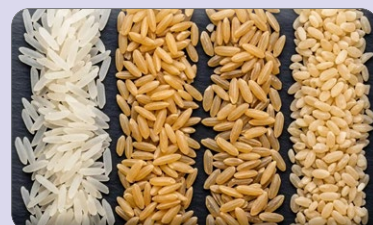




تشخیص تراریختگی سویا با استفاده از روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز



روندهای جدید و کاربردهای نوظهور شاخص جریان مذاب



مروری بر میزان آلودگی آرسنیک در برنج



بهینه‌سازی شرایط خنثی‌سازی آزمایشگاهی روغن خام تخم پنبه



مروری بر میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در بسته‌بندی‌های غذایی: ساختار، پیامدهای زیست‌محیطی، روش‌های آزمون و مقررات بین‌المللی

ردیابی نانوذرات با روش
طیف‌سنجی جرمی پلاسمای
جفت‌شده القایی تگ‌ذره‌ای

شبکه آزمایشگاهی کشور در مسیر توسعه هم‌افزایی و گسترش همکاری‌های تخصصی



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران

سال چهاردهم ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۵ ■ شماره پیاپی ۵۴

ISSN 2538-3450

صاحب امتیاز: ستاد ویژه توسعه فناوری نانو معاونت علمی
و فناوری ریاست جمهوری

سردبیر: علیرضا بدیعی

مدیر مسئول: مجتبی نسب

مدیریت اجرایی: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

دبیر مقالات: داود قزایلو

همکاران این شماره:

شبیم نجفی اصلی پاشاکی، مهسا اسماعیل زاده، مسلم جهانی
معصومه حاجی داداشی، محمدرضا عطائی، هوشنگ پرهام
نوشین خلقتی، زهرا سلیمانی بابادی، سیده ندا موسوی
مجید عامری، سید ابراهیم فرزاد کیش، توحید شوموسی
عبدالرسول ارومیه‌ای، محمد برخی

طراحی و صفحه آرایی: سیمین رفیع پور لنگرودی

ویراستار: زینب زرینچه

نشانی: تهران . صندوق پستی ۳۴۴-۱۴۵۶۵

تلفن: ۰۲۱ ۶۶۹۴۱۰۸۵

پایگاه اینترنتی: www.IJLK.ir

پست الکترونیکی: info@ijlk.ir



شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

فهرست مطالب

شبکه آزمایشگاهی کشور در مسیر توسعه هم‌افزایی و گسترش
همکاری‌های تخصصی

۲ <

استاندارد «کیفیت آب - طراحی یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی
به منظور صحت‌گذاری روش‌های تجزیه‌ای - راهنما و الزامات»

۸ <



تشخیص تراریختگی سویا با استفاده از روش
واکنش زنجیره‌ای پلیمرز

۱۰ <



روندهای جدید و کاربردهای نوظهور شاخص
جریان مذاب

۱۶ <



مروری بر میزان آلودگی آرسنیک در برنج

۲۲ <



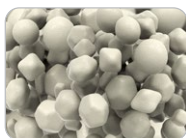
بهینه‌سازی شرایط خنثی‌سازی آزمایشگاهی روغن
خام تخم پنبه

۳۲ <



مروری بر میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها
در بسته‌بندی‌های غذایی: ساختار، پیامدهای
زیست‌محیطی، روش‌های آزمون و مقررات بین‌المللی

۴۴ <



ردیابی نانوذرات با روش طیف‌سنجی جرمی
پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای

۵۵ <

اخبار

استاندارد

مقالات

شبکه آزمایشگاهی کشور در مسیر توسعه همافزایی و گسترش همکاری‌های تخصصی

توسعه شبکه آزمایشگاهی در استان‌ها، استفاده مشترک از تجهیزات، تقویت ارتباط میان دانشگاه و صنعت، گسترش همکاری با تشکل‌های تخصصی و فعال‌تر شدن کارگروه‌های تخصصی تجهیزات، از جمله محورهایی است که شبکه آزمایشگاهی کشور با هدف افزایش بهره‌وری زیرساخت‌ها و ارتقای کیفیت خدمات آزمایشگاهی، دنبال می‌کند. در همین راستا، طی ماه‌های اخیر مجموعه‌ای از نشست‌ها و برنامه‌های تخصصی در استان‌های تهران، اصفهان و خراسان رضوی، و حوزه آزمون‌های غیرمخرب و کارگروه‌های تخصصی برگزار شده است.

توسعه شبکه در استان‌ها و تقویت همکاری بین آزمایشگاهی



در همین چارچوب، دومین گردهمایی آزمایشگاه‌های استان خراسان رضوی با حضور امیر یونسیان، رئیس شبکه آزمایشگاهی کشور، مجتبی نسب، دبیر شبکه آزمایشگاهی کشور، حبیب رجبی مشهدی، معاون پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد، محبت محبی، مدیر شبکه آزمایشگاهی دانشگاه فردوسی مشهد، مدیران و مسئولین آزمایشگاه‌های استان، نمایندگان دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها، صنایع و شرکت‌های دانش‌بنیان، ۲۷ تیرماه ۱۴۰۵ در دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد برگزار شد.

این گردهمایی با هدف توسعه تعامل میان آزمایشگاه‌های عضو شبکه، بررسی ظرفیت‌های همکاری میان مراکز پژوهشی و صنعتی، ارتقای کیفیت خدمات آزمایشگاهی و معرفی برنامه‌ها، فعالیت‌ها و حمایت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور برگزار شد. در این نشست، راهکارهای توسعه شبکه آزمایشگاهی در استان و نقش آن در تقویت زیست‌بوم پژوهش و فناوری کشور مورد بحث و تبادل نظر قرار گرفت.

امیر یونسیان در این گردهمایی با تأکید بر ضرورت توسعه همکاری‌های درون استانی آزمایشگاه‌ها اظهار

کرد: یکی از سیاست‌های جدی شبکه آزمایشگاهی کشور، تقویت ساختارهای استانی و افزایش تعامل میان مراکز آزمایشگاهی هر استان است. به گفته وی، زیرشبکه‌های استانی می‌توانند با شناسایی ظرفیت‌های موجود، زمینه شکل‌گیری همکاری‌های مشترک میان دانشگاه‌ها، صنایع و شرکت‌های فناور را فراهم کنند و بخشی از نیازهای پژوهشی و صنعتی استان‌ها را در داخل همان استان پاسخ دهند.

● استفاده مشترک از تجهیزات؛ راهکاری برای افزایش بهره‌وری

معرفی این تجهیزات و تسهیل دسترسی به خدمات آن‌ها، امکان بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت‌های موجود را فراهم کند. دکتر یونسین، استانداردهای مهم فعالیت شبکه دانست و تصریح کرد که ارائه خدمات دقیق، معتبر و قابل استناد، مستلزم رعایت استانداردهای ملی و بین‌المللی است. به گفته وی، شبکه آزمایشگاهی کشور برنامه‌های متعددی را برای ارتقای کیفیت خدمات و افزایش سطح استانداردهای آزمایشگاهی در دستور کار دارد.

رئیس شبکه آزمایشگاهی کشور همچنین با اشاره به هزینه‌های بالای تأمین و نگهداری تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی، استفاده مشترک و هدفمند از تجهیزات موجود را یکی از راهکارهای افزایش بهره‌وری سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در این حوزه عنوان کرد. وی افزود: در بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی کشور، تجهیزات ارزشمند و پیشرفته‌ای وجود دارد که می‌تواند نیازهای طیف گسترده‌ای از پژوهشگران و صنایع را پاسخ دهد. شبکه آزمایشگاهی کشور تلاش می‌کند با ایجاد بستری مناسب برای

● پیوند دانشگاه، صنعت و شرکت‌های دانش‌بنیان

برای ایفای این نقش دارند. ایجاد ارتباط مؤثر میان صنعت و مراکز آزمایشگاهی می‌تواند به افزایش کیفیت محصولات، کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه و گسترش بازار فناوری کشور کمک کند. وی همچنین اشتراک‌گذاری داده‌ها و تجربیات آزمایشگاهی را بخشی مهم از فرآیند شبکه‌سازی دانست و تأکید کرد که این فرآیند تنها به به اشتراک‌گذاری تجهیزات محدود نمی‌شود؛ بلکه انتقال دانش، تجربیات مدیریتی، استانداردهای تخصصی و همکاری‌های مشترک پژوهشی را نیز دربرمی‌گیرد.

در ادامه این رویکرد، توسعه ارتباط میان آزمایشگاه‌ها، دانشگاه‌ها، صنایع و شرکت‌های دانش‌بنیان نیز مورد توجه قرار گرفته است. امیر یونسین با اشاره به نقش آزمایشگاه‌ها در تحقق اقتصاد دانش‌بنیان، توسعه همکاری میان دانشگاه‌ها، صنایع و شرکت‌های فناوری را یکی از الزامات توسعه اقتصاد مبتنی بر دانش و فناوری دانست.

وی با بیان اینکه آزمایشگاه‌ها می‌توانند حلقه اتصال این بخش‌ها باشند، افزود: بسیاری از مسائل و چالش‌های صنایع کشور به آزمون‌های تخصصی، تحقیقات کاربردی و توسعه فناوری نیاز دارند و آزمایشگاه‌های کشور ظرفیت مناسبی

● اصفهان؛ گامی دیگر برای تقویت شبکه آزمایشگاهی

در امتداد همین سیاست، نخستین گردهمایی بزرگ مدیران آزمایشگاه‌های استان اصفهان نیز ۱۰ تیرماه ۱۴۰۵ با حضور دکتر امیر یونسین، رئیس شبکه آزمایشگاهی کشور، مجتبی نسب، دبیر شبکه آزمایشگاهی کشور، مهدی هادی، مدیرکل استاندارد استان اصفهان، ایمان پورزرگر، عضو هیئت‌مدیره انجمن کارفرمایی آزمایشگاه‌های آکرودیته اصفهان، جمعی از اعضای هیئت‌مدیره انجمن آزمایشگاه‌های آکرودیته و مدیران مجموعه‌های آزمایشگاهی استان اصفهان برگزار شد.

در این گردهمایی که حدود ۲۰۰ نفر به‌صورت حضوری و حدود ۵۰ نفر به‌صورت برخط حضور داشتند، ظرفیت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور، راهکارهای توسعه همکاری میان آزمایشگاه‌های صنعتی، پژوهشی و دانشگاهی، ارتقای خدمات آزمایشگاهی و نقش این شبکه در توسعه زیست‌بوم فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان مورد بررسی قرار گرفت.



وضعیت استان اصفهان گفت: در حال حاضر ۱۲۳ مجموعه آزمایشگاهی این استان عضو شبکه آزمایشگاهی کشور هستند که حدود ۴۰ درصد آن‌ها در حوزه فناوری نانو فعالیت می‌کنند. وی ابراز امیدواری کرد حضور آزمایشگاه‌های فعال استان در سایر حوزه‌های فناوری نیز در شبکه آزمایشگاهی افزایش یابد.

دکتر یونسین همچنین به پراکندگی مناسب اعضای شبکه در شهرهای مختلف استان اصفهان از جمله اصفهان، کاشان، شاهین‌شهر، نجف‌آباد و دیگر شهرستان‌ها اشاره کرد و این گردهمایی را زمینه‌ای برای تقویت هم‌افزایی، توسعه همکاری‌های تخصصی و گسترش تعامل میان شبکه آزمایشگاهی کشور و مجموعه‌های آزمایشگاهی استان دانست.

دکتر یونسین در این نشست با قدردانی از انجمن آزمایشگاه‌های آکرودیته و برگزارکنندگان رویداد، هدف از برگزاری چنین نشست‌هایی را معرفی ظرفیت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور به آزمایشگاه‌های عضو و غیرعضو و ایجاد زمینه همکاری گسترده‌تر میان شبکه و مجموعه‌های آزمایشگاهی استان‌ها عنوان کرد.

وی با اشاره به نقش شبکه در توسعه فعالیت‌های دانش‌بنیان آزمایشگاه‌ها تصریح کرد: عضویت در شبکه آزمایشگاهی کشور یکی از پیش‌نیازهای اصلی ارزیابی و دریافت عنوان دانش‌بنیان برای آزمایشگاه‌ها است و مجموعه‌های آزمایشگاهی برای ورود به فرآیند دانش‌بنیان شدن، باید در این شبکه عضویت داشته باشند.

رئیس شبکه آزمایشگاهی کشور همچنین با اشاره به



● گسترش همکاری در حوزه آزمون‌های غیرمخرب

کیفیت خدمات آزمایشگاهی برگزار شد. در حاشیه این نشست، تفاهم‌نامه همکاری میان شبکه آزمایشگاهی کشور و انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی و آزمایش‌های غیرمخرب ایران توسط امیر یونسین، رئیس شبکه آزمایشگاهی کشور، و حسن شیروانی، رئیس هیئت‌مدیره انجمن، امضا شد. این تفاهم‌نامه با هدف هم‌افزایی ظرفیت‌ها، امکانات

توسعه تعاملات تخصصی شبکه آزمایشگاهی کشور در ادامه به همکاری با تشکل‌های حرفه‌ای نیز گسترش یافته است. در همین راستا، نشست مشترک شبکه آزمایشگاهی کشور با «انجمن صنفی کارفرمایی شرکت‌های بازرسی فنی و آزمایش‌های غیرمخرب ایران» با هدف توسعه همکاری‌های مشترک، گسترش عضویت آزمایشگاه‌های آزمون‌های غیرمخرب در شبکه، بهره‌گیری از ظرفیت‌های حمایتی شبکه و ارتقای



اجرایی، پیگیری عضویت آزمایشگاه‌های عضو انجمن در شبکه، برگزاری نشست‌های تخصصی و برنامه‌های آموزشی و نظارت بر اجرای تعهدات نیز از جمله مسئولیت‌های پیش‌بینی شده برای طرفین است.

و توانمندی‌های دو مجموعه، توسعه خدمات آزمایشگاهی، ترویج فعالیت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور، گسترش کاربرد آزمون‌های غیرمخرب (NDT) و افزایش بهره‌وری زیرساخت‌های آزمایشگاهی کشور منعقد شده است.

بر اساس مفاد این تفاهم‌نامه، معرفی شبکه آزمایشگاهی کشور به آزمایشگاه‌های عضو انجمن و تسهیل عضویت آن‌ها در شبکه از مهم‌ترین محورهای همکاری دو طرف است. برگزاری برنامه‌های آموزشی، ترویجی و توانمندسازی تخصصی در حوزه فناوری‌ها و خدمات آزمایشگاهی، برگزاری مسابقات علمی و فناورانه در سطح ملی و منطقه‌ای و توسعه همکاری‌های تخصصی میان اعضای دو مجموعه نیز در دستور کار قرار دارد. همکاری در تدوین، بازنگری و ارتقای استانداردها، دستورالعمل‌ها و ضوابط فنی مرتبط با آزمون‌های غیرمخرب، از دیگر محورهای این تفاهم‌نامه است؛ اقدامی که می‌تواند به ارتقای کیفیت خدمات آزمایشگاهی، افزایش قابلیت اطمینان نتایج آزمون‌ها و توسعه استانداردهای تخصصی این حوزه کمک کند.

همچنین، دو طرف در زمینه همکاری‌های علمی و انتشار دانش تخصصی، از جمله ارائه و داوری مقالات و همکاری در چاپ و انتشار مجله تخصصی انجمن، همکاری خواهند کرد. فراهم‌سازی زیرساخت‌ها و منابع مورد نیاز، انجام هماهنگی‌های

🎯 کارگروه‌های تخصصی؛ بستری برای تبادل تجربه

از خدمات شبکه و حمایت‌های قابل ارائه به کارگروه‌های تخصصی را تشریح کرد. وی با اشاره به ظرفیت گسترده شبکه آزمایشگاهی کشور، بر ضرورت استفاده هدفمند از زیرساخت‌های آزمایشگاهی و ظرفیت کارگروه‌های تخصصی و همچنین ایجاد ارتباط مؤثر میان آزمایشگاه‌ها و دانشگاه‌ها تأکید کرد.

در ادامه، داود قزابلو، دبیر کارگروه تخصصی TEM، گزارشی از تاریخچه فعالیت‌ها و دستاوردهای این کارگروه ارائه کرد و به بررسی فرصت‌های موجود برای تعامل میان آزمایشگاه‌ها و ظرفیت‌های همکاری میان اعضای کارگروه پرداخت.

در بخش پایانی نشست، نمایندگان آزمایشگاه‌های عضو کارگروه تخصصی TEM ضمن ارائه گزارشی از وضعیت آزمایشگاه‌های خود، چالش‌ها، نیازها و فرصت‌های همکاری را مطرح و پیشنهادهایی برای بهبود شرایط موجود و افزایش بهره‌برداری از ظرفیت‌های آزمایشگاهی ارائه شد. پس از آن نیز جلسه پرسش و پاسخ برگزار و حضاران دیدگاه‌ها و پرسش‌های خود را بیان کردند.

در پایان این نشست، شرکت‌کنندگان از آزمایشگاه‌های

در کنار توسعه شبکه در استان‌ها و همکاری با تشکلهای تخصصی، کارگروه‌های تخصصی نیز به‌عنوان بستری برای تبادل تجربه و شناسایی فرصت‌های همکاری میان آزمایشگاه‌ها فعال هستند. در همین چارچوب، نشست کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) روز یکشنبه ۲۹ شهریور ۱۴۰۵ به‌صورت حضوری و برخط در مرکز خدمات آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف برگزار شد.

این نشست با حضور کارشناسان و نمایندگان آزمایشگاه‌های فعال در حوزه دستگاه TEM و با هدف تقویت تعامل میان آزمایشگاه‌های عضو، بررسی ظرفیت‌های موجود و شناسایی فرصت‌های همکاری برگزار گردید.

در آغاز نشست، مرضیه احمدی، به نمایندگی از مدیریت مرکز خدمات آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف، ضمن خوشامدگویی به حضاران، درباره تاریخچه فعالیت‌ها، عملکرد و دستاوردهای این مرکز توضیحاتی ارائه کرد.

سپس مجتبی نسب، دبیر شبکه آزمایشگاهی کشور، به معرفی شبکه آزمایشگاهی، خدمات و ظرفیت‌های آن در حوزه تجهیزات آزمایشگاهی پرداخت و سازوکار بهره‌مندی اعضا

از تقویت شبکه‌های استانی و استفاده مشترک از تجهیزات آغاز می‌شود و با پیوند میان دانشگاه، صنعت و شرکت‌های دانش‌بنیان، همکاری با تشکلهای تخصصی و فعال‌سازی ظرفیت کارگروه‌های تخصصی ادامه می‌یابد و هدف آن، بهره‌گیری مؤثرتر از زیرساخت‌های موجود و ارتقای کیفیت و دامنه خدمات آزمایشگاهی کشور است.

مستقر در مرکز خدمات آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف بازدید کردند و از نزدیک با بخشی از تجهیزات، ظرفیت‌ها و توانمندی‌های این مجموعه آشنا شدند. برگزاری این مجموعه از نشست‌ها و امضای تفاهم‌نامه‌های تخصصی، در مجموع، بیانگر رویکرد شبکه آزمایشگاهی کشور برای توسعه همکاری در سطوح مختلف است؛ رویکردی که

بررسی چالش‌ها و اولویت‌های توسعه خدمات آنالیز عنصری در شبکه آزمایشگاهی کشور



شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع به ظرفیت‌های آزمایشگاهی، بر اهمیت توسعه همکاری میان مراکز و انتقال دانش فنی و تجربیات تخصصی تأکید کرد.

شبکه آزمایشگاهی کشور با برخورداری از ۱۸ کارگروه تخصصی و مشارکت بیش از ۲ هزار کارشناس و متخصص فعالیت می‌کند. کارگروه تخصصی آنالیز عنصری نیز با مشارکت بیش از ۲۵۰ متخصص، بستری برای تبادل تجربه، هم‌افزایی علمی و شناسایی نیازهای تخصصی این حوزه فراهم کرده است.

حسن به‌نژاد، مدیر آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تهران، با تأکید بر اهمیت نیروی انسانی متخصص، اظهار کرد که برخورداری از تجهیزات پیشرفته، بدون نیروی توانمند برای راه‌اندازی، بهره‌برداری و نگهداری، لزوماً به استفاده مؤثر از ظرفیت‌های آزمایشگاهی منجر نمی‌شود.

وی سرمایه‌گذاری در توسعه تجهیزات را نیازمند توجه هم‌زمان به آموزش، توانمندسازی و حفظ کارشناسان دانست و بر ضرورت حمایت مالی و حرفه‌ای از نیروهای متخصص و فراهم‌کردن زمینه رشد و ارتقای شغلی آنان تأکید کرد.

در همین راستا، نشست کارگروه تخصصی آنالیز عنصری شبکه آزمایشگاهی کشور، ۲۲ شهریورماه ۱۴۰۵ با حضور مجتبی نسب، دبیر شبکه آزمایشگاهی کشور، حسن به‌نژاد، مدیر آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تهران، فریده باتقوا، دبیر کارگروه تخصصی آنالیز عنصری و جمعی از متخصصان، کارشناسان و اپراتورهای تجهیزات این حوزه از آزمایشگاه‌های سراسر کشور، به‌صورت حضوری و مجازی برگزار شد.

این نشست با هدف بررسی عملکرد و دستاوردهای کارگروه طی یک سال گذشته، شناسایی چالش‌های فنی و زیرساختی و تعیین اولویت‌های اجرایی برای توسعه خدمات آنالیز عنصری برگزار شد. در این برنامه، ظرفیت‌ها و حمایت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور، نقش سرمایه انسانی، اقدامات کارگروه و پیشنهادهای کارشناسان برای ادامه فعالیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

مهندس نسب، در این نشست ضمن معرفی تاریخچه، خدمات و دستاوردهای شبکه، به تشریح سازوکارهای حمایتی این مجموعه از کارگروه‌های تخصصی پرداخت. وی با اشاره به نقش شبکه در تسهیل دسترسی پژوهشگران، دانشگاه‌ها،

تأکید کرد و توسعه همکاری میان اعضا را از محورهای اصلی فعالیت کارگروه دانست.

در بخش گفت‌وگو و پرسش و پاسخ، کارشناسان به بررسی چالش‌های فنی، تجهیزات و زیرساخت‌ها، تأمین مواد مرجع و استانداردها، مسائل نیروی انسانی و ضرورت هماهنگی بیشتر میان آزمایشگاه‌ها پرداختند.

در پایان نشست، حاضران از آزمایشگاه‌های دانشگاه تهران بازدید کردند و با بخشی از ظرفیت‌ها و امکانات آزمایشگاهی این دانشگاه آشنا شدند.

در ادامه، فریده باتقوا، دبیر کارگروه تخصصی آنالیز عنصری، گزارشی از مأموریت‌ها، اقدامات و برنامه‌های این کارگروه ارائه کرد.

برگزاری نشست‌های تخصصی، تدوین مقالات برای فصلنامه دانش آزمایشگاهی، بررسی استانداردهای بین‌المللی روش‌های آزمون و پیگیری موضوع تدوین استاندارد ملی از جمله اقدامات مطرح‌شده در این گزارش بود.

باتقوا همچنین بر ضرورت مشارکت مستقیم کارشناسان آزمایشگاه‌های کشور در شناسایی مسائل و نیازهای تخصصی





تهیه کننده

شبیم نجفی اصلی پاشاکی*

*najafi.grcir@gmail.com

مدیر فنی آزمایشگاه های مرکز پژوهش های
کاربردی علوم زمین - البرز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

استاندارد «کیفیت آب - طراحی یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی به منظور صحه گذاری روش های تجزیه ای - راهنما و الزامات»

از حداقل هشت آزمایشگاه به دست آمده باشند، الزامی است. مشارکت در این نوع کارآزمایی بین آزمایشگاهی داوطلبانه است. توصیه می شود برای دستیابی به داده های عملکردی اطمینان پذیر، تنها آزمایشگاه های دارای تجربه کافی در این کارآزمایی مشارکت کنند؛ به گونه ای که قادر باشند تمام نمونه های آزمون ارائه شده را با استفاده از روش های تجزیه ای شرح داده شده در روش تجزیه ای استاندارد شده مربوطه، تجزیه کنند.

توصیه می شود مشارکت در کارآزمایی بین المللی باشد و مشارکت کنندگان از حداقل پنج کشور انتخاب شوند. لازم است فراخوان مشارکت در کارآزمایی بین آزمایشگاهی حداقل پنج ماه پیش از ارسال نمونه ها منتشر شود. همچنین توصیه می شود آزمایشگاه ها حداقل ظرف چهار هفته پس از انتشار فراخوان کارآزمایی بین آزمایشگاهی، تمایل خود را برای مشارکت اعلام کنند. اگر در فراخوان مشارکت، تعداد آزمایشگاه های دارای تجربه کافی در به کارگیری این روش نباشد، لازم است سازمان دهنده مسئول کارآزمایی بین آزمایشگاهی به این آزمایشگاه ها در به کارگیری روش مذکور کمک کند. برای این منظور، در جدول شماره (۱)، برنامه زمانی مقدماتی اجرای یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی ارائه شده است.

استاندارد «طراحی یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی به منظور صحه گذاری روش های تجزیه ای» یک استاندارد راهنما است که الزامات لازم را برای کمک به افرادی که کارآزمایی های بین آزمایشگاهی را سازمان دهی می کنند، بیان می کند. هدف از این الزامات، طراحی و سازمان دهی مقایسه های بین آزمایشگاهی بین المللی به منظور صحه گذاری روش های استاندارد شده جدید فیزیکی، شیمیایی و زیست شیمیایی است. پیش نیاز اجرای یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی، تکمیل فرآیند توسعه روش و صحه گذاری تک تک مراحل فرآیند کامل اندازه گیری، مطابق با استاندارد ملی ایران ۲۲۵۸۸ است. برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد، دریافت تعداد زیادی نتیجه آزمون اهمیت دارد. به شدت توصیه می شود که همه نمونه ها توسط همه مشارکت کنندگان آزمون شوند و نتایج مربوط به همه عوامل به سازمان دهنده کارآزمایی بین آزمایشگاهی ارسال شود. این کار سبب می شود پس از حذف نتایج نامتعارف، بیشترین تعداد ممکن از نتایج آزمون مستقل در ارزیابی مورد استفاده قرار گیرد.

تعداد مشارکت کنندگان بر اطمینان پذیری داده های عملکردی محاسبه شده از نظر آماری تأثیر دارد. وجود حداقل ۲۴ نتیجه آزمون، پس از حذف نتایج دور افتاده، که

جدول (۱): برنامه زمانی مقدماتی یک کارآزمایی بین آزمایشگاهی

وظیفه	زمان
فراخوان مشارکت و اعلام تمایل به مشارکت ظرف چهار هفته	پنج ماه پیش از ارسال نمونه‌ها
ارسال اطلاعات تفصیلی درباره کارآزمایی بین آزمایشگاهی همراه با فرم ثبت مربوطه؛ انجام بررسی‌های پایداری و همگنی نمونه‌ها	چهار ماه پیش از ارسال نمونه‌ها
برگزاری کارگاه آموزشی یا تهیه مواد آموزشی	سه ماه پیش از ارسال نمونه‌ها
انتخاب نهایی مشارکت‌کنندگان براساس نتایج مرحله آموزشی	چهار هفته پیش از ارسال نمونه‌ها
بسته‌بندی و ارسال نمونه‌ها	کمی پیش از ارسال نمونه‌ها
دریافت نتایج	چهار تا شش هفته پس از ارسال نمونه‌ها
پایان ارزیابی آماری مقدماتی	سه ماه پس از ارسال نمونه‌ها

توصیه می‌شود در طراحی و سازماندهی کارآزمایی‌های بین آزمایشگاهی به‌منظور صحت‌گذاری روش، موارد زیر رعایت شود:

- تکمیل توسعه روش و صحت‌گذاری تک‌تک مراحل؛
- استفاده از نمونه‌هایی برای هر ماتریس هدف و دامنه کاربرد؛
- انتخاب غلظت سنجیدنی‌های نماینده دامنه روش تجزیه‌ای استاندارد شده؛
- تعیین مقادیر تخصیص‌یافته برای سنجیدنی‌ها؛
- انجام موفقیت‌آمیز آزمون‌های پایداری و همگنی نمونه‌ها؛
- شفاف بودن الزامات حمل و نقل نمونه‌ها؛
- مشارکت حداقل ۱۲ آزمایشگاه (همچنین برای هر روش تجزیه‌ای اختیاری، در صورت کاربرد)؛
- ارائه اطلاعات زیر به مشارکت‌کنندگان:
 - ◀ آخرین ویرایش روش تجزیه‌ای استاندارد شده که مبنای کارآزمایی بین آزمایشگاهی است؛
 - ◀ الزامات مربوط به اجرای روش (بدون اعمال تغییرات فنی در روش ارائه شده؛ لازم است مشارکت‌کننده با روش مربوطه آشنایی کافی داشته باشد)؛
 - ◀ برنامه زمانی شامل اجرای آزمون و گزارش‌دهی نتایج؛
 - ◀ شرایط انبارش نمونه‌ها؛
 - ◀ تعداد تکرارهای آزمون؛
 - ◀ گزارش جزئیات و نتایج تجزیه‌ای در قالب فرم، ترجیحاً به‌صورت الکترونیکی؛
 - ◀ معیارهای حذف داده‌ها از ارزیابی آماری.



نویسندگان

مهسا اسماعیل زاده^۱، مسلم جهانی^{۲*}

۱. موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۲. مدیر آزمایشگاه مرکزی موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

*m.jahani@RIFST.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

تشخیص تراریختگی سویا با استفاده از روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز

چکیده

محصولات تراریخته، با وجود مزایایی مانند افزایش عملکرد تولید و مقاومت در برابر آفات، همواره از جنبه‌های زیست‌محیطی و ایمنی غذایی مورد توجه بوده‌اند و نگرانی‌هایی درباره آثار احتمالی آن‌ها بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان مطرح شده‌است. از این رو، شناسایی و تشخیص محصولات تراریخته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی کارایی روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز^۱ در تشخیص تراریختگی محصولات غذایی، از یک نمونه مرجع گواهی شده سویای تراریخته^۲ استفاده شد. در مرحله نخست، پس از خردایش نمونه در حضور نیتروژن مایع، DNA به روش دستی و با استفاده از بافر استیل‌تری‌متیل‌آمونیم بروماید^۳ استخراج شد. سپس خلوص و غلظت DNA با استفاده از دستگاه نانودراپ^۴ تعیین و آزمون PCR با استفاده از آغازگرهای اختصاصی انجام شد. نتایج الکتروفورز محصول PCR روی ژل آگارز، وجود توالی‌های اختصاصی مرتبط با تراریختگی را در نمونه مورد بررسی تأیید کرد. براساس نتایج این پژوهش، روش PCR از دقت و کارایی مناسبی برای شناسایی محصولات تراریخته برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان روشی سریع و قابل اعتماد در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

تراریخته، استخراج DNA، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز، آغازگر، بافر CTAB.

ارگانیسم تراریخته^۵ به گونه‌ای از جانور، گیاه یا میکروارگانیسم اطلاق می‌شود که ژنوم آن با استفاده از روش‌های مهندسی ژنتیک تغییر یافته باشد. این تغییرات با اهدافی مانند افزایش عملکرد تولید، بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای یا کیفی، افزایش مقاومت در برابر آفات، علف‌کش‌ها، بیماری‌ها و تنش‌های محیطی انجام می‌شود. بیشتر گیاهان تراریخته با استفاده از روش تفنگ ژنی^۶ یا انتقال ژن به واسطه آگروباکتریوم^۷ تولید شده‌اند. نخستین گزارش از تولید گیاهان تراریخته در سال ۱۹۸۳ منتشر شد. سویا یکی از مهم‌ترین محصولات تراریخته در جهان به شمار می‌رود، به گونه‌ای که در سال ۲۰۱۱ حدود ۴۷ درصد از ۱۶۰ میلیون هکتار اراضی زیر کشت محصولات تراریخته را به خود اختصاص داده است. در حال حاضر، برزیل پس از ایالات متحده آمریکا، دومین تولیدکننده بزرگ سویا در جهان است و پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آینده به بزرگ‌ترین تولیدکننده این محصول تبدیل شود [۱].

براساس نتایج یک مطالعه انجام شده توسط شرکت سلس^۸، حدود ۸۵ درصد از اراضی زیر کشت سویا در برزیل، در فصل زراعی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲، به بذره‌های تراریخته اختصاص داشته است. تاکنون پنج رقم سویای تراریخته از سوی کمیسیون فنی ملی ایمنی زیستی برزیل^۹ برای تولید و تجاری‌سازی تأیید شده‌اند. با توجه به اهمیت اقتصادی سویا و چالش‌های ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی، استفاده از ارقام تراریخته می‌تواند نقش مهمی در تسریع برنامه‌های اصلاح نباتات و افزایش بهره‌وری تولید ایفا کند. نخستین گزارش از تولید سویای تراریخته در سال ۱۹۸۸ منتشر شد [۲]. با وجود گذشت بیش از دو دهه از توسعه فناوری تولید سویاهای تراریخته، دستیابی به گیاهان تراریخته پایدار همچنان یک چالش به شمار می‌رود؛ زیرا موفقیت این فرآیند به ترکیب کارآمد روش‌های انتقال ژن و بازاریابی گیاه وابسته است. تاکنون دو روش اصلی برای تولید گیاهان تراریخته کامل و پایدار، با موفقیت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها به کار گرفته شده‌اند که شامل بمباران ذرات^{۱۰} و انتقال ژن با واسطه باکتری آگروباکتریوم تومیفاسینس^{۱۱} هستند. هر دو روش، در پژوهش‌های علوم پایه و همچنین کاربردهای کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. علاوه بر این، تراریخت‌سازی ریشه‌های سویا با استفاده از آگروباکتریوم رایزوترنز^{۱۲} به عنوان ابزاری کارآمد برای مطالعه عملکرد ژن‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

صرف‌نظر از روش انتقال ژن، تولید گیاهان تراریخته به طور معمول به سامانه‌ای مؤثر برای شناسایی و انتخاب سلول‌ها یا بافت‌های تراریخت نیاز دارد. ژن‌های نشانگر قابل انتخاب^{۱۳} با ایجاد مقاومت یا تحمل نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها یا علف‌کش‌ها، امکان شناسایی و انتخاب سلول‌ها یا بافت‌های تراریخت را فراهم می‌کنند. آنتی‌بیوتیک هیگرومایسین^{۱۴} به طور گسترده به عنوان عامل انتخاب مورد استفاده قرار گرفته و به یکی از رایج‌ترین عوامل انتخابی برای جداسازی بافت‌های تراریخت سویا، به ویژه بافت‌های جنین‌زا، تبدیل شده است. همچنین، در برخی مطالعات از علف‌کش‌های مختلف به عنوان عامل انتخاب برای شناسایی و جداسازی بافت‌های تراریخت سویا استفاده شده است. در کنار مزایای محصولات تراریخته، نگرانی‌هایی نیز درباره پیامدهای احتمالی آن‌ها بر محیط زیست و سلامت انسان مطرح شده است. از جمله این موارد می‌توان به تأثیر بر تنوع زیستی، احتمال ایجاد مقاومت در برخی آفات و علف‌های هرز و همچنین نگرانی‌های مربوط به بروز واکنش‌های آلرژیک یا سایر پیامدهای احتمالی سلامت اشاره کرد. علاوه بر این، ارزیابی خطرات احتمالی ناشی از ژن‌های وارد شده به مواد غذایی، همچنان یکی از موضوعات مورد توجه در مطالعات ایمنی زیستی است. از این رو، شناسایی و برچسب‌گذاری محصولات تراریخته، به منظور اطلاع‌رسانی به مصرف‌کنندگان و رعایت الزامات قانونی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴].

با توجه به افزایش تعداد ارقام یا رویدادهای تراریختگی غیرمجاز سویا در بازار و همچنین ضرورت حفظ حق انتخاب آگاهانه مصرف‌کنندگان، توسعه روش‌های غربالگری و اجرای برنامه‌های پایش در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد. واکنش زنجیره‌ای پلیمرز مبتنی بر DNA، یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی محصولات تراریخته است. در این پژوهش، DNA سویا با استفاده از بافر ستیل‌تری‌متیل‌آمونیم بروماید استخراج شد و سپس با استفاده از آغازگرهای اختصاصی و روش PCR، وجود توالی‌های اختصاصی مرتبط با تراریختگی در نمونه مورد بررسی، ارزیابی شد. در بیشتر سازه‌های انتقال ژن، برای بیان ژن وارد شده وجود یک پروموتور^{۱۵} و یک ترمیناتور^{۱۶} ضروری است. متداول‌ترین پروموتور مورد استفاده در سازه‌های تراریخت، پروموتور 35S ویروس موزایک گل کلم^{۱۷} است که در بسیاری از گیاهان تراریخت به کار می‌رود. از این روش می‌توان برای غربالگری اولیه حضور DNA مشتق شده از گیاهان تراریخت استفاده کرد. متداول‌ترین ترمیناتور مورد استفاده در بسیاری از گیاهان تراریخت، توالی نوپالین سنتاز^{۱۸} است که از باکتری خاکزی آگروباکتریوم تومیفاسینس منشأ می‌گیرد. در نمونه‌های سویا و فرآورده‌های حاصل از آن، در صورت عدم شناسایی پروموتور CaMV 35S و ترمیناتور NOS، به طور معمول پروموتور ویروس موزایک انجیر^{۱۹} نیز به عنوان یکی از توالی‌های هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

□ مواد و روش‌ها

◆ استخراج DNA به روش دستی

برای استخراج DNA، ابتدا دانه‌های سویا با استفاده از آسیاب برقی خرد شدند. سپس نمونه‌ها در هاون استریل و در حضور نیتروژن مایع به خوبی ساییده شدند تا پودر یکنواختی حاصل شود. در ادامه، ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی گرم از پودر حاصل به یک میکروتیوب منتقل شد. سپس ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر استخراج حاوی سستیل‌تری‌متیل‌آمونیم بروماید با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر، کلرید سدیم با غلظت ۱/۴ مول بر لیتر، تریس^{۲۰} با غلظت ۰/۱ مول بر لیتر و اتیلن‌دی‌آمین تترااستیک اسید دی‌سدیم^{۲۱} با غلظت ۰/۰۲ مول بر لیتر و pH=۸ که از پیش تا ۶۵ درجه سلسیوس گرم شده بود، به نمونه افزوده شد. نمونه به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۶۵ درجه سلسیوس گرمخانه‌گذاری و در این مدت، هر ۱۰ دقیقه یک بار به آرامی مخلوط شد. پس از پایان مرحله گرمخانه‌گذاری، نمونه با نیروی ۱۳۰۰×g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ و مایع رویی با دقت به یک میکروتیوب جدید منتقل شد. سپس، ۰/۷ تا ۱ برابر حجم محلول، کلروفرم به نمونه افزوده و مخلوط به خوبی همگن شد. در ادامه، مخلوط با نیروی ۱۲۰۰×g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ و مایع رویی دوباره به یک میکروتیوب جدید منتقل شد.

