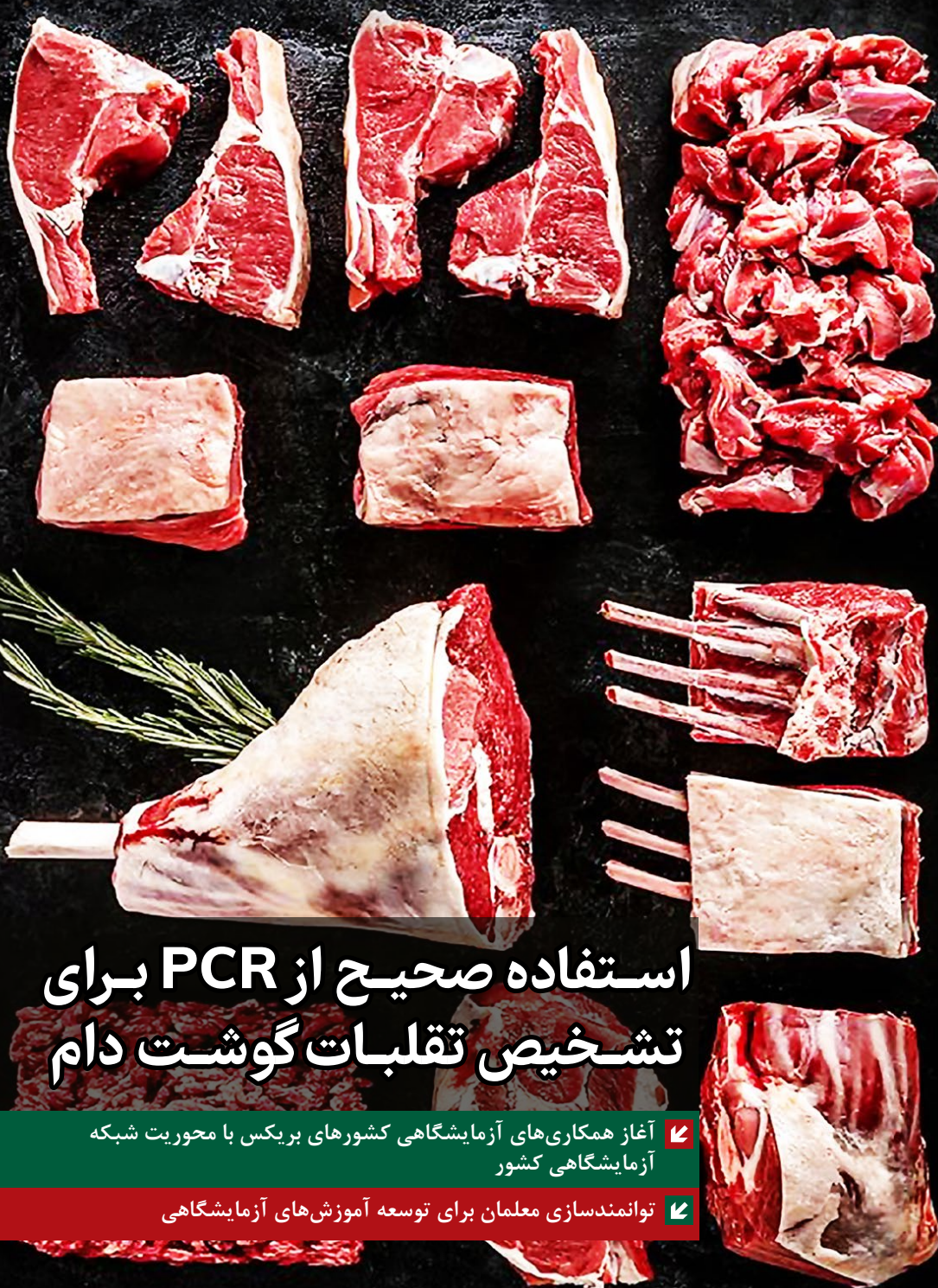


# دانش آزمایشگاهی ایران

سال چهاردهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۵ ■ شماره پیاپی ۵۳

ISSN 2538-3450



## استفاده صحیح از PCR برای تشخیص تقلبات گوشت دام

➡ آغاز همکاری‌های آزمایشگاهی کشورهای بریکس با محوریت شبکه آزمایشگاهی کشور

➡ توانمندسازی معلمان برای توسعه آموزش‌های آزمایشگاهی



آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و نفوذ جیوه در بررسی رفتار بتن در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن



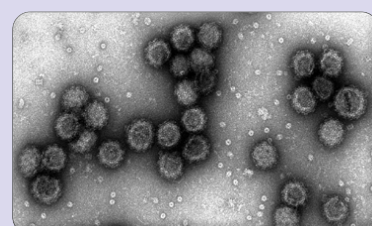
آشنایی با برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی در آزمایشگاه



تحلیل گرموزن‌سنجی؛ مفاهیم، اصول و کاربردها



نقشه راه توسعه زیر ساخت‌های آنالیز مواد در ایران: تحلیل آماری مقالات ISI در پنج سال اخیر و مقایسه جهانی-منطقه‌ای



بررسی برخی خطاهای رایج در کار با میکروسکوپ الکترونی عبوری و راه‌های پیشگیری از آن‌ها







# فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران

سال چهاردهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۵ ■ شماره پیاپی ۵۳

ISSN 2538-3450

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

سر دبیر: علیرضا بدیعی

مدیر مسئول: مجتبی نسب

مدیریت اجرایی: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

دبیر مقالات: داود قزایلو

همکاران این شماره: شبتم نجفی اصلی پاشاکی، مسعود قمری  
دکتر عبدالرسول ارومیه‌ای، پدram ملائکه، ندا سادات فعال نظری  
مجتبی تقی‌پور، داود قزایلو، فاطمه مهدی‌پور

طراحی و صفحه آرایی: سیمین رفیع‌پور 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

آغاز همکاری‌های آزمایشگاهی کشورهای بریکس با محوریت شبکه  
آزمایشگاهی کشور

۲ <

توانمندسازی معلمان برای توسعه آموزش‌های آزمایشگاهی

۲ <

روش آزمون تعیین غلظت نانولوله‌های کربنی در هوای محیط با  
میکروسکوپ الکترونی عبوری (ASTM D8526:2023)

۸ <



آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و نفوذ جیوه در  
بررسی رفتار بتن در اثر چرخه‌های یخ زدن  
و آب شدن

۹ <



آشنایی با برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی  
در آزمایشگاه

۱۸ <



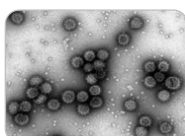
تحلیل گرماوزن‌سنجی؛ مفاهیم، اصول و  
کاربردها

۲۳ <



نقشه راه توسعه زیر ساخت‌های آنالیز مواد در  
ایران: تحلیل آماری مقالات ISI در پنج سال اخیر و  
مقایسه جهانی-منطقه‌ای

۲۹ <



بررسی برخی خطاهای رایج در کار با میکروسکوپ  
الکترونی عبوری و راه‌های پیشگیری از آن‌ها

۳۸ <



استفاده صحیح از PCR برای تشخیص  
تقلبات گوشت دام

۵۲ <

## آغاز همکاری‌های آزمایشگاهی کشورهای بریکس با محوریت شبکه آزمایشگاهی کشور



این کارگروه تخصصی، گفت: معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست‌جمهوری، شبکه آزمایشگاهی کشور را به عنوان نقطه کانونی همکاری‌های آزمایشگاهی در بریکس منصوب کرده است. بر این اساس، ما وظیفه داریم ظرفیت‌های ملی را در قالب یک نظام شبکه‌ای به کشورهای عضو معرفی کنیم.

یکی از پیشنهاد‌های مهم ایران که توسط مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور و طی ارائه‌ای تفصیلی مطرح شد، پیوستن و اتصال شبکه آزمایشگاهی کشور به شبکه آزمایشگاهی کشورهای عضو بریکس بود تا دسترسی متقابل به تجهیزات و خدمات پیشرفته آزمایشگاهی، تسهیل شود.

مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور، با تشریح توانمندی‌ها و ظرفیت‌های ایران در حوزه زیرساخت‌های پژوهشی، گفت: شبکه آزمایشگاهی کشور به عنوان بستر ملی ارائه خدمات تخصصی، نقش مهمی در توسعه همکاری‌های علمی و تبادل فناوری میان ایران و اعضای بریکس ایفا می‌کند.

یونسیان، بر آمادگی شبکه آزمایشگاهی کشور برای به‌اشتراک‌گذاری تجربیات عملیاتی، ارائه خدمات تخصصی، تعریف پروژه‌های مشترک و ایجاد دسترسی متقابل میان پژوهشگران ایران و کشورهای عضو بریکس تاکید کرد. وی با اشاره به مجموعه‌ای از زیرساخت‌های مرجع و پیشرفته ایران در حوزه‌های علوم پایه، نروساینس، فیزیک ذرات و تحقیقات زیستی، افزود: ایران طی سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری راهبردی در زیرساخت‌های پیشرفته علمی انجام داده و این ظرفیت‌ها اکنون آماده مشارکت فعال در برنامه‌های مشترک بریکس هستند. وی همچنین، چهار زیرساخت ملی معرفی‌شده ایران را تشریح کرد و گفت: رصدخانه ملی ایران برای تحقیقات



امیر یونسیان مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور در حاشیه هفتمین نشست کارگروه زیرساخت‌های پژوهشی و کلان‌پروژه‌های علمی کشورهای بریکس که به میزبانی جمهوری اسلامی ایران برگزار شد، از نقش آفرینی شبکه آزمایشگاهی کشور، به عنوان بستر تعامل ایران و کشورهای بریکس، برای توسعه همکاری‌های آزمایشگاهی خبر داد و گفت: شبکه آزمایشگاهی کشور امروز به‌عنوان نقطه کانونی همکاری‌های زیرساختی ایران در بریکس عمل می‌کند و می‌تواند پیونددهنده ظرفیت‌های علمی جمهوری اسلامی ایران با زیرساخت‌های پژوهشی سایر کشورهای عضو باشد.

یونسیان ادامه داد: هدف ما این است که مدل شبکه‌ای ایران را که موفق به یکپارچه‌سازی و به‌هم‌رسانی توان آزمایشگاهی در سطح ملی شده، در سطح بین‌المللی نیز گسترش دهیم و زمینه ایجاد یک سازوکار پایدار برای همکاری‌های چندجانبه را فراهم کنیم. وی با اشاره به حضور پررنگ جمهوری اسلامی ایران در





اپتیکی و فرسرخ، پروژه شتابگر ملی در قزوین به عنوان نسل چهارم منابع سینکروترون، آزمایشگاه ملی نقشه برداری مغز با مجموعه‌ای متنوع از آزمایشگاه‌های پیشرفته نوروتصویربرداری، تحریک مغزی و پردازش داده و مرکز ملی پژوهش‌های نخست‌نی‌سانان که نخستین مرکز اختصاصی کشور برای مطالعات پیشرفته علوم اعصاب و بیماری‌های عصبی محسوب می‌شود، تنها بخشی از زیرساخت‌های تحقیقاتی کلان ایران هستند. مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور تأکید کرد: این زیرساخت‌ها می‌توانند پایه اجرای پروژه‌های مشترک، تحقیقات میان‌رشته‌ای و توسعه فناوری‌های نوظهور بین ایران و کشورهای بریکس باشند.





## توانمندسازی معلمان برای توسعه آموزش‌های آزمایشگاهی



به گزارش پایگاه خبری شبکه آزمایشگاهی کشور، امیر یونسین، مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور، با اشاره به اجرای طرح جامع مهارت‌آموزی دانش‌آموزان اظهار کرد: این طرح در بازه زمانی پاییز ۱۴۰۴ تا بهار ۱۴۰۵ با حمایت شبکه آزمایشگاهی کشور برگزار شد. این برنامه با رویکرد تلفیق آموزش نظری و عملی، ارتقای کیفیت یادگیری، افزایش انگیزه دانش‌آموزان و آشنایی نسل آینده با فناوری‌های نوین طراحی و اجرا شد.

این برنامه در دو بخش «دوره توانمندسازی معلمان آزمایشگاه‌های دانش‌آموزی» و «مسابقه ملی آزمایشگر کوچک، افتخار فردا» برگزار شد و توانست زمینه آشنایی معلمان و دانش‌آموزان با حوزه‌های نوظهور زیست‌فناوری، نانوفناوری و سلول‌های بنیادی را فراهم کند.

**شبکه آزمایشگاهی کشور**  
**برنامه جامع مهارت‌آموزی دانش‌آموزان**  
دوره توانمندسازی دبیران آزمایشگاه‌های دانش‌آموزی

**سرفصل‌های آموزشی دوره:**

- آشنایی با برنامه‌ها، خدمات و حمایت‌های شبکه آزمایشگاهی کشور
- آشنایی با تجهیزات و دستگاه‌های آزمایشگاهی
- ایمنی و استاندارد در آزمایشگاه
- آموزش فناوری‌های نوین و روش تدریس آن به دانش‌آموزان ابتدایی همراه با آزمایش
- بازدید از آزمایشگاه‌های عضو شبکه آزمایشگاهی کشور

**زمان برگزاری:** ۲۷ و ۲۸ آبان ۱۴۰۴  
**مکان برگزاری:** سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

www.Labsnet.ir  
info@labsnet.ir  
@LabsNet







## مسابقه ملی «آزمایشگر کوچک، افتخار فردا»، امید آفرین و زمینه ساز پرورش نسل آینده فناوران کشور



به گزارش پایگاه خبری شبکه آزمایشگاهی کشور، امیر یونسین، مدیر شبکه آزمایشگاهی کشور، با اشاره به اجرای طرح جامع مهارت آموزی دانش آموزان اظهار کرد: این طرح در بازه زمانی پاییز ۱۴۰۴ تا بهار ۱۴۰۵ با حمایت شبکه آزمایشگاهی کشور برگزار شد. این برنامه با رویکرد تلفیق آموزش نظری و عملی، ارتقای کیفیت یادگیری، افزایش انگیزه دانش آموزان و آشنایی نسل آینده با فناوری های نوین طراحی و اجرا شد. این برنامه در دو بخش «دوره توانمندسازی معلمان آزمایشگاه های دانش آموزی» و «مسابقه ملی آزمایشگر کوچک، افتخار فردا» برگزار شد و توانست زمینه آشنایی معلمان و دانش آموزان با حوزه های نوظهور زیست فناوری، نانوفناوری و سلول های بنیادی را فراهم کند.

### ● رقابت ۶۵۰ اثر در مسابقه ملی آزمایشگر کوچک، افتخار فردا

همچنین شبکه های ارتباطی متعددی برای پاسخگویی، دریافت آثار و ارائه راهنمایی های آموزشی ایجاد گردید. در پایان مهلت ارسال آثار، ۶۵۰ اثر به دبیرخانه مسابقه رسید که از این تعداد، ۴۹۸ اثر در موضوعات تعیین شده مسابقه و ۱۵۲ اثر در سایر موضوعات علوم تجربی مقطع ابتدایی بود. در میان آثار تخصصی نیز ۲۲۱ اثر در حوزه زیست فناوری، ۱۹۸ اثر در حوزه نانوفناوری و ۷۹ اثر در حوزه سلول های بنیادی ارائه شد.

مسابقه ملی «آزمایشگر کوچک، افتخار فردا» از ۱۸ بهمن ۱۴۰۴ تا ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۵ برگزار شد. این مسابقه با هدف آشنایی دانش آموزان مقطع ابتدایی با فناوری های نوین، تقویت روحیه پژوهشگری و ترویج فرهنگ انجام آزمایش های علمی طراحی شد. برای اجرای این مسابقه، ۱۷ دستورکار آزمایش متناسب با دانش آموزان ابتدایی تدوین شد و محتوای آموزشی و اقلام مورد نیاز در اختیار معلمان و دانش آموزان قرار گرفت.

### ● مشارکت گسترده دانش آموزان از سراسر کشور

کشور بوده اند که نشان دهنده دسترسی مناسب برنامه به طیف گسترده ای از دانش آموزان است. از مجموع آثار دریافتی، ۶۶ درصد شامل ۴۳۱ اثر متعلق به دانش آموزان مقطع ابتدایی دوم و ۳۴ درصد شامل ۲۱۹ اثر مربوط به دانش آموزان مقطع ابتدایی اول بوده است. همچنین ۵۵ درصد آزمایش ها در محیط خانه و ۴۵ درصد در مدارس و پژوهش سراها انجام شده است.

در این مسابقه، دانش آموزانی از تمامی استان های کشور (به جز سیستان و بلوچستان) در این رقابت شرکت کردند و استان تهران با ۱۴۴ اثر بیشترین میزان مشارکت را به خود اختصاص داد. همچنین حضور دانش آموزان مناطق کمتر برخوردار و روستاهای مختلف کشور از جمله قاین، سقز، سنقر و کلیایی، گتوند، هویزه، مانه و سملقان، و سرایان، از ویژگی های قابل توجه این مسابقه بود. بررسی آثار نشان می دهد حدود نیمی از شرکت کنندگان از شهرها و مناطق کمتر برخوردار



## نقش مؤثر معلمان و مراکز آموزشی

همچنین ۳۱ مرکز آموزشی شامل پژوهش‌سراها، مدارس و مؤسسات آموزشی از ۱۵ استان کشور در اجرای مسابقه مشارکت داشتند. پژوهش‌سرای جابرین حیان قزوین، پژوهش‌سرای شهید مطهری تبریز، دبستان شاهد یاس نبی(س) قاین و پژوهش‌سرای ابن‌سینا ملارد، از جمله مراکزی بودند که بیش‌ترین تعداد آثار را به دبیرخانه مسابقه ارسال کرده‌اند.

در این مسابقه، ۶۴ دبیر، دانش‌آموزان را هدایت و راهنمایی کرده‌اند. علاوه بر آن، ۲۸ دبیر در سراسر کشور بر اساس محتوای آموزشی مسابقه، دوره‌های آموزشی ویژه دانش‌آموزان و معلمان برگزار کردند که حاصل آن برگزاری ۳۸ دوره آموزشی برای دانش‌آموزان با بیش از یک‌هزار و ۱۶۵ شرکت‌کننده، و ۲۹ دوره آموزشی برای معلمان با بیش از یک‌هزار و ۲۳۰ شرکت‌کننده بود.

## ارزیابی آثار و معرفی برگزیدگان

مورد بررسی قرار گرفت و دبیران برتر در حوزه‌های مختلف فناوری معرفی شدند.

