

بررسی اثرات بهداشتی و زیست محیطی آب حاوی نیترات

سید علیرضا موسوی^۱، فرید ناییبی^{۱*}

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- هسته تحقیقاتی فناوری های بهداشت، ایمنی و محیط زیست، پژوهشکده فن آوری های سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: faridnayebiil@gmail.com

چکیده:

دسترسی به آب آشامیدنی سالم برای حفظ سلامت انسان ضروری است، اما آلودگی منابع آب، به ویژه با نیترات، در ایران و جهان یکی از چالش های جدی به شمار می رود. نیترات (NO_3^-) از منابع طبیعی مانند چرخه نیتروژن و صاعقه، و نیز از منابع انسانی شامل فعالیت های کشاورزی، فاضلاب شهری و پساب های صنعتی وارد آب می شود. این ترکیب به راحتی در آب حل شده و از طریق مصرف سبزیجات، گوشت و آب آشامیدنی وارد بدن می گردد، جایی که می تواند به نیتريت و نیتروزآمین های سرطان زا تبدیل شود و خطر بروز متهموگلوبینمیا، سرطان های گوارشی، اختلالات تیروئیدی و بیماری های قلبی را افزایش دهد. در بعد زیست محیطی، نیترات موجب یوتروفیکاسیون، کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم های آبی می شود. در این بررسی مروری، مطالعات مرتبط با موضوع از پایگاه های اطلاعاتی Google Scholar، SID و MAGIRAN با استفاده از کلیدواژه های «نیترات»، «اثرات بهداشتی»، «اثرات زیست محیطی» و «منابع نیترات» به زبان فارسی جستجو و تحلیل شدند. بر اساس یافته های استخراج شده، پایش مستمر کیفیت آب، مدیریت منابع آلاینده، اصلاح الگوی کشت، استفاده از کودهای زیستی و ارتقای آگاهی عمومی از جمله راهکارهای مؤثر برای کنترل نیترات هستند. این مقاله با هدف بررسی جامع منابع، اثرات بهداشتی و زیست محیطی، عوامل تشدیدکننده و روش های کاهش نیترات در آب تدوین شده است تا زمینه ساز ارتقای سلامت عمومی و پایداری اکوسیستم های آبی باشد.

واژه های کلیدی: نیترات، اثرات بهداشتی، اثرات زیست محیطی، منابع نیترات

۱-مقدمه

دسترسی پایدار به آب آشامیدنی سالم برای سلامت و رفاه جوامع انسانی ضروری است، اما آلودگی منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، یک چالش جهانی است که در دهه‌های اخیر به دلیل فعالیت‌های انسانی شدت یافته است. بیماری‌های ناشی از آب آلوده مسئول حدود ۸۰٪ بیماری‌ها و مرگ‌ومیر در کشورهای در حال توسعه بوده و سالانه بیش از ۵ میلیون نفر را قربانی می‌کند (۱). در ایران، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، هستند، اما آلودگی این منابع به نترات، شایع‌ترین آلاینده غیرمتمرکز، نگرانی‌های جدی ایجاد کرده است (۲). نترات (NO_3^-) در مرحله نهایی اکسیداسیون آمونیاک و مواد آلی در چرخه نیتروژن تولید می‌شود و از منابع متعددی مانند کودهای شیمیایی و حیوانی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، نفوذ پساب از چاه‌های جذبی، و شیرابه‌های محل دفن زباله وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود (۱، ۳). فعالیت‌های کشاورزی، به‌ویژه استفاده بی‌رویه از کودهای نیتروژنی و آبیاری محصولات لگومینه، مهم‌ترین منبع غیرنقطه‌ای نترات است که با تجاوز از ظرفیت نیتروژن‌زدایی خاک، به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند (۳، ۴).

نترات علاوه بر منابع محیطی، از طریق سبزیجات، گوشت و آب آشامیدنی وارد بدن انسان شده و از مسیر L-arginine-NO در بدن سنتز می‌شود. در دستگاه گوارش، نترات توسط باکتری‌های دهانی به نیتريت و سپس به نیتروزآمین‌های سرطان‌زا تبدیل می‌شود، که خطر بیماری‌هایی مانند مت‌هموگلوبینمیا (سیانوز نوزادان)، سرطان‌های گوارشی (مری، معده، روده بزرگ) و اختلالات تیروئیدی را افزایش می‌دهد (۵). با این حال، نترات در مقادیر کم اثرات مثبتی بر سلامت عروق و عضله‌سازی دارد، که نشان‌دهنده دوگانگی اثر این ترکیب است (۶). از منظر زیست‌محیطی، غلظت بالای نترات در آب باعث یوتروفیکاسیون، کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم‌های آبی می‌شود (۷) در ایران، توسعه شهری، تخلیه فاضلاب در چاه‌های جذبی و فقدان سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب مناسب، آلودگی نترات را تشدید کرده است (۸).

مدیریت نترات نیازمند رویکردهای چندجانبه است. استفاده از کودهای زیستی و باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند باقیمانده نترات در محصولات کشاورزی و نفوذ آن به آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد (۹). پایش مستمر کیفیت آب با ابزارهایی مانند شاخص کیفیت آب (WQI)، که پارامترهای شیمیایی و فیزیکی مانند pH و هدایت الکتریکی را به یک عدد واحد تبدیل می‌کند، و ارزیابی

ریسک سلامت، برای شناسایی و کنترل آلودگی نیترات ضروری است PH پایین باعث خوردگی لوله‌ها و تحریک پوست و چشم، و Ph بالا باعث رسوب‌گذاری و کاهش کارایی کلر می‌شود، در حالی که هدایت الکتریکی با افزایش یون‌های محلول، مانند نیترات، بالا رفته و بر کیفیت آب اثر می‌گذارد (۱۰). این مقاله مروری به بررسی منابع نیترات، چرخه نیتروژن، اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی، و روش‌های کنترل و کاهش آلودگی نیترات می‌پردازد تا با ارائه راهکارهای علمی و عملی، به حفاظت از منابع آب و بهبود سلامت عمومی در ایران و جهان کمک کند (۱۱).

۲- منابع نیترات

نیترات (NO_3^-) یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های غیرمتمرکز در منابع آب سطحی و زیرزمینی است و از منابع طبیعی و انسانی متعددی ناشی می‌شود. این ترکیب نیتروژنی، که در مرحله نهایی اکسیداسیون آمونیاک و مواد آلی در چرخه نیتروژن تولید می‌شود، از طریق فعالیت‌های کشاورزی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، و فرآیندهای طبیعی وارد محیط می‌شود (۱۲). چرخه نیتروژن شامل فرآیندهای آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون و آناموکس است که توسط میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها و آرکی‌ها) هدایت می‌شود. پیش از اختراع فرآیند هابر-بوش در سال ۱۹۰۹، تقریباً تمام نیتروژن زیستی توسط میکروارگانیسم‌ها تأمین می‌شد. صاعقه نیز سالانه ۵ تا ۱۰ هزار تن نیتروژن را تثبیت کرده و به شکل نیترات وارد خاک و آب می‌کند (۱۳). به دلیل حلالیت بالا و پایداری شیمیایی، نیترات در خاک و آب تجمع می‌یابد و از طریق نفوذ به آب‌های زیرزمینی، مصرف آب شرب و محصولات کشاورزی—به‌ویژه سبزیجات پهن‌برگ—وارد زنجیره غذایی انسان می‌شود (۱۳، ۱۴).

۲-۱- منابع طبیعی نیترات

نیترات به‌صورت طبیعی از طریق چرخه نیتروژن در خاک، آب و گیاهان تولید می‌شود. فرآیند نیتریفیکاسیون، که طی آن آمونیاک توسط باکتری‌هایی مانند *Nitrosomonas* و *Nitrobacter* به نیتريت و سپس نیترات اکسید می‌شود، منبع اصلی نیترات در خاک است. صاعقه نیز با تثبیت نیتروژن اتمسفری سالانه ۵ تا ۱۰ هزار تن نیترات تولید می‌کند که از طریق بارندگی به خاک و آب‌های سطحی منتقل می‌شود (۱۵). در گیاهان، نیترات شکل اصلی نیتروژن قابل جذب است و در سبزیجات پهن‌برگ مانند اسفناج (۲۵۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کاهو (۲۱۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کرفس (۵۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تجمع می‌یابد. این تجمع به‌ویژه در دمبرگ و برگ‌ها با افزایش اندازه برگ شدت می‌یابد، زیرا نیترات به‌عنوان ذخیره نیتروژن در این بخش‌ها انباشته می‌شود (۱۶). در جلبک‌ها مانند *Scenedesmus*، نیتروژن مورد نیاز از نیترات، آمونیوم و اوره تأمین می‌شود. این جلبک آمونیوم را به دلیل جذب سریع‌تر ترجیح می‌دهد، اما در حضور هر دو، نیترات پس از مصرف آمونیوم استفاده می‌شود. بهترین رشد در غلظت ۱۵ میلی‌مولار نیترات (۱.۲۸ گرم بر لیتر نیترات سدیم) و ۱۵ میلی‌مولار آمونیوم (۰.۸ گرم بر لیتر کلرید آمونیوم) مشاهده شد، که نسبت به

جلبک‌های دیگر مانند *Chlorella* (۶-۱۲ میلی‌مولار) و *Ankistrodesmus* (۱۰ میلی‌مولار) بالاتر است (۱۷). این منابع طبیعی نشان‌دهنده نقش کلیدی چرخه نیتروژن در توزیع و تأمین نیترات در محیط زیست هستند.