دو برابر حجم نمونه، بافر رسوب حاوی سستیل‌تری‌متیل‌آمونیم بروماید با غلظت ۵ گرم بر لیتر و کلرید سدیم با غلظت ۰/۰۴ مول بر لیتر افزوده و مخلوط، بدون هم‌زدن، به مدت ۶۰ دقیقه در دمای اتاق نگهداری گردید. سپس نمونه به مدت ۱۵ دقیقه با نیروی ۱۲۰۰×g سانتریفیوژ و مایع رویی دور ریخته شد. در ادامه، ۳۵۰ میکرولیتر محلول کلرید سدیم با غلظت ۱/۲ مول بر لیتر و ۳۵۰ میکرولیتر کلروفرم به بخش باقی‌مانده افزوده و محتویات میکروتیوب به خوبی همگن گردید. مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با نیروی ۱۲۰۰×g سانتریفیوژ و فاز آبی به یک میکروتیوب جدید منتقل شد. سپس، ۰/۶ برابر حجم محلول به‌دست آمده از

مرحله قبل، ایزوپروپانول افزوده و محتویات لوله با چند بار وارونه کردن به آرامی مخلوط گردید. پس از ۲۰ دقیقه نگهداری در دمای اتاق، نمونه به مدت ۱۵ دقیقه با نیروی ۱۲۰۰×g سانتریفیوژ و مایع رویی دور ریخته شد. در پایان، ۵۰۰ میکرولیتر اتانول ۹۶ درصد به رسوب افزوده و لوله چندین بار به آرامی وارونه شد. این مرحله موجب حذف کامل CTAB خواهد شد. سپس، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با نیروی ۱۲۰۰×g سانتریفیوژ و مایع رویی دور ریخته شد. پس از خشک شدن رسوب DNA در دمای اتاق، مقدار مناسبی آب دی‌یونیزه یا بافر TE (شامل تریس با غلظت ۰/۱ مول بر لیتر و نمک دی‌سدیم EDTA با غلظت ۰/۰۱ مول بر لیتر، با pH=۸) به آن افزوده شد. در پایان، غلظت و خلوص DNA استخراج شده با استفاده از دستگاه نانودراپ و کیفیت آن با ژل الکتروفورز ارزیابی گردید [۵ و ۶].

◆ آماده‌سازی پرایمرها

به‌منظور طراحی آغازگرهای اختصاصی، توالی‌های ژنی با استفاده از پایگاه اطلاعاتی مرکز ملی اطلاعات زیست‌فناوری^{۲۲} و پایگاه اطلاعاتی آزمایشگاه زیست‌شناسی مولکولی اروپا^{۲۳} و بهره‌گیری از ابزار جست‌وجو و هم‌ترازسازی توالی BLASTn بررسی شدند. بر این اساس، ژن لکتین (Le1) سویا به‌عنوان ژن مرجع داخلی^{۲۴} انتخاب شد. آغازگرهای اختصاصی برای پروموتور ۳۵S و وروس موزاییک گل کلم و ترمیناتور نوپالین سنتاز^{۲۵} مشتق از باکتری خاکری آگروباکتریوم تومیفاسینس، به‌منظور شناسایی توالی‌های مرتبط با تراریختگی سویا طراحی و در آزمون PCR مورد استفاده قرار گرفتند. در نمونه‌های سویا و فرآورده‌های حاصل از آن، در صورت عدم شناسایی پروموتور CaMV 35S و ترمیناتور NOS، پروموتور ۳۴S و وروس موزاییک گل‌میمونی نیز به‌عنوان یکی از توالی‌های هدف مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات و توالی آغازگرهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است [۷ و ۸].

جدول (۱): مشخصات پرایمرهای اختصاصی مورد استفاده در این پژوهش [۷ و ۸].

ردیف	توالی آغازگر	کاربرد	آغازگر	ردیف نوکلئوتیدی آغازگر	طول محصول PCR (جفت باز)	کلید دستیابی در NCBI
۱	Soy bean Lectin gene	تشخیص توالی ژن لکتین سویا	Lec-F	GCC CTC TAC TCC ACC CCC ATC C	۱۱۸	M30884
			Lec-R	GCC CAT CTG CAA GCC TTT TTG TG		
۲	CaMV 35S	تشخیص	Cam2-F	CCA CGT CTT CAA AGC AAG TGG	۱۲۳	V00141
		پروموتور	Cam2-R	TCC TCT CCA AAT GAA ATG AAC TTC C		
۳	NOS	تشخیص	NOS-F	GCA TGA CGT TAT TTA TGA GAT ggg	۱۱۸	V00087
		ترمیناتور	NOS -R	GAC ACC GCG CGC GAT AAT TTA TCC		
۴	FMV 34S	تشخیص	FMV-F	AAG CCT CAA CAA GGT CAG	۱۹۶	X06166
		پروموتور	FMV-R	CTG CTC GAT GTT GAC AAG		

♦ اجرای واکنش زنجیره‌ای پلیمرز (PCR)

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز (PCR) با استفاده از دستگاه ترموسایکلر^{۲۶} انجام شد. مخلوط واکنش PCR با حجم نهایی ۱۵ میکرولیتر شامل ۷/۵ میکرولیتر مسترمیکس^{۲۷}، ۰/۵ میکرولیتر از هر یک از پرایمرها، ۰/۵ میکرولیتر DNA استخراج شده و ۶ میکرولیتر آب دی‌یونیزه، در شرایط

سرد و کاملاً استریل آماده شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، نمونه‌ای حاوی تمامی اجزای مخلوط واکنش، به‌جز DNA الگو، به‌عنوان کنترل منفی در کنار سایر نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شرایط دمایی واکنش PCR برای هر یک از توالی‌های هدف در جدول (۲) ارائه شده‌است.

جدول (۲): برنامه دمایی واکنش PCR برای ژن‌های هدف [۷].

مرحله	ژن مرجع داخلی لکتین (Le1)	پروموتور CaMV 35S	ترمیناتور NOS	پروموتور FMV 34S
واسرشت اولیه	۱۰ دقیقه در ۹۵°C	۱۰ دقیقه در ۹۵°C	۱۰ دقیقه در ۹۵°C	۱۰ دقیقه در ۹۵°C
چرخه تکثیر	۳۰ ثانیه در ۹۵°C ۳۰ ثانیه در ۶۲°C ۶۰ ثانیه در ۷۲°C	۳۰ ثانیه در ۹۵°C ۳۰ ثانیه در ۵۹°C ۴۵ ثانیه در ۷۲°C	۲۵ ثانیه در ۹۵°C ۳۰ ثانیه در ۶۲°C ۴۵ ثانیه در ۷۲°C	۳۰ ثانیه در ۹۵°C ۳۰ ثانیه در ۵۴°C ۴۰ ثانیه در ۷۲°C
تعداد چرخه‌ها	۳۵	۳۸	۴۰	۴۰
طول‌سازی نهایی	۵ دقیقه در ۷۲°C	۵ دقیقه در ۷۲°C	۵ دقیقه در ۷۲°C	۵ دقیقه در ۷۲°C

♦ ژل الکتروفورز آگارز

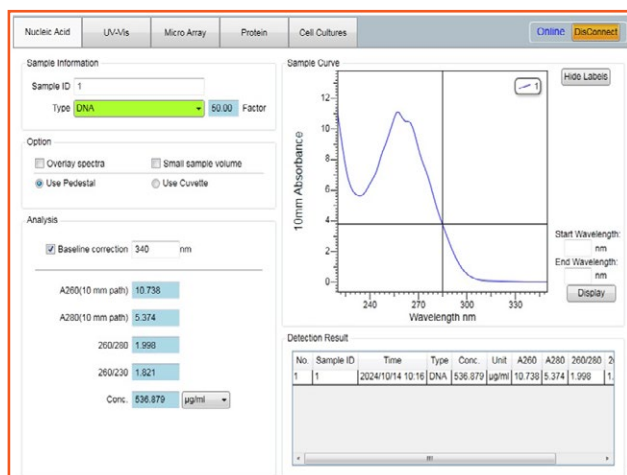
۵ میکرولیتر از محصول PCR و کنترل منفی روی ژل آگارز ۱ درصد حاوی رنگ ایمن DNA Green Viewer بارگذاری و در ولتاژ ۸۰ ولت به مدت ۴۰ دقیقه الکتروفورز شد. بافر TAE 50X شامل ۲۴۲ گرم تریس در ۶۰۰ میلی‌لیتر آب، ۵۷/۱ میلی‌لیتر اسید استیک و ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول EDTA با غلظت ۰/۵ مول بر لیتر بود که pH آن روی ۸ تنظیم و حجم نهایی آن به ۱ لیتر رسانده شد. برای تهیه ژل آگارز و بافر مورد استفاده در تانک الکتروفورز، از بافر TAE 1X استفاده و از رقیق‌سازی ۱۰ میلی‌لیتر بافر TAE 50X با ۴۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر تهیه شد. پس از اتمام ژل، تصاویر باندهای DNA حاصل از PCR با استفاده از دستگاه ژل‌داک^{۲۸} مشاهده و ثبت شدند [۹].

□ نتایج

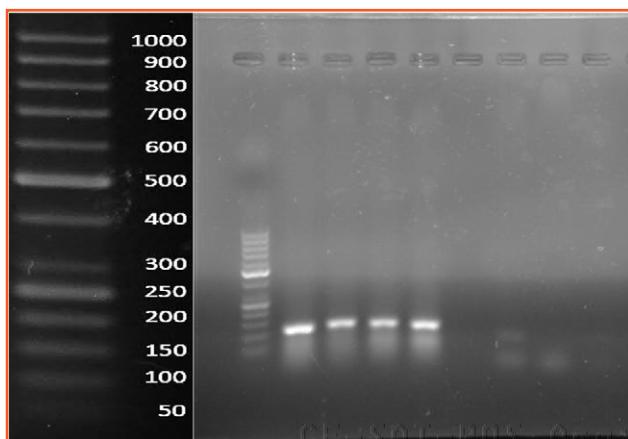
♦ تعیین کیفیت و خلوص (DNA)

به‌منظور ارزیابی DNA از نظر غلظت و میزان آلودگی به پروتئین و سایر مواد باقی‌مانده از فرآیند استخراج، از دستگاه نانودراپ استفاده شد. نتایج این آزمون در شکل (۱) ارائه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نسبت جذب در طول موج‌های ۲۸۰/۲۶۰ نانومتر برابر با ۱/۹۹

و نسبت جذب در طول موج‌های ۲۳۰/۲۶۰ نانومتر برابر با ۱/۸۲ بود که بیانگر کیفیت و خلوص مناسب DNA استخراج‌شده است. همچنین، غلظت DNA نیز برای انجام آزمون PCR مناسب ارزیابی شد. علاوه بر این، کیفیت DNA از نظر عدم تخریب و شکستگی در طی فرآیند استخراج، با استفاده از ژل آگارز بررسی شد که نتیجه آن در شکل (۲) ارائه شده‌است. مشاهده یک باند منفرد DNA در قسمت بالای ژل، نشان‌دهنده سالم بودن و عدم شکستگی DNA استخراج‌شده است.



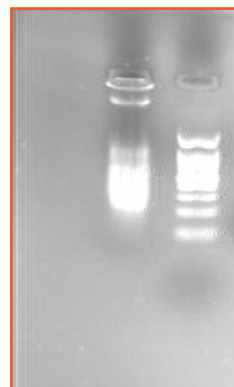
شکل (۱): نتایج نانودراپ DNA استخراج شده از نمونه سویا.



شکل (۳): نتایج آزمون PCR نمونه سویای تراریخته. چاهک‌ها از چپ به راست شامل نشانگر اندازه DNA [DNA Size Marker III S5092 (bp ۵۰)، ژن مرجع داخلی سویا (لکتین)، دو چاهک مربوط به پروموتور CaMV 35S، یک چاهک مربوط به ترمیناتور NOS، یک چاهک خالی و سه چاهک مربوط به کنترل‌های منفی هستند. اندازه باندهای نشانگر در شکل مشخص شده است. طول قطعات تکثیر شده برای ژن لکتین، پروموتور CaMV 35S و ترمیناتور NOS به ترتیب ۱۱۸، ۱۲۳ و ۱۱۸ جفت‌باز است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز (PCR) با موفقیت برای تشخیص تراریختگی نمونه سویای مورد بررسی به کار گرفته شد. همچنین، روش استخراج DNA و پرایمرهای مورد استفاده، کارایی و دقت مناسبی در تکثیر توالی‌های هدف نشان دادند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که روش PCR می‌تواند به‌عنوان روشی سریع، اختصاصی و قابل اعتماد برای شناسایی محصولات تراریخته مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نگرانی‌های موجود درباره ایمنی محصولات اصلاح ژنتیکی شده و ضرورت آگاهی مصرف‌کنندگان، برچسب‌گذاری این محصولات و استقرار نظام‌های مؤثر پایش و نظارت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، ایجاد و تقویت نظام‌های تنظیمی و نظارتی در این زمینه در کشور توصیه می‌شود.



شکل (۲): ارزیابی کیفی DNA استخراج شده از نمونه سویا با استفاده از ژل الکتروفورز آگارز ۱ درصد. از چپ به راست: چاهک اول، نمونه DNA استخراج شده از سویا و چاهک دوم، نشانگر اندازه GeneRuler 100 bp DNA Ladder, SM0241).

♦ واکنش زنجیره‌ای پلیمرز

پس از استخراج DNA، به‌منظور تأیید حضور ژن مرجع داخلی سویا، واکنش PCR با استفاده از پرایمرهای اختصاصی ژن لکتین انجام شد. نتایج ژل الکتروفورز، حضور این ژن را تأیید کرد. طول قطعه تکثیر شده^{۲۹} مربوط به ژن لکتین ۱۱۸ جفت‌باز بود. در ادامه، واکنش PCR برای ردیابی توالی‌های شاخص تراریختگی شامل پروموتور CaMV 35S و ترمیناتور NOS نیز انجام شد و تمامی محصولات PCR به‌طور هم‌زمان روی یک ژل آگارز الکتروفورز شدند (شکل (۳)).

مشاهده باندهای ۱۲۳ و ۱۱۸ جفت‌باز، به ترتیب در نمونه‌های مربوط به پروموتور CaMV 35S و ترمیناتور NOS، تراریختگی نمونه سویای مورد بررسی را تأیید کرد و نشان داد که روش PCR روشی مؤثر، اختصاصی و سریع برای تشخیص محصولات تراریخته است. در این آزمون، از DNA Size Marker III (bp 50) S5092، به‌عنوان نشانگر اندازه DNA استفاده شد. همچنین، عدم مشاهده هیچ‌گونه باند در چاهک‌های مربوط به کنترل منفی، صحت انجام واکنش و نبود آلودگی در فرآیند آزمایش را تأیید کرد.

پی‌نوشت

1. Polymerase Chain Reaction (PCR)
2. Certified Reference Material (CRM)
3. Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB)
4. NanoDrop
5. Genetically Modified Organism (GMO)
6. Biolistic
7. Agrobacterium-mediated transformation
8. Celeres
9. National Biosafety Technical Commission (CTNBio)
10. Particle Bombardment or Biolistic
11. Agrobacterium tumefaciens
12. Agrobacterium rhizogenes
13. Selectable Marker Genes
14. Hygromycin
15. Promoter
16. Terminator
17. Cauliflower Mosaic Virus 35S Promoter, CaMV 35S
18. Nopaline Synthase (NOS)
19. Figwort Mosaic Virus Promoter, FMV 34S
20. Tris
21. Disodium Ethylenediaminetetraacetic Acid (Na₂EDTA)
22. National Center for Biotechnology Information (NCBI)
23. European Molecular Biology Laboratory (EMBL)
24. Endogenous Reference Gene
25. Nopaline Synthase Terminator (NOS)
26. Thermal Cycler
27. Master Mix 2X
28. Gel Documentation System
29. PCR Product

مرجع

- [1] James, C., Global status of commercialized biotech/GM crops, 2011. Vol. 44. 2011: isaaa Ithaca, NY.
- [2] Christou, P., D.E. McCabe, and W.F. Swain, Stable transformation of soybean callus by DNA-coated gold particles. *Plant Physiology*, 1988. 87(3): p. 671-674.
- [3] Milena Schenkel Homrich 1,* , Beatriz Wiebke-Strohm 1,2,* , Ricardo Luís Mayer Weber 1, Maria Helena Bodanese-Zanettini *Genet Mol Biol* 2012 Dec 18;35(4 Suppl):998–1010.
- [4] Domingo, J.L. and J. Giné Bordonaba, A literature review on the safety assessment of genetically modified plants. *Environment International*, 2011. 37(4): p. 734-742.
- [5] Iranian National Standard (2018), Methods for the detection of genetically modified organisms and their products - Nucleic acid extraction (INSO 10763, 1st Revision), <https://standard.inso.gov.ir/>
- [6] Iranian National Standard (2018), Methods for the detection of genetically modified organisms and their products - General requirements and definitions (INSO 9613, 1st Revision), <https://standard.inso.gov.ir/>
- [7] Iranian National Standard (2019), Food stuffs- Methods for the detection of genetically modified organisms and their products - Qualitative methods based on nucleic acid (INSO 9617, 1st Revision), <https://standard.inso.gov.ir/>
- [8] O'Leary NA, Cox E, Holmes JB, Anderson WR, Falk R, Hem V, Tsuchiya MTN, Schuler GD, Zhang X, Torcivia J, Ketter A, Breen L, Cothran J, Bajwa H, Tinne J, Meric PA, Hlavina W, Schneider VA. Exploring and retrieving sequence and metadata for species across the tree of life with NCBI Datasets. *Sci Data*. 2024 Jul 5;11(1):732. doi: 10.1038/s41597-024-03571-y. PMID: 38969627; PMCID: PMC11226681.
- [9] Rudge, S.R. and C.A. Monnig, Electrophoresis techniques. *Separation and Purification Methods*, 2000. 29(1): p. 129-148.

نویسندگان

معصومه حاجی داداشی^۱، محمدرضا عطائی^۲

۱. شرکت دقت آزمون بسپار، زنجان، ایران
 ۲. دانشجوی دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، دانشکده
 فیزیک، زنجان، ایران

*degatazmoonbasparco@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰



روندهای جدید و کاربردهای نوظهور شاخص جریان مذاب

واژه‌های کلیدی

شاخص جریان مذاب، تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی)،
کنترل کیفیت پیش‌بینانه، یادگیری ماشین، اقتصاد
چرخشی، رئولوژی پلیمر.

چکیده

شاخص جریان مذاب^۱ یا نرخ جریان مذاب^۲ طی دهه‌های گذشته، یکی از آزمون‌های پایه در رئولوژی پلیمرها بوده و بیشتر برای کنترل کیفیت به‌کار رفته است. پیشرفت‌های فناوری و تغییر اولویت‌های صنعتی در سال‌های اخیر، کاربردهای تازه‌ای برای این آزمون پدید آورده‌اند که بسیار فراتر از نقش سنتی آن در کنترل و تأیید کیفیت فرآیندهای دسته‌ای است. این مقاله چهار حوزه نوین را بررسی می‌کند که در آن‌ها شاخص جریان مذاب نقشی روزافزون یافته است:

۱. توسعه مواد اولیه برای تولید افزایشی^۳ یا چاپ سه‌بعدی^۴، که در آن شاخص جریان مذاب به فرمول‌بندی فیلامنت‌ها و بهینه‌سازی عوامل چاپ کمک می‌کند؛

۲. تضمین کیفیت پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین^۵، که این شاخص را از یک معیار پس از وقوع به یک عامل کنترل لحظه‌ای فرآیند تبدیل می‌کند؛

۳. نوآوری در تجهیزات با بهره‌گیری از فناوری سلول‌های بار^۶ و سامانه‌های خودکار، که دقت اندازه‌گیری را افزایش داده و اجرای روش‌های جدید آزمون را امکان‌پذیر می‌کند؛

۴. تقویت اقتصاد چرخشی^۷ از طریق بازیافت توزیع‌شده، که شناسایی ویژگی‌های پلیمرها را برای اجرای طرح‌های پایدار در مقیاس جوامع محلی امکان‌پذیر می‌سازد.

این کاربردها نشان می‌دهند که شاخص جریان مذاب دیگر تنها یک معیار منفعل برای کنترل کیفیت نیست، بلکه ابزاری مؤثر برای پیشبرد تولید هوشمند، مدیریت پایدار جریان مواد و گسترش نوآوری غیرمتمرکز به‌شمار می‌رود.

شاخص جریان مذاب یا نرخ جریان مذاب به جرم پلیمر خروجی از یک قالب موئین استاندارد شده در دما و فشار مشخص، برحسب گرم در ۱۰ دقیقه، گفته می‌شود. به عنوان مثال، براساس استاندارد ASTM D1238، آزمون شاخص جریان مذاب برای پلی اتیلن در دمای ۱۹۰ درجه سانتی گراد و فشار ناشی از وزنه ۲/۱۶ کیلوگرمی انجام می‌شود. این شاخص از دیرباز یکی از مهم‌ترین معیارهای تضمین کیفیت مواد پلیمری به‌شمار رفته است [۱]. یکی از دلایل اهمیت ماندگار این شاخص آن است که به‌طور هم‌زمان اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های ذاتی ماده و عملکرد عملی آن ارائه می‌دهد. این آزمون، روشی سریع و مقرون به صرفه است که نتایج آن با وزن مولکولی متوسط (به‌خصوص وزن مولکولی میانگین وزنی^۸) و گرانیوی^۹ پلیمر همبستگی دارد. همچنین در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی، از جمله کنترل و تأیید یکنواختی محصول در فرآیندهای تولید دسته‌ای^{۱۰}، به کار می‌رود. با این حال، تحول‌های گسترده در دانش و صنعت پلیمر، بر جایگاه و کاربرد شاخص جریان مذاب نیز تأثیر گذاشته است. ظهور تولید افزایشی یا چاپ سه‌بعدی و گسترش دسترسی به آن، استفاده روزافزون از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در علم مواد، حرکت به سوی اقتصاد چرخشی و افزایش تقاضا برای دقت و سرعت بیشتر در صنایع دارای الزامات نظارتی، همگی نیازهای کاربران از شاخص جریان مذاب را دگرگون کرده‌اند. این مقاله با تکیه بر پژوهش‌های منتشر شده در مجلات معتبر، چهار حوزه را بررسی می‌کند که کاربردهای شاخص و نرخ جریان مذاب در آن‌ها دستخوش تحول چشمگیری شده‌است. در این حوزه‌ها، نقش این آزمون از ابزاری برای کنترل کیفیت به ابزاری پیش‌بینانه، توانمندساز و تسهیل‌کننده مشارکت گسترده‌تر در تولید و بازیافت تغییر یافته است.

توسعه و بهینه‌سازی مواد اولیه در تولید افزایشی

برای تولیدکنندگان و پژوهشگرانی که در حال توسعه مواد اولیه فیلامنتی هستند، شاخص جریان مذاب پلی مهم میان فرمول‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی و تولید صنعتی به‌شمار می‌رود. موادی که مقدار شاخص جریان مذاب آن‌ها خارج از محدوده بهینه باشد، عیب‌های مشخصی در فرآیند چاپ ایجاد می‌کنند. جریان ناکافی موجب خروج ناکامل ماده از نازل و کاهش چسبندگی بین لایه‌ها می‌شود، در حالی که جریان بیش از حد، تراوش ماده، تشکیل رشته‌های ناخواسته و کاهش دقت ابعادی قطعه را به دنبال دارد. آزمون شاخص جریان مذاب به طراحان و پژوهشگران این امکان را می‌دهد که پیش از آغاز تولید در مقیاس صنعتی، این مشکلات را شناسایی کرده و با اصلاح فرمول مواد، کیفیت آن‌ها را بهبود دهند. تولید افزایشی با روش اکستروژن مواد^{۱۱}، به‌ویژه مدل‌سازی رسوب ذوبی^{۱۲}، به رفتار جریان فیلامنت‌های پلیمری درون نازل‌های گرم شده وابستگی زیادی دارد. از این رو، شاخص جریان مذاب به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در غربالگری و بهینه‌سازی مواد اولیه، در فرآیند توسعه این مواد به کار می‌رود [۲ تا ۵].

پژوهش بامیدی و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۶]، کاربرد شاخص جریان مذاب را در توسعه فیلامنت‌های نوین زیست‌کامپوزیتی نشان می‌دهد. در این پژوهش، فیلامنت‌های پلی لاکتیک اسید^{۱۳} با افزودن ۷ تا ۱۳ درصد وزنی الیاف گیاه ریحان مقدس و ۰/۱ تا ۰/۴ درصد وزنی گرافن اصلاح شدند. نتایج آزمون‌های رئولوژی نشان داد که شاخص جریان مذاب

کامپوزیت‌های حاصل، ۲۲ تا ۳۱ درصد افزایش یافته است؛ یافته‌ای که پیامدهای مستقیمی برای بهبود چاپ‌پذیری این مواد دارد. پژوهشگران همچنین راهبردی برای بهینه‌سازی عوامل اکستروژن با استفاده از نرم‌افزار برش‌دهنده^{۱۴} ارائه کردند و نشان دادند که اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب، به‌طور مستقیم با کاهش عیب‌های رایج چاپ، از جمله ایجاد حفره‌های میان‌لایه، ارتباط دارد. علاوه بر این، پژوهشگران روشی کارآمد برای انجام آزمون شاخص جریان مذاب ارائه کردند که به تجهیزات گران‌قیمت آزمایشگاهی نیاز ندارد و ارزیابی ویژگی‌های فیلامنت را در محیط‌های نمونه‌سازی اولیه تسهیل می‌کند [۶].

نمونه‌ای دیگر از نقش مهم مشخصه‌یابی رئولوژیکی^{۱۵} در توسعه مواد اولیه، در پژوهشی درباره نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با نانوذرات نیتريد سیلیسیم برای چاپ سه‌بعدی به روش اکستروژن مواد دیده می‌شود [۷]. در این پژوهش که ویداکیس و همکاران در سال ۲۰۲۴ منتشر کردند، میزان نیتريد سیلیسیم به‌صورت نظام‌مند از صفر تا ۶ درصد وزنی تغییر داده شد تا فرمولاسیونی بهینه با تعادل مناسب میان فرآوری‌پذیری و خواص مکانیکی به‌دست آید. نتایج این پژوهش نشان داد که مشخصه‌یابی رئولوژیکی، با استفاده از رئومتر چرخشی^{۱۶} و اندازه‌گیری نرخ جریان مذاب، نقش مهمی در درک چگونگی تأثیر نانوپرکننده سرامیکی بر رفتار جریان ماده دارد؛ رفتاری که به‌طور مستقیم بر قابلیت چاپ اثر می‌گذارد. بررسی‌ها نشان داد که افزودن ۲ درصد وزنی نیتريد سیلیسیم، بهترین عملکرد کلی را فراهم می‌کند و ضمن حفظ ویژگی‌های جریان مناسب برای اکستروژن، موجب

افزایش ۲۱ درصدی مدول کشسانی^{۱۷} و بهبود ۷/۱۵ درصدی استحکام خمشی^{۱۸} می‌شود [۷]. این پژوهش نمونه‌ای از کاربرد مشخصه‌یابی نظام‌مند رئولوژی در طراحی فیلامنت‌های کامپوزیتی با کارایی بالا برای تولید افزایشی است.

تضمین کیفیت پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین

امروزه به‌کارگیری هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین به یکی از روندهای مهم در حوزه‌های گوناگون علم و مهندسی تبدیل شده‌است. در علوم پلیمر نیز یکی از مهم‌ترین تحول‌های مرتبط با شاخص جریان مذب، تلفیق آن با الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. این رویکرد، شاخص جریان مذب را از معیاری که پس از تولید و به‌صورت برون‌خط اندازه‌گیری می‌شود، به یک حسگر مجازی^{۱۹} برای پیش و کنترل لحظه‌ای فرآیند تبدیل می‌کند.

مطالعه‌ای شاخص که در دسامبر ۲۰۲۵ در نشریه آی‌ای‌ای اکسس^{۲۰} منتشر شد [۸]، اهمیت و توانمندی این رویکرد را به خوبی نشان می‌دهد. پژوهشگران، دستگاهی سفارشی برای آزمون جریان مذب بر پایه استاندارد انجمن آزمون و مواد آمریکا^{۲۱} توسعه دادند که با بهره‌گیری از سامانه کنترل رایانه‌ای، قادر است آزمون‌های جریان مذب را به‌صورت یکنواخت و تکرارپذیر برای نمونه‌های مختلف انجام دهد. پژوهشگران با استفاده از مجموعه داده‌ای شامل پلیمرهای گوناگون، دماهای مختلف آزمون و وزن‌های اعمالی متفاوت، چندین مدل یادگیری ماشین را برای پیش‌بینی سریع و دقیق نرخ جریان مذب آموزش دادند. در میان این مدل‌ها، رگرسیون مبتنی بر شبکه عصبی^{۲۲} بهترین عملکرد را نشان داد و به جذر میانگین مربعات خطا^{۲۳} برابر با ۰/۳ گرم بر ۱۰ دقیقه و میانگین درصد خطای مطلق^{۲۴} معادل ۳/۲ درصد دست یافت. هر چند این مدل‌ها نمی‌توانند آزمون‌های تجربی را به‌طور کامل جایگزین کنند، اما قادرند ویژگی‌های جریان پلیمر را پیش از انجام آزمون فیزیکی با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند. این موضوع تعداد آزمون‌های مورد نیاز را کاهش می‌دهد و در نتیجه، مصرف مواد اولیه، هزینه‌های نیروی انسانی و زمان مورد نیاز برای کنترل کیفیت را نیز کاهش می‌دهد.

این مطالعه، کاربرد این رویکرد را در چارچوب اینترنت اشیای صنعتی^{۲۵} نیز نشان می‌دهد. تلفیق آزمون شاخص جریان مذب با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، با فراهم کردن امکان ارزیابی یکنواخت کیفیت پلیمرهای بازیافتی و بهینه‌سازی مصرف منابع از طریق تحلیل‌های پیش‌بینانه^{۲۶} (چه در تخمین مقدار شاخص جریان مذب و چه پیش‌بینی کیفیت محصول)،

زمینه را برای دستیابی به «تولیدی هوشمندتر و پایدارتر» فراهم می‌کند [۸]. این رویکرد با روندهای حاکم بر انقلاب صنعتی چهارم همسو است؛ به‌گونه‌ای که تلفیق داده‌های برخط^{۲۷}، تضمین کیفیت را از نمونه‌برداری دوره‌ای به پیش‌پوسته فرآیند تغییر می‌دهد؛ این تحول، گرچه نمونه‌برداری دوره‌ای را به‌طور کامل منسوخ نمی‌کند، نیاز به اجرای مداوم را کاسته و در مصرف زمان و منابع صرفه‌جویی می‌کند. در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۲۵ منتشر شد، یک مدل ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین، حاصل تلفیق دو الگوریتم ماشین یادگیری حدی هسته‌ای^{۲۸} و پیوند تابعی بردار تصادفی^{۲۹} و بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پلیکان^{۳۰} پیشنهاد شد. این مدل با استفاده از عوامل برخط راکتور، از جمله دما، فشار و نرخ خوراک کاتالیست، نرخ جریان مذب را با ضریب تعیین برابر با ۰/۹۶۵ پیش‌بینی می‌کند [۹]. چنین مدل‌هایی امکان اصلاح پیشگیرانه شرایط فرآیند را پیش از تولید مواد خارج از مشخصات را فراهم می‌کنند. افزون بر این، تحلیل مقادیر شیلی^{۳۱} [۱] در این مدل‌ها، مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر پیش‌بینی را مشخص می‌کند و ضمن افزایش قابلیت تفسیرپذیری مدل، بینش‌های کاربردی و قابل اجرا برای بهینه‌سازی فرآیند در اختیار کاربران قرار می‌دهد. مقادیر شیلی روشی مبتنی بر نظریه بازی‌ها است که سهم هر ویژگی ورودی را در خروجی نهایی مدل، با در نظر گرفتن همه مشارکت‌ها و تعاملات ممکن میان ویژگی‌ها، تعیین می‌کند. این روش به کاربران کمک می‌کند تا درک عمیق‌تری از چگونگی عملکرد مدل و میزان تاثیر هر ویژگی بر خروجی آن به‌دست آورند [۱۰ و ۱۱].

باید توجه داشت که این مدل‌ها نه تنها دستگاه‌های اندازه‌گیری شاخص جریان مذب را منسوخ نمی‌کنند، بلکه اهمیت و دامنه کاربرد آن‌ها را نیز افزایش می‌دهند. در عمل، توسعه و آموزش مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به حجم زیادی از داده‌های تجربی نیاز دارد که تنها از طریق انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند. پس از آموزش، این مدل‌ها با استفاده از داده‌های جدید، مقدار شاخص جریان مذب یا سایر ویژگی‌های موردنظر را با سرعت و دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کنند. با این حال، برای تأیید و اعتبارسنجی نتایج، همچنان انجام آزمون‌های تجربی ضروری است. به بیان دیگر، این مدل‌ها جایگزین آزمون‌های آزمایشگاهی نمی‌شوند، بلکه فرآیند طراحی، توسعه و بهینه‌سازی مواد و فرآیندها را تسریع کرده و هزینه‌ها و زمان مورد نیاز را کاهش می‌دهند. در گزارش آینده‌پژوهی بازار دستگاه‌های شاخص جریان مذب تا سال ۲۰۳۱ [۱۲]، تحلیلگران، رشد پایدار سامانه‌های دیجیتال و خودکار اندازه‌گیری شاخص جریان مذب را در پاسخ به افزایش تقاضا در صنایع خودروسازی، بسته‌بندی،

■ اقتصاد چرخشی و بازیافت توزیع شده

حرکت جهانی به سوی اقتصاد چرخشی پلاستیک، نیاز به روش‌های در دسترس و قابل اعتماد برای شناسایی ویژگی‌های پلیمرها را بیش از پیش افزایش داده است. در این میان، آزمون شاخص جریان مذاب نقش مهمی در «بازیافت توزیع شده و تولید افزایشی»^{۳۵} ایفا می‌کند؛ رویکردی که در آن تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و کارگاه‌های محلی، ضایعات پلاستیکی را به مواد اولیه قابل استفاده برای تولید محصولات جدید تبدیل می‌کنند. چالش اصلی در بازیافت توزیع شده و تولید افزایشی، یکنواخت نبودن مواد اولیه ورودی است. جریان‌های ضایعاتی، به‌طور معمول شامل مخلوطی از پلیمرهای مختلف، محصولات تخریب شده در اثر استفاده پیشین و انواع آلاینده‌ها هستند که هر یک می‌توانند رفتار جریان مذاب را به‌طور غیرقابل پیش‌بینی تغییر دهند. از سوی دیگر، هزینه بالای دستگاه‌های اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب، استفاده از آن‌ها را برای بسیاری از کارگاه‌های محلی و واحدهای کوچک بازیافت دشوار کرده و به یکی از موانع کنترل کیفیت در سامانه‌های بازیافت توزیع شده تبدیل شده‌است. در پاسخ به این نیاز، پژوهشگران طرح‌های متن‌باز^{۳۶} برای ساخت دستگاه شاخص جریان مذاب ارائه کرده‌اند که دسترسی به مشخصه‌یابی رئولوژیکی را تسهیل می‌کند. این سامانه‌های کم‌هزینه که برای ورقه‌های بازیافتی پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول شده^{۳۷} و مخلوط‌های پلی‌اتیلن سنگین^{۳۸}/پلی‌اتیلن ترفتالات^{۳۹} اعتبارسنجی شده‌اند، دقت کافی را برای غربالگری مواد اولیه و بهینه‌سازی عوامل فرآیند فراهم می‌کنند [۱۴].

پژوهش‌های بامیدی و همکاران که در سال ۲۰۲۵ منتشر شد، به‌طور مشخص بر ضرورت افزایش دسترسی به آزمون شاخص جریان مذاب تأکید دارد و روشی کارآمد برای انجام این آزمون ارائه می‌کند که به گفته نویسندگان، «به تجهیزات گران‌قیمت آزمایشگاهی نیاز ندارد» [۶]. این‌گونه پژوهش‌ها با فراهم کردن روش‌های کم‌هزینه برای ارزیابی ویژگی‌های رئولوژیکی فیلامنت، به واحدهای بازیافت در مقیاس کوچک امکان می‌دهند کیفیت چاپ را به‌صورت یکنواخت حفظ کنند و میزان ضایعات مواد را کاهش دهند.