از میان ۲۴ دبیر ثبت‌نام‌کننده در مسابقه نیز ۲۸ نفر با برگزاری دوره‌های آموزشی برای دانش‌آموزان و معلمان در فرآیند ترویج آموزش‌های علمی مشارکت داشتند. عملکرد این گروه بر اساس تعداد مخاطبان آموزش‌دیده ارزیابی شد و پنج دبیر برتر این بخش معرفی شدند. ۱۱ نفر از دبیران مشارکت‌کننده نیز به طور هم‌زمان در برگزاری دوره‌های آموزشی و راهنمایی دانش‌آموزان برای حضور در مسابقه نقش‌آفرینی کرده‌اند.

در بخش مراکز مشارکت‌کننده نیز ۳۱ مرکز شامل پژوهش‌سراهای دانش‌آموزی، مدارس و مؤسسات آموزشی مورد ارزیابی قرار گرفتند و از میان آن‌ها چهار مجموعه که بیش از ۲۰ اثر به دبیرخانه مسابقه ارسال کرده بودند، به عنوان مراکز منتخب معرفی شدند.

فهرست کامل برگزیدگان این مسابقه در پایگاه اینترنتی شبکه آزمایشگاهی کشور به نشانی [www.LabsNet.ir](http://www.LabsNet.ir) منتشر شده است.

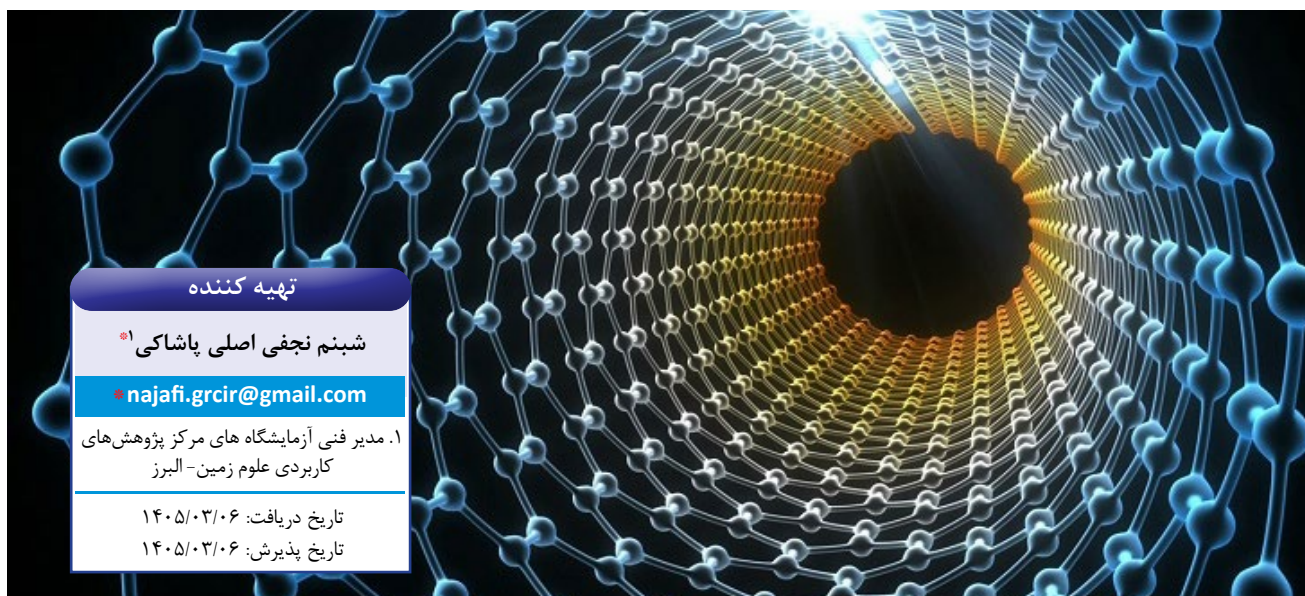
در مرحله نهایی مسابقه، مستندات و آثار ارسالی در چهار بخش شامل آثار دانش‌آموزی، دبیران راهنما، دبیران برگزارکننده دوره‌های آموزشی و مراکز مشارکت‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت. آثار دانش‌آموزان بر اساس شاخص‌هایی همچون تبیین هدف آزمایش، صحت اجرای مراحل، توانایی تحلیل نتایج، کیفیت ارائه و رعایت اصول تولید محتوا بررسی شد و در نهایت برگزیدگان هر یک از حوزه‌های زیست‌فناوری، فناوری نانو و سلول‌های بنیادی با توجه به محل اجرای آزمایش و مقطع تحصیلی معرفی شدند.

بررسی نتایج مسابقه نشان داده است که حضور معلم راهنما در کنار دانش‌آموزان تأثیر مثبتی بر کیفیت اجرای آزمایش‌ها و نتایج حاصل از آن داشته است. با این حال اختلاف ناچیز میانگین امتیازات نشان می‌دهد، دانش‌آموزان حتی در شرایط انجام آزمایش در خانه و با بهره‌گیری از محتوای آموزشی ارائه شده از سوی شبکه آزمایشگاهی نیز توانسته‌اند فعالیت‌های آزمایشگاهی را با موفقیت اجرا کنند.

در بخش ارزیابی دبیران راهنما، عملکرد ۴۶ معلم مشارکت‌کننده بر اساس شاخص‌هایی نظیر تعداد آثار هدایت‌شده، تنوع موضوعی و کیفیت آموزش‌های ارائه‌شده

## توسعه امید و نشاط علمی در شرایط خاص کشور

استقبال گسترده دانش‌آموزان و خانواده‌ها از این برنامه، به‌ویژه در شرایطی که مدارس و مراکز آموزشی با محدودیت‌هایی مواجه بودند، نشان‌دهنده ظرفیت بالای آموزش‌های آزمایشگاهی برای ایجاد انگیزه، نشاط و امید در میان دانش‌آموزان است. بر اساس نتایج این برنامه، برگزاری دوره‌های منظم توانمندسازی معلمان، توسعه آموزش‌های مجازی، افزودن حوزه‌هایی همچون هوش مصنوعی، هوافضا و انرژی به برنامه‌های آموزشی و همچنین گسترش مسابقه در سطح بین‌المللی از جمله پیشنهادهای مطرح‌شده برای دوره‌های آینده است.



تهیه کننده

شبمن نجفی اصلی پاشاکی<sup>۱</sup>

✉ najafi.grcir@gmail.com

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶

## روش آزمون تعیین غلظت نانولوله های کربنی در هوای محیط با میکروسکوپ الکترونی عبوری

(ASTM D8526:2023)

در نمونه های هوای محیطی، نانولوله های کربنی نه تنها به صورت منفرد، بلکه بیشتر به شکل انبوه های پیچیده یا در همراهی با سایر ذرات یافت می شوند. در این استاندارد، همه این حالت ها با عنوان «ساختارهای نانولوله ای» طبقه بندی می شوند. هر گروه پیوسته از ذرات که در آن حداقل یک نانولوله کربنی با طول ۲۵۰ نانومتر یا بیشتر شناسایی شود، باید در شمارش ثبت شده و حداقل طول قابل گزارش نیز ۲۵۰ نانومتر است، اما الیاف کوتاه تر می توانند به صورت جداگانه گزارش شوند. همچنین، بیشینه غلظت قابل اندازه گیری با این روش ۷۰۰۰ ساختار در هر میلی متر مربع تعیین شده است که معادل غلظت هوایی وابسته به حجم نمونه برداری شده است.

اهمیت این روش در توانایی آن برای اندازه گیری نانولوله های کربنی هوابرد در شرایط گوناگون محیطی و ارزیابی هر نوع جواز نظر حضور این ساختارهاست. از آنجا که قطر نانولوله های کربنی از حد تفکیک میکروسکوپ نوری کوچک تر است، استفاده از میکروسکوپی الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا، روشی قابل اعتماد و بدون ابهام برای شناسایی حتی نازک ترین نانولوله ها محسوب می شود. این روش برای آنالیز یک فیلتر واحد طراحی شده و دقت آن مربوط به همان فیلتر است. با این حال، برای بررسی تغییرات غلظت در مکان و زمان، به صورت معمول به نمونه های متعددی نیاز است؛ چرا که تنوع بین نمونه ها به طور معمول بیشتر از تنوع درون یک نمونه است.

در این روش آزمون استاندارد، یک رویکرد تحلیلی مبتنی بر میکروسکوپی الکترونی عبوری<sup>۱</sup> برای تعیین غلظت نانولوله های کربنی و ذرات حاوی آن ها در جوهای محیطی (فضای باز و محیط های داخلی) ارائه شده است. این روش به طور ویژه برای فیلترهای غشایی پلی کربناتی با حفره های موبینگ طراحی شده که حجم معینی از هوا از آن ها عبور داده شده است. کاربرد این روش مستلزم آن است که پوشش ذرات بر سطح فیلتر از ۲۵ درصد بیشتر نشود؛ در غیر این صورت، انجام آنالیز مستقیم امکان پذیر نخواهد بود. واحدهای اندازه گیری براساس سیستم بین المللی<sup>۲</sup> بیان شده اند و مسئولیت رعایت الزامات ایمنی، بهداشتی و زیست محیطی بر عهده کاربر است.

فرآیند نمونه برداری شامل عبور حجم معینی از هوا از میان یک فیلتر پلی کربناتی با بیشینه اندازه منافذ ۰/۴ میکرومتر است. سپس سطح فیلتر با یک لایه نازک از کربن، از طریق تبخیر در خلاء پوشش داده می شود. بخش های کوچکی از این فیلتر پوشش داده شده بریده شده و روی شبکه های مخصوص نمونه گیری TEM قرار می گیرند. در ادامه، با استفاده از یک حلال، بستر فیلتر حل می شود و تنها فیلم نازک کربنی همراه با ذرات، در جای اولیه خود باقی می ماند. در نهایت، این شبکه ها با بزرگنمایی پایین و بالا بررسی می شوند و در صورت نیاز، ترکیب عنصری نانولوله ها با روش طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس<sup>۳</sup> تأیید می شود.

1. Transmission Electron Microscopy (TEM)  
2. International System of Units (SI)

3. Energy dispersive X-ray analysis (EDXA)



## نویسنده

مسعود قمری<sup>۱</sup>\*

۱. شرکت دوام بنیان حامی ایرانیان، همدان، ایران

\*ghamari.eng@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷



# آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و نفوذ جیوه در بررسی رفتار بتن در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن

## واژه‌های کلیدی

مقاومت الکتریکی، نفوذ جیوه، بتن، سازه، ساختمان، آزمایش غیرمخرب.

## چکیده

بررسی رفتار مواد سیمانی در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، شامل بتن، ملات و خمیر سیمان، با شناخت ساختار حفره‌های داخلی آن‌ها ارتباطی مستقیم دارد. حتی اگر شرایط بیرونی به‌عنوان مثال، دما یا رطوبت تغییر کند، این دگرگونی در ساختار داخلی این مواد نیز بازتاب می‌یابد. ساختار داخلی مواد سیمانی را می‌توان با روش‌های مخرب و غیرمخرب بررسی کرد. سنجش مقاومت الکتریکی و آزمایش نفوذ جیوه از جمله روش‌های غیرمخرب‌اند که به دلیل سادگی و روشن بودن مبنای آن‌ها، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. این مقاله مروری می‌کوشد گزارشی از روند پژوهش‌ها در سال‌های اخیر درباره این موضوع ارائه دهد. ابتدا کلیاتی درباره دو روش سنجش مقاومت الکتریکی و آزمایش نفوذ جیوه بیان شده و سپس وضعیت پژوهش در جهان بررسی می‌شود. در بخش سوم، شماری از مقاله‌های منتشرشده در این زمینه مرور می‌شوند. همچنین در پایان مطالب جمع‌بندی شده و نتیجه‌گیری کلی، همراه با پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده، ارائه می‌شود.

## مقدمه

یخ زدن و آب شدن پدیده‌ای است که به تخریب داخلی و سطحی بتن می‌انجامد و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های دوام بتن به‌شمار می‌رود. آب محبوس در حفره‌های داخلی بتن، در طول چرخه‌های یخ زدن و آب شدن باعث ایجاد آسیب می‌شود؛ از این رو، بررسی اندازه و توزیع حفره‌های موجود در بتن برای برآورد مقاومت آن در برابر این پدیده ضروری است. سنجش مقاومت الکتریکی و آزمایش نفوذ جیوه دو روش برای برآورد میزان دوام بتن هستند.

## ■ مقاومت الکتریکی

◀ هندسه نمونه: مقاومت الکتریکی از دیدگاه علم فیزیک به هندسه نمونه (طول و سطح مقطع) وابسته است.

◀ فرکانس و شکل جریان: فرکانس و شکل جریان القایی (مستقیم یا متناوب) مقادیر مختلفی از مقاومت را گزارش می‌دهند.

◀ دما: دما در عمل آوری و همچنین فرآیند یخ زدن و آب شدن مهم است.

◀ رطوبت نمونه: هر چه رطوبت بیشتر باشد، انتقال الکتریسیته راحت‌تر صورت می‌گیرد.

## ■ آزمایش نفوذ جیوه

آزمایش نفوذ جیوه برای تشخیص ساختار تخلخلی بتن به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۳]. این آزمایش، علاوه بر بتن و مواد سیمانی، برای خاک و سنگ‌ها نیز به‌کار می‌رود [۴]. استاندارد مورد استفاده برای این آزمایش ASTM D4404 است [۵]. جیوه ماده‌ای غیرچسبان است؛ یعنی نمی‌تواند تماس خود را با یک سطح حفظ کند. از این رو، به راحتی درون یک محیط متخلخل نفوذ می‌کند [۳]. ساختار تخلخلی بتن نقش مهمی در دوام بتن ایفا می‌کند و همین عامل، آزمایش نفوذ جیوه را به بتن مرتبط می‌سازد.

## ◆ روش آزمایش

نمونه درون یک سلول قرار می‌گیرد و با جیوه احاطه می‌شود. از آنجا که جیوه ماده‌ای غیرچسبان است، باید به سامانه، فشار خارجی اعمال شود تا جیوه به ساختار نمونه نفوذ کند. مقدار تجمعی جیوه نفوذ کرده در هر گام فشار محاسبه می‌شود. درنهایت، برای تخمین اندازه حفره‌ها از معادله (۱) استفاده نموده و نمودار تخلخل تجمعی-قطر حفره‌ها رسم می‌شود [۶].

$$d = \frac{-4\gamma \cos \theta}{P} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

(P): فشار خارجی، ( $\gamma$ ): کشش سطحی جیوه و ( $\theta$ ): زاویه تماس است.

عوامل زیادی در نتایج آزمایش نفوذ جیوه مؤثر هستند و همین امر موجب قابل بحث بودن نتایج برخی مطالعاتی شده‌است که از این آزمایش استفاده می‌کنند؛ از جمله این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۷]:

◀ عوامل نظری: مانند کشش سطحی جیوه و زاویه تماس (معادله (۱))؛

◀ آماده‌سازی نمونه: به‌عنوان مثال، اره کردن، مغزی

مقاومت الکتریکی بتن، چه در حالت سخت شده و چه در سنین اولیه، به روند انتقال جریان الکتریکی وابسته است. یون‌های موجود در محلول حفره‌ای بتن، عامل انتقال جریان‌اند؛ بنابراین، اگر محلول یخ زده باشد، جریان کم‌تر و در نتیجه مقاومت بیشتری به‌دست می‌آید. از این راه می‌توان میزان آب یخ زده و یخ زده را تعیین نمود.

## ■ روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، استاندارد مشخصی وجود ندارد و هر پژوهشگر از روش ویژه خود استفاده می‌کند [۱]. برای ارزیابی مقاومت الکتریکی، گاهی از دو الکتروود و گاهی از چهار الکتروود استفاده می‌شود و رساناهای قرارگرفته بین الکتروودها و نمونه نیز می‌توانند متفاوت باشند؛ به‌عنوان مثال، صفحه فلزی یا اسفنج مرطوب. افزون بر این، به‌کارگیری جریان برق مستقیم یا متناوب (شهری) نیز محل بحث است [۱]. نتایج ارزیابی مقاومت الکتریکی برای مطالعه دوام بتن به عوامل زیر وابسته است [۲]:

## ◆ عوامل ذاتی بتن:

◀ نسبت آب به سیمان: نسبت آب به سیمان بالا باعث افزایش حفره‌ها و کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود.

◀ نوع و اندازه سنگدانه: سنگدانه‌ها، بسته به نوع و اندازه خود، می‌توانند مقاومت الکتریکی به مراتب بیشتر از خمیرهای بدون سنگدانه نشان دهند.

◀ شرایط عمل‌آوری: درجه اشباع و درجه هیدراسیون سیمان دو عامل مهم در عمل‌آوری هستند که می‌توانند مقاومت الکتریکی را به شدت تغییر دهند.

## ◆ عوامل خارجی:

◀ حضور میلگرد: میلگردها نمونه را به یک مدار تبدیل می‌کنند و ممکن است مقاومت را بیشتر یا کمتر نشان دهند.

◀ وجود ترک در سطح بتن: تئوری اولیه مقاومت الکتریکی بر این اساس است که بتن یک ماده همسان و با هندسه نیمه‌بی‌نهایت است. وجود ترک این فرض را نقض می‌کند.

◀ فاصله بین قطب‌ها (الکتروودها): به دلیل پراکندگی توزیع سنگدانه‌ها (که دارای مقاومت بالایی هستند)، ممکن است فرض همسان بودن بتن درست نباشد. از این رو، فاصله بین الکتروودها به دلیل انعکاس دادن این غیریکنواختی مهم است.

◀ سطح تماس الکتروودها با بتن: از رساناهای مختلفی برای تسهیل انتقال بار می‌توان استفاده نمود (به‌عنوان مثال، اسفنج مرطوب).



عمران به شمار می‌رود. این نسبت برای ارزیابی مقاومت الکتریکی در جدول (۲) برابر ۷۱/۲۷ درصد است که حاکی از وضعیتی مشابه در این زمینه است. برای محدود کردن نتایج جست‌وجو به کاربردهای مرتبط با بتن و همچنین چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، کلیدواژه‌های تکمیلی به عبارت جست‌وجو افزوده شد. بر این اساس، جدول (۳) فهرست کلیدواژه‌های استفاده شده و نتایج حاصل از جست‌وجو را ارائه می‌کند. لازم به یادآوری است که مقالات مندرج در جدول (۲) براساس همان ۴۲۱ مقاله مربوط به «آزمایش نفوذ جیوه» و همان ۱۰۰۹ مقاله مربوط به «ارزیابی مقاومت الکتریکی» استخراج شده‌است.

جدول (۳): تعداد مقالات در رشته عمران، مرتبط با بتن یا یخ زدن و آب شدن.

