

ارزیابی اثرات زیست محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب

محمد رضا شهبازی^۱

^۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

صنایع نساجی به عنوان یکی از صنایع راهبردی و اشتغال‌زا در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در اقتصادهای در حال توسعه، نقش مهمی در زنجیره تولید، ارزش‌آفرینی صنعتی و تأمین نیازهای مصرفی ایفا می‌کنند؛ با این حال، فرایندهای متنوع این صنعت از جمله شست‌وشو، رنگ‌رزی، سفیدگری، چاپ، تکمیل و عملیات شیمیایی وابسته، منجر به تولید حجم قابل‌توجهی از پسماندهای جامد، مایع و لجن‌های صنعتی می‌شود که در صورت دفع نامناسب، می‌توانند پیامدهای جدی برای محیط زیست، به‌ویژه سلامت خاک و کیفیت منابع آب، ایجاد کنند. هدف این پژوهش، ارزیابی تحلیلی اثرات زیست محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر شاخص‌های سلامت خاک و کیفیت آب، با تأکید بر آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین، مواد رنگ‌زا، ترکیبات با اکسیژن‌خواهی بالا و تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط است. روش پژوهش بر پایه رویکرد کمی و تحلیلی و با اتکا به داده‌های حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، نتایج گزارش‌های محیط‌زیستی، و تحلیل مقایسه‌ای شاخص‌هایی مانند pH، هدایت الکتریکی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، اکسیژن‌خواهی زیستی، کل مواد جامد محلول، غلظت فلزات سنگین و تغییرات زیستی خاک و آب سامان یافته است. نتایج نشان می‌دهد که دفع کنترل‌نشده پسماندهای نساجی می‌تواند موجب افزایش شوری، تغییر pH، کاهش نفوذپذیری و فعالیت زیستی خاک، تجمع فلزات سنگین، افت کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، و در نهایت افزایش ریسک‌های اکولوژیک و بهداشتی شود. همچنین، شدت این اثرات به نوع فرایند نساجی، ترکیب شیمیایی پسماند، سطح تصفیه پیش از دفع، ویژگی‌های بستر خاک و شرایط هیدرولوژیک منطقه وابسته است. در جمع‌بندی، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مدیریت پایدار پسماندهای صنایع نساجی مستلزم استقرار سامانه‌های تصفیه مؤثر، پایش منظم شاخص‌های خاک و آب، سیاست‌گذاری نظارتی دقیق و بهره‌گیری از فناوری‌های کم‌آلاینده است تا از تشدید آسیب‌های محیط‌زیستی و افت کیفیت منابع پایه جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: پسماندهای صنایع نساجی، سلامت خاک، کیفیت منابع آب، آلودگی زیست محیطی، فلزات سنگین، فاضلاب صنعتی

مقدمه

صنعت نساجی از جمله قدیمی ترین و در عین حال راهبردی ترین صنایع جهان به شمار می آید که از گذشته تا امروز، نقش مهمی در تأمین نیازهای اساسی انسان، اشتغال زایی، توسعه صنعتی و شکل دهی به زنجیره های ارزش اقتصادی ایفا کرده است. این صنعت به دلیل برخورداری از دامنه وسیعی از فعالیت ها، از تولید الیاف طبیعی و مصنوعی تا ریسندگی، بافندگی، رنگرزی، چاپ و تکمیل، در بسیاری از کشورها سهمی تعیین کننده در تولید، تجارت و ارزش افزوده صنعتی دارد. با این حال، همین گستردگی فرایندها و اتکای شدید آنها به آب، انرژی و مواد شیمیایی، صنعت نساجی را به یکی از صنایع دارای بار آلاینده گی بالا تبدیل کرده است. به بیان دیگر، در کنار منافع اقتصادی و اجتماعی، توسعه صنعت نساجی با افزایش تولید انواع پسماندها و آلاینده های زیست محیطی نیز همراه بوده است؛ آلاینده هایی که در صورت مدیریت نامناسب، می توانند آثار مخربی بر اکوسیستم های طبیعی و سلامت انسان بر جای گذارند (وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲؛ آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریاسامی، ۲۰۲۴).

در میان پیامدهای زیست محیطی صنعت نساجی، تولید حجم بالای فاضلاب، پسماند جامد و لجن صنعتی از مهم ترین مسائل به شمار می رود. اگرچه بخش عمده ای از مطالعات پیشین بر ویژگی ها، تصفیه و بازچرخانی فاضلاب های مایع متمرکز بوده اند، اما پسماندهای جامد و لجن های حاصل از تصفیه خانه های صنایع نساجی نیز به همان اندازه، و در برخی موارد حتی بیشتر، از منظر پایداری محیط زیست اهمیت دارند. این پسماندها غالباً حاوی ترکیبی از رنگزاهای باقی مانده، مواد آلی مقاوم به تجزیه، نمک ها، سورفکتانت ها، مواد شیمیایی کمکی، ترکیبات آلی سنتزی و در بسیاری از موارد فلزات سنگین هستند. از آنجا که بخش مهمی از این ترکیبات زیست تجزیه پذیری اندکی دارند یا در محیط پایدار باقی می مانند، دفع نامناسب آنها می تواند زمینه ساز آلودگی ثانویه خاک، منابع آب سطحی و آب های زیرزمینی شود (سنج رانی، گنگ و میرزا، ۲۰۲۴/۲۰۲۵؛ میاه و همکاران، ۲۰۲۳؛ داس و همکاران، ۲۰۲۲).

بیان مسئله اصلی در این پژوهش، به طور مشخص، به دفع غیراصولی یا ناکافی پسماندهای جامد و لجن های ناشی از صنایع نساجی مربوط می شود. در بسیاری از واحدهای صنعتی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، مدیریت این پسماندها همچنان با محدودیت های فنی، هزینه ای، نظارتی و اجرایی روبه رو است. در نتیجه، بخشی از لجن ها و پسماندهای جامد ممکن است پس از آگیری اولیه یا حتی بدون تثبیت مناسب، در محل های دفن عمومی، اراضی پیرامون صنایع، زمین های متروکه یا نقاطی با حداقل کنترل زیست محیطی تخلیه شوند. چنین وضعیتی زمانی نگران کننده تر می شود که ترکیبات شیمیایی موجود در این پسماندها تحت اثر بارش، رطوبت، دما، اکسایش، کاهش و سایر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، به تدریج آزاد شوند و شیرابه هایی با بار آلاینده گی بالا تولید کنند. این شیرابه ها می توانند از طریق نفوذ در لایه های خاک، به عمق زمین منتقل شده و کیفیت منابع آب زیرزمینی را تهدید کنند؛ یا از راه رواناب سطحی، به آب های سطحی و اراضی مجاور راه یابند (انور و همکاران، ۲۰۱۸؛ میاه و همکاران، ۲۰۲۳).

ماهیت آلاینده های موجود در پسماندهای نساجی، یکی از مهم ترین دلایل حساسیت این موضوع است. رنگزاهای نساجی، به ویژه رنگ های راکتیو، ایندیگو و سایر رنگ های سنتزی، به دلیل ساختار شیمیایی پیچیده و پایداری بالا، به آسانی در محیط تجزیه نمی شوند. این ترکیبات در صورت ورود به آب، سبب تغییر رنگ محسوس، کاهش نفوذ نور، اختلال در فرایند فتوسنتز، افت کیفیت زیباشناختی منابع آبی و آسیب به گیاهان و موجودات آبی می شوند. همچنین، حضور آنها معمولاً با افزایش بار آلودگی آلی و بالا رفتن شاخص هایی مانند اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی زیستی همراه است؛ وضعیتی که می تواند اکسیژن محلول آب را کاهش داده و تعادل زیستی اکوسیستم های آبی را برهم زند (آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲؛ وانگ،

جیانگ و گائو، ۲۰۲۲). افزون بر این، برخی از رنگزاها و فرآورده های تجزیه آن ها دارای آثار سمی، جهش زا و حتی سرطان زای بالقوه هستند و از این رو، حضور مداوم آن ها در محیط، یک تهدید زیست محیطی و بهداشتی جدی محسوب می شود (آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریاسامی، ۲۰۲۴).

در کنار رنگزاها، فلزات سنگین نیز از آلاینده های مهم موجود در پسماندها و لجن های نساجی به شمار می روند. در فرایندهای مختلف رنگرزی، چاپ، تثبیت و استفاده از برخی مواد کمکی، فلزاتی مانند کروم، مس، روی، منگنز، نیکل، سرب، کادمیوم و آرسنیک ممکن است در ترکیب نهایی پسماندها حضور داشته باشند. اهمیت این فلزات از آن جهت است که برخلاف بسیاری از آلاینده های آلی، به راحتی تجزیه نمی شوند، قابلیت ماندگاری طولانی در محیط دارند و می توانند در خاک، رسوبات و زیست توده های گیاهی و جانوری تجمع پیدا کنند. این ویژگی باعث می شود که دفع نادرست پسماندهای نساجی، نه تنها کیفیت محیط فیزیکی را کاهش دهد، بلکه از طریق انتقال تدریجی فلزات سنگین به محصولات کشاورزی و زنجیره غذایی، سلامت انسان و سایر جانداران را نیز به خطر اندازد (وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲؛ اولادیمجی و همکاران، ۲۰۲۴).

از دیدگاه محیط زیست خاک، ورود مستمر یا متمرکز پسماندهای نساجی می تواند بر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اثر بگذارد. تغییر در pH، افزایش شوری و هدایت الکتریکی، اختلال در تعادل یونی، کاهش تخلخل، افت نفوذپذیری، افزایش فشردگی و کاهش تهویه خاک از جمله پیامدهای فیزیکوشیمیایی محتمل هستند. همچنین، ترکیبات سمی و مقاوم موجود در این پسماندها می توانند فعالیت میکروارگانیسم های مفید خاک را کاهش دهند، چرخه عناصر غذایی را مختل کنند و کارکردهای زیستی خاک را تضعیف سازند. در نتیجه، سلامت خاک به عنوان یک بستر زنده و پویا کاهش می یابد و ظرفیت آن برای پشتیبانی از تولید زیستی، پالایش طبیعی آلاینده ها و حفظ تعادل اکولوژیک محدود می شود. این مسئله به ویژه در مناطقی که اراضی کشاورزی، سکونتگاه های انسانی و فعالیت های صنعتی در مجاورت یکدیگر قرار دارند، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (داس و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریاسامی، ۲۰۲۴).

پیامدهای ناشی از دفع پسماندهای نساجی، محدود به خاک نمی شود و منابع آب را نیز به طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر قرار می دهد. شیرابه های حاصل از لجن و پسماندهای جامد، در صورت نفوذ به محیط یا تماس با رواناب ها، می توانند موجب افزایش رنگ، مواد جامد محلول، بار آلی، شوری و غلظت فلزات در آب شوند. این تغییرات کیفیت آب را برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی کاهش می دهد و همزمان بر سلامت زیستمدان آبی و کارکرد اکوسیستم های آبی اثر منفی می گذارد. مطالعات مروری جدید نشان داده اند که آلاینده های صنعت نساجی، به ویژه رنگزاها و فلزات سنگین، در صورت عدم حذف یا مهار مؤثر، می توانند به بروز سمیت آبی، اختلال در فتوسنتز، کاهش تنوع زیستی و تشدید ریسک های اکولوژیک منجر شوند (آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲؛ وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲). از این منظر، مدیریت نامناسب پسماندهای نساجی صرفاً یک مسئله پسماند جامد نیست، بلکه موضوعی به هم پیوسته در پیوند با کیفیت آب، سلامت خاک و ایمنی بهداشتی جوامع انسانی است.

اهمیت انجام این پژوهش از چند جهت قابل تبیین است. نخست آنکه صنعت نساجی در بسیاری از کشورها، از جمله کشورهای در حال توسعه، سهم مهمی در اشتغال، تولید و صادرات دارد و هرگونه اختلال در پایداری زیست محیطی آن می تواند پیامدهای گسترده اجتماعی و اقتصادی به همراه داشته باشد. دوم آنکه هزینه های ناشی از آلودگی خاک و آب، اغلب در کوتاه مدت آشکار نمی شود، اما در بلندمدت به شکل کاهش بهره وری اراضی، افت کیفیت منابع آب، افزایش هزینه های تصفیه، آسیب به سلامت عمومی و کاهش تاب آوری زیست بومی بروز می یابد. سوم آنکه بخش قابل توجهی از راهبردهای مدیریتی موجود، بیشتر معطوف به تصفیه فاضلاب مایع است و موضوع دفع نهایی لجن و پسماند جامد هنوز در بسیاری از کشورها

به صورت کامل و نظام مند حل نشده است (سنج رانی، گنگ و میرزا، ۲۰۲۴/۲۰۲۵؛ جهان و همکاران، ۲۰۲۲؛ تومبره و همکاران، ۲۰۲۵).

مرور ادبیات نشان می دهد که با وجود افزایش مطالعات درباره تصفیه پساب، رنگبری، کاهش COD و BOD و فناوری های بازچرخانی آب در صنعت نساجی، هنوز در زمینه ارزیابی جامع اثرات دفع پسماندهای جامد و لجن های نساجی بر خاک و منابع آب، شکاف دانشی معناداری وجود دارد. بسیاری از پژوهش ها بر فاضلاب مایع تمرکز داشته اند و به مسئله لجن صرفاً به عنوان محصول جانبی تصفیه نگریسته اند، نه به عنوان یک منبع بالقوه آلودگی مستقل. از سوی دیگر، مطالعاتی که به مدیریت لجن پرداخته اند، غالباً یا بر امکان بازیافت و استفاده مجدد تمرکز داشته اند یا وضعیت مدیریتی واحدهای صنعتی را گزارش کرده اند؛ در حالی که ارزیابی هم زمان سازوکار انتقال آلاینده ها، آثار آن ها بر شاخص های سلامت خاک و کیفیت آب، و پیامدهای اکولوژیک و بهداشتی ناشی از آن، کمتر به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است (میا و همکاران، ۲۰۲۳؛ سنج رانی، گنگ و میرزا، ۲۰۲۴/۲۰۲۵؛ انور و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، در بسیاری از موارد، داده های کمی و تحلیلی کافی درباره سهم نسبی رنگزاها، فلزات سنگین، مواد آلی و سایر ترکیبات در تخریب کیفیت محیط در دسترس نیست.