روند جهانی افزایش بازیافت پلیمرها، موجب گسترش کاربرد آزمون شاخص جریان مذاب شده‌است. این آزمون، به دلیل سادگی اجرا و آموزش، می‌تواند در ارزیابی مواد اولیه ورودی، تعیین نسبت مناسب مواد بازیافتی به مواد نو برای دستیابی به ویژگی‌های موردنظر و همچنین تأیید کیفیت محصول در پایان فرآیند به کار رود. الزام اتحادیه اروپا به بازیافت ۵۵ درصد از بسته‌بندی‌های پلاستیکی تا سال ۲۰۳۰ [۱۵]، تقاضای قابل توجهی برای توسعه چنین راهکارهایی ایجاد کرده است. از این رو، آزمون شاخص جریان مذاب، به‌ویژه با استفاده از دستگاه‌های در دسترس و کم‌هزینه، نقش مهمی در تسهیل گذار به اقتصاد چرخشی خواهد داشت.

تجهیزات پزشکی و الکترونیک پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، یکپارچه‌سازی این سامانه‌ها با اینترنت اشیای صنعتی امکان نظارت از راه دور، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه و پیش‌برخط عملکرد تجهیزات را فراهم می‌کند؛ قابلیت‌هایی که در محیط‌های تولید پیوسته، اهمیت روزافزونی یافته‌اند.

■ نوآوری در دستگاه‌ها و افزایش دقت

یکی دیگر از روندهای نوین در حوزه شاخص جریان مذاب، پیشرفت دستگاه‌های اندازه‌گیری این شاخص است. این دستگاه‌ها در سال‌های اخیر، در پاسخ به نیاز روزافزون به دقت بیشتر، خودکارسازی گسترده‌تر و افزایش قابلیت‌های اندازه‌گیری، دستخوش تحول چشمگیری شده‌اند. بازنگری استاندارد انجمن آزمون و مواد آمریکا در سال ۲۰۲۳، این پیشرفت‌ها را به‌طور رسمی مورد تأیید قرار داد؛ از جمله به‌کارگیری سامانه‌های اعمال نیرو مبتنی بر سلول بار که دقت و تکرارپذیری اندازه‌گیری را افزایش می‌دهند [۱۳]. دستگاه‌های متداول اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب، به‌منظور ایجاد نیروی لازم برای اکستروژن، از وزنه‌های فیزیکی قرار گرفته روی پیستون استفاده می‌کنند. هر چند این روش در شرایط پایدار و برای مواد با ویژگی‌های یکنواخت عملکرد مناسبی دارد، اما از نظر دقت، انعطاف‌پذیری و قابلیت کنترل با محدودیت‌هایی همراه است. در مقابل، سامانه‌های مبتنی بر سلول بار، نیروی مورد نیاز را به کمک مجموعه‌ای شامل موتور و پیچ ساچمه‌ای^{۳۲} و با استفاده از کنترل حلقه‌بسته^{۳۳} اعمال می‌کنند [۱۳]. این ساختار مزیت‌های متعددی دارد، از جمله: ■ اعمال پروفایل نیروی قابل برنامه‌ریزی که انجام آزمون را با بارهای مختلف، بدون نیاز به تعویض دستی وزنه‌ها، امکان‌پذیر می‌کند؛

■ پایش برخط نیروی اعمالی در طول آزمون؛

■ کاهش خطای انسانی و در نتیجه افزایش تکرارپذیری

نتایج؛

■ تغییر خودکار وزنه‌ها، که تعیین نسبت نرخ جریان^{۳۴} را بدون تأثیر شتاب ناشی از جابه‌جایی جرم امکان‌پذیر می‌کند. نتایج آزمون‌های انجام شده توسط انجمن آزمون و مواد آمریکا نشان داد که این دستگاه‌ها از نظر نتایج اندازه‌گیری، هم‌خوانی بالایی با دستگاه‌های متداول دارند و در عین حال، تکرارپذیری و بازتولیدپذیری بهتری ارائه می‌کنند. این بهبود عملکرد، به‌ویژه در کاربردهایی که به کنترل دقیق نوسان‌های فرآیند نیاز دارند، مانند تولید تجهیزات پزشکی و قطعات خودرو، اهمیت زیادی دارد.

نتیجه‌گیری

شاخص جریان مذاب، که سال‌ها به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی کنترل کیفیت پلیمرها شناخته می‌شد، در سال‌های اخیر، هم‌زمان با پیشرفت‌های فناوری و افزایش توجه به مسائل زیست‌محیطی، کاربردهای گسترده‌تری یافته است. این شاخص دیگر تنها ابزاری برای کنترل کیفیت نیست، بلکه در حوزه‌های مختلف، از طراحی مواد اولیه تا پایش و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، نقش مؤثری ایفا می‌کند. در تولید افزایشی، شاخص جریان مذاب راهنمایی مؤثر برای فرمول‌بندی فیلامنت و بهینه‌سازی شرایط چاپ به‌شمار می‌رود و به شناسایی و کاهش عوامل ایجادکننده عیوبی کمک می‌کند که کیفیت قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

از طریق تلفیق با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شاخص جریان مذاب از یک شاخص پس‌نگر به عاملی پیش‌بینانه در بوم‌سامانه‌های (اکوسیستم) تولید هوشمند تبدیل شده است. این تحول، امکان پیش‌بینی ویژگی‌های جریان پلیمر و بهینه‌سازی فرآیند تولید را پیش از بروز انحراف در کیفیت محصول فراهم می‌کند. پیشرفت در دستگاه‌های آزمون، از جمله به‌کارگیری فناوری سلول بار، خودکارسازی و یکپارچه‌سازی دیجیتال، دقت اندازه‌گیری را افزایش داده و قابلیت‌های آزمون را گسترش داده است؛ در حالی که این پیشرفت‌ها همچنان با استانداردهای پذیرفته شده بین‌المللی سازگار هستند. در حوزه اقتصاد چرخشی نیز، آزمون شاخص جریان مذاب، به دلیل سادگی، هزینه پایین و دسترس‌پذیری، نقش مهمی در گسترش بازیافت توزیع‌شده ایفا می‌کند و امکان مشارکت واحدهای کوچک، کارگاه‌های محلی و سایر ذی‌نفعان را در مدیریت پایدار جریان مواد فراهم می‌سازد.

شاخص جریان مذاب و دستگاه‌های اندازه‌گیری آن، با وجود تحول‌های پیوسته در طراحی و کاربرد، به دلیل سادگی، سرعت، هزینه مناسب و توانایی ارائه اطلاعات ارزشمند درباره رفتار رئولوژیکی پلیمرها، همچنان جایگاه خود را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی مواد پلیمری حفظ خواهند کرد. آزمون شاخص جریان مذاب، با فراهم کردن اطلاعات رئولوژیکی سریع، در دسترس و کاربردی، ارتباط میان دانش پایه پلیمر و نیازهای عملی تولید را تقویت کرده است. همچنین، این آزمون با انطباق با فناوری‌های نوین، از جمله یادگیری ماشین، دستگاه‌های هوشمند و راهکارهای اقتصاد چرخشی، توانسته است پاسخگوی نیازهای در حال تغییر صنعت باشد. بر همین اساس، پیش‌بینی می‌شود بازار دستگاه‌های شاخص جریان مذاب در سال‌های آینده نیز به رشد خود ادامه دهد.

پی‌نوشت

1. Melt Flow Index (MFI)
2. Melt Flow Rate (MFR)
3. Additive Manufacturing (AM)
4. Three-Dimensional Printing (3D Printing)
5. Machine Learning (ML)
6. Load Cell
7. Circular Economy
8. Weight-Average Molecular Weight (Mw)
9. Viscosity
10. Batch Production
11. Material Extrusion Additive Manufacturing (MEX)
12. Fused Deposition Modeling (FDM)
13. Polylactic Acid (PLA)
14. Slicer
15. Rheological Characterization
16. Rotational Rheometer
17. Elastic Modulus
18. Flexural Strength
19. Virtual Sensor
20. IEEE Access
21. ASTM International
22. Neural Network Regression
23. Root Mean Square Error (RMSE)
24. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)
25. Industrial Internet of Things (IIoT)
26. Predictive Analytics
27. Real-time Data
28. Kernel Extreme Learning Machine (KELM)
29. Random Vector Functional Link (RVFL)
30. Pelican Optimization Algorithm (POA)
31. Shapley values
32. Ball Screw
33. Closed-loop Control
34. Flow Rate Ratio (FRR)
35. Distributed Recycling and Additive Manufacturing (DRAM)
36. Open-source
37. Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)
38. High-Density Polyethylene (HDPE)
39. Polyethylene Terephthalate (PET)

مراجع

- [1] A. V. Shenoy, D. R. Saini, *Advances in Polymer Technology*, 6 (1986) 1–58.
- [2] H. Zhang, F. Ye, F. Chen, W. Yuan, W. Yan, *Additive Manufacturing*, 81 (2024) 103992.
- [3] S. R. Stewart, J. E. Wentz, J. T. Allison, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2A-2015 (2016).
- [4] A. Afzal, A. Karaki, A. H. Muliana, H. S. Bazzi, E. Masad, M. Khraisheh, *Journal of Applied Polymer Science*, 143 (2026) e70213.
- [5] N. Kumar, P. K. Jain, P. Tandon, P. M. Pandey, *International Journal of Materials and Product Technology*, 59 (2019) 194-211.
- [6] R. Bammidi, H. Madivada, S. Dowluru, *International Polymer Processing*, 40 (2025) 649-657.
- [7] N. Vidakis, N. Michailidis, A. Argyros, N. Mountakis, V. Papadakis, M. Spiridaki, A. Moutsopoulou, E. Sfakiotakis, M. Petousis, *Colloid and Polymer Science*, 302 (2024) 843-860.
- [8] A. O. Biçen, Ç. Çağlı, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21 (2025) 9468-9479.
- [9] M. A. Parvez, I. M. Mehedi, *Polymers*, 17 (2025) 2382.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Shapley_value.
- [11] S. Lundberg, S. Lee, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 (2017).
- [12] <https://www.researchandmarkets.com/reports/6138257/melt-flow-indexers-market-report-trends>
- [13] <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/determination-of-melt-flow-rate-astm-d1238/>
- [14] D. Liu, A. Basdeo, C. S. Gonzalez, A. Romani, H. Boudaoud, C. Nouvel, F. A. Cruz Sanchez, J. M. Pearce, *Materials*, 17 (2024) 5966.
- [15] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_18_6.

نویسندگان

هوشنگ پرهام^{۱*}، نوشین خلقتی^۲،زهرا سلیمانی بابادی^۳، سیده ندا موسوی^۳

۱. مدیر فنی شرکت دانش آزمون پرهام جنوب، اهواز، خوزستان، ایران

۲. مدیر کنترل کیفیت آزمایشگاه شرکت دانش آزمون پرهام جنوب، اهواز، خوزستان، ایران

۳. کارشناس آزمایشگاه جذب اتمی شرکت دانش آزمون پرهام جنوب، اهواز، خوزستان، ایران

*Daplab1394@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶

واژه‌های کلیدی

فلزات سنگین، آرسنیک، برنج، آلودگی فلزی.

مروری بر میزان آلودگی آرسنیک در برنج

چکیده

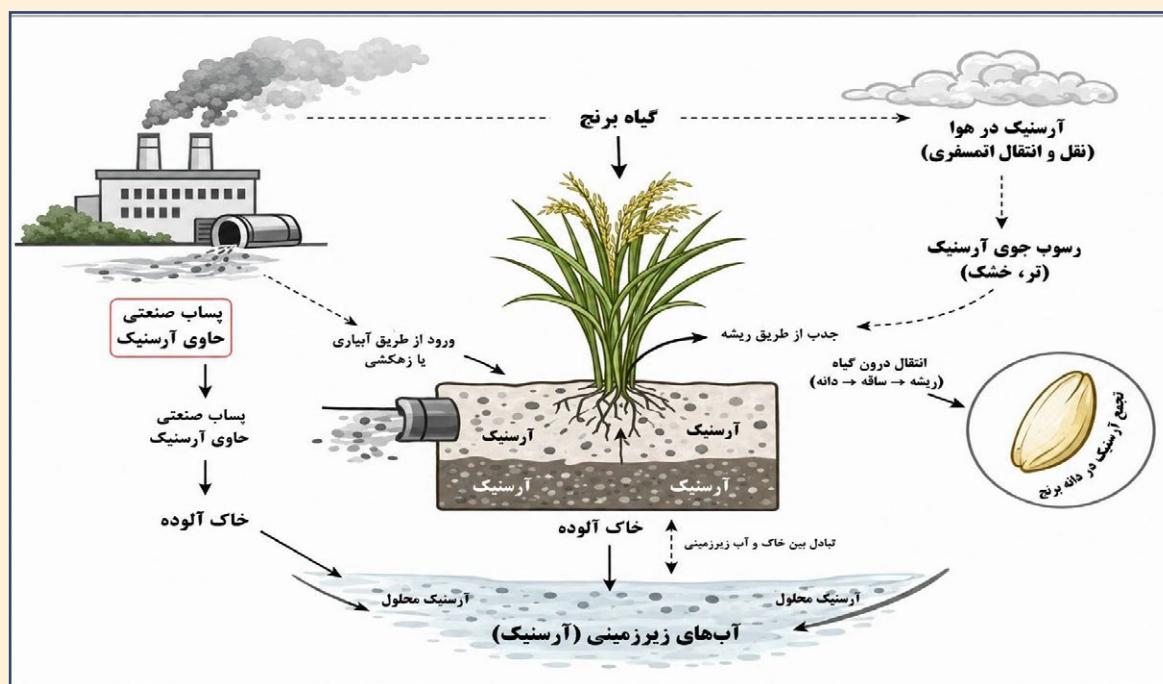
در دهه‌های اخیر، در نتیجه فعالیت‌های انسانی، نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره آلودگی‌های محیط‌زیستی شکل گرفته است. آلودگی خاک به فلزات سنگین، یکی از چالش‌های مهم در سراسر جهان به شمار می‌رود. این فلزات از منابع طبیعی و همچنین فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی از طریق مصرف کودها و آفت‌کش‌ها، وارد محیط‌زیست می‌شوند. برنج، به‌ویژه برنج سفید، پس از گندم یکی از مهم‌ترین مواد غذایی جهان، به‌خصوص در کشورهای آسیایی، محسوب می‌شود. مصرف گسترده این محصول، اهمیت ارزیابی سلامت آن، به‌ویژه از نظر آلودگی به فلزات سنگین، را دوچندان کرده است. از این رو، پایش مستمر آلاینده‌های فلزی در برنج برای حفظ سلامت مصرف‌کنندگان ضروری است. تأثیر فلزات سنگین بر سلامت انسان، بررسی مسیرهای آلودگی مواد غذایی به این آلاینده‌ها و نیز شناسایی راهکارهای پیشگیری از انتشار، آن‌ها را به موضوعی مهم تبدیل کرده است. برنج، به دلیل رشد در شرایط غرقابی (بی‌هوازی)، در مقایسه با سایر غلات، ظرفیت بیشتری برای تجمع آرسنیک دارد. قرار گرفتن در معرض آرسنیک از طریق مصرف برنج آلوده می‌تواند پیامدهای نامطلوبی از جمله بروز سرطان، ضایعات پوستی، بیماری‌های قلبی-عروقی، اختلال‌های متابولیک، آسیب‌های عصبی و تکاملی و همچنین آسیب به کبد و کلیه را به دنبال داشته باشد. در این مقاله، وضعیت آلودگی آرسنیک در برنج، عوامل مؤثر بر انتقال و تجمع آن، روش‌های استخراج و اندازه‌گیری و همچنین راهکارهای مناسب و مقرون به صرفه برای کاهش آلودگی، بدون ایجاد اختلال در ویژگی‌های مطلوب برنج، بررسی شده‌اند.

آرسنیک، یکی از شبه‌فلزهای سمی و به نسبت فراوان پوسته زمین، به شمار می‌رود [۱]. این عنصر به‌طور طبیعی، در اثر فرسایش سنگ‌ها و کانی‌های حاوی آرسنیک و با تأثیر عوامل جوی، مانند باد و باران، وارد آب و خاک می‌شود [۲]. آرسنیک نخستین بار در سال ۱۲۵۰ میلادی توسط آلبرتوس ماگنوس^۱ شناسایی شد و به‌صورت آلوتروپ‌های مختلف وجود دارد. این عنصر از نظر فراوانی، پنجاه و سومین عنصر پوسته زمین است و حدود ۱/۵ ppm از ترکیب آن را تشکیل می‌دهد. همچنین، غلظت آرسنیک در خاک حدود ۱۰ ppm و در آب دریا حدود ۱/۶ ppb گزارش شده‌است [۳]. آرسنیک در محیط زیست به شکل‌های شیمیایی مختلف، شامل گونه‌های معدنی و آلی، وجود دارد [۴]. سمیت گونه‌های مختلف آرسنیک به ویژگی‌هایی مانند تحرک، حلالیت و فراهمی زیستی آن‌ها بستگی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که گونه‌های معدنی، به‌ویژه آرسنیت^۲، به دلیل تحرک و فراهمی زیستی بیشتر، سمیت بالاتری نسبت به سایر گونه‌های آرسنیک، از جمله آرسنات^۳ و گونه‌های آلی دارند [۵ و ۶]. افزون بر این، آرسنیک معدنی می‌تواند در اثر فعالیت میکروارگانیزم‌ها متیله شده و به ترکیب‌های آلی، مانند اسید مونومتیل آرسونیک^۴ و اسید دی‌متیل آرسینیک^۵ تبدیل شود.

هر چهار گونه آرسنیک یاد شده می‌توانند در خاک‌های شالیزاری حضور داشته باشند و قابلیت جذب توسط ریشه‌های برنج را دارند. از این رو، در گیاهانی که در شرایط هوازای کشت می‌شوند، آرسنات، به‌عنوان گونه غالب آرسنیک، مهم‌ترین شکل قابل جذب برای گیاه به شمار می‌رود. در مقابل، در برنج کشت شده در شرایط غرقابی (بی‌هوازی)، آرسنیت به دلیل تحرک و فراهمی زیستی بیشتر، گونه غالب و قابل جذب است. این تفاوت اساسی، تأثیر چشمگیری بر میزان و الگوی جذب آرسنیک در گیاهان دارد [۷].

آرسنیک در نتیجه فعالیت‌های انسانی، از جمله کشاورزی، معدن کاری، فلزکاری، ساخت‌وساز، مصرف کودهای شیمیایی و دامی، آبیاری با فاضلاب، استفاده از آفت‌کش‌ها، فرآوری مواد معدنی، مصرف زغال‌سنگ و سایر فرآیندهای صنعتی، در خاک تجمع می‌یابد [۲ و ۸]. این عنصر پس از ورود به محیط، می‌تواند به آب‌های سطحی و زیرزمینی منتقل و در نهایت، موجب آلودگی خاک‌های کشاورزی شود [۹]. افزون بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در بسیاری از مناطق جهان، آب‌های زیرزمینی که در آبیاری مزارع برنج به کار می‌روند، دارای غلظت بالایی از آرسنیک هستند و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع ورود این آلاینده به سامانه‌های کشت برنج شناخته می‌شوند (شکل (۱)) [۱۰].

یکی دیگر از عوامل مؤثر در افزایش آلودگی خاک به آرسنیک، پایین بودن باروری ذاتی خاک است. در چنین شرایطی، کشاورزان برای افزایش حاصل‌خیزی خاک و کنترل آفات، به‌طور معمول مقادیر بیشتری کود و آفت‌کش‌های حاوی ترکیب‌های آرسنیک را در چند نوبت مصرف می‌کنند [۵ و ۹]. تداوم این روند، موجب تجمع آرسنیک در خاک و افزایش غلظت گونه‌های قابل جذب آن در ناحیه ریشه گیاه می‌شود.



شکل (۱): نمایی از مسیرهای ورود آرسنیک به گیاه برنج.

مقدمه

برنج نقش مهمی در کاهش گرسنگی و تأمین انرژی در سطح جهان دارد؛ به گونه‌ای که میزان مصرف سالانه آن در آسیا به بیش از ۱۰۰ کیلوگرم به ازای هر نفر می‌رسد. دانه‌های برنج دارای ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و ضدآلرژی هستند. همچنین، از این ماده غذایی در تولید مکمل‌های غذایی نوزادان، کیک، شیر برنج، نوشیدنی‌ها و سایر فرآورده‌های غذایی استفاده می‌شود. با این حال، این محصولات ممکن است حاوی آرسنیک باشند که مصرف آن می‌تواند خطر بروز یا تشدید برخی بیماری‌ها را در مصرف‌کنندگان افزایش دهد. از این رو، انجام آنالیزهای دوره‌ای فلزات سنگین، به‌ویژه آرسنیک، در این ماده غذایی پرمصرف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳].

مطابق دستورالعمل‌های سازمان ملی استاندارد ایران، حد مجاز آرسنیک در برنج حداکثر ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg) تعیین شده است. افزایش غلظت آرسنیک بیش از حد مجاز در محیط و زنجیره غذایی، به دلیل سمیت بالا برای انسان و محیط‌زیست و همچنین تجزیه‌ناپذیری آن، می‌تواند موجب بروز مشکلات و عوارض متعددی شود. از جمله این عوارض می‌توان به حالت تهوع، کاهش تولید گلبول‌های قرمز، ضربه قلب غیرطبیعی، احساس خارش پوستی، اختلال در عملکرد تنفس سلولی، فعالیت آنزیم‌های سلولی و فرآیند میتوز اشاره کرد. در موارد شدید، مواجهه با آرسنیک می‌تواند به ایجاد ضایعات پوستی، اختلال در عملکرد سیستم ایمنی و بروز بیماری‌های خودایمنی، مشکلات عصبی، نوسانات خلقی و افسردگی، بیماری‌های ریوی و تحریک‌پذیری، بیماری‌های قلبی-عروقی، لرزش و ضعف عضلانی، فشار خون بالا، دیابت شیرین، اختلالات دستگاه گوارش، عفونت‌های مزمن و انواع سرطان‌های داخلی منجر شود [۱، ۸ و ۱۱].

در سال‌های اخیر، تعداد مطالعات منتشر شده درباره روش‌های اندازه‌گیری گونه‌های مختلف آرسنیک به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ زیرا گونه‌های شیمیایی مختلف این عنصر نقش مهمی در ارزیابی خطرات مرتبط با سلامت انسان دارند [۱۲]. یکی از راهبردهای مؤثر برای اندازه‌گیری گونه‌های آرسنیک، استفاده از روش‌هایی است که امکان تعیین مقدار این عنصر در برنج را بدون تغییر در گونه‌های شیمیایی آن فراهم می‌کنند [۱۳]. با این حال، محدودیت‌های مربوط به انتخاب‌پذیری و حساسیت روش‌های موجود، اندازه‌گیری عناصر در غلظت‌های پایین را با دشواری مواجه می‌کند. آنالیز گونه‌های مختلف آرسنیک به‌صورت معمول شامل دو مرحله اصلی، استخراج و اندازه‌گیری است. در تحلیل‌های شیمیایی، مانند تعیین گونه‌های آرسنیک در ماتریس‌های پیچیده‌ای مانند برنج، بهینه‌سازی دقیق این مراحل ضروری است تا تغییرات در گونه‌های عنصری اندازه‌گیری شده به حداقل برسد [۱۴]. در این تحقیق، مروری بر روش‌های تجزیه‌ای مختلف مورد استفاده برای تعیین و اندازه‌گیری آرسنیک در برنج ارائه شده است.

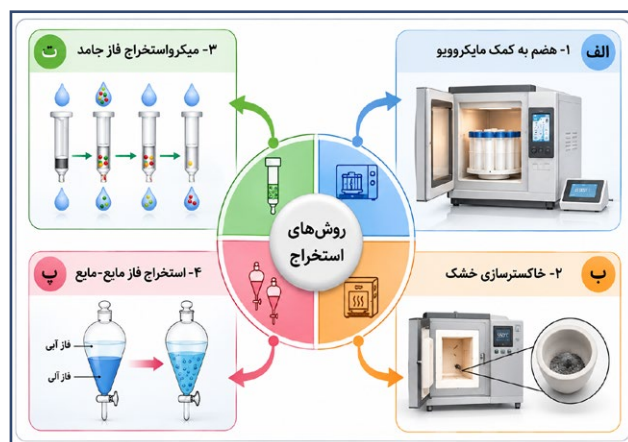
جدیدترین روش‌های استخراج گونه‌های مختلف آرسنیک کل

استخراج و آماده‌سازی نمونه برای اندازه‌گیری آرسنیک با هدف آزادسازی کامل این عنصر از بافت نمونه و کاهش تداخل‌ها انجام می‌شود. در این تحقیق، چهار روش برای هضم و استخراج آرسنیک بررسی شده است. روش نخست، هضم به کمک دستگاه مایکروویو با استفاده از اسید نیتریک غلیظ^۶ و هیدروژن پراکسید^۷ است. این روش، روشی کارآمد، سریع و تکرارپذیر به شمار می‌رود که با ایجاد دما و فشار کنترل شده، تجزیه کامل مواد آلی و انتقال آرسنیک به فاز محلول را فراهم می‌کند [۱۵].

روش دوم، خاکسترسازی خشک^۸ است که در آن نمونه در دمای بالا سوزانده شده و مواد آلی آن حذف می‌شوند.

سپس خاکستر حاصل در اسید مناسب حل شده و با استفاده از عوامل کاهنده، آرسنات به آرسنیت احیا می‌شود. با این حال، احتمال اتلاف آرسنیت نیز در این روش وجود دارد [۱۶]. روش سوم، میکرواستخراج فاز جامد^۹ است که بر پایه جذب انتخابی گونه‌های آرسنیک روی یک جاذب جامد و سپس واجذب آن‌ها انجام می‌شود. این روش به دلیل مصرف کم حلال و حساسیت بالا مورد توجه قرار گرفته است [۱۷]. روش چهارم، میکرواستخراج پخشی فاز مایع-مایع^{۱۰} است که در آن، آرسنیک پس از تشکیل کمپلکس مناسب، به‌صورت قطرات بسیار ریز در فاز آلی پخش شده و با بازده بالا استخراج می‌شود. همچنین، روش استخراج فاز مایع-مایع کلاسیک^{۱۱} بر انتقال آرسنیک یا کمپلکس آن از فاز آبی به فاز آلی نامحلول براساس ضریب توزیع استوار است؛ با این حال، در مقایسه

با روش‌های میکرواستخراج، به مقدار بیشتری حلال و زمان طولانی‌تری نیاز دارد (شکل (۲)) [۱۸].



شکل (۲): نمایشی از روش‌های متداول آماده‌سازی نمونه و استخراج آرسنیک در برنج شامل هضم به کمک مایکروویو، خاکسترسازی خشک، میکرواستخراج فاز جامد و استخراج فاز مایع-مایع.

روش‌های متداول اندازه‌گیری آرسنیک

بر اساس مطالعات انجام شده، آرسنیک موجود در نمونه‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا متصل به طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^{۱۲}، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^{۱۳}، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^{۱۴}، طیف‌سنجی فلورسانس اتمی با تولید هیدرید^{۱۵} و طیف‌سنجی جذب اتمی^{۱۶} مجهز به سامانه تولید هیدرید^{۱۷} یا کوره گرافیتی^{۱۸}، جداسازی و اندازه‌گیری نمود (شکل (۳)) [۱۹].



شکل (۳): نمایشی از روش‌های متداول اندازه‌گیری آرسنیک در برنج.

کارا^{۱۹} و همکاران در سال ۲۰۲۱، شش گونه آرسنیک شامل آرسنیت، آرسنات، اسید مونومتیل‌آرسونیک، اسید دی‌متیل‌آرسونیک، آرسنوبتائین^{۲۰} و آرسنوکولین^{۲۱} را در نمونه آرد

برنج با استفاده از HPLC-ICP-MS جداسازی و شناسایی کردند. در شرایط بهینه کروماتوگرافی، جداسازی کامل و مطلوبی میان شش گونه آرسنیک به‌دست آمد و عملکرد سامانه HPLC-ICP-MS برای اندازه‌گیری کمی این گونه‌ها ارزیابی شد. حد تشخیص روش^{۲۲} برای گونه‌های مختلف آرسنیک در محدوده ۰/۱۴ تا ۰/۲۹ نانوگرم بر میلی‌لیتر (ng/mL) قرار داشت، در حالی که حد اندازه‌گیری کمی^{۲۳} در بازه ۰/۴۵ تا ۰/۹۷ نانوگرم بر میلی‌لیتر (ng/mL) محاسبه شد. به‌منظور اعتبارسنجی قابلیت کاربرد روش در ماتریس‌های پیچیده، آزمون‌های بازیابی با استفاده از روش افزودن استاندارد^{۲۴} روی نمونه‌های برنج انجام شد. نتایج نشان داد که درصد بازیابی در محدوده ۹۳ تا ۱۰۹ درصد قرار دارد که بیانگر دقت و قابلیت اطمینان مناسب روش است. همچنین، اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار برای تمامی نمونه‌های غنی‌شده^{۲۵} انجام شد و مقادیر انحراف استاندارد نسبی^{۲۶} کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آمد. این نتایج نشان‌دهنده تکرارپذیری مطلوب روش پیشنهادی است [۲۰].

هوانگ^{۲۷} و همکاران در سال ۲۰۱۵، آرسنیت موجود در برنج را اندازه‌گیری کردند. در این مطالعه، آرسنیک کل موجود در نمونه‌های برنج با استفاده از اسید نیتریک غلیظ استخراج شد و سپس آرسنات با استفاده از تیواوره^{۲۸} به آرسنیت کاهش یافت. در ادامه، آرسنیت (As(III)) از گونه‌های آرسنیک آلی، از جمله متیل‌آرسنیک اسید (MMA) و دی‌متیل‌آرسنیک اسید (DMA)، با استفاده از کارتریج‌های رزین پلی‌استایرن جداسازی شد و پس از آن، As(III) با روش طیف‌سنجی فلورسانس اتمی با تولید هیدرید (HG-AFS) به‌صورت کمی اندازه‌گیری شد. این روش به حد تشخیص برابر با ۱/۱ میکروگرم بر کیلوگرم (μg/kg)، حد اندازه‌گیری کمی برابر با ۳/۶ میکروگرم بر کیلوگرم (μg/kg) و انحراف استاندارد نسبی کمتر از ۶ درصد دست یافت. اعتبارسنجی روش با استفاده از مواد مرجع گواهی‌شده^{۲۹} و مقایسه با روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی همراه با کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا انجام شد. در مقایسه با روش‌های کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنجی فلورسانس اتمی با تولید هیدرید^{۳۰} یا کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^{۳۱}، روش پیشنهادی به دلیل هزینه کمتر تجهیزات، حساسیت بالا و حد تشخیص پایین قابلیت استفاده گسترده‌تری دارد [۲۱].

تاکانوری^{۳۲} و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک روش تحلیلی برای تعیین دو گونه آرسنیک غیرآلی شامل آرسنیت و آرسنات و اندازه‌گیری مجموع آن‌ها را در انواع برنج ایندیکا و ژاپونیکا با پوست و بدون پوست، به‌صورت بین‌المللی اعتبارسنجی کردند. این روش همچنین امکان شناسایی دو ترکیب آرسنیک آلی شامل MMA و DMA، را به‌صورت پیک‌های مجزا در کروماتوگرافی مایع^{۳۳} فراهم می‌کند. این روش مبتنی بر

(mg/kg) برای آرسنیک گزارش شد. مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی نشان داد که بین نتایج دو روش همبستگی بسیار مطلوبی وجود دارد. همچنین، این روش با موفقیت برای تعیین آرسنیک کل غیرآلی شامل (آرسنیت و آرسنات) در نمونه‌های تجاری برنج به کار گرفته شد و نتایج رضایت‌بخشی ارائه داد [۲۴]. در جدول (۱)، خلاصه‌ای از روش‌های اندازه‌گیری آرسنیک در برنج شده‌است.

جدول (۱): مروری بر روش‌های تجزیه‌ای مختلف برای تعیین آرسنیک کل^{۴۵} و آرسنیک آلی^{۴۶} موجود در نمونه‌های برنج کشورهای مختلف [۱۹].

کشورها	روش اندازه‌گیری	گونه‌های آرسنیک
آمریکا، اسپانیا، چین، انگلستان	ICP-MS, HPLC-ICP-MS	آرسنیک کل (T-As)، آرسنیک غیرآلی (I-As)
جمهوری چک	HPLC-ICP-MS	T-As, I-As
ایتالیا	ICP-MS	T-As, I-As
یونان	طیف‌سنجی جذب اتمی الکتروترمال ^{۴۷}	T-As, I-As, As(III), As(V)
کامبوج	ICP-MS	T-As
استرالیا، مصر	ICP-MS	T-As
ترکیه	HPLC-ICP-MS	T-As, I-As
چین	کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنجی فلورسانس اتمی ^{۴۸}	I-As
چین	HG-AFS	I-As
ژاپن	HPLC-ICP-MS	As(III), As(V), MMA, DMA
استرالیا	HPLC-ICP-MS	As(III), As(V), DMA, MMA
هند، بنگلادش	HPLC-ICP-MS	T-As, As(III), As(V), DMA, MMA
برزیل	HG-AAS	As(V) و As(III)
ویتنام	HPLC-ICP-MS/MS	As(V), As(III), DMA, MMA
تایوان	ICP-MS	T-As, As(III), As(V), DMA, MMA
ایران	HG-AAS, HPLC	T-As, As(III), As(V), DMA, MMA
اروگوئه	HPLC-ICP-MS	T-As, I-As
کانادا	ICP-MS	T-As
تایلند	HG-AFS	T-As, I-As

جداسازی LC و آشکارسازی با طیف‌سنجی ICP-MS استوار است. اعتبار روش براساس دستورالعمل هماهنگ شده اتحادیه بین‌المللی شیمی محض و کاربردی^{۴۴}، سازمان بین‌المللی استانداردسازی^{۴۵} و انجمن اداره شیمی‌دان‌های تحلیلی رسمی^{۴۶} ارزیابی شد. در این مطالعه، ۱۶ آزمایشگاه از چهار کشور مشارکت کردند که داده‌های حاصل از ۱۳ آزمایشگاه معتبر شناخته شد. انحراف استاندارد نسبی تکرارپذیری^{۴۷} در محدوده ۸/۳ تا ۷/۷ درصد و انحراف استاندارد نسبی تجدیدپذیری^{۴۸} در بازه ۱۰ تا ۳۶ درصد گزارش شد. براساس نتایج حاصل، حد تشخیص روش برابر با ۰/۰۰۲ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg) و حد تعیین کمی برابر با ۰/۰۳ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg) تخمین زده شد. همچنین، دامنه کاربرد روش در محدوده ۰/۰۲ تا ۲ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg) تعیین شد [۲۲].

بورجس^{۴۹} و همکاران در سال ۲۰۲۰، روشی را توسعه دادند که در آن آرسنیک موجود در برنج با استفاده از استخراج به کمک امواج مایکروویو استخراج شد و سپس گونه‌های مختلف آرسنیک با استفاده از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا متصل به طیف‌سنجی فلورسانس اتمی با تولید هیدرید^{۴۰} اندازه‌گیری شدند. این روش امکان تعیین کمی و گونه‌شناسی آرسنیک‌های غیرآلی و آلی شامل آرسنات، آرسنیت، MMA و DMA را فراهم کرد. این گونه‌ها از رایج‌ترین فرم‌های آرسنیک در نمونه‌های برنج هستند. در روش پیشنهادی، درصد بازیابی در محدوده ۸۶ تا ۱۱۰ درصد قرار داشت که نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش است. همچنین، حد تعیین کمی برای گونه‌های آرسنیت و آرسنات به ترتیب برابر با ۱/۵۹ و ۴/۸۱ میکروگرم بر کیلوگرم (μg/kg) گزارش شد [۲۳].

تیان وی^{۴۱} و همکاران در سال ۲۰۲۴، در پژوهشی یک روش ولتامتری سریع، ساده و دقیق برای تعیین آرسنیک کل در نمونه‌های برنج ارائه کردند. در این روش، آماده‌سازی نمونه شامل افزودن محلول مخلوط اسید نیتریک و ال-سیستئین^{۴۲} بود که استخراج و تبدیل گونه‌های آرسنیک به آرسنیت را به‌صورت هم‌زمان تسهیل می‌کرد. به‌منظور کاهش اثرات ناشی از ماتریس پیچیده برنج، از کامپوزیت‌های مغناطیسی برای جذب یون‌های مزاحم، به‌ویژه یون‌های مس و سایر عوامل مداخله‌گر، استفاده شد. این روش امکان تعیین آرسنیک کل را با کاهش اثر تداخلات ماتریسی فراهم کرد. علاوه بر این، آرسنیت با استفاده از ولتامتری موج مربعی^{۴۳} با الکترودهای چاپ‌شده روی صفحه^{۴۴} که با نانوذرات طلا و ال-سیستئین اصلاح شده بودند، اندازه‌گیری شد. این اصلاح سطح الکتروده موجب افزایش حساسیت و انتخاب‌پذیری روش شد. براساس این راهبرد، روش اصلاح شده مقاومت مناسبی در برابر تداخلات و عوامل مزاحم نشان داد و حساسیت بالایی داشت؛ به‌طوری‌که حد تشخیص برابر با ۰/۰۱۸ میلی گرم بر کیلوگرم

کشت دوم و قهوه‌ای) و برنج وارداتی از پاکستان (نام‌های تجاری با عنوان‌های A، B و C) و هندوستان (نام‌های تجاری با عنوان‌های A و B) بررسی شد. میزان غلظت آرسنیک نمونه‌های برنج ذکر شده در جدول (۲) نشان داده شده‌است [۲۹].

جدول (۲): میزان آرسنیک موجود در انواع مختلف برنج‌های تولید داخل و وارداتی (mg/kg) [۲۹].