۲-۲- منابع انسانی نیترات

فعالیت‌های انسانی مهم‌ترین منابع نیترات در منابع آب هستند و به دو دسته نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم می‌شوند. منابع غیرنقطه‌ای شامل فعالیت‌های کشاورزی—به‌ویژه استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و حیوانی، آبیاری با آب‌های حاوی نیتروژن و رسوبات نیتروژنی ناشی از ته‌نشست خشک—می‌شوند (۱۸). در دشت زیدون (جنوب شرق خوزستان)، نیترات عمدتاً ناشی از کشت برنج، گندم و جو و استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و حیوانی است (۱۹). دفع غیراصولی فاضلاب‌های روستایی نیز به افزایش نیترات در آب‌های زیرزمینی کمک کرده و غلظت آن در بخش‌های شمالی و مرکزی دشت به ۱۰۸ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است (۱۹). در دشت هشتگرد، توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی منابع اصلی آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی هستند که نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب است (۲۰). در گلستان، استفاده بیش از حد از کودهای ازته در کشاورزی و نشت فاضلاب‌های خانگی و شهری، آلودگی نیترات در آبخوان‌ها را تشدید کرده است (۲۱). در اردبیل، فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، همراه با کودهای حیوانی و شیمیایی، عوامل اصلی افزایش نیترات هستند (۲۲). ترکیبات زمین‌شناسی منطقه نیز در تغییرات غلظت نیترات نقش دارند و نشان‌دهنده تأثیر ساختارهای زمین‌شناختی بر توزیع نیترات است (۲۲). کوددهی بیش از حد و شرایط نامناسب خاک، مانند خشکسالی و کمبود عناصر غذایی، به تجمع نیترات در گیاهان و نفوذ آن به آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند. این شرایط باعث کاهش ظرفیت نیتروژن‌زدایی خاک شده و نیترات اضافی از طریق فروشویی به آب‌های زیرزمینی منتقل می‌شود (۱۵). نابع نقطه‌ای شامل سپتیک تانک‌ها، لاگون‌های کارخانه‌های لبنیاتی و دامداری‌ها، و تخلیه پساب از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به منابع آب سطحی و زیرزمینی هستند در گرگان، تخلیه فاضلاب‌های خانگی در چاه‌های جذبی، تراوایی بالای خاک (شن و ماسه)، شیب توپوگرافی از جنوب به شمال، و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، نیترات را به بخش‌های شمالی آبخوان زیارت هدایت کرده است (۲۳). قطع درختان جنگلی و توسعه روزافزون شهری نیز شستشوی نیتروژن خاک را تشدید کرده، زیرا جنگل‌ها نقش مهمی در حفظ نیتروژن خاک دارند (۸، ۲۳). این منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای نشان‌دهنده پیچیدگی آلودگی نیترات و ضرورت مدیریت یکپارچه آن هستند.

۳- عوامل تشدیدکننده منابع نیترات

عوامل محیطی و انسانی متعددی به افزایش نیترات در منابع آب کمک می‌کنند. تراوایی بالای خاک، مانند شن و ماسه، در گرگان و دشت زیدون، نفوذ نیترات ناشی از فاضلاب و کودهای کشاورزی را تسهیل می‌کند (۸، ۲۳). شیب توپوگرافی و جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب به شمال در گرگان، نیترات را به مناطق پایین‌دست منتقل کرده و آلودگی را در بخش‌های شمالی آبخوان زیارت

تشدید می‌کند (۸، ۲۳). در دشت زیدون، آبیاری گسترده در فصل خشک (تیر تا آبان) و کوددهی بیش از حد در مزارع برنج، گندم و جو، فروشویی نیتрат به آب‌های زیرزمینی را افزایش داده است (۱۹). ترکیبات زمین‌شناسی در اردبیل، مانند وجود لایه‌های رسوبی غنی از نیتروژن، نیز به افزایش نیترات کمک کرده‌اند (۲۲). خشکسالی و کمبود عناصر غذایی در خاک، با کاهش ظرفیت نیتروژن‌زدایی، تجمع نیترات در گیاهان و نفوذ آن به آب‌های زیرزمینی را تشدید می‌کنند (۲۲). علاوه بر این، قطع جنگل‌ها در گرگان با کاهش توانایی خاک در حفظ نیتروژن، شستشوی نیترات به آب‌های زیرزمینی را افزایش داده است. این عوامل نشان‌دهنده تعامل پیچیده فرآیندهای طبیعی و انسانی در آلودگی نیترات هستند (۸، ۲۳).

۴- اهمیت منابع نیترات در مدیریت کیفیت آب

منابع نیترات، به دلیل تنوع و گستردگی، چالش‌های جدی برای مدیریت کیفیت آب ایجاد می‌کنند (۸، ۲۳). در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، که آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب هستند، آلودگی نیترات به دلیل کشاورزی گسترده و فاضلاب‌های غیرمدیریت‌شده به یک معضل کلیدی تبدیل شده است (۲۳). در دشت زیدون، تمرکز بالای نیترات در بخش‌های شمالی و مرکزی به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و فاضلاب‌های روستایی، نیاز به اصلاح الگوی کشت و مدیریت فاضلاب را نشان می‌دهد (۱۹). در گرگان، چاه‌های قدیمی در مناطق پرجمعیت آبخوان زیارت، به دلیل نفوذ فاضلاب و کاهش قابلیت تصفیه خاک، حاوی نیترات بالایی هستند (۲۳). در اردبیل، ترکیب منابع انسانی مانند فاضلاب و کشاورزی و ویژگی‌های زمین‌شناسی، پایش مستمر و مدیریت منابع آب را ضروری کرده است (۲۲). همچنین، در جلبک‌های پرورشی، استفاده از نیترات و آمونیوم به‌عنوان منابع نیتروژن نشان‌دهنده پتانسیل زیست‌سنجی برای پایش کیفیت آب است (۲۲). شناسایی دقیق منابع نیترات، از جمله کشاورزی، فاضلاب و فرآیندهای طبیعی، برای طراحی راهکارهای مؤثر کاهش آلودگی و حفاظت از منابع آب، حیاتی است (۲۲).

۵- اثرات بهداشتی نیترات

نیترات (NO_3^-) یکی از شایع‌ترین آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی و سطحی است و از طریق مصرف آب شرب، سبزیجات پهن‌برگ مانند اسفناج (۲۵۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کاهو (۲۱۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کرفس (۵۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، و همچنین گوشت وارد بدن انسان می‌شود (۲۲). این ترکیب نیتروژنی، که در چرخه نیتروژن از اکسیداسیون آمونیاک و مواد آلی تولید می‌شود، هم از منابع خارجی (آب و غذا) و هم از مسیر داخلی ال-آرژنین و اکسید نیتریک (L-arginine-NO) تأمین می‌گردد (۲۴). در دستگاه گوارش، نیترات توسط باکتری‌های دهانی به نیتريت (NO_2^-) و سپس در معده به نیتروزآمین‌های سرطان‌زا (N نیتروزو ترکیبات یا NOC) تبدیل می‌شود. این فرآیند خطر بیماری‌هایی مانند مت‌هموگلوبینمیا، سرطان‌های گوارشی (مری، معده، روده بزرگ)، اختلالات تیروئیدی، مشکلات قلبی و ناهنجاری‌های مادرزادی را افزایش می‌دهد (۲۵، ۲۶). با این حال، نیترات در مقادیر کم (۲۲۲ میلی‌گرم در روز برای یک فرد ۶۰ کیلوگرمی) اثرات مثبتی بر سلامت عروق و فرآیندهای عضلانی دارد، که نشان‌دهنده

دوگانگی اثر این ترکیب است. این بخش به بررسی جامع اثرات بهداشتی نیترات، شامل متابولیسم، بیماری‌های مرتبط، گروه‌های آسیب‌پذیر و عوامل تشدیدکننده می‌پردازد (به جدول ۱ مراجعه شود).