در چنین شرایطی، ضرورت دارد پژوهشی انجام شود که با نگاهی جامع، فراتر از تصفیه فاضلاب مایع، به مسئله پسماند جامد و لجن نساجی بپردازد و رابطه میان نوع پسماند، ترکیب آلاینده ها، نحوه دفع و پیامدهای زیست محیطی آن را روشن سازد. این ضرورت زمانی برجسته تر می شود که برخی راهکارهای پیشنهادی برای استفاده مجدد از لجن، مانند به کارگیری در مصالح یا سایر کاربردهای ثانویه، بدون ارزیابی دقیق ریسک های محیط زیستی، ممکن است به جابه جایی مسئله از یک محیط به محیطی دیگر منجر شوند، نه حل واقعی آن (انور و همکاران، ۲۰۱۸؛ داس و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، هر گونه تصمیم گیری در این حوزه باید بر پایه شناخت دقیق ماهیت آلاینده ها، رفتار آن ها در محیط، مسیرهای انتقال، پتانسیل زیست انباشت، و ریسک های ناشی از تماس انسانی و اکولوژیک استوار باشد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات زیست محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب انجام می شود. این پژوهش در پی آن است که انواع اصلی پسماندهای جامد و لجن های نساجی و مهم ترین آلاینده های موجود در آن ها را شناسایی کند، آثار این آلاینده ها را بر شاخص های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و آب مورد بررسی قرار دهد، سازوکارهای انتقال و تجمع آلاینده ها را تبیین نماید و در نهایت، چارچوبی تحلیلی برای مدیریت پایدارتر پسماندهای صنعت نساجی ارائه دهد. انتظار می رود نتایج این مطالعه بتواند افزون بر غنی سازی ادبیات علمی، برای سیاست گذاران، مدیران صنعتی و متخصصان محیط زیست نیز در طراحی راهبردهای پیشگیرانه، کنترلی و اصلاحی سودمند واقع شود.

مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش بر این پیش فرض استوار است که پسماندهای ناشی از صنایع نساجی، صرفاً مواد زائد فاقد کارکرد نیستند، بلکه حامل مجموعه ای از ترکیبات شیمیایی، آلی و معدنی اند که در صورت دفع غیر اصولی، می توانند به عنوان یک منبع فعال آلودگی وارد به هم کنش با اجزای اصلی محیط زیست، یعنی خاک، آب و زیست مندان، شوند. از این منظر، ارزیابی اثرات زیست محیطی این پسماندها نیازمند اتکا به چند چارچوب نظری مکمل است: نخست، چارچوب آلودگی صنعتی و انتشار آلاینده ها؛ دوم، چارچوب سلامت خاک؛ سوم، چارچوب کیفیت منابع آب؛ چهارم، چارچوب سرنوشت و انتقال آلاینده ها در

محیط؛ و پنجم، چارچوب مدیریت پایدار پسماند. ترکیب این چارچوب ها امکان آن را فراهم می سازد که مسئله پسماند نساجی نه فقط به عنوان یک موضوع فنی در سطح کارخانه، بلکه به عنوان یک مسئله پیچیده محیط زیستی، اکولوژیک و مدیریتی فهم و تحلیل شود.

از منظر نظریه های مرتبط با آلودگی صنعتی، هر فعالیت تولیدی که در جریان آن مواد خام، انرژی و ترکیبات شیمیایی وارد فرایند می شوند، به طور اجتناب ناپذیر با تولید خروجی های ناخواسته نیز همراه است. این خروجی ها ممکن است در قالب پساب، گاز، حرارت، لجن یا پسماند جامد ظاهر شوند. در صنعت نساجی، به دلیل تنوع فرایندها و شدت مصرف آب و مواد شیمیایی، حجم و پیچیدگی این خروجی ها نسبتاً بالاست. در این میان، پسماند جامد و لجن حاصل از مراحل رنگرزی، چاپ، تکمیل و نیز واحدهای تصفیه فاضلاب، بخشی از بار آلایندهی کل سیستم تولید را تشکیل می دهند و از آنجا که اغلب حاوی رنگزها، ترکیبات آلی مقاوم، مواد کمکی فرایند، نمک ها و گاه فلزات سنگین هستند، می توانند پس از خروج از چرخه تولید نیز در محیط فعال باقی بمانند (وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲؛ آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، در سطح نظری، پسماند نساجی را باید به عنوان امتداد آلایندهی صنعتی پس از تولید در نظر گرفت؛ یعنی نقطه ای که در آن، آلودگی از محیط کارخانه به محیط طبیعی منتقل می شود.

در چارچوب نظری سلامت خاک، خاک تنها یک بستر فیزیکی برای نگهداری گیاه نیست، بلکه سامانه ای زنده، پویا و چندبعدی است که مجموعه ای از کارکردهای حیاتی از جمله تولید زیست توده، چرخه مواد غذایی، ذخیره و پالایش آب، زیستگاه موجودات ریز و درشت ریز، و تنظیم برخی فرایندهای زیست ژئوشیمیایی را بر عهده دارد. در ادبیات نوین محیط زیست، مفهوم سلامت خاک به توانایی خاک در حفظ عملکردهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی خود در طول زمان و در مواجهه با تنش ها اشاره دارد. بر این اساس، هر عاملی که بتواند تعادل عناصر، فعالیت میکروبی، ساختار فیزیکی یا ظرفیت پالایش طبیعی خاک را مختل کند، به عنوان تهدیدی برای سلامت خاک تلقی می شود. پسماندهای نساجی از این منظر، به ویژه به دلیل دارا بودن ترکیبات پایدار، سمی و شورکننده، می توانند سبب تغییر pH، افزایش هدایت الکتریکی، اختلال در نسبت های یونی، کاهش فعالیت آنزیمی و میکروبی، افت تخلخل و در نهایت کاهش کارکردهای بوم شناختی خاک شوند (داس و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریاسامی، ۲۰۲۴). در نتیجه، چارچوب سلامت خاک کمک می کند تا اثرات دفع پسماند نساجی صرفاً در سطح آلودگی شیمیایی سنجیده نشود، بلکه از منظر افت کارکرد و تاب آوری خاک نیز مورد بررسی قرار گیرد.

از سوی دیگر، کیفیت منابع آب نیز در این پژوهش بر مبنای چارچوبی نظری تحلیل می شود که آب را یک منبع چندمنظوره، محدود و آسیب پذیر می داند؛ منبعی که کیفیت آن تابع برهم کنش میان ویژگی های طبیعی حوضه، نوع کاربری زمین، شدت فعالیت های انسانی و بار آلایندهی ورودی است. در این دیدگاه، آلودگی آب فقط به معنای حضور یک ماده ناخواسته در آب نیست، بلکه به هر تغییری اطلاق می شود که توان آب را برای مصارف شرب، کشاورزی، صنعتی یا زیستگاهی کاهش دهد. پسماندها و لجن های نساجی، از طریق شیرابه، رواناب سطحی، نفوذ عمقی و انتقال ذره ای، می توانند مقادیر قابل توجهی از رنگ، مواد جامد محلول، مواد آلی، فلزات و ترکیبات سمی را وارد منابع آب کنند. این ورود، شاخص هایی مانند اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی زیستی، کدورت، شوری، pH و غلظت عناصر سنگین را تحت تأثیر قرار می دهد و در سطحی گسترده تر، پایداری اکوسیستم های آبی را به خطر می اندازد (آل توهامی و همکاران، ۲۰۲۲؛ وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲). بر این اساس، کیفیت آب در این تحقیق نه فقط به عنوان یک متغیر فیزیکوشیمیایی، بلکه به عنوان بازتابی از فشار محیطی ناشی از الگوی دفع پسماند صنعتی در نظر گرفته می شود.

یکی از مهم ترین بنیان های نظری پژوهش حاضر، مفهوم سرنوشت و انتقال آلاینده ها در محیط است. این مفهوم بیان می کند که آلاینده ها پس از ورود به محیط، در یک نقطه ثابت باقی نمی ماندند، بلکه بسته به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خود و نیز شرایط محیطی، دچار فرایندهایی همچون جذب سطحی، نفوذ، انحلال، تبادل یونی، رسوب، انتقال افقی، انتقال عمودی، زیست تجمع و تبدیل شیمیایی یا زیستی می شوند. بنابراین، میزان خطر یک آلاینده تنها به غلظت اولیه آن وابسته نیست، بلکه به تحرک پذیری، ماندگاری، قابلیت زیستی، امکان ورود به زنجیره غذایی و اثرات تجمعی آن نیز بستگی دارد. در خصوص پسماندهای نساجی، این چارچوب نظری اهمیت زیادی دارد، زیرا بسیاری از ترکیبات موجود در این پسماندها، به ویژه رنگرهای سنتزی و فلزات سنگین، در برابر تجزیه مقاوم اند و در شرایط خاص می توانند از محیط دفع به خاک های پیرامون، آب های سطحی یا آبخوان ها منتقل شوند (انور و همکاران، ۲۰۱۸؛ اولادیمجی و همکاران، ۲۰۲۴). در نتیجه، تحلیل اثرات زیست محیطی پسماند نساجی بدون توجه به رفتار انتقالی آلاینده ها، ناقص خواهد بود.

در تبیین رفتار آلاینده ها، نظریه ریسک محیط زیستی نیز نقش مهمی دارد. بر اساس این دیدگاه، خطر محیط زیستی زمانی معنا پیدا می کند که سه مؤلفه اصلی، یعنی منبع آلاینده، مسیر انتقال و گیرنده حساس، به طور هم زمان وجود داشته باشند. در مسئله مورد بررسی این پژوهش، پسماندها و لجن های نساجی منبع آلاینده اند؛ خاک، آب، گیاهان، آبزیان و انسان گیرندگان بالقوه اند؛ و مسیرهای انتقال شامل نفوذ در خاک، رواناب، انحلال در آب، جذب گیاهی و انتقال در زنجیره غذایی است. این چارچوب به پژوهش امکان می دهد که تنها به اندازه گیری حضور آلاینده ها بسنده نکند، بلکه درباره احتمال بروز اثر، شدت اثر و دامنه اثر نیز قضاوت کند. برای نمونه، ممکن است غلظت یک فلز سنگین در پسماند بالا باشد، اما اگر در شرایط مشخصی از تحرک کمی برخوردار باشد، الگوی ریسک آن با حالتی که همان فلز در محیط اسیدی و با قابلیت انتقال بالا قرار دارد، متفاوت خواهد بود. از این رو، ریسک محیط زیستی در این مطالعه به مثابه پیونددهنده میان ویژگی های پسماند و پیامدهای واقعی آن در محیط عمل می کند.

بنیان نظری دیگر این پژوهش، مفهوم پایداری محیط زیستی و مدیریت یکپارچه پسماند است. رویکردهای سنتی مدیریت پسماند، عمدتاً بر جمع آوری و دفع نهایی تمرکز داشتند، در حالی که رویکردهای جدید، پسماند را بخشی از چرخه حیات محصول و نظام تولید می دانند. بر اساس این رویکرد، ارزیابی پسماند باید از نقطه تولید آغاز شود و تا مرحله تفکیک، کاهش در مبدأ، بازیافت، استفاده مجدد، تثبیت، تبدیل و دفع نهایی ادامه یابد. در صنعت نساجی، این رویکرد اهمیت دوچندان دارد، زیرا بخشی از پسماندهای تولیدشده ممکن است قابلیت بازیافت یا استفاده ثانویه داشته باشند، اما این قابلیت تنها زمانی مطلوب است که انتقال آلودگی از یک محیط به محیط دیگر اتفاق نیفتد. به بیان دیگر، هر راهکار مدیریتی باید نه تنها از منظر اقتصادی و فنی، بلکه از دیدگاه ارزیابی چرخه ای آلودگی، ریسک زیست محیطی و ایمنی بلندمدت نیز بررسی شود (سنجرانی، گنگ و میرزا، ۲۰۲۴/۲۵؛ داس و همکاران، ۲۰۲۲). بدین ترتیب، چارچوب مدیریت پایدار پسماند کمک می کند تا یافته های پژوهش در سطح توصیف باقی نماند و به عرصه سیاست گذاری و تصمیم سازی نیز پیوند بخورد.

در ادبیات جدید، مفهوم اقتصاد چرخشی نیز به عنوان یکی از مبانی نظری مکمل برای تحلیل پسماندهای صنعتی مطرح شده است. اقتصاد چرخشی بر این اصل استوار است که مواد و منابع باید تا حد امکان در چرخه تولید و مصرف حفظ شوند و تولید پسماند به حداقل برسد. با این حال، در خصوص پسماندهای نساجی، به ویژه لجن های آلوده به رنگرهای و فلزات، اجرای این رویکرد بدون ارزیابی دقیق مخاطرات محیطی می تواند چالش برانگیز باشد. به همین دلیل، استفاده از منطق اقتصاد چرخشی در این حوزه مستلزم آن است که بازیافت یا استفاده مجدد از پسماندها با تحلیل کامل ویژگی های آلاینده، پایداری ترکیبات، ریسک نشت و امکان تماس انسان و محیط همراه باشد. در غیر این صورت، راهکارهایی که در ظاهر به کاهش پسماند منجر

می‌شوند، ممکن است در عمل موجب توزیع مجدد آلودگی در بخش‌های دیگر محیط یا اقتصاد شوند (انور و همکاران، ۲۰۱۸؛ میاه و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، در پژوهش حاضر، اقتصاد چرخشی نه به‌عنوان یک راه‌حل پیش‌فرض، بلکه به‌عنوان رویکردی مشروط به ارزیابی ریسک و ایمنی محیط‌زیستی در نظر گرفته می‌شود.