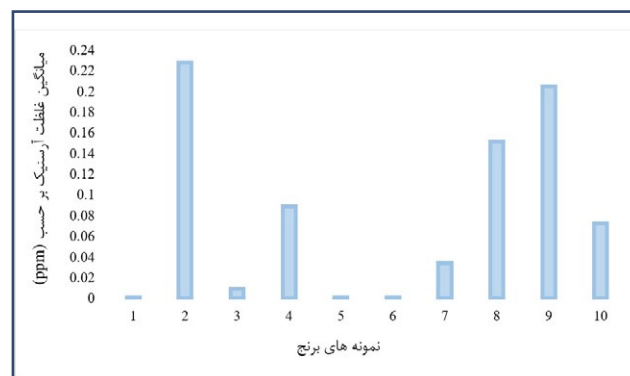
منطقه	آرسنیک (mg/kg)
حد مجاز (طبق استاندارد ملی ۱۲۹۶۸)	۰/۱۵
پاکستانی A	< LOQ*
پاکستانی B	۰/۰۴۸
پاکستانی C	۰/۰۵
هندی A	۰/۰۸
هندی B	۰/۱۱۰
مازندران طارم	۰/۰۷۵
مازندران شیرودی	۰/۱۰۰
مازندران ندا	۰/۰۹
گیلان تالش	۰/۰۶۶
گیلان کاظمی	۰/۰۷
گیلان هاشمی	۰/۰۸۳
ارگانیک کشت اول	< LOQ
ارگانیک کشت دوم	۰/۰۳۰
C _۵ -ارگانیک قهوه‌ای	۰/۱۵۰
*کمتر از حد تعیین	

در مطالعه مسافری و همکاران، برنج‌های وارداتی از کشورهای هند و پاکستان به استان هرمزگان و همچنین برنج‌های تولید داخل از نظر غلظت آرسنیک طبق استاندارد ملی به شماره ۱۶۷۲۲ به روش خاکسترسازی خشک، توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به سامانه تولید هیدرید بررسی شدند. نتایج نشان داد که در هیچ یک از نمونه‌های برنج،

مقایسه غلظت آرسنیک در نمونه‌های مختلف برنج و عوامل مؤثر بر آن

غلظت آرسنیک موجود در برنج می‌تواند در مناطق مختلف جغرافیایی متفاوت باشد؛ این تفاوت به عوامل متعددی از جمله شرایط ژئوشیمیایی، ویژگی‌های خاک و کیفیت آب آبیاری مرتبط است [۲۵]. شواهد حاصل از یک تحلیل بر مطالعات میدانی آسیایی نیز نشان داده است که غلظت آرسنیک خاک، در مقایسه با آرسنیک آب آبیاری، پیش‌بینی‌کننده قوی‌تری برای غلظت آرسنیک در دانه برنج است [۲۶]. زاوالا^۴ و همکاران در مطالعه‌ای، ۲۰۴ نمونه برنج از مناطق مختلف شامل آمریکا، اروپا و آسیا را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت آرسنیک کل در این نمونه‌ها در محدوده ۰/۰۰۵ تا ۰/۷۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg) متغیر بود. همچنین، میانگین غلظت آرسنیک کل در نمونه‌های آمریکا و اروپا ۰/۱۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg) و در نمونه‌های آسیا ۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg) گزارش شد [۲۷].

همچنین، مرضیه کلاه‌کج و همکاران غلظت آرسنیک را در ۱۰ نمونه برنج از منطقه میداوود استان خوزستان بررسی کردند. غلظت آرسنیک در این نمونه‌ها در شکل (۴) ارائه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت این فلز در ۳۰ درصد از نمونه‌های برنج، در مقایسه با حد مجاز درج شده در استاندارد ملی ۱۲۹۶۸ که برای آرسنیک کل برنج ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده، بیشتر است [۲۸].



شکل (۴): میانگین غلظت آرسنیک در نمونه‌های مختلف برنج براساس نتایج اندازه‌گیری انجام شده [۲۸].

در مطالعه‌ای دیگر، ناجی طبسی و همکاران غلظت آرسنیک را طبق استاندارد ملی ۱۶۷۲۲ و با دستگاه جذب اتمی، در محصول برنج مناطق مختلف مازندران (گونه‌های طارم، شیرودی و ندا)، گیلان (گونه‌های طارم، علی کاظمی و هاشمی)، سه نمونه برنج ارگانیک (کشت اول،

غلظت آرسنیک از حد مجاز تعیین شده براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۱۲۹۶۸، یعنی ۰/۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)، بیشتر نبود. نتایج حاصل از این پژوهش در جدول (۳) ارائه شده است [۳۰].

جدول (۳): میانگین غلظت آرسنیک کل در انواع نمونه های برنج وارداتی و تولید داخل (mg/kg) [۳۰].

نوع برنج	غلظت آرسنیک کل (mg/kg)
هندی	۰/۰۴۷
پاکستانی	۰/۰۴۷
ایرانی	۰/۰۳۵
مجاز هندی ^۱	۰/۰۳۸
غیرمجاز هندی ^۲	۰/۰۵۵
مجاز پاکستانی	۰/۰۵۲
غیرمجاز پاکستانی	۰/۰۴۳

۱: برنج هایی که مورد تایید وزارت بهداشت هستند.
۲: واردات بخشی از برنج که بدون تایید وزارت بهداشت انجام می شود.

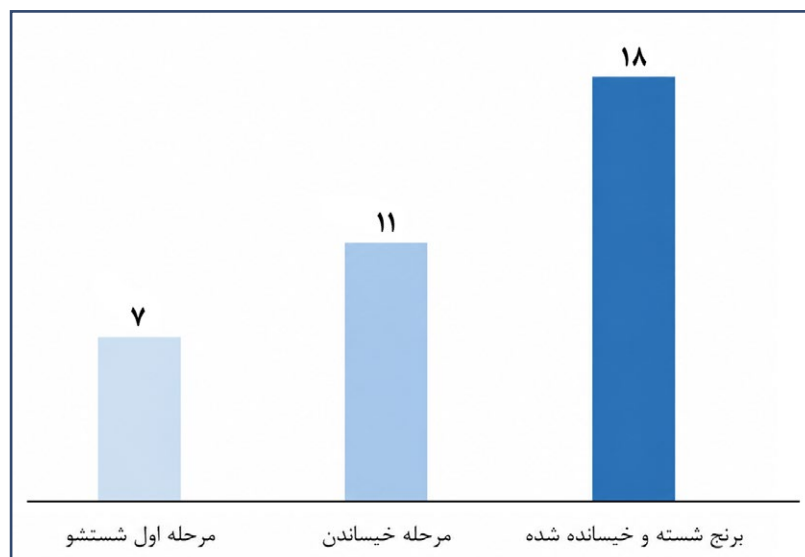
طبق مطالعه انجام شده، میانگین غلظت آرسنیک در هر دو گروه برنج های ایرانی و نمونه های وارداتی، کمتر از حداکثر غلظت مجاز تعیین شده توسط سازمان ملی استاندارد ایران، معادل ۰/۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)، بود. بیشترین غلظت آرسنیک کل، معادل ۰/۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)، در یکی از نمونه های

برنج وارداتی از هند مشاهده شد، در حالی که کمترین غلظت، معادل ۰/۰۳ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)، به یکی از نمونه های برنج ایرانی مربوط بود. به طور مشابه، میانگین و حداکثر غلظت آرسنیک در نمونه های مختلف برنج عرضه شده در بازار استان خراسان، واقع در شمال شرق ایران، به ترتیب ۰/۰۵۱ و ۰/۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg) گزارش شده است. حدود ۵۳ درصد از نمونه های برنج وارداتی دارای غلظت آرسنیک بالاتر از ۰/۰۸۲ میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg)، یعنی میانگین غلظت آرسنیک در این گروه، بودند؛ در حالی که تنها ۳۳ درصد از نمونه های برنج تولید داخل، غلظتی بالاتر از این مقدار داشتند.

اگرچه میانگین غلظت آرسنیک در برنج تولید داخل کمتر از برنج وارداتی بود اما این تفاوت از نظر آماری معنادار نبود ($P=0/061$). با وجود شناسایی آرسنیک در تمامی نمونه های بررسی شده، هیچ یک از نمونه ها از حداکثر غلظت مجاز آرسنیک تعیین شده در ایران فراتر نرفتند. بنابراین، نمی توان نتیجه گرفت که برنج های وارداتی از پاکستان و هند به طور معنی داری غلظت آرسنیک بیشتری نسبت به برنج های تولید داخل دارند [۳۱]. میزان آلودگی آرسنیک در برنج می تواند بر حسب شرایط خاک و آب آبیاری در مناطق مختلف متفاوت باشد. از این رو، برای کاهش غلظت آرسنیک در برنج، توصیه می شود برنج با آب فاقد غلظت بالای فلزات سنگین شستشو داده شده و پس از خیساندن مصرف شود. مقایسه نتایج این آزمون نشان داد که غلظت آرسنیک کل در برنج، پس از سه بار شستشو و سه ساعت خیساندن، در مقایسه با نمونه پیش از شستشو، ۱۸ درصد کاهش یافته است. نتایج این پژوهش در جدول (۴) و شکل (۵) ارائه شده است [۳۲].

جدول (۴): مقایسه (میانگین $\pm$ SD) آرسنیک کل در مراحل مختلف در برنج وارداتی و داخلی ($\mu\text{g/kg}$) [۳۲].

نوع برنج	تعداد برنج ها	برنج خشک	مرحله خیساندن	شستشوی مرحله اول	شستشوی مرحله دوم	P Value
داخلی	۷	$45/92 \pm 2/16$	$37/61 \pm 2/15$	$3/38 \pm 0/25$	$5/03 \pm 0/13$	$p < 0/05$
وارداتی	۱۴	$51/55 \pm 1/9$	$42/3 \pm 1/92$	$3/36 \pm 0/19$	$5/64 \pm 0/15$	$p < 0/05$
جمع	۲۱	$48/73 \pm 2/03$	$39/95 \pm 2/03$	$3/49 \pm 0/1$	$5/33 \pm 0/14$	$p < 0/05$



شکل (۵): درصد کاهش غلظت آرسنیک پس از شستشوی و خیساندن نمونه‌های برنج [۳۲].

نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده روی نمونه‌های مختلف برنج نشان می‌دهد که برنج و فرآورده‌های حاصل از آن، یکی از مهم‌ترین منابع دریافت غذایی آرسنیک برای انسان هستند. برنج پس از گندم، یکی از محصولات کشاورزی مهم در تأمین غذای بشر به‌شمار می‌رود. با توجه به پراکندگی آلودگی آرسنیک در منابع خاک و آب که به شرایط جغرافیایی، فعالیت‌های صنعتی و ویژگی‌های محیطی مناطق مختلف وابسته است، همچنین با در نظر گرفتن اثرات نامطلوب و جبران‌ناپذیر این آلودگی بر سلامت انسان و محیط‌زیست، حذف یا کاهش آرسنیک از منابع آب و خاک برای جلوگیری از ورود و تجمع این عنصر سمی در مواد غذایی پرمصرف، ضروری است. روش‌های مدیریت آب، مانند آبیاری تناوبی و اصلاح خاک، همچنین شستشو و خیساندن برنج پیش از پخت و آبکش کردن آن در فرآیند پخت، می‌توانند به‌عنوان روش‌هایی ساده و مقرون به صرفه برای کاهش تجمع آرسنیک در برنج مورد استفاده قرار گیرند. افزون بر موارد ذکر شده، اندازه‌گیری دوره‌ای غلظت فلزات سنگین و اجرای برنامه‌های مناسب برای پایش و پاکسازی منابع آب و خاک، به‌منظور تأمین و حفظ امنیت غذایی جامعه، ضروری است.

از میان روش‌های تجزیه‌ای مختلف برای اندازه‌گیری آرسنیک، می‌توان به کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا متصل به طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (HPLC-ICP-MS) به‌عنوان یکی از روش‌های مناسب برای تفکیک و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی مختلف آرسنیک اشاره کرد. این روش از حساسیت بالایی برخوردار است و قابلیت اندازه‌گیری آرسنیک در غلظت‌های بسیار پایین را دارد. همچنین، در مقایسه با بسیاری از روش‌های دیگر، از دقت و صحت مناسبی برخوردار است. از محدودیت‌های این روش می‌توان به نیاز به تجهیزات پیشرفته، هزینه بالای تعمیر و نگهداری دستگاه و پیچیدگی فرآیند آماده‌سازی نمونه اشاره کرد که استفاده گسترده از آن را از نظر اقتصادی محدود می‌کند.

روش دیگر، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) است. برخلاف کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا متصل به طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (HPLC-ICP-MS) که امکان جداسازی و اندازه‌گیری گونه‌های مختلف شیمیایی آرسنیک را فراهم می‌کند، در روش ICP-MS معمولی غلظت آرسنیک کل اندازه‌گیری می‌شود. این روش از سرعت بالایی برخوردار است و امکان اندازه‌گیری هم‌زمان چندین عنصر را فراهم می‌کند. همچنین، آماده‌سازی نمونه در آن نسبت به HPLC-ICP-MS ساده‌تر است.

روش دیگر، طیف‌سنجی جذب اتمی همراه با تولید هیدرید (HG-AAS) است که یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری آرسنیک کل در نمونه‌ها به‌شمار می‌رود. این روش در مقایسه با ICP-MS و HPLC-ICP-MS به تجهیزات ساده‌تر و هزینه کمتری نیاز دارد، اما به‌طور معمول از نظر حساسیت، حد تشخیص و قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان چند عنصر، محدودیت‌های بیشتری دارد.

1. Albertus Magnus
2. Arenite (As III)
3. Arsenate (As V)
4. Monomethylarsonic acid (MMA)
5. Dimethylarsinic acid (DMA)
6. Concentrated Nitric Acid (HNO₃)
7. Hydrogen Peroxide (H₂O₂)
8. Dry Ashing
9. Solid Phase Microextraction (SPME)
10. Dispersive Liquid-Liquid Microextraction (DLLME)
11. Liquid-Liquid Extraction (LLE)
12. High-performance liquid chromatography coupled to inductively coupled plasma-mass spectrometry (HPLC-ICP-MS)
13. High-performance liquid chromatography (HPLC)
14. Inductively coupled plasma-mass spectrometer (ICP-MS)
15. Hydride-generation atomic fluorescence spectrometry (HG-AFS)
16. Atomic Absorption Spectrometry (AAS)
17. Hydride Generation (HG)
18. Graphite furnace atomic absorption spectrometry (GF-AAS)
19. Kara
20. Arsenobetaine (AsB)
21. Arsenocholine (AsC)
22. Limit of Detection (LOD)
23. Limit of Quantification (LOQ)
24. Standard Addition Method
25. Spiked Samples
26. Relative Standard Deviation (RSD%)
27. Huang
28. Thiourea
29. Certified Reference Materials (CRMs)
30. Liquid Chromatography-Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry (LC-HG-AFS)
31. Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LC-ICP-MS)
32. Takanori
33. Liquid chromatography (LC)
34. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
35. International Organization for Standardization (ISO)
36. Association of Official Analytical Chemists (AOAC)
37. Repeatability Relative Standard Deviation (RSDr)
38. Reproducibility Relative Standard Deviation (RSDR)
39. Borges
40. High-performance liquid chromatography- hydride generation- atomic fluorescence spectrometry (HPLC-HG-AFS)
41. Wei Tian
42. L-Cysteine
43. Square Wave Voltammetry (SWV)
44. Screen-Printed Electrodes (SPEs)
45. Total arsenic (T-As)
46. Inorganic arsenic (I-As)
47. Electrothermal atomic absorption spectrometry (ETAAS)
48. Liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry (LC-AFS)
49. Zavala

- [1] S. Shaker Kouhi, M. Rabiee, Journal of Environmental Health Engineering, 13 (2025) 91-107.
- [2] T. Abedi, A. Mojiri, Plants, 9(2020), 129.
- [3] R. Ejaz, M. K. Sharif, A. Sameen, R. Batool, S. Tehseen, M. Aziz, Food Nutrition Chemistry, 1(2023), 1.
- [4] K.F Akter, G. Owens, D.E. Davey, R. Naidu, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 184(2005), 97-149.
- [5] A. Kord Zanganeh, H. R. Pourkhabbaz, A.R. Pourkhabbaz, Journal of Environmental Health Engineering, 51 (2025) 59-73.
- [6] S. Alka, S. Shahir, N. Ibrahim, M.J Ndejiko, D.V Vo, F.A. Manan, Journal of Cleaner Production. 278 (2021) 123805.
- [7] A.A. Meharg, E. Adomaco, Y. Lawgali, C. Deacon, P. Williams, Food Standards Agency, C101045.
- [8] S. M. Mehdinia, H. Nssehinia, Environment and Water Engineering, 8 (2022) 538-550.
- [9] B. Shirzad, N. Khakipour, Food Technology & Nutrition, 1 (2022) 45-55.
- [10] J. Dittmar, A. Voegelin, F. Maurer, L.C. Roberts, S.J. Hug, G.C. Sasha, M. Ashraf Ali, A. Borhan, M. Badruzzaman, R. Kretzschmar, ACS Publications, 44(2010), 8-8842.
- [11] N. Vahaji, M. Tayefeh, Agricultural and Natural Resources Engineers Basij Organization of Alborz Province, 2016.
- [12] A. Raab, C. Baskaran, J. Feldmann, Cooking rice in a high water to rice ratio reduces inorganic arsenic content, J. Environ. Monit. 11 (2009) 41-44.
- [13] T. Narukawa, T. Suzuki, K. Inagaki, Extraction techniques for arsenic species in rice flour and their speciation by HPLC–ICPMS, Talanta., 130 (2014) 213-220.
- [14] I. Pizarro, M. Gómez, MA. Palacios, Evaluation of stability of arsenic species in rice, Anal. Bioanal. Chem., 376 (2003) 102109.
- [15] T. sarvar, S. Khan, X. Yu, S. Amin, M. Amjad Khan, A. Sarwar, J. Muhammad, S. Nazneen, Environmental Technology & Innovation, 1864 (2020).
- [16] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). National Standard of Iran No. 16722, First Edition. Food-stuffs—Determination of Trace Elements—Determination of Total Arsenic by Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry (HGAAS) after Dry Ashing 2013.
- [17] S. Davari, F. Hosseini, Dispersive solid phase microextraction based on aminefunctionalized bimodal mesoporous silica nanoparticles for separation and determination of calcium ions in chronic kidney disease, Anal. Methods Environ. Chem. J., 1 (2018) 57-66.
- [18] H. Shirkhanloo, A. Khaligh, HZ. Mousavi, Ultra-trace arsenic and mercury speciation and determination in blood samples by ionic liquid-based dispersive liquid liquid microextraction combined with flow injection-hydride generation/cold vapor atomic absorption spectroscopy, Chem. Papers, 69 (2015) 779-790.
- [19] J. Hassan, M. Kazem Koochi, M. Amrollahi-Sharifabadi, S. Olubusayo Funmlola, Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal, 2 (2023) 85-100.
- [20] S. Kara, D. Selali Chormey, A. Saygilar, S. Bakirdere, Food Chemistry, 356 (2021).
- [21] Y. Huang, J. Shan, B. Fan, Y. He, S. Xia, Y. Sun, J. Lu, M. Wang, F. Wang, Analytical Methods, 2015.
- [22] T. Ukena, E. Matsumoto, T. Nishimura, J.C.S. Harn, C.A. Lee, L. Rojanapantip, N. Mayteeyonpiriya, K. Suthilucksanananish, Y. Yamada, Journal Of AOAC International, 97 (2014) 946-956.
- [23] G.A. Borges, G.D.O. Souza, P.S.F. Lopes, V.S.T. Ciminelli, C.L. Caldeira, G.D. Rodrigues, Quim Nova, 2020.
- [24] W. Tian. J. Guo. S. Wang. M. Zhou. Y. He. X. Xi. X. Chen. Y. Wang. Y. Wu. J. Zhang. Food chemistry: X. 24(2024)102003.
- [25] S. Majumder, P. Banik, Journal of Environmental Management. 233 (2019) 184–199.
- [26] J. Mandal, S. Sengupta, S. Sarkar, A. Mukherjee, M. D. Wood, S. M. Hutchinson, D. Mondal, Frontiers in Environmental Science, 9 (2021) 760125.
- [27] Y.J. Zavala, J.M. Duxbury, National Library of Medicine, 42 (2008) 10, 3856-3860.
- [28] M. Kolahkaj, S. Battaleblooie, H. Amanipoor, S. Modabberi, Iran. J. Health & Environment, 9 (2017) 4, 537-544.
- [29] S. Naji-Tabasi, A. Verdian, H. Zamani, L. Asghari, SH. Shirzaei, Journal of Food Hygiene, 39 (2020) 10.
- [30] F. Mosaferi, M. Ahmadi, F. Porramezan, M. Abedi Arani, Journal of Preventive Medicine, 5 (2016) 2, 65-73.
- [31] S. Nemati, M. Mosaferi, A. Ostadrahimi, A. Mohammadi, National Library of Medicine, 4 (2014) 2, 180-186. Preventive Medici
- [32] H. Adibi, M. Mazhari, K. Bidaki, M. Mahmoudi, Scientific Research Monthly Journal of Kermanshah University of Medical Sciences, 5 (2018) 2, 628-638.

بهینه‌سازی شرایط خنثی‌سازی آزمایشگاهی روغن خام تخم پنبه

نویسندگان

مجید عامری^{۱*}

سید ابراهیم فرزاد کیش^۱، توحید شמוש^۱

۱. آزمایشگاه جویابه‌نود، تهران، ایران

*Ameri.Majid@JouyaBehnood.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

واژه‌های کلیدی

خنثی‌سازی روغن، روغن تخم پنبه، تصفیه قلیایی، اسیدهای چرب آزاد، سود سوزآور، کربنات سدیم، افت تصفیه، رنگ روغن.

چکیده

روغن‌های خام گیاهی حاوی مقادیر قابل توجهی ناخالصی، از جمله اسیدهای چرب آزاد، فسفاتیدها، رنگدانه‌ها و ترکیبات سمعی هستند که وجود آن‌ها کیفیت و پایداری روغن را کاهش می‌دهد. خنثی‌سازی، یکی از مهم‌ترین مراحل تصفیه روغن، نقش مهمی در حذف این ناخالصی‌ها و بهبود کیفیت محصول نهایی دارد. در این پژوهش، خنثی‌سازی روغن خام تخم پنبه در مقیاس آزمایشگاهی با هدف تعیین شرایط بهینه فرآیند بررسی شد. اثر عواملی مانند مقدار سود اضافی، اجرای فرآیند به صورت یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای، دمای واکنش، زمان اختلاط، غلظت محلول سود و استفاده از کربنات سدیم بر شاخص‌هایی مانند اسیدیته نهایی، رنگ، مقدار صابون باقی‌مانده و افت تصفیه ارزیابی شد. نتایج نشان داد خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، در مقایسه با روش یک مرحله‌ای، کاهش مؤثرتری در شدت رنگ قرمز روغن ایجاد می‌کند، هر چند افت تصفیه نیز افزایش می‌یابد. شرایط بهینه شامل استفاده از ۱۳۵ درصد سود اضافی، افزودن ۲۵ درصد از سود اضافی در مرحله نخست و به‌کارگیری محلول سود ۲۰ درجه بومه^۱ در مرحله نخست و محلول سود ۲۸ درجه بومه در مرحله دوم، در دماهای ۷۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۱/۵ دقیقه برای هر مرحله بود. در این شرایط، روغن تصفیه شده با اسیدیته ۰/۳ درصد، رنگ مطلوب و افت تصفیه قابل قبول به‌دست آمد.

مقدمه

روغن‌های خامی که از منابع حیوانی و گیاهی به‌دست می‌آیند، کاملاً خالص نیستند و علاوه بر گلیسریدها، حاوی انواعی از ناخالصی‌ها نیز هستند. تصفیه روغن، مجموعه‌ای از فرآیندها برای حذف این ناخالصی‌ها و آماده‌سازی روغن خام برای مصرف است. از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در روغن خام می‌توان به کلروفیل^۲، گزانتوفیل^۳، گوسیپول^۴، رنگدانه‌ها^۵، کربوهیدرات‌ها، فسفاتیدها، استرول‌ها^۶، ترکیبات حاصل از اکسیداسیون، مواد معطر، فلزات و اسیدهای چرب آزاد^۷ اشاره کرد. البته همه ناخالصی‌های موجود در روغن خام نامطلوب نیستند؛ به‌عنوان مثال، استرول‌ها ترکیباتی بی‌رنگ، پایدار در برابر حرارت و از نظر شیمیایی خنثی هستند و تا زمانی که مقدار آن‌ها در محدوده طبیعی باشد، مشکلی ایجاد نمی‌کنند. همچنین توکوفرول‌ها^۸ که به‌طور طبیعی در روغن وجود دارند، با جلوگیری از اکسیداسیون، پایداری روغن را افزایش می‌دهند و از ترکیبات ارزشمند آن به‌شمار می‌آیند [۲ و ۳].

بنابراین، اصطلاح تصفیه که در صنعت روغن به‌کار می‌رود، به حذف مواد خارجی غیرگلیسریدی موجود در روغن، صرف‌نظر از ارزش تغذیه‌ای آن‌ها، گفته می‌شود. این فرآیند به‌گونه‌ای انجام می‌شود که کمترین آسیب به گلیسریدها وارد شود و افت روغن به حداقل برسد [۳، ۵ و ۶]. فرآیند تصفیه روغن شامل مراحل زیر است:

۱. صمغ‌گیری^۹؛ ۲. خنثی‌سازی^{۱۰}؛ ۳. بی‌رنگ کردن^{۱۱}؛ ۴. هیدروژناسیون^{۱۲}؛ ۵. بی‌بوسازی^{۱۳}.

البته موم‌گیری^{۱۴} و زمستانه‌سازی^{۱۵} از مراحل ویژه‌ای هستند که برای برخی روغن‌های مایع به‌کار می‌روند. این مراحل برای جلوگیری از کدر شدن روغن در دماهای پایین انجام می‌شوند، زیرا در دمای یخچال، موم‌ها و تری‌گلیسریدهای دارای نقطه ذوب بالا، مانند استئارین^{۱۶}، رسوب کرده و شفافیت روغن را کاهش می‌دهند. در ادامه، ابتدا مرحله خنثی‌سازی به‌طور مختصر معرفی می‌شود و سپس خنثی‌سازی روغن خام تخم پنبه در مقیاس آزمایشگاهی و تعیین شرایط بهینه آن بررسی خواهد شد [۷ و ۸].

○ خنثی سازی (Neutralization)

آزاد موجود در روغن است. با وجود این، در عمل برای اطمینان از کامل شدن واکنش خنثی سازی، همواره مقداری سود اضافی به روغن افزوده می شود. مقدار این سود اضافی با توجه به کیفیت روغن خام و غلظت محلول سود تعیین می شود. در واحدهای تصفیه روغن، غلظت محلول سود به طور معمول بر حسب درجه بومه بیان می شود. برای خنثی سازی روغن های خام با کیفیت مطلوب، به صورت معمول از محلول های سود با غلظت ۱۲، ۱۴ یا ۱۶ درجه بومه استفاده می شود.

در روغن های خامی که مقدار اسیدهای چرب آزاد کم است، به طور معمول از محلول سود با غلظت پایین تر استفاده می شود، در حالی که برای روغن های دارای اسیدهای چرب آزاد بیشتر، محلول های سود با غلظت بالاتر به کار می روند. با این حال، تنظیم اولیه شرایط فرآیند به صورت تجربی و بر پایه نتایج بررسی های آزمایشگاهی انجام می شود. ابتدا مقدار سود مورد نیاز برای خنثی سازی اسیدهای چرب آزاد موجود در روغن محاسبه و سپس مقدار مشخصی سود اضافی به آن افزوده می شود. میزان سود اضافی با توجه به نوع روغن، ویژگی های مخلوط کن، زمان تماس و مقدار فسفاتیدها تعیین می شود و در هر واحد تصفیه ممکن است متفاوت باشد. مقدار سود اضافی مورد نیاز برای خنثی سازی در مقیاس آزمایشگاهی همواره بیشتر از مقدار مورد استفاده در واحدهای صنعتی است. همچنین، در فرآیندهای ناپیوسته (بچ) نسبت به فرآیندهای پیوسته^{۱۹}، از سود اضافی بیشتری استفاده می شود [۱ و ۹].

○ روش های مختلف تصفیه قلیایی

خنثی سازی به روش های مختلفی انجام می شود. در ادامه، این روش ها به اختصار معرفی می شوند.

۱. خنثی سازی ناپیوسته (بچ)^{۲۰}

امروزه این روش در برخی واحدهای کوچک تولید روغن با ظرفیت ۱۰ تن در روز یا کمتر به کار می رود. از مهم ترین مزایای آن می توان به هزینه سرمایه گذاری پایین، امکان ساخت تجهیزات در داخل کشور و قابلیت تصفیه انواع روغن خام با کیفیت های مختلف اشاره کرد. در مقابل، افت تصفیه زیاد، هزینه بالای بهره برداری به دلیل مصرف بیشتر آب و انرژی و نیز پیامدهای زیست محیطی ناشی از تولید پساب از مهم ترین محدودیت های این روش به شمار می روند. تجهیزات مورد استفاده در خنثی سازی ناپیوسته شامل یک مخزن مجهز به همزن و کویل های بخار برای گرم کردن روغن است. بخش پایینی مخزن به شکل

هدف از مرحله خنثی سازی، جداسازی اسیدهای چرب آزاد، مواد جامد معلق (لردها)، مواد صمغی، باقی مانده فسفاتیدها و بخشی از رنگدانه ها با استفاده از بازهای قوی یا ضعیف است. از آنجا که در این مرحله از مواد قلیایی برای حذف ناخالصی ها استفاده می شود، این روش را تصفیه قلیایی نیز می نامند که رایج ترین روش تصفیه شیمیایی روغن های خوراکی است. در این فرآیند، اختلاط روغن با محلول قلیا سبب واکنش اسیدهای چرب آزاد با قلیا و تشکیل صابون های نامحلول در روغن می شود. افزون بر این، سایر ترکیبات اسیدی نیز با قلیا واکنش می دهند و بخشی از ناخالصی ها از طریق جذب روی ذرات صابون تشکیل شده از روغن حذف می شوند. به طور کلی، در تصفیه قلیایی، مواد نامحلول در روغن همراه با فاز آبی از روغن جدا می شوند [۱ و ۲].

تصفیه قلیایی با استفاده از محلول سود، مقدار اسیدهای چرب آزاد روغن را تا حدود ۰/۰۳ درصد کاهش می دهد. در مقابل، با به کارگیری قلیای ضعیف تری مانند کربنات سدیم، کاهش مقدار اسیدهای چرب آزاد به کمتر از ۰/۱ درصد به سادگی امکان پذیر نیست. همچنین تصفیه قلیایی موجب حذف تقریباً کامل فسفاتیدها از روغن می شود. گوسیپول و رنگدانه های وابسته به آن نیز به آسانی با محلول سود واکنش داده و تا حد زیادی در طی این فرآیند از روغن خام تخم پنبه حذف می شوند. در روغن هایی که رنگ آن ها به صورت عمده ناشی از رنگدانه های کاروتنوئیدی^{۱۷} است، تصفیه قلیایی موجب کاهش شدت رنگ می شود. این پدیده احتمالاً به دلیل جذب این رنگدانه ها بر سطح صابون های تشکیل شده و خروج آن ها از روغن رخ می دهد [۲ و ۳].

وجود ناخالصی های نامطلوب در روغن موجب تیره شدن رنگ، کف کردن، دود کردن، تشکیل رسوب هنگام حرارت دادن، کاهش پایداری در برابر اکسیداسیون و بروز سایر واکنش های نامطلوب می شود. این ناخالصی ها در فرآیند تولید روغن تصفیه شده نیز مشکلاتی ایجاد کرده و کیفیت محصول نهایی را کاهش می دهند. از این رو، کیفیت روغن خام نقش مهمی در کارایی فرآیند تصفیه و کیفیت روغن تصفیه شده دارد.

همان گونه که پیش تر بیان شد، تصفیه قلیایی مهم ترین و رایج ترین روش برای جداسازی ناخالصی ها از روغن است و هیدروکسید سدیم یا سود، متداول ترین قلیا برای انجام این فرآیند به شمار می آید. با این حال، مقدار و غلظت محلول سود تأثیر چشمگیری بر کیفیت تصفیه و میزان افت روغن دارد و با انتخاب شرایط مناسب می توان افت تصفیه را به حداقل رساند. مقدار سود مورد نیاز برای خنثی سازی، از نظر تئوری، معادل مقدار اسیدهای چرب

روغن خنثی‌شده در شرایط خلأ خشک شده و برای مرحله رنگ‌بری آماده می‌شود [۱۰].

۲. خنثی‌سازی پیوسته^{۲۴}

در این روش، روغن و محلول سود به‌طور پیوسته وارد دستگاه اختلاط شده و پس از مخلوط شدن، خمیر صابون و روغن با استفاده از سانتریفیوژ از یکدیگر جدا می‌شوند. استفاده از جداکننده سانتریفیوژی در این روش، در مقایسه با فرآیند ناپیوسته، موجب کاهش افت تصفیه و افزایش بازده فرآیند می‌شود. مهم‌ترین مزایای خنثی‌سازی پیوسته عبارت‌اند از:

- ❖ کاهش زمان تماس روغن با محلول قلیا که در نتیجه، صابونی شدن روغن و افت تصفیه را کاهش می‌دهد؛
 - ❖ بهبود جداسازی روغن و خمیر صابون که موجب کاهش افت روغن و افزایش بازده فرآیند می‌شود؛
 - ❖ کنترل دقیق‌تر شرایط فرآیند که به تولید روغن تصفیه شده با کیفیت یکنواخت‌تر و پایدارتر منجر می‌شود.
- خنثی‌سازی پیوسته به دو روش انجام می‌شود که تفاوت اصلی آن‌ها در مدت زمان تماس روغن با محلول سود و دمای فرآیند در هنگام اختلاط است. این دو روش عبارتند از: مخلوط کردن طولانی و مخلوط کردن کوتاه.

• مخلوط کردن طولانی

این روش برای روغن‌های خام با کیفیت مطلوب و مقدار کم اسیدهای چرب آزاد به‌کار می‌رود. در این روش، روغن و محلول هیدروکسید سدیم به مدت ۳ تا ۱۰ دقیقه در دمای ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس دمای مخلوط به سرعت تا حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این روش در ایالات متحده آمریکا به‌عنوان یکی از روش‌های متداول تصفیه روغن شناخته می‌شود.

• مخلوط کردن کوتاه

این روش برای روغن‌هایی با مقدار بالای اسیدهای چرب آزاد مناسب‌تر است. در این روش، روغن و محلول هیدروکسید سدیم در دمای ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت کوتاه، حدود ۱۵ ثانیه، با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس دو فاز روغن و خمیر صابون با استفاده از سانتریفیوژ از یکدیگر جدا می‌شوند. کوتاه بودن زمان تماس روغن با محلول سود، صابونی شدن ناخواسته تری‌گلیسریدها را محدود کرده و در نتیجه، افت تصفیه کاهش می‌یابد [۱، ۳ و ۵].

در روش مخلوط کردن کوتاه، روغن‌های خام با کیفیت پایین را می‌توان در دو مرحله خنثی‌سازی نمود. روغنی که دو مرحله خنثی‌سازی را پشت سر گذاشته است، در

مخروطی طراحی می‌شود و ظرفیت آن به‌طور معمول حدود ۲۷۰۰ کیلوگرم است. هم‌زن از نوع پارویی^{۲۱} بوده و سرعت چرخش آن قابل تنظیم است. در مرحله اختلاط روغن با محلول سود، هم‌زن با سرعت بالا (حدود ۴۰ دور در دقیقه) کار می‌کند تا اختلاط کامل انجام شود. پس از تشکیل صابون، سرعت هم‌زن به حدود ۸ دور در دقیقه کاهش می‌یابد تا ذرات صابون به‌صورت معلق باقی بمانند و شرایط برای جداسازی آن‌ها فراهم شود. دمای روغن در مخزن باید در مدت کوتاهی به مقدار مورد نیاز برای انجام فرآیند خنثی‌سازی برسد و در طول فرآیند نیز در همان محدوده حفظ شود [۲، ۴ و ۷].

• خنثی‌سازی ناپیوسته خشک^{۲۲}

این روش در بسیاری از کشورها برای خنثی‌سازی روغن‌های صمغ‌گیری شده، به‌ویژه روغن خام تخم پنبه، به‌کار می‌رود؛ اما برای روغن سویا مناسب نیست. در این روش، ابتدا روغن تا دمای مورد نظر گرم شده و به بخش مخروطی پایین مخزن پمپ می‌شود. سپس هم‌زن با سرعت بالا (حدود ۴۰ دور در دقیقه) به‌کار می‌افتد تا روغن به‌طور کامل با محلول سود مخلوط شود. در ادامه، مقدار محاسبه شده محلول سود به سرعت روی سطح روغن افزوده شده و هم‌زدن تا تشکیل امولسیون ادامه می‌یابد. مدت زمان اختلاط با محلول سود به نوع روغن بستگی دارد. پس از پایان این مرحله، صابون تشکیل شده در روغن خام طی حدود ۱۰ تا ۱۲ ساعت ته‌نشین می‌شود. در این روش، خمیر صابون حاصل غلظت بالایی دارد و روغن خنثی شده تقریباً عاری از صابون و رطوبت است [۳، ۴ و ۸].

• خنثی‌سازی ناپیوسته مرطوب^{۲۳}

از این روش برای خنثی‌سازی روغن‌هایی با مقدار بالای اسیدهای چرب آزاد، مانند روغن زیتون و روغن بزرک استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا روغن به مخزن خنثی‌سازی پمپ شده و تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود. سپس محلول هیدروکسید سدیم به روغن افزوده شده و پس از اختلاط، دمای مخلوط به ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در ادامه، آب جوش روی سطح مخلوط پاشیده می‌شود تا صابون تشکیل شده همراه با سایر ناخالصی‌ها از روغن جدا شده و ته‌نشین شود. در برخی موارد، کربنات سدیم نیز افزوده می‌شود تا به شکستن امولسیون کمک کند. در پایان مرحله خنثی‌سازی، برای جداسازی صابون باقی‌مانده، روغن چندین بار با آب شست‌وشو داده می‌شود. پس از هر مرحله شست‌وشو، روغن برای مدتی بدون هم‌زدن نگه داشته می‌شود تا آب و سایر ناخالصی‌ها ته‌نشین شوند. درنهایت،

۷. روغن برای مرحله شست‌وشو تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد.

