹۵ درصد است.	• فراوانی زیاد • میزان کاهش بالا • راندمان حذف مناسب • کاهنده قوی‌تر نسبت به آهن	• نیاز به دوز بالا • زمان طولانی واکنش • شرایط غیرهوایی

کومار و چاکرابورتی (۲۰۰۶)؛ رانگچاینیکم و همکاران (۲۰۰۶)؛ کسای و همکاران (۲۰۱۱)؛ آرچنا و همکاران (۲۰۱۲)؛ ژو و گتینگ (۲۰۱۲)؛ لی و پارک (۲۰۱۳)؛ محسنی و همکاران (۲۰۱۳)؛ حکیزیماننا و همکاران (۲۰۱۷)؛ ژو و همکاران (۲۰۱۷)؛ رضوانی و همکاران (۲۰۱۹).

نتیجه‌گیری

ضرورت حذف نیترات از آب شرب برای پیشگیری از بروز بیماری‌ها در انسان، عامل مهمی در مطالعه و به‌روزرسانی تکنیک‌های حذف نیترات است. در مطالعه صورت گرفته تلاش شد تا با معرفی انواع روش‌های حذف نیترات، مکانیسم روش، نمونه مطالعات صورت گرفته، انعکاس ویژگی‌ها و نهایتاً مقایسه مختصر روش‌ها، یک پایه مطالعاتی برای ورود و نوآوری در تکنیک‌های کاهش نیترات ارائه شود. درک صحیح از ابعاد روش‌های مورد استفاده، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه، بهبود نتایج و تحقق استاندارد سازمان بهداشت جهانی می‌شود. در بین تکنیک‌های مورد مطالعه، تبادل یونی، اسمز معکوس و الکترودیالیز بهترین شرایط حذف نیترات در مقیاس صنعتی را فراهم می‌کنند، کارایی بالا، سهولت تکنیک، رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و استفاده در مقیاس صنعتی از مهم‌ترین ویژگی‌های مطلوب مشترک این روش‌ها است.

منابع

۳. مرزجی م، صبحی م، امین‌زاده ب، بغدادی م، و پرداختی ع، ۱۳۹۴، اصلاح سطح کربن فعال گرانوله با روش تصفیه نهایی با هدف نیترات‌زدایی آب آشامیدنی، مجله آب و فاضلاب، ۲۸(۲): ۱۰-۱.
۴. شاکری ن، قربانی ه، و غفاریان مقرب م، ه. ۱۳۹۹، بررسی اثر pH و اسید هیومیک بر مقدار آمونیوم و نیتريت حاصل از فرایند نیترات‌زدایی از آب توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۵): ۱۱۶-۱۲۸.
۵. دهقانی م، خاشی ز، و طباطبایی م، ر. ۱۳۸۷، بررسی کارایی حذف نیترات از آب آشامیدنی با استفاده از رزین آنیونی قوی، اولین کنفرانس بین‌المللی بحران آب، زابل، <https://civilica.com/doc/64411>
6. Ahn S. C. Oh S.Y. and Cha D. K. 2008. Enhanced reduction of nitrate by zero-valent iron at elevated temperatures. Journal of Hazardous Materials. 156(1-3): 17-22.
7. Amarine M. Lekhlif B. and Echaabi J. 2020. Nitrate removal from groundwater in Casablanca region (Morocco) by electrocoagulation. Groundwater for Sustainable Development. 11: 100452.
8. Kostraba J. N. Gay E. C. Rewers M. and Hamman R. F. 1992. Nitrate levels in community drinking waters and risk of IDDM: an ecological analysis. Diabetes care. 15(11): 1505-1508.
9. Anglada Á. Urtiaga A. and Ortiz I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 84(12):

۱. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ۱۳۸۸، استاندارد شماره ۱۰۵۳، آب آشامیدنی- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ۲۶ ص.
۲. صیدمحمدی ع، موحیدیان عطار ح، و نیک‌آئین م، ۱۳۹۱، حذف نیترات از آب آشامیدنی با استفاده از ارگانوسم‌های دینتریفایر اتوتروف در راکتور با بستر شناور، سلامت و محیط‌زیست، ۵(۴): ۳۹۹-۴۲۰.