از منظر نظریه سامانه‌ها، مسئله پسماندهای نساجی را می‌توان حاصل تعامل چند زیرسامانه دانست: زیرسامانه تولید صنعتی، زیرسامانه مدیریت پسماند، زیرسامانه محیط طبیعی، و زیرسامانه حکمرانی و نظارت. هرگونه ضعف در یکی از این زیرسامانه‌ها می‌تواند کل سامانه را به سمت تولید یا تشدید آلودگی سوق دهد. برای مثال، اگر در سطح تولید صنعتی از مواد شیمیایی پرخطر استفاده شود، یا در سطح مدیریت پسماند، تثبیت و دفع ایمن انجام نگیرد، یا در سطح حکمرانی، ضوابط و پایش مؤثر وجود نداشته باشد، احتمال انتقال آلودگی به خاک و آب به شدت افزایش می‌یابد. این نگاه سامانه‌ای به پژوهش اجازه می‌دهد که پدیده مورد مطالعه را صرفاً به رفتار یک آلاینده یا یک محل دفع تقلیل ندهد، بلکه آن را در متن شبکه‌ای از روابط علی، مدیریتی و محیطی تحلیل کند. در نتیجه، مبانی نظری این تحقیق فقط بر ماهیت پسماند تمرکز ندارد، بلکه بر سازوکارهای نهادی و فرایندی تولید ریسک نیز توجه دارد.

افزون بر این، مفهوم تاب‌آوری محیط‌زیستی نیز در تحلیل حاضر اهمیت دارد. تاب‌آوری محیط‌زیستی به توانایی یک اکوسیستم یا منبع طبیعی در جذب تنش، حفظ کارکردهای اساسی و بازگشت به وضعیت تعادلی پس از اختلال اشاره دارد. خاک و منابع آب، تا حدی توان خودپالایی و بازیابی دارند، اما این توان محدود است و در صورت ورود مکرر یا شدید آلاینده‌ها، ممکن است دچار افت پایدار عملکرد شوند. پسماندهای نساجی، به‌ویژه هنگامی که حاوی مواد مقاوم و تجمع‌پذیر باشند، می‌توانند ظرفیت تاب‌آوری خاک و آب را کاهش دهند و زمان مورد نیاز برای احیای طبیعی را به‌طور معناداری افزایش دهند. از این دیدگاه، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی باید فراتر از اندازه‌گیری آبی آلاینده‌ها برود و به این پرسش نیز پاسخ دهد که آیا سامانه محیطی مورد نظر توان بازیابی خود را حفظ کرده است یا خیر. این نکته به‌ویژه در مناطقی اهمیت دارد که فشار هم‌زمان صنعتی، کشاورزی و شهری بر منابع طبیعی وارد می‌شود.

در مجموع، مبانی نظری این پژوهش نشان می‌دهد که دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی را نمی‌توان صرفاً یک مسئله خدماتی یا فنی در سطح کارخانه دانست. این پدیده، در بطن خود، مسئله‌ای چندبعدی است که با مفاهیم آلودگی صنعتی، سلامت خاک، کیفیت آب، انتقال آلاینده‌ها، ریسک محیط‌زیستی، پایداری، مدیریت یکپارچه پسماند، اقتصاد چرخشی، نگاه سامانه‌ای و تاب‌آوری محیط‌زیستی پیوند دارد. بر پایه این مبانی، پژوهش حاضر تلاش می‌کند رابطه میان ویژگی‌های پسماندهای نساجی، نحوه دفع آن‌ها و پیامدهای حاصل بر خاک و منابع آب را در قالب یک چارچوب تحلیلی منسجم بررسی کند. چنین چارچوبی کمک می‌کند تا یافته‌های پژوهش نه تنها برای توصیف وضعیت موجود، بلکه برای تحلیل علل، پیش‌بینی پیامدها و پیشنهاد راهبردهای مدیریتی مؤثر نیز قابل استفاده باشد.

پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در زمینه پسماندهای صنایع نساجی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مطالعات انجام‌شده، بر پساب مایع، روش‌های حذف رنگ، کاهش بار آلی، بهبود کارایی تصفیه‌خانه‌ها و فناوری‌های بازچرخانی آب متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که موضوع پسماندهای جامد و لجن‌های ناشی از این صنعت، به‌ویژه از منظر اثرات هم‌زمان بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب، نسبتاً کمتر به‌صورت جامع بررسی شده است. این عدم توازن در ادبیات پژوهشی سبب شده است که با وجود توسعه دانش فنی

درباره تصفیه فاضلاب نساجی، هنوز درک یکپارچه و مبتنی بر شواهد کافی از پیامدهای دفع نهایی پسماندهای جامد و لجن های نساجی در محیط وجود نداشته باشد. از این رو، مرور پیشینه پژوهش حاضر در دو سطح مطالعات خارجی و مطالعات داخلی قابل سامان دهی است؛ به گونه ای که ابتدا روند پژوهش های بین المللی و سپس وضعیت ادبیات پژوهشی فارسی بررسی شود.

در سطح بین المللی، مطالعات مروری و پژوهش های جدید به روشنی نشان داده اند که صنعت نساجی از آلاینده ترین صنایع در حوزه مصرف آب و تولید پساب و لجن محسوب می شود. وانگ، جیانگ و گائو (۲۰۲۲) در مروری جامع بر ویژگی ها، منابع و روش های کنترل آلودگی در صنعت نساجی نشان دادند که فرایندهای رنگرزی و تکمیل، مقادیر زیادی رنگزا، مواد آلی، نمک ها و در برخی موارد فلزات سنگین را وارد جریان پسماند می کنند. یافته های این مطالعه نشان می دهد که اگرچه توجه اصلی در اغلب پژوهش ها بر فاضلاب مایع متمرکز بوده است، اما بخشی از آلاینده ها پس از فرایند تصفیه به لجن منتقل می شوند و همین امر، مدیریت لجن را به یک مسئله ثانویه اما بسیار مهم تبدیل می کند. اهمیت این پژوهش برای مطالعه حاضر در آن است که روشن می سازد آلودگی نساجی با تصفیه مایع پایان نمی یابد، بلکه ممکن است در قالب لجن و پسماند جامد به محیط منتقل شود.

در همین راستا، آل توهامی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه ای مروری درباره اکوتوکسیکولوژی آلاینده های نساجی، بر نقش رنگزاهای سنتزی و ترکیبات شیمیایی مرتبط در ایجاد اثرات منفی بر اکوسیستم های آبی و زیستی تأکید کردند. آنان نشان دادند که ورود این ترکیبات به محیط موجب افزایش اکسیژن خواهی شیمیایی و زیستی، کاهش نفوذ نور، اختلال در فتوسنتز، ایجاد سمیت برای آبزیان و بروز آثار جهش زایی و سرطان زایی بالقوه می شود. هرچند تمرکز اصلی این مطالعه بر آب و آبزیان است، اما از منظر نظری و تحلیلی برای پژوهش حاضر اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نشان می دهد ترکیبات موجود در پسماندهای نساجی، ماهیتی فعال و خطرزا دارند و در صورت انتقال از محل دفع به منابع آب، می توانند کیفیت اکولوژیک آن ها را به طور معنادار کاهش دهند.

پریاسامی (۲۰۲۴) نیز در اثری جدید، با تمرکز بر آلاینده های صنعت نساجی و چالش های محیط زیستی ناشی از آن، بر این نکته تأکید کرده است که مواد رنگزا و سایر ترکیبات مصرفی در این صنعت، به دلیل پایداری شیمیایی بالا و مقاومت در برابر تجزیه، یکی از مهم ترین منابع آلودگی محیط زیست به شمار می روند. وی نشان می دهد که مسئله صرفاً به حضور این مواد در فاضلاب محدود نیست، بلکه پسماندهای باقی مانده از عملیات تصفیه و دفع نیز می توانند منشأ آلودگی باشند. اهمیت مطالعه پریاسامی برای پژوهش حاضر آن است که بر لزوم نگاه جامع به زنجیره آلودگی نساجی، از تولید تا دفع نهایی، تأکید دارد و از این رو با رویکرد تحلیلی این تحقیق هم راستا است.

در حوزه مدیریت پسماند جامد و لجن نساجی، سنج رانی، گنگ و میرزا (۲۰۲۴/۲۰۲۵) یکی از به روزترین مرورهای علمی را ارائه کرده اند. این پژوهش با تمرکز بر انواع پسماند جامد صنعت نساجی، روش های مدیریت، بازیافت، استفاده مجدد و چالش های دفع، نشان می دهد که حجم پسماند جامد این صنعت در حال افزایش است و راهبردهای سنتی دفع، دیگر پاسخگوی الزامات پایداری محیط زیستی نیستند. نکته مهم در یافته های آنان این است که هرچند بازیافت و استفاده مجدد از پسماندها می تواند در چارچوب اقتصاد چرخشی مفید باشد، اما در مورد لجن های آلوده به رنگزاها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی مقاوم، هر نوع استفاده ثانویه باید با احتیاط و مبتنی بر ارزیابی ریسک انجام گیرد. این نتیجه، برای پژوهش حاضر اهمیت روش شناختی و تحلیلی دارد؛ زیرا نشان می دهد ارزیابی اثرات دفع پسماند نساجی بدون توجه به ترکیب آلاینده ها و سرنوشت محیطی آن ها، ناکافی خواهد بود.

در سطح پژوهش های تجربی، میاه و همکاران (۲۰۲۳) وضعیت واقعی مدیریت لجن صنایع نساجی را در یکی از مراکز مهم تولید پوشاک و نساجی در بنگلادش بررسی کردند. یافته های آنان نشان داد که لجن های حاصل از تصفیه خانه ها اغلب بدون پردازش کافی و بدون ارزیابی جامع خطرات محیط زیستی مدیریت می شوند. این مطالعه آشکار ساخت که بخش مهمی از چالش، نه در شناخت وجود لجن، بلکه در نبود سامانه مؤثر برای دفع ایمن، پایش، و ارزیابی پیامدهای آن نهفته است. پژوهش میاه و همکاران از این نظر برای مطالعه حاضر بسیار مهم است که نشان می دهد در عمل، فاصله میان فناوری تصفیه و مدیریت ایمن پسماند نهایی قابل توجه است و همین فاصله می تواند بستر آلودگی خاک و منابع آب را فراهم کند.

در ارتباط با استفاده مجدد از لجن و پیامدهای احتمالی آن، انور و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی امکان به کارگیری لجن نساجی در برخی کاربردها و نیز سنجش ریسک های سلامت مرتبط پرداختند. نتایج آنان نشان داد که هرچند استفاده مجدد از لجن ممکن است از منظر کاهش حجم پسماند جذاب به نظر برسد، اما ترکیب شیمیایی لجن، به ویژه از حیث فلزات سنگین و سایر ترکیبات بالقوه سمی، باید با دقت سنجیده شود. این یافته اهمیت ویژه ای برای پژوهش حاضر دارد؛ زیرا نشان می دهد مدیریت پسماند نساجی تنها با معیار کاهش مقدار پسماند قابل قضاوت نیست، بلکه باید اثرات بالقوه آن بر سلامت انسان، خاک و آب نیز هم زمان در نظر گرفته شود.

داس و همکاران (۲۰۲۲) نیز با تمرکز بر لجن صنعتی و امکان ایجاد ارزش افزوده از آن، بر این نکته تأکید کرده اند که بسیاری از لجن های صنعتی، از جمله لجن های نساجی، دارای ترکیبات مقاوم و غیر زیست تجزیه پذیر هستند و اگرچه می توان از برخی رویکردهای فناورانه برای تبدیل آن ها به محصولات جدید بهره برد، اما هرگونه مداخله باید بر پایه ارزیابی دقیق ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیست محیطی پسماند صورت گیرد. این مطالعه از آن جهت با پژوهش حاضر مرتبط است که نشان می دهد نگاه صرفاً فناورانه به پسماند بدون سنجش پیامدهای اکولوژیک، ممکن است گمراه کننده باشد.

در حوزه آلودگی فلزات سنگین، اولادیمچی و همکاران (۲۰۲۴) به نقش فلزات موجود در پساب و پسماندهای صنعتی در آلودگی محیط و ریسک های مرتبط پرداخته اند. یافته های آنان نشان می دهد که فلزات سنگین به دلیل ماندگاری بالا، قابلیت تجمع در خاک و رسوبات، و امکان انتقال به زنجیره غذایی، یکی از مهم ترین عوامل تهدید کننده سلامت محیط و انسان هستند. این مطالعه اگرچه محدود به صنعت نساجی نیست، اما از آنجا که نساجی یکی از مصرف کنندگان و تولید کنندگان بالقوه چنین فلزاتی است، برای چارچوب نظری و تحلیلی این پژوهش اهمیت دارد.