۸. مقدار ۱۷۰ تا ۲۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر تا دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس به روغن افزوده شد. مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه و با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه هم‌زده شد.

۹. پس از افزودن آب، مخلوط آب و روغن به یک قیف جداکننده منتقل و به مدت ۱۵ دقیقه در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

۱۰. سپس فاز آبی از روغن جدا شد و روغن در یک بالن با حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر منتقل و در پایان، رطوبت باقی‌مانده از روغن در خلاء ۶۶۰ میلی‌متر جیوه (mmHg) و در دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد حذف شد.

○ محاسبات حجمی

◀ حجم محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$V_1 = \frac{FFA \times W}{N \times 28/2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

(V_1): حجم محلول هیدروکسید سدیم موردنیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد بر حسب میلی‌لیتر، (FFA): درصد اسیدهای چرب آزاد روغن، (W): جرم نمونه روغن بر حسب گرم و (N): نرمالیت محلول هیدروکسید سدیم است.

◀ حجم محلول سود اضافی از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$V_2 = A \times V_1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

(V_2): حجم محلول سود اضافی بر حسب میلی‌لیتر، (A): ضریب سود اضافی (به‌صورت اعشاری) و (V_1): حجم محلول سود مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد بر حسب میلی‌لیتر است.

◀ حجم محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$V_3 = \frac{3000 \times M}{98 \times N} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن:

مقایسه با روغنی که تنها یک بار خنثی شده، کیفیت مطلوب‌تری دارد. در روغن‌هایی مانند روغن سویا و روغن کانولا که حاوی مقداری فسفاتید غیرهیدراته^{۲۵} هستند، می‌توان پیش از افزودن محلول هیدروکسید سدیم، مقدار مناسبی اسید فسفریک به روغن اضافه کرد. در پایان، شست‌وشوی روغن با آب می‌تواند به‌صورت یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای یا جریان مخالف انجام شود. انتخاب هر یک از این روش‌ها به شرایط اقتصادی و تجهیزات موجود در واحد تصفیه بستگی دارد.

توضیحات ارائه شده، مروری بر روش‌های مختلف تصفیه قلیایی یا خنثی‌سازی روغن‌های خام بود. در ادامه، خنثی‌سازی روغن تخم پنبه در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده و شرایط بهینه این فرآیند تعیین می‌شود [۶، ۷].

○ روش کار

تمامی آزمایش‌ها براساس یک روش ثابت انجام شدند و تنها متغیرهای فرآیند شامل غلظت و مقدار محلول هیدروکسید سدیم، مقدار کربنات سدیم، زمان اختلاط و دمای واکنش در هر آزمایش تغییر داده شد. در ادامه، روش کلی انجام آزمایش‌ها ارائه می‌شود.

۱. مقدار ۵۰۰ تا ۷۰۰ گرم روغن خام تخم پنبه با اسیدیته مشخص در یک بشر با حجم ۲۰۰۰ میلی‌لیتر توزین شد؛

۲. سپس ۰/۱۴ درصد اسید فسفریک ۸۵ درصد به روغن افزوده شد؛

۳. بشر حاوی روغن روی گرم‌کن حرارتی^{۲۶} قرار گرفت و نمونه با استفاده از هم‌زن مکانیکی و با سرعت ۴۵۰ دور در دقیقه هم‌زده شد تا دمای روغن به مقدار موردنظر (۷۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد) برسد. مدت زمان هم‌زدن در این مرحله به‌طور معمول حدود ۳۵ دقیقه بود.

۴. پس از رسیدن روغن به دمای موردنظر، مقدار محاسبه شده محلول هیدروکسید سدیم به آن افزوده شد.

* مقدار سود مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه شد:

مقدار سود مورد نیاز = سود لازم برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد + سود اضافی + سود لازم برای خنثی‌سازی اسید فسفریک افزوده شده.

۵. پس از افزودن محلول هیدروکسید سدیم، مخلوط به مدت زمان تعیین شده با استفاده از هم‌زن مکانیکی و با سرعت ۱۱۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شد.

۶. سپس مخلوط روغن و صابون حاصل در سانتی‌فیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۸ دقیقه قرار گرفت. پس از پایان سانتی‌فیوژ، فاز روغنی به یک بشر با حجم ۲۰۰۰ میلی‌لیتر منتقل شد.

که در آن:

(gr_3) : جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک بر حسب گرم و (M) : جرم اسید فسفریک افزوده شده به روغن بر حسب گرم است.

◀ جرم کل هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی روغن از رابطه (۸) محاسبه شد:

$$gr = gr_1 + gr_2 + gr_3 \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن:

(gr) : جرم کل هیدروکسید سدیم مورد نیاز بر حسب گرم، (gr_1) : جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد بر حسب گرم، (gr_2) : جرم هیدروکسید سدیم اضافی بر حسب گرم و (gr_3) : جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک بر حسب گرم است.

روش شرح داده شده در بخش قبل، مربوط به خنثی‌سازی یک مرحله‌ای بود. در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، محلول هیدروکسید سدیم در دو مرحله به روغن افزوده می‌شود. به این ترتیب، در مرحله چهارم، به جای افزودن کل مقدار محلول سود، تنها بخشی از مقدار محاسبه شده، متناسب با شرایط هر آزمایش، به روغن افزوده شد. سپس مراحل پنجم و ششم انجام گرفت و در ادامه، باقیمانده محلول سود به روغن اضافه شد. پس از آن، مراحل پنجم تا پایان فرآیند بار دیگر تکرار شد.

بر این اساس، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روغن خام تخم پنبه با هدف تعیین شرایط بهینه خنثی‌سازی انجام شد. در این آزمایش‌ها، اثر مقدار سود اضافی، انجام خنثی‌سازی به صورت یک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای، دمای افزودن محلول سود، زمان هم‌زدن پس از افزودن محلول سود و همچنین استفاده از کربنات سدیم بررسی شد. نتایج این آزمایش‌ها در ادامه ارائه و تحلیل شده‌است [۵، ۶ و ۸].

نتایج

(الف) - بررسی تأثیر مقدار سود اضافی در خنثی‌سازی یک مرحله‌ای

به منظور بررسی تأثیر مقدار سود اضافی بر فرآیند خنثی‌سازی یک مرحله‌ای، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در شرایط یکسان انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، تنها مقدار سود اضافی به عنوان متغیر تغییر داده شد و سایر شرایط ثابت نگه داشته شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌است.

(V_3) : حجم محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک بر حسب میلی‌لیتر، (M) : جرم اسید فسفریک افزوده شده به روغن بر حسب گرم و (N) : نرمالیت محلول هیدروکسید سدیم است.

◀ حجم کل محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی روغن از رابطه (۴) محاسبه شد:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن:

(V_3) : حجم کل محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز بر حسب میلی‌لیتر، (V_1) : حجم محلول سود مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد، (V_2) : حجم محلول سود اضافی بر حسب میلی‌لیتر و (V_3) : حجم محلول سود مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک افزوده شده بر حسب میلی‌لیتر است.

محاسبات وزنی

◀ جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$gr_1 = \frac{FFA \times W}{705} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن:

(gr_1) : جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد بر حسب گرم، (W) : جرم نمونه روغن بر حسب گرم و (FAA) : درصد اسیدهای چرب آزاد است.

◀ جرم هیدروکسید سدیم اضافی از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$gr_2 = A \times gr_1 \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن:

(gr_2) : جرم هیدروکسید سدیم اضافی بر حسب گرم، (A) : ضریب سود اضافی (به صورت اعشاری) و (gr_1) : جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسیدهای چرب آزاد بر حسب گرم است.

◀ جرم هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای خنثی‌سازی اسید فسفریک از رابطه (۷) محاسبه شد:

$$gr_3 = M \times 1.44 \quad \text{رابطه (۷)}$$

جدول (۱): نتایج خنثی‌سازی یک مرحله‌ای با مقادیر مختلف سود اضافی.

ردیف	درصد سود اضافی	نرمالیت سود	اسیدیته پس از خنثی‌سازی	صابون پس از خنثی‌سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
۱	۷۵ درصد	۴	۰/۰۳۵ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+7}/V_R	۱۰ درصد
۲	۱۰۰ درصد	۴	۰/۰۳۵ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+5}/V_R	۱۰/۱ درصد
۳	۱۲۵ درصد	۴	۰/۰۳۵ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+4}/V_R	۱۰/۲ درصد
۴	۱۳۵ درصد	۴	۰/۰۳ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+4}/V_R	۱۰/۸ درصد
۵	۱۵۰ درصد	۴	۰/۰۳ درصد	۵۱ ppm	V_{Y+4}/V_R	۱۱ درصد

* اسیدیته روغن خام ۲ درصد، دمای افزودن محلول هیدروکسید سدیم ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان هم‌زدن ۳ دقیقه بود.

* در تمامی جدول‌های این مقاله، رنگ روغن با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج PFX990 اندازه‌گیری شد.

درصد سود اضافی به‌عنوان مقدار بهینه در شرایط این آزمایش انتخاب شد.

(ب)- بررسی تأثیر کربنات سدیم در خنثی‌سازی یک مرحله‌ای

به‌منظور بررسی تأثیر کربنات سدیم بر فرآیند خنثی‌سازی یک مرحله‌ای، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در شرایط یکسان انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، تنها مقدار سود اضافی و کربنات سدیم افزوده شده به‌عنوان متغیرهای آزمایش تغییر داده شد و سایر شرایط ثابت نگه داشته شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌است.

با توجه به نتایج جدول (۱)، با افزایش مقدار سود مصرفی، رنگ روغن پس از خنثی‌سازی کاهش می‌یابد. با این حال، پس از رسیدن مقدار سود اضافی به ۱۳۵ درصد، افزایش بیشتر آن تأثیر محسوسی بر کاهش رنگ روغن ندارد. به‌طوری‌که افزایش سود اضافی از ۱۳۵ درصد به ۱۵۰ درصد تنها تغییر ناچیزی در رنگ روغن پس از خنثی‌سازی ایجاد می‌کند. از نظر افت تصفیه نیز، اختلاف قابل توجهی بین نمونه‌ها مشاهده نشد و مقدار افت تصفیه در تمامی آزمایش‌ها در محدوده ۱۰ تا ۱۱ درصد قرار داشت. بنابراین، با توجه به بهبود رنگ روغن و ثابت ماندن افت تصفیه، ۱۳۵

جدول (۲): نتایج خنثی‌سازی یک مرحله‌ای با مقادیر مختلف سود و کربنات سدیم اضافی.

ردیف	درصد سود اضافی	درصد کربنات سدیم اضافی	نرمالیت سود	اسیدیته پس از خنثی‌سازی	صابون پس از خنثی‌سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
۱	-	۱۲۰ درصد	۴	۰/۰۳ درصد	۴۸ ppm	V_{Y+9}/V_R	۹ درصد
۲	۲۲ درصد	۶۰ درصد	۴	۰/۰۳۵ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+9}/V_R	۹/۳ درصد
۳	۷۵ درصد	۶۰ درصد	۴	۰/۰۳۵ درصد	۴۵ ppm	V_{Y+8}/V_R	۹/۵ درصد
۴	۱۰۰ درصد	۵۰ درصد	۴	۰/۰۳ درصد	۵۱ ppm	V_{Y+5}/V_R	۹/۷ درصد
۵	۱۳۵ درصد	۳۵ درصد	۴	۰/۰۳ درصد	۴۸ ppm	V_{Y+4}/V_R	۱۰ درصد

* اسیدیته روغن خام ۲ درصد، دمای افزودن محلول هیدروکسید سدیم ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان هم‌زدن ۳ دقیقه بود.

در هر دو آزمایش، در مرحله نخست، محلول هیدروکسید سدیم تنها به مقدار استوکیومتری افزوده شد؛ بنابراین، در این مرحله سود اضافی استفاده نشد. سپس، در مرحله دوم، در آزمایش ردیف (۱) مقدار ۷۵ درصد و در آزمایش ردیف (۲) مقدار ۱۳۵ درصد سود اضافی به روغن افزوده شد. نتایج نشان داد که افزایش سود اضافی در مرحله دوم از ۷۵ درصد به ۱۳۵ درصد، موجب کاهش قابل توجه رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی شد.

این روند در آزمایش‌های ردیف‌های (۴) و (۶) جدول (۳) نیز مشاهده شد. در هر دو آزمایش، در مرحله نخست از ۲۰ درصد سود اضافی استفاده شد، اما در مرحله دوم، مقدار سود اضافی در ردیف (۴) برابر ۱۱۵ درصد (مجموع سود اضافی ۱۳۵ درصد) و در ردیف (۶) برابر ۱۰۰ درصد (مجموع سود اضافی ۱۲۰ درصد) بود. مقایسه نتایج نشان داد که در ردیف (۴)، که مقدار کل سود اضافی بیشتر بود، رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی کمتر از ردیف (۶) بود. از سوی دیگر، مقایسه نتایج ردیف‌های (۴) و (۵) جدول (۳) نشان داد که افزایش مجموع سود اضافی از ۱۳۵ درصد به ۱۵۰ درصد تأثیر محسوسی بر کاهش رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی نداشت. بنابراین، در شرایط این آزمایش‌ها، استفاده از ۱۳۵ درصد سود اضافی را می‌توان مقدار بهینه برای کاهش رنگ قرمز در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای در نظر گرفت.

در ادامه، تأثیر مقدار سود اضافی در مرحله نخست خنثی‌سازی دو مرحله‌ای بررسی شد. با افزایش سود اضافی

با توجه به یکسان بودن شرایط آزمایش در جدول‌های (۱) و (۲)، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کربنات سدیم تأثیر قابل توجهی بر کاهش رنگ روغن پس از خنثی‌سازی ندارد؛ به طوری که با استفاده از ۱۲۰ درصد کربنات سدیم اضافی (ردیف (۱) جدول (۲))، مقدار رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی ۹/۲ به‌دست آمد، در حالی که با استفاده از ۱۲۵ درصد سود اضافی (ردیف (۳) جدول (۱))، مقدار رنگ قرمز به ۴/۷ کاهش یافت. همچنین، نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که افزایش مقدار سود اضافی در کاهش رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی مؤثر است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار سود اضافی، مقدار رنگ قرمز روغن کاهش می‌یابد. با وجود این، همان‌گونه که در ادامه مقاله نشان داده خواهد شد، استفاده از کربنات سدیم موجب کاهش افت تصفیه می‌شود و از این نظر، می‌تواند بر عملکرد فرآیند خنثی‌سازی تأثیر مثبتی داشته باشد.

(ج) - بررسی خنثی‌سازی دو مرحله‌ای

در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، مقدار سود اضافی همچنان یکی از عوامل مهم فرآیند است. علاوه بر آن، سهم سود افزوده شده در مرحله نخست نیز بر نتایج خنثی‌سازی تأثیرگذار است؛ از این رو، هر دو عامل در این بخش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این بررسی‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌است. به‌منظور بررسی خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، ابتدا مقدار بهینه سود اضافی تعیین شد. برای این منظور، آزمایش‌های ردیف‌های (۱) و (۲) جدول (۳) انجام گرفت.

جدول (۳): نتایج خنثی‌سازی دو مرحله‌ای در شرایط مختلف فرآیند.

ردیف	درصد سود اضافی		بومه محلول سود	دمای افزودن محلول سود		زمان هم‌زدن		اسیدیته پس از خنثی‌سازی	صابون پس از خنثی‌سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
	مرحله اول	مرحله دوم		مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم				
۱	-	۷۵	۲۰	۸۰	۸۰	۲	۲	۰/۰۳۵ درصد	۹۰ ppm	$Y + 7/6_R$	۱۶
۲	-	۱۳۵	۲۰	۸۰	۸۰	۲	۲	۰/۰۳ درصد	۹۰ ppm	$Y + 4/2_R$	۱۶/۶
۳	۵	۱۳۰	۲۸	۸۵	۸۵	۳	۳	۰/۰۲۵ درصد	۳۰ ppm	$Y + 4/4_R$	۳۶/۷
۴	۲۰	۱۱۵	۲۸	۸۵	۸۵	۳	۳	۰/۰۲۵ درصد	۶۰ ppm	$Y + 3_R$	۳۰
۵	۳۰	۱۲۰	۲۸	۸۵	۸۵	۳	۳	۰/۰۲۵ درصد	۳۰ ppm	$Y + 3/3_R$	۲۶/۵
۶	۲۰	۱۰۰	۲۸	۸۵	۸۵	۳	۳	۰/۰۲۵ درصد	۳۰ ppm	$Y + 4/1_R$	۲۸/۳

* اسیدیته اولیه روغن خام ۲ درصد بود.

مرحله نخست از صفر به ۳۰ درصد (ردیف‌های (۲) تا (۵) جدول (۳))، تغییر محسوسی در رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی مشاهده شد. در ردیف‌های (۲) و (۳)، که به ترتیب از صفر و ۵ درصد سود اضافی در مرحله نخست استفاده شده بود، مقدار رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی حدود ۴/۳ بود. در مقابل، در ردیف‌های (۴) و (۵)، که مقدار سود اضافی مرحله نخست به ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش یافت، مقدار رنگ قرمز به ترتیب به ۳ و ۳/۳ کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش سود اضافی در مرحله نخست تا حدود ۲۰ درصد، موجب بهبود رنگ روغن پس از خنثی‌سازی می‌شود، اما افزایش آن به ۳۰ درصد بهبود قابل توجهی نسبت به ۲۰ درصد ایجاد نمی‌کند. بنابراین، در شرایط این آزمایش‌ها، استفاده از ۲۰ درصد سود اضافی در مرحله نخست و ۱۳۵ درصد سود اضافی کل به عنوان شرایط بهینه خنثی‌سازی دو مرحله‌ای انتخاب شد.

(د) - بررسی تاثیر افزایش کربنات سدیم در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای

به منظور بررسی تأثیر کربنات سدیم بر فرآیند خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در شرایط مختلف انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

همان‌گونه که در ردیف (۱) جدول (۴) مشاهده می‌شود، مجموع سود اضافی مصرف شده در دو مرحله برابر ۸۰ درصد و مقدار کربنات سدیم اضافی ۵۵ درصد

است؛ بنابراین، مجموع سود و کربنات سدیم اضافی به ۱۳۵ درصد (جمع مستقیم مقادیر) می‌رسد. در این شرایط، مقدار رنگ قرمز روغن پس از خنثی‌سازی برابر ۶ اندازه‌گیری شد. در مقابل، در ردیف (۴) جدول (۴)، با استفاده از ۱۳۵ درصد سود اضافی و بدون استفاده از کربنات سدیم، مقدار رنگ قرمز پس از خنثی‌سازی ۳ به دست آمد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که کربنات سدیم در کاهش رنگ قرمز روغن، به اندازه سود مؤثر نیست. با این حال، درصد افت تصفیه در آزمایشی که تنها از سود استفاده شد (ردیف (۴) جدول (۴))، بیشتر از آزمایشی بود که در آن از سود و کربنات سدیم به طور هم‌زمان استفاده شد (ردیف (۱) جدول (۴)). این نتایج بیانگر آن است که استفاده از کربنات سدیم می‌تواند در کاهش افت تصفیه مؤثر باشد. همچنین، نتایج آزمایش‌های ردیف‌های (۲) و (۳) جدول (۴) نیز این مشاهده را تأیید می‌کند. همچنین، در آزمایش ردیف (۳) جدول (۴)، کربنات سدیم در هر دو مرحله خنثی‌سازی به کار گرفته شد که در پایان فرآیند، مقدار رنگ قرمز برابر ۳/۶ به دست آمد. در مقابل، در آزمایش ردیف (۲)، کربنات سدیم تنها در مرحله دوم خنثی‌سازی استفاده شد و مقدار رنگ قرمز پس از خنثی‌سازی به ۳/۲ رسید. این نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به رنگ قرمز کمتر، همراه با افت تصفیه پایین‌تر، استفاده از کربنات سدیم تنها در مرحله دوم خنثی‌سازی مناسب‌تر است. نتایج بررسی‌های بعدی نیز این یافته را تأیید می‌کند.

جدول (۴): نتایج خنثی‌سازی دو مرحله‌ای با مقادیر مختلف کربنات سدیم اضافی.

ردیف	درصد سود اضافی		بومه محلول سود	درصد کربنات سدیم اضافی		اسیدیته بعد از خنثی‌سازی	صابون باقی مانده پس از خنثی‌سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
	مرحله اول	مرحله دوم		مرحله اول	مرحله دوم				
۱	۲۰	۶۰	۲۸	-	۵۵	۰/۰۳ درصد	۳۰ ppm	$70_Y + 6_R$	۲۵
۲	۲۰	۱۱۵	۲۸	-	۵۰	۰/۰۲۵ درصد	۳۰ ppm	$70_Y + 3/2_R$	۲۵
۳	۲۰	۱۱۵	۲۸	۳۰	۳۰	۰/۰۲۵ درصد	۱۵ ppm	$70_Y + 3/6_R$	۲۴
۴	۲۰	۱۱۵	۲۸	-	-	۰/۰۲۵ درصد	۶۰ ppm	$70_Y + 3_R$	۳۰

* اسیدیته روغن خام ۲ درصد، دمای افزودن محلول سود در هر دو مرحله ۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان هم‌زدن در هر مرحله ۳ دقیقه بوده است.

(هـ) - بررسی تأثیر غلظت (درجه بومه) محلول سود در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای

در آزمایش‌های بعدی، از محلول سود ۲۰ بومه که با افزودن کربنات سدیم به ۲۸ بومه رسانده شده بود، استفاده شد. بنابراین، در ادامه هر جا از محلول ۲۸ بومه نام برده شده‌است، منظور همان محلول سود ۲۰ بومه است که با افزودن کربنات سدیم به ۲۸ بومه رسیده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده با استفاده از این محلول در جدول

(۵) ارائه شده‌است.

هدف از این آزمایش تأثیر بوه سود مصرفی در فرآیند خنثی‌سازی می‌باشد. آزمایش‌های ردیف‌های (۱) و (۲) جدول (۵)، تأثیر مقدار سود اضافی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شرایط دو آزمایش یکسان بوده و تنها مقدار سود اضافی مصرفی در آن‌ها متفاوت است. در هر دو آزمایش، مقدار سود اضافی در مرحله نخست خنثی‌سازی ۲۵ درصد بود؛ اما در مرحله دوم، این مقدار در آزمایش ردیف (۱) برابر

جدول (۵): نتایج خنثی‌سازی دو مرحله‌ای با استفاده از محلول سود ۲۸ بومه.

ردیف	درصد سود اضافی		بومه محلول سود		دمای افزودن محلول سود		اسیدیت پس از خنثی‌سازی	صابون باقی‌مانده پس از خنثی‌سازی	رنگ (سل ۱ اینچی)	درصد افت تصفیه
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم				
۱	۲۵	۱۱۵	۲۰	محلول سود ۲۸ بومه	۷۵	۷۰	۰/۰۲۵ درصد	۳۰ ppm	Y_{+3}/R	۱۶
۲	۲۵	۲۰	۲۰	محلول سود ۲۸ بومه	۷۵	۷۰	۰/۰۳۵ درصد	۹۰ ppm	Y_{+9}/R	۱۳
۳	۲۵	۱۱۵	محلول سود ۲۸ بومه	محلول سود ۲۸ بومه	۷۵	۷۰	۰/۰۳ درصد	۳۰ ppm	Y_{+4}/R	۱۵/۳

* اسیدیت روغن خام ۲ درصد و زمان هم‌زدن در هر مرحله ۳ دقیقه بوده است.

(و) - بررسی تأثیر زمان در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای

در آزمایش‌های پیشین، زمان واکنش در هر مرحله ۳ دقیقه در نظر گرفته شده بود. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که درصد افت تصفیه به نسبت زیاد است. از این رو، آزمایش‌های دیگری با زمان واکنش ۱/۵ دقیقه در هر مرحله انجام شد تا تأثیر کاهش زمان واکنش بر فرآیند خنثی‌سازی بررسی شود. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۶) ارائه شده‌است.

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که زمان واکنش تأثیر قابل توجهی بر افت تصفیه دارد. در هر دو آزمایش، همه شرایط یکسان بود و تنها زمان واکنش (هم‌زدن) تفاوت داشت. در پایان خنثی‌سازی، رنگ روغن در هر دو آزمایش تقریباً یکسان بود؛ اما درصد افت تصفیه در آزمایشی با زمان واکنش کمتر (ردیف (۱) جدول (۶)) برابر ۱۳/۳ درصد و در آزمایشی با زمان واکنش بیشتر (ردیف (۲) جدول (۶)) برابر ۱۶ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش زمان واکنش، بدون ایجاد تغییر محسوس در رنگ روغن، موجب کاهش افت تصفیه می‌شود.

۱۱۵ درصد (مجموع سود اضافی ۱۴۰ درصد) و در آزمایش ردیف (۲) برابر ۲۰ درصد (مجموع سود اضافی ۴۵ درصد) در نظر گرفته شد. در پایان فرآیند خنثی‌سازی، مقدار رنگ قرمز به ترتیب ۳/۳ و ۹ به دست آمد. این نتایج نیز نشان می‌دهد که افزایش مقدار سود اضافی در کاهش رنگ قرمز مؤثر است. همچنین، مقایسه‌ای بین استفاده از محلول ۲۸ بومه در یک مرحله و هر دو مرحله خنثی‌سازی دو مرحله‌ای انجام شد. این مقایسه در آزمایش‌های ردیف‌های (۱) و (۳) جدول (۵) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شرایط دو آزمایش یکسان بود؛ با این تفاوت که در آزمایش ردیف (۱)، در مرحله نخست از سود ۲۰ بومه و در مرحله دوم از محلول سود ۲۸ بومه استفاده شد، در حالی که در آزمایش ردیف (۳)، محلول سود ۲۸ بومه در هر دو مرحله به کار رفت. در پایان فرآیند خنثی‌سازی، مقدار رنگ قرمز به ترتیب ۳/۳ و ۴/۴ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که برای کاهش بیشتر رنگ قرمز، استفاده از محلول سود ۲۸ بومه تنها در مرحله دوم خنثی‌سازی دو مرحله‌ای مناسب‌تر است.

جدول (۶): نتایج بررسی تأثیر زمان واکنش در خنثی سازی دو مرحله ای.

ردیف	درصد سود اضافی		درجه بومه محلول سود		زمان هم زدن		اسیدیت پس از خنثی سازی	صابون باقی مانده پس از خنثی سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم				
۱	۲۵	۱۱۵	۲۰	محلول ۲۸	۱/۵	۱/۵	درصد ۰/۰۲۵	۶۶ ppm	$۷۰_Y+۳/۵_R$	۱۳/۳
۲	۲۵	۲۰	۲۰	محلول ۲۸	۳	۳	درصد ۰/۰۲۵	۳۰ ppm	$۷۰_Y+۳/۳_R$	۱۶

* اسیدیت اولیه روغن خام ۲ درصد بود. دمای روغن هنگام افزودن سود در مرحله اول ۷۵ درجه سانتیگراد و در مرحله دوم ۷۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد.

(ز) - بررسی تأثیر استفاده از محلول سود ۲۸ بومه بر افت تصفیه

به منظور بررسی تأثیر استفاده از محلول سود ۲۸ بومه بر افت تصفیه، مجموعه ای از آزمایش ها در شرایط مختلف انجام شد. نتایج این بررسی ها در جدول (۷) ارائه شده است.

آزمایش های گزارش شده در جدول (۷) همگی در شرایط یکسان انجام شد و تنها در بومه محلول سود مصرفی با یکدیگر تفاوت داشتند. نتایج نشان می دهد که با استفاده از سود ۲۰ بومه در هر دو مرحله (ردیف (۱))، رنگ قرمز و درصد افت تصفیه به ترتیب برابر ۳/۱ و ۱۵ درصد بود. در حالتی که در مرحله نخست از سود ۲۰ بومه و در مرحله دوم از محلول سود ۲۸ بومه استفاده شد (ردیف (۲))، رنگ قرمز

به ۳/۵ و درصد افت تصفیه به ۱۳/۳ درصد رسید. همچنین، در آزمایش ردیف (۳) که در هر دو مرحله از محلول سود ۲۸ بومه استفاده شد، رنگ قرمز ۴/۷ و درصد افت تصفیه ۱۲/۴ درصد به دست آمد.

بنابراین، با افزایش میزان استفاده از محلول سود ۲۸ بومه، درصد افت تصفیه کاهش یافت، اما رنگ قرمز روغن افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، استفاده از سود ۲۰ بومه در هر دو مرحله (ردیف (۱) جدول (۷)) موجب رنگ قرمز کمتر، ولی افت تصفیه بیشتر شد؛ در حالی که استفاده از محلول سود ۲۸ بومه در هر دو مرحله (ردیف (۳) جدول (۷)) افت تصفیه را کاهش داد، اما رنگ قرمز بیشتری ایجاد کرد.

جدول (۷): نتایج بررسی تأثیر استفاده از محلول سود ۲۸ بومه بر افت تصفیه در خنثی سازی دو مرحله ای.

ردیف	درصد سود اضافی		بومه محلول سود		دما هنگام افزودن سود		اسیدیت پس از خنثی سازی	صابون باقی مانده پس از خنثی سازی	رنگ (سل یک اینچی)	درصد افت تصفیه
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله اول	مرحله دوم				
۱	۲۵	۱۱۵	۲۰	۲۰	۷۵	۷۰	درصد ۰/۰۳	۶۰ ppm	$۷۰_Y+۳/۱_R$	۱۵
۲	۲۵	۱۱۵	۲۰	محلول ۲۸	۷۵	۷۰	درصد ۰/۰۲۵	۹۰ ppm	$۷۰_Y+۳/۵_R$	۱۳/۳
۳	۲۵	۱۱۵	محلول ۲۸	محلول ۲۸	۷۵	۷۰	درصد ۰/۰۳۵	۳۰ ppm	$۷۰_Y+۴/۷_R$	۱۲/۴

* اسیدیت اولیه روغن خام ۲ درصد بود. زمان هم زدن در هر مرحله ۱/۵ دقیقه در نظر گرفته شد.

● روش بهینه خنثی‌سازی روغن خام تخم پنبه در شرایط آزمایشگاهی

براساس نتایج حاصل از این پژوهش، روش بهینه خنثی‌سازی روغن خام تخم پنبه در شرایط آزمایشگاهی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود. مشخصات روغن خام مورد استفاده و روغن حاصل از فرآیند خنثی‌سازی در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): مشخصات روغن خام و روغن پس از خنثی‌سازی به روش بهینه.

ویژگی	روغن خام	روغن پس از خنثی‌سازی
اسیدیته	۱/۷۵ درصد	۰/۰۳ درصد
رنگ (سل یک اینچی)	$70_Y + 20_R$	$70_Y + 3/4_R$
فسفاتید	۱/۱۱ درصد	-
صابون	-	۹۰ ppm
فسفر	-	۴/۴ ppm

ابتدا ۶۰۰ گرم روغن خام تخم پنبه را در یک بشر ۲۰۰۰ میلی‌لیتری ریخته و ۰/۱۴ درصد (۰/۵ میلی‌لیتر) اسید فسفریک ۸۵ درصد به آن اضافه می‌کنیم. سپس بشر را روی گرم‌کن حرارتی قرار داده و با استفاده از هم‌زن مکانیکی با سرعت ۴۵۰ دور در دقیقه، روغن را هم می‌زنیم تا دمای آن به ۷۵ درجه سانتی‌گراد برسد. برای دستیابی به این دما، حرارت گرم‌کن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که روغن طی ۳۰ تا ۴۰ دقیقه به دمای مورد نظر برسد. در مرحله بعد، ۲/۷۵ گرم سود (معادل ۲۵ درصد بیش از مقدار استوکیومتری) را در ۱۵/۷ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرده و محلول سود ۲۰ بومه را تهیه

می‌کنیم. سپس این محلول را به روغن افزوده و سرعت هم‌زن را به ۱۱۰۰ دور در دقیقه افزایش می‌دهیم. مخلوط حاصل به مدت ۱/۵ دقیقه هم زده می‌شود.

سپس مخلوط روغن و صابون حاصل را به مدت ۸ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار می‌دهیم. در مرحله بعد، فاز روغنی را جدا کرده و به یک بشر ۲۰۰۰ میلی‌لیتری منتقل می‌کنیم. سپس روغن را تا دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرده و ۱۰ میلی‌لیتر محلول سود ۲۸ بومه (سود ۲۰ بومه که با کربنات سدیم به ۲۸ بومه رسیده است) به آن اضافه می‌کنیم. مخلوط حاصل را با هم‌زن مکانیکی و با سرعت ۱۱۰۰ دور در دقیقه، به مدت ۱/۵ دقیقه هم می‌زنیم. در این مرحله، مقدار سود اضافی ۱۱۵ درصد است که با احتساب مرحله نخست، مجموع سود اضافی به ۱۳۵ درصد می‌رسد.

مخلوط حاصل را به مدت ۸ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار می‌دهیم. سپس فاز روغنی را جدا کرده و روغن را تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌کنیم. در ادامه، ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به آن افزوده و مخلوط را به مدت ۳۰ ثانیه با هم‌زن مکانیکی و با دور آهسته (۱۵۰ دور در دقیقه) هم می‌زنیم. سپس مخلوط آب و روغن را به دکاناتور منتقل کرده و به مدت ۱۵ دقیقه در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهیم تا فازهای آب و روغن از یکدیگر جدا شوند. در پایان، آب را از روغن جدا کرده و روغن حاصل را در خلاء ۶۶۰ میلی‌متر جیوه (mmHg) و در دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک کرده و سپس توزین می‌کنیم.

* لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها، به استثنای آزمایش مربوط به روش بهینه، از یک نمونه روغن خام تخم پنبه استفاده شد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش، در صورتی که هدف از خنثی‌سازی، کاهش اسیدیته روغن با حداقل افت تصفیه و بدون در نظر گرفتن رنگ نهایی باشد، انجام خنثی‌سازی یک مرحله‌ای مناسب‌تر است. در مقابل، اگر هدف دستیابی به رنگ قرمز کمتر در پایان فرآیند خنثی‌سازی باشد، استفاده از روش خنثی‌سازی دو مرحله‌ای توصیه می‌شود. در خنثی‌سازی دو مرحله‌ای، به‌منظور دستیابی به نتایج مطلوب، رعایت شرایط زیر پیشنهاد می‌شود:

- ♦ در مرحله نخست از سود ۲۰ بومه و در مرحله دوم از محلول سود ۲۸ بومه استفاده شود؛
- ♦ مجموع سود اضافی ۱۳۵ درصد در نظر گرفته شود؛
- ♦ مقدار سود اضافی در مرحله نخست ۲۵ درصد باشد؛
- ♦ دمای فرآیند در مرحله نخست ۷۵ و در مرحله دوم ۷۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شود؛
- ♦ زمان هم‌زدن روغن با سود در هر مرحله ۱/۵ دقیقه باشد.

پی‌نوشت

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 1. Baumé, Bé° | 14. Dewaxing |
| 2. Chlorophyll | 15. Winterization |
| 3. Xanthophyll | 16. Stearin |
| 4. Gossypol | 17. Carotenoids |
| 5. Pigments | 18. Batch |
| 6. Sterols | 19. Continuous |
| 7. Free Fatty Acids (FFA) | 20. Batch Neutralization |
| 8. Tocopherols | 21. Paddle Agitator |
| 9. Degumming | 22. Dry Batch Neutralization |
| 10. Neutralization | 23. Wet Batch Neutralization |
| 11. Bleaching | 24. Continuous Neutralization |
| 12. Hydrogenation | 25. Non-Hydratable Phosphatides (NHP) |
| 13. Deodorization | 26. Hot Plate |

مراجع

- [1] O'Brien, R. D. Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications. CRC Press.
- [2] Hamm, W., Hamilton, R. J., Calliauw, G. Edible Oil Processing. Wiley-Blackwell.
- [3] Gunstone, F. D., Harwood, J. L., Dijkstra, A. J. The Lipid Handbook. CRC Press.
- [4] Cherry, J. P., Leffler, T. P. Cottonseed Oil. In: Bailey's Industrial Oil and Fat Products. Wiley.
- [5] Shahidi, F. Bailey's Industrial Oil and Fat Products. Wiley.
- [6] Patterson, H. B. W. Handling and Storage of Oils and Fats. Elsevier.
- [7] Lawson, H. Food Oils and Fats: Technology, Utilization and Nutrition. Chapman & Hall.
- [8] Erickson, D. R. Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press.
- [9] Thomas, A. Fats and Fatty Oils. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- [10] Hui, Y. H. Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Vol. 4. Wiley.

نویسنده

عبدالرسول ارومیه‌ای^{۱*}۱. رئیس هیئت مدیره و مدیرعامل شرکت
خاتم پلیمر، تهران، ایران

*oromia2000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

واژه‌های کلیدی

نانوپلاستیک و میکروپلاستیک، آلاینده‌های زیست‌محیطی، ترکیبات شیمیایی، راهکارهای پیشگیری، مقررات بین‌المللی، مهاجرت، روش آزمون.