- ground water. *Water Research*. 39(17): 4065-4072.
22. Demiral H. and Gündüzoğlu G. 2010. Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse. *Bioresource Technology*. 101(6): 1675-1680.
 23. Desai A. B. R. 2010. Reduction of perchlorate and nitrate by aluminum activated by pH change and electrochemically induced pitting corrosion. Texas AandM University.
 24. Ding J. Li W. Zhao Q.L. Wang K. Zheng Z. and Gao Y. Z. 2015. Electroreduction of nitrate in water: role of cathode and cell configuration. *Chemical Engineering Journal*. 271: 252-259.
 25. Hafshejani L. D. Hooshmand A. Naseri A. A. Mohammadi A. S. Abbasi F. and Bhatnagar A. 2016. Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar. *Ecological Engineering*. 95: 101-111.
 26. Duan S. Tong T. Zheng S. Zhang X. and Li S. 2020. Achieving low-cost, highly selective nitrate removal with standard anion exchange resin by tuning recycled brine composition. *Water research*. 173: 115571.
 27. Elazzouzi M. Haboubi K. and Elyoubi M.S. 2017. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*. 117: 614-626.
 28. Esfahani A. R. and Datta T. 2020. Nitrate removal from water using zero-valent aluminium. *Water and Environment Journal*. 34(1): 25-36.
 29. Esmaeilion F. 2020. Hybrid renewable energy systems for desalination. *Applied Water Science*. 10(3): 1-47.
 30. Fuentes C. A. B. and Hwang Y. 2021. Catalytic reduction of nitrate in reverse osmosis concentrate by using Pd-Cu/activated carbon felt. *Energy and Environment*. 32(1): 152-167.
 31. Gautam S. K. and Suresh S. 2007. Studies on dechlorination of DDT (1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane) using magnesium/palladium bimetallic system. *Journal of Hazardous Materials*. 139(1): 146-153.
 32. Georgeaud V. Diamand A. Borrut D. Grange D. and Coste M. 2011. Electrochemical treatment of wastewater polluted by nitrate: selective reduction to N₂ on boron-doped diamond cathode. *Water Science and Technology*. 63(2): 206-212.
 33. Ghafari S. Hasan M. and Aroua M.K. 2008. Bio-electrochemical removal of nitrate from water and wastewater-A review. *Bioresource* 1747-1755.
 10. Arahman N. Mulyati S. Lubis M. R. Takagi R. and Matsuyama H. 2017. January. Removal performance of NO₃⁻ ion from groundwater by electrodialysis. In AIP Conference Proceedings. 1788(1): 030090.
 11. Araújo R. Castro A. C. M. Baptista J. S. and Fiúza A. 2016. Nanosized iron based permeable reactive barriers for nitrate removal-Systematic review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 94: 29-34.
 12. Archana Sharma S. K. and Sobti R. C. 2012. Nitrate removal from ground water: A review. *E-Journal of Chemistry*. 9(4): 1667-1675.
 13. Bhatnagar A. Ji M. Choi Y. H. Jung W. Lee S. H. Kim S. J. and Kang J. W. 2008. Removal of nitrate from water by adsorption onto zinc chloride treated activated carbon. *Separation Science and Technology*. 43(4): 886-907.
 14. Bhatnagar A. Kumar E. and Sillanpää M. 2010. Nitrate removal from water by nano-alumina: Characterization and sorption studies. *Chemical Engineering Journal*. 163(3): 317-323.
 15. Chatterjee S. Lee D. S. Lee M. W. and Woo S. H. 2009. Nitrate removal from aqueous solutions by cross-linked chitosan beads conditioned with sodium bisulfate. *Journal of Hazardous Materials*. 166(1): 508-513.
 16. Chatterjee S. and Woo S. H. 2009. The removal of nitrate from aqueous solutions by chitosan hydrogel beads. *Journal of Hazardous Materials*. 164(2-3): 1012-1018.
 17. Chen G. F. Yuan Y. Jiang H. Ren S. Y. Ding L. X. Ma L. and Wang H. 2020. Electrochemical reduction of nitrate to ammonia via direct eight-electron transfer using a copper-molecular solid catalyst. *Nature Energy*. 5(8): 605-613.
 18. Chintala R. Mollinedo J. Schumacher T. E. Papiernik S. K. Malo D. D. Clay D. E. and Gulbrandson D. W. 2013. Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*. 179: 250-257.
 19. Choe J. K. Bergquist A. M. Jeong S. Guest J. S. Werth C. J. and Strathmann T. J. 2015. Performance and life cycle environmental benefits of recycling spent ion exchange brines by catalytic treatment of nitrate. *Water research*. 80: 267-280.
 20. Choe S. Liljestrang H. M. and Khim J. 2004. Nitrate reduction by zero-valent iron under different pH regimes. *Applied Geochemistry*. 19(3): 335-342.
 21. Dash B. P. and Chaudhari S. 2005. 'Electrochemical denitrification of simulated