به طور کلی، بررسی مطالعات خارجی چند الگوی مهم را آشکار می سازد. نخست آنکه بخش اعظم مطالعات بر شناسایی آلاینده ها و تصفیه فاضلاب مایع تمرکز دارند. دوم آنکه در مطالعات جدیدتر، توجه به مدیریت لجن و پسماند جامد در حال افزایش است، اما هنوز این حوزه نسبت به فاضلاب مایع کمتر توسعه یافته است. سوم آنکه مطالعات مربوط به اثرات زیست محیطی عمدتاً بر کیفیت آب و اکوسیستم های آبی متمرکز بوده اند و بررسی هم زمان اثرات بر خاک و آب کمتر مشاهده می شود. چهارم آنکه موضوع انتقال آلاینده ها از محل دفع به محیط پیرامون، به ویژه در شرایط واقعی و میدانی، هنوز نیازمند پژوهش های بیشتر است. پنجم آنکه در بسیاری از مطالعات، ارزیابی ریسک محیط زیستی و بهداشتی به صورت مستقل یا محدود انجام شده و کمتر با داده های یکپارچه خاک و آب تلفیق شده است. بنابراین، ادبیات خارجی با وجود غنا و تنوع، هنوز از یک شکاف تحلیلی مهم رنج می برد که همان نبود رویکرد جامع در ارزیابی پیامدهای دفع پسماندهای نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب است.

در سطح داخلی و ادبیات پژوهشی فارسی، نتایج جست‌وجو و مرور منابع نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در ایران بیشتر بر تصفیه پساب نساجی، حذف رنگ از محیط‌های آبی، جذب و حذف فلزات سنگین از آب، بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه، و استفاده از جاذب‌های طبیعی یا مصنوعی برای کاهش بار آلاینده‌ها متمرکز بوده‌اند. در این مطالعات، مسئله اصلی معمولاً کارایی حذف رنگ، کاهش شاخص‌های آلودگی در فاضلاب، و انتخاب روش مناسب برای تصفیه پساب است. این جهت‌گیری پژوهشی هرچند برای بهبود کیفیت پساب خروجی اهمیت زیادی دارد، اما در عمل باعث شده است که موضوع پسماند جامد و لجن، به‌ویژه از منظر دفع نهایی و اثرات محیط‌زیستی آن، کمتر مورد توجه قرار گیرد.

بررسی پایگاه‌های علمی فارسی نشان می‌دهد که پژوهش‌های داخلی در زمینه صنعت نساجی، عمدتاً پیرامون موضوعاتی همچون حذف رنگ‌های راکتو و اسیدی از آب، استفاده از نانوذرات و جاذب‌های زیستی، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، انعقاد و لخته‌سازی، الکتروشیمی، غشاها و روش‌های ترکیبی تصفیه سامان یافته‌اند. در برخی موارد نیز پژوهش‌هایی درباره مشخصات فاضلاب نساجی و بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها انجام شده است. با این حال، مطالعه‌ای که به‌طور مستقیم و هم‌زمان، اثرات دفع پسماند جامد یا لجن نساجی را بر شاخص‌های سلامت خاک و کیفیت منابع آب ارزیابی کند، در مرور حاضر به‌صورت برجسته و نظام‌مند مشاهده نشد. این خلأ، اهمیت پژوهش حاضر را در بستر داخلی دوچندان می‌سازد.

از منظر تحلیلی، ادبیات فارسی موجود را می‌توان دارای سه محدودیت اصلی دانست. نخست، غلبه رویکرد تصفیه‌محور بر رویکرد ارزیابی اثرات محیط‌زیستی؛ به این معنا که بیشتر پژوهش‌ها به دنبال پاسخ به این پرسش بوده‌اند که چگونه می‌توان آلاینده‌های موجود در فاضلاب را حذف کرد، نه اینکه پسماندهای باقی‌مانده پس از تصفیه چه سرنوشتی پیدا می‌کنند و چه اثری بر محیط دارند. دوم، تمرکز بر محیط آبی و کم‌توجهی به خاک به‌عنوان گیرنده مهم آلاینده‌های صنعتی. سوم، نبود چارچوب‌های تلفیقی برای تحلیل هم‌زمان پسماند، خاک، آب و ریسک‌های ناشی از انتقال آلاینده‌ها. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که پژوهش حاضر نه‌تنها در سطح خارجی، بلکه در بستر داخلی نیز می‌تواند یک خلأ علمی مشخص را پوشش دهد.

بر این اساس، جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه دانش موجود درباره ماهیت آلاینده‌های نساجی، خطرات رنگ‌زها، نقش فلزات سنگین و ضرورت بهبود مدیریت پسماند به‌طور قابل‌توجهی توسعه یافته است، اما هنوز چند کمبود اساسی پابرجاست: کمبود مطالعاتی که به‌صورت هم‌زمان بر خاک و آب تمرکز کنند؛ کمبود داده‌های تحلیلی درباره رابطه میان نوع و نحوه دفع پسماند با شدت آلودگی محیطی؛ کمبود پژوهش‌های میدانی و واقع‌گرا درباره سرنوشت لجن و پسماند جامد؛ و کمبود رویکردهای یکپارچه‌ای که ارزیابی کیفیت محیط، سلامت اکولوژیک و ریسک بهداشتی را در کنار هم قرار دهند. پژوهش حاضر در پاسخ به همین خلأها طراحی شده است و تلاش می‌کند با تمرکز بر اثرات زیست‌محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب، تصویری منسجم‌تر، تحلیلی‌تر و کاربردی‌تر از این مسئله ارائه دهد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از حیث هدف، کاربردی و از حیث شیوه اجرا، توصیفی - تحلیلی با رویکرد پیمایشی - میدانی است. منطق اصلی انتخاب این روش آن است که مسئله مورد بررسی، یعنی ارزیابی اثرات زیست‌محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب، ماهیتی چندبعدی دارد و برای تحلیل آن، ترکیب داده‌های محیطی، شاخص‌های فیزیکوشیمیایی و تحلیل آماری روابط میان متغیرها ضروری است. بر این اساس، پژوهش حاضر به‌گونه‌ای طراحی شده است

که بتواند هم وضعیت موجود آلودگی را توصیف کند، هم تفاوت میان نقاط در معرض آلودگی و نقاط شاهد را نشان دهد، و هم رابطه میان شدت مواجهه با پسماندهای نساجی و تغییرات شاخص های خاک و آب را به صورت تحلیلی بررسی کند.

جامعه مورد مطالعه در این پژوهش، شامل محدوده های تحت تأثیر فعالیت واحدهای نساجی و محل های دفع یا انباشت پسماندهای ناشی از این صنایع است. از آنجا که هدف پژوهش، سنجش اثرات زیست محیطی در محیط واقعی است، واحد تحلیل در این مطالعه، نمونه های خاک و آب برداشت شده از نقاط مختلف پیرامون محل دفع پسماند در مقایسه با نقاط شاهد فاقد تماس مستقیم با پسماند در همان پهنه جغرافیایی یا پهنه ای با شرایط نسبتاً مشابه است. بدین ترتیب، طراحی پژوهش بر مبنای مقایسه بین دو گروه اصلی، یعنی نقاط آلوده یا در معرض اثر و نقاط کنترل، سامان یافته است. این نوع طراحی امکان می دهد که تغییرات مشاهده شده در شاخص های محیطی با احتمال بیشتری به اثرات ناشی از دفع پسماندهای نساجی نسبت داده شود، هرچند در تحلیل نهایی، سایر عوامل محیطی نیز با احتیاط مدنظر قرار می گیرند.

روش نمونه گیری به صورت هدفمند و طبقه بندی شده انجام می شود. در مرحله نخست، محدوده های اصلی دفع، انباشت یا تخلیه پسماندهای نساجی بر اساس شواهد میدانی، اطلاعات مدیریتی یا گزارش های محلی شناسایی می شوند. سپس با توجه به جهت جریان احتمالی رواناب، شیب زمین، فاصله از محل دفع، و موقعیت منابع آب سطحی یا زیرزمینی، نقاط نمونه برداری تعیین می گردند. برای افزایش دقت تحلیلی، نقاط نمونه برداری در چند طبقه فاصله ای تعریف می شوند؛ برای مثال، نقاط نزدیک به محل دفع، نقاط با فاصله متوسط، و نقاط دورتر که نقش شاهد نسبی را ایفا می کنند. در مورد آب نیز، بسته به شرایط منطقه، نمونه ها از منابع آب سطحی، کانال های زهکش، آب های راکد پیرامونی، یا در صورت دسترسی، از چاه ها و منابع آب زیرزمینی کم عمق برداشت می شوند. این الگوی نمونه گیری به پژوهش امکان می دهد که تغییرات مکانی آلودگی را نیز بررسی کند و فقط به یک سنجش نقطه ای محدود نماند.

در بخش خاک، نمونه برداری از لایه سطحی و در صورت نیاز از عمق های پایین تر انجام می شود، زیرا بخش عمده تماس اولیه پسماند با خاک در لایه های فوقانی رخ می دهد و آثار تجمع آلاینده ها نیز در همین لایه ها بارزتر است. نمونه ها پس از برداشت، در ظروف یا کیسه های استاندارد نگهداری شده و برای انجام آزمون های آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل می شوند. در بخش آب نیز نمونه ها در ظروف استاندارد، مطابق با دستورالعمل های نمونه برداری محیطی، جمع آوری و برای جلوگیری از تغییر ویژگی ها، در شرایط نگهداری مناسب به آزمایشگاه منتقل می گردند. زمان نمونه برداری، شرایط دمایی، وضعیت بارندگی، و ویژگی های ظاهری محیط نیز ثبت می شود تا در تفسیر نتایج مورد استفاده قرار گیرد.

متغیرهای پژوهش در دو دسته اصلی مستقل و وابسته تعریف می شوند. متغیر مستقل در این مطالعه، شدت و وضعیت مواجهه محیط با پسماندهای ناشی از صنایع نساجی است که به صورت عملیاتی با شاخص هایی مانند فاصله از محل دفع پسماند، نوع محل نمونه برداری، قرارگیری در محدوده در معرض آلودگی یا شاهد، و در صورت امکان نوع پسماند موجود (لجن، پسماند جامد، یا شیرابه) سنجیده می شود. متغیرهای وابسته شامل شاخص های سلامت خاک و کیفیت منابع آب هستند. برای خاک، شاخص هایی مانند pH، هدایت الکتریکی (EC)، ماده آلی، ظرفیت نگهداشت رطوبت، غلظت برخی فلزات سنگین منتخب، و در صورت امکان برخی شاخص های زیستی یا میکروبی در نظر گرفته می شوند. برای آب نیز شاخص هایی مانند pH، هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی زیستی (BOD)، کل مواد محلول (TDS)، کدورت، شوری و غلظت فلزات سنگین منتخب اندازه گیری می شوند. انتخاب این شاخص ها بر این مبنا صورت گرفته است که بتوانند هم بار شیمیایی آلودگی و هم تغییر در کیفیت عملکردی خاک و آب را بازنمایی کنند.

برای سنجش دقیق متغیرها، از روش های متداول و استاندارد آزمایشگاهی استفاده می شود. اندازه گیری pH و هدایت الکتریکی با دستگاه های کالیبره شده و بر اساس دستورالعمل های استاندارد انجام می گیرد. COD و BOD با روش های مرجع آزمایشگاهی سنجیده می شوند و فلزات سنگین نیز در صورت فراهم بودن امکانات، با استفاده از روش هایی نظیر جذب اتمی یا روش های مشابه قابل اعتماد اندازه گیری خواهند شد. به منظور افزایش پایایی داده ها، برای هر نمونه ثبت مشخصات، کدگذاری، نگهداری مناسب و کنترل کیفیت آزمایشگاهی پیش بینی می شود. همچنین بخشی از نمونه ها می توانند به صورت تکراری یا شاهد آزمایشگاهی بررسی شوند تا از ثبات اندازه گیری ها اطمینان حاصل شود.

ابزار گردآوری داده ها در این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: چک لیست میدانی، فرم ثبت مشخصات نمونه ها و نتایج آزمون های آزمایشگاهی. چک لیست میدانی برای ثبت اطلاعاتی نظیر موقعیت جغرافیایی، فاصله از محل دفع، نوع محیط پیرامون، وضعیت پوشش سطح، وجود رواناب یا شیرابه، و سایر نشانه های ظاهری آلودگی به کار می رود. فرم ثبت نمونه ها نیز برای مستندسازی زمان برداشت، نوع نمونه، شرایط نگهداری، کد آزمایشگاهی و سایر مشخصات استفاده می شود. در نهایت، داده های کمی حاصل از آزمایشگاه مبنای اصلی تحلیل آماری را تشکیل می دهند. این ساختار داده ای سبب می شود که پژوهش فقط بر نتایج عددی متکی نباشد، بلکه بتواند تفسیر خود را با شواهد میدانی نیز پشتیبانی کند.

برای سنجش روایی و پایایی، در این پژوهش از چند راهکار استفاده می شود. روایی محتوایی شاخص ها و ابزار ثبت داده ها با اتکا به ادبیات پژوهش و استانداردهای سنجش کیفیت خاک و آب تأمین می گردد. به این معنا که شاخص های انتخاب شده بر اساس پیشینه علمی و تناسب آن ها با ماهیت آلاینده های نساجی تعیین می شوند. پایایی اندازه گیری نیز از طریق کالیبراسیون تجهیزات، اجرای آزمون ها طبق دستورالعمل استاندارد، تکرار محدود برخی سنجش ها و ثبت دقیق فرایند نمونه برداری و آزمایش تضمین می شود. در صورت بهره گیری از ارزیابی کارشناسی برای برخی متغیرهای تکمیلی، ضریب توافق یا بازبینی هم زمان نیز می تواند مدنظر قرار گیرد.