کلیدواژه	تعداد مقالات	درصد (از ۱۰۰۹ یا ۴۲۱)
electrical resistivity & freeze and thaw	۱۰۴	۱۰/۳۱
Electrical resistivity & freeze and thaw & concrete	۱۹	۱/۸۸
Electrical resistivity & freeze and thaw & cement	۱۶	۱/۵۹
mercury intrusion test & concrete	۲۷۳	۶۴/۸
mercury intrusion test & cement	۲۸۴	۶۷/۵
mercury intrusion test & freeze and thaw	۴۱	۷/۹
& mercury intrusion test concrete & freeze and thaw	۲۵	۵/۹
& mercury intrusion test cement & freeze and thaw	۲۲	۵/۲

همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، کمتر از ۴ درصد از مقالات مربوط به کاربرد روش مقاومت الکتریکی در ارزیابی یخ زدن و آب شدن بتن یا خمیر سیمان بوده که این مقدار، معادل ۳۵ مقاله است. همچنین درخصوص آزمایش نفوذ جیوه، تنها ۲۵ مقاله (حدود ۶ درصد) به کاربرد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن در بتن اختصاص یافته‌اند. لازم به ذکر است که کلید واژه‌های مورد استفاده در جدول (۳) در هر بخش از متن مقاله ممکن است مشاهده شوند (به‌منظور فیلتر جست‌وجو). بنابراین، بدیهی است که در برخی موارد، ممکن است تمام مقالات موجود در هر دسته به‌صورت کامل و مستقیم به موضوع مورد نظر مرتبط نباشند و صرفاً به دلیل ذکر کلیدواژه‌ها در بخشی از متن (حتی در عنوان یا چکیده) در آن طبقه قرار گرفته باشند.

گرفتن، شکستن از المان اصلی یا ساخت نمونه در آزمایشگاه؛ کنترل عملیات: به‌عنوان مثال، نرخ فشار اعمالی و انجام آزمایش به‌صورت پیوسته یا گام به گام.

## وضعیت تحقیق در جهان

آمار ارائه شده در این بخش از پایگاه وب‌آوساینس<sup>۱</sup> استخراج شده‌است؛ از این رو، تنها مقالات ISI را شامل می‌شود و مقالات کنفرانسی یا مقالات ژورنالی نمایه نشده در این پایگاه، در آمار لحاظ نشده‌اند. براساس این پایگاه، تعداد ۴۲۱ مقاله درباره آزمایش نفوذ جیوه و ۱۰۰۹ مقاله درباره ارزیابی مقاومت الکتریکی در حوزه مهندسی عمران، در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ میلادی منتشر شده‌است. جدول‌های (۱) و (۲) تعداد مقالات منتشر شده را به ترتیب درباره آزمایش نفوذ جیوه و ارزیابی مقاومت الکتریکی در هفت سال اخیر نشان می‌دهند.

جدول (۱): توزیع مقالات چاپ شده درباره آزمایش نفوذ جیوه در مهندسی عمران.

سال	تعداد	درصد
۲۰۲۱	۵۰	۱۱/۵۸
۲۰۲۰	۸۷	۲۶/۶۷
۲۰۱۹	۶۰	۱۴/۲۵
۲۰۱۸	۵۳	۱۲/۵۹
۲۰۱۷	۴۰	۹/۵۰
۲۰۱۶	۲۸	۶۵/۶
۲۰۱۵	۲۵	۵/۹۴

جدول (۲): توزیع مقالات چاپ شده درباره ارزیابی مقاومت الکتریکی در مهندسی عمران.

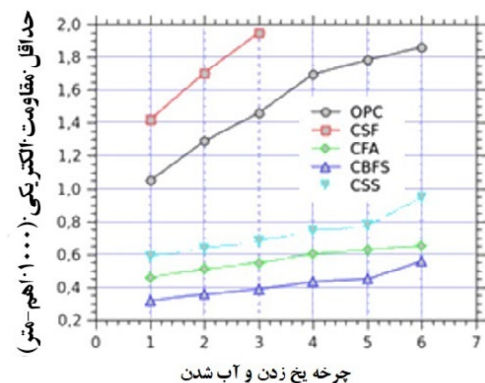
سال	تعداد	درصد
۲۰۲۱	۱۰۰	۹/۹۱
۲۰۲۰	۱۷۲	۱۷/۰۵
۲۰۱۹	۱۱۱	۱۱
۲۰۱۸	۱۱۸	۱۱/۷
۲۰۱۷	۹۵	۹/۴۲
۲۰۱۶	۶۵	۴۴/۶
۲۰۱۵	۵۸	۵/۷۵

جمع مقادیر مندرج در جدول (۱) نشان می‌دهد که ۸۷/۱۸ درصد از مقالات در هفت سال اخیر منتشر شده‌اند و ۱۲/۸۲ درصد باقی‌مانده در طول ۲۴ سال پیش از آن به چاپ رسیده‌اند. این توزیع بیانگر آن است که این آزمایش همچنان از موضوعات تکامل نیافته اما مورد توجه در حوزه مهندسی

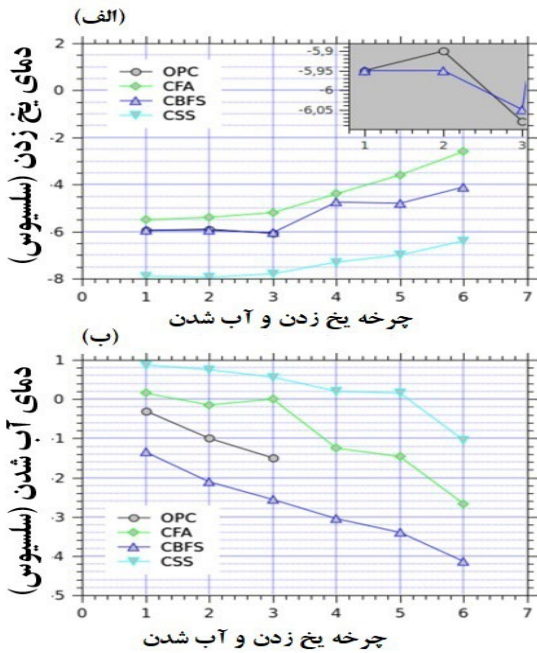
## ■ مرور کارهای گذشته

ارزیابی مقاومت الکتریکی از نظر روش‌شناسی به نسبت ساده است؛ با این حال، از آنجا که بتن می‌تواند ترکیبی از موادی با ویژگی‌های متفاوت باشد، ارائه یک بازه قطعی و عمومی برای آن امکان‌پذیر نیست و هر نمونه دارای مقدار ویژه خود است [۱]. با این وجود، به‌طور کلی، مقاومت الکتریکی بتن در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ اهم بر متر گزارش شده است [۸ تا ۱۲]. وانگ و همکاران [۱۳] به ارزیابی مقاومت الکتریکی خمیر سیمان سخت شده در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن پرداختند. در این مطالعه، تأثیر حضور مواد افزودنی شامل دوده سیلیسی<sup>۲</sup>، خاکستر بادی<sup>۳</sup>، سرباره کوره‌های ذوب آهن و الیاف فولادی بر مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با خمیر بدون افزودنی مقایسه شد. نتایج حاصل از افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن نشان داد که ترکیب‌های مختلف، سطوح متفاوتی از مقاومت الکتریکی را از خود بروز می‌دهند (شکل (۱)). به‌طور خاص، شکل (۱) حاکی از آن است که خمیرهای حاوی دوده سیلیسی و سرباره کوره ذوب آهن به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین سطح مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهند. خمیر بدون افزودنی در جایگاه دوم از نظر سطح مقاومت الکتریکی قرار گرفت. به‌طور کلی، تنها افزودن دوده سیلیسی منجر به افزایش مقاومت الکتریکی شد، در حالی که سایر افزودنی‌ها باعث کاهش آن شدند.

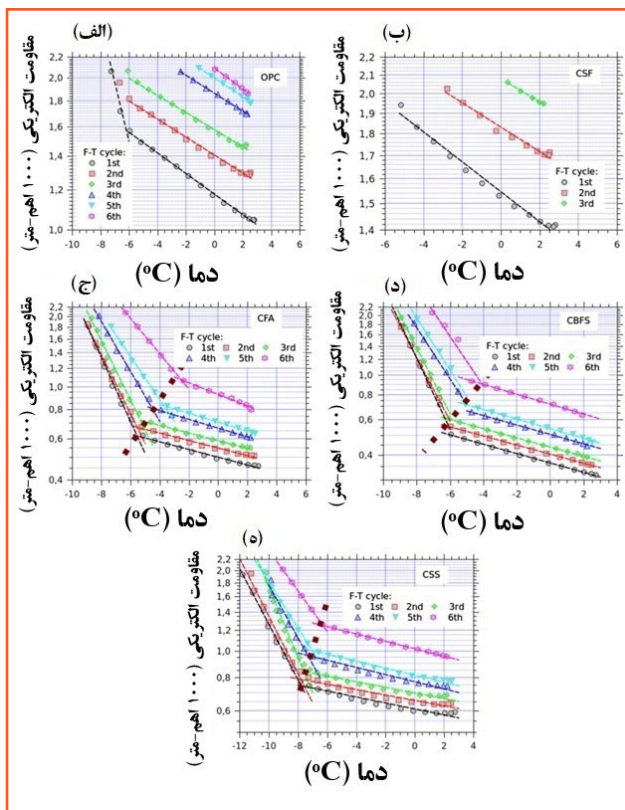
نتایج نشان دادند که صرف نظر از نوع افزودنی، با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب، دمای شروع تبلور یخ افزایش و دمای ذوب کاهش می‌یابد (شکل (۲)). لازم به ذکر است که در شکل (۲)، منحنی مربوط به نمونه حاوی دوده سیلیسی ارائه نشده است؛ زیرا تعیین نقاط مربوط به انجماد و ذوب آن از روی نمودار مربوطه امکان‌پذیر نبود. شکل (۳) حاکی از آن است که لگاریتم مقاومت الکتریکی پس از نقطه شروع تبلور یخ، با دما رابطه‌ای خطی دارد و این رابطه تحت تأثیر نوع افزودنی و تعداد چرخه‌های انجماد و ذوب قرار نمی‌گیرد.



شکل (۱): سطح مقاومت الکتریکی خمیر سیمان سخت شده با افزودنی‌های مختلف [۱۳].



شکل (۲): (الف): نقاط یخ زدن و (ب): آب شدن برای نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف [۱۳].

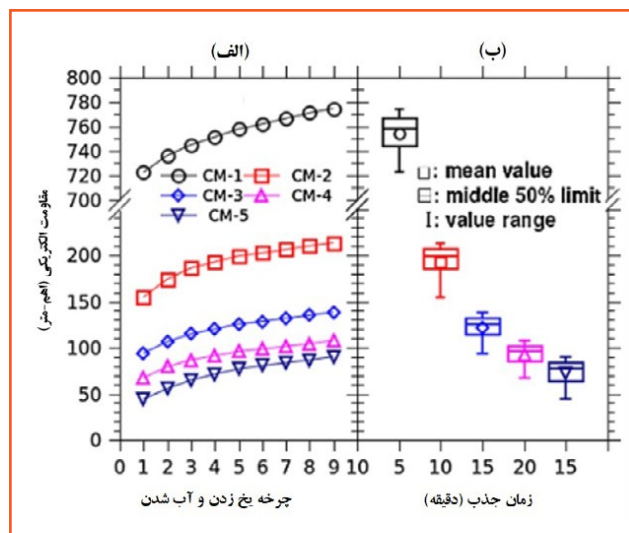


شکل (۳): نمودار لگاریتم مقاومت الکتریکی در برابر دما در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن برای نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف [۱۳].

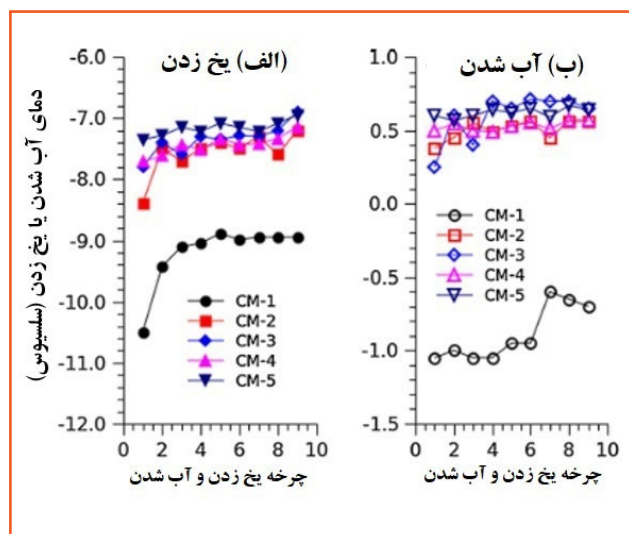
وانگ و همکاران [۱۴] تأثیر میزان رطوبت بر مقاومت الکتریکی خمیر سیمان سخت شده را بررسی کردند. در این مطالعه، پس از عمل‌آوری خمیر سیمان و خشک کردن آن



داد که با افزایش تعداد چرخه‌ها، مقاومت الکتریکی اندکی افزایش می‌یابد. شکل (۶) نیز نقاط شروع یخ زدن و آب شدن را نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت، افزایش می‌یابند. افزون بر این، با افزایش تعداد چرخه‌ها، مشاهده شد که این نقاط نیز اندکی به مقادیر بالاتری منتقل می‌شوند.



شکل (۵): مقاومت الکتریکی حداقل در طول چرخه‌ها و مدت زمان جذب رطوبت [۱۴].



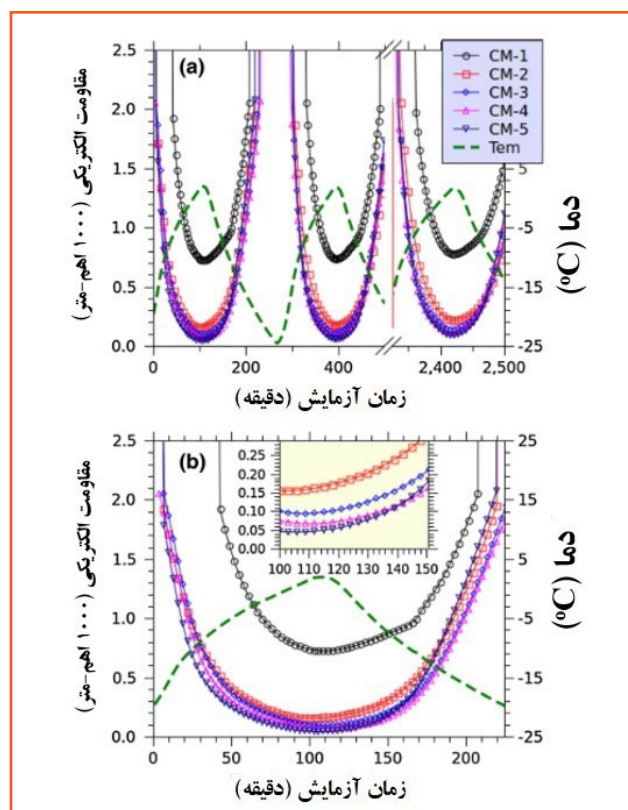
شکل (۶): نقاط یخ زدن و آب شدن در برابر چرخه‌ها [۱۴].

فرنام و همکاران [۱۵] ملات ماسه-سیمان را با سطوح مختلف اشباع و غلظت‌های متفاوت نمک محلول، در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن قرار دادند. دامنه دمای آزمایش از  $-35^{\circ}\text{C}$  تا  $23^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در این پژوهش، دو گروه نمونه مورد بررسی قرار گرفت: گروه نخست شامل نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف اشباع و گروه دوم شامل نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف نمک محلول بود. برای دستیابی به سطوح اشباع مورد نظر، نمونه‌ها به مدت سه روز در آب قرار گرفتند و سپس از محلول خارج شدند؛ پس از آن، رطوبت آن‌ها هر ۱۵ یا ۳۰

در کوره به مدت ۱۴ روز، نمونه‌ها به مدت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه در آب قرار گرفتند. جدول (۴)، نام نمونه‌ها و درصد رطوبت متناظر با هر یک را ارائه می‌دهد. شکل (۴) نیز تغییرات مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده و دما را بر حسب زمان آزمایش (چرخه‌های یخ زدن و آب شدن) نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای همه نمونه‌ها، بیشینه و کمینه مقاومت الکتریکی به ترتیب در کمینه و بیشینه دما رخ می‌دهند.

جدول (۴): نام‌گذاری نمونه‌ها در مطالعه یانگ و همکاران [۱۴].

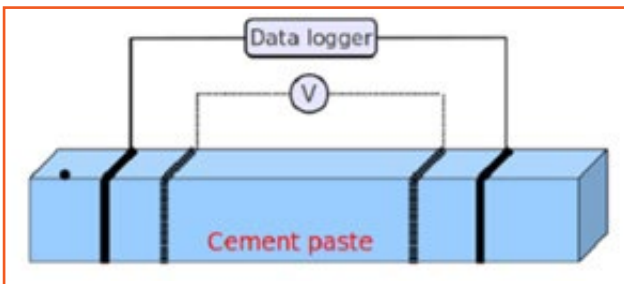
نمونه	زمان جذب رطوبت (دقیقه)	میزان رطوبت (درصد)
CM-1	۵	۹/۷
CM-2	۱۰	۱۴/۵
CM-3	۱۵	۲۳/۵
CM-4	۲۰	۲۵/۸
CM-5	۲۵	۲۸/۵



شکل (۴): نمودار مقاومت الکتریکی در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن [۱۴].