- Al-CO₃ layered double hydroxide. *Inorganic Materials*. 44(7): 742-749.
45. Hrbacova P. Heviánková S. Chromíková J. and Thomas J. 2017. Electrodialysis process to reduce the concentration of Nitrates in waters. *Inzynieria Mineralna*. 2017(1): 125-130.
46. Hu Q. Chen N. Feng C. and Hu W. 2015. 'Nitrate adsorption from aqueous solution using granular chitosan-Fe³⁺ complex', *Applied Surface Science*. 347: 1-9.
47. Hurtado-Martinez M. Munoz-Palazon B. Robles-Arenas V. M. Gonzalez-Martinez A. and Gonzalez-Lopez J. 2021. Biological nitrate removal from groundwater by an aerobic granular technology to supply drinking water at pilot-scale. *Journal of Water Process Engineering*. 40: 101786.
48. Ileri B. Ayyildiz O. and Apaydin O. 2015. Ultrasound-assisted activation of zero-valent magnesium for nitrate denitrification: Identification of reaction by-products and pathways. *Journal of Hazardous Materials*. 292(3): 1-8.
49. Kalaruban M. Loganathan P. Shim W. G. Kandasamy J. Ngo H. H. 2016a. Enhanced removal of nitrate from water using amine-grafted agricultural wastes, *Science of the Total Environment*. 565: 503-510.
50. Kalaruban M. Loganathan P. Shim W. G. Kandasamy J. and Naidu G. 2016b. Removing nitrate from water using iron-modified Dowex 21K XLT ion exchange resin: Batch and fluidised-bed adsorption studies, *Separation and Purification Technology*. 158: 62-70.
51. Kalaruban M. Loganathan P. Kandasamy J. Naidu R. and Vigneswaran S. 2017. 'Enhanced removal of nitrate in an integrated electrochemical-adsorption system', *Separation and Purification Technology*. 189: 260-266.
52. Karanasios K. A. Vasiliadou I. A. Pavlou S. and Vayenas D. V. 2010. Hydrogenotrophic denitrification of potable water: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 180(1-3): 20-37.
53. Karthikeyan P. and Meenakshi S. 2020. Enhanced removal of phosphate and nitrate ions by a novel ZnFe LDHs-activated carbon composite. *Sustainable Materials and Technologies*. 25: e00154.
54. Kassaei M. Z. Motamedi E. Mikhak A. and Rahnemaie R. 2011. Nitrate removal from water using iron nanoparticles produced by arc discharge vs. reduction, *Chemical Engineering Journal*. 166(2): 490-495.
55. Katal R. Baei M. S. Rahmati H. T. and Esfandian H. 2012. Kinetic, isotherm and thermodynamic study of nitrate adsorption Technology. 99(10): 3965-3974.
34. Ghanbari F. Moradi M. Mohseni-Bandpei A. Gohari F. Abkenar T. M. and Aghayani E. 2014. Simultaneous application of iron and aluminum anodes for nitrate removal: a comprehensive parametric study. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 11(6): 1653-1660.
35. Ghazouani M. Akrouit H. and Boussemlil L. 2017. Nitrate and carbon matter removals from real effluents using Si/BDD electrode. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(11): 9895-9906.
36. Ghodbane O. Sarrazin M. Roué L. and Bélanger D. 2008. Electrochemical reduction of nitrate on pyrolytic graphite-supported Cu and Pd-Cu electrocatalysts. *Journal of the Electrochemical Society*. 155(6): F117.
37. Govindan K. Noel M. and Mohan R. 2015. Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches. *Journal of Water Process Engineering*. 6: 58-63.
38. Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum (no date). Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950> (Accessed: 27 March 2021).
39. Hakizimana J. N. Gourich B. Chafi M. Stiriba Y. Vial C. Drogui P. and Naja J. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 404: 1-21.
40. Hamoudi S. Saad R. and Belkacemi K. 2007. Adsorptive removal of phosphate and nitrate anions from aqueous solutions using ammonium-functionalized mesoporous silica. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 46(25): 8806-8812.
41. Hassan M. L. Kassem N. F. and Abd El-Kader A. H. 2010. Novel Zr(IV)/sugar beet pulp composite for removal of sulfate and nitrate anions. *Journal of Applied Polymer Science*. 117(4): 2205-2212.
42. He T. Ye Q. Sun Q. Cai X. Ni J. Li Z. and Xie D. 2018. Removal of nitrate in simulated water at low temperature by a novel psychrotrophic and aerobic bacterium, *Pseudomonas taiwanensis* Strain J. *BioMed research international*. 2018: 1-9.
43. Hojjat Ansari M. and Basiri Parsa J. 2016. Removal of nitrate from water by conducting polyaniline via electrically switching ion exchange method in a dual cell reactor: Optimizing and modeling. *Separation and Purification Technology*. 169: 158-170.
44. Hosni K. and Srasra E. 2008. Nitrate adsorption from aqueous solution by M II-