روش تجزیه و تحلیل داده ها در دو سطح آمار توصیفی و آمار استنباطی انجام می شود. در سطح توصیفی، برای هر یک از شاخص های خاک و آب، از شاخص هایی مانند میانگین، انحراف معیار، حداقل، حداکثر و دامنه تغییرات استفاده خواهد شد تا تصویر اولیه ای از وضعیت داده ها به دست آید. علاوه بر این، نتایج در قالب جداول و نمودارهای مناسب ارائه می شود تا مقایسه میان نقاط آلوده و شاهد تسهیل گردد. در سطح استنباطی، ابتدا نرمال بودن توزیع داده ها با آزمون هایی مانند کولموگروف-اسمیرنوف یا شاپیرو-ویلک بررسی می شود. در صورت نرمال بودن داده ها، برای مقایسه میانگین شاخص ها بین دو گروه از آزمون t مستقل و برای مقایسه بیش از دو گروه یا طبقه فاصله ای از تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) استفاده خواهد شد. اگر پیش فرض نرمال بودن برقرار نباشد، از آزمون های ناپارامتری متناظر مانند من-ویتنی یا کروسکال-والیس بهره گرفته می شود.

افزون بر مقایسه گروه ها، برای بررسی رابطه میان شدت مواجهه با پسماند و تغییرات شاخص های محیطی، از ضریب همبستگی پیرسون یا اسپیرمن - بسته به نوع توزیع داده ها - استفاده می شود. همچنین در صورتی که حجم و کیفیت داده ها اجازه دهد، از رگرسیون خطی برای تبیین سهم متغیرهای مستقل در تغییر شاخص های کیفیت خاک و آب استفاده خواهد شد. این تحلیل می تواند نشان دهد که آیا کاهش فاصله از محل دفع یا قرار گرفتن در محدوده آلوده، به طور معناداری با افزایش بار آلودگی یا افت کیفیت محیطی همراه است یا خیر. سطح معناداری آزمون ها در این پژوهش ۰.۰۵ در نظر گرفته می شود.

برای پردازش و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزارهای آماری متداول مانند SPSS، R یا Excel استفاده می‌شود. داده‌ها پس از ورود، پاک‌سازی، بازبینی و کنترل خطا، مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. در این مرحله، داده‌های پرت، مقادیر مفقود، ناسازگاری‌های احتمالی و خطاهای ورود اطلاعات بررسی می‌شوند تا تحلیل نهایی بر پایه داده‌های معتبر انجام گیرد. همچنین نتایج کمی با مشاهدات میدانی تطبیق داده می‌شود تا تفسیر نهایی از انسجام بیشتری برخوردار باشد.

از نظر ملاحظات اخلاقی و اجرایی، این پژوهش بر اصل دقت علمی، بی‌طرفی تحلیلی و امانت‌داری در گزارش یافته‌ها استوار است. داده‌ها بدون دستکاری و با رعایت اصول مستندسازی ثبت و تحلیل می‌شوند. در صورت استفاده از اطلاعات واحدهای صنعتی یا داده‌های محلی، ملاحظات مربوط به محرمانگی و استفاده صرفاً پژوهشی از داده‌ها رعایت خواهد شد. همچنین تلاش می‌شود نمونه‌برداری و بررسی‌های میدانی به گونه‌ای انجام گیرد که کمترین مداخله را در محیط طبیعی ایجاد کند.

در مجموع، روش‌شناسی این پژوهش به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند با اتکا به داده‌های واقعی یا داده‌های شبیه‌سازی شده منطبق با منطق محیطی، تصویری علمی و قابل دفاع از اثرات دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب ارائه دهد. نقطه قوت این روش در آن است که از یک‌سو بر شاخص‌های عینی و آزمایشگاهی تکیه دارد و از سوی دیگر، با مقایسه مکانی، تحلیل آماری و پیوند دادن داده‌های خاک و آب، امکان دستیابی به یک ارزیابی یکپارچه را فراهم می‌سازد. این چارچوب روش‌شناختی، مبنای مناسبی برای تدوین بخش بعدی پژوهش، یعنی یافته‌ها و تحلیل داده‌ها، فراهم می‌کند.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

در این بخش، یافته‌های پژوهش بر اساس داده‌های نمونه‌واقع‌نما ارائه می‌شود. داده‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با منطق روش‌شناختی پژوهش سازگار باشند و امکان تحلیل اثرات دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر شاخص‌های سلامت خاک و کیفیت منابع آب را فراهم کنند. هدف از ارائه این داده‌ها، نشان دادن الگوی تحلیلی پژوهش، نحوه مقایسه نقاط در معرض آلودگی با نقاط شاهد، و تفسیر آماری نتایج است. بر این اساس، نمونه‌ها در دو گروه اصلی شامل گروه در معرض پسماند و گروه شاهد طبقه‌بندی شدند. برای افزایش دقت تحلیل، در بخش خاک و آب، هر گروه شامل ۱۵ مشاهده فرض شد و شاخص‌های منتخب فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفتند.

آمار توصیفی شاخص‌های سلامت خاک

جدول ۱، وضعیت توصیفی شاخص‌های منتخب خاک را در دو گروه شاهد و در معرض پسماند نشان می‌دهد. شاخص‌های مورد بررسی شامل pH، هدایت الکتریکی (EC)، ماده آلی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل هستند. انتخاب این شاخص‌ها بر این مبنا صورت گرفته است که از یک‌سو بتوانند تغییرات عمومی کیفیت خاک را نشان دهند و از سوی دیگر، امکان ارزیابی آلودگی فلزی ناشی از پسماندهای نساجی را فراهم کنند.

جدول ۱. آمار توصیفی شاخص های خاک در گروه شاهد و گروه در معرض پسماند

شاخص خاک	گروه	تعداد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
pH	شاهد	۱۵	۷.۳۲	۰.۲۸	۶.۹۰	۷.۷۰
pH	در معرض پسماند	۱۵	۸.۱۱	۰.۳۵	۷.۵۰	۸.۶۰
EC، دسی زیمنس بر متر	شاهد	۱۵	۱.۲۴	۰.۳۱	۰.۸۰	۱.۸۰
EC، دسی زیمنس بر متر	در معرض پسماند	۱۵	۳.۸۶	۰.۷۴	۲.۶۰	۵.۱۰
ماده آلی، درصد	شاهد	۱۵	۲.۴۱	۰.۴۲	۱.۸۰	۳.۱۰
ماده آلی، درصد	در معرض پسماند	۱۵	۱.۶۷	۰.۳۸	۱.۱۰	۲.۳۰
سرب، میلی گرم بر کیلوگرم	شاهد	۱۵	۱۸.۷۵	۴.۹۶	۱۱.۲۰	۲۶.۴۰
سرب، میلی گرم بر کیلوگرم	در معرض پسماند	۱۵	۵۱.۸۴	۱۰.۷۲	۳۵.۱۰	۷۲.۳۰
کادمیم، میلی گرم بر کیلوگرم	شاهد	۱۵	۰.۴۳	۰.۱۲	۰.۲۲	۰.۶۵
کادمیم، میلی گرم بر کیلوگرم	در معرض پسماند	۱۵	۱.۲۸	۰.۳۴	۰.۷۲	۱.۸۹
کروم، میلی گرم بر کیلوگرم	شاهد	۱۵	۲۶.۵۷	۶.۲۱	۱۶.۸۰	۳۸.۵۰
کروم، میلی گرم بر کیلوگرم	در معرض پسماند	۱۵	۸۴.۳۶	۱۸.۴۳	۵۲.۷۰	۱۱۹.۶۰
نیکل، میلی گرم بر کیلوگرم	شاهد	۱۵	۲۱.۱۲	۵.۱۸	۱۳.۹۰	۳۰.۴۰
نیکل، میلی گرم بر کیلوگرم	در معرض پسماند	۱۵	۴۶.۷۹	۹.۶۵	۳۱.۲۰	۶۴.۸۰

بر اساس نتایج جدول ۱، میانگین pH خاک در گروه در معرض پسماند بالاتر از گروه شاهد است. این افزایش می تواند ناشی از ورود ترکیبات قلیایی، نمک ها و مواد کمی مورد استفاده در فرایندهای شست و شو، رنگرزی و تکمیل نساجی باشد. همچنین، مقدار هدایت الکتریکی خاک در نقاط در معرض پسماند به طور محسوس بیشتری از نقاط شاهد است که نشان دهنده افزایش شوری و تجمع یون های محلول در خاک است. افزایش EC یکی از نشانه های مهم فشار شیمیایی بر خاک محسوب می شود، زیرا می تواند بر جذب آب توسط گیاه، فعالیت میکروبی و ساختار فیزیکی خاک اثر منفی بگذارد.

از سوی دیگر، میانگین ماده آلی در خاک های در معرض پسماند کمتر از گروه شاهد است. این کاهش ممکن است به اختلال در فعالیت زیستی خاک، کاهش جمعیت میکروارگانیسم های مفید، یا تخریب ساختار طبیعی خاک در اثر ورود ترکیبات آلاینده مربوط باشد. همچنین، میانگین غلظت فلزات سنگین شامل سرب، کادمیم، کروم و نیکل در گروه در معرض پسماند به طور آشکاری بیشتر از گروه شاهد است. این یافته نشان می دهد که محل های دفع پسماندهای نساجی می توانند به عنوان منبع تجمع فلزات در خاک عمل کنند و در صورت تداوم، خطر ورود این عناصر به زنجیره غذایی یا انتقال به آب های زیرزمینی را افزایش دهند.

آمار توصیفی شاخص های کیفیت آب

جدول ۲، آمار توصیفی شاخص های منتخب کیفیت آب را در دو گروه شاهد و در معرض پسماند نشان می دهد. شاخص های مورد بررسی شامل pH، هدایت الکتریکی، کل مواد محلول، اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی زیستی، کدورت، سرب و کروم هستند.

جدول ۲: آمار توصیفی شاخص های کیفیت آب در گروه شاهد و گروه در معرض پسماند

شاخص آب	گروه	تعداد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
pH	شاهد	۱۵	۷.۱۸	۰.۲۴	۶.۸۰	۷.۵۰
pH	در معرض پسماند	۱۵	۸.۳۷	۰.۴۱	۷.۶۰	۹.۱۰
EC، میکروزیمنس بر سانتی متر	شاهد	۱۵	۶۸۵	۱۱۲	۵۱۰	۸۸۰
EC، میکروزیمنس بر سانتی متر	در معرض پسماند	۱۵	۲۱۸۰	۴۳۵	۱۵۲۰	۳۰۵۰
TDS، میلی گرم بر لیتر	شاهد	۱۵	۴۳۶	۷۶	۳۲۰	۵۶۵
TDS، میلی گرم بر لیتر	در معرض پسماند	۱۵	۱۴۳۸	۲۹۵	۹۸۰	۲۰۲۰
COD، میلی گرم بر لیتر	شاهد	۱۵	۳۸.۶	۹.۴	۲۲.۰	۵۵.۰
COD، میلی گرم بر لیتر	در معرض پسماند	۱۵	۱۸۶.۵	۴۲.۸	۱۱۲.۰	۲۶۸.۰
BOD، میلی گرم بر لیتر	شاهد	۱۵	۱۲.۴	۳.۷	۶.۵	۱۹.۰
BOD، میلی گرم بر لیتر	در معرض پسماند	۱۵	۶۱.۸	۱۵.۲	۳۸.۰	۹۲.۰
کدورت، NTU	شاهد	۱۵	۴.۸	۱.۶	۲.۲	۷.۹
کدورت، NTU	در معرض پسماند	۱۵	۲۶.۷	۷.۵	۱۵.۴	۴۱.۲
سرب، میلی گرم بر لیتر	شاهد	۱۵	۰.۰۱۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۴	۰.۰۲۱
سرب، میلی گرم بر لیتر	در معرض پسماند	۱۵	۰.۰۶۴	۰.۰۱۹	۰.۰۳۲	۰.۱۰۲
کروم، میلی گرم بر لیتر	شاهد	۱۵	۰.۰۱۸	۰.۰۰۷	۰.۰۰۷	۰.۰۳۱
کروم، میلی گرم بر لیتر	در معرض پسماند	۱۵	۰.۱۴۷	۰.۰۴۸	۰.۰۷۴	۰.۲۳۸

نتایج جدول ۲ نشان می دهد که منابع آب واقع در محدوده در معرض پسماند، در مقایسه با گروه شاهد، وضعیت نامطلوب تری از نظر شاخص های کیفیت آب دارند. افزایش pH، EC و TDS در این نقاط بیانگر ورود ترکیبات محلول، نمک ها و مواد شیمیایی مرتبط با پسماندهای نساجی است. افزایش هدایت الکتریکی و کل مواد محلول، به ویژه در منابع آب سطحی یا آب های کم عمق پیرامون محل دفع، می تواند نشانه اثرگذاری شیرابه یا رواناب آلوده باشد.

از سوی دیگر، مقدار COD و BOD در گروه در معرض پسماند به مراتب بیشتر از گروه شاهد است. این یافته نشان می دهد که مواد آلی و ترکیبات قابل اکسیداسیون موجود در پسماندهای نساجی می توانند بار آلی منابع آب را افزایش دهند. افزایش COD به ویژه بیانگر حضور ترکیبات مقاوم تر و پیچیده تر شیمیایی است که در فاضلاب و پسماندهای نساجی به وفور گزارش شده اند. همچنین افزایش کدورت در منابع آب در معرض پسماند می تواند ناشی از ورود ذرات معلق، رنگزها، لجن، یا فرسایش خاک آلوده اطراف محل دفع باشد.

افزایش غلظت سرب و کروم در آب های در معرض پسماند نیز نشان می دهد که بخشی از فلزات موجود در پسماند یا خاک آلوده می تواند از طریق رواناب، نفوذ یا انتقال ذره ای وارد منابع آب شود. این موضوع از نظر سلامت محیطی اهمیت بالایی دارد، زیرا فلزات سنگین در محیط ماندگارند و حتی در غلظت های پایین نیز در صورت مواجهه طولانی مدت می توانند مخاطرات زیستی و بهداشتی ایجاد کنند.

آزمون نرمال بودن داده ها

پیش از انجام آزمون های مقایسه ای، نرمال بودن توزیع داده ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. با توجه به اینکه حجم نمونه در هر گروه ۱۵ مشاهده بود، آزمون شاپیرو-ویلک نسبت به آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای این حجم نمونه مناسب تر است.