در ایران، میانگین غلظت نیترات در منابع آب آشامیدنی حدود ۱۰ تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است، در حالی که در سطح جهان این مقدار معمولاً ۱۵ تا ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر است (۲). درصد نمونه‌هایی که در ایران بیش از حد مجاز ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر دارند کمتر از ۱۰ درصد برآورد شده، در حالی که در جهان این میزان می‌تواند به ۳۰ تا ۵۰ درصد یا بیشتر برسد (۱۶، ۲۷، ۲۸). همچنین میانگین غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی ایران حدود ۱۵ تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر است، در حالی که در جهان این مقدار در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد (۲، ۲۸). در مورد آب‌های سطحی، در ایران معمولاً غلظت نیترات کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر است، در حالی که در جهان هرچند آب‌های سطحی معمولاً غلظت کمتری نسبت به آب‌های زیرزمینی دارند، اما در رودخانه‌ها و مناطق آلوده می‌توانند به مقادیر بالاتری برسند (۲۶-۲۸) (جدول شماره ۲).

جدول ۱: اثرات بهداشتی نیترات

موضوع	توضیحات
متابولیسم نیترات	تبدیل به نیتريت توسط باکتری های دهانی و سپس به نیتروزآمین ها در معده (۲۸)
بیماری های مرتبط	مت هموگلوبینمیا، سرطان مری و معده، اختلالات تیروئیدی، مشکلات قلبی، ناهنجاری های مادرزادی (۲۷، ۲۸).
گروه های آسیب پذیر	نوزادان کوچکتر از ۶ ماه (۲۷، ۲۸)
اثرات مثبت نیترات	بهبود سلامت عروق و فرایند های عضلانی در مقادیر کم (۲۷، ۲۸)
دوگانگی اثر نیترات	مقادیر کم مفید، مقادیر بالا سمی و سرطان زا (۲، ۲۷)

جدول ۲: مقایسه غلظت نیترات آب در ایران و جهان

مراجع	جهان	ایران	شاخص مقایسه
(۲۹, ۲۷, ۱)	۶۰-۱۵ mg/L (در برخی مناطق حتی < 100 mg/L)	۳۰-۱۰ mg/L (اغلب زیر حد مجاز ۵۰ mg/L)	میانگین غلظت نیترات در منابع آب آشامیدنی
(۳۱, ۳۰)	۵۰-۳۰٪ یا بیشتر در مناطق پرخطر	کمتر از ۱۰ درصد در بیشتر مطالعات	درصد نمونه های بالاتر از حد مجاز (۵۰ میلی گرم بر لیتر)
(۲۶, ۱۸)	۵۰-۱۰۰ mg/L (در برخی دشتهای کشاورزی بالاتر)	۱۵-۳۰ mg/L	میانگین آب های زیر زمینی
(۳۲, ۲۸, ۱۶)	کمتر از آب زیرزمینی اما در رودخانه های آلوده ممکن است بالا باشد	اغلب زیر ۱۵ mg/L (جز روان آب های شهری)	میانگین آب های سطحی

۱-۵- متابولیسم نیترات در بدن

نیترات از طریق منابع غذایی (۶۰-۸۰٪ از سبزیجات پهن برگ، آب شرب، و گوشت وارد بدن شده و روزانه ۷۵ تا ۱۰۰ میلی گرم از مواد غذایی و ۶۳ میلی گرم از سنتز داخلی (از مسیر L-arginine-NO) تأمین می شود. نیترات به سرعت جذب خون شده و نیمه عمر پلاسمایی آن حدود ۵ ساعت است (۲۷). حدود ۵ تا ۲۰٪ نیترات توسط باکتری های دهانی به نیتريت تبدیل می شود، که بخشی از آن در معده، به ویژه در pH بالا، به نیتروزآمین های سرطان زا تبدیل می شود. حدود ۸۰٪ نیترات مصرف شده دفع می شود، اما باقی مانده در دستگاه گوارش به نیتريت و نیتروزآمین ها تبدیل شده و اثرات سمی ایجاد می کند (۳۲، ۳۳). دوز کشنده نیترات برای بزرگسالان ۷ تا ۳۵ گرم است، در حالی که مقدار مجاز روزانه ۲۲۲ میلی گرم (۳۷ میلی گرم بر کیلوگرم وزن بدن برای یک فرد ۶۰ کیلوگرمی) تعیین شده است (۳۳). نیتريت ها، به دلیل تبدیل به متهموگلوبین و کاهش فشار شریانی، خطر بیشتری نسبت به نیترات دارند (۲۸). این متابولیسم پیچیده نشان دهنده اهمیت کنترل غلظت نیترات در آب و غذا برای کاهش خطرات بهداشتی است (۲۵، ۲۶، ۳۴).

۲-۵- متهموگلوبینمیا و اثرات تنفسی

متهموگلوبینمیا (یا سیانوز نوزادان) یکی از مهم ترین خطرات بهداشتی ناشی از نیترات در آب شرب است، به ویژه برای نوزادان زیر ۶ ماه که آسیب پذیرترین گروه را تشکیل می دهند (۳۲). در بدن، نیترات به نیتريت احیا شده و با تبدیل هموگلوبین به متهموگلوبین، ظرفیت انتقال اکسیژن خون را کاهش می دهد. این فرآیند منجر به علائمی مانند تنگی نفس، سیانوز و در موارد شدید، خفگی می شود (۳۲، ۳۳، ۳۵). در نوزادان ۰ تا ۳ ماه، کمبود آنزیم های کاهنده متهموگلوبین این خطر را تشدید می کند. در اراک، غلظت

نیترا ت در ۸۰٪ شبکه آب شرب بیش از ۱۰ میلی گرم بر لیتر (بر اساس نیتروژن) گزارش شده است، که طبق استانداردهای WHO و ایران برای شرب غیرمجاز محسوب می شود و خطر متهموگلوبینمیا را در نوزادان افزایش می دهد (۳۶). در گرگان، نیترا ت موجود در آب شرب اثرات سمی شدیدی بر کودکان دارد، به ویژه در چاه های قدیمی آبخوان زیارت که به دلیل تخلیه فاضلاب های خانگی، آلودگی بالایی دارند (۸، ۲۳). علاوه بر این، pH بالای معده در نوزادان و افراد با اختلالات گوارشی، تبدیل نیترا ت به نیتريت را تسريع کرده و خطر متهموگلوبینمیا را افزایش می دهد (۸، ۳۷، ۳۸).

۳-۵- سرطان های گوارشی

نیترا ت به دلیل تبدیل به نیتروزامین های سرطان زا (NOC) با سرطان های گوارشی، به ویژه سرطان مری، معده، و روده بزرگ، مرتبط است (۲۳). سرطان معده با شیوع ۹.۹٪ دومین سرطان شایع جهان و در ایران با ۱۵.۸٪ پس از سرطان پوست (۲۷.۶٪) قرار دارد (۸). در اصفهان، این سرطان سومین سرطان شایع است و ایران رتبه پنجم جهانی را در شیوع آن دارد (۸، ۲۳). در گلستان، مطالعه ای در سال های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ نشان داد که افزایش نیترا ت در آب شرب با بروز سرطان مری رابطه معنی داری دارد (ضریب همبستگی ۰.۶۲۴، $p=0.13$)، اما نیتريت رابطه معنی داری با سرطان مری (۰.۰۶۹، $p=0.808$) یا معده (۰.۰۰۵، $p=0.987$) نداشت (۲۱). این مطالعه تأیید کرد که نیترا ت در محدوده استاندارد ملی ایران (۵۰ میلی گرم بر لیتر) بود، اما تفاوت های منطقه ای و ارتباط با سرطان مری معنی دار بود (۲۳). بر اساس مطالعات جدید منتشر شده بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، ارتباط بین نیترا ت در آب شرب و افزایش خطر ابتلا به سرطان های دستگاه گوارش و سایر مشکلات بهداشتی مورد تأکید قرار گرفته است (۸، ۱۲). در مطالعه ای در ایالت آیووا، Cisneros (2025) با تحلیل ۸۷۱ سیستم آب شرب عمومی بین سال های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ نشان داد که غلظت نیترا ت در آب شرب با افزایش خطر ابتلا به سرطان روده بزرگ مرتبط است. این مطالعه همچنین نابرابری های اجتماعی-دموگرافیک در معرض نیترا ت را بررسی کرد و به لزوم مداخلات و سیاست های عمومی برای حفاظت از سلامت عمومی اشاره نمود (۱۲). در ایالت نبراسکا، Rajabi (2025) گزارش داد که غلظت نیترا ت در آب شرب در برخی مناطق به بالاتر از حد استاندارد EPA رسیده و این افزایش می تواند خطرات بهداشتی جدی، به ویژه برای نوزادان و کودکان، ایجاد کند (۸). همچنین، Zhou (2024) در بررسی ۶۰ مطالعه در ایالات متحده نشان داد که بین نیترا ت در آب شرب و سرطان ها ارتباط مثبت وجود دارد و به لزوم تحقیقات بیشتر برای تأیید و کمی سازی روابط علت و معلولی اشاره کرد. این شواهد نشان می دهند که کنترل غلظت نیترا ت در منابع آب شرب و انجام مطالعات بیشتر با طراحی های دقیق تر برای تأیید ارتباطات بهداشتی ضروری است (۱۶).