مروری بر میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در بسته‌بندی‌های غذایی: ساختار، پیامدهای زیست‌محیطی، روش‌های آزمون و مقررات بین‌المللی

چکیده

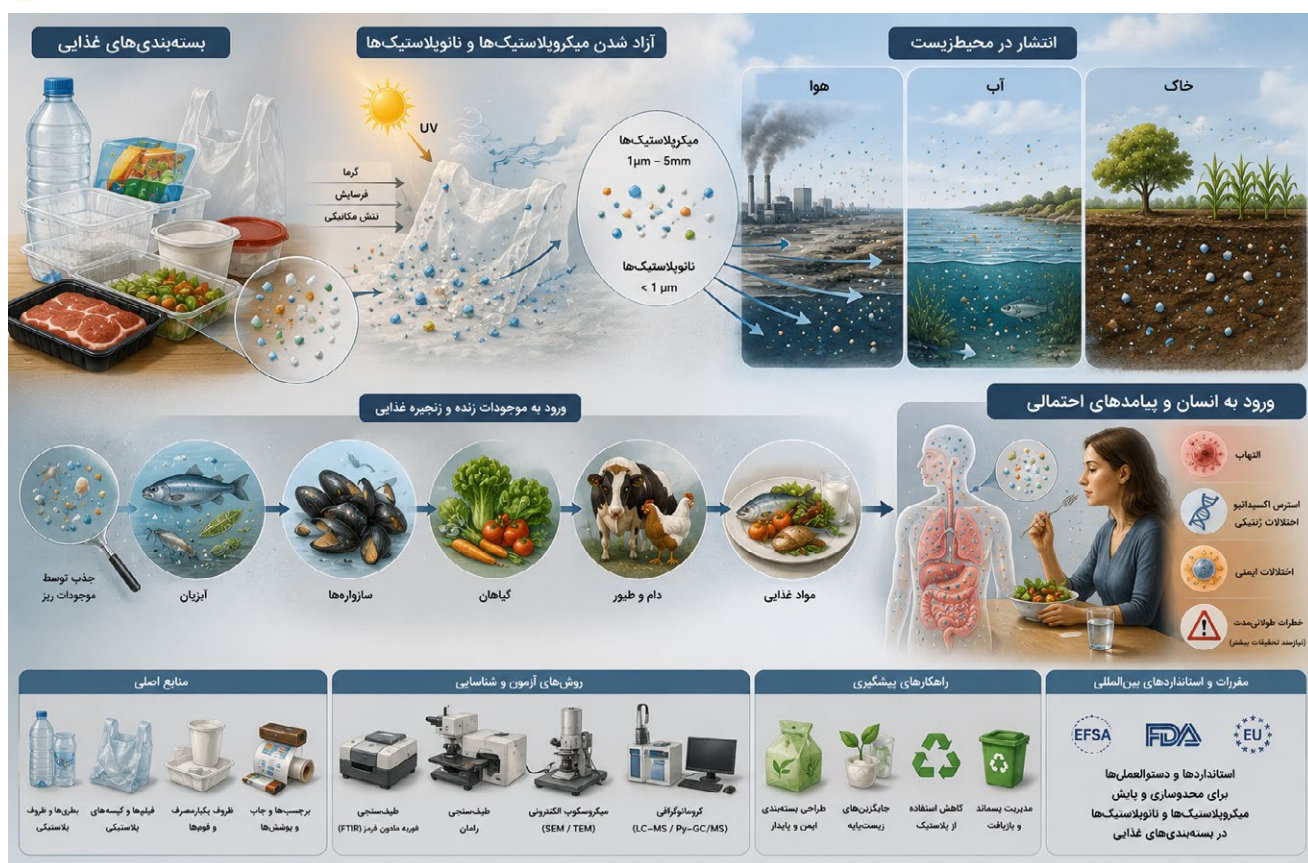
میکروپلاستیک‌ها^۱ و نانوپلاستیک‌ها^۲ از آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند که در اثر تجزیه ماکروپلاستیک‌ها^۳، یعنی پلیمرهای آلی با جرم مولکولی بالا، ایجاد می‌شوند. این آلاینده‌ها در محیط‌های خشکی، آبی و جو پراکنده هستند و به دلیل پیامدهای احتمالی برای سلامت انسان، امنیت غذایی و سایر موجودات زنده، به یکی از نگرانی‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند. میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از نظر اندازه، شکل، رنگ و ترکیب شیمیایی تنوع زیادی دارند و ممکن است از انواع مختلف پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی موجود در محصولات پلیمری منشأ گرفته باشند. همچنین، میکروالیاف منسوجات و محصولات آرایشی و بهداشتی نیز از منابع مهم انتشار این آلاینده‌ها به‌شمار می‌روند.

در مجموع، میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ممکن است در بسیاری از محصولات پلاستیکی وجود داشته باشند و به‌طور عمده در اثر تجزیه، سایش یا آسیب‌دیدگی این محصولات ایجاد شوند. با توجه به گسترش استفاده از پلاستیک در زندگی روزمره، شناخت منابع تولید این آلاینده‌ها و تلاش برای کاهش انتشار آن‌ها در محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ممکن است در مواد غذایی نیز وجود داشته باشند؛ به‌ویژه هنگامی که محیط محل تولید، کشت یا پرورش این محصولات به ذرات پلاستیکی آلوده باشد. همچنین، انسان می‌تواند از طریق استنشاق هوا، مصرف مواد غذایی و تماس پوستی ناشی از استفاده از محصولات مراقبت شخصی، در معرض میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها قرار گیرد.

از این رو، انتقال میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با غذا به ماده غذایی، از موضوعات مهم در ایمنی مواد غذایی به‌شمار می‌رود. به همین دلیل، اتحادیه اروپا و سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا مقرراتی را برای کنترل و پیشگیری از این آلاینده‌ها تدوین کرده‌اند. در این مقاله، راهکارهای پیشگیری، مقررات بین‌المللی و روش‌های آزمون مرتبط با میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها بررسی می‌شوند.

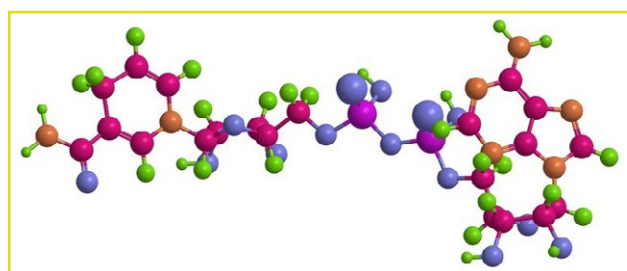
پلاستیک‌ها در طیف گسترده‌ای از محصولات مصرفی و صنعتی، از جمله اسباب‌بازی‌ها، لوازم خانگی، محصولات آرایشی، تجهیزات پزشکی، قطعات خودرو، منسوجات، بسته‌بندی‌ها و مصالح ساختمانی، کاربرد دارند. تنها بخش محدودی از پسماندهای پلاستیکی بازیافت یا سوزانده می‌شوند و بخش عمده آن‌ها در محل‌های دفن پسماند یا محیط‌زیست انباشته می‌شوند. آلودگی پلاستیکی در محیط‌های مختلف، از خشکی و رودخانه‌ها تا آب‌های داخلی، سواحل و اقیانوس‌ها، مشاهده می‌شود. بیشتر پلاستیک‌ها زیست‌تخریب‌پذیر نیستند و در نتیجه، به مرور زمان و در اثر عوامل محیطی، به ذرات کوچک‌تری به نام میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها تجزیه می‌شوند.

میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از آلاینده‌های نوظهور زیست‌محیطی به شمار می‌روند. این ذرات به دلیل پراکندگی گسترده و افزایش مداوم حضور در محیط‌زیست، نه تنها تهدیدی برای بوم‌سامانه‌ها محسوب می‌شوند، بلکه ممکن است پیامدهای نامطلوبی نیز برای سلامت انسان داشته باشند. به‌ویژه، نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره آزادسازی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌های ثانویه در اثر تجزیه و تخریب محصولات پلاستیکی مصرفی وجود دارد [۱]. میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها می‌توانند از طریق استنشاق هوا، مصرف مواد غذایی و تماس پوستی به دلیل استفاده از محصولات آرایشی و بهداشتی به انسان منتقل شوند [۲ و ۳].



عمده به‌صورت سنتزی تولید می‌شوند و بخش عمده آن‌ها از مواد اولیه پتروشیمی به‌دست می‌آیند.

رابطه بین ماکروپلاستیک‌ها، میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها



شکل (۱): مدل سه‌بعدی یک ماکرومولکول پلیمری [۱].

ماکروپلاستیک‌ها به‌صورت معمول پلیمرهای آلی با جرم مولکولی بالا هستند که از زنجیره‌های اتم‌های کربن، همراه یا بدون حضور اتم‌های اکسیژن، نیتروژن یا گوگرد، تشکیل شده‌اند. با این حال، این مواد به‌طور معمول حاوی ترکیبات دیگری نیز هستند که برای بهبود ویژگی‌های آن‌ها به فرمولاسیون پلاستیک افزوده می‌شوند. پلاستیک‌ها به‌طور

پلاستیکی و بررسی تغییرات آن در گذر زمان، برای ارزیابی وضعیت آلودگی و مدیریت آن ضروری است.



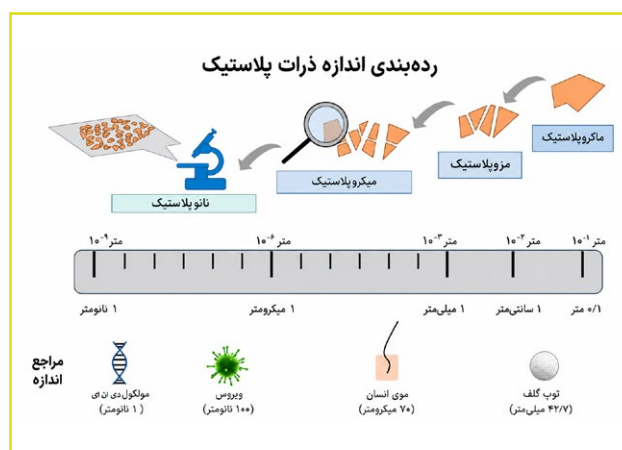
شکل (۳): منابع تولید میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه [۳].

ترکیب شیمیایی پلاستیک‌ها

پلاستیک‌ها، مواد سازنده اصلی ماکروپلاستیک‌ها هستند. این مواد در اثر واکنش‌های پلیمریزاسیون^۸ میان واحدهای سازنده‌ای به نام مونومر تشکیل می‌شوند. میکرو و نانوپلاستیک‌ها اجزای ریزتر ماکرومولکول‌ها هستند. پلیمرها ممکن است از یک نوع مونومر تشکیل شده باشند که در این صورت هموپلیمر^۹ نامیده می‌شوند، یا از دو یا چند نوع مونومر تشکیل شوند که به آن‌ها کوپلیمر^{۱۰} گفته می‌شود. رایج‌ترین پلیمرهای تجاری مورد استفاده در تولید لوازم خانگی، بسته‌بندی مواد غذایی، فرآورده‌های دارویی، محصولات آرایشی و بهداشتی، تجهیزات پزشکی و تجهیزات صنعتی عبارتند از: پلی‌پروپیلن^{۱۱}، پلی‌اتیلن^{۱۲}، پلی‌اتیلن ترفتالات^{۱۳} که با عنوان پلی‌استر نیز شناخته می‌شود، پلی‌استایرن^{۱۴}، پلی‌وینیل کلرید^{۱۵}، پلی‌کربنات^{۱۶}، رزین اپوکسی^{۱۷}، آکریلونیتریل-بوتادین-استایرن^{۱۸}، پلی‌آمیدها^{۱۹} که با نام نایلون نیز شناخته می‌شوند، پلی‌وینیلیدن کلرید^{۲۰} با نام تجاری ساران^{۲۱}، پلی‌متیل متاکریلات^{۲۲}، پلی‌آریل سولفون^{۲۳}، پلی‌آکریلونیتریل^{۲۴}، پلی‌وینیل الکل^{۲۵} و پلی‌تترافلوئورواتیلن^{۲۶} که با نام تجاری تفلون شناخته می‌شود. این پلیمرها به دلیل جرم مولکولی بالا، به‌طور کلی مواد شیمیایی به نسبت خنثی به شمار می‌روند و در شرایط معمول، سمیت ذاتی قابل توجهی ندارند.

با این حال، ممکن است مقادیر ناچیزی از مونومرها، حلال‌ها و افزودنی‌هایی مانند پایدارکننده‌ها، آنتی اکسیدان‌ها، نرم کننده‌ها، پرکننده‌ها و رنگ دانه‌ها که در فرآیند پلیمریزاسیون به‌طور کامل مصرف یا حذف نشده‌اند، در محصول نهایی باقی

پلاستیک‌ها، برخلاف موادی مانند مواد غذایی و کاغذ، به سادگی زیست‌تخریب‌پذیر نیستند. این مواد در اثر عوامل محیطی، به تدریج به قطعات کوچک‌تر خرد می‌شوند. هنگامی که اندازه این ذرات به کمتر از ۵ میلی‌متر برسد، میکروپلاستیک نامیده می‌شوند. ذراتی که اندازه آن‌ها کمتر از یک میکرومتر باشد نیز نانوپلاستیک نام دارند. نانوپلاستیک‌ها در مقایسه با میکروپلاستیک‌ها، به دلیل فراوانی بیشتر، اندازه کوچک‌تر و واکنش‌پذیری بالاتر موجب می‌شوند که بتوانند به نقاط دور دست منتقل شوند و قابلیت نفوذ به سلول‌های زنده را نیز داشته باشند. در این مقاله، نانوپلاستیک‌ها از نظر منشأ تشکیل، اندازه، واکنش‌پذیری، تحرک، رفتار زیست‌محیطی و برهم‌کنش با میکروارگانیسم‌ها، آلاینده‌ها و مواد آلی طبیعی، با میکروپلاستیک‌ها و نانوذرات مهندسی‌شده^۵ مقایسه می‌شوند [۴ و ۵].



شکل (۲): طبقه‌بندی ذرات پلاستیکی براساس اندازه و روند تبدیل ماکروپلاستیک به نانوپلاستیک [۴ و ۵].

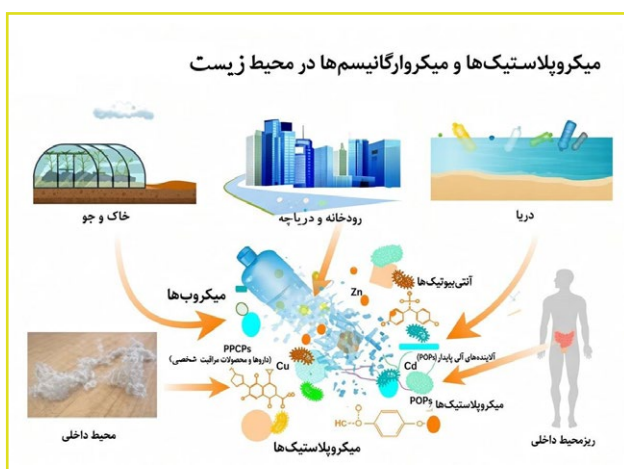
دسته‌بندی میکروپلاستیک‌ها

● **میکروپلاستیک‌های اولیه^۶:** ذرات بسیار ریزی هستند که به‌طور مستقیم برای کاربردهای تجاری تولید می‌شوند. از جمله این ذرات می‌توان به ریزدانه‌های پلاستیکی مورد استفاده در برخی محصولات آرایشی و بهداشتی و همچنین میکروالیاف جدا شده از پوشاک، منسوجات و تجهیزاتی مانند تورهای ماهیگیری اشاره کرد.

● **میکروپلاستیک‌های ثانویه^۷:** ذراتی هستند که در اثر تجزیه و خردشدگی اقلام پلاستیکی بزرگ‌تر، مانند بطری‌های آب، ایجاد می‌شوند. این فرآیند بر اثر قرار گرفتن پلاستیک در معرض عوامل محیطی، به‌ویژه تابش نور خورشید، تغییرات دمایی، امواج دریا و تنش‌های مکانیکی رخ می‌دهد [۶].

با توجه به اینکه قطعات پلاستیکی بزرگ‌تر موجود در محیط، به مرور زمان به ذرات کوچک‌تر تجزیه و خرد می‌شوند، پایش مستمر و مستندسازی همه سطوح آلودگی

میزان اجرا و الزامات قانونی این مقررات در کشورهای مختلف متفاوت است [۱۱]. پژوهش‌های سال‌های اخیر نشان داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها تنها در اقیانوس‌ها و محیط‌های آبی حضور ندارند، بلکه در هوای تنفسی، از جمله در گرد و غبار معمولی منازل نیز یافت می‌شوند. با وجود این، آثار بلندمدت قرار گرفتن در معرض این ذرات بر سلامت انسان هنوز به‌طور کامل شناخته نشده‌است. همچنین، میکروپلاستیک‌ها به مرور زمان می‌توانند آلاینده‌های آلی پایدار^{۲۷} موجود در محیط را جذب و بر سطح خود انباشته کنند. در نتیجه، این ذرات می‌توانند به انتقال و پراکندگی این آلاینده‌ها در محیط‌زیست کمک کنند [۱۲].



شکل (۴): مسیر ورود میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از بسته‌بندی‌های غذایی به محیط‌زیست و زنجیره غذایی [۱۳ و ۲۵].

میکروپلاستیک‌ها در زنجیره ارزش غذایی

امروزه پلاستیک در تمامی بخش‌های محیط‌زیست، از جمله هوا، آب و خاک، به‌طور گسترده حضور دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل این وضعیت، استفاده فراوان از مواد پلاستیکی در تولید بسته‌بندی‌های مواد غذایی، از جمله بسته‌بندی محصولات لبنی، گوشت، آبیان و انواع نوشیدنی‌ها مانند آب معدنی است. تماس مواد غذایی با بسته‌بندی‌های پلاستیکی می‌تواند، بسته به نوع بسته‌بندی و شرایط نگهداری، به مهاجرت برخی ترکیبات شیمیایی یا ذرات میکروپلاستیک و نانوپلاستیک به ماده غذایی منجر شود. این برهم‌کنش می‌تواند کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار دهد و در برخی موارد، با انتقال ترکیبات موجود در ساختار بسته‌بندی به ماده غذایی، موجب تغییر در ویژگی‌های تغذیه‌ای و کاهش ایمنی مصرف شود.

وجود میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های مختلف، از جمله اکوسیستم‌های خاک، آب‌های سطحی، رسوبات ساحلی، ماسه‌های ساحلی، رسوبات آب‌های شیرین و حتی محیط‌های عمیق دریایی، گزارش شده‌است. همچنین، حضور این ذرات در

بمانند. این ترکیبات به‌عنوان ناخالصی شناخته می‌شوند و لازم است ویژگی‌های سمیت آن‌ها ارزیابی شود [۷ تا ۹].

میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از نظر اندازه، شکل، رنگ، نوع پلیمر و افزودنی‌های شیمیایی به کار رفته در ساخت آن‌ها، تنوع بسیار زیادی دارند. این ذرات می‌توانند از انواع مختلف پلیمرها تشکیل شده باشند و حاوی افزودنی‌هایی باشند که در فرآیند تولید پلاستیک به آن‌ها افزوده می‌شود. به‌طور کلی، میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در بیشتر مواد پلاستیکی مورد استفاده یافت می‌شوند و به‌صورت عمده در اثر تجزیه، فرسایش یا سایش محصولات پلاستیکی ایجاد می‌شوند. با توجه به گسترش استفاده از پلاستیک در زندگی روزمره، شناخت منابع تولید این ذرات و تلاش برای کاهش انتشار آن‌ها در محیط‌زیست، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰].

آلاینده‌های زیست‌محیطی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها

بیشتر مواد پلاستیکی برای تجزیه در محیط‌زیست به صدها سال زمان نیاز دارند. فرآیند تجزیه این مواد با تجزیه طبیعی موادی مانند چوب، پارچه یا سایر مواد زیست‌تخریب‌پذیر تفاوت دارد. پلاستیک‌ها به‌جای آنکه به‌طور کامل تجزیه شوند، در اثر عوامل محیطی به تدریج به قطعات کوچک‌تر خرد شده و در نهایت، به میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها تبدیل می‌شوند. زباله‌های پلاستیکی رها شده در خشکی، سواحل و محیط‌های آبی، از مهم‌ترین منابع تولید میکروپلاستیک‌ها به شمار می‌روند. تابش نور خورشید، فرسایش مکانیکی، امواج، باد و سایر عوامل محیطی، موجب خرد شدن این مواد و پراکنده شدن ذرات پلاستیکی در آب، خاک و هوا می‌شوند. این فرآیند در محیط‌های گوناگون، از سواحل دریا گرفته تا مناطق روستایی و شهرها، رخ می‌دهد. امروزه میکروپلاستیک‌ها به یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی در مقیاس جهانی تبدیل شده‌اند و به دلیل پراکندگی گسترده و قابلیت ورود به زنجیره غذایی، نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره امنیت غذایی، سلامت انسان و پایداری بوم‌سامانه‌ها (اکوسیستم‌ها) ایجاد کرده‌اند. به همین دلیل، این آلاینده‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱۱].

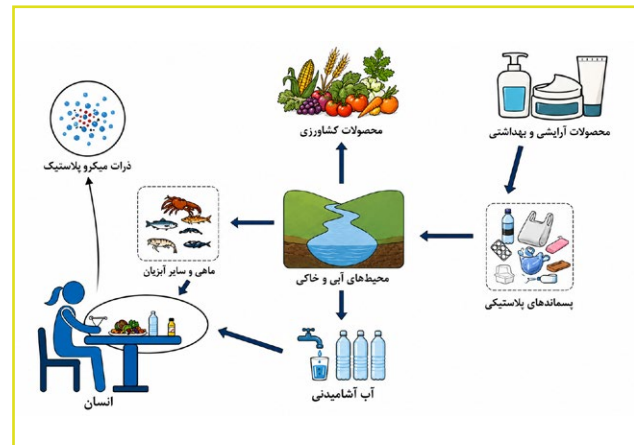
در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها و گزارش‌های متعددی درباره مخاطرات میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها به‌عنوان آلاینده‌های زیست‌محیطی و آثار آن‌ها بر سلامت انسان منتشر شده‌است. در پی این مطالعات، سازمان‌های بین‌المللی مختلف، مقررات و راهکارهایی را برای کنترل، پیشگیری و کاهش انتشار این آلاینده‌ها تدوین کرده‌اند. با این حال،

بسته‌بندی‌ها و ظروف پلاستیکی نیز از منابع مهم آلودگی مواد غذایی به میکروپلاستیک‌ها به‌شمار می‌روند. آلودگی مواد غذایی ناشی از بسته‌بندی‌های پلاستیکی می‌تواند از دو مسیر ایجاد شود: آزاد شدن ذرات از خود بسته‌بندی و رهاسازی ذرات در هنگام باز کردن یا استفاده از بسته‌بندی پلاستیکی. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها در انواع بسته‌بندی‌های مواد غذایی، از جمله بسته‌بندی گوشت، بطری‌های آب و کیسه‌های چای، شناسایی شده‌اند. همچنین، در محصولات کشاورزی، این ذرات می‌توانند از طریق ریشه جذب شده و به بخش‌های مختلف گیاه، از جمله ساقه، برگ، میوه و بذر، منتقل و در نتیجه موجب آلودگی میوه‌ها و سبزی‌ها شوند [۱۵ و ۱۶].

مهاجرت میکرو و نانوپلاستیک‌ها از مواد بسته‌بندی در تماس با مواد غذایی

مواد بسته‌بندی در تماس با مواد غذایی^{۲۹} در طول نگهداری و مصرف، در معرض تنش‌های حرارتی و عوامل محیطی قرار می‌گیرند. این شرایط می‌تواند موجب آزاد شدن و مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از بسته‌بندی به ماده غذایی شود. مطالعات مربوط به مهاجرت این ذرات در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با وجود پیشرفت‌های حاصل شده، هنوز شناخت جامعی از روش‌های آزمون، روش‌های شناسایی و عوامل مؤثر بر این پدیده وجود ندارد. در یک مقاله مروری نظام‌مند که بر پایه بررسی ۳۵ مقاله داوری‌شده انجام شده‌است، رویکردهای کنونی برای آزمون و شناسایی مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها، همچنین راهکارهای پیشگیری از آلودگی، ارزیابی شده و پیشنهادهایی برای هدایت پژوهش‌های آینده ارائه شده‌است. به‌طور کلی، مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از مواد بسته‌بندی به مواد غذایی، با استفاده از مایعات شبیه‌ساز مواد غذایی و در شرایط مختلف، از جمله نگهداری، گرمادهی و استفاده در مایکروویو، بررسی می‌شود. پس از انجام آزمون مهاجرت، ذرات آزاد شده به‌صورت معمول با بهره‌گیری از روش‌هایی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۳۰}، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^{۳۱}، کروماتوگرافی گازی/طیف‌سنجی جرمی، کروماتوگرافی مایع و میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^{۳۲} شناسایی و مشخصه‌یابی می‌شوند. انواع ظروف و بسته‌بندی‌های پلاستیکی یک‌بار مصرف، از جمله پر مطالعه‌ترین مواد در پژوهش‌های مربوط به مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها هستند؛ زیرا قابلیت آزادسازی و انتقال این ذرات به مواد غذایی در

باران و برف نیز تأیید شده‌است؛ ذراتی که به دلیل اندازه بسیار کوچک، به‌طور معمول با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند. در واقع، مصرف گسترده پلاستیک، همراه با ناکارآمدی سامانه‌های مدیریت پسماند، از جمله جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت نامناسب در پایان عمر محصولات، موجب انباشت گسترده پسماندهای پلاستیکی در محیط‌زیست شده‌است. از این رو، رهاسازی مواد پلاستیکی در محیط‌زیست، امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی زیست‌محیطی شناخته می‌شود [۱۳].



شکل (۵): منابع انتشار میکروپلاستیک‌ها و مسیر انتقال آن‌ها به زنجیره غذایی انسان [۱۳ و ۱۴].

میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ممکن است در مواد غذایی وجود داشته باشند که یکی از مهم‌ترین دلایل آن، آلودگی محیطی محل رشد، پرورش یا تولید این مواد است. همچنین انسان می‌تواند از طریق استنشاق هوا، مصرف غذا و آب آشامیدنی و نیز تماس پوستی در هنگام استفاده از محصولات آرایشی و بهداشتی، در معرض این ذرات قرار گیرد. با توجه به اینکه میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها می‌توانند پیامدهای بالقوه‌ای برای سلامت انسان داشته باشند، شناخت میزان حضور، فراوانی و مسیرهای مواجهه انسان با این ذرات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناختی (مورفولوژی)^{۲۸}، اندازه و ترکیب پلیمری میکروپلاستیک‌ها در انواع مختلف مواد غذایی، از جمله فرآورده‌های آبی، نمک، آب آشامیدنی، نوشیدنی‌ها، مواد غذایی بسته‌بندی شده، عسل، میوه‌ها و سبزی‌ها، نشان می‌دهد که این ذرات به‌طور گسترده در زنجیره غذایی انسان حضور دارند. غلظت میکروپلاستیک‌ها در گروه‌های مختلف مواد غذایی دامنه گسترده‌ای دارد و میزان آن به عواملی مانند شدت آلودگی محیط پیرامون و روش‌های به کار رفته برای شناسایی و اندازه‌گیری این ذرات بستگی دارد.

میکروپلاستیک‌ها به‌طور عمده از محیط‌های آبی آلوده، شامل آب‌های شیرین و دریایی، منشأ می‌گیرند. علاوه‌بر این،

۴. ارزیابی‌های علمی سازمان ایمنی غذای اروپا^{۳۴}:

سازمان ایمنی غذای اروپا به‌طور مستمر شواهد علمی مربوط به میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در مواد غذایی و نوشیدنی‌ها را ارزیابی کرده و نظریات علمی و توصیه‌های تخصصی خود را درباره خطرهای احتمالی این آلاینده‌ها برای سلامت انسان منتشر می‌کند.

این مقررات و اقدامات با هدف حفاظت از سلامت مصرف‌کنندگان و محیط‌زیست تدوین شده‌اند و به‌طور مستمر، متناسب با پیشرفت‌های علمی و نیازهای قانون‌گذاری، بازنگری و به‌روزرسانی می‌شوند تا بالاترین الزامات ایمنی و کیفیت در مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی رعایت شود [۱۹، ۲۰ و ۲۱].

مقررات و اقدامات سازمان غذا و داروی ایالات متحده درباره میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی

سازمان غذا و داروی ایالات متحده در ۲۴ ژوئیه ۲۰۲۴، صفحه‌ای با عنوان «میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در مواد غذایی» منتشر کرد. در این صفحه، اطلاعاتی درباره وضعیت کنونی دانش در زمینه میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها، آثار احتمالی آن‌ها بر سلامت انسان و فعالیت‌های این سازمان برای پایش پژوهش‌های جدید ارائه شده‌است. همچنین، اقدامات FDA برای توسعه و ارزیابی روش‌های آزمون و حمایت از پیشرفت‌های علمی در این حوزه تشریح شده‌است.

براساس مطالب منتشر شده در صفحه جدید FDA، شواهد موجود نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها به‌صورت عمده از منابع محیطی وارد زنجیره غذایی می‌شوند. با این حال، این سازمان اعلام کرده است که شواهد علمی موجود برای اثبات مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از بسته‌بندی‌های پلاستیکی به مواد غذایی و نوشیدنی‌ها کافی نیست. FDA همچنین تأکید می‌کند که بر پایه شواهد علمی کنونی، اطلاعات کافی برای نتیجه‌گیری مبنی بر اینکه مقادیر فعلی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در مواد غذایی برای سلامت انسان خطر ایجاد می‌کنند، وجود ندارد. با این حال، این سازمان همچنان روند انتشار شواهد علمی را پایش کرده و از توسعه روش‌های آزمون و انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه حمایت می‌کند.

FDA اعلام کرده است که وجود میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌های با منشأ محیطی در مواد غذایی، به تنهایی به معنای وجود خطر برای سلامت انسان یا مغایرت با مقررات این سازمان نیست؛ مگر آنکه شواهد علمی، بروز مخاطرات

آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، نبود استانداردهای یکسان برای روش‌های آزمون و شناسایی، مقایسه نتایج مطالعات مختلف را دشوار کرده و ضرورت استانداردسازی این روش‌ها را بیش از پیش آشکار می‌سازد. همچنین، انجام پژوهش‌های بیشتر برای ارزیابی خطرهای بالقوه ناشی از مواجهه انسان با میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ضروری است [۱۷، ۱۸ و ۲۳].

مقررات اتحادیه اروپا EU No. 10/2011 درباره مواد پلاستیکی در تماس با مواد غذایی

اتحادیه اروپا در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها داشته است. در حوزه مواد و بسته‌بندی‌های پلاستیکی در تماس با مواد غذایی، مجموعه‌ای از مقررات و دستورالعمل‌ها برای تضمین ایمنی مصرف‌کنندگان و کنترل مهاجرت مواد از بسته‌بندی به ماده غذایی تدوین شده‌است. یکی از مهم‌ترین این اسناد، مقرره EU No. 10/2011 است که الزامات مربوط به مواد و فرآورده‌های پلاستیکی در تماس با مواد غذایی را مشخص می‌کند. مهم‌ترین مفاد این مقرره عبارتند از:

۱. **مقررات ثبت، ارزیابی، صدور مجوز و محدودیت مواد شیمیایی^{۳۵}:** این مقررات، چارچوب اصلی اتحادیه اروپا برای مدیریت و کنترل مواد شیمیایی است. در سال‌های اخیر، محدودیت‌هایی نیز در چارچوب این مقررات برای برخی کاربردهای میکروپلاستیک‌ها وضع شده‌است که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر مواد و بسته‌بندی‌های پلاستیکی و سایر محصولات مرتبط تأثیرگذار باشد.

۲. **مقررات مواد و فرآورده‌های در تماس با مواد غذایی (Regulation (EC) No. 1935/2004):** این مقرره الزامات عمومی ایمنی برای تمامی مواد و فرآورده‌های در تماس با مواد غذایی را تعیین می‌کند. براساس این مقرره، این مواد نباید در شرایط معمول یا قابل پیش‌بینی استفاده، ترکیباتی را با مقادیر زیان‌آور به مواد غذایی منتقل کنند یا موجب تغییر نامطلوب در ترکیب، کیفیت یا ویژگی‌های حسی مواد غذایی شوند.

۳. **راهبرد اتحادیه اروپا برای کاهش آلودگی پلاستیکی:** اتحادیه اروپا در قالب برنامه‌ها و راهبردهای مرتبط با اقتصاد چرخشی و مدیریت پسماند، اقداماتی را برای کاهش مصرف پلاستیک‌های یک‌بار مصرف و محدود کردن انتشار میکروپلاستیک‌ها تدوین کرده است. این اقدامات شامل توسعه مواد جایگزین، بهبود سامانه‌های بازیافت و کاهش ورود پسماندهای پلاستیکی به محیط زیست است.

با الزامات قانونی و حفظ ایمنی آن‌ها در تماس با مواد غذایی اطمینان حاصل شود.

این مقررات با هدف حفاظت از سلامت عمومی و تضمین ایمنی مواد غذایی بسته‌بندی شده تدوین و اجرا شده‌اند.

راهکارهای کاهش انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی به شمار می‌روند و می‌توانند آثار نامطلوبی بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان داشته باشند. از این رو، اجرای راهکارهایی برای کاهش تولید، انتشار و ورود این ذرات به محیط‌زیست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه، مهم‌ترین راهکارهای پیشنهادی در این زمینه ارائه می‌شود:

۱. **کاهش مصرف پلاستیک‌های یک‌بار مصرف:** کاهش استفاده از محصولات پلاستیکی یک‌بار مصرف، از جمله کیسه‌های پلاستیکی، بطری‌های نوشیدنی و ظروف یک‌بار مصرف، یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش تولید پسماندهای پلاستیکی و در نتیجه، کاهش تشکیل و انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در محیط‌زیست است.

۲. **استفاده و نگهداری صحیح از تجهیزات الکتریکی و لوازم خانگی:** استفاده و نگهداری صحیح از تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، از جمله تلفن همراه، رایانه همراه، تلویزیون و سایر لوازم خانگی که بخش قابل توجهی از اجزای آن‌ها از مواد پلاستیکی ساخته شده‌است، می‌تواند از فرسایش زود هنگام و آزاد شدن ذرات میکروپلاستیک و نانوپلاستیک جلوگیری کند. همچنین، مدیریت صحیح این وسایل در پایان عمر مفید و هدایت آن‌ها به چرخه بازیافت، از انباشت پسماندهای پلاستیکی و ورود آن‌ها به محیط‌زیست جلوگیری می‌کند. با توجه به اینکه سالانه حجم زیادی از تجهیزات برقی و الکترونیکی به پسماند تبدیل می‌شوند، مدیریت اصولی این پسماندها نقش مهمی در کاهش آلودگی‌های پلاستیکی دارد.

۳. **خودداری از گرم کردن مواد غذایی در ظروف پلاستیکی نامناسب با استفاده از مایکروویو:** توصیه می‌شود مواد غذایی که در ظروف پلاستیکی نگهداری می‌شوند، مگر در صورتی که ظرف برای استفاده در مایکروویو طراحی و تأیید شده باشد، در مایکروویو گرم نشوند. افزایش دما می‌تواند احتمال مهاجرت برخی ترکیبات شیمیایی و آزاد شدن ذرات میکروپلاستیک و نانوپلاستیک از بسته‌بندی به مواد غذایی را افزایش دهد. ورود این ترکیبات و ذرات به مواد غذایی ممکن است کیفیت آن را تحت تأثیر قرار دهد و در صورت مواجهه طولانی‌مدت، نگرانی‌هایی را درباره سلامت انسان ایجاد کند.

بهداشتی را نشان دهد. این سازمان همچنین اعلام کرده است که هم‌زمان با انتشار یافته‌های علمی جدید، محتوای این صفحه را به‌روزرسانی خواهد کرد. FDA تأکید می‌کند که در صورت اثبات آثار زیان‌بار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها بر سلامت انسان، اقدامات قانونی و نظارتی لازم را در چارچوب اختیارات خود انجام خواهد داد [۱۹ و ۲۰].

سازمان غذا و داروی ایالات متحده مقررات و الزامات متعددی را برای مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی تدوین کرده است. هدف این مقررات، اطمینان از ایمنی این مواد و جلوگیری از انتقال ترکیبات زیان‌آور به مواد غذایی است. مهم‌ترین این مقررات عبارتند از:

۱. **مجاز بودن استفاده از مواد در تماس با مواد غذایی:** مواد پلاستیکی مورد استفاده در بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی باید الزامات ایمنی تعیین شده از سوی سازمان غذا و داروی ایالات متحده را برآورده کنند و برای کاربرد مورد نظر، مطابق مقررات این سازمان مجاز باشند. این مواد نباید در شرایط معمول استفاده، ترکیبات زیان‌آور را به مواد غذایی منتقل کنند.

۲. **مواد مجاز برای استفاده در بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی:** FDA فهرست مواد مجاز برای استفاده در مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی را در مقررات خود و براساس ارزیابی‌های ایمنی منتشر می‌کند. این مواد شامل انواع پلیمرها، افزودنی‌ها، رنگ‌ها و سایر ترکیباتی هستند که استفاده از آن‌ها، در صورت رعایت شرایط تعیین شده، برای تماس با مواد غذایی مجاز است.

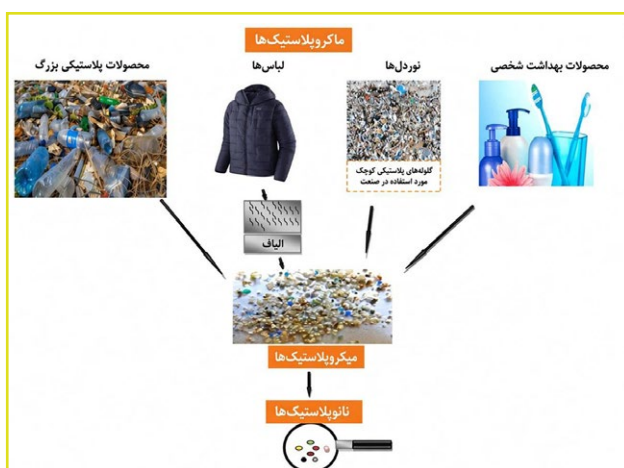
۳. **ارزیابی ایمنی مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی:** مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی باید از نظر ایمنی ارزیابی شوند تا اطمینان حاصل شود که در شرایط معمول یا قابل پیش‌بینی استفاده، ترکیبات زیان‌آور را با مقادیر نامطلوب به مواد غذایی منتقل نمی‌کنند. این ارزیابی‌ها بر پایه داده‌های علمی و آزمون‌های مربوط به مهاجرت مواد انجام می‌شوند.