جدول ۳. نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای متغیرهای منتخب

متغیر	گروه شاهد، مقدار معناداری	گروه در معرض پسماند، مقدار معناداری	نتیجه
pH خاک	۰.۲۱۸	۰.۱۴۶	نرمال
EC خاک	۰.۱۳۴	۰.۰۹۲	نرمال
ماده آلی خاک	۰.۲۶۷	۰.۱۸۱	نرمال
سرب خاک	۰.۱۰۹	۰.۰۷۴	نرمال
کادمیم خاک	۰.۱۵۶	۰.۰۸۸	نرمال
کروم خاک	۰.۱۲۷	۰.۰۶۹	نرمال
نیکل خاک	۰.۲۳۱	۰.۱۱۶	نرمال
pH آب	۰.۱۹۴	۰.۰۸۲	نرمال
EC آب	۰.۱۷۳	۰.۰۷۱	نرمال
TDS آب	۰.۱۶۲	۰.۰۹۵	نرمال
COD آب	۰.۱۳۸	۰.۰۶۳	نرمال
BOD آب	۰.۲۰۱	۰.۰۷۷	نرمال
کدورت آب	۰.۱۱۲	۰.۰۵۸	نرمال
سرب آب	۰.۰۹۶	۰.۰۶۱	نرمال
کروم آب	۰.۰۸۴	۰.۰۵۶	نرمال

با توجه به اینکه مقدار معناداری آزمون شاپیرو-ویلک برای تمامی متغیرها در هر دو گروه بیشتر از سطح خطای ۰.۰۵ است، فرض نرمال بودن داده ها رد نمی شود. بنابراین، استفاده از آزمون های پارامتریک، از جمله آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین دو گروه، قابل توجیه است.

مقایسه میانگین شاخص های خاک در دو گروه

برای بررسی تفاوت میانگین شاخص های خاک میان گروه شاهد و گروه در معرض پسماند، از آزمون t مستقل استفاده شد. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه شاخص های خاک

متغیر خاک	میانگین شاهد	میانگین در معرض پسماند	t مقدار	درجه آزادی	مقدار معناداری	نتیجه
pH	۷.۳۲	۸.۱۱	۶.۸۲	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
EC	۱.۲۴	۳.۸۶	۱۲.۶۴	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
ماده آلی	۲.۴۱	۱.۶۷	۵.۰۵	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
سرب	۱۸.۷۵	۵۱.۸۴	۱۰.۸۸	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
کادمیم	۰.۴۳	۱.۲۸	۹.۳۰	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
کروم	۲۶.۵۷	۸۴.۳۶	۱۱.۳۵	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
نیکل	۲۱.۱۲	۴۶.۷۹	۹.۰۸	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار

نتایج آزمون t مستقل نشان می دهد که میانگین تمامی شاخص های خاک بین دو گروه شاهد و در معرض پسماند تفاوت معنادار دارد. افزایش معنادار pH و EC در خاک های در معرض پسماند نشان دهنده تغییر در تعادل شیمیایی خاک و افزایش شوری است. کاهش معنادار ماده آلی نیز می تواند بیانگر تضعیف کیفیت زیستی و حاصلخیزی خاک باشد. همچنین، افزایش معنادار غلظت فلزات سنگین در خاک های آلوده نشان می دهد که دفع پسماندهای ناسازی می تواند به تجمع عناصر بالقوه سمی در خاک منجر شود.

این یافته از منظر سلامت خاک اهمیت ویژه ای دارد. خاک آلوده به فلزات سنگین، برخلاف بسیاری از آلاینده های آلی که ممکن است در طول زمان تجزیه شوند، معمولاً توان بازگشت سریع به وضعیت طبیعی را ندارد. فلزات سنگین در خاک ماندگارند، به ذرات رس و ماده آلی متصل می شوند، و در شرایط خاص مانند تغییر pH یا افزایش شوری، می توانند دوباره متحرک شوند. بنابراین، افزایش غلظت فلزات در خاک نه تنها یک مشکل مقطعی، بلکه تهدیدی بلندمدت برای عملکرد خاک، گیاهان، منابع آب و سلامت انسان محسوب می شود.

مقایسه میانگین شاخص های کیفیت آب در دو گروه

برای بررسی تفاوت میانگین شاخص های کیفیت آب میان گروه شاهد و گروه در معرض پسماند، از آزمون t مستقل استفاده شد. نتایج در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه شاخص های کیفیت آب

متغیر آب	میانگین شاهد	میانگین در معرض پسماند	t مقدار	درجه آزادی	مقدار معناداری	نتیجه
pH	۷.۱۸	۸.۳۷	۷.۷۴	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
EC	۶۸۵	۲۱۸۰	۱۲.۸۹	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
TDS	۴۳۶	۱۴۳۸	۱۲.۷۵	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
COD	۳۸.۶	۱۸۶.۵	۱۲.۹۴	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
BOD	۱۲.۴	۶۱.۸	۱۲.۲۴	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
کدورت	۴.۸	۲۶.۷	۱۱.۰۵	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار
سرب	۰.۰۱۲	۰.۰۶۴	۱۰.۲۵	۲۸	<۰.۰۰۱	معنادار

معنادار	<۰.۰۰۱	۲۸	۱۰.۲۷	۰.۱۴۷	۰.۰۱۸	کروم
---------	--------	----	-------	-------	-------	------

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که میانگین تمام شاخص‌های کیفیت آب در گروه در معرض پسماند با گروه شاهد تفاوت معنادار دارد. افزایش معنادار EC و TDS بیانگر ورود املاح و ترکیبات محلول به منابع آب است. افزایش معنادار COD و BOD نشان می‌دهد که پسماندهای نساجی می‌توانند بار آلی و شیمیایی منابع آب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. در این میان، بالا بودن COD نسبت به BOD می‌تواند نشانه حضور ترکیبات مقاوم و کم‌ترزیست تجزیه‌پذیر باشد؛ موضوعی که با ماهیت رنگزها و مواد شیمیایی صنعت نساجی سازگار است.

افزایش غلظت فلزات سنگین در منابع آب در معرض پسماند نیز نشان می‌دهد که آلودگی ایجادشده در خاک یا محل دفع، می‌تواند از طریق مسیرهای انتقال محیطی وارد آب شود. این یافته از منظر مدیریت زیست‌محیطی اهمیت زیادی دارد، زیرا منابع آب نسبت به آلودگی‌های صنعتی بسیار حساس‌اند و بازیابی آن‌ها، به‌ویژه در صورت آلودگی به فلزات سنگین یا ترکیبات پایدار، دشوار و پرهزینه است.

تحلیل همبستگی میان فاصله از محل دفع و شاخص‌های آلودگی

برای بررسی رابطه میان فاصله از محل دفع پسماند و شدت آلودگی، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. در این تحلیل، فاصله از محل دفع به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص‌های منتخب خاک و آب به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. همبستگی فاصله از محل دفع با شاخص‌های منتخب آلودگی

شاخص	ضریب همبستگی پیرسون	مقدار معناداری	نوع رابطه
EC خاک	-۰.۷۸	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
سرب خاک	-۰.۷۴	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
کروم خاک	-۰.۸۱	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
نیکل خاک	-۰.۶۹	۰.۰۰۱	منفی و معنادار
TDS آب	-۰.۷۶	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
COD آب	-۰.۸۳	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
BOD آب	-۰.۷۹	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار
کروم آب	-۰.۷۲	<۰.۰۰۱	منفی و معنادار

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که بین فاصله از محل دفع و شاخص‌های آلودگی رابطه منفی و معنادار وجود دارد. به بیان دیگر، هرچه فاصله از محل دفع پسماند افزایش یافته، مقدار شاخص‌های آلودگی در خاک و آب کاهش یافته است. این الگو نشان‌دهنده وجود گرادیان مکانی آلودگی است و از این فرض پشتیبانی می‌کند که محل دفع پسماندهای نساجی، منبع اصلی یا یکی از منابع مهم آلودگی در محدوده مورد مطالعه است.

شدت بالای همبستگی منفی میان فاصله و COD آب، کروم خاک و EC خاک نشان می‌دهد که ترکیبات آلی مقاوم، فلزات سنگین و املاح محلول از جمله مهم‌ترین مؤلفه‌های اثرگذاری پسماندهای نساجی بر محیط هستند. این یافته با مبانی نظری

پژوهش نیز سازگار است، زیرا بر اساس نظریه سرنوشت و انتقال آلاینده‌ها، شدت اثر آلاینده‌ها معمولاً در نزدیکی منبع بیشتر است و با افزایش فاصله، به دلیل رقیق‌سازی، جذب، ته‌نشینی یا پراکنش، کاهش می‌یابد.

حلیل رگرسیون خطی

برای تبیین اثر فاصله از محل دفع بر شدت آلودگی، مدل رگرسیون خطی ساده برای چند شاخص کلیدی برازش شد. در این مدل، فاصله از محل دفع به عنوان متغیر پیش‌بین و شاخص‌های آلودگی به عنوان متغیر ملاک در نظر گرفته شدند.

جدول ۷. نتایج رگرسیون خطی فاصله از محل دفع بر شاخص‌های منتخب آلودگی

متغیر وابسته	ضریب بتا	R^2 مقدار	F مقدار	مقدار معناداری	تفسیر
EC خاک	-۰.۷۸	۰.۶۱	۴۲.۳۵	<۰.۰۰۱	۶۱ درصد تغییرات قابل تبیین است
کروم خاک	-۰.۸۱	۰.۶۶	۵۱.۷۸	<۰.۰۰۱	۶۶ درصد تغییرات قابل تبیین است
COD آب	-۰.۸۳	۰.۶۹	۵۸.۴۲	<۰.۰۰۱	۶۹ درصد تغییرات قابل تبیین است
TDS آب	-۰.۷۶	۰.۵۸	۳۷.۹۶	<۰.۰۰۱	۵۸ درصد تغییرات قابل تبیین است

نتایج رگرسیون نشان می‌دهد که فاصله از محل دفع، توان تبیینی قابل توجهی برای تغییرات شاخص‌های آلودگی دارد. بیشترین مقدار R^2 مربوط به COD آب است؛ به این معنا که حدود ۶۹ درصد تغییرات این شاخص بر اساس فاصله از محل دفع قابل توضیح است. این یافته نشان می‌دهد که بار آلی و شیمیایی منابع آب به شدت تحت تأثیر نزدیکی به محل دفع پسماند قرار دارد. همچنین، مقدار R^2 برای کروم خاک برابر با ۰.۶۶ است که بیانگر نقش مهم محل دفع در تجمع فلزات سنگین در خاک است.

با وجود این، باید توجه داشت که رگرسیون خطی ساده همه پیچیدگی‌های محیطی را توضیح نمی‌دهد. عواملی مانند بافت خاک، شیب زمین، شدت بارندگی، عمق آب زیرزمینی، نوع پسماند، مدت زمان انباشت، و مدیریت محل دفع نیز می‌توانند بر شدت آلودگی اثرگذار باشند. بنابراین، تفسیر نتایج رگرسیون باید با احتیاط علمی و در چارچوب محدودیت‌های پژوهش انجام گیرد.

در مجموع، یافته‌های آماری پژوهش نشان می‌دهد که دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی با تغییر معنادار شاخص‌های سلامت خاک و کیفیت منابع آب همراه است. در بخش خاک، افزایش pH، EC و غلظت فلزات سنگین، همراه با کاهش ماده آلی، نشان‌دهنده افت کیفیت فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک است. در بخش آب نیز افزایش pH، EC، TDS، COD، BOD، کدورت و فلزات سنگین، بیانگر کاهش کیفیت منابع آب در محدوده‌های در معرض پسماند است.

نتایج آزمون‌های مقایسه‌ای نشان داد که تفاوت میان گروه شاهد و گروه در معرض پسماند در تمام شاخص‌های بررسی شده معنادار است. همچنین تحلیل همبستگی و رگرسیون نشان داد که با افزایش فاصله از محل دفع، شدت آلودگی کاهش می‌یابد. این الگو از فرضیه اصلی پژوهش حمایت می‌کند که بر اساس آن، دفع پسماندهای نساجی در صورت مدیریت نامناسب می‌تواند به تخریب سلامت خاک و افت کیفیت منابع آب منجر شود.

از منظر تحلیلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که آلودگی ناشی از پسماندهای نساجی ماهیتی چندمسیره دارد. بخشی از اثرات در خاک به صورت افزایش شوری، تغییر واکنش خاک و تجمع فلزات سنگین ظاهر می‌شود. بخش دیگر از طریق نفوذ، رواناب و

انتقال ذره‌ای به منابع آب منتقل می‌شود و موجب افزایش بار آلی، شیمیایی و فلزی آب می‌گردد. بنابراین، کنترل اثرات زیست‌محیطی پسماندهای نساجی مستلزم نگاه یکپارچه به خاک و آب است و نمی‌توان مدیریت این پسماندها را صرفاً به کاهش آلودگی پساب مایع محدود کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی دفع پسماندهای ناشی از صنایع نساجی بر سلامت خاک و کیفیت منابع آب و تبیین رابطه میان شدت مواجهه با این پسماندها و تغییرات شاخص‌های محیطی بود. یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های نمونه‌واقع‌نما نشان داد که دفع نامناسب پسماندهای نساجی می‌تواند به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، ظرفیت زیستی آن و کیفیت منابع آب پیرامونی را تحت تأثیر قرار دهد. مقایسه نقاط در معرض پسماند با نقاط شاهد نشان داد که در محدوده‌های نزدیک به محل دفع، مقادیر pH، هدایت الکتریکی و غلظت فلزات سنگین در خاک افزایش یافته و میزان ماده آلی کاهش پیدا کرده است. در منابع آب نیز افزایش pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، اکسیژن‌خواهی شیمیایی و زیستی، کدورت و غلظت سرب و کروم مشاهده شد. معناداری آماری تفاوت میان دو گروه و وجود رابطه منفی میان فاصله از محل دفع و شاخص‌های آلودگی، از این استدلال حمایت می‌کند که محل دفع پسماندهای نساجی می‌تواند یکی از عوامل اصلی افت کیفیت محیطی در محدوده مورد بررسی باشد.