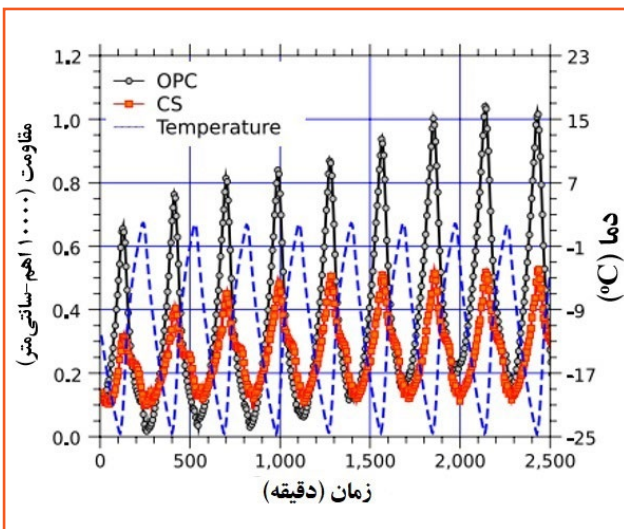
شکل (۵) نشان می‌دهد که هر چه درصد رطوبت اولیه بیشتر باشد، حداقل مقاومت الکتریکی نیز کاهش می‌یابد. این پدیده به افزایش حجم محلول درون حفرات و در نتیجه، تسهیل انتقال بار نسبت داده می‌شود. همچنین، نتایج نشان

سیمان معمولی و یک نمونه حاوی سرباره کوره ذوب آهن مورد استفاده قرار گرفت. نسبت آب به مواد سیمانی در هر دو نمونه یکسان در نظر گرفته شد. پیش از انجام آزمایش، مقاومت فشاری نمونه‌ها به عنوان مقدار مرجع اندازه‌گیری شد. برای تسهیل اندازه‌گیری جریان درون نمونه، سوراخی با قطر ۲ سانتی‌متر در آن ایجاد شد و سپس پوششی پلاستیکی روی نمونه قرار گرفت تا شرایط ایزوله فراهم شود. آزمایش‌ها طی ۱۰ چرخه یخ زدن و آب شدن و با نرخ ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت انجام شدند. در شکل (۸) چگونگی قرارگیری نمونه نشان داده شده است.



شکل (۸): چگونگی قرار گرفتن نمونه در آزمایش وانگ و همکاران [۱۶].

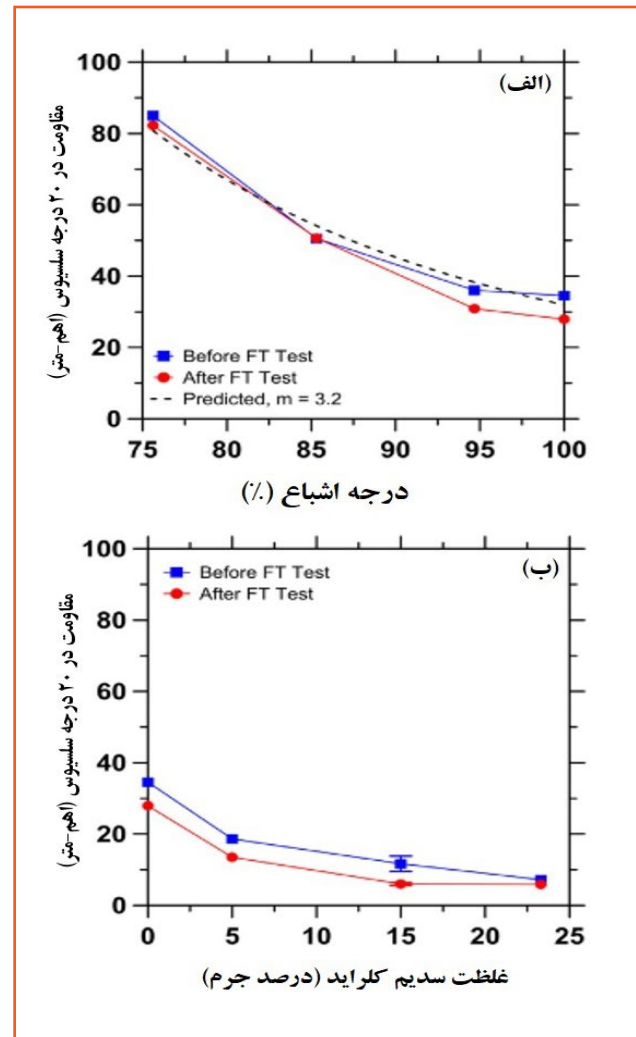
شکل (۹)، روند تغییرات مقاومت الکتریکی و دما را در سوراخ نمونه (داخل نمونه) بر حسب زمان نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که برای هر دو نوع نمونه، با کاهش دما، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش تعداد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، بیشینه مقدار مقاومت الکتریکی نیز روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. این پدیده را می‌توان به آسیب‌های وارده به ساختار بلوری نمونه نسبت داد که منجر به تخریب مسیرهای ارتباطی و انتقال جریان می‌شود. قابل ذکر است که نمونه متشکل از خمیر سیمان معمولی، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به نمونه حاوی مواد افزودنی (سرباره کوره آهن‌گدازی) از خود نشان می‌دهد.



شکل (۹): تغییر مقاومت و دما با زمان برای نمونه معمولی (CS) و نمونه دارای افزودنی (OPC) در آزمایش وانگ و همکاران [۱۶].

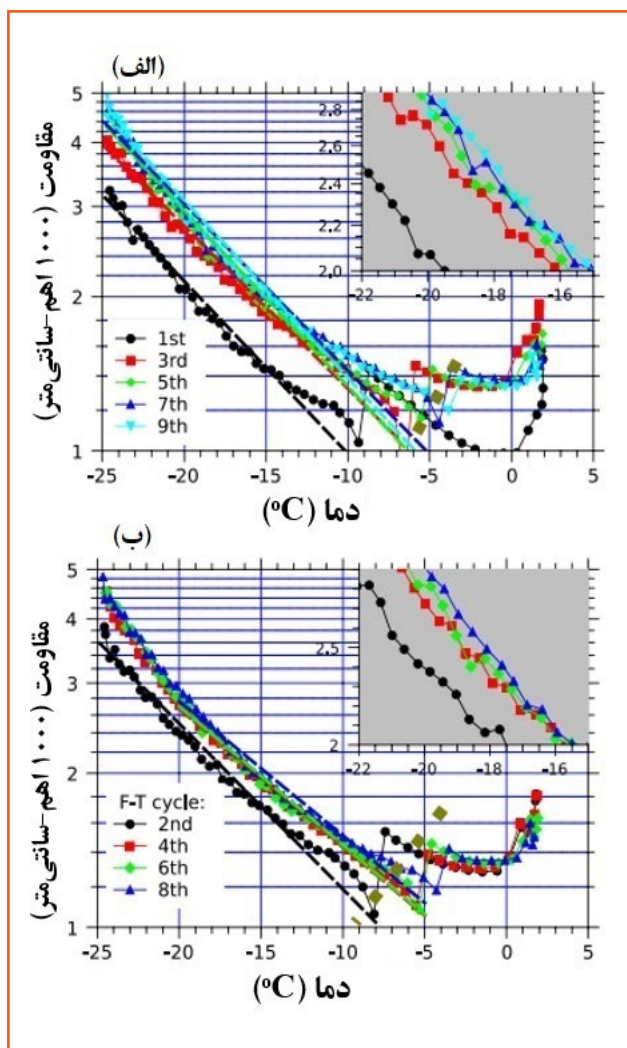
دقیقه اندازه‌گیری شد تا زمانی که به درصدهای هدف، یعنی ۷۵، ۸۵، ۹۵ و ۱۰۰ درصد برسند. به منظور اطمینان از توزیع یکنواخت رطوبت در نمونه‌ها، آن‌ها یک هفته پیش از انجام آزمایش در شرایط ایزوله نگهداری شدند. همچنین، نمونه‌های حاوی نمک پس از اشباع کامل با محلول‌هایی با غلظت ۵، ۱۵ و ۲۳ درصد نمک، به مدت سه روز در هوای آزاد قرار داده شدند.

شکل (۷) نشان می‌دهد که با کاهش میزان اشباع، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد؛ این امر به دلیل کاهش حجم محیط انتقال بار (آب) و افزایش مقاومت در برابر انتقال الکتریسیته است. با این حال، افزایش غلظت نمک منجر به افزایش یون‌های محلول در آب شده و در نتیجه، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشخص شد که تغییرات در درجه اشباع و غلظت نمک تأثیر اندکی بر انرژی فعال‌سازی (حداقل انرژی مورد نیاز برای یخ زدن آب) داشت.



شکل (۷): تغییر مقاومت الکتریکی با درجه اشباع و غلظت نمک [۱۵].

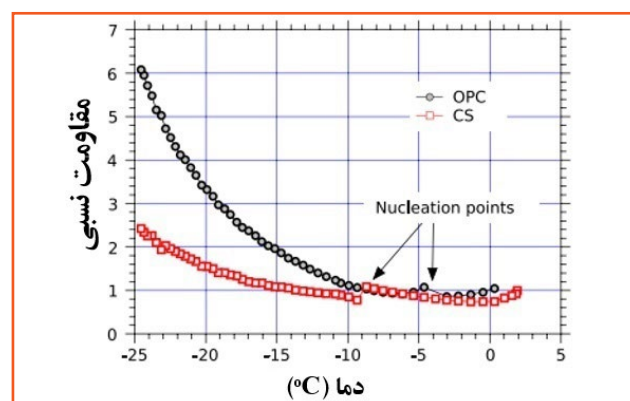
در مطالعه‌های دیگر، وانگ و همکاران [۱۶] مقاومت الکتریکی خمیر سیمان سخت شده و اشباع شده را در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن بررسی کردند. در این پژوهش، یک نمونه خمیر



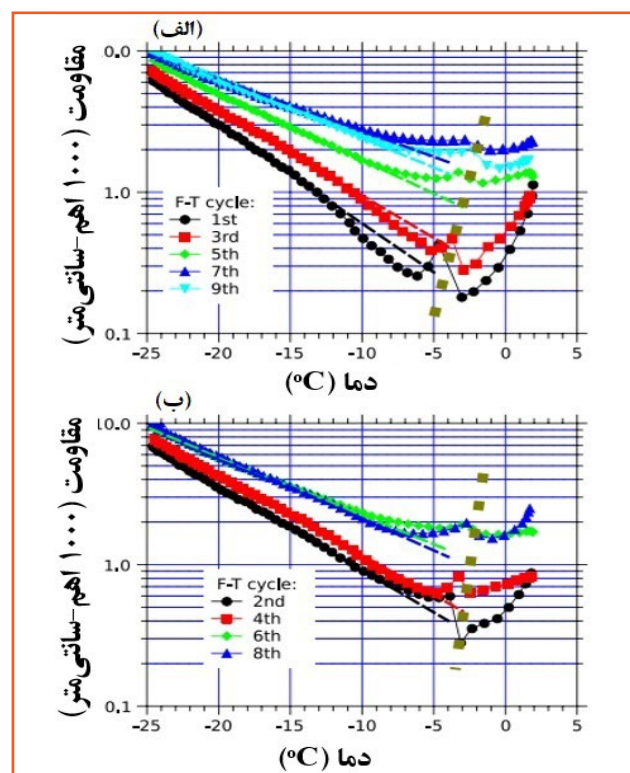
شکل (۱۲): افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های دارای مواد افزودنی برای چرخه‌های زوج و فرد [۱۶].

کیانو و همکاران [۱۷] مقاومت الکتریکی بتن هوادار را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از نمونه‌های اشباع شده با چهار نسبت آب به سیمان و درصد هوای بین ۲/۵ تا ۹ درصد استفاده شد. با افزایش درصد هوا، تعداد و حجم حفرات افزایش یافته و در نتیجه امکان تجمع آب در منافذ بیشتر می‌شود؛ بنابراین، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان نیز اثر مشابهی بر کاهش مقاومت الکتریکی نشان داد. وانگ و همکاران [۱۸] آسیب ناشی از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن را در ملات ماسه-سیمان حاوی نمک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان آسیب، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. با این حال، علاوه بر غلظت نمک و میزان رطوبت که اثر آن‌ها در مطالعات پیشین مشخص شده بود، دمای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. برای نمونه، در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و برای نسبت آب به سیمان ۰/۷، در دمای مرجع ۲۳ درجه سانتی‌گراد، ملات دارای غلظت نمک بالاتر، مقاومت بیشتری نشان می‌دهد؛ در حالی که در دمای مرجع ۲۸- درجه سانتی‌گراد، این

پس از تشکیل بلورهای یخ، مقاومت نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد. از آنجایی که مقاومت الکتریکی فاز جامد و یخ به‌طور قابل توجهی بالاتر از محلول حفره‌ای است، هرگونه تغییر ناگهانی در مقاومت را می‌توان به‌عنوان نقطه آغاز فرآیند یخ‌زدگی در نظر گرفت (شکل (۱۰)). پیش از تشکیل بلور یخ، مقاومت الکتریکی با کاهش دما افزایش جزئی از خود نشان می‌دهد. پس از نقطه آغاز یخ‌زدگی، رفتار نمونه‌های حاوی و فاقد مواد افزودنی متفاوت می‌شود. در خمیرهای معمولی، افزایش مقاومت الکتریکی پس از این نقطه از الگوی U شکل تبعیت می‌کند، در حالی که در نمونه‌های حاوی افزودنی‌ها، مقاومت الکتریکی به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد (شکل‌های (۱۱) و (۱۲)). همچنین، پس از تشکیل بلورهای یخ، لگاریتم مقاومت الکتریکی در هر دو نوع نمونه با دما دارای رابطه‌ای خطی است.



شکل (۱۰): مقاومت الکتریکی قبل و بعد از تشکیل بلورهای یخ برای نمونه‌های معمولی (OPC) و با افزودنی (CS) [۱۶].

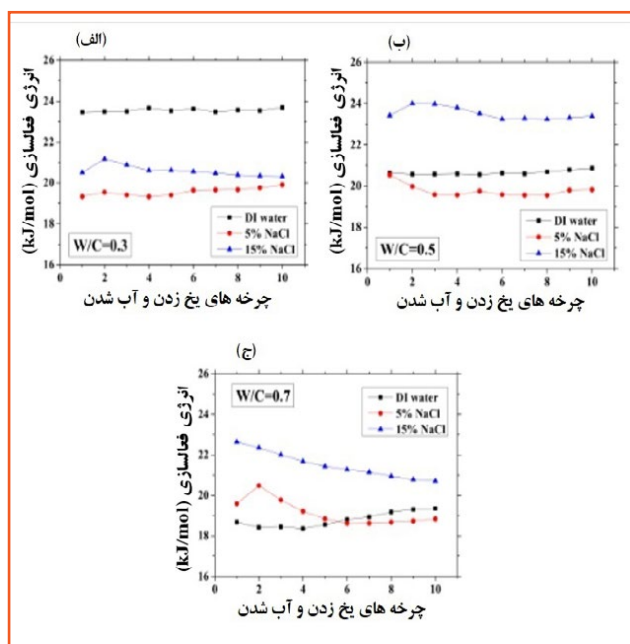


شکل (۱۱): افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های بدون مواد افزودنی برای چرخه‌های زوج و فرد [۱۶].



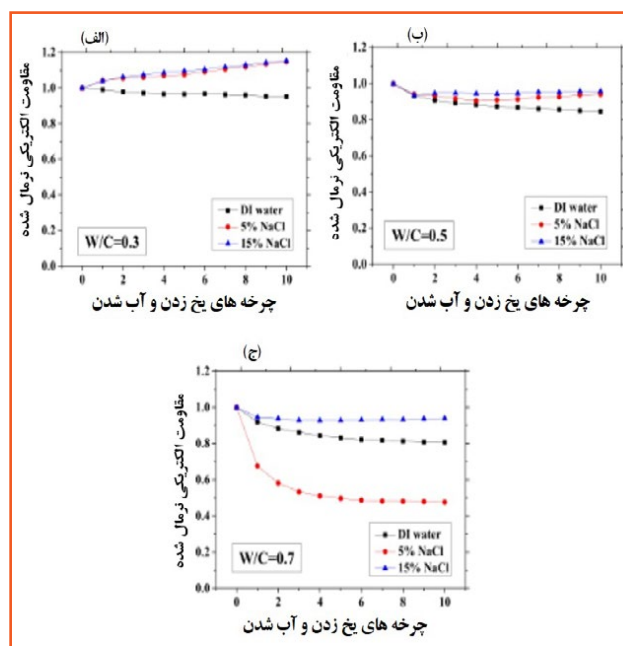
بیشتر می‌شود و همچنین با افزایش غلظت نمک، مقدار انرژی فعال‌سازی نیز افزایش می‌یابد (شکل (۱۵)). افزون بر این، دماهای یخ زدن و آب شدن با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابند (شکل‌های (۱۶) و (۱۷)). با این حال، تغییرات دمای یخ زدن بر حسب تعداد چرخه‌ها در نسبت‌های مختلف آب به سیمان یکسان نبوده و از روند مشخصی پیروی نمی‌کند. در مقابل، دمای آب شدن حساسیت اندکی نسبت به تعداد چرخه‌ها نشان می‌دهد و در طول آزمایش تقریباً ثابت باقی می‌ماند. از آنجا که تغییرات مقاومت الکتریکی در فرآیندهای یخ زدن و آب شدن ناشی از دگرگونی‌های ساختار داخلی بتن است، رابطه میان تغییرات مقاومت الکتریکی و مدول الاستیسیته (مدول یانگ)، همچنین رابطه میان تغییرات انرژی فعال‌سازی و مدول الاستیسیته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که برای این تغییرات نیز نمی‌توان روند مشخص و قابل تعمیمی ارائه کرد.

آن‌ها مدلی برای ارزیابی آسیب ارائه کردند که در آن، مقاومت الکتریکی در یک دمای مرجع به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که انرژی فعال‌سازی، به‌عنوان حداقل انرژی لازم برای آغاز فرآیند یخ زدن آب، با گسترش آسیب دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌شود و ممکن است روند افزایشی یا کاهشی داشته باشد. این مطالعه روی نمونه‌هایی با ابعاد کوچک<sup>۴</sup> انجام شد و یافته‌های آن نشان داد که رفتار بتن در این مقیاس، در چارچوب موضوع مورد بررسی، با نتایج حاصل از نمونه‌های بزرگ‌تر تفاوت دارد.

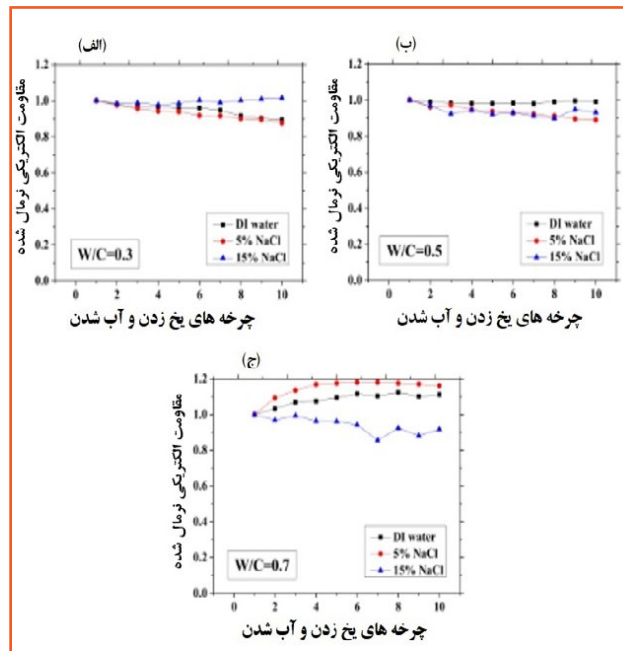


شکل (۱۵): تغییر انرژی فعال‌سازی با چرخه‌های یخ زدن و آب شدن برای نسبت‌های آب به سیمان مختلف [۱۸].