۴. **الزامات برچسب‌گذاری:** در مواردی که برچسب‌گذاری برای مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی الزامی باشد، اطلاعات درج شده باید مطابق مقررات FDA، دقیق، شفاف و غیرگمراه‌کننده باشد. همچنین، در صورت لزوم، دستورالعمل‌های مربوط به استفاده ایمن از محصول نیز باید در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد.

۵. **کنترل کیفیت و رعایت الزامات قانونی:** تولیدکنندگان مواد و بسته‌بندی‌های در تماس با مواد غذایی موظف‌اند در تمامی مراحل تولید، الزامات ایمنی و کیفیت تعیین شده از سوی FDA را رعایت کنند. همچنین، باید با استقرار نظام‌های مناسب کنترل کیفیت، از انطباق محصولات

فیلترهای مناسب در ماشین‌های لباس‌شویی و سایر منابع تولید الیاف پلاستیکی، با کاهش ورود الیاف میکروپلاستیکی به شبکه فاضلاب، می‌تواند میزان انتشار این آلاینده‌ها در محیط‌های آبی را کاهش دهد.

اجرای راهکارهای یاد شده می‌تواند در کاهش انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها و در نتیجه، کاهش آثار نامطلوب آن‌ها بر محیط‌زیست و سلامت انسان مؤثر باشد. علاوه بر این، فرهنگ‌سازی، اصلاح الگوی مصرف و افزایش آگاهی عمومی می‌تواند تقاضا برای محصولات پایدار و جایگزین‌های مناسب پلاستیک را افزایش دهد. در نتیجه، تولیدکنندگان نیز به توسعه و عرضه محصولات سازگارتر با محیط‌زیست ترغیب خواهند شد. تحقق این اهداف، مستلزم مشارکت مصرف‌کنندگان، صنایع، نهادهای علمی و دستگاه‌های سیاست‌گذار در اجرای برنامه‌های مؤثر برای کاهش آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها است.



شکل (۶): انواع محصولات پلاستیکی مولد میکروپلاستیک و نانوپلاستیک [۱۱]

روش‌های آنالیز و تعیین میکروپلاستیک‌ها و آلاینده‌های مرتبط در ظروف بسته‌بندی

روش‌های متعددی برای شناسایی، آنالیز و تعیین مقدار میکروپلاستیک‌ها، نانوپلاستیک‌ها و آلاینده‌های مرتبط در انواع ظروف و محصولات پلاستیکی وجود دارد که بسیاری از آن‌ها به صورت مکمل یکدیگر به کار می‌روند. در این روش‌ها، نمونه‌برداری و آماده‌سازی صحیح نمونه، انتخاب روش آزمون متناسب با نوع نمونه و آلاینده مورد بررسی و همچنین آشنایی و تجربه کافی در کار با دستگاه‌های اندازه‌گیری، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت و قابلیت اعتماد نتایج دارند. مراحل کلی این فرآیند به شرح زیر است:

۱. نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه؛

۴. خودداری از قرار دادن آب آشامیدنی و مواد غذایی بسته‌بندی شده در ظروف پلاستیکی در معرض نور مستقیم خورشید: قرار گرفتن طولانی مدت ظروف پلاستیکی حاوی آب آشامیدنی یا مواد غذایی در معرض نور مستقیم خورشید و دمای بالا، می‌تواند موجب تخریب تدریجی پلیمرها، افزایش آزاد شدن ذرات میکروپلاستیک و نانوپلاستیک و همچنین مهاجرت برخی ترکیبات شیمیایی به آب یا مواد غذایی شود. از این رو، نگهداری این محصولات در محیط‌های خنک و دور از تابش مستقیم نور خورشید توصیه می‌شود.
۵. استفاده از مواد جایگزین، مانند شیشه، فلز و کاغذ، در مواردی که از نظر فنی، بهداشتی و زیست‌محیطی امکان‌پذیر باشد، می‌تواند به کاهش مصرف پلاستیک و در نتیجه، کاهش تولید و انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در محیط‌زیست منجر شود.

۶. بهبود تفکیک و بازیافت پسماندهای پلاستیکی: بهبود سامانه‌های تفکیک پسماند از مبدأ و توسعه ظرفیت‌های بازیافت، نقش مهمی در کاهش رهاسازی پسماندهای پلاستیکی در محیط‌زیست دارد و از این طریق، تشکیل و انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها را کاهش می‌دهد.

۷. افزایش آگاهی عمومی: آموزش و اطلاع‌رسانی به عموم جامعه درباره پیامدهای زیست‌محیطی مصرف بی‌رویه پلاستیک، مدیریت صحیح پسماندهای پلاستیکی و توسعه فرهنگ بازیافت، از راهکارهای مؤثر در کاهش آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها به شمار می‌رود.

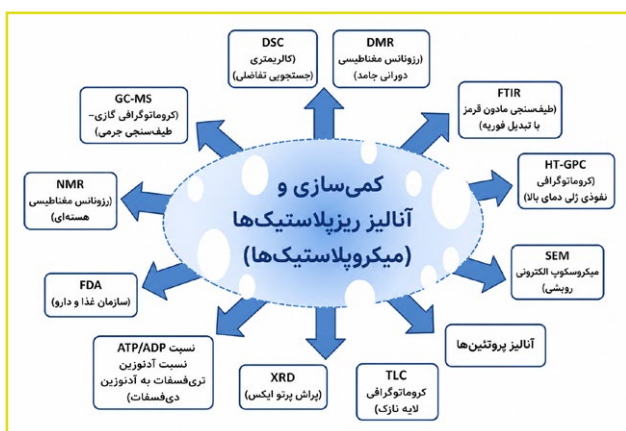
۸. تدوین و اجرای مقررات محیط‌زیستی: تدوین و اجرای قوانین و مقررات برای محدود کردن تولید و مصرف محصولات پلاستیکی غیرضروری و حمایت از پژوهش و توسعه مواد زیست‌تجزیه‌پذیر و سایر مواد جایگزین، در کاربردهایی که از نظر فنی و زیست‌محیطی مناسب باشند، می‌تواند در کاهش آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها مؤثر باشد.
۹. پیشگیری از آلودگی در صنایع: صنایع می‌توانند با به‌کارگیری فرآیندهای تولید پاک، بهینه‌سازی خطوط تولید، کنترل انتشار ذرات پلاستیکی، بهبود مدیریت پسماندها و استفاده از بسته‌بندی‌های سازگارتر با محیط‌زیست، از انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در مراحل تولید و بسته‌بندی جلوگیری کنند.

۱۰. حمایت از پژوهش و توسعه: حمایت از پژوهش و توسعه به‌منظور طراحی فناوری‌ها و روش‌های نوین برای کاهش انتشار میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها و توسعه مواد جایگزین با آثار زیست‌محیطی کمتر، از الزامات اساسی برای کاهش آلودگی‌های پلاستیکی و حرکت به سوی توسعه پایدار به شمار می‌رود.

۱۱. استفاده از سامانه‌های فیلتراسیون: استفاده از



شکل (۷): روش‌های نمونه برداری و آماده سازی [۲۴].



شکل (۸): روش‌های اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها در انواع پلیمرها [۲۱ و ۲۴].

۲. شناسایی نوع پلیمر با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ با بازتاب کلی تضعیف شده^{۳۵} و طیف‌سنجی تبدیل فوریه رامان^{۳۶}؛

۳. شناسایی و اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها با استفاده از روش‌های میکروسکوپی نوری با قدرت بالا یا میکروسکپ الکترونی SEM و طیف‌سنجی FTIR و FT-RAMAN؛
۴. آزمون مهاجرت کل در شبیه‌سازهای مواد غذایی مطابق با مقررات اتحادیه اروپا EU No. 10/2011؛

۵. آزمون مهاجرت ویژه در شبیه‌ساز اسیدی مواد غذایی برای تعیین فلزات سنگین با استفاده از طیف‌سنجی نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی^{۳۷} یا طیف‌سنجی جذب اتمی^{۳۸}؛

۶. آزمون مهاجرت ویژه برای تعیین مونومرها، الیگومرها، افزودنی‌ها و نرم‌کننده‌ها با استفاده از روش‌های کروماتوگرافی گازی^{۳۹}، کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی^{۴۰}، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا-طیف‌سنجی جرمی^{۴۱} و پیرولیز-کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی^{۴۲}؛

۷. اندازه‌گیری مواد باقیمانده و مواد قابل استخراج با حلال مطابق با الزامات سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا؛

۸. بررسی اجزای تشکیل دهنده محصول با استفاده از روش‌های آنالیز حرارتی TGA و DSC؛

۹. تعیین مورفولوژی، اندازه و ویژگی‌های سطحی ذرات میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی^{۴۳} و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^{۴۴}.

نتیجه‌گیری

میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها از جمله آلاینده‌های نوظهور هستند که در اثر تجزیه، فرسایش و سایش محصولات پلاستیکی ایجاد می‌شوند. این ذرات به دلیل پراکندگی گسترده و قابلیت ورود به زنجیره غذایی، به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و ایمنی مواد غذایی تبدیل شده‌اند. بسته‌بندی‌های پلاستیکی و مواد در تماس با غذا نیز می‌توانند در شرایطی مانند دماهای مختلف، سایش و شرایط نگهداری، به‌عنوان منابع بالقوه انتقال این ذرات به مواد غذایی عمل کنند. با وجود پیشرفت در روش‌های شناسایی و آزمون، هنوز روش‌های کاملاً یکسان و استاندارد برای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و ارزیابی مهاجرت میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها وجود ندارد و این امر، مقایسه نتایج مطالعات را دشوار می‌کند. بنابراین، استانداردسازی روش‌های آزمون و توسعه روش‌های دقیق و قابل مقایسه، از اولویت‌های مهم پژوهشی به‌شمار می‌رود.

اتحادیه اروپا و سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA) چارچوب‌هایی را برای ایمنی مواد بسته‌بندی‌های در تماس با غذا تدوین کرده‌اند؛ با این حال، براساس شواهد موجود، هنوز داده‌های کافی برای اثبات قطعی خطرات بهداشتی ناشی از میزان فعلی این ذرات در مواد غذایی و تعیین حدود مجاز مواجهه وجود ندارد. در مجموع، پیشگیری و کاهش انتشار، پایش مستمر، بهبود مدیریت پسماند، کنترل شرایط استفاده از بسته‌بندی‌ها و توسعه مواد جایگزین باید به‌طور هم‌زمان دنبال شوند. همچنین، انجام پژوهش‌های بیشتر درباره میزان مهاجرت، مواجهه طولانی‌مدت و پیامدهای سلامت، همراه با استانداردسازی روش‌های آزمون و تکمیل مقررات، برای کاهش خطر احتمالی، ارتقای ایمنی مواد غذایی و حفاظت از محیط‌زیست ضروری است.

1. Microplastics (MPs)
2. Nanoplastics (NPs)
3. Macroplastics
4. U.S. Food and Drug Administration (FDA)
5. Engineered Nanoparticles (ENPs)
6. Primary Microplastics
7. Secondary Microplastics
8. Polymerization
9. Homopolymer
10. Copolymer
11. Polypropylene (PP)
12. Polyethylene (PE)
13. Polyethylene Terephthalate (PET)
14. Polystyrene (PS)
15. Polyvinyl Chloride (PVC)
16. Polycarbonate (PC)
17. Epoxy Resin
18. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
19. Polyamides (PA)
20. Polyvinylidene Chloride (PVDC)
21. Saran
22. Polymethyl Methacrylate (PMMA)
23. Polyarylsulfone (PSU)
24. Polyacrylonitrile (PAN)
25. Polyvinyl Alcohol (PVA)
26. Polytetrafluoroethylene (PTFE)
27. Persistent Organic Pollutants (POPs)
28. Morphology
29. Food Contact Materials (FCMs)
30. Scanning Electron Microscopy (SEM)
31. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
32. Scanning Electron Microscopy–Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)
33. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)
34. European Food Safety Authority (EFSA)
35. Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR)
36. Fourier Transform Raman Spectroscopy (FT-Raman)
37. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)
38. Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
39. Gas Chromatography (GC)
40. Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)
41. High Performance Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (HPLC-MS)
42. Pyrolysis Gas Chromatography–Mass Spectrometry (Py-GC-MS)
43. Atomic Force Microscopy (AFM)
44. Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX)

مراجع

- [1] Sumon Sarkar, et al., Review Micro plastic Pollution: Chemical Characterization and Impact on Wildlife, International Journal of Environmental Research and Public Health. Public Health, 2023.
- [2] Micro plastics - Britannica Online Encyclopedia, URL://www.britannica.com/technology/ micro plastic Access Date: August 01, 2024.
- [3] Khaled Ziani, et al, Review, Micro plastics: A Real Global Threat for Environment and Food, Nutrients, 15, 617, 2023.
- [4] Virender K. et al, Nano plastics are potentially more dangerous than micro plastics, Environmental Chemistry Letters, 9 Nov.2023.
- [5] R. Marfella, F. Prattichizzo, et.al. Micro plastics and Nano plastics in Atheroma's and Cardiovascular Events, the New England Journal of Medicine, 2024.
- [6] <https://www.milanpolymerdays.org/blog/what-are-microplastics>
- [7] Esther Garrido Gamarro and Violetta Costanzo, Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO) Rome, 2022- © FAO, 2022, last updated 22/03/2024.
- [8] Neviaty P. Zamani, et al., Polymer composition of micro plastics in marine organisms across trophic levels, BIO Web of Conferences 175, 2025.
- [9] Mikaël Kedzierski et.al., Chemical composition of micro plastics floating on the surface of the Mediterranean Sea, Marine Pollution Bulletin, V. 174, January 2022.
- [10] Juliana A. Ivar do Su, Why it is important to analyze the chemical composition of micro plastics in environmental samples, Marine Pollution Bulletin, V. 165, April 2021.
- [11] Madushika Sewwandi, et al, Environmental Pollution, Volume 317, 15 January 2023.
- [12] Wang, Shibo Li, et al., Chapter 5 - Sorption of toxic chemicals on micro plastics, An Emerging Matter of Environmental Urgency و, Micro plastic Contamination in Aquatic Environments (Second Edition) 2024.
- [13] Khaled Ziani et al., Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. Nutrients, 15, 6171, 2023,
- [14] Sana syde ansar, et al. Micro plastics distribution and potential health implications of food and food products, Journal of Food Composition and Analysis, Volume 139, March 2025.
- [15] Alena Vdovchenko and Marina Resmini, Mapping Micro plastics in Humans: Analysis of Polymer Types, and Shapes in Food and Drinking Water A Systematic Review, International Journal of Molecular Sciences, 25, 7074, 2025.
- [16] Mengke Jin, Micro plastics contamination in food and beverages: Direct exposure to humans, Concise reviews & Hypotheses in Food Science, 13 May 2021.
- [17] V.C. Shruti, et al, Migration testing of micro plastics in plastic food-contact materials: Release, characterization, pollution level, and influencing factors, Trends in Analytical Chemistry 170, 2024. Science Direct journal www.elsevier.com/locate/trac.
- [18] Compliance with Micro plastics Restrictions, Chemradar Jul 29, 2024.
- [19] European Commission. 2004. Regulation (EC) No 1935/2004 "on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/ EEC." Off. J. Eur. Union L338/4, 4–17.
- [20] REACH restriction addressing intentionally added micro plastics, Proposal for a Regulation on preventing pellet losses to reduce micro plastics pollution, September-October 2023.
- [21] FDA Publishes Web Page on Micro plastics and Nano plastics in Food, News, 31/7/2024 & 2026 Keller and Heckman LLP. All rights reserved.
- [22] S. Saumonrkar, et. al., Review Micro plastic Pollution: Chemical Characterization and Impact on Wildlife, Public Health 2023, International Journal of Environmental Research and Public Health.
- [23] Comprehensive Analysis of Common Polymers Using Hyphenated TGA-FTIR-GC/MS and Raman Spectroscopy Towards a Database for Micro- and Nano plastics Identification, Characterization, and Quantitation (2023).
- [24] Chingakham Chinglenthoba, et al., Micro plastics in food packaging: Analytical methods, health risks, and sustainable alternatives, Journal of Hazardous Materials Advances V18, May 2025.

نویسندگان

شبیم نجفی اصلی پاشاکی^{۱*}، محمد برخی^۲

۱. مدیر فنی آزمایشگاه‌های مرجع علوم زمین مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، البرز، ایران

۲. سرپرست معاونت آزمایشگاه‌های مرجع علوم زمین مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، البرز، ایران

*Najafi.grcir@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

ردیابی نانوذرات با روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای

واژه‌های کلیدی

sp-ICP-MS، نانوذرات مهندسی‌شده، غلظت عددی نانوذرات، آنالیز عنصری، رهایش نانومواد.

چکیده

گسترش سریع فناوری نانو موجب افزایش رهایش نانوذرات مهندسی‌شده^۱ به سامانه‌های زیستی و محیط‌زیستی شده‌است. شناسایی و توصیف دقیق این نانوذرات برای درک سرنوشت آن‌ها در محیط‌زیست، سازوکارهای انتقال، فراهمی زیستی و اثرات سمی بالقوه آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^۲ به دلیل حساسیت بسیار بالا، قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان چند عنصر و گستره کاری وسیع، به یکی از قدرتمندترین روش‌های آنالیزی برای شناسایی و اندازه‌گیری نانوذرات تبدیل شده‌است. دو راهبرد اصلی مبتنی بر طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی برای مطالعه نانوذرات وجود دارد. نخست، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای^۳ که امکان شناسایی و توصیف مستقیم نانوذرات منفرد را در تعلیق‌های آبی فراهم می‌کند. دوم، ICP-MS متداول که برای اندازه‌گیری عناصر در غلظت‌های کم در ماتریس‌های پیچیده محیطی، مانند خاک، رسوبات و بافت‌های گیاهی، به کار می‌رود.

این مقاله، اصول، پیشرفت‌های روش‌شناختی، عملکرد آنالیزی و کاربردهای روش sp-ICP-MS را بررسی می‌کند. در این میان، تأکید ویژه‌ای بر کاربرد این روش در توصیف و پایش نانوذرات در ماتریس‌های مختلف شده‌است. همچنین، مزایا و محدودیت‌های این روش به‌صورت انتقادی ارزیابی و چشم‌اندازهای آینده برای بهبود آنالیز نانوذرات با استفاده از ICP-MS بررسی شده‌است.

گسترش سریع فناوری نانو موجب تولید و کاربرد گسترده نانوذرات مهندسی شده در حوزه‌های مختلف، از جمله پزشکی، الکترونیک، کشاورزی، اصلاح محیط زیست و صنایع غذایی شده است. نانوذرات مهندسی شده به صورت معمول قطری در بازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر دارند و برای کاربردهای مشخص طراحی و تولید می‌شوند. اندازه بسیار کوچک این ذرات، خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی، از جمله نسبت سطح به حجم بالا، فعالیت کاتالیزوری بیشتر و ویژگی‌های نوری و الکترونیکی متفاوت را برای آن‌ها ایجاد می‌کند [۱ و ۲].

نانوذرات فلزی، از جمله نقره (Ag)، طلا (Au)، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، مس (Cu) و اکسید روی (ZnO)، از پرکاربردترین نانومواد مورد استفاده در صنایع مختلف هستند. این مواد در محصولات مصرفی مانند پوشش‌های ضد میکروبی، تجهیزات پزشکی، کودها، فرآورده‌های آرایشی و بهداشتی و سامانه‌های تصفیه آب به کار گرفته می‌شوند [۳]. با این حال، گسترش استفاده از نانوذرات، نگرانی‌هایی را درباره رهايش آن‌ها در محیط زیست و پیامدهای بالقوه زیست محیطی آن‌ها ایجاد کرده است. نانوذرات می‌توانند از مسیرهای گوناگون وارد سامانه‌های محیط زیستی شوند، از جمله:

- ❖ تخلیه پساب‌های صنعتی؛
- ❖ تخلیه پساب‌های شهری و فاضلاب؛
- ❖ رواناب‌های کشاورزی؛
- ❖ تخریب، فرسایش و هوازگی محصولات مصرفی حاوی نانوذرات.

پس از رهايش در محیط زیست، نانوذرات ممکن است دستخوش فرآیندهای پیچیده‌ای از جمله تجمع، انحلال، اکسایش و برهم کنش با مواد آلی طبیعی، شوند. این فرآیندها بر تحرک، فراهمی زیستی و سمیت نانوذرات تأثیرگذار هستند و در نتیجه، سرنوشت و رفتار آن‌ها را در محیط زیست تعیین می‌کنند [۴]. غلظت عددی نانوذرات به تعداد نانوذرات موجود در واحد حجم یا واحد جرم یک نمونه اشاره دارد. این عامل یکی از شاخص‌های مهم در آنالیز پراکنه‌های^۴ حاوی نانوذرات به شمار می‌رود. علاوه بر این، غلظت عددی، شاخص مناسبی برای ارزیابی سمیت فرآورده‌های حاوی نانوذرات است. اندازه‌گیری دقیق این عامل می‌تواند به صنایع در بهبود کنترل کیفیت فرآیندهای تولید، پایش یکنواختی محصولات و ارتقای نظام تضمین کیفیت کمک کند. در حال حاضر، در بیشتر موارد، غلظت عددی نانوذرات به طور غیرمستقیم و براساس موازنه جرم برآورد می‌شود و هنوز روش مستقیم و صحت‌گذاری شده‌ای برای اندازه‌گیری این عامل وجود ندارد. به منظور دستیابی به یک روش مستقیم برای تعیین غلظت عددی نانوذرات، روش‌های آنالیزی گوناگونی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل فنون مبتنی بر اندازه‌گیری، به عنوان مثال، تهنشینی مرکزگیز تفاضلی^۵، پراکندگی پویای نور چندزاویه‌ای^۶، پراکندگی پرتو ایکس با زاویه کوچک^۷ و طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی^۸ و همچنین روش‌های مبتنی بر شمارش ذرات، از جمله آنالیز ردیابی ذرات^۹، حسگر مقاومت پالسی^{۱۰}، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای، شمارنده ذرات متراکم^{۱۱} و سامانه تحلیل تحرک تفاضلی^{۱۲} هستند. در میان این روش‌ها، ICP-MS و به ویژه sp-ICP-MS، به دلیل حساسیت بالا، قابلیت اندازه‌گیری مستقیم نانوذرات و توانایی تعیین هم‌زمان اندازه ذرات و غلظت عددی آن‌ها، بیش از سایر روش‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در میان روش‌های مختلف تجزیه، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی، به دلیل حساسیت بسیار بالا، قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان چند عنصر و حدود آشکارسازی بسیار پایین، به عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های آنالیز نانوذرات شناخته می‌شود. در این مقاله، دو راهبرد اصلی مبتنی بر ICP-MS برای آنالیز نانوذرات معرفی و بررسی شده‌اند:

- ❖ طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای (sp-ICP-MS) برای شناسایی و اندازه‌گیری مستقیم نانوذرات منفرد در تعلیق‌های آبی.
 - ❖ طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی متداول^{۱۳} برای آنالیز عنصری نانوذرات موجود در ماتریس‌های پیچیده، مانند خاک، رسوبات و بافت‌های زیستی.
- این دو راهبرد، مکمل یکدیگر هستند و امکان توصیف جامع نانوذرات را در نمونه‌های زیستی، محیط‌زیستی و سایر ماتریس‌های پیچیده فراهم می‌کنند.

شکل (۱): نمای کلی اصول اندازه‌گیری نانوذرات به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای، شامل ورود نانوذرات به پلازما، تولید پالس‌های مجزا، مقایسه پاسخ دستگاه در ICP-MS متداول و sp-ICP-MS و ارتباط شدت و تعداد پالس‌ها با اندازه و غلظت عددی نانوذرات.

غلظت عددی نانوذرات نیز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$C_n = \frac{N_{NP}}{\eta_{neb} \cdot \frac{1000}{Q_{sam}} \cdot t_i} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

(C_n): غلظت عددی نانوذرات بر حسب kg^{-1} , (N_{np}): تعداد رویدادهای آشکارسازی شده در طول زمان جمع‌آوری داده‌ها، (η_{neb}): کارایی انتقال مهپاش، (Q_{sam}): نرخ جرمی برداشت نمونه بر حسب $g \cdot min^{-1}$ و (t_i): کل زمان جمع‌آوری داده‌ها بر حسب دقیقه است.

در عمل، همان‌گونه که در رابطه (۱) نشان داده شده‌است، برای برقراری ارتباط میان تعداد رویدادهای آشکارسازی شده در یک پنجره زمانی مشخص (رویش زمانی) و تعداد واقعی نانوذرات موجود در محلول، لازم است کارایی انتقال مهپاش (η_{neb}) تعیین شود. برای محاسبه کارایی انتقال، روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده‌است که از میان آن‌ها، روش‌های مبتنی بر تواتر ذرات و اندازه ذرات از متداول‌ترین روش‌های گزارش شده در منابع علمی به شمار می‌روند [۸]. هر دو رویکرد بر استفاده از مواد مرجع نانوذره‌ای استوار هستند؛ با این حال، این مواد مرجع بسیار محدود بوده و نمونه‌های موجود نیز بیشتر از نظر جنس، اندازه و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی با نانوذرات موجود در نمونه‌های واقعی تفاوت دارند. در روش تواتر ذرات که رایج‌ترین روش برای تعیین کارایی انتقال است، یک ماده مرجع نانوذره تک‌پراکنه^{۱۶} با غلظت جرمی مشخص به دستگاه ICP-MS تزریق می‌شود، این ماده مرجع در بیشتر موارد از نانوذرات طلا با جرم و اندازه اسمی مشخص تشکیل شده‌است. سپس تعداد ذرات آشکارسازی شده در طول زمان روبش اندازه‌گیری و کارایی انتقال مهپاش (η_{neb}) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\eta_{neb} = \frac{N_{NP} \cdot d^3 \cdot \rho_{NP} \cdot \pi \cdot 10^{-9}}{6C_m \cdot Q_{sam} \cdot t_i} \cdot 100\% \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

(N_{np}): تعداد رویدادهای آشکارسازی شده در طول زمان جمع‌آوری داده‌ها، (d): میانگین قطر هسته نانوذرات بر حسب قطر معادل کره هم حجم بر حسب nm، (ρ_{np}): چگالی نانوذرات بر حسب $g \cdot cm^{-3}$ ، (C_m): غلظت جرمی تعلیق نانوذرات بر حسب $ng \cdot kg^{-1}$ و (t_i): کل زمان جمع‌آوری داده‌ها بر حسب دقیقه و (Q_{sam}): نرخ جرمی برداشت نمونه

است که بر حسب $g \cdot min^{-1}$ بیان می‌شود.

در رابطه (۲)، هندسه نانوذرات به‌صورت کره فرض شده و چگالی آن‌ها نیز به‌طور معمول برابر با چگالی ماده توده‌ای در نظر گرفته می‌شود. این فرض برای نانوذرات طلا تقریب مناسبی است، اما برای بسیاری از نانوذرات دیگر همواره صادق نیست. به‌عنوان مثال، سیلیکون‌دی‌اکسید بی‌شکل آبدار، سیلیس استوبر^{۱۷} و کوارتز، با وجود ترکیب شیمیایی مشابه، چگالی‌های متفاوتی دارند. افزون بر این، بسیاری از نانوذرات دارای شکل‌هایی غیرکروی هستند؛ بنابراین، فرض کروی بودن و استفاده از چگالی ماده توده‌ای می‌تواند موجب ایجاد خطا در برآورد اندازه ذرات شود. با این حال، در مورد برخی نانوذرات که به‌صورت کنترل شده سنتز می‌شوند، مانند نانوذرات طلای کروی، این فرض تقریب قابل قبولی به شمار می‌رود.

برقرار نبودن این دو فرض اساسی، موجب افزایش عدم قطعیت در نتایج اندازه‌گیری به روش sp-ICP-MS می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که عدم قطعیت در کارایی انتقال مهپاش (η_{neb})، مهم‌ترین عامل ایجاد عدم قطعیت کلی در اندازه‌گیری غلظت عددی نانوذرات با استفاده از روش تواتر ذرات در sp-ICP-MS است. با این روش، غلظت عددی نانوذرات را می‌توان با عدم قطعیت نسبی گسترش‌یافته‌ای در حدود ۱۲ تا ۱۶ درصد تعیین نمود [۹]. در روش تواتر ذرات، عدم قطعیت برآورد شده برای کارایی انتقال مهپاش (η_{neb}) در حدود ۱۱ درصد گزارش شده‌است [۱۰]. در مقابل، برخی از عوامل، مانند زمان جمع‌آوری داده‌ها و نرخ جرمی برداشت نمونه، با دقت بالایی قابل اندازه‌گیری هستند. یکی دیگر از عوامل کلیدی که به بهینه‌سازی دقیق نیاز دارد، تعداد رویدادهای آشکارسازی شده نانوذرات است.

برای بهینه‌سازی شمارش نانوذرات، عوامل متعددی باید مدنظر قرار گیرند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شرایط کاری دستگاه ICP، زمان ماند، آستانه تفکیک میان سیگنال پس‌زمینه و رویدادهای ناشی از نانوذرات و همچنین ضریب رقیق‌سازی نمونه اشاره کرد. در بهینه‌سازی شرایط کاری ICP، هدف دستیابی به بیشترین شدت سیگنال برای عنصر مورد نظر، همراه با کمترین سهم سیگنال پس‌زمینه است. آستانه آشکارسازی ذرات، حد فاصل میان سیگنال پس‌زمینه و پالس‌های ناشی از رویدادهای نانوذرات را تعیین می‌کند. در مورد نانوذراتی که اندازه آن‌ها به حد آشکارسازی نزدیک است، محل تعیین این آستانه می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عدم قطعیت کلی اندازه‌گیری داشته باشد. از این رو، انتخاب

هم‌حجم تبدیل می‌شود. رابطه بین جرم نانوذره و قطر آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6 \times m_p}{\pi \rho_p}} \times 10^4 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن:

(d_p): قطر معادل کره هم‌حجم نانوذره بر حسب نانومتر (nm)، (p_p): چگالی نانوذره و (m_p): جرم نانوذره است که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$m_p = \frac{1}{f_a} \times \frac{[I_{NP} - I_{BKGD}]}{m} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن:

(f_a): کسر جرمی عنصر آنالیت در نانوذره، (I_{NP}): شدت سیگنال ثبت شده برای نانوذره، (I_{BKGD}): شدت سیگنال پس‌زمینه و (m): شیب منحنی کالیبراسیون جرمی است [۸].

در نتیجه، با معلوم بودن چگالی نانوذرات، جرم آن‌ها به قطر معادل کره هم‌حجم تبدیل می‌شود. از این طریق، روش sp-ICP-MS قادر است توزیع اندازه نانوذرات را در نمونه‌های آبی و تعلیق‌های نانوذره‌ای تعیین کند. روش sp-ICP-MS با تعلیق‌های آبی حاوی بیشتر نانوذرات فلزی، اکسیدهای فلزی و اکسیدهای شبه‌فلزی سازگار است. علاوه بر این، سایر نانوذراتی که با برچسب‌های قابل آشکارسازی با ICP-MS و در غلظتی مناسب برای تفکیک از سیگنال پس‌زمینه نشان‌دار شده باشند، نیز با دقت مناسبی با این روش قابل آشکارسازی و اندازه‌گیری هستند. در منابع علمی، کاربرد sp-ICP-MS برای آنالیز نانوذرات نقره، طلا، سیلیس، تیتانیوم، سرب، سربیم‌دی‌اکسید، پلاتین، پالادیم، آلومینا، سلنیم، آهن‌اکسید، روی‌اکسید، مس، مولیبدن و همچنین نانوذرات کربنی نشان‌دار شده با ایتیریم، کبالت و سایر عناصر گزارش شده است [۱۱].

براساس مطالعات منتشر شده تاکنون، می‌توان با استفاده از یک رابط ICP یا سامانه متداول ورود نمونه، غلظت عددی انواع مختلف نانوذرات را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کرد. این قابلیت، کاربرد روش sp-ICP-MS را برای تعیین غلظت عددی نانوذرات گسترش داده است، زیرا مواد مرجع و نمونه‌های آزمون معتبر هنوز بسیار محدود هستند و تولید مجموعه‌ای جامع از مواد مرجع برای پوشش طیف گسترده نانوذرات موجود در نمونه‌های واقعی، فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه به شمار

مناسب آستانه آشکارسازی برای تعیین دقیق غلظت عددی نانوذرات ضروری است. یکی از رویکردهای پایه برای تفکیک رویدادهای ناشی از نانوذرات از خط پایه ایجاد شده به‌واسطه سیگنال پس‌زمینه یا آنالیت حل‌شده، استفاده از آستانه‌هایی بر مبنای انحراف استاندارد سیگنال خط پایه است. در این روش، آستانه آشکارسازی به‌صورت معمول برابر با سه یا پنج برابر انحراف استاندارد خط پایه (۳σ یا ۵σ) در نظر گرفته می‌شود، اگرچه برخی پژوهشگران از معیارهای ۷σ یا ۸σ نیز استفاده کرده‌اند. انتخاب هر یک از این معیارها بر احتمال شناسایی نادرست رویدادها تأثیر می‌گذارد و در صورت انتخاب آستانه‌های پایین‌تر، تعداد نتایج مثبت کاذب می‌تواند قابل توجه باشد [۱۷].

عدم قطعیت در شمارش نانوذرات از دو مؤلفه اصلی، شامل خطاهای نظام‌مند (اریبی) و خطاهای تصادفی ناشی از فرآیند شمارش، تشکیل می‌شود. این عدم قطعیت را می‌توان با انتخاب یک شار بهینه از نانوذرات، که در آن سهم خطاهای تصادفی و نظام‌مند تقریباً برابر باشد، به حداقل رساند. در چنین شرایطی، احتمال وقوع رویدادهای هم‌زمان ناشی از ورود دو یا چند نانوذره به دستگاه (رویدادهای دوگانه و سه‌گانه) نیز به کمترین مقدار خود می‌رسد.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، روش sp-ICP-MS بر آشکارسازی سیگنال‌های یونی گذرا (پالس‌های گذرا) ناشی از ورود نانوذرات منفرد به پلازما استوار است (شکل (۱)). از آنجا که زمان اقامت هر نانوذره در پلازما بسیار کوتاه و به‌صورت معمول در حد چند صد میکروثانیه است، ابر یونی حاصل به‌صورت یک پالس کوتاه و میرا به آشکارساز می‌رسد. از این پالس‌های گذرا، دو عامل کلیدی شامل شدت پالس و بسامد وقوع پالس‌ها استخراج می‌شود. شدت هر پالس با جرم عنصر موجود در نانوذره متناسب است و با فرض کروی بودن ذرات و معلوم بودن چگالی آن‌ها، می‌توان قطر نانوذرات را محاسبه کرد. همچنین، تعداد پالس‌های ثبت شده در واحد زمان بیانگر تعداد نانوذراتی است که در همان بازه زمانی وارد پلازما می‌شوند. بسامد وقوع پالس‌ها برای تعیین غلظت عددی نانوذرات به کار می‌رود. پیش از اندازه‌گیری نمونه‌ها، دستگاه با استفاده از محلول‌های استاندارد یونی کالیبره می‌شود و سپس جرم هر نانوذره از شدت سیگنال اندازه‌گیری‌شده و براساس منحنی کالیبراسیون به‌دست می‌آید. در ادامه، با فرض کروی بودن نانوذرات و معلوم بودن چگالی آن‌ها، جرم محاسبه شده به قطر معادل کره

نسبت سطح به حجم بالا و واکنش‌پذیری زیاد، بیش از سایر مواد در معرض فرآیندهایی مانند تجمع، کلوخه‌ای شدن و انحلال قرار دارند. از سوی دیگر، امکان بررسی نانوذرات در محیط طبیعی آن‌ها، بدون نیاز به آماده‌سازی گسترده نمونه، از مزیت‌های مهم این روش به شمار می‌رود؛ زیرا هرگونه آماده‌سازی می‌تواند ماهیت شیمیایی نانوذرات را تغییر داده و بر رفتار آن‌ها اثرگذار باشد. به‌عنوان نمونه، کلوخه‌ای شدن نانوذرات نقره در نمونه‌های آب دریای شیشه‌سازی‌شده بررسی شده‌است. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش قدرت یونی محلول، سرعت کلوخه‌ای شدن نانوذرات نیز افزایش می‌یابد [۲۲].