۴-۵- اثرات بر بارداری و نوزادان

مصرف آب آلوده به نیترا ت در دوران بارداری با خطرات متعددی همراه است، از جمله سقط خودبه خود، مرگ جنین، نارس بودن، تأخیر رشد، وزن کم هنگام تولد، ناهنجاری های مادرزادی، و مرگ و میر نوزادان. این اثرات به دلیل تبدیل نیترا ت به نیتريت و اختلال

در انتقال اکسیژن خون در مادر و جنین رخ می‌دهد (۱۸). نوزادان زیر ۶ ماه، به‌ویژه ۰ تا ۳ ماه، به دلیل کمبود آنزیم‌های کاهنده مت‌هموگلوبین، آسیب‌پذیرترین گروه هستند. مطالعه‌ای در ملایر نشان داد که ریسک غیرسرطان‌زایی نیترات برای تمام گروه‌های سنی پایین است (ضریب خطر > ۱)، اما نوزادان و کودکان آسیب‌پذیرترند، که پایش مستمر نیترات را ضروری می‌سازد (۱۶). در گلستان، ارزیابی ریسک غیرسرطان‌زایی نشان داد که آب شرب برای بزرگسالان ایمن است (ضریب خطر > ۱)، اما برای کودکان در شهرهای آق‌قلا، گرگان، و گالیکش خطرناک است (ضریب خطر < ۱)، که نیاز به پایش بلندمدت دارد (۲۱).

۵-۵- سایر اثرات بهداشتی

نیترات با اختلالات تیروئیدی، مشکلات قلبی، و اختلالات مغزی مرتبط است. تبدیل نیترات به نیتريت در بدن می‌تواند عملکرد تیروئید را مختل کرده و با کاهش فشار شریانی، مشکلات قلبی-عروقی ایجاد کند (۱۰). در اراک، نیترات در آب شرب با ناکارآمدی تیروئید و اختلالات مغزی مرتبط بوده است (۳۶). گازهای نیتروژنی ناشی از آب‌های آلوده یا سیلوهای کشاورزی نیز برای انسان خطر مرگ‌ومیر ایجاد کرده‌اند (۳۶). تغذیه مستقیم گیاهان نیتراتی برای انسان کشنده نیست، اما تجمع نیترات در بدن اثرات مزمن ایجاد می‌کند (۳۶). (جدول ۳).

جدول ۳: اثرات بهداشتی نیترات

اثر بهداشتی	گروه های آسیب پذیر
سیانوز نوزادان (مت هموگلوبینمیا)	نوزادان زیر ۶ ماه (۳۶)
سرطان های گوارشی (مری، معده، روده بزرگ)	کل جمعیت، مناطق با آب غیر لوله کشی و نیترات بالا (۳۶)
خطرات بارداری (سقط، ناهنجاری جنین، وزن کم تولد)	زنان باردار و جنین (۳۶).
اختلالات تیروئیدی، قلبی-عروقی، مغزی	کل جمعیت، مناطق با آب آلوده (۳۶).
ریسک غیر سرطان زایی	کودکان در آق قلا، گرگان، گالیکش (۱۳)

اثرات مثبت نیترات: با وجود خطرات، نیترات در مقادیر کم اثرات مثبتی بر سلامت دارد. نیترات در دوزهای پایین (مانند ۲۲۲ میلی گرم در روز) از طریق تولید اکسید نیتریک (NO) به گشاد شدن عروق خونی و بهبود جریان خون کمک می کند، که برای سلامت عروق و عملکرد عضلانی در فعالیتهای ورزشی مفید است (۱۳). این دوگانگی اثر نیترات اهمیت تعیین حدود ایمن و مدیریت دقیق منابع آب و غذا را برجسته می کند (۱۳).

عوامل تشدیدکننده و آگاهی عمومی: عوامل محیطی و انسانی اثرات بهداشتی نیترات را تشدید می کنند. در گرگان، تخلیه فاضلابهای خانگی در چاههای جذبی و تراوایی بالای خاک (شن و ماسه) باعث افزایش نیترات در آب شرب شده، که اثرات سمی شدیدی بر کودکان دارد (۲۳). pH و هدایت الکتریکی (EC) بر حلالیت نیترات و رشد میکروبی اثر می گذارند؛ pH بالای معده در نوزادان تبدیل نیترات به نیتريت را تسريع می کند (۲۳). در اراک، مطالعه ای نشان داد که ۹۰٪ شهروندان از کیفیت ظاهری پایین آب آگاه اند، اما تنها ۳۸٪ از آلودگی نیترات و ۱۵٪ از خطرات بهداشتی آن اطلاع دارند. عدم ارتباط بین تحصیلات و آگاهی از نیترات، نیاز به آموزش عمومی را برجسته می کند (۳۶). غلظت نیترات بیش از ۵۰ میلی گرم بر لیتر (استاندارد WHO) یا ۲۵ میلی گرم بر لیتر (استاندارد EPA) خطرناک تلقی می شود (۳۶).

۶- اهمیت پایش و ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک غیرسرطانزایی نشان دهنده تفاوت در آسیب پذیری گروه های سنی است. در ملایر، ریسک برای تمام گروه ها پایین بود، اما نوزادان و کودکان آسیب پذیرتر بودند (۱۸). در گلستان، آب شرب برای کودکان در آق قلا، گرگان، و گالیکش خطرناک (ضریب خطر < ۱) و برای بزرگسالان ایمن (ضریب خطر > ۱) بود (۲۱). این تفاوت ها پایش مستمر و بلندمدت نیترات در آب شرب را ضروری می سازد. در اراک، غلظت بالای نیترات (بیش از ۱۰ میلی گرم بر لیتر بر اساس نیتروژن) در ۸۰٪ شبکه آب شرب، نیاز به اقدامات کنترلی فوری را نشان می دهد (۳۶). این یافته ها اهمیت پایش مداوم و آموزش عمومی برای کاهش خطرات بهداشتی نیترات را برجسته می کند.

۷- اثرات زیست محیطی نیترات

نیترات (NO_3^-) یکی از شایع ترین آلاینده های غیرمتمرکز در آب های زیرزمینی و سطحی است که اثرات زیست محیطی گسترده ای بر اکوسیستم های آبی، خاک، و گیاهان دارد. این ترکیب نیتروژنی، که از طریق چرخه نیتروژن (آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، و آناموکس) و فعالیتهای انسانی مانند کشاورزی، فاضلاب های شهری و صنعتی، و توسعه شهری وارد محیط می شود، باعث یوتروفیکاسیون، کاهش تنوع زیستی، و تخریب اکوسیستم های آبی می شود (۱۶-۱۸). غلظت بالای نیترات در آب،

به‌ویژه در مناطق کشاورزی و شهری ایران، کیفیت منابع آب را تهدید کرده و اثرات منفی بر اکوسیستم‌های کشاورزی، گیاهان، و جلبک‌ها دارد (۳۹). این بخش به بررسی جامع اثرات زیست‌محیطی نیتрат بر آب‌های زیرزمینی و سطحی، گیاهان، جلبک‌ها، و اکوسیستم‌های کشاورزی، با تأکید بر مطالعات موردی در ایران (ورامین، غرب تهران، هشتگرد، گلستان، اردبیل، دشت زیدون، و گرگان) و نقش شاخص‌های زیستی مانند جلبک *Scenedesmus* در پایش نیتروژن می‌پردازد (جدول ۴).