روند معکوس شده و ملات با غلظت نمک کمتر مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): تغییر مقاومت الکتریکی با چرخه‌های یخ زدن و آب شدن برای نسبت آب به سیمان‌های مختلف؛ دمای مرجع: ۲۳ درجه سانتی‌گراد [۱۸].



شکل (۱۴): تغییر مقاومت الکتریکی با چرخه‌های یخ زدن و آب شدن برای نسبت آب به سیمان‌های مختلف؛ دمای مرجع: ۲۸- درجه سانتی‌گراد [۱۸].

در نسبت‌های پایین آب به سیمان، انرژی فعال‌سازی نسبت به تعداد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن حساسیت چندانی نشان نمی‌دهد و ملات‌های حاوی نمک از انرژی فعال‌سازی کمتری برخوردار هستند. با افزایش نسبت آب به سیمان، حساسیت انرژی فعال‌سازی به تعداد چرخه‌ها

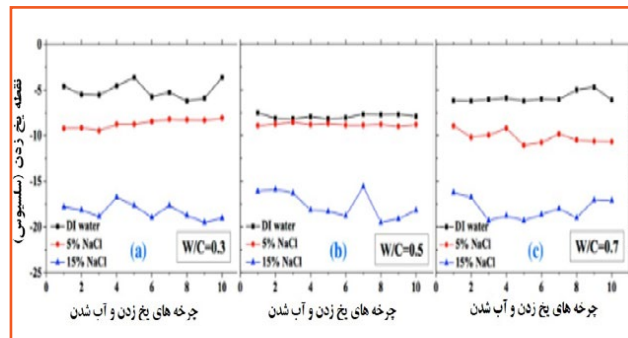
بهره‌گیری از آزمایش نفوذ جیوه، بُعد فراکتالی حفرات بتن را برآورد کردند. نتایج نشان داد که این حفرات دارای بُعد فراکتالی بین ۱ و ۲ هستند و حضور ترکیبات شیمیایی مختلف در بتن می‌تواند موجب تغییر این بُعد شود.

وای و همکاران [۲۳] امکان‌سنجی روش‌های مختلف را برای مطالعه عوامل تخلخل خمیر سیمان در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن بررسی کردند. این روش‌ها شامل رابطه کاتز-تامسون، محیط‌های مؤثر کلی<sup>۵</sup> و معادله ناویر-استوکس بودند. عوامل مورد نیاز برای این بررسی از نتایج آزمایش نفوذ جیوه، پراش پرتو ایکس و تصویربرداری الکترون‌های بازتابی<sup>۶</sup> استخراج شد. در این مطالعه، آزمایش نفوذ جیوه برای شناسایی حفرات در مقیاس نانومتر که با روش‌های پراش پرتو ایکس و تصویربرداری الکترون‌های بازتابی قابل مشاهده نیستند، به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش نفوذ جیوه در چارچوب مدل کاتز-تامسون، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد.

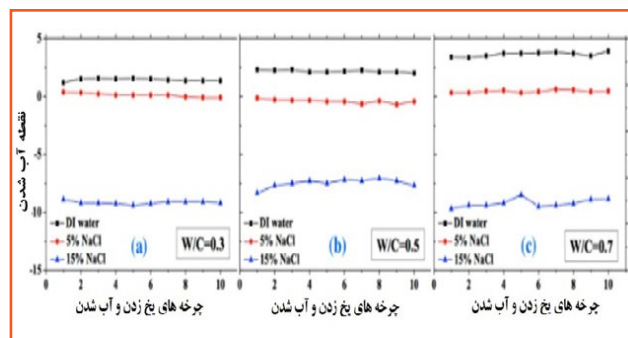
لی و همکاران [۲۴] یک مدل آسیب جدید برای بتن در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن ارائه کردند. در این پژوهش، از آزمایش نفوذ جیوه و گرماسنجی روبشی تفاضلی برای تعیین اندازه و حجم حفرات استفاده شد. گرماسنجی روبشی تفاضلی نیز به منظور بازتاب تغییرات اندازه حفرات در طی چرخه‌های یخ زدن و آب شدن به کار گرفته شد.

ژانگ و تیلور [۲۵] به بررسی توزیع اندازه حفرات در خمیر سیمان سخت شده، متأثر از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و در حضور نمک‌های یخ‌زدا پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که نمونه‌هایی با حفرات با اندازه متوسط (در بازه ۰/۰۴ تا ۰/۲ میکرومتر) کمترین مقاومت را در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن از خود نشان می‌دهند.

ژاو و همکاران [۲۶] با اصلاح مراحل انجام آزمایش نفوذ جیوه، روشی را برای دستیابی به برآورد دقیق‌تر از اندازه حفرات پیشنهاد کردند. در روش استاندارد نفوذ جیوه، اندازه حفرات بزرگ کمتر از مقدار واقعی و اندازه حفرات کوچک بیش از مقدار واقعی برآورد می‌شود. در این روش، افزایش پیوسته فشار تا بیشینه و سپس کاهش پیوسته آن، رویه معمول است. با این حال، در روش پیشنهادی، فشار جیوه به صورت پیوسته از حداقل به بیشینه مقدار افزایش می‌یابد و چرخه‌های فشار-فشارزدایی به طور متناوب تکرار می‌شوند.



شکل (۱۶): تغییرات دمای یخ زدن در طول چرخه‌ها برای نسبت‌های آب به سیمان مختلف [۱۸].



شکل (۱۷): تغییرات دمای آب شدن در طول چرخه‌ها برای نسبت‌های آب به سیمان مختلف [۱۸].

معادله (۲) همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، وجود حفرات مبنای ارتباط میان نتایج آزمایش نفوذ جیوه و پدیده‌های یخ زدن و آب شدن است. یکی از روابطی که از طریق آن می‌توان نفوذپذیری خمیر سیمان را به مقاومت الکتریکی و در نتیجه به رفتار آن در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، مرتبط ساخت، معادله کاتز-تامسون است [۳]. این معادله به طور مستمر برای انطباق با شرایط مختلف توسعه یافته است. معادله (۲) شکل پایه‌ای رابطه کاتز-تامسون را نشان می‌دهد [۱۹ و ۲۰]:

$$k = \frac{1}{226} d_c^2 \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

( $k$ ): نفوذپذیری ذاتی ( $m^2$ ), ( $d_c$ ): قطر بحرانی حفره‌ای ( $m$ ),  
( $\sigma$ ): رسانایی بالک ( $\frac{S}{m}$ ) و ( $\sigma_0$ ): رسانایی محلول حفره‌ای ( $\frac{S}{m}$ ) هستند.

تیبیت و همکاران [۲۱] با استفاده از برآزش گوسی، نتایج حاصل از آزمایش نفوذ جیوه را به مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی مرتبط کردند. آنان همچنین رابطه کاتز-تامسون را به منظور بهبود این برآورد اصلاح نمودند. از سوی دیگر، ژیانگونگ و همکاران [۲۲] با



بررسی رفتار بتن در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن را می‌توان معادل بررسی حفرات و ساختار داخلی بتن دانست. ارزیابی مقاومت الکتریکی و آزمایش نفوذ جیوه، هر دو ابزارهایی برای مطالعه ساختار داخلی بتن هستند. هر دو روش یاد شده ساده و قابل درک‌اند، اما تعدد متغیرها و وابستگی میان آن‌ها سبب شده‌است که نتوان برای همه شرایط، قاعده‌ای واحد ارائه کرد. از سوی دیگر، نگاه تک بُعدی در پژوهش‌های مرتبط با مقاومت الکتریکی، یکی دیگر از کاستی‌های مهم در مطالعات گذشته است. در بسیاری از این پژوهش‌ها، از مبانی علم مواد و قوانین فیزیکی برای تفسیر نتایج استفاده نشده و اتکای اصلی تنها بر تجربه و داده‌های آزمایشگاهی بوده است.

رطوبت و وجود نمک، دو عاملی هستند که در بیشتر تحقیقات مرتبط با ارزیابی مقاومت الکتریکی متاثر از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن به آن‌ها پرداخته شده‌است. با این حال، هیچ یک از مطالعات مرور شده، ارزیابی این مولفه‌ها را در بتن سخت شده و در حضور میلگردها مورد بررسی قرار نداده‌اند. این کمبود تحقیقاتی ممکن است ناشی از پیچیدگی در طراحی آزمایش‌ها و یا فقدان یک چهارچوب استاندارد برای انجام آن باشد. برخی از یافته‌ها در تمامی مطالعات مشترک هستند؛ به‌عنوان مثال، افزایش مقاومت الکتریکی با کاهش دما یا کاهش مقاومت الکتریکی با افزایش درصد رطوبت. پژوهشگران در تلاش هستند تا این نتایج کلی را به مخلوط‌های مختلف (به‌عنوان مثال، ملات، خمیر سیمان و مخلوط‌های حاوی افزودنی‌ها یا درصد‌های رطوبت متفاوت) تعمیم دهند.

علاوه‌بر نبود روش آزمایشی استاندارد، این احتمال وجود دارد که تکراری بودن نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی متاثر از یخ زدن و آب شدن، عاملی در کمبود تعداد مقالات این حوزه باشد. از این رو، شاید بهتر باشد این آزمایش به‌صورت موردی و با در نظر گرفتن شرایط ویژه هر پروژه در پروژه‌های عملیاتی انجام شود. در ادبیات فنی، اطلاعاتی درباره موضوعات زیر گزارشی موجود نیست؛ بنابراین، می‌توانند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرند:

- ارزیابی مقاومت الکتریکی و انجام آزمایش نفوذ جیوه روی بتن سخت شده و دارای میلگرد؛
- به‌کارگیری هوش مصنوعی برای تفسیر نتایج و بازسازی شکل ساختار داخلی بتن؛
- ایجاد یک بانک اطلاعاتی بین‌المللی برای این آزمایش‌ها به‌منظور کاهش اثر تعدد متغیرها؛
- مطالعه بتن‌های خاص به‌عنوان مثال، بتن با کارایی زیاد، بتن با مقاومت بالا، بتن سبز و بتن بازیافتی با استفاده از این دو روش.

## پی‌نوشت

1. Web of Science
2. Condensed Silica Fume (CSF)
3. Coal Fly Ash (CFA)
4. Mesoscale Concrete
5. General Effective Media (GEM)
6. Backscattered electron imaging

## مراجع

- [1] G. Cosoli, A. Mobili, F. Tittarelli, G.M. Revel, and P. Chiariotti, *Applied Sciences-Basel*, 10 (2020) 42.
- [2] P. Azarsa and R. Gupta, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017 (2017) 30.
- [3] C.M. Tibbetts, C.C. Tao, J.M. Paris, and C.C. Ferraro, *Construction and Building Materials*, 263 (2020) 13.
- [4] E. Rojas, M.D. Perez-Rea, G. Gallegos, and J. Leal, *Journal of Porous Media*, 15 (2012) 517-530.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry*. 2018, U.S.A.
- [6] E.W. Washburn, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 7 (1921) 115-116.
- [7] H.Y. Ma, *Journal of Porous Materials*, 21 (2014) 207-215.
- [8] T. Gorzelańczyk, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11 (2011) 45-60.
- [9] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R.B. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, John Wiley and Sons, U.S.A., 2003.
- [10] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, and M. Raupach, *Materials and Structures*, 33 (2000) 603-611.
- [11] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*. 1982, Lund University.
- [12] O.E. Gjorv, Ø.E. Vennesland, and A. El-Busaidy. *Electrical resistivity of concrete in the oceans*. in Offshore technology conference. 1977. Houston, Texas, U.S.A: OnePetro.
- [13] Z.D. Wang, Q. Zeng, L. Wang, Y. Yao, and K.F. Li, *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 477-486.
- [14] Z. Wang, Q. Zeng, L. Wang, Y. Yao, and K. Li, *Journal of Materials Science*, 49 (2014) 4305-4314.
- [15] Y. Farnam, H. Todak, R. Spragg, and J. Weiss, *Cement and Concrete Composites*, 59 (2015) 49-59.
- [16] Z.D. Wang, Q. Zeng, L. Wang, Y. Yao, and K.F. Li, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015.8)
- [17] C. Qiao, M. Khanzadeh Moradillo, H. Hall, M. Ley, and W. Weiss, *Aci Materials Journal*, 116 (2019).
- [18] Y. Wang, T. Ueda, F.Y. Gong, D.W. Zhang, and Z. Wang, *Materials*, 13 (2020) 22.
- [19] A.J. Katz and A.H. Thompson, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92 (1987) 599-607.
- [20] A.J. Katz and A.H. Thompson, *Quantitative prediction of permeability and electrical conductivity in porous rock*, in SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. 1986. p. 6-7.
- [21] C.M. Tibbetts, B.E. Watts, C.C. Ferraro, and E.D. Huber, *Cement and Concrete Composites*, 116 (2021) 103870.
- [22] X.Q. Ding, Y.C. Zhang, F.C. Wang, and J.H. Zhou, *Revista Romana De Materiale-Romanian Journal of Materials*, 50 (2020) 268-273.
- [23] Y. Wei, W. Guo, Z. Wu, and X. Gao, *Construction and Building Materials*, 244 (2020) 118298.
- [24] B. Li, J.Z. Mao, T. Nawa, and T.Y. Han, *Construction and Building Materials*, 147 (2017) 79-90.
- [25] J. Zhang and P.C. Taylor, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015) 04014123.
- [26] J.A. Zhou, G.A. Ye, and K. van Breugel, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 1120-1128.



## نویسنده

دکتر عبدالرسول ارومیه‌ای<sup>۱</sup>

۱. مدیر عامل شرکت خاتم پلیمر، تهران، ایران

\*oromia2000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

# آشنایی با برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی در آزمایشگاه



## چکیده

برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی در آزمایشگاه‌های کنترل و آنالیز مواد و محصولات شیمیایی و پلیمری، از اهمیت ویژه‌ای برای کارشناسان برخوردار است. این برگه اطلاعات کلی مربوط به ویژگی‌ها، خطرات، چگونگی استفاده ایمن، حمل‌ونقل و انبارش مواد شیمیایی را ارائه می‌دهد و به کارشناسان آزمایشگاه کمک می‌کند تا از خطرات بالقوه آگاه شوند. این برگه‌ها با شناسایی خطراتی مانند اشتعال‌پذیری، سمیت، خوردگی و اثرات بهداشتی، کارشناسان را قادر می‌سازند تا تجهیزات حفاظت فردی مناسب را انتخاب کرده و اقدامات اولیه در شرایط حادثه را به سرعت انجام دهند. کاربرد برگه اطلاعات ایمنی در آزمایشگاه شامل بررسی برچسب‌ها، کنترل نشت، انتخاب خاموش‌کننده مناسب و دفع ایمن مواد است و کارشناسان را برای واکنش در برابر حوادثی مانند انفجار یا مسمومیت آماده می‌سازد. دسترسی مداوم به برگه اطلاعات ایمنی تضمین‌کننده استفاده ایمن از مواد خالص و مخلوط است.

## مقدمه

در دنیای پیچیده و تخصصی آزمایشگاه‌های کنترل و آنالیز مواد شیمیایی و پلیمری، درک عمیق و دقیق خواص و خطرات مواد مورد استفاده، سنگ بنای اصلی حفظ ایمنی، اطمینان از صحت نتایج و پیشگیری از حوادث ناگوار است. مواد شیمیایی، با طیف وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و پتانسیل بروز خطرات گوناگون از قبیل اشتعال‌پذیری، سمیت، خوردگی و اثرات بهداشتی نامطلوب، نیازمند مدیریتی هوشمندانه و آگاهانه هستند. در این میان، برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی به‌عنوان یک سند استاندارد و جامع، نقشی حیاتی در این فرآیند ایفا می‌کند. این برگه‌ها که اطلاعاتی کلیدی درباره ویژگی‌ها، خطرات، چگونگی استفاده ایمن، حمل‌ونقل و انبارش مواد را ارائه می‌دهد، ابزاری ضروری برای هر کارشناس آزمایشگاه محسوب می‌شود. این سند نه تنها کارشناسان را از خطرات بالقوه آگاه ساخته و به پیشگیری از حوادث، مسمومیت‌ها و خسارات زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه اطلاعات دقیقی درباره خواص فیزیکی و شیمیایی مواد و روش‌های ایمن کار با آن‌ها در اختیار کاربران قرار می‌دهد. شناسایی دقیق مخاطرات، از جمله با اتکا به ساختار بصری لوزی خطر که شدت خطرات را از طریق رنگ‌ها و مقیاس عددی (۰ تا ۴) نمایش می‌دهد، به کارشناسان امکان

می‌دهد تا تجهیزات حفاظت فردی مناسب را انتخاب کرده و در شرایط اضطراری، اقدامات اولیه را به سرعت و با اطمینان اجرا نمایند [۱].

علاوه بر اهمیت کاربردی در محیط آزمایشگاه، تهیه و ارائه برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی یک الزام قانونی برای تولیدکنندگان است و عدم رعایت آن می‌تواند پیامدهای حقوقی و جریمه‌های قابل توجهی را به همراه داشته باشد. این سند، با فراهم آوردن اطلاعات لازم برای مدیریت ریسک‌های صنعتی، نقش مهمی در کاهش بروز حوادث، حفاظت از محیط‌زیست و انطباق با مقررات ایمنی ایفا می‌کند، به‌ویژه در صنایعی چون صنایع شیمیایی، نفت و داروسازی که ایمنی کارکنان و محیط از اولویت بالایی برخوردار است.

این مقاله با هدف افزایش آگاهی و توانمندی کارشناسان آزمایشگاه در استفاده مؤثر از برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی، به بررسی جنبه‌های کلیدی این اسناد، از جمله کاربرد عملی آن‌ها در سناریوهای مختلف آزمایشگاهی (به‌عنوان مثال، بررسی برچسب‌ها، مهار نشستن، انتخاب خاموش‌کننده‌های مناسب و دفع ایمن مواد)، پرداخته و بر ضرورت دسترسی مداوم به این اطلاعات برای تضمین استفاده ایمن از مواد شیمیایی و ارتقای سطح کلی ایمنی در محیط کار تأکید دارد.