- Zimmermann T. de Larraya U. P. Mathew A. P. and Bismarck A. 2016. Nitrate removal from water using a nanopaper ion-exchanger. *Environmental Science: Water Research and Technology*. 2(1): 117-124.
67. Mehrabi N. Soleimani M. Yeganeh M. M. and Sharififard H. 2015. Parameter optimization for nitrate removal from water using activated carbon and composite of activated carbon and Fe₂O₃ nanoparticles. *RSC Advances*. 5(64): 51470-51482.
68. Mirabi M. Ghaderi E. and Rasouli Sadabad H. 2017. Nitrate reduction using hybrid system consisting of zero valent magnesium powder/activated carbon (Mg⁰/AC) from water. *Process Safety and Environmental Protection*. 111: 627-634.
69. Mishra P. C. and Patel R. K. 2009. Use of agricultural waste for the removal of nitrate-nitrogen from aqueous medium. *Journal of Environmental Management*. 90(1): 519-522.
70. Mizuta K. Matsumoto T. Hatate Y. Nishihara K. and Nakanishi T. 2004. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology*. 95(3): 255-257.
71. Mohseni-Bandpi A. Elliott D. J. and Zazouli M. A. 2013. Biological nitrate removal processes from drinking water supply - A review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 11(1): 1-11.
72. Namasivayam C. and Höll W. H. 2005. Quaternized biomass as an anion exchanger for the removal of nitrate and other anions from water. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 80(2): 164-168.
73. Nujić M. Milinković D. and Habuda-Stanić M. 2017. Nitrate removal from water by ion exchange. *Croat. J. Food Sci. Technol.* 9(2): 182-186.
74. Öztürk N. and Bektaş T.E. 2004. Nitrate removal from aqueous solution by adsorption onto various materials. *Journal of Hazardous Materials*. 112(1-2): 155-162.
75. Pirsaeheb M. Khosravi T. Sharafi K. and Mouradi M. 2016. Comparing operational cost and performance evaluation of electrodialysis and reverse osmosis systems in nitrate removal from drinking water in Golshahr, Mashhad. *Desalination and Water Treatment*. 57(12): 5391-5397.
76. Province S. 2014. *Ournal of*, *Asian journal of chemistry*. 26(18): 6097-6100.
77. Rahman N. and Khan M. F. 2015. Development of poly-o-toluidine zirconium (IV) ethylenediamine as a new adsorbent for nitrate: Equilibrium modelling and thermodynamic studies. *Journal of Industrial* from aqueous solution using modified rice husk. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 18(1): 295-302.
56. Khajeh M. Laurent S. and Dastafkan K. 2013. Nanoadsorbents: Classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media). *Chemical Reviews*. 113(10): 7728-7768.
57. Koay P. P. Alam M. S. Alam M. M. Etesami M. Hasnat M. A. and Mohamed N. 2016. Electrocatalytic reduction of nitrate ions at a poly crystalline SnCu modified platinum surface by using an H⁺ conducting solid polymer in a sandwich type membrane reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 4(4): 4494-4502.
58. Kumar M. and Chakraborty S. 2006. Chemical denitrification of water by zero-valent magnesium powder. *Journal of Hazardous Materials*. 135(1-3): 112-121.
59. Lee G. and Park J. 2013. Reaction of zero-valent magnesium with water: Potential applications in environmental remediation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 102: 162-174.
60. Li M. Feng C. Zhang Z. Yang S. and Sugiura N. 2010. Treatment of nitrate contaminated water using an electrochemical method. *Bioresource Technology*. 101(16): 6553-6557.
61. Li W. Xiao C. Zhao Y. Zhao Q. Fan R. and Xue J. 2016. Electrochemical Reduction of High-Concentrated Nitrate Using Ti/TiO₂ Nanotube Array Anode and Fe Cathode in Dual-Chamber Cell. *Catalysis Letters*. 146(12): 2585-2595.
62. Luk G. K. and Au-Yeung W. C. 2002. Experimental investigation on the chemical reduction of nitrate from groundwater. *Advances in Environmental Research*. 6(4): 441-453.
63. Majlesi M. Mohseny S. M. Sardar M. Golmohammadi S. and Sheikhmohammadi A. 2016. Improvement of aqueous nitrate removal by using continuous electrocoagulation/electroflotation unit with vertical monopolar electrodes. *Sustainable Environment Research*. 26(6): 287-290.
64. Malakootian M. Yousefi N. and Fatehizadeh A. 2011. Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 8(1): 107-114.
65. Matsunaga A. and Yasuhara A. 2005. Dechlorination of polychlorinated organic compounds by electrochemical reduction with naphthalene radical anion as mediator. *Chemosphere*. 59(10): 1487-1496.
66. Mautner A. Maples H. A. Sehaqui H.