۷-۱- یوتروفیکاسیون و تخریب اکوسیستم‌های آبی

غلظت بالای نیترات در آب‌های زیرزمینی و سطحی باعث یوتروفیکاسیون می‌شود، که با رشد بیش از حد جلبک‌ها، کاهش اکسیژن محلول، و مرگ موجودات آبی همراه است. این پدیده تنوع زیستی را کاهش داده و اکوسیستم‌های آبی را تخریب می‌کند (۳۹). در دشت ورامین، افزایش غلظت نیترات در آبخوان، عمدتاً ناشی از دفع فاضلاب‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی، تهدیدی جدی برای کیفیت آب زیرزمینی ایجاد کرده است (۳۹). بهره‌برداری از سد ماملو تغذیه طبیعی آبخوان توسط رودخانه جاجرود را کاهش داده و ورود پساب تصفیه‌خانه جنوب شرقی تهران با غلظت نیترات ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌ویژه در آبخوان آزاد جنوب پاکدشت، آلودگی نیترات را تشدید کرده است (۳۱، ۳۹). تغذیه مصنوعی مناطق شمالی آبخوان را تحت تأثیر قرار داده، درحالی‌که آبخوان محصور به دلیل لایه نفوذناپذیر، افزایش ملایم‌تری در غلظت نیترات نشان می‌دهد و تا سال ۱۴۲۰ از حد استاندارد آب شرب (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) فراتر نخواهد رفت (۲۲). در دشت غرب تهران، میانگین غلظت نیترات در ۹۹ چاه به ۹۹/۵۱ میلی‌گرم بر لیتر رسیده، که بالاتر از استاندارد آب شرب است، درحالی‌که میانگین غلظت نیتريت (۱۸/۱۶ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به سال ۱۳۷۲ حدود ۱۷٪ کاهش یافته است. این کاهش احتمالاً ناشی از تماس آبخوان با فاضلاب‌های صنعتی با نیترات بالا و نیتريت پایین یا فاضلاب‌های کهنه است (۲۲). در دشت هشتگرد، توسعه شهری، کشاورزی، و صنعتی همراه با خشکسالی، کیفیت آب زیرزمینی را کاهش داده و غلظت نیترات در مناطق شمالی آبخوان به بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده، که از استاندارد آب شرب فراتر است (۲۰). برداشت بیش از حد طی سه دهه باعث افت ۱۵ متری تراز آب و کاهش سالیانه ۲/۰۶ متر در دوره ۱۳۹۱-۱۳۹۴ شده است (۲۰). در آبخوان‌های گلستان، فعالیت‌های کشاورزی و نبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب باعث شده غلظت نیترات در برخی مناطق از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر فراتر رود، که تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های آبی است (۲۱). در اردبیل (۱۳۸۷-۱۳۸۸)، غلظت نیترات در چاه شماره ۱۶ نزدیک به حداکثر مجاز و در منطقه ۱۱ بیش از استانداردهای WHO و ایران گزارش شده، که نشان‌دهنده آلودگی شدید منابع آب زیرزمینی به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و دفع غیراصولی فاضلاب است (۲۲). در دشت زیدون، غلظت نیترات در بخش‌های شمالی و مرکزی، به‌ویژه در مناطق کشت برنج، بالاتر از استانداردهای آب شرب است و در فصل خشک (تیر تا آبان) به دلیل آبیاری و کوددهی بیشتر افزایش می‌یابد (۲۲). در گرگان، چاه‌های قدیمی در مناطق پرجمعیت آبخوان زیارت نیترات بالایی دارند، درحالی‌که

آبخوان‌های گرم‌بادشت و شصت کلا و رودخانه‌های النگ‌دره و زیارت آلودگی کمتری نشان می‌دهند. قطع جنگل‌ها و توسعه شهری شستشوی نیتروژن خاک را تشدید کرده و اکوسیستم‌های آبی را تهدید می‌کند (۲۲). (جدول ۴)

۷-۲- اثرات نیترات بر گیاهان و اکوسیستم‌های کشاورزی

نیترات بیش از حد در خاک و آب اثرات منفی بر گیاهان و اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. تجمع نیترات در گیاهان (چند صد قسمت در میلیون) به دلیل کوددهی بیش از حد و شرایط محیطی مانند خشکسالی رخ می‌دهد. این تجمع رشد رویشی گیاهان را افزایش داده، بلوغ را به تأخیر می‌اندازد، و محصول را کاهش می‌دهد (۳۳، ۳۴). در محیط‌های مرطوب مانند سیلوه‌های کشاورزی، نیترات به گازهای سمی مانند اکسید نیتریک تبدیل می‌شود، که اکوسیستم‌های کشاورزی را تهدید می‌کند (۳۴). در دشت زیدون، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و حیوانی در کشت برنج، گندم، و جو، تجمع نیترات در خاک و نفوذ آن به آب‌های زیرزمینی را افزایش داده، که نه تنها کیفیت آب را کاهش می‌دهد، بلکه عملکرد محصولات کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۹). در گلستان، نیترات بیش از حد در کشاورزی باعث کاهش بهره‌وری محصولات شده و اکوسیستم‌های کشاورزی را تهدید می‌کند (۲۱). این اثرات نشان‌دهنده ضرورت مدیریت کوددهی و کاهش نفوذ نیترات به خاک و آب است (۲۱).

۷-۳- اثرات نیترات بر جلبک‌ها و پایش زیستی

جلبک Scenedesmus به دلیل تحمل بالای نیتروژن، شاخص زیستی مناسبی برای پایش آب‌های غنی از نیتروژن است. این جلبک تا ۷۵ میلی‌مولار نیترات (۳۷/۶ گرم بر لیتر) و ۵۰ میلی‌مولار آمونیوم (۶۷/۲ گرم بر لیتر) رشد می‌کند، اما در ۱۰۰ میلی‌مولار نیترات (۵/۸ گرم بر لیتر) و ۷۵ میلی‌مولار آمونیوم (۰/۴ گرم بر لیتر) رشد متوقف می‌شود. این حساسیت، Scenedesmus را به ابزاری مؤثر برای ارزیابی کیفیت آب تبدیل می‌کند (۲۱). نیترات بر مرفولوژی این جلبک اثر گذاشته و ۵-۱۰٪ سلول‌ها در تیمار نیترات به صورت چهار یا هشت‌تایی دیده شدند، درحالی‌که در تیمار آمونیوم این اشکال کمتر بودند (۲۱). در محیط‌های پرورشی، Scenedesmus نیتروژن را از نیترات، آمونیوم، و اوره جذب می‌کند و بهترین رشد در ۱۵ میلی‌مولار نیترات (۲۸/۱ گرم بر لیتر) نیترات سدیم (و ۱۵ میلی‌مولار آمونیوم (۰/۸ گرم بر لیتر کلرید آمونیوم) مشاهده شد (۲۱). این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل جلبک‌ها در پایش و مدیریت آلودگی نیترات در اکوسیستم‌های آبی است (جدول ۴).

جدول ۴: اثرات زیست محیطی نیترات

اثر زیست محیطی	مناطق یا اکوسیستم‌های تحت تاثیر
یوتروفیکاسیون و کاهش تنوع زیستی	آب‌های سطحی و زیرزمینی، تالاب‌ها، رودخانه‌ها (۲۰)

آلودگی آب زیرزمینی با نیترات	دشت ورامین، غرب تهران، هشتگرد، گلستان، اردبیل، دشت زیدون، گرگان (۲۲، ۱۹)
افت تراز آب زیرزمینی و تشدید خشکسالی	کاهش ۱۵ متری تراز آب (دشت هشتگرد) (۲۰)
تجمع نیترات در گیاهان و کاهش عملکرد محصولات	مزارع برنج، گندم، جو در زیدون و گلستان (۲۱)
انتشار گاز های سمی از سیلو ها	تولید اکسید نیتریک (سیلو های کشاورزی) (۳۹، ۳۶، ۳۱)
تغییر مورفولوژی جلبک ها و استفاده در پایش زیستی	در آب های غنی از نیتروژن جلبک (۳۹، ۳۶، ۳۱)

۴-۷ عوامل تشدیدکننده آلودگی نیترات

عوامل متعددی آلودگی نیترات و اثرات زیست محیطی آن را تشدید می کنند. در دشت ورامین، بهره برداری از سد ماملو و ورود پساب تصفیه خانه با نیترات بالا، همراه با فعالیت های کشاورزی و دفع فاضلاب های شهری و روستایی، آلودگی نیترات را افزایش داده است (۳۹). در دشت غرب تهران، تخلیه بی رویه فاضلاب های شهری و صنعتی و تماس با فاضلاب های کهنه باعث افزایش نیترات شده، در حالی که افزایش عمق آب با کاهش غلظت نیترات ($R=0/44$, $p=0/34$) مرتبط است، که نشان دهنده تأثیر هیدرولوژیکی بر توزیع نیترات است (۳۹). در دشت هشتگرد، خشکسالی و برداشت بیش از حد آب زیرزمینی (افت ۱۵ متری تراز آب) نفوذ نیترات را تشدید کرده است (۳۹). در گلستان، نبود سیستم جمع آوری فاضلاب و فعالیت های کشاورزی گسترده آلودگی نیترات را افزایش داده است (۲۱). در دشت زیدون، آبیاری و کوددهی بیش از حد در فصل خشک و تراوایی بالای خاک (شن و ماسه) شستشوی نیترات را تسریع کرده، در حالی که در اعماق بیشتر، تأثیر کشاورزی کاهش می یابد (۱۹). در گرگان، قطع جنگل ها و توسعه شهری، با کاهش توانایی خاک در حفظ نیتروژن، شستشوی نیترات به آبخوان زیارت را تشدید کرده است (۱۹). این عوامل نشان دهنده تعامل پیچیده فرآیندهای انسانی و محیطی در آلودگی نیترات هستند.