## ■ آشنایی با برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی برای کارشناسان آزمایشگاه

برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی<sup>۱</sup> سندی استاندارد است که اطلاعات جامعی درباره ویژگی‌ها، خطرات، چگونگی استفاده ایمن، حمل‌ونقل و انبارش مواد شیمیایی ارائه می‌دهد. آشنایی با این برگه برای کارشناسان آزمایشگاه ضروری است، زیرا آن‌ها را از خطرات بالقوه آگاه می‌سازد و به پیشگیری از حوادث، مسمومیت‌ها و خسارات زیست‌محیطی کمک می‌کند. این سند همچنین اطلاعات کاملی درباره خواص فیزیکی و شیمیایی مواد و روش‌های ایمن کار با آن‌ها در اختیار کاربران قرار می‌دهد.

این برگه‌ها با شناسایی دقیق مخاطراتی نظیر اشتعال‌پذیری، سمیت، خوردگی و اثرات بهداشتی، کارشناسان را قادر می‌سازند تا تجهیزات حفاظت فردی<sup>۲</sup> مناسب را انتخاب کرده و اقدامات اولیه در شرایط اضطراری را به سرعت اجرا نمایند. علاوه بر این، شناخت لوزی خطر<sup>۳</sup> که با استفاده از رنگ‌ها و مقیاس عددی صفر تا چهار، شدت خطرات را به‌طور بصری نشان می‌دهد و در درک سریع و جامع ریسک‌های مرتبط با مواد شیمیایی بسیار مؤثر است [۲].

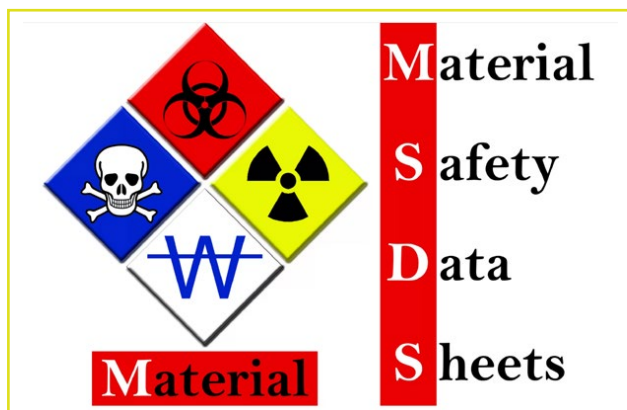
## ■ انطباق قانونی و مدیریت ریسک

تهیه و ارائه برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی برای تولیدکنندگان الزامی است و عدم رعایت این الزام می‌تواند پیامدهای قانونی و جریمه‌های مربوطه را به دنبال داشته باشد. این سند، با فراهم کردن اطلاعات لازم درباره خطرات مواد شیمیایی و راهکارهای کنترل آن‌ها، نقش مهمی در

مدیریت ریسک‌های صنعتی، کاهش بروز حوادث و حفاظت از محیط‌زیست ایفا می‌کند. در صنایعی مانند صنایع شیمیایی، نفت و داروسازی، برگه اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی کلیدی برای ارتقای ایمنی کارکنان و انطباق با الزامات و مقررات ایمنی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

## ■ کاربرد عملی در آزمایشگاه

در محیط آزمایشگاه، SDS (همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده‌است) در بررسی برچسب‌ها، کنترل و مهار نشستن، انتخاب خاموش‌کننده‌های مناسب و دفع ایمن مواد شیمیایی نقش مهمی دارد و کارشناسان را برای واکنش مؤثر در برابر حوادثی مانند انفجار یا مسمومیت آماده می‌سازد. دسترسی مداوم به SDS، استفاده ایمن از مواد خالص و مخلوط را تضمین کرده و به ارتقای سطح ایمنی در محیط کار کمک می‌کند.



شکل (۱): نمادهای مرتبط با برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (MSDS/SDS). این نمادها خطرات مختلف مواد شیمیایی از جمله سمیت، خطرات زیستی، راديوکتیویته و واکنش‌پذیری با آب را نشان می‌دهند [۳].



## ■ اهمیت، مزایا و مولفه‌های کلیدی برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS)

برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد شیمیایی به‌عنوان اسناد استاندارد و حیاتی در حوزه مدیریت ایمنی مواد، اطلاعات جامع و ضروری را درباره شناسایی، خطرات و روش‌های ایمن کار با ترکیبات شیمیایی فراهم می‌کنند. این مدارک، ستون فقرات ارتباطات ایمنی در زنجیره تامین مواد شیمیایی محسوب شده و نقش بسزایی در پیشگیری از حوادث، کاهش ریسک‌های بهداشتی و زیست‌محیطی و تضمین انطباق با الزامات قانونی ایفا می‌کنند.

ساختار (۱۶) بخشی این برگه‌ها که توسط سیستم هماهنگ جهانی طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری مواد شیمیایی<sup>۴</sup> استانداردسازی شده‌است، امکان دسترسی نظام‌مند به اطلاعات کلیدی را فراهم می‌آورد. این بخش‌ها شامل موارد زیر هستند: شناسایی ماده و تامین‌کننده، تعیین هویت خطرات، ترکیب یا اجزاء، اقدامات کمک‌های اولیه، اقدامات مقابله با آتش‌سوزی، اقدامات مربوط به انتشار تصادفی، جابجایی و انبارداری، کنترل مواجهه و حفاظت فردی، خواص فیزیکی و شیمیایی، پایداری و واکنش‌پذیری، اطلاعات سمیت‌شناسی، اطلاعات بوم‌شناختی، ملاحظات دفع، اطلاعات حمل‌ونقل، اطلاعات مقرراتی و سایر اطلاعات مرتبط. این چارچوب مدون، فهم و به‌کارگیری اطلاعات را برای طیف وسیعی از کاربران، از جمله متخصصان ایمنی، پژوهشگران، کارشناسان صنعتی و نهادهای نظارتی، تسهیل می‌نماید.

مزایای کلیدی SDS/MSDS فراتر از انطباق صرف با مقررات است. این برگه‌ها ابزاری اساسی برای ارزیابی ریسک در محیط‌های کاری، طراحی سازوکارهای ایمنی مؤثر، آموزش کارکنان و توسعه برنامه‌های مدیریت بحران محسوب می‌شوند. درک عمیق اطلاعات مندرج در SDS/MSDS به کاربران اجازه می‌دهد تا با آگاهی کامل از ماهیت و شدت خطرات، اقدامات پیشگیرانه لازم را به کار گیرند و در صورت بروز حوادث ناخواسته، پاسخگویی مناسب و مؤثری داشته باشند.

یکی از جنبه‌های حیاتی SDS/MSDS، ضرورت بروزرسانی مستمر آن است. با توجه به پیشرفت دانش علمی، کشف خطرات جدید و تغییرات در ترکیبات یا فرآیندهای تولید، اطلاعات مندرج در این برگه‌ها باید به‌طور منظم بازنگری و بروز شوند. تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان مسئولیت قانونی و اخلاقی دارند که اطمینان حاصل کنند SDS/MSDS ارائه شده، منعکس‌کننده آخرین اطلاعات علمی و مقرراتی موجود است. این فرآیند بروزرسانی، دقت و اعتبار اطلاعات ایمنی را در طول چرخه عمر محصول حفظ می‌کند [۴].

در زمینه تجارت بین‌المللی، SDS/MSDS نقشی محوری ایفا می‌کند. تطابق این اسناد با استانداردهای بین‌المللی نظیر GHS و همچنین الزامات خاص کشورها و مناطق، امری ضروری است. استانداردهایی مانند توافق‌نامه حمل‌ونقل بین‌المللی کالاهای خطرناک جاده‌ای<sup>۵</sup> و مقررات مشابه در سایر حوزه‌های حمل‌ونقل به‌عنوان مثال، انجمن بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی<sup>۶</sup> و کد بین‌المللی کالاهای خطرناک دریایی<sup>۷</sup>، الزامات اطلاعاتی ویژه‌ای را برای مواد شیمیایی خطرناک تعیین می‌کنند که باید در SDS/MSDS منعکس شود. این امر، مستلزم ترجمه دقیق و بومی‌سازی اطلاعات، با در نظر گرفتن تفاوت‌های زبانی و قانونی، است. در نتیجه، SDS/MSDS صرفاً یک سند اطلاعاتی نیست، بلکه ابزاری پویا و بنیادین برای تضمین ایمنی، سلامت و حفاظت از محیط‌زیست در سراسر جهان است. رعایت الزامات مربوط به تدوین، نگهداری، بروزرسانی و توزیع این برگه‌ها، لازمه فعالیت مسئولانه و پایدار در صنعت شیمی و تمامی صنایعی است که با مواد شیمیایی سروکار دارند.

## ■ نقش MSDS در مدیریت ریسک و ایمنی مواد شیمیایی

وجود برگه اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS) در کنار هر ماده شیمیایی، یکی از ارکان بنیادی نظام مدیریت ایمنی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش ریسک‌های عملیاتی و بهداشتی ایفا می‌کند. این سند، مجموعه‌ای ساختاریافته از داده‌های علمی و دستورالعمل‌های کاربردی را ارائه می‌کند که هدف آن، آگاهی‌بخشی دقیق به مصرف‌کننده درباره ماهیت ماده، نوع مخاطرات و الزامات ایمن‌سازی فرآیندهای مرتبط با آن است. اطلاعات MSDS به کاربران این امکان را می‌دهد که پیش از هرگونه استفاده، انتقال یا انبارش، تصویری جامع از رفتار فیزیکی، شیمیایی و زیست‌محیطی ماده در اختیار داشته باشند. بر مبنای اصول ارزیابی ریسک، سه عامل «ماهیت خطر»، «احتمال مواجهه» و «شدت پیامد» مشخص‌کننده سطح نهایی ریسک هستند. MSDS در عمل ابزاری است که هر سه بخش این معادله را پوشش می‌دهد. بدین معنا که از طریق ارائه هشدارهای طبقه‌بندی شده درباره سمیت، قابلیت اشتعال، واکنش‌پذیری و خطرات مزمن، ماهیت خطر ماده را مشخص می‌کند؛ سپس با بیان شرایط نگهداری و کاربری، احتمال مواجهه را به حداقل می‌رساند و درنهایت، با ارائه اقدامات اضطراری، شدت پیامدهای حادثه را کنترل‌پذیر می‌سازد.

به علاوه، MSDS راهنمای عملیاتی مهمی برای طراحی و اجرای کنترل‌های مهندسی و مدیریتی محسوب می‌شود.

## ■ اطلاعات ارائه شده در برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS)

برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS) اسناد جامعی هستند که اطلاعات کلیدی و حیاتی را در مورد یک ماده شیمیایی خاص ارائه می‌دهند. این اطلاعات برای تضمین ایمنی کارکنان، مدیریت صحیح مواد و رعایت مقررات ضروری است. اطلاعات ارائه شده در SDS/MSDS به‌طور کلی شامل موارد زیر است:

### ۱. اطلاعات کلی محصول

- نام محصول: نام تجاری و نام شیمیایی ماده؛
- نام تولید کننده/توزیع کننده: اطلاعات کامل شرکت سازنده یا وارد کننده، شامل نام، آدرس و اطلاعات تماس؛
- کد محصول/شماره شناسایی: شماره شناسایی منحصر به فرد ماده که توسط تولید کننده یا سازمان‌های استاندارد تعیین شده است؛
- فرمول شیمیایی: ترکیب شیمیایی ماده؛
- شماره تلفن اضطراری: اطلاعات تماس برای مواقع اضطراری (به‌عنوان مثال، حوادث، نشت یا تماس ناخواسته).

### ۲. شناسایی خطرات

- طبقه‌بندی خطرات: دسته‌بندی ماده براساس سیستم‌های استاندارد بین‌المللی (به‌عنوان مثال، GHS) که شامل خطرات فیزیکی (مانند اشتعال‌پذیری، انفجار)، خطرات سلامتی (به‌عنوان مثال، سمیت، سرطان‌زایی، تحریک پوست/چشم) و خطرات زیست‌محیطی است؛
- شناسایی و ارزیابی خطرات: درک دقیق خطرات بالقوه مانند اشتعال‌پذیری، سمیت، خوردگی و اثرات بهداشتی، به کارشناسان امکان می‌دهد تا وسایل حفاظت فردی مناسب را انتخاب کرده و در صورت بروز حوادث، اقدامات اولیه را به سرعت اجرا نمایند. در این راستا، آشنایی با ساختار لوزی خطر (انجمن ملی حفاظت در برابر حریق آمریکا)، که با استفاده از رنگ‌ها و اعداد (۰ تا ۴) شدت خطرات مختلف را به‌صورت بصری مشخص می‌کند، ابزاری حیاتی برای درک سریع و مؤثر میزان ریسک مرتبط با ماده شیمیایی است (شکل (۳)).
- عناصر برجسب‌گذاری: نمادهای گرافیکی، کلمات سیگنال (مانند «خطر» یا «هشدار») و عبارات هشداردهنده که به‌طور خلاصه خطرات اصلی را نشان می‌دهند؛
- اقدامات احتیاطی: توصیه‌های اولیه برای جلوگیری از مواجهه یا کاهش اثرات خطرات؛
- خطرات دیگر: اطلاعاتی در مورد خطراتی که ممکن

به‌عنوان مثال، توصیه‌های مربوط به دما و رطوبت مناسب، فشار مجاز، نوع تهویه مورد نیاز، تجهیزات حفاظت فردی و ملاحظات مربوط به حمل‌ونقل، همگی در راستای ایجاد محیط کار ایمن و استاندارد ارائه شده‌اند. این اطلاعات، مبتنی بر داده‌های تجربی و یافته‌های سمیت‌شناسی و فیزیکوشیمیایی ماده بوده و به همین دلیل از اعتبار علمی برخوردارند. شکل (۲)، دسترسی به اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS) را از طریق مراکز اطلاعاتی و همچنین برجسب‌های هشداردهنده روی ظروف مواد شیمیایی خطرناک که شامل علائم آتش‌گیری، سمیت و احتیاط است، به تصویر می‌کشد. این تصاویر به خوبی اهمیت آگاهی و در دسترس بودن اطلاعات ایمنی را برای کاربران مواد شیمیایی نشان می‌دهند.



شکل (۲): اهمیت دسترسی به برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS) و علائم هشداردهنده مواد شیمیایی خطرناک [۳].

یکی دیگر از جنبه‌های مهم این اسناد، نقش آن‌ها در مدیریت شرایط اضطراری است. بخش‌هایی از MSDS که به اقدامات مقابله با نشت، انفجار، آتش‌سوزی و تماس تصادفی اختصاص دارد، در واقع دستورالعمل‌هایی هستند که به‌صورت عملیاتی و فوری قابل اجرا بوده و می‌توانند از گسترش بحران یا تشدید آسیب جلوگیری کنند. این ویژگی سبب شده است که MSDS نه تنها یک ابزار آموزشی، بلکه بخشی از رویه‌های رسمی واکنش اضطراری در صنایع شیمیایی، آزمایشگاه‌ها و واحدهای عملیاتی باشد. بنابراین، می‌توان MSDS را یک سند «دانش‌پایه» و «عمل‌محور» دانست که مواد شیمیایی را از منظر ایمنی، بهداشتی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار داده و دانش لازم برای استفاده صحیح و کنترل ریسک را در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد. به‌کارگیری صحیح این اطلاعات، به شکل مستقیم با کاهش حوادث، جلوگیری از خسارات مالی، حفظ سلامت کارکنان و پایداری زیست‌محیطی ارتباط دارد. بدین ترتیب، MSDS نه صرفاً یک الزام اداری، بلکه ابزاری تخصصی و ضروری در مدیریت علمی مواد شیمیایی است.



ارائه می‌شود. پس از شناسایی ویژگی‌های اشتعال‌پذیری یا انفجارپذیری ماده، روش‌های مناسب مقابله و اطفاء حریق نیز باید مشخص شود. انتخاب عامل اطفاء مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا استفاده از روش نامتناسب می‌تواند موجب تشدید حادثه یا گسترش آتش‌سوزی شود. همچنین، تجهیزات حفاظت فردی مناسب برای نیروهای امدادی و آتش‌نشانان باید به‌طور دقیق تعیین و توصیه شود.

#### ۶. اطلاعات واکنش‌پذیری در صورت انتشار در محیط

این بخش شامل اطلاعاتی درباره رفتار ماده در صورت انتشار ناخواسته در محیط است و راهنمای لازم برای مدیریت ایمن آن را ارائه می‌دهد. در این قسمت، خطرات احتمالی ناشی از تماس ماده با محیط اطراف، شرایط ناپایدار یا واکنش‌پذیر و همچنین مواد یا روش‌های مناسب برای خنثی‌سازی یا کنترل آن بیان می‌شود. این اطلاعات برای پیشگیری از گسترش آلودگی، کاهش خطرات ثانویه و انتخاب اقدام مناسب در شرایط اضطراری اهمیت ویژه‌ای دارد.

#### ۷. روش حمل و انبار کردن

در این بخش، دستورالعمل‌های مربوط به چگونگی حمل، جابه‌جایی و انبارش ایمن ماده ارائه می‌شود. رعایت این الزامات از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا برخی مواد در صورت قرار گرفتن در مجاورت یکدیگر یا نگهداری در شرایط نامناسب، ممکن است از طریق واکنش‌های شیمیایی موجب بروز حریق، انفجار، خوردگی، سوزندگی یا سایر مخاطرات شوند. بنابراین، تعیین شرایط مناسب دما، تهویه، فاصله‌گذاری، نوع بسته‌بندی و سازگاری شیمیایی مواد، نقش اساسی در پیشگیری از حوادث و حفظ ایمنی دارد.

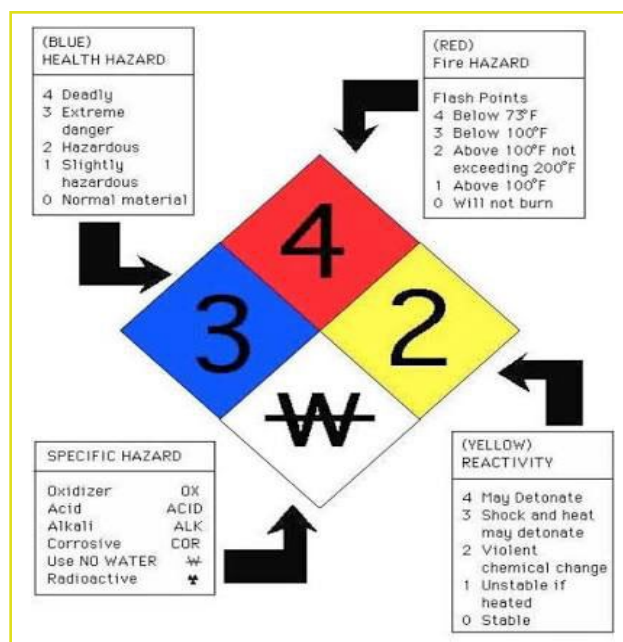
#### ۸. اطلاعات حفاظتی هنگام کار و تماس با ماده

در این بخش، الزامات و توصیه‌های ایمنی که هنگام کار با ماده یا در زمان تماس با آن باید رعایت شود، بیان می‌شود. این اطلاعات به‌صورت معمول شامل سه محور اصلی است: کنترل‌های فردی مانند استفاده از تجهیزات حفاظت فردی مناسب، کنترل‌های بهداشتی برای کاهش احتمال مواجهه و آلودگی و کنترل‌های زیست‌محیطی برای محدود کردن انتشار ماده به محیط و کاهش آثار نامطلوب آن. رعایت این موارد نقش مهمی در پیشگیری از آسیب‌های شغلی و حفظ سلامت کاربران و محیط دارد.