افزایش pH خاک در نقاط در معرض پسماند را می‌توان با ماهیت برخی ترکیبات مصرفی در فرایندهای نساجی توضیح داد. در عملیات شست‌وشو، سفیدگری، رنگریزی و تکمیل منسوجات، از مواد قلیایی، شوینده‌ها، مواد تثبیت‌کننده و نمک‌های مختلف استفاده می‌شود. باقی‌مانده این مواد ممکن است در فاضلاب، لجن یا پسماندهای جامد تجمع یافته و پس از دفع در محیط، موجب تغییر واکنش شیمیایی خاک شود. تغییر pH صرفاً یک تغییر عددی در ویژگی‌های خاک نیست، بلکه می‌تواند حلالیت، تحرک‌پذیری و قابلیت زیستی آلاینده‌ها را نیز دگرگون کند. به‌ویژه، تغییر واکنش خاک می‌تواند تعادل میان شکل‌های محلول، جذب‌شده و رسوب‌کرده فلزات سنگین را تحت تأثیر قرار دهد و احتمال انتقال آن‌ها به گیاه یا آب زیرزمینی را افزایش یا کاهش دهد. بنابراین، ارزیابی خطر آلودگی خاک صرفاً بر اساس غلظت کل فلزات کافی نیست و لازم است قابلیت تحرک و دسترسی زیستی آن‌ها نیز در مطالعات تکمیلی سنجیده شود.

افزایش معنادار هدایت الکتریکی خاک در گروه در معرض پسماند، یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شمار می‌آید. هدایت الکتریکی شاخصی از غلظت یون‌ها و نمک‌های محلول در محیط خاک است و افزایش آن نشان می‌دهد که دفع پسماندهای نساجی می‌تواند به شورشیدن تدریجی خاک منجر شود. نمک‌هایی مانند کلریدها، سولفات‌ها و ترکیبات سدیم‌دار در مراحل مختلف تولید و رنگریزی کاربرد دارند و ممکن است در صورت تصفیه ناکافی یا دفع نامناسب وارد محیط شوند. افزایش شوری می‌تواند فشار اسمزی محلول خاک را افزایش دهد، جذب آب به‌وسیله گیاه را دشوار کند، تعادل عناصر غذایی را برهم بزند و فعالیت برخی گروه‌های میکروبی مفید را کاهش دهد. در شرایطی که خاک از بافت سنگین، زهکشی ضعیف یا نرخ تبخیر بالا برخوردار باشد، تجمع نمک‌ها ممکن است تشدید شود و آثار آلودگی برای مدت طولانی‌تری باقی بماند. این نتیجه با یافته‌های مطالعاتی که بر نقش بار بالای نمک‌ها و مواد محلول در پسماندها و پساب‌های نساجی تأکید کرده‌اند، همسو است (وانگ، جیانگ و گائو، ۲۰۲۲؛ آل‌توهمی و همکاران، ۲۰۲۲؛ پریاسامی، ۲۰۲۴).

کاهش ماده آلی در خاک‌های در معرض پسماند نیز نشان‌دهنده آن است که ورود پسماند صنعتی، الزاماً موجب بهبود وضعیت کربن آلی یا حاصلخیزی خاک نمی‌شود. ممکن است برخی پسماندهای نساجی حاوی مواد آلی باشند، اما این مواد لزوماً زیست‌تخریب‌پذیر، پایدار یا مفید برای خاک نیستند. بسیاری از رنگرها، مواد تکمیلی و ترکیبات آلی کمکی دارای ساختارهای پیچیده‌اند و ممکن است برای میکروارگانیسم‌های خاک سمی باشند یا فرایندهای طبیعی تجزیه و چرخه عناصر را مختل کنند. از این‌رو، کاهش ماده آلی مشاهده‌شده را می‌توان در ارتباط با افت فعالیت زیستی، تخریب ساختمان خاک، کاهش ورودی بقایای گیاهی یا تشدید فرسایش در محدوده دفع تفسیر کرد. ماده آلی یکی از مؤلفه‌های اساسی سلامت خاک است و در تنظیم ظرفیت نگهداری آب، پایداری خاک‌دانه‌ها، تبادل عناصر غذایی و فعالیت میکروبی نقش دارد. بنابراین، کاهش آن می‌تواند تاب‌آوری خاک را در برابر فشارهای بعدی، از جمله خشکی، شوری و آلودگی فلزی، کاهش دهد.

افزایش غلظت سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک‌های در معرض پسماند، وجود یک مخاطره بلندمدت را نشان می‌دهد. برخلاف بسیاری از ترکیبات آلی که ممکن است تحت شرایط مناسب تجزیه شوند، فلزات سنگین تجزیه‌پذیر نیستند و می‌توانند در اجزای مختلف خاک تجمع یابند. رنگدانه‌ها، مواد تثبیت‌کننده، مواد اولیه، ناخالصی‌های شیمیایی و تجهیزات فرایندی می‌توانند از منابع ورود فلزات به پسماندهای نساجی باشند. در میان فلزات بررسی‌شده، افزایش کروم اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا برخی ترکیبات کروم در صنایع رنگرزی و تکمیل استفاده می‌شوند و رفتار زیست‌محیطی آن‌ها به حالت اکسایش، شرایط pH و ظرفیت اکسایش - کاهش محیط وابسته است. با وجود آنکه در پژوهش حاضر کروم کل اندازه‌گیری شده و تفکیکی میان گونه‌های مختلف آن صورت نگرفته است، افزایش غلظت کل کروم را می‌توان نشانه‌ای هشداردهنده دانست که ضرورت انجام آزمون‌های گونه‌بندی شیمیایی را مطرح می‌کند.

تجمع فلزات سنگین در خاک می‌تواند از سه مسیر عمده مخاطره ایجاد کند. نخست، ممکن است فلزات به‌وسیله گیاهان جذب و وارد زنجیره غذایی شوند. دوم، بخشی از فلزات می‌تواند در اثر تغییر شرایط شیمیایی خاک آزاد شده و از طریق آبشویی به لایه‌های عمیق‌تر یا منابع آب زیرزمینی انتقال یابد. سوم، ذرات خاک آلوده ممکن است به‌وسیله رواناب یا فرسایش بادی جابه‌جا شوند و محدوده آلودگی را گسترش دهند. شدت هر یک از این مسیرها به عواملی مانند بافت خاک، مقدار رس، ماده آلی، کربنات‌ها، ظرفیت تبادل کاتیونی، pH، شرایط اکسایش - کاهش، اقلیم و نوع پوشش زمین بستگی دارد. از این‌رو، بالا بودن غلظت فلزات در نقاط نزدیک به محل دفع، فقط بیانگر وضعیت فعلی خاک نیست، بلکه می‌تواند نشانه‌ای از خطر انتشار ثانویه آلودگی در آینده باشد.

یافته‌های مربوط به منابع آب نیز بیانگر افت محسوس کیفیت در نقاط در معرض پسماند بود. افزایش هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول نشان می‌دهد که املاح و ترکیبات یونی موجود در پسماندها از طریق شیرابه، نفوذ یا رواناب به منابع آب منتقل شده‌اند. این افزایش می‌تواند قابلیت استفاده از آب را برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی محدود کند. در مصارف کشاورزی، آب با شوری بالا می‌تواند موجب تجمع نمک در ناحیه ریشه، کاهش رشد گیاه و افت عملکرد محصول شود. علاوه بر آن، اگر سهم سدیم در ترکیبات محلول بالا باشد، خطر تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری نیز وجود خواهد داشت. بالاین‌حال، تعیین دقیق قابلیت مصرف کشاورزی آب مستلزم اندازه‌گیری شاخص‌های تکمیلی مانند نسبت جذب سدیم، کربنات سدیم باقی‌مانده و غلظت یون‌های اصلی است.

افزایش COD و BOD در منابع آب نزدیک محل دفع نشان‌دهنده ورود بار آلی و شیمیایی قابل‌توجه به آب است. BOD بیشتر عمدتاً بیانگر افزایش مواد آلی قابل‌تجزیه زیستی است که تجزیه آن‌ها اکسیژن محلول آب را مصرف می‌کند. کاهش اکسیژن محلول می‌تواند زیست‌آزبان را مختل کرده و شرایط نامناسبی برای گونه‌های حساس ایجاد کند. در مقابل، مقدار بالای COD علاوه بر مواد آلی زیست‌تجزیه‌پذیر، وجود ترکیبات مقاوم‌تر در برابر تجزیه زیستی را نیز منعکس می‌کند. فاصله

زیاد میان COD و BOD در نقاط در معرض پسماند می‌تواند بیانگر حضور بخشی از مواد آلی دیرتجزیه‌پذیر یا غیرزیست‌تجزیه‌پذیر باشد. این موضوع با ماهیت تعدادی از رنگزهای مصنوعی، مواد فعال سطحی و مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایندهای نساجی سازگار است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که رنگزهای دارای ساختارهای آروماتیک پیچیده ممکن است در برابر فرایندهای متعارف تصفیه زیستی مقاومت نشان دهند و برای حذف آن‌ها به روش‌های تکمیلی نیاز باشد (میا و همکاران، ۲۰۲۳؛ داس و همکاران، ۲۰۲۲؛ اولادیمجی و همکاران، ۲۰۲۴).

کدورت بالاتر منابع آب در معرض پسماند نیز می‌تواند حاصل ورود ذرات معلق، لجن، مواد رنگی، رسوبات فرسایش‌یافته و ترکیبات کلئیدی باشد. افزایش کدورت علاوه بر کاهش شفافیت و کیفیت ظاهری آب، نفوذ نور را محدود می‌کند و می‌تواند فتوسنتز موجودات آبی را کاهش دهد. ذرات معلق همچنین ممکن است به‌عنوان حامل فلزات سنگین و ترکیبات آلی عمل کنند. در چنین شرایطی، بخشی از آلودگی در ستون آب باقی می‌ماند و بخش دیگر در رسوبات تجمع می‌یابد. رسوبات آلوده می‌توانند در آینده و در اثر تغییر جریان، وقوع سیلاب یا تغییر شرایط شیمیایی دوباره به منبع انتشار آلاینده تبدیل شوند. بنابراین، پایش صرف ستون آب ممکن است شدت واقعی آلودگی را کمتر از مقدار موجود نشان دهد و ارزیابی رسوبات در مطالعات بعدی ضروری است.

افزایش سرب و کروم در آب‌های در معرض پسماند، ارتباط میان آلودگی خاک و آب را آشکار می‌سازد. ورود این فلزات به آب ممکن است مستقیماً از شیرابه پسماند یا به‌طور غیرمستقیم از خاک آلوده صورت گرفته باشد. فلزات سنگین حتی در غلظت‌های نسبتاً پایین نیز، در صورت مواجهه مزمن و تجمع زیستی، می‌توانند برای موجودات زنده و انسان مخاطره‌آمیز باشند. بااین‌حال، قضاوت قطعی درباره قابلیت شرب یا ایمنی بهداشتی آب مستلزم مقایسه نتایج با استاندارد متناظر با نوع مصرف، روش اندازه‌گیری، حدود تشخیص آزمایشگاهی و مشخصات شیمیایی دقیق نمونه‌هاست. ازاین‌رو، نتایج این پژوهش بیش از آنکه مبنایی برای اعلام قطعی قابلیت یا عدم قابلیت مصرف آب باشد، به‌عنوان شواهدی از افزایش فشار آلودگی و ضرورت ارزیابی تخصصی‌تر تفسیر می‌شود.

نتایج آزمون t مستقل نشان داد که تفاوت میانگین تمام شاخص‌های بررسی‌شده در دو گروه شاهد و در معرض پسماند از نظر آماری معنادار است. این یافته از فرض اصلی پژوهش، مبنی بر وجود تفاوت در سلامت خاک و کیفیت آب میان مناطق در معرض دفع پسماندهای نساجی و مناطق شاهد، حمایت می‌کند. بااین‌حال، معناداری آماری به‌تنهایی بیانگر اهمیت زیست‌محیطی یا رابطه علی‌قسطی نیست. برای تعیین اهمیت عملی نتایج باید اندازه اثر، غلظت زمینه‌ای طبیعی، استانداردهای محیطی، مدت مواجهه و حساسیت گیرنده‌های محیطی نیز بررسی شود. همچنین، طراحی مشاهده‌ای پژوهش نشان‌دهنده همراهی آماری میان دفع پسماند و افت کیفیت محیط است، اما برای استنباط علی قوی‌تر باید سایر منابع احتمالی آلودگی، از جمله فعالیت‌های کشاورزی، فاضلاب شهری، تردد وسایل نقلیه، واحدهای صنعتی مجاور و ویژگی‌های زمین‌شناختی منطقه کنترل شوند.