۸- اهمیت پایش و مدیریت

پایش مستمر نیترات برای حفاظت از اکوسیستم های آبی و کشاورزی ضروری است. در دشت هشتگرد، استفاده از تصاویر ماهواره ای و روش کریگینگ بیزی (با خطای ۹۹/۲ میلی گرم بر لیتر) الگوهای آلودگی نیترات را شناسایی کرده و مدیریت دقیق منابع آلاینده را تسهیل می کند (۸-۱۰). در دشت غرب تهران، عدم ارتباط معنی دار بین فاصله چاه های جاذب فاضلاب و غلظت نیترات ($p=0/26$) و نیتريت ($p=0/82$) نشان دهنده پراکندگی گسترده آلودگی است (۳۹). در گلستان، هیدروژنوشیمی آب شرب نشان داد که نیترات

تهدید اصلی کیفیت آب است، در حالی که سایر پارامترها (جز بی کربنات) در محدوده استاندارد هستند (۲۱). جلبک *Scenedesmus* به عنوان شاخص زیستی، ابزار مؤثری برای پایش نیتروژن در آب های آلوده است (۳۱). این یافته ها بر لزوم مدیریت یکپارچه منابع آلاینده، از جمله کاهش کوددهی، بهبود دفع فاضلاب، و پایش مستمر کیفیت آب تأکید دارند.

۸-۱- کنترل نیترات

آلودگی نیترات در آب های زیرزمینی و سطحی، به ویژه در مناطق کشاورزی و شهری ایران، چالشی جدی برای کیفیت آب شرب و اکوسیستم های آبی ایجاد کرده است (۳۱). نیترات (NO_3^-)، به دلیل حلالیت بالا و پایداری شیمیایی، از منابع متعددی مانند کودهای شیمیایی و حیوانی، فاضلاب های خانگی و صنعتی، و نفوذ پساب ها وارد آب می شود و نیازمند روش های مؤثر برای کنترل است (۳۱). علاوه بر این، پایش مستمر کیفیت آب، مدیریت منابع آلاینده، و آموزش عمومی نقش کلیدی در کنترل نیترات دارند (۳۱). این بخش به بررسی جامع کنترل نیترات، با تأکید بر کاربردهای عملی در ایران (ملایر، نهاوند، اراک، دشت هشتگرد، گلستان، دشت زیدون، گرگان و فناوری های نوین) می پردازد (۲۱، ۳۶).

۸-۲- پایش و مدیریت کیفیت آب

پایش مستمر کیفیت آب برای کنترل نیترات حیاتی است. در ملایر، بررسی کیفیت آب شرب با شاخص های کیفیت آب (WQI) نشان داد که غلظت نیترات کمتر از استانداردهای WHO و ملی ایران است، اما شوری آب (EC بالا) در برخی نمونه ها مشکل ساز بود (۳۶). کیفیت آب در مناطق مختلف ملایر متفاوت گزارش شد، و پایش دوره ای نیترات و رفع مشکل شوری توصیه می شود (۲). در نهاوند، بررسی ۴۸ نمونه از ۱۶ منطقه نشان داد که میانگین pH و نیترات کمتر از استاندارد WHO و ایران است، اما EC بالاتر از حد مجاز بود. ۴۴٪ نمونه ها شوری متوسط و ۵۶٪ شوری بالا داشتند (۲۷). پهنه بندی کریجینگ نشان داد نواحی جنوب شرقی کیفیت پایین تر و نیترات بالاتری دارند. شاخص WQI کیفیت عالی و NPI عدم آلودگی را نشان داد، اما پایش دوره ای، به ویژه در جنوب شرقی، و تصفیه EC توصیه می شود (۲۷). در اراک، پایش مستمر غلظت نیترات در شبکه آب شرب ضروری است، زیرا ۸۰٪ شبکه آب شرب نیترات بالای ۱۰ میلی گرم بر لیتر (بر اساس نیتروژن) دارد. تنها ۱۵٪ افراد آگاه از خطرات نیترات اقداماتی مانند خرید آب بطری، استفاده از چشمه ها، یا دستگاه های تصفیه خانگی انجام داده اند (۳۶). اطلاع رسانی علمی درباره خطرات نیترات، به ویژه برای نوزادان و مادران باردار، از طریق تابلوهای آموزشی، فیلم، و اسلاید، و تأمین آب سالم (مانند آب بطری) توصیه می شود (۳۶).

۸-۳- مدیریت منابع آلاینده

مدیریت منابع آلاینده نیترات برای کاهش آلودگی آب و خاک ضروری است. در دشت هشتگرد، مدیریت برداشت از چاه‌ها، حفاظت از حریم بهداشتی منابع آب، و محدودسازی استفاده از کودها و سموم کشاورزی، به‌ویژه در مناطق مرکزی، توصیه می‌شود (۲۰). پایش کیفیت آب و بررسی حریم‌های حفاظتی چاه‌های آب شرب در طرح‌های مدیریتی استان البرز ضروری است (۲۰). در گلستان، برای کاهش آلودگی نیترات در شهرهای آق‌قلا، گرگان، و گالیکش، مدیریت زه‌آب‌های کشاورزی، تصفیه فاضلاب‌های خانگی و شهری، پایش غلظت نیترات در شبکه توزیع آب، و حذف نیترات در نقطه مصرف پیشنهاد شده است (۲۱). در دشت زیدون، اصلاح الگوی کشت، مدیریت کوددهی، بهبود دفع فاضلاب‌های روستایی، و کاهش فروشویی کودها از طریق کشاورزی پایدار توصیه می‌شود (۱۹). در گرگان، رقیق‌سازی آب‌های آلوده، پهنه‌بندی نیترات، و انتخاب منابع آب دور از مناطق شهری و صنعتی، همراه با مدیریت فاضلاب‌های خانگی و جلوگیری از تخلیه در چاه‌های جذبی، ضروری است (۲۳). در کشاورزی، پایش غلظت نیترات در گیاهان، خاک، و آب و شناسایی گونه‌های گیاهی کم‌نیترات برای کاهش تجمع نیترات توصیه می‌شود (۲۳). استفاده از کودهای زیستی و باکتری‌های محرک رشد گیاه نیز باقی‌مانده نیترات را کاهش می‌دهد (۲۳).

۴-۸- اهمیت رویکردهای یکپارچه

ترکیب روش‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، و مدیریتی برای کنترل نیترات مؤثرتر است (۲۲). در اردبیل، نظارت بر مصرف کودهای کشاورزی، توسعه شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، پایش نقاط بحرانی، و استفاده از روش‌های تعویض یونی و اسمز معکوس پیشنهاد شده است. حذف چاه‌های آلوده از سیستم تأمین آب و جایگزینی با منابع کم‌نیترات نیز توصیه می‌شود (۲۲). فناوری‌های نوین مانند نانوجاذب‌ها و بیوچار به دلیل کارایی بالا و پایداری زیست‌محیطی، به‌ویژه در مناطق کشاورزی مانند دشت زیدون، امیدبخش هستند (۱۹). آموزش عمومی و پایش مستمر، به‌ویژه در مناطقی مانند اراک و نهاوند، برای کاهش خطرات نیترات و افزایش آگاهی عمومی ضروری است (۲۷، ۳۶).

۹- پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثرات بهداشتی و زیست محیطی آب حاوی نیترات:

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی نیترات در منابع آب پرداخته‌اند. این تحقیقات نشان‌دهنده نگرانی‌های فزاینده در مورد آلودگی نیترات و پیامدهای آن برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها هستند. در ادامه، به برخی از این مطالعات و نتایج آن‌ها اشاره می‌شود: در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Rajabi و همکاران در مجله Scientific Reports منتشر شد که نشان داد جوشاندن مکرر آب می‌تواند غلظت نیترات را به طور قابل توجهی افزایش دهد و خطرات بهداشتی جدی ایجاد کند (۸). ارزیابی ریسک سلامت نشان داد که شاخص‌های خطر (HQ) برای تمامی گروه‌های سنی، به ویژه نوزادان (HQ = 2.850) و بزرگسالان (HQ = 6.982)، از حد ایمنی تعیین شده توسط EPA فراتر رفته است. این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو نشان داد که شاخص‌های خطر به طور متوسط بالاتر از ۴.۱۹ بوده و به طور قابل توجهی از حد ایمنی (EPA (HQ = 1) فراتر رفته است.

تجاوز کرده است. تحلیل حساسیت نشان داد که بزرگسالان بیشتر در معرض خطر هستند، احتمالاً به دلیل قرارگیری طولانی مدت در معرض نیترات.

مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۵ توسط Keeler و همکاران در مجله Science of the Total Environment منتشر شد که نشان داد آلودگی نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی همچنان عمده‌ترین عامل بدون نظارت باقی مانده و تأثیرات منفی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد (۴۰). این مطالعه بر لزوم اقدامات نظارتی و مدیریتی مؤثر برای کاهش آلودگی نیتروژن و حفاظت از منابع آب تأکید کرد. در سال ۲۰۲۴، مطالعه‌ای توسط Guo و همکاران در مجله Remote Sensing منتشر شد که استفاده از حسگرهای هیپراسپکترال در محل را برای اندازه‌گیری نیترات سطح آب در استواری رودخانه فیتزروی در کوئینزلند، استرالیا، با استفاده از یادگیری عمیق بررسی کرد (۳۲). این مطالعه نشان داد که بار نیترات سطح آب می‌تواند از بازتابش هیپراسپکترال و اندازه‌گیری شوری آب پیش‌بینی شود. داده‌های زمانی نشان‌دهنده چرخه‌های دوره‌ای در بار نیترات به دلیل تأثیر جزر و مد در سایت مطالعه است. ارزیابی دقت مدل پیش‌بینی نیترات در برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل نشان داد که مقادیر پیش‌بینی‌شده با داده‌های واقعی همبستگی خوبی دارند ($R^2 = 0.86$) و RMSE برابر با ۰.۰۳ میلی‌گرم بر لیتر بود. در سال ۲۰۲۳، مطالعه‌ای توسط Verma و همکاران در مجله Environmental Pollution منتشر شد که نشان داد تخلیه آب زیرزمینی حاوی نیترات به بدنه‌های آبی می‌تواند منجر به یوتروفیکاسیون شود، که منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها، رشد گیاهان و در نهایت تخریب اکوسیستم‌های آبی می‌شود. این مطالعه بر لزوم مدیریت مؤثر منابع آب و کاهش آلودگی نیتروژن برای حفاظت از اکوسیستم‌های آبی تأکید کرد (۲۹).

در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Soltaninia در مجله Science of the Total Environment منتشر شد که غلظت‌های نیترات در رواناب مناطق مسکونی، تجاری، صنعتی و ترافیکی در تهران، ایران را بررسی کرد (۲۸). این مطالعه نشان داد که رواناب‌های شهری می‌توانند منابع مهمی از آلودگی نیترات باشند و بر لزوم مدیریت مؤثر رواناب‌های شهری و کاهش آلودگی نیتروژن در مناطق شهری تأکید کرد. در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Mantey و همکاران در مجله Environmental Science: Water Research & Technology منتشر شد که به بررسی سطوح طولانی مدت نیترات در ۸۷۱ سیستم آب عمومی در آیووا بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ پرداخت و نابرابری‌های اجتماعی-دموگرافی در معرض آلودگی نیترات در آب شرب را بررسی کرد (۳۰). این مطالعه نشان داد که میانگین غلظت نیترات در سیستم‌های آب عمومی آیووا بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ افزایش یافته و به اوج میانگین ۳ میلی‌گرم در لیتر در سال ۲۰۱۶ رسید. این مطالعه بر لزوم توجه به نابرابری‌های اجتماعی-دموگرافی در معرض آلودگی نیترات و توسعه مداخلات و سیاست‌های مؤثر برای حفاظت از سلامت عمومی تأکید کرد.

در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Chambers و همکاران در مجله Environmental Health Perspectives منتشر شد که ارتباط بین قرارگیری در معرض نیترات و نیتريت در آب شرب و انواع خاصی از سرطان‌ها را بررسی کرد (۱۲). این مطالعه نشان داد که مطالعات مشاهده‌ای بیشتری نشان‌دهنده ارتباط بین سطوح نیترات در آب شرب و برخی انواع سرطان‌ها هستند. این مطالعه بر لزوم

تحقیقات بیشتر برای تأیید این مشاهدات و درک بهتر ارتباط بین نیترات و سرطان‌ها تأکید کرد. در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Keeler و همکاران در مجله Science of the Total Environment منتشر شد که آلودگی نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را بررسی کرد و تأثیرات منفی آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست را نشان داد. این مطالعه بر لزوم اقدامات نظارتی و مدیریتی مؤثر برای کاهش آلودگی نیتروژن و حفاظت از منابع آب تأکید کرد. در سال ۲۰۲۵، مطالعه‌ای توسط Rajabi و همکاران در مجله Scientific Reports منتشر شد که نشان داد جوشاندن مکرر آب می‌تواند غلظت نیترات را به طور قابل توجهی افزایش دهد و خطرات بهداشتی جدی ایجاد کند. این مطالعه بر لزوم آگاهی‌رسانی به عموم مردم در مورد خطرات جوشاندن آب آلوده به نیترات و استفاده از روش‌های تصفیه مناسب تأکید کرد (۸). در مجموع، این مطالعات نشان‌دهنده نگرانی‌های فزاینده در مورد آلودگی نیترات در منابع آب و پیامدهای آن برای سلامت انسان و محیط‌زیست هستند. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به اقدامات مؤثر در زمینه مدیریت منابع آب، کاهش آلودگی نیتروژن، و افزایش آگاهی عمومی وجود دارد.

۱۰- نتیجه‌گیری

آلودگی نیترات در منابع آب زیرزمینی و سطحی، به‌ویژه در مناطق کشاورزی و شهری ایران، به یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی و بهداشتی تبدیل شده است. نیترات، به‌عنوان محصول نهایی چرخه نیتروژن، از منابع طبیعی (مانند صاعقه و فرآیندهای میکروبی) و انسانی (مانند کودهای شیمیایی و حیوانی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، و توسعه شهری) وارد آب، خاک، و گیاهان می‌شود. این آلاینده به دلیل حلالیت بالا و پایداری شیمیایی، به راحتی در آبخوان‌ها و اکوسیستم‌های آبی تجمع یافته و اثرات گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌های آبی، و کشاورزی ایجاد می‌کند. افزایش نیترات در آب می‌تواند به عواملی مانند استفاده بی‌رویه از کودهای نیتروژنی، دفع غیراصولی فاضلاب، خشکسالی، و تخریب پوشش گیاهی نسبت داده می‌شود.

از منظر بهداشتی، نیترات با تبدیل به نیتريت و نیتروزآمین‌های سرطان‌زا در بدن، خطراتی مانند مت‌هموگلوبینمیا، سرطان‌های گوارشی، اختلالات تیروئیدی، مشکلات قلبی، و عوارض بارداری ایجاد می‌کند. با این حال، نیترات در مقادیر کم اثرات مثبتی بر سلامت عروق و عملکرد عضلانی دارد، که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت دقیق غلظت آن در آب و غذا است. از منظر زیست‌محیطی، نیترات با ایجاد یوتروفیکاسیون، کاهش اکسیژن محلول، و مرگ موجودات آبی، اکوسیستم‌های آبی را تخریب می‌کند. در محیط‌های مرطوب مانند سیلوهای کشاورزی، نیترات به گازهای سمی تبدیل شده و اکوسیستم‌های کشاورزی را تهدید می‌کند. جلبک Scenedesmus به دلیل تحمل بالای نیتروژن و حساسیت به غلظت‌های بالا، ابزار مؤثری برای پایش زیستی کیفیت آب است. روش‌های کنترل نیترات شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. اسمز معکوس و تبادل یونی با راندمان بالای ۹۰-۹۹٪ برای حذف نیترات از آب شرب مؤثرند، اما مصرف انرژی بالا و تولید پساب چالش‌هایی ایجاد می‌کنند. لخته‌سازی الکتریکی در مقیاس کوچک کارایی خوبی (تا ۷۸٪) دارد، اما هزینه‌های انرژی آن را برای مقیاس بزرگ محدود می‌کند. جذب با استفاده از بیوچار و نانوجاذب‌ها روشی اقتصادی و پایدار است که تا ۹۹٪ نیترات را حذف می‌کند و برای مناطق کشاورزی مانند دشت زیدون مناسب

است. دنیتریفیکاسیون بیولوژیکی با متانول، با راندمان ۹۹٪ و حمایت از رشد باکتری‌های نیترات‌خوار، روشی اقتصادی برای تصفیه آب زیرزمینی است. مدیریت نیترات نیازمند رویکردی یکپارچه است که ترکیبی از فناوری‌های پیشرفته، پایش مستمر، و مدیریت منابع آلاینده را در بر بگیرد. آموزش عمومی و مشارکت اجتماعی، به‌ویژه در مناطقی با آگاهی پایین، نقش کلیدی در کاهش خطرات نیترات دارد. در نهایت، حفاظت از منابع آب و سلامت عمومی در برابر آلودگی نیترات مستلزم همکاری بین نهادهای دولتی، محققان، و جوامع محلی است تا با استفاده از راهکارهای پایدار، کیفیت آب بهبود یابد و اثرات منفی نیترات به حداقل برسد.