#### ۹. خواص فیزیکی و شیمیایی

این بخش، از جمله قسمت‌های بسیار مهم برگه اطلاعات ایمنی مواد است و پس از اطلاعات اولیه محصول، به‌طور

است در طبقه‌بندی رسمی GHS قرار نگیرند، اما همچنان مهم باشند (به‌عنوان مثال، خوردندگی، سوزاندگی).



شکل (۳): نمایش بصری خطرات مواد شیمیایی با استفاده از لوزی خطر [۴].

#### ۳. ترکیب محصول (اجزای خطرناک محصول)

در این بخش، اجزای تشکیل‌دهنده محصول، به‌ویژه مواد خطرناک موجود در فرمولاسیون، همراه با درصد تقریبی یا دامنه غلظت آن‌ها و سایر اطلاعات مرتبط ذکر می‌شود. این اطلاعات برای شناسایی دقیق ماهیت خطر، ارزیابی میزان مواجهه و انتخاب اقدامات کنترلی مناسب ضروری است.

#### ۴. کمک‌های اولیه

در این بخش، اقدامات فوری و اولیه‌ای که در صورت بروز تماس یا مواجهه ناخواسته با ماده شیمیایی باید انجام شود، به‌صورت خلاصه و کاربردی بیان می‌شود. این اطلاعات به‌طور معمول براساس نوع مسیر مواجهه ارائه می‌شوند و شامل موارد زیر هستند:

- تماس پوستی؛
- استنشاق یا تماس تنفسی؛
- بلع یا تماس گوارشی.

در این قسمت همچنین به مخاطرات احتمالی ماده از نظر ایجاد اثرات بیماری‌زا اشاره می‌شود تا فرد بتواند در کوتاه‌ترین زمان، اقدامات مناسب و متناسب با نوع حادثه را انجام دهد.

#### ۵. اطلاعات مربوط به خطرات آتش‌سوزی یا انفجار و روش‌های اطفاء

در این بخش، اطلاعات مرتبط با خطرات بالقوه آتش‌سوزی یا انفجار ماده در شرایط نگهداری، حمل‌ونقل یا مصرف

است. در صورتی که حرارت تولید شده از حد اشتعالزایی فراتر رود، این امر می‌تواند منجر به حریق یا انفجار شود.

◀ واکنش گرماگیر: ماده با جذب حرارت از منابع خارجی، پتانسیل تولید حریق یا انفجار را دارد.

◀ تجزیه: ماده ممکن است به مواد دیگری تجزیه شود.

◀ ترکیب: ماده ممکن است با مواد دیگر ترکیب شود.

■ **شرایط اجتناب:** رعایت اصول ایمنی در هنگام کار با موادی که دارای واکنش‌پذیری بالا هستند، نقش مهمی در پیشگیری از حوادث و کاهش خطرات احتمالی دارد. فعالیت‌هایی که باید از آن‌ها اجتناب شود، شامل موارد زیر است؛ به عنوان مثال، نزدیک کردن تینر به حرارت، استفاده از تینر در فضای بسته، استنشاق مستقیم بخار تینر و غیره.

■ **مواد ناسازگار:** ناسازگاری این ماده با مواد یا شرایط خاص می‌تواند منجر به تولید خطر نماید.

■ **خطرات حاصل از تجزیه محصول:** تجزیه ماده، چه در اثر حرارت (تجزیه حرارتی) و چه در شرایط دیگر، می‌تواند خطراتی را به همراه داشته باشد:

◀ خطرات شیمیایی؛

◀ خطرات حریق؛

◀ خطرات پرتوزایی (در صورت وجود مواد رادیواکتیو).

آگاهی از این اطلاعات برای شناسایی شرایطی که ممکن است موجب تجزیه، انفجار، آتش‌سوزی، تولید گازهای خطرناک یا واکنش‌های ناخواسته شوند، اهمیت زیادی دارد. رعایت اصول ایمنی در هنگام کار با مواد دارای واکنش‌پذیری بالا، نقش مهمی در پیشگیری از حوادث و کاهش خطرات احتمالی دارد.

## ۱۱. اطلاعات زیست محیطی

این بخش به‌طور تفصیلی به بررسی اثرات بالقوه ماده بر محیط‌زیست می‌پردازد. اطلاعات ارائه شده در این قسمت شامل مواردی مانند سمیت برای موجودات زنده (آبزیان، خاکزیان)، قابلیت تجزیه‌پذیری در محیط (زیست‌تخریب‌پذیری)، پتانسیل تجمع زیستی و تحرک در خاک است. علاوه بر این، در این بخش به چگونگی خنثی‌سازی ماده در صورت انتشار در محیط، روش‌های کنترل و جمع‌آوری مواد رها شده و اقدامات لازم برای مقابله با پیامدهای زیست‌محیطی و حتی فردی ناشی از این انتشار، راهنمایی‌های لازم ارائه می‌شود. هدف اصلی این بخش، آگاهی‌بخشی در خصوص اثرات زیست‌محیطی ماده و ارائه راهکارهای عملی برای به حداقل رساندن این اثرات و مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی احتمالی است.

معمول نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی ویژگی‌های ذاتی ماده دارد. در این قسمت، ویژگی‌هایی ارائه می‌شود که برای شناسایی رفتار ماده در شرایط مختلف، تعیین الزامات نگهداری و بررسی سازگاری آن با فرآیندهای مصرف یا تولید ضروری هستند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به شکل ظاهری، رنگ، بو، حالت فیزیکی در دمای محیط و نیز خواص شیمیایی مانند نقطه جوش، نقطه ذوب، فشار بخار، چگالی، دانسیته، چگالی ویژه، دمای اشتعال، قابلیت انحلال و pH اشاره کرد. برای مثال، دمای جوش ماده در فشار مشخص، نشان‌دهنده شرایطی است که ماده در آن به جوش می‌آید و می‌تواند در انتخاب دمای نگهداری و فرآیند تولید اهمیت داشته باشد. نقطه اشتعال<sup>۸</sup> نیز دمایی است که در آن ماده می‌تواند بخارهای قابل اشتعال تولید کند و بنابراین، در ارزیابی خطر آتش‌سوزی و انفجار بسیار مهم است. همچنین فشار بخار اطلاعات لازم درباره تمایل ماده به تبخیر را در دمای معین فراهم می‌کند و چگالی یا دانسیته نیز برای بررسی سازگاری ماده با سایر ترکیبات یا ارزیابی شرایط اختلاط مورد توجه قرار می‌گیرد. در مجموع، این اطلاعات به مصرف‌کننده، فروشنده و واحدهای ایمنی کمک می‌کند تا ماده را در شرایط مناسب‌تری نگهداری، حمل و مصرف کنند و از بروز خطرات احتمالی جلوگیری شود.

## ۱۰. پایداری و واکنش‌پذیری

این بخش به بررسی جامع پایداری شیمیایی و پتانسیل واکنش‌پذیری ماده در شرایط مختلف می‌پردازد.

■ **پایداری شیمیایی:**<sup>۹</sup> ماده در شرایط عادی و توصیه شده برای نگهداری و مصرف، پایدار است. با این حال، ناپایداری آن در شرایط خاص مانند دما، رطوبت، نور یا فشار بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ■ پتانسیل واکنش‌پذیری<sup>۱۰</sup>

◀ واکنش با سایر مواد: میزان واکنش‌پذیری ماده با سایر مواد موجود در محیط (مانند مواد ناسازگار) و همچنین در برخی موارد، با اجزای بدن انسان، مورد توجه قرار می‌گیرد. این واکنش‌ها ممکن است در شرایط خاص به بروز خطرات جدی منجر شوند.

◀ شرایط ایجاد واکنش‌های ناخواسته: عواملی مانند دما، رطوبت، نور، فشار و تماس با مواد ناسازگار می‌توانند موجب واکنش‌های ناخواسته، تجزیه، انفجار، آتش‌سوزی یا تولید گازهای خطرناک شوند.

## ■ انواع واکنش‌های اصلی

◀ واکنش گرمازا: در اثر تماس با مواد دیگر یا به دلیل فعل و انفعالات داخلی، ماده قادر به تولید خودبه‌خودی حرارت



## ۱۲. ملاحظات مربوط به دفع ماده (به عنوان زباله)

این بخش به نکات و الزامات کلیدی درخصوص دفع ایمن و مسئولانه ماده شیمیایی به عنوان زباله می پردازد. در این قسمت، دستورالعمل های لازم برای طبقه بندی و جداسازی صحیح ماده زائد، روش های مناسب دفع براساس مقررات محلی، ملی و بین المللی و تأکید بر ممنوعیت دفع در سیستم های فاضلاب شهری، آب های سطحی و زیرزمینی، ارائه می شود. همچنین، در این بخش به اثرات زیست محیطی احتمالی ناشی از دفع نادرست اشاره شده و بر اهمیت رعایت رویه های زیست محیطی برای جلوگیری از آلودگی خاک، آب و هوا تأکید می شود. راهنمایی های لازم برای مدیریت پسماندهای شیمیایی خطرناک و استفاده از روش های دفع سازگار با محیط زیست در این بخش گنجانده شده است.

## ۱۳. اطلاعات مربوط به حمل و نقل

این بخش به الزامات و ملاحظات مرتبط با جابه جایی ایمن ماده شیمیایی اختصاص دارد و اطلاعات لازم درباره نوع بسته بندی مناسب، چگونگی برچسب گذاری، شرایط نگهداری حین حمل و اقدامات احتیاطی مورد نیاز را ارائه می کند. در این قسمت همچنین به مواردی اشاره می شود که رعایت آن ها برای پیشگیری از نشت، شکست بسته، واکنش ناخواسته یا بروز خطر برای افراد و محیط زیست ضروری است. علاوه بر این، کدها و شناسه های حمل و نقل ماده شیمیایی در این بخش درج می شود تا امکان دسترسی سریع به اطلاعات ایمنی مربوط به حمل در مسیرهای مختلف فراهم شود؛ از جمله حمل و نقل جاده ای، هوایی، دریایی و ریلی. این اطلاعات برای انتخاب روش مناسب حمل و کاهش خطرات احتمالی، نقش اساسی دارد و رعایت آن ها برای حفظ ایمنی عمومی و حفاظت از محیط زیست ضروری است.

## ۱۴. اطلاعات قانونی

این بخش شامل الزامات، محدودیت ها و توصیه های قانونی مرتبط با استفاده ایمن از ماده شیمیایی است. در این قسمت، دستورالعمل هایی درباره چگونگی صحیح برخورد، شرایط مجاز استفاده و محدودیت های احتمالی در کاربرد ماده ارائه می شود. این محدودیت ها می توانند شامل ملاحظات زیست محیطی، نظیر ممنوعیت یا محدودیت در رهاسازی ماده در طبیعت و نیز ملاحظات فردی، مانند محدودیت مصرف یا تماس برای گروه های خاص، باشند. همچنین، این بخش می تواند به الزامات انطباق با قوانین و مقررات ملی و بین المللی در زمینه تولید، نگهداری، حمل، مصرف و دفع ماده اشاره کند. هدف اصلی از درج این اطلاعات، کاهش

خطرات احتمالی، پیشگیری از سوء استفاده یا کاربرد نادرست و اطمینان از استفاده مسئولانه و مطابق با ضوابط ایمنی و حقوقی است.

## ۱۵. اطلاعات سم شناسی

این بخش به بررسی اثرات بهداشتی و سمی بالقوه ماده شیمیایی می پردازد. در صورتی که ماده به عنوان سمی یا خطرناک طبقه بندی شود، در این قسمت اطلاعات جامعی درخصوص عوارض ناشی از تماس، استنشاق یا بلع آن ارائه می شود. همچنین، شماره ثبت اثرات سمی ماده شیمیایی برای ارجاع به منابع دقیق تر و اطلاعات تکمیلی درج می شود. در این بخش، موارد زیر مورد توجه قرار می گیرند:

## ■ شدت سمیت

- ▲ سمیت حاد: اثرات فوری و کوتاه مدتی که پس از تماس با دوز بالای ماده در مدت زمان کوتاه رخ می دهند؛
- ▲ سمیت مزمن: اثرات بلند مدتی که در اثر تماس مکرر یا طولانی مدت با دوزهای پایین ماده بروز می کنند.

■ اثرات سم: شرح دقیق علائم و عوارض ناشی از مواجهه با ماده.

## نکات مهم:

- LD50 (دوز کشنده ۵۰ درصد): میزان دوزی از ماده که انتظار می رود باعث مرگ ۵۰ درصد از جمعیت مورد آزمایش شود.
- LC50 (غلظت کشنده ۵۰ درصد): غلظت ماده در هوا یا آب که انتظار می رود باعث مرگ ۵۰ درصد از جمعیت مورد آزمایش شود.

## ۱۶. ملاحظات و اطلاعات دیگر

این بخش حاوی اطلاعات تکمیلی و ملاحظات مهمی است که به درک بهتر کاربر و تضمین ایمنی در استفاده، نگهداری و دفع ماده شیمیایی کمک شایانی می کند؛ محتوای آن بسته به سازنده، نوع ماده شیمیایی و الزامات قانونی خاص، متفاوت بوده و به صورت معمول شامل توصیه های ایمنی اضافی، اطلاعات قانونی و مقرراتی مربوطه، تاریخچه بازنگری سند، توضیح مخفف ها و واژگان تخصصی و توصیه های خاص مصرف کننده برای استفاده ایمن و مؤثر از ماده، به همراه اطلاعات تماس اضطراری ضروری است؛ بنابراین، مطالعه دقیق آن به تمامی مصرف کنندگان و افراد درگیر با ماده شیمیایی اکیداً توصیه می شود تا از بروز حوادث جلوگیری شده و انطباق با مقررات و استفاده صحیح از محصول تضمین شود [۵ تا ۹].

این مقاله بر اهمیت حیاتی برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (SDS/MSDS) در محیط‌های آزمایشگاهی، به‌ویژه در آزمایشگاه‌های کنترل و آنالیز مواد و محصولات شیمیایی و پلیمری، تأکید دارد. این برگه‌ها به‌عنوان منبعی جامع، اطلاعات ضروری درخصوص ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد، خطرات بالقوه (از جمله اشتعال‌پذیری، سمیت، خوردگی و اثرات بهداشتی) و دستورالعمل‌های مربوط به استفاده ایمن، حمل‌ونقل و انبارش را در اختیار کارشناسان قرار می‌دهند. شناسایی دقیق و درک خطرات مرتبط و همچنین با استفاده از ابزارهایی مانند لوزی خطر NFPA، به کارشناسان امکان می‌دهد تا تجهیزات حفاظت فردی (PPE) مناسب را انتخاب کرده و در صورت بروز حوادث ناگوار، به‌عنوان مثال، نشت، انفجار یا مسمومیت، اقدامات اولیه و صحیح را به سرعت و با اطمینان بیشتری اجرا نمایند. تضمین دسترسی مداوم به SDS/MSDS برای تمامی مواد شیمیایی، اعم از خالص و مخلوط، برای حفظ بالاترین استانداردهای ایمنی در محیط کار ضروری است و آمادگی لازم را برای واکنش مؤثر در برابر شرایط اضطراری فراهم می‌آورد. درنهایت، این برگه‌ها ابزاری بنیادین برای توانمندسازی کارشناسان آزمایشگاه به‌منظور کاهش ریسک‌ها و تضمین محیط کاری ایمن و سالم محسوب می‌شوند.

## پی‌نوشت

1. Safety Data Sheet (SDS) یا Material Safety Data Sheet (MSDS)
2. Personal Protective Equipment (PPE)
3. The National Fire Protection Association (NFPA)
4. Globally Harmonized System (GHS)
5. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR)
6. International Air Transport Association (IATA)
7. International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG)
8. Flash Point
9. Chemical Stability
10. Reactivity Potential

## مراجع

- [1] <https://echa.europa.eu/safety-data-sheets>
- [2] <https://www.sciencedirect.com/topics/material-safety->
- [3] [www.chemicals.co.uk](http://www.chemicals.co.uk)
- [4] <https://www.hse.gov.uk/labelling-packaging/safety-d>
- [5] <https://quizlet.com/378086249/msds-material-safety-data-sheet-diagram/>
- [6] HSE: Information about health and safety at work
- [7] Material Safety Data Sheets and their relevance to Customs work
- [8] <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3514.pdf>
- [9] [https://hse.khu.ac.ir/files/site114/files/MSDS.docx\\_\(1\).pdf](https://hse.khu.ac.ir/files/site114/files/MSDS.docx_(1).pdf)



## نویسنده

پدرام ملائکه<sup>۱\*</sup>

۱. شرکت فنی و مهندسی آزما پلیمر پارس، مشهد، ایران  
 ۲. عضو کارگروه آنالیز حرارتی

\*pedrammalaekhe@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸

تحلیل گرماوزن سنجی؛  
مفاهیم، اصول و کاربردها

## واژه‌های کلیدی

تحلیل گرماوزن سنجی، واسنجی (کالیبراسیون)،  
 تصدیق، آنالیز گاز.