انحلال نانوذرات نقره در محلول‌هایی با ترکیب شیمیایی متفاوت نیز بررسی شده و سرعت انحلال نانوذرات نقره با سه نوع پوشش سطحی مختلف محاسبه شده‌است. نتایج حاصل از sp-ICP-MS نشان داد که کاهش قطر نانوذرات با افزایش شدت سیگنال گونه‌های محلول هم‌بستگی دارد و امکان برقراری موازنه جرمی برای تأیید تبدیل نانوذرات نقره به گونه‌های محلول را فراهم می‌کند [۲۳]. فرآیند انحلال نانوذرات نقره در سامانه‌های طبیعی نیز با استفاده از نانوذراتی با غلظت مشخص بررسی شده‌است [۲۴]. این قابلیت، برای رهگیری تغییرات و تبدیل نانومواد در محصولات تجاری نیز اهمیت زیادی دارد. از آنجا که نانوذرات نقره به‌طور طبیعی در محیط‌زیست دچار انحلال می‌شوند و پوشش‌های سطحی آن‌ها نیز نقش مهمی در فرآیندهای انتقال و تبدیل دارند، خطر زیست‌سمی این نانوذرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از مهم‌ترین و رو به رشدترین حوزه‌های کاربرد sp-ICP-MS، بررسی اثرات مواجهه و فرآیندهای تبدیل نانوذرات در سامانه‌های زیستی است. استفاده از نانوذرات در فرآورده‌های غذایی، تصویربرداری زیستی و سامانه‌های دارورسانی، احتمال ورود آن‌ها به موجودات زنده و برهم‌کنش با فرآیندهای زیستی را افزایش داده است. یکی از چالش‌های اصلی در آنالیز نانوذرات در بافت‌های زیستی، استخراج آن‌ها به فازی مناسب برای اندازه‌گیری دستگاهی، بدون ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها، است. در روش‌های متداول، بافت به‌طور کامل هضم می‌شود؛ در نتیجه، امکان تعیین ویژگی‌های نانوذرات، از جمله اندازه، میزان تجمع و کلوخه‌ای شدن آن‌ها، از بین می‌رود. برای بررسی برداشت نانوذرات طلا و نقره در جانداران مدل، از امواج فراصوت به‌عنوان روش اصلی استخراج نانوذرات فلزی از بافت

می‌رود. چالش اصلی در تعیین غلظت نانوذرات با روش sp-ICP-MS، نیاز به رقیق‌سازی بسیار زیاد نمونه است. در عمل، دستیابی به چنین ضرایب رقیق‌سازی در بسیاری از آزمایشگاه‌ها دشوار است. رقیق‌سازی باید به‌گونه‌ای انجام شود که ویژگی‌ها و پایداری نانوذرات حفظ شود و در عین حال، از بروز پدیده‌های ناخواسته دستگاهی^{۱۸} مانند وقوع رویدادهای هم‌زمان، جلوگیری شود. افزون بر این، ترکیب عنصری نمونه و حضور عنصر به‌صورت محلول نیز از عوامل مهمی هستند که بر کمترین اندازه نانوذرات قابل آشکارسازی تأثیر می‌گذارند [۱۲].

روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای طی یک دهه گذشته به‌طور چشمگیری توسعه یافته و به یکی از ابزارهای مهم برای تعیین غلظت عددی نانوذرات تبدیل شده‌است. این روش که در ابتدا برای اندازه‌گیری تعلیق‌های ساده حاوی نانوذرات پایدار طلا و نقره به کار می‌رفت، امروزه برای آنالیز نانوذرات پیچیده‌تر، مانند سیلیس و تیتانیا، در ماتریس‌های پیچیده‌ای همچون مواد غذایی، فرآورده‌های آرایشی و بافت‌های زیستی نیز به کار گرفته می‌شود و نقش مهمی در کمک به صنایع برای انطباق با الزامات و مقررات موجود ایفا می‌کند.

کاربرد روش sp-ICP-MS نخستین بار در مطالعات شیمی اتمسفر مطرح شد [۱۳] و از آن زمان تاکنون، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه کاربرد این روش برای نمونه‌های محیط‌زیستی انجام شده‌است [۱۴]. برای نمونه، در مطالعات مربوط به گیاهان پالاینده پساب، از sp-ICP-MS برای شناسایی نانوذرات مختلف، از جمله نقره، تیتانیم و سریم، در پساب‌های صنعتی استفاده شده‌است [۱۵]. در این مطالعات، هدف اصلی تعیین اندازه و نوع نانوذرات موجود در پساب‌ها بوده است. پساب‌های صنعتی، تعلیق‌های شیمیایی پیچیده‌ای هستند که علاوه بر نانوذرات، حاوی طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی خطرناک نیز هستند. مطالعات اخیر بیشتر بر رهایش نانوذرات مهندسی‌شده، به‌ویژه نانوذرات نقره و تیتانیم، از محصولات تجاری مانند دستمال‌های کاغذی، بسته‌بندی‌های مواد غذایی، فرآورده‌های ضدآفتاب، پودرهای ماشین ظرف‌شویی و پودرهای ماشین لباس‌شویی متمرکز بوده‌اند [۱۶ تا ۲۰].

یکی از قابلیت‌های مهم روش sp-ICP-MS، آشکارسازی هم‌زمان سیگنال‌های ناشی از نانوذرات و گونه‌های محلول و همچنین اندازه‌گیری غلظت آن‌ها در نمونه‌های محیط‌زیستی است [۲۱]. نانومواد به دلیل

مختل کرده و در نتیجه از تکثیر و گسترش سلول‌های سرطانی جلوگیری می‌کند. در روش SC-ICP-MS، تعلیقی از سلول‌های مورد بررسی به سامانه ورود نمونه دستگاه وارد می‌شود. هر سلول به صورت منفرد وارد پلاسما شده، یونیده می‌شود و ابر یون‌های حاصل از آن به سامانه طیفسنج جرمی هدایت می‌شود. از آنجا که هر سلول به طور جداگانه آشکارسازی می‌شود، مقدار فلز موجود در هر سلول به صورت مستقل اندازه‌گیری خواهد شد. برای جلوگیری از ورود هم‌زمان چند سلول به پلاسما و همپوشانی سیگنال‌ها، به طور معمول از تعلیقی با غلظتی در حدود ۱۰۰۰۰۰ سلول در هر میلی‌لیتر استفاده می‌شود.

بررسی اثر داروهای شیمی‌درمانی بر سلول‌های سرطانی، یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های سرطان‌شناسی است. در روش SC-ICP-MS، مقدار پلاتین موجود در هر سلول سرطانی به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان جذب و اثرگذاری دارو اندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های متداول، ارزیابی اثر داروهای ضدسرطان به طور معمول به اندازه‌گیری متابولیت‌های مرتبط با سرطان یا تعیین غلظت عنصر در سلول‌های هضم‌شده محدود است.

اگرچه تاکنون پیشرفت‌های چشمگیری در توسعه روش SC-ICP-MS حاصل شده‌است اما همچنان چالش‌هایی وجود دارد که زمینه‌ساز پیشرفت‌های بیشتر در آینده خواهد بود. برای دستیابی به کارایی انتقال بالاتر همراه با تکرارپذیری مناسب در اندازه‌گیری‌های بلندمدت، لازم است سامانه‌های ورود نمونه بهبود یابند تا امکان افزایش توان عملیاتی نمونه‌ها فراهم شود. همچنین انتظار می‌رود پژوهش‌های بیشتری در زمینه آماده‌سازی نمونه، به‌ویژه برای نمونه‌های جامد، انجام شود تا روش‌های صحت‌گذاری‌شده‌ای توسعه یابند که توانایی پردازش تعداد زیاد نمونه‌های مورد نیاز در مطالعات سم‌شناسی و ارزیابی ریسک را داشته باشند.

نبود مواد مرجع مناسب برای کالیبراسیون دستگاه، همچنان یکی از چالش‌های اصلی این روش به شمار می‌رود. با این حال، توسعه اخیر روش‌های کالیبراسیون بدون نیاز به ماده مرجع، افق‌های تازه‌ای را برای تعیین ویژگی‌های مواد مرجع و مواد کنترل کیفیت گشوده است. این مواد می‌توانند در روش‌هایی با توان عملیاتی بیشتر، مانند روش تواتر ذرات، که برای طیف گسترده‌ای از کاربردها به مواد مرجع نیاز دارند، مورد استفاده قرار گیرند. درنهایت، توسعه بیشتر نرم‌افزارهای پردازش داده، به‌ویژه برای دستگاه‌های طیفسنجی جرمی پلاسمای

اندام‌های زنده استفاده شده‌است [۲۵]. روش‌های هضم آنزیمی نیز برای استخراج نانوذرات از بافت‌های زیستی به کار گرفته شده‌اند. برای نمونه، از آنزیم پروتئیناز K به منظور استخراج نانوذرات نقره تزریق‌شده به بافت گوشت مرغ استفاده شده‌است. نتایج این مطالعه نشان داد که بازده بازیابی نانوذرات نقره بالا بوده و به حدود ۸۰ درصد می‌رسد [۲۶].

در برخی کاربردها، نانوذرات باید بدون انجام هیچ‌گونه فرآیند هضم و به طور مستقیم در محیط طبیعی خود آنالیز شوند. در چنین شرایطی، می‌توان با رقیق‌سازی نمونه و استفاده از حمام فراصوت، بدون نیاز به هضم کامل بافت، نانوذرات را برای آنالیز آماده کرد. این مطالعات نشان داده‌اند که روش sp-ICP-MS قابلیت شناسایی و تعیین ویژگی‌های نانوذرات با ریخت‌شناسی‌های مختلف، از جمله نانوسیم، نانولیف و نانولوله را دارد. به عنوان مثال، هنگامی که قطر داخلی یک نانولوله مشخص باشد، طول آن از شدت سیگنال مربوط به جرم هر رویداد نانوذره‌ای محاسبه می‌شود [۲۷].

همچنین، پژوهش‌های دیگر توانایی sp-ICP-MS را در شناسایی نانوذرات فلزی پوشش‌دار در سرم خون نشان داده‌اند. افزون بر این، نانوذرات نشان‌دار شده با نشانگرهای زیستی^{۱۹} مختلف با حساسیت بالایی با sp-ICP-MS آنالیز شده و اجزای زیستی متصل به آن‌ها نیز شناسایی می‌شوند [۲۸ تا ۳۰].

در برخی موارد، اندازه نانوذرات کلئیدی، مانند نانوذرات سیلیکا، با روش sp-ICP-MS قابل تعیین نیست؛ زیرا این ذرات بسیار کوچک هستند و سیگنال پس‌زمینه به نسبت زیاد است. این محدودیت به عملکرد دستگاه ICP-Q-MS مربوط می‌شود، زیرا این دستگاه از قدرت تفکیک کافی برای تمایز یون‌های اتمی از یون‌های مولکولی با نسبت جرم به بار (m/z) یکسان برخوردار نیست [۳۱].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش sp-ICP-MS، اندازه‌گیری نانوذرات فلزی در بافت‌های مختلف است [۳۲]. ویژگی اصلی این روش، آشکارسازی ابرهای یون‌های مثبت حاصل از تک‌ذره‌ها است. پیشرفت سامانه‌های جمع‌آوری داده در این دستگاه‌ها، زمینه توسعه رویکردی با عنوان طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌سلولی^{۲۰} را فراهم کرده است که در آن، سلول‌های منفرد به طور مستقیم مورد بررسی قرار می‌گیرند [۳۳]. بسیاری از داروهای مورد استفاده در شیمی‌درمانی سرطان، حاوی فلزات واسطه، به‌ویژه پلاتین، هستند. این فلز با تشکیل پیوندهای کوئوردینانسی پایدار با DNA سلول‌های سرطانی، فرایند همانندسازی DNA را

در روش sp-ICP-MS فراهم کرده است. این پیشرفت‌ها، تعیین ویژگی‌های نانوساختارهای پیچیده، مانند نانوذرات هسته-پوسته، را با دقت بیشتری امکان‌پذیر ساخته‌اند. از سوی دیگر، در زمان‌های ماند میکروثانیه، حد آشکارسازی اندازه ذرات نسبت به زمان‌های ماند میلی‌ثانیه، کمتر تحت تأثیر حضور گونه‌های محلول و سیگنال پس‌زمینه قرار می‌گیرد. در نتیجه، آشکارسازی انتخابی نانوذرات حتی در حضور غلظت‌های زیاد گونه‌های محلول امکان‌پذیر می‌شود. این قابلیت به‌ویژه برای نانوذراتی که مستعد انحلال هستند، مانند نانوذرات نقره، اهمیت زیادی دارد.

جفت‌شده القایی با آنالیزگر زمان پرواز^{۲۱}، ضروری است. این پیشرفت‌ها امکان ثبت هم‌زمان اطلاعات چند ایزوتوپی را با تفکیک زمانی در حد میکروثانیه و در حالت تک‌ذره‌ای فراهم می‌کنند. چنین قابلیت، گزینش بهتر سیگنال‌های آشکارسازی و در نتیجه تعیین دقیق‌تر غلظت عددی نانوذرات با ترکیب عنصری پیچیده، از جمله نانوذرات هسته-پوسته و نانوذرات چندعنصری، را امکان‌پذیر می‌سازد.

پیشرفت‌های اخیر در تجهیزات ICP، از جمله کاهش زمان ماند به مقیاس میکروثانیه و توسعه آشکارسازهای زمان پرواز با قابلیت آشکارسازی شبه‌هم‌زمان چند ایزوتوپی، امکان آشکارسازی چندعنصری و چندایزوتوپی را

نتیجه‌گیری

طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) به یکی از قدرتمندترین روش‌های آنالیزی برای آشکارسازی، اندازه‌گیری و تعیین ویژگی‌های نانوذرات تبدیل شده‌است. این روش با بهره‌گیری از حساسیت بالا، حدود آشکارسازی پایین و قابلیت اندازه‌گیری چندعنصری، امکان بررسی نانوذرات را در نمونه‌های زیستی، محیط‌زیستی و صنعتی فراهم می‌کند. فنون مبتنی بر ICP-MS به‌طور کلی در دو حالت اندازه‌گیری به کار گرفته می‌شوند:

◀ حالت آنالیز توده‌ای (Conventional ICP-MS)، که برای اندازه‌گیری غلظت کل عناصر در نمونه مناسب است.

◀ حالت تک‌ذره‌ای (Single Particle ICP-MS; sp-ICP-MS)، که امکان تعیین اندازه، غلظت عددی، توزیع اندازه و در بسیاری از موارد، بررسی تغییرات و سرنوشت نانوذرات را فراهم می‌کند.

در حالت متداول ICP-MS، گونه‌های محلول سیگنالی پیوسته تولید می‌کنند که شدت آن با غلظت عنصر در نمونه متناسب است. در این حالت، غلظت کل عنصر اندازه‌گیری می‌شود، اما امکان تمایز بین گونه‌های محلول و شکل ذره‌ای آن‌ها وجود ندارد. در مقابل، در روش sp-ICP-MS، هر نانوذره‌ای که وارد پلاسمای می‌شود، به‌جای ایجاد یک سیگنال پیوسته، یک پالس مجزای سیگنال تولید می‌کند. این پالس‌ها امکان شناسایی و اندازه‌گیری نانوذرات منفرد را فراهم می‌کنند.

هر پالس حاصل از یونش یک نانوذره منفرد است. با تحلیل فراوانی و شدت این پالس‌ها، می‌توان ویژگی‌های مهم نانوذرات، از جمله اندازه و غلظت عددی آن‌ها، را تعیین کرد. برای اندازه‌گیری دقیق و قابل اعتماد غلظت عددی نانوذرات، به‌صورت معمول لازم است نمونه به میزان زیادی رقیق شود. با این حال، این روش بیشتر برای نمونه‌هایی با ماتریس به نسبت ساده مناسب است. در بسیاری از کاربردها، بهینه‌سازی نظام‌مند روش‌های آماده‌سازی نمونه، مانند استخراج قلیایی یا آنزیمی و فیلتراسیون، به‌منظور ایجاد تعادل میان کارایی استخراج نانوذرات و حفظ ویژگی‌های آن‌ها، ضروری است. همچنین، برای دستیابی به غلظت مناسب نانوذرات، به‌طور معمول از ضرایب رقیق‌سازی بالا استفاده می‌شود تا احتمال ورود هم‌زمان چند نانوذره به پلاسمای کاهش یافته و در نتیجه، عدم قطعیت ناشی از شمارش ذرات به حداقل برسد.

طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی و توسعه‌های اخیر آن، از جمله روش sp-ICP-MS، فنون آنالیزی دقیقی برای تعیین غلظت نانوذرات، اندازه و توزیع اندازه ذرات، ترکیب عنصری، غلظت عددی ذرات و بررسی فرآیندهای تبدیل آن‌ها در سامانه‌های محیط‌زیستی به شمار می‌روند. در روش متداول ICP-MS، تنها غلظت کل عناصر اندازه‌گیری می‌شود و امکان تمایز بین گونه‌های محلول و نانوذرات وجود ندارد. این محدودیت با توسعه روش طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره‌ای (sp-ICP-MS) تا حد زیادی برطرف شده‌است.

پی‌نوشت

1. Engendered Nanoparticles (ENPs)
2. Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS)
3. Single particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (SP-ICP-MS)
4. dispersion
5. Differential Centrifugal Sedimentation (DCS)
6. Multi-Angle Dynamic Light Scattering (MDLS)
7. Small-Angle X-ray Scattering (SAXS)
8. UV–Vis Spectroscopy
9. Particle Tracking Analysis (PTA)
10. Resistive Pulse Sensing (RPS)
11. Condensation Particle Counter (CPC)
12. Differential Mobility Analysis System (DMAS)
13. Conventional ICP-MS
14. Deguelldre
15. Element-specific
16. Single dispersion
17. Stöber silica
18. instrumental artefacts
19. biomarkers
20. Single Cell ICP-MS (SC-ICP-MS)
21. Time-of-Flight Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (TOF-ICP-MS)

مراجع

- [1] A. P. Gondikas, K. Fvd, R. B. Reed, S. Wagner, J. F. Ranville, T. Hofmann., Environ Sci Technol. 48 (2014), 5415–22.
- [2] H. Rauscher, A. Mech, N. Gibson., LU, Publications Office, 2019.
- [3] S. Guha, L. F. Pease, K. A. Brorson., Journal of Virological Methods, 178 (2011), 201–208.
- [4] A. Mech, H. Rauscher, K. Rasmussen., Publications Office of the European Union, 2020
- [5] F. Laborda, J. Jiménez-Lamana, E. Bolea, J. R. Castillo., J. Anal. At. Spectrom., 29 (2014), 20–28.
- [6] C. Deguelldre, P. Y. Favarger., Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 217 (2003), 137–142.
- [7] F. Laborda, E. Bolea, J. Jiménez-Lamana., Analytical Chemistry, 86 (2014) 5, 2270–2278.
- [8] H. E. Pace, N. J. Rogers, C. Jarolimek, V. K. Coleman, C. P. Higgins, J. F. Ranville., Anal. Chem. 83 (2011), 9361–9369.
- [9] S. Cuello-Núñez, I. Abad-Álvarez, D. Bartczak., J. Anal. At. Spectrom., 35 (2020), 1832–1839.
- [10] K. E. Murphy, J. Liu, A. R. Montoro Bustos., In: NIST SP 1200-21, National Institute of Standards and Technology, Jan. 2016.
- [11] E. Bolea-Fernandez, A. Rua-Ibarz, M. Velimirovic, K. Tirez, F. Vanhaecke., J. Anal. At. Spectrom., 35 (2020), 455–460.

مراجع

- [12] J. Liu, K. E. Murphy, R. I. MacCuspie, M. R. Wincheſte., *Anal Chem.*, 86 (2014), 3405–14.
- [13] T. Nomizu, H. Hayashi, N. Hoshino, T. Tanaka, H. Kawaguchi, K. Kitagawa, *J Anal At Spectrom.*, 17 (2002). 592–5.
- [14] J. Tuoriniemi, G. Cornelis, M. Hassellöv., *Anal Chem.*, 84(2012). 3965–72.
- [15] D. M. Mitrano, E. K. Leshner, A. Bednar, J. Monserud, C. P. Higgins, J. F. Ranville., *Environ Toxicol Chem.*, 31 (2012). 115–21.
- [16] C. Szakal, S. M. Roberts, P. Westerhoff, A. Bartholomaeus, N. Buck, I. Illuminato., *ACS Nano.*, 8 (2014). 3128–35.
- [17] T. M. Benn, P. Westerhoff., *Environ Sci Technol.*, 42 (2008). 4133–239.
- [18] J. Farkas, H. Peter, P. Christian, J. A. Gallego Urrea, M. Hassellöv, J. Tuoriniemi, *Environ Int.*, 37 (2011). 1057–62.
- [19] T.P. Linsinger, R. Peters, S. Weigel., *Anal Bioanal Chem.*, 406 (2014). 3835–43.
- [20] K. Ramos, M. M. Gómez-Gómez, C. Cámara, L. Ramos., *Talanta.*, 151 (2016). 83–90.
- [21] G. Cornelis, M. Hassellöv., *J Anal At Spectrom.*, 29 (2014). 134–44.
- [22] D. António, C. Cascio, Ž. Jakšić, D. Jurašin, D. Lyons, A. Nogueira., *Marine Environ Res*; 2015.
- [23] D. Mitrano, J. Ranville, A. Bednar, K. Kazor, A. Hering, C. Higgins., *Environ Sci: Nano.*, 1 (2014). 248–59.
- [24] L. Furtado, M. Hoque, D. Mitrano, J. Ranville, B. Cheever, P. Froſt., *Environ Chem*; 2014.
- [25] J. G. Coleman, A. J. Kennedy, A. J. Bednar, J. F. Ranville, J. G. Laird, A. R. Harmon., *Environ Toxicol Chem.*, 32 (2013). 2069–77.
- [26] R. J. Peters, Z. H. Rivera, G. van Bommel, H. J. Marvin, S. Weigel, H. Bouwmeester., *Anal Bioanal Chem.*, 406 (2014) 16. 3875–85.
- [27] L. D. Scanlan, R. B. Reed, A. V. Loguinov, P. Antczak, A. Tagmount, S. Aloni., *ACS Nano.*, 7 (2013). 10681–94.
- [28] M. Roman, C. Rigo, H. Caſtillo-Michel, I. Munivrana, V. Vindigni, I. Mičetić., *Anal Bioanal Chem.*, 25 (2015). 1–16.
- [29] S. Hu, R. Liu, S. Zhang, Z. Huang, Z. Xing, X. Zhang., *J Am Soc Mass Spectrom.*, 20 (2009). 1096–103.
- [30] S. Zhang, G. Han, Z. Xing, S. Zhang, X. Zhang., *Anal Chem.*, 86 (2014) , 3541–7.
- [31] S. D. Tanner, V.I. Baranov, D. R. Bandura, “Reaction cells and collision cells for ICP-MS: a tutorial review”, *Spectrochim Acta, Part B.*, 57 (2002). 1361–452.
- [32] D. Mitrano, J. F. Ranville, C. Stephan, “Quantitative Evaluation of Nanoparticle Dissolution Kinetics using Single Particle ICP-MS: A Case Study with Silver Nanoparticles”, *PerkinElmer*, 2014.
- [33] K. Neubauer, C. Stephan, “Determination of Gold and Silver Nanoparticles in Blood using Single Particle ICP-MS”, *PerkinElmer*, 2014.

Authors

Shabnam Najafi AsliPashaki^{1*}Mohammad Barkhi²

*Najafi.grcir@gmail.com

1. Technical manager at GRCIR, Alborz, Iran

2. Acting Deputy of Labs at GRCIR, Alborz, Iran

Tracing nanoparticles by sp-ICP-MS method

Abstract

The rapid expansion of nanotechnology has led to an increasing release of engineered nanoparticles (ENPs) into environmental and biological systems. Accurate detection and characterization of these nanoparticles are essential for understanding their environmental fate, transport mechanisms, bioavailability, and potential toxicological effects. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP MS) has become one of the most powerful analytical techniques for nanoparticle detection due to its exceptional sensitivity, multi element capability, and wide dynamic range. Two major ICP MS based analytical strategies have emerged for nanoparticle studies: single particle ICP MS (sp ICP MS), which enables direct characterization of individual nanoparticles in suspensions, and ICP MS which allows trace elemental analysis in complex environmental matrices such as soil, sediment, and plant tissues.

This review discusses the principles, methodological developments, analytical performance, and applications of sp-ICP-MS approaches. Particular emphasis is placed on its complementary roles in nanoparticle characterization and monitoring of different matrices. The advantages and limitations of each technique are critically evaluated, and future directions for improving ICP MS based nanoparticle analysis are discussed. The integration of particle resolved techniques with robust sample preparation strategies provides a comprehensive framework for accurate nanoparticle analysis in environmental and biological samples. The advantages and limitations of the technique are critically evaluated, and future directions for improving ICP-MS-based nanoparticle analysis are discussed.

Keywords

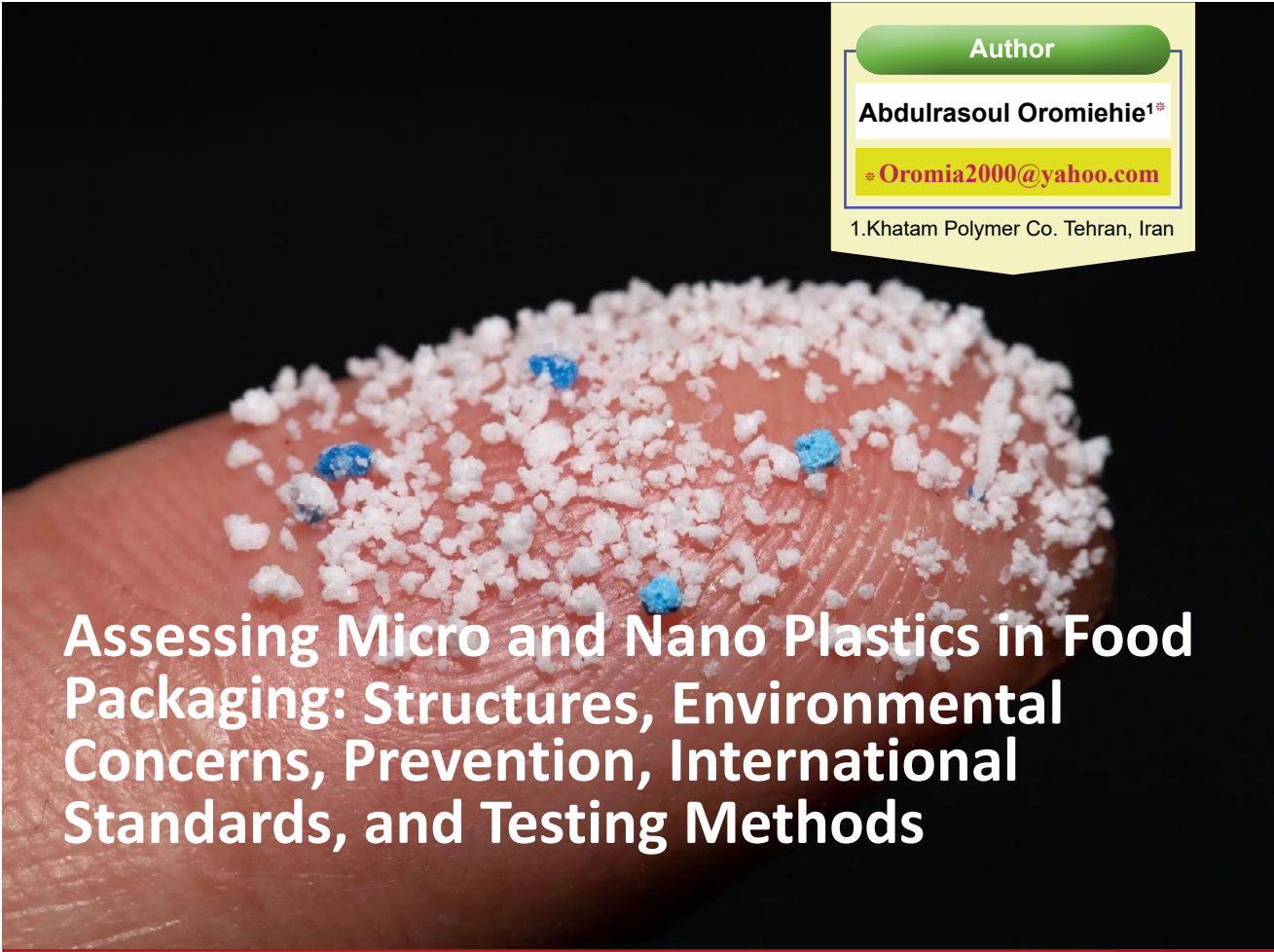
sp ICP MS, engineered nanoparticles, nanoparticle number concentration, elemental analysis, nanomaterial release.

Author

Abdulrasoul Oromiehie¹*

*Oromia2000@yahoo.com

1.Khatam Polymer Co. Tehran, Iran



Assessing Micro and Nano Plastics in Food Packaging: Structures, Environmental Concerns, Prevention, International Standards, and Testing Methods

Abstract

Microplastics and nanoplastics are emerging environmental contaminants originating from the degradation of macroplastics—high-molecular-weight organic polymers. Dispersed across terrestrial, aquatic, and atmospheric compartments, they have become a significant global concern due to their potential implications for human health, food security, and other organisms. These pollutants exhibit considerable diversity in size, shape, color, and chemical composition, deriving from various polymer types or manufacturing additives. Textile microfibers and personal care products also constitute major sources of their release. Microplastics and nanoplastics may be present in numerous plastic products and are primarily generated through degradation, abrasion, or physical damage. Given the pervasive use of plastics in daily life, identifying their sources and mitigating environmental release is of paramount importance. These particles can also contaminate foodstuffs, largely through environmental pollution at sites of production, cultivation, or farming. Human exposure may occur via air inhalation, food consumption, and dermal contact with personal care products. Consequently, the migration of microplastics and nanoplastics from food-contact materials and packaging into food represents a critical food-safety concern, prompting the European Union and the U.S. Food and Drug Administration to establish regulatory frameworks for their control and prevention. This review examines the prevention strategies, international regulations, and analytical testing methods related to microplastics and nanoplastics.

Keywords

Microplastics; Nanoplastics; Food safety; Food-contact materials; Migration; Packaging.

Authors

Majid Ameri^{1*}
Seyed Ebrahim Farzad Kish¹
Tohid Shamousi¹

*Ameri.Majid@JouyaBehnood.com

1. Jouyabehnood Laboratory, Tehran, Iran

Optimization of Crude Cottonseed Oil Neutralization in Laboratory Scale

Abstract

Crude vegetable oils contain significant amounts of impurities, including free fatty acids, phosphatides, pigments, and gummy substances, which adversely affect oil quality and stability. Neutralization is one of the most important steps in the oil refining process, playing a critical role in removing these impurities and improving the quality of the final product. In this study, the laboratory-scale neutralization of crude cottonseed oil was investigated to determine the optimum process conditions. The effects of excess caustic soda, single-stage and two-stage neutralization, reaction temperature, mixing time, caustic solution concentration, and the use of sodium carbonate were evaluated based on final acidity, color, residual soap content, and refining loss. The results showed that two-stage neutralization was more effective than the single-stage process in reducing the red color intensity of the oil, although it resulted in a higher refining loss. The optimum conditions consisted of using 135% excess caustic soda, with 25% of the excess alkali added during the first stage, employing a 20° Baumé caustic solution in the first stage and a 28° Baumé caustic solution in the second stage, at temperatures of 75°C and 70°C, respectively, with a mixing time of 1.5 minutes for each stage. Under these conditions, refined oil with a final acidity of 0.3%, desirable color, and acceptable refining loss was obtained.

Keywords

Oil neutralization; Cottonseed oil; Alkali refining; Free fatty acids; Caustic soda; Sodium carbonate; Refining loss; Oil color.



A Review of Arsenic Contamination Levels in Rice

Authors

H. Parham^{1*}, N. Khelqati²
Z. Soleimani Babadi³
S. N. Mousavi³

*Daplab1394@gmail.com

1. Technical Manager, Danesh Azmoon Parham Jonoub Company, Ahvaz, Khuzestan, Iran
2. Quality Control Manager, Danesh Azmoon Parham Jonoub Company, Ahvaz, Khuzestan, Iran
3. Atomic Absorption Laboratory Analyst, Danesh Azmoon Parham Jonoub Company, Ahvaz, Khuzestan, Iran

Abstract

In recent decades, growing concerns have emerged regarding environmental pollution as a consequence of human activities. Soil contamination with heavy metals is considered one of the major environmental challenges worldwide. These metals enter the environment from both natural sources and anthropogenic activities, particularly agricultural practices involving the use of fertilizers and pesticides. Rice, especially white rice, is one of the most important food commodities worldwide, particularly in Asian countries. The widespread consumption of rice has further emphasized the importance of assessing its safety, particularly with regard to heavy metal contamination. Therefore, continuous monitoring of metal contaminants in rice is essential to protect consumer health.

The adverse effects of heavy metals on human health, the investigation of pathways through which these contaminants enter food products, and the identification of strategies to prevent their release have become important areas of concern. Owing to its cultivation under flooded and anaerobic conditions, rice has a greater capacity for arsenic accumulation than other cereal grains. Exposure to arsenic through the consumption of contaminated rice may result in adverse health effects, including cancer, skin lesions, cardiovascular diseases, metabolic disorders, neurological and developmental impairments, as well as liver and kidney damage.

This review examines the current status of arsenic contamination in rice, the factors affecting its transfer and accumulation, methods for arsenic extraction and determination, and appropriate, cost-effective strategies for reducing arsenic contamination without adversely affecting the desirable quality characteristics of rice.

Keywords

Heavy metals; Arsenic; Rice; Metal contamination.

Authors

Masoomeh Haji-Dadashi^{1*}
Mohammad Reza Ataii^{1,2}

*degatazmoonbasparco@gmail.com

1. Deghat Azmoon Baspar Co, Zanjan, Iran
2. Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran



Emerging Trends and Novel Applications of the Melt Flow Index

Abstract

The Melt Flow Index (MFI) or Melt Flow Rate (MFR) has been one of the fundamental rheological tests in the polymer field for decades, primarily for quality control. Recent technological advances and changing industrial priorities have created new applications in recent years that go far beyond its traditional use in verifying batch processes. This paper examines four emerging areas where the melt flow index test has gained increasing importance: (1) the development of feedstocks for additive manufacturing (3D printing), where the melt flow index guides filament formulation and optimization of printing parameters; (2) machine learning-based predictive quality assurance, which transforms the melt flow index from a lagging indicator into an instantaneous process control parameter; (3) equipment innovation through load cell technology and automation, which increases precision and enables new testing protocols; (4) strengthening the circular economy through distributed recycling, which makes it possible to characterize polymer properties for sustainability initiatives on a community scale. These applications introduce the melt flow index not merely as a passive quality metric, but as an active factor in shaping smart manufacturing, sustainable material flows, and decentralized innovation.

Keywords

Melt Flow Index (MFI), Additive Manufacturing (3D Printing), Predictive Quality Control, Machine Learning, Circular Economy, Polymer Rheology.

Authors

Mahsa Esmaeilzadeh¹
Moslem Jahani^{2*}

***m.jahani@RIFST.ac.ir**

1. Biotechnology Laboratory Expert, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
2. Director of the Central Laboratory, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran



Detection of soybean transgenicity using polymerase chain reaction method in the central laboratory of the Research Institute of Food Science and Technology

Abstract

Transgenic crops offer benefits such as higher yields and pest resistance. However, they raise concerns regarding environmental impact and food safety, as well as potential effects on ecosystems and human health. Therefore, identifying and distinguishing genetically modified products is of particular importance. In this study, a certified reference sample of transgenic soybean was used to evaluate the efficiency of the polymerase chain reaction method in detecting transgenic food products. In the first stage, after grinding the sample in the presence of liquid nitrogen, DNA was extracted manually using cetyltrimethylammonium bromide buffer. Then, the purity and concentration of DNA were determined using a Nanodrop device, and PCR was performed using specific primers. The results of electrophoresis on agarose gel confirmed the presence of specific sequences associated with transgenicity in the sample under study. Based on the results, the PCR method has appropriate accuracy and efficiency for identifying transgenic products, which can be used as a fast and reliable method in food quality control laboratories.

Keywords

transgenic, DNA extraction, polymerase chain reaction, primer, CTAB buffer



Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Volume 14 ■ Issue 2 ■ Summer 2026 ■ No.54

ISSN 2538-3450

Concessionaire:

Iran Nanotechnology Innovation Council

Managing Editor: Alireza Badieli

Editor in Chief: Mojtaba Nasab

Executive Management: Iran Nanotechnology
Laboratory Network (INLN)

Article Editor: Davoud Gharailou

Authors:

Shabnam Najafi AsliPashaki
Mohammad Barkhi, Abdulrasoul Oromiehie
Majid Ameri, Seyed Ebrahim Farzad Kish
Tohid Shamousi, H. Parham, N. Khelqati
Z. Soleimani Babadi, S. N. Mousavi
Masoomah Haji-Dadashi, Mohammad Reza Ataii
Mahsa Esmaeilzadeh, Moslem Jahani

Designer : Simin Rafipour Langroudi

Editor: Zeinab Zarincheh

Iran, Tehran, Po.Box: 14565-344

www.IJLK.ir

Email : info@ijlk.ir



Iran Nanotechnology
Laboratory Network

Contents



Tracing nanoparticles by sp-ICP-MS
method

>65



Assessing Micro and Nano Plastics
in Food Packaging: Structures,
Environmental Concerns,
Prevention, International Stan-
dards, and Testing Methods

>66



Optimization of Crude
Cottonseed Oil Neutralization in Laboratory
Scale

>67



A Review of Arsenic Contamination
Levels in Rice

>68



Emerging Trends and Novel Appli-
cations of the Melt Flow Index

>69



Detection of soybean transgenicity
using polymerase chain reaction
method in the central laboratory of
the Research Institute of Food Sci-
ence and Technology

>70



Tracing nanoparticles by sp-ICP-MS method



Detection of soybean transgenic-
ity using polymerase chain
reaction method in the central
laboratory of the Research
Institute of Food Science and
Technology



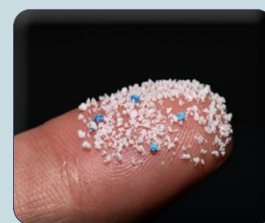
Emerging Trends and Novel
Applications of the Melt Flow
Index



A Review of Arsenic
Contamination Levels in Rice



Optimization of Crude
Cottonseed Oil Neutralization in
Laboratory Scale



Assessing Micro and Nano
Plastics in Food Packaging:
Structures, Environmental
Concerns, Prevention, Interna-
tional Standards, and Testing
Methods