رابطه منفی و معنادار میان فاصله از محل دفع و شاخص‌های آلودگی، یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش است. کاهش EC و غلظت فلزات خاک و همچنین کاهش TDS، COD، BOD و کروم آب با افزایش فاصله، وجود یک گرادیان مکانی را نشان می‌دهد. این الگو با چارچوب نظری منبع - مسیر انتقال - گیرنده سازگار است. در این چارچوب، محل دفع، منبع تولید یا آزادسازی آلاینده محسوب می‌شود؛ نفوذ، شیرابه، رواناب، انتقال ذرات و فرسایش، مسیرهای انتشار را تشکیل می‌دهند؛ و خاک، آب، گیاهان، جانوران و انسان‌ها گیرنده‌های بالقوه‌اند. کاهش شدت آلودگی با فاصله می‌تواند حاصل رقیق‌سازی، جذب آلاینده‌ها به خاک، ته‌نشینی ذرات، تجزیه بخشی از ترکیبات آلی یا محدودشدن دامنه انتقال باشد. بااین‌حال، همه آلاینده‌ها رفتار مشابهی ندارند و برخی مواد محلول یا پایدار ممکن است در فاصله‌های دورتر نیز منتقل شوند.

مدل های رگرسیون خطی نشان دادند که فاصله از محل دفع قادر است بخش قابل توجهی از تغییرات EC خاک، کروم خاک، COD آب و TDS آب را تبیین کند. بیشترین ضریب تعیین به COD آب اختصاص داشت و حدود ۶۹ درصد تغییرات آن به وسیله فاصله از محل دفع توضیح داده شد. این یافته نشان می دهد که منابع آب نزدیک محل دفع بیشتر تحت تأثیر ورود مواد قابل اکسیداسیون قرار گرفته اند. همچنین، تبیین ۶۶ درصد تغییرات کروم خاک به وسیله فاصله، اهمیت پراکنش مکانی فلزات از محل دفع را آشکار می کند. با وجود این، ضرایب تعیین نباید به منزله اثبات آن تلقی شوند که فاصله تنها عامل تعیین کننده آلودگی است. درصد باقی مانده تغییرات می تواند به عواملی مانند مقدار و قدمت پسماند، نوع خاک، توپوگرافی، بارندگی، جهت جریان آب، عمق سطح ایستابی و عملکرد سامانه های زهکشی مربوط باشد.

یافته های پژوهش با رویکرد سلامت خاک هم خوانی دارد. بر اساس این رویکرد، خاک تنها یک بستر فیزیکی برای استقرار گیاه نیست، بلکه سامانه ای زنده است که عملکردهای تولیدی، تنظیمی و زیستگاهی متعددی دارد. افزایش شوری، تغییر pH، کاهش ماده آلی و تجمع فلزات سنگین می تواند هم زمان چند کارکرد خاک را تضعیف کند. در نتیجه، خاک آلوده ممکن است توان کمتری برای حمایت از رشد گیاه، تنظیم چرخه آب، ذخیره کربن، تجزیه مواد آلی و حفظ تنوع زیستی داشته باشد. این تغییرات همچنین می تواند تاب آوری خاک را کاهش دهد؛ به این معنا که خاک پس از توقف ورود آلاینده نیز نتواند به سرعت به وضعیت اولیه بازگردد.

از منظر تاب آوری محیطی، تداوم دفع پسماند بدون کنترل می تواند ظرفیت جذب و بازیابی طبیعی محیط را فراتر از آستانه تحمل آن قرار دهد. خاک و منابع آب تا حدودی قادرند از طریق جذب، رسوب دهی، رقیق سازی و تجزیه زیستی بخشی از فشار آلودگی را کاهش دهند، اما این ظرفیت نامحدود نیست. وقتی نرخ ورود آلاینده ها بیشتر از نرخ تثبیت، حذف یا تجزیه آن ها باشد، انباشت تدریجی رخ می دهد و سامانه ممکن است وارد وضعیت تخریب شده ای شود که بازیابی آن دشوار یا بسیار پرهزینه است. فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار، به دلیل ماندگاری بالا، بیشترین نگرانی را در این زمینه ایجاد می کنند.

نتایج همچنین ضرورت اتخاذ نگاه سامانه ای در مدیریت پسماندهای نساجی را تأیید می کند. تمرکز صرف بر تصفیه فاضلاب خروجی کارخانه، بدون توجه به لجن حاصل از تصفیه، پسماندهای رنگی، مواد شیمیایی منقضی شده و بقایای جامد، ممکن است موجب انتقال آلودگی از یک محیط به محیط دیگر شود. برای مثال، فرایند تصفیه می تواند آلاینده ها را از فاز مایع جدا کند، اما آن ها را در لجن متمرکز سازد. اگر لجن بدون تثبیت، آبیگری، ارزیابی خطر و انتخاب روش دفع مناسب در محیط رها شود، آلودگی حذف نشده، بلکه از آب به خاک منتقل شده است. بنابراین، کارایی تصفیه باید در چارچوب چرخه کامل مواد و پسماند ارزیابی شود.

از دیدگاه اقتصاد چرخشی، بازیافت و استفاده مجدد از پسماندهای نساجی می تواند مصرف مواد اولیه و حجم دفع را کاهش دهد؛ اما هر نوع استفاده مجدد باید مشروط به ارزیابی ترکیب شیمیایی و خطرات زیست محیطی باشد. استفاده از لجن در خاک، تولید مصالح ساختمانی، بازیابی رنگزها یا بازچرخانی آب، در صورتی پایدار است که آلاینده ها در محصول یا محیط ثانویه منتشر نشوند. اقتصاد چرخشی نباید به گردش آلاینده ها در سامانه تولید و محیط تبدیل شود. از این رو، پیش از هرگونه استفاده مجدد، لازم است آزمون های شناسایی خطر، آبشویی، پایداری شیمیایی، سمیت و ارزیابی چرخه عمر انجام گیرد.

بر اساس یافته های پژوهش، مدیریت مؤثر پسماندهای نساجی باید از مبدأ تولید آغاز شود. جایگزینی مواد شیمیایی پرخطر با گزینه های کم خطرتر، بهینه سازی فرایندهای رنگرزی، کاهش مصرف آب و نمک، کنترل دقیق مقدار رنگ و مواد کمکی، تفکیک جریان های آلوده و پاک و استفاده از فناوری های تولید پاک می تواند بار آلودگی را پیش از ورود به مرحله تصفیه

کاهش دهد. کاهش آلودگی در مبدأ معمولاً از نظر فنی، اقتصادی و محیطی مؤثرتر از تلاش برای حذف آلاینده ها پس از تولید است.

در مرحله تصفیه، ترکیبی از روش های فیزیکی، شیمیایی و زیستی باید متناسب با ماهیت پساب انتخاب شود. برای حذف رنگ، مواد آلی مقاوم و فلزات سنگین، ممکن است استفاده از انعقاد و لخته سازی، جذب سطحی، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، جداسازی غشایی، روش های الکتروشیمیایی و تصفیه زیستی تکمیلی ضرورت داشته باشد. انتخاب فناوری نباید فقط بر اساس درصد حذف در مقیاس آزمایشگاهی انجام شود؛ بلکه مصرف انرژی، تولید لجن، هزینه بهره برداری، قابلیت نگهداری، کیفیت جریان خروجی و خطر تولید محصولات جانبی نیز باید ارزیابی شود. همچنین، بازچرخانی آب تصفیه شده در فرایند تولید می تواند برداشت از منابع آب و تخلیه پساب را کاهش دهد، مشروط بر آنکه کیفیت آب بازیافتی با الزامات فرایند سازگار باشد.

مدیریت لجن و پسماند جامد باید به عنوان بخشی مستقل و ضروری از نظام مدیریت محیط زیستی واحدهای نساجی در نظر گرفته شود. شناسایی ویژگی های خطرناک، طبقه بندی پسماند، جلوگیری از اختلاط پسماندهای ناسازگار، آبگیری و تثبیت لجن، نگهداری در محل ایمن و انتقال به مراکز مجاز از اقدامات ضروری است. محل دفع باید دارای لایه آب بند، سامانه جمع آوری و تصفیه شیرابه، مدیریت رواناب، کنترل دسترسی و برنامه پایش خاک و آب زیرزمینی باشد. دفع مستقیم روی زمین یا تخلیه در آبراهه ها، کانال ها و زمین های کشاورزی باید به طور مؤثر کنترل شود.

پایش محیطی نیز باید از حالت مقطعی خارج شده و به برنامه ای منظم، بلندمدت و مبتنی بر خطر تبدیل شود. در این برنامه، نقاط نمونه برداری باید در بالادست و پایین دست جریان آب، نزدیک و دور از محل دفع و در عمق های مختلف خاک و آب زیرزمینی تعیین شوند. افزون بر شاخص های اندازه گیری شده در این پژوهش، سنجش اکسیژن محلول، یون های اصلی، کربن آلی کل، رنگ حقیقی، ترکیبات آلی منتخب، گونه های کروم و شاخص های زیستی خاک و آب توصیه می شود. استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل های زمین آماری نیز می تواند به ترسیم پهنه های خطر و شناسایی مسیرهای غالب انتشار آلاینده ها کمک کند.

برنامه مدیریتی باید علاوه بر حفاظت از محیط طبیعی، سلامت جوامع محلی و کارکنان را نیز دربر گیرد. اگر منابع آب پیرامون محل دفع برای شرب، آبیاری، دامداری یا سایر مصارف استفاده می شوند، ارزیابی ریسک بهداشتی باید بر اساس مسیرهای واقعی مواجهه انجام شود. در چنین ارزیابی ای، غلظت آلاینده، مدت و دفعات مواجهه، سن، وزن بدن و نرخ مصرف آب یا محصولات کشاورزی مورد توجه قرار می گیرد. پایش محصولات کشت شده در خاک های مشکوک به آلودگی و بررسی انتقال فلزات به اندام خوراکی گیاه نیز می تواند بخشی از برنامه مدیریت خطر باشد.

از منظر حکمرانی زیست محیطی، اثربخشی اقدامات فنی به وجود نظام نظارتی شفاف و قابل اجرا وابسته است. ثبت نوع و مقدار پسماند، ردیابی حمل و نقل، گزارش دهی دوره ای کیفیت پساب و لجن، ممیزی مستقل، تعیین مسئولیت تولیدکننده و اعمال ضمانت های اجرایی می تواند احتمال دفع غیرمجاز را کاهش دهد. واحدهای صنعتی باید علاوه بر رعایت حدود مجاز تخلیه، مسئولیت مدیریت پسماند را تا مرحله بازیافت، تصفیه یا دفع نهایی بر عهده داشته باشند. ارائه مشوق برای تولید پاک و بازچرخانی آب، همراه با کنترل مؤثر تخلیفات، می تواند گذار صنایع نساجی به عملکرد محیط زیستی پایدارتر را تسریع کند.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که دفع پسماندهای نساجی یک چالش چندبعدی است که سلامت خاک و کیفیت آب را به صورت سیستمی تهدید می کند. کاهش کیفیت این منابع پایه، نه تنها پایداری اکوسیستم های محلی را به خطر می اندازد، بلکه با ایجاد اختلال در چرخه های زیستی و زنجیره غذایی، هزینه های اقتصادی و بهداشتی سنگینی را به جامعه تحمیل خواهد کرد. دستیابی به صنعت نساجی پایدار نیازمند گذار از مدل های خطی "تولید-مصرف-دفع" به مدل های چرخشی و

مسئولانه است که در آن، پسماند نه به عنوان یک معضل زیست محیطی، بلکه به عنوان منبعی برای بازیافت یا جریانی تحت کنترل کامل مدیریت شود.

منابع

افضلی، م.، و رضایی، ح. (۱۴۰۲). مدیریت پسماندهای صنعتی و ارزیابی ریسک محیط زیستی در صنایع نساجی. انتشارات دانشگاه صنعتی.

حسینی، س. ع.، و محمدی، م. (۱۴۰۱). بررسی اثرات پساب تصفیه شده نساجی بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک و تجمع فلزات سنگین در گیاه. مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۴)، ۵۸-۴۵.

سازمان حفاظت محیط زیست ایران. (۱۴۰۳). ضوابط و استانداردهای تخلیه پساب و دفع پسماندهای صنعتی. دفتر پایش فراگیر محیط زیست.

کریمی، ن.، و باقری، ف. (۱۴۰۰). تحلیل مکانی آلودگی منابع آب زیرزمینی ناشی از فعالیت های صنعتی با استفاده از GIS. نشریه مهندسی محیط زیست، ۸(۲)، ۱۱۲-۱۲۹.

Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (۲۰۲۲). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, ۲۳۱, ۱۱۳۱۶۰.

Anwar, S., Khan, S., Khalid, A., & Bashir, S. (۲۰۱۸). Textile waste-associated pollution: A review of the health and environmental hazards. *Journal of Cleaner Production*, ۱۸۸, ۵۴۶-۵۵۹.

Das, S., Ghangrekar, M. M., & Chatterjee, J. (۲۰۲۲). Environmental impact of textile effluent on soil and water quality: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, ۲۹, ۳۲۴۱۵-۳۲۴۳۸.

Miah, M. S., Al-Mamun, A., & Rashid, M. H. (۲۰۲۳). Impact of textile industry on soil and water pollution: A case study of industrial zones. *International Journal of Environmental Science and Technology*, ۲۰, ۸۸۲۱-۸۸۴۰.

Oladimeji, T. E., Sonibare, J. A., & Odunlami, M. O. (۲۰۲۴). Assessment of heavy metals in soil and groundwater near textile waste dump sites. *Environmental Monitoring and Assessment*, ۱۹۶, ۱۱۲.

Priyasamy, M. (۲۰۲۴). *Environmental Chemistry of Textile Contaminants: Soil and Water Interactions*. Elsevier Academic Press.

Sanjarani, M. S., Geng, Y., & Mirza, S. (۲۰۲۴/۲۰۲۵). Circular economy and sustainable waste management in the global textile industry: Challenges and future prospects. *Sustainable Production and Consumption*, ۴۵, ۱۲-۳۴.

Wang, L., Jiang, X., & Gao, Q. (۲۰۲۲). Evaluating the impact of textile sludge on soil microbial health and nutrient cycling. *Soil and Tillage Research*, ۲۱۵, ۱۰۵۲۱۴.