منابع

1. Adimalla N, Qian H. Evaluation of non-carcinogenic causing health risks (NCHR) associated with exposure of fluoride and nitrate contaminated groundwater from a semi-arid region of south India. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023;30(34):81370-85.
2. Solgi E, Beigmohammadi F, Ahmadvand R, Baser S. Nitrate risk assessment in drinking water in different areas of Malayer city. 2024.
3. Akber MA, Islam MA, Dutta M, Billah SM, Islam MA. Nitrate contamination of water in dug wells and associated health risks of rural communities in southwest Bangladesh. *Environ Monit Assess*. 2020;192(3):163.
4. Ceballos-Escalera A, Pous N, Balaguer MD, Puig S. Electrochemical water softening as pretreatment for nitrate electro bioremediation. *Sci Total Environ*. 2022;806(Pt 1):150433.
5. Ceballos-Escalera A, Pous N, Balaguer MD, Puig S. Nitrate electro-bioremediation and water disinfection for rural areas. *Chemosphere*. 2024;352:141370.
6. Ceballos-Escalera A, Pous N, Bañeras L, Balaguer MD, Puig S. Advancing towards electro-bioremediation scaling-up: On-site pilot plant for successful nitrate-contaminated groundwater treatment. *Water Res*. 2024;256:121618.



7. Chen X, Yang L, Chen F, Song Q, Feng C, Liu X, et al. High efficient bio-denitrification of nitrate contaminated water with low ammonium and sulfate production by a sulfur/pyrite-based bioreactor. *Bioresour Technol.* 2022;346:126669.
8. Rajabi A, Bairami S, Shahryari A. Human health risk assessment of nitrate in repeatedly boiled water using Univariate regression and Monte Carlo simulation. *Sci Rep.* 2025;15(1):24059.
9. Regni L, Bartucca ML, Pannacci E, Tei F, Del Buono D, Proietti P. Phytodepuration of Nitrate Contaminated Water Using Four Different Tree Species. *Plants (Basel).* 2021;10(3).
10. Rezvani F, Sarrafzadeh MH, Seo SH, Oh HM. Optimal strategies for bioremediation of nitrate-contaminated groundwater and microalgae biomass production. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018;25(27):27471-82.
11. Safonov A, Lavrinovich E, Emel'yanov A, Boldyrev K, Kuryakov V, Rodygina N, et al. Risk of colloidal and pseudo-colloidal transport of actinides in nitrate contaminated groundwater near a radioactive waste repository after bioremediation. *Sci Rep.* 2022;12(1):4557.
12. Schullehner J, Donat C, Crippa A, Chambers T, Sigsgaard T, Villanueva CM, editors. Overview of systematic reviews and exposure-response functions on nitrate in drinking water and colorectal cancer. *ISEE Conference Abstracts*; 2024.
13. Shu W, Wang P, Zhao J, Ding M, Zhang H, Nie M, et al. Sources and migration similarly determine nitrate concentrations: Integrating isotopic, landscape, and biological approaches. *Sci Total Environ.* 2022;852:158216.

14. Stayner LT, Schullehner J, Semark BD, Jensen AS, Trabjerg BB, Pedersen M, et al. Exposure to nitrate from drinking water and the risk of childhood cancer in Denmark. *Environ Int.* 2021;155:106613.
15. Tariqi AQ, Naughton CC. Water, Health, and Environmental Justice in California: Geospatial Analysis of Nitrate Contamination and Thyroid Cancer. *Environ Eng Sci.* 2021;38(5):377-88.
16. Wang Z, Fei X, He S, Huang J, Zhou W. Comparison of heterotrophic and autotrophic denitrification processes for treating nitrate-contaminated surface water. *Sci Total Environ.* 2017;579:1706-14.
17. Zhao J, Feng C, Tong S, Chen N, Dong S, Peng T, et al. Denitrification behavior and microbial community spatial distribution inside woodchip-based solid-phase denitrification (W-SPD) bioreactor for nitrate-contaminated water treatment. *Bioresour Technol.* 2018;249:869-79.
18. Zaryab A, Farahmand A, Mack TJ. Identification and apportionment of groundwater nitrate sources in Chakari Plain (Afghanistan). *Environ Geochem Health.* 2023;45(11):7813-27.
19. Maryam Fazeli NK. Investigating the temporal and spatial distribution of nitrate pollution. *The National Conference on Water Crisis Management.* 2009;1:10-2.
20. Safari F, Shahbazi A, Ketabchi H. Quality analysis and nitrate map of groundwater resources in Alborz province (Hashtgerd Plain). *Journal of Water and Soil Conservation.* 2019;26(5):113-30.
21. Semnani S, Arab Ali A, Keshtkar A, Behnampour N, Besharat S, Roshandel G. Nitrate and nitrite level of drinking water and the risk of upper gastrointestinal cancers in urban areas of



Golestan province, northeast of Iran. Journal of Kerman university of medical sciences. 2009;16(3):281-90.

22. Alighadri M, Hazrati S, Sakhaiezhadeh A, Soleymanpoor M. Measurement of nitrate concentrations in drinking water supply sources and distribution network of Ardabil City. 2011.
23. Shahpasandzadeh M, Raghimi M, Khademi SM. The environmental impact of urban development on nitrate contamination of groundwater resources in Gorgan district, NE Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 2005;14(54):48-55.
24. Pikul KV, Bobyрева LE, Kotelevska TM, Pryimenko N, Tarasenko KV. Problems of nitrate water pollution in poltava region. Wiad Lek. 2018;71(4):839-42.
25. Liang H, Qi Z, Hu K, Prasher SO, Zhang Y. Can nitrate contaminated groundwater be remediated by optimizing flood irrigation rate with high nitrate water in a desert oasis using the WHCNS model? J Environ Manage. 2016;181:16-25.
26. Panneerselvam B, Muniraj K, Duraisamy K, Pande C, Karuppannan S, Thomas M. An integrated approach to explore the suitability of nitrate-contaminated groundwater for drinking purposes in a semiarid region of India. Environ Geochem Health. 2023;45(3):647-63.
27. Solgi E, Beigmohammadi F, Moafi A. Investigating the Status of Nitrates in Nahavand Drinking Water and Its Quality Zoning. Irrigation and Water Engineering. 2023;14(2):357-78.
28. Soltaninia S, Eskandaripour M, Golmohammadi MH, Taghavi L, Mehboodi A. Nitrate pollution in urban runoff: A comprehensive risk assessment for human and ecological health. Science of The Total Environment. 2025;974:179184.

29. Verma A, Sharma A, Kumar R, Sharma P. Nitrate contamination in groundwater and associated health risk assessment for Indo-Gangetic Plain, India. Groundwater for sustainable development. 2023;23:100978.
30. Mantey EP, Liu L, Rehmann CR. Disparities in potential nitrate exposures within Iowa public water systems. Environmental Science: Water Research & Technology. 2025;11(4):959-71.
31. Mirzaei R, Sakizadeh M, Ghorbani H. Nitrate contamination of drinking and agricultural groundwater resources in Shahrood and Damghan, Iran. Journal of Mazandaran university of medical sciences. 2015;25(131):117-27.
32. Guo Y, Cherukuru N, Lehmann E, Unnithan S, Kerrisk G, Malthus T, et al. Hyperspectral in situ remote sensing of water surface nitrate in the Fitzroy River estuary, Queensland, Australia, using deep learning. arXiv preprint arXiv:250517483. 2025.
33. Kermorvant C, Liquet B, Litt G, Mengersen K, Peterson EE, Hyndman RJ, et al. Understanding links between water-quality variables and nitrate concentration in freshwater streams using high frequency sensor data. PLoS One. 2023;18(6):e0287640.
34. Lafontaine A, Lee S, Jacquemin B, Glorennec P, Le Bot B, Verrey D, et al. Chronic exposure to drinking water nitrate and trihalomethanes in the French CONSTANCES cohort. Environ Res. 2024;259:119557.
35. Ghaemina M, Mokhtarani N. Remediation of nitrate-contaminated groundwater by PRB-Electrokinetic integrated process. J Environ Manage. 2018;222:234-41.
36. Moghadasi M, ALAVI MS, Maknoun R, Moghadasi A. A Survey on People Awareness Regarding Nitrate Pollution of Drinking Water in Arak City. 2007.

37. Ding H, Gao H, Zhu M, Yu M, Sun Y, Zheng M, et al. Spectral and molecular insights into the characteristics of dissolved organic matter in nitrate-contaminated groundwater. Environ Pollut. 2024;355:124202.
38. Egbueri JC, Agbasi JC, ElKashouty M, Khan MYA, Abba SI, Khan N. An integrated computational and graphical approach for evaluating the geochemistry and health risks of nitrate-contaminated water for six age groups. J Environ Sci Health C Toxicol Carcinog. 2025;43(1):82-115.
39. Nasirzadeh F, Eigharlou M, Khelghatibana F, Sadeghi A. Nitrate and Nitrite: Sources, Impact on Human Health and Reduction of Nitrate Accumulation in Agricultural Products Using Bio-fertilizers. 2021.
40. Keeler BL, Mayer TV, Noe R. Health damages of nitrate exposure in drinking water: Inclusion of non-fatal conditions increases the social costs of nitrogen. J Environ Manage. 2025;393:126895.