89. Xu J. Pu Y. Qi W. K. Yang X. J. Tang Y. Wan P. and Fisher A. 2017. Chemical removal of nitrate from water by aluminum-iron alloys. *Chemosphere*. 166: 197-202.
90. Yao F. Yang Q. Zhong Y. Shu X. Chen F. Sun J. and Li X. 2019. Indirect electrochemical reduction of nitrate in water using zero-valent titanium anode: Factors, kinetics, and mechanism. *Water Research*. 157: 191-200.
91. Zhang Y. Douglas G. B. Kaksonen A. H. Cui L. and Ye Z. 2019. Microbial reduction of nitrate in the presence of zero-valent iron. *Science of the Total Environment*. 646: 1195-1203.
92. Zhang Z. King J. F. Szczuka A. Chuang Y. H. and Mitch W. A. 2020. Pilot-scale ozone/biological activated carbon treatment of reverse osmosis concentrate: Potential for synergism between nitrate and contaminant removal and potable reuse. *Environmental Science: Water Research and Technology*. 6(5): 1421-1431.
93. Zhao Y. Feng C. Wang Q. Yang Y. Zhang Z. and Sugiura N. 2011. Nitrate removal from groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-electrode reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 192(3): 1033-1039.
94. Zhu I. and Getting T. 2012. A review of nitrate reduction using inorganic materials. *Environmental Technology Reviews*. 1(1): 46-58.
95. Dehghani M. Haidari E. Shamsavani S. and Shamsedini N. 2015. Removal of Nitrate in the Aqueous Phase Using Granular Ferric Hydroxide. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 7(2): 25-31.
78. Rezaee A. Godini H. Dehestani S. and Khavanin A. 2008. Application of impregnated almond shell activated carbon by zinc and zinc sulfate for nitrate removal from water. *Iranian journal of environmental health science and engineering (IJEHSE)*. 5: 125-130.
79. Rezvani F. Sarrafzadeh M. H. Ebrahimi S. and Oh H. M. 2019. Nitrate removal from drinking water with a focus on biological methods: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 26(2): 1124-1141.
80. van Rijn J. Tal Y. and Schreier H. J. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering*. 34(3): 364-376.
81. Ruangchainikom C. Liao C. H. Anotai J. and Lee M. T. 2006. Effects of water characteristics on nitrate reduction by the Fe 0/CO2 process. *Chemosphere*. 63(2): 335-343.
82. Schipper L. A. Cameron S. C. and Warneke S. 2010. Nitrate removal from three different effluents using large-scale denitrification beds. *Ecological Engineering*. 36(11): 1552-1557.
83. Shuai D. Choe J. K. Shapley J. R. and Werth C. J. 2012. Enhanced activity and selectivity of carbon nanofiber supported Pd catalysts for nitrite reduction. *Environmental Science and Technology*. 46(5): 2847-2855.
84. Su L. Li K. Zhang H. Fan M. Ying D. Sun T. and Jia J. 2017. Electrochemical nitrate reduction by using a novel Co3O4/Ti cathode. *Water Research*. 120(3): 1-11.
85. Vasudevan S. Epron F. Lakshmi J. Ravichandran S. Mohan S. and Sozhan G. 2010. Removal of NO3- from drinking water by electrocoagulation- An alternate approach, *Clean- Soil, Air, Water*. 38(3): 225-229.
86. Wang T. Lin J. Chen Z. Megharaj M. and Naidu R. 2014. Green synthesized iron nanoparticles by green tea and eucalyptus leaves extracts used for removal of nitrate in aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*. 83: 413-419.
87. Xiao Y. Zheng Y. Wu S. Yang Z. H. and Zhao F. 2015. Bacterial Community Structure of Autotrophic Denitrification Biocathode by 454 Pyrosequencing of the 16S rRNA Gene. *Microbial Ecology*. 69(3): 492-499.
88. Xu D. Li Y. Yin L. Ji Y. Niu J. and Yu Y. 2018. Electrochemical removal of nitrate in industrial wastewater. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 12(1): 1-14.