## چکیده

در این مقاله، تحلیل گرماوزن سنجی یا توزین گرمایی<sup>۱</sup> معرفی شده و اصول پایه مرتبط با دستگاه و روش، شامل کالیبراسیون<sup>۲</sup> و تصدیق<sup>۳</sup> و چگونگی اجرای آن‌ها توضیح داده می‌شود. عملکرد سخت‌افزاری دستگاه نیز بررسی خواهد شد. علاوه بر آن، کاربردهای تحلیل گرماوزن سنجی و روش‌های جانبی مرتبط، از طریق دستگاه‌های آزمون قابل اتصال به TGA، مانند تحلیل گاز تکامل یافته<sup>۴</sup> و تحلیل گازهای خروجی همراه با طیف سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه<sup>۵</sup> نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## مقدمه

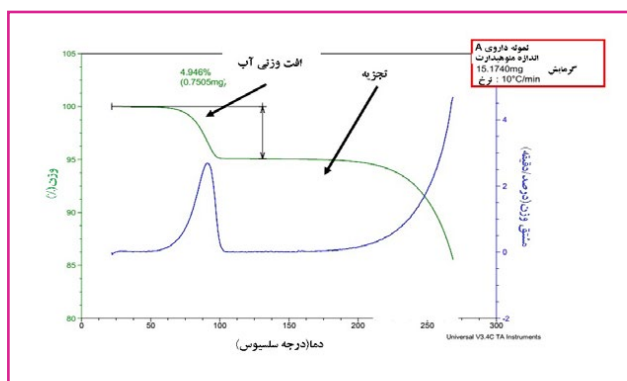
تحلیل گرماوزن سنجی یا توزین گرمایی تغییرات افزایشی یا کاهش وزن، جرم و نرخ تغییر وزن<sup>۶</sup> را به عنوان تابعی از دما، زمان و محیط گازی<sup>۷</sup> اندازه‌گیری می‌کند. این روش به ارزیابی پایداری گرمایی و پایداری اکسایشی مواد، ترکیب سامانه‌های چند جزیی، طول عمر تخمینی محصولات و سینتیک تجزیه مواد کمک می‌کند. همچنین، تاثیر محیط‌های گازی واکنش‌پذیر یا خورنده بر مواد، میزان رطوبت، محتوای مواد فرار و مقدار باقی‌مانده مواد پس از گرمایش نیز با استفاده از TGA قابل تعیین است.

## اصول و سازوکار روش

در تحلیل گرماوزن سنجی، کاهش وزن نمونه آزمون می‌تواند ناشی از تجزیه با شکستن پیوندهای شیمیایی، تبخیر مواد فرار با افزایش دما، برهم‌کنش نمونه با یک محیط گازی کاهنده مانند هیدروژن یا آمونیاک و همچنین آزادسازی مواد جذب شده<sup>۸</sup> باشد. از سوی دیگر، افزایش وزن نمونه در اثر اکسایش با محیط گازی اکسیدکننده و جذب مواد<sup>۹</sup> نیز قابل اندازه‌گیری است. تمامی این پدیده‌ها فرآیندهای سینتیکی هستند، به این معنا که برای وقوع هر یک نرخ مشخصی وجود دارد.

روش هم‌زمان تفاضل گرمایی و تحلیل  
گرماوزن سنجی

روش هم‌زمان تفاضل گرمایی و تحلیل گرماوزن سنجی<sup>۱۰</sup>، جریان گرما و تغییرات وزن یک ماده را به عنوان تابعی از دما یا زمان در یک محیط گازی کنترل شده، از دمای اتاق به طور معمول  $23 \pm 2$  تا  $1500$  درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری می‌کند. اطلاعات به دست آمده امکان تمایز بین فرآیندهای گرماگیر<sup>۱۱</sup> و گرمازا<sup>۱۲</sup> که کاهش وزنی ندارند، مانند ذوب و تبلور و فرآیندهایی که با کاهش وزن همراه هستند، مانند تجزیه و تخریب را فراهم می‌کند.



شکل (۴): تحلیل گرمای سنجی یک داروی مونوهیدرات [۱].

## ویژگی‌های مدل‌های دستگاه‌های TGA

جدول (۱) ویژگی‌های تعدادی از دستگاه‌های تحلیل گرمای سنجی یک تولیدکننده را نشان می‌دهد و شرایط کاری و محدوده عملکرد هر مدل را ارائه می‌کند.

جدول (۱): انواع مدهای دستگاه TGA با مشخصات و محدوده عملکرد متفاوت [۱].

مدل دستگاه	TGA ۵۵۰۰	TGA ۵۵۰/۵۰	TGA ۵۰/۵۵۰
محدوده دمایی عملکرد	دمای محیط تا ۱۲۰۰ °C	دمای محیط تا ۱۰۰۰ °C	دمای محیط تا ۱۵۰۰ °C
محدوده نرخ گرمادهی	۰/۱ تا ۵۰۰ °C بر دقیقه به صورت خطی بیشتر از ۱۶۰۰ °C بر دقیقه به صورت بالستیک (با استفاده از گاز پاک کننده ۱۶)	۰/۱ تا ۱۰۰ °C بر دقیقه به صورت خطی	۰/۱ تا ۱۰۰ °C بر دقیقه به صورت خطی
ظرفیت وزن نمونه	۱۰۰۰ mg	۱۰۰۰ mg	۲۰۰ mg
محدوده توزین پویا <sup>۱۷</sup>	۱۰۰۰ mg	۱۰۰۰ mg	-
رانش پویای خط مبنا <sup>۱۸</sup> بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد	کمتر از ۱۰ μg	کمتر از ۵۰ μg	کمتر از ۵۰ μg

## طرحواره<sup>۱۹</sup> دستگاه TGA

مطابق شکل (۵)، بخش‌های مختلف تحلیل گر گرمای سنجی نمایش داده شده و ترازو در سمت راست طرح قابل مشاهده است. بیشتر دستگاه‌های آزمایش دارای پیکربندی ترازوی شمیه<sup>۲۰</sup> به صورت عمودی هستند.

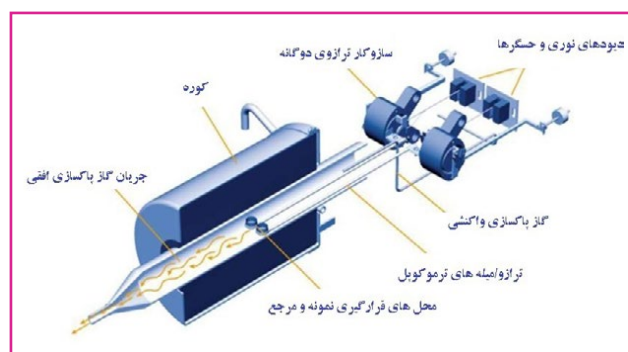
این تحلیل، اطلاعات متنوعی درباره مواد ارائه می‌دهد، از جمله:

- ♦ پایداری گرمایی و پایداری اکسایشی مواد؛
- ♦ ترکیب سامانه‌های چند جزیی و طول عمر تخمینی محصولات؛
- ♦ سینتیک تجزیه مواد و تأثیر محیط‌های گازی واکنش‌پذیر یا خورنده؛
- ♦ میزان رطوبت، محتوای مواد فرار و مقدار باقی‌مانده پس از گرمایش؛

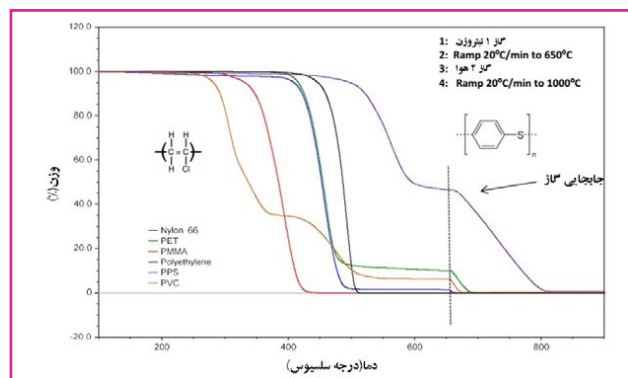
♦ دماهای گذار<sup>۱۳</sup>، گرماهای هم‌جوشی-گداخت<sup>۱۴</sup> و واکنش‌ها؛

♦ نقاط ذوب و جوش و ظرفیت گرمایی.

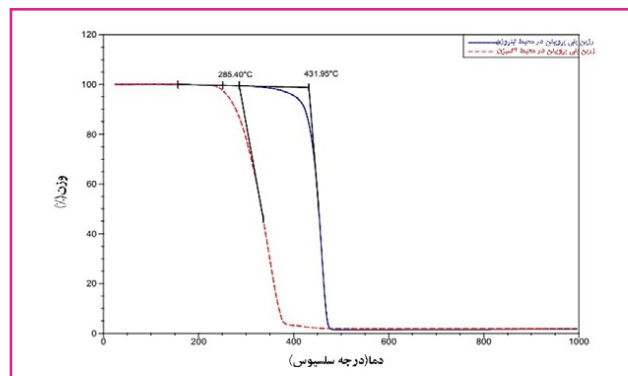
این اطلاعات به‌طور معمول با استفاده از نمودارها و شکل‌های (۱) تا (۴) نشان داده می‌شوند.



شکل (۱): نمای از دستگاه تحلیلگر حرارتی هم‌زمان<sup>۱۵</sup> [۱].



شکل (۲): نمودار پایداری گرمایی پلیمرها [۱].



شکل (۳): نمودار پایداری اکسایشی پل پروپیلن [۱].



شکل (۷): کوره سیم پیچ استاندارد با نرخ جریان ترازو/نمونه: ۶۰/۴۰ میلی لیتر بر دقیقه [۱].

#### ◆ کوره EGA

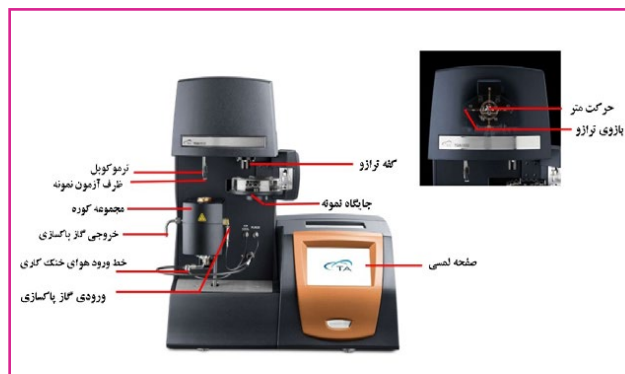
این مدل کوره به صورت اختیاری برای برخی مدل های دستگاه ها ارائه می شود و محدوده دمایی از دمای محیط تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد را پوشش می دهد. نرخ گرمایش خطی کنترل شده از ۰/۱ تا ۵۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه قابل تنظیم است. وجود یک لایه کوارتز، تمیز کردن کوره را آسان می کند و این کوره قابل تعویض با کوره سیم پیچ است (شکل (۸)).



شکل (۸): کوره EGA با نرخ جریان ترازو/نمونه: ۹۰/۱۰ میلی لیتر بر دقیقه [۱].

#### ◆ کوره فروسرخ (IR)

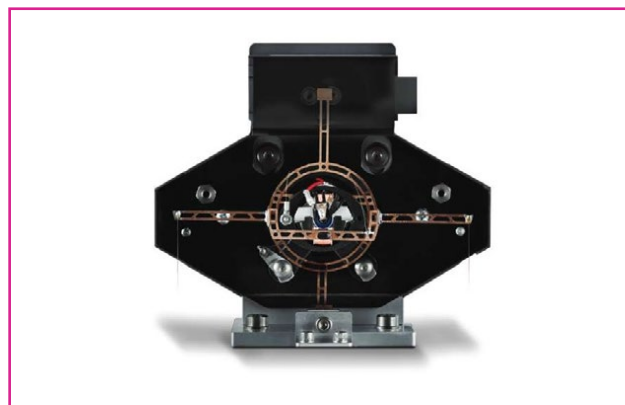
این مدل از لامپ های هالوژن کوارتز به عنوان منبع گرمایش استفاده می کند و محدوده دمایی از دمای محیط تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد را پوشش می دهد. نرخ گرمایش خطی کنترل شده از ۰/۱ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه قابل تنظیم است و نرخ گرمایش بالستیک بیش از ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه را فراهم می کند. کوره به آهنربای الکتریکی یکپارچه برای کالیبراسیون دما مجهز است و با استانداردهای نقطه کیوری<sup>۲۲</sup> (دمایی که در آن خاصیت مغناطیسی جسم دگرگون می شود) سازگار است. این کوره همچنین قابلیت تحلیل گاز خروجی<sup>۲۳</sup> را دارد (شکل (۹)).



شکل (۵): طرحواره دستگاه تحلیلگر گرمایزن سنجی [۱].

#### ترازوی TGA و عملکرد آن

جزء اصلی دستگاه، ترازوی آن است که براساس اصل عدم تعادل عمل می کند. جریان الکتریکی به حرکت کنتور وارد می شود و میزان جریان اعمال شده متناسب با تغییر وزن نمونه است (شکل (۶)).



شکل (۶): ترازوی دستگاه تحلیلگر گرمایزن سنجی [۱].

#### انواع گزینه های کوره TGA

##### ◆ کوره سیم پیچ

این مدل کوره به عنوان استاندارد در برخی مدل های دستگاه ها استفاده می شود و محدوده دمایی از دمای محیط تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد را فراهم می کند. نرخ گرمایش خطی کنترل شده از ۰/۱ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه قابل تنظیم است و نرخ گرمایش سریع (بالستیک<sup>۲۱</sup>) بیش از ۶۰۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه قابل اعمال است. این کوره همچنین قابل تعویض با کوره تحلیل گاز تکامل یافته است (شکل (۷)).



♦ روش دستی: استفاده از یک کفه خالی و وزنه‌های واسنجی؛  
♦ روش خودکار: استفاده از سه تجهیز واسنجی وزن و ظروف آزمون موجود همراه دستگاه.  
توجه: ظروف آزمون واسنجی تنها زمانی قابل استفاده هستند که یک ظرف آزمون مرجع از جنس پلاتین نصب شده باشد.

### استاندارد ASTM E 2040: واسنجی در مقیاس جرمی دستگاه‌های گرم‌وزن‌سنجی

سیگنال جرمی تولیدشده توسط دستگاه تحلیلگر گرم‌وزن‌سنجی با جرم یک ماده مرجع قابل ردیابی در یک آزمایشگاه مرجع ملی مقایسه می‌شود. برای مرتبط کردن سیگنال جرم (یا وزن) تولید شده توسط TGA با سیگنال ماده مرجع، از یک همبستگی خطی با استفاده از دو نقطه واسنجی استفاده می‌شود. این روش آزمون انطباق دستگاه TGA را در شرایط محیطی بررسی می‌کند. بیشتر آزمون‌های TGA در شرایط افزایش دما یا در دماهای ثابت و دور از شرایط محیطی انجام می‌شوند؛ بنابراین، این روش آزمون اثرات دما بر واسنجی جرم را پوشش نمی‌دهد. در واسنجی دستی، برخی مدل‌های دستگاه از یک استاندارد جرمی صفر و پس از آن از استانداردهای جرمی ۱۰۰ میلی‌گرم و ۱۰۰۰ میلی‌گرم استفاده می‌کنند.

### استاندارد ASTM E 1582: واسنجی مقیاس دما در دستگاه TGA

این استاندارد دو روش را برای واسنجی دمای دستگاه تحلیلگر گرم‌وزن‌سنجی تشریح می‌کند که بر پایه نقطه ذوب یا گذار مغناطیسی انجام می‌شوند. رایج‌ترین رویکرد در دستگاه‌های TGA، استفاده از گذار مغناطیسی است. دمای نقطه کیوری، یعنی دمایی که در آن ماده خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد، به‌عنوان نقطه جبران دمایی<sup>۲۸</sup> در نظر گرفته می‌شود. مواد پارامغناطیس<sup>۲۹</sup> موادی هستند که قابلیت جذب توسط آهنربا را دارند. نقاط واسنجی دما از طریق مقایسه دمای آغاز ذوب اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع تعیین می‌شوند. نرم‌افزار دستگاه‌ها امکان انجام حداکثر پنج نقطه واسنجی دما را فراهم می‌کنند. به‌طور کلی، این نقاط باید محدوده دمایی مورد نظر برای آزمون نمونه‌های بعدی را پوشش دهند.

### واسنجی دمایی دستگاه TGA

مراحل شرح داده شده برای دو حالت پیکربندی ترازوی عمودی و ترازوی افقی، مطابق با شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۹): کوره فروسرخ<sup>۲۴</sup> با نرخ جریان ترازو/نمونه: ۲۵/۲۵ میلی‌لیتر بر دقیقه (۱).

### واسنجی و تصدیق استاندارد TGA

در این دستگاه، دو نوع واسنجی وزنی<sup>۲۵</sup> و دمایی<sup>۲۶</sup> مورد نیاز است. واسنجی دما تحت تأثیر عواملی مانند نوع و جریان گاز پاک‌کننده<sup>۲۷</sup>، رسانایی گرمایی هلیوم، رسانایی گرمایی نیتروژن، هوا، اکسیژن و آرگون، نوع ظرف آزمون و نرخ گرمایش قرار دارد.

### راهنماهای واسنجی و تصدیق عمومی

واسنجی در دو حالت انجام می‌شود: استفاده در حین عملکرد دستگاه و واسنجی هنگام راه‌اندازی. در صورتی که دستگاه مرحله تصدیق را با موفقیت پشت سر نگذارد یا تنظیمات دستگاه تغییر کرده باشد، واسنجی مجدد ضروری است. تصدیق باید تعیین کند که داده‌ها هر چند وقت یک‌بار بررسی شوند. برای این منظور، یک ماده مرجع به‌عنوان نمونه استاندارد آزمون شده و نتایج با مقادیر مرجع مقایسه می‌شود. در صورتی که نتایج خارج از محدوده رواداری قرار گیرند، واسنجی مجدد انجام می‌شود.

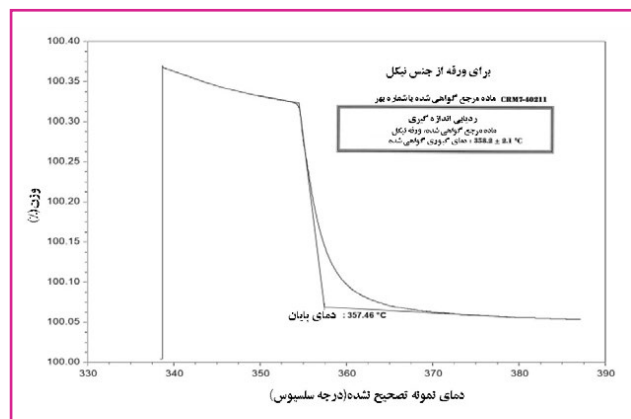
### الزامات قبل از واسنجی

قبل از انجام مراحل واسنجی، ظرف آزمون دستگاه تحلیلگر گرم‌وزن‌سنجی باید کاملاً تمیز شود. نرخ جریان گاز پاک‌کننده باید مطابق با نوع کوره تنظیم شود و نباید بیش از  $\pm 5$  میلی‌لیتر بر دقیقه انحراف داشته باشد. برای واسنجی، از مواد مرجع با خلوص بالا ( $> 99/99$  درصد) استفاده می‌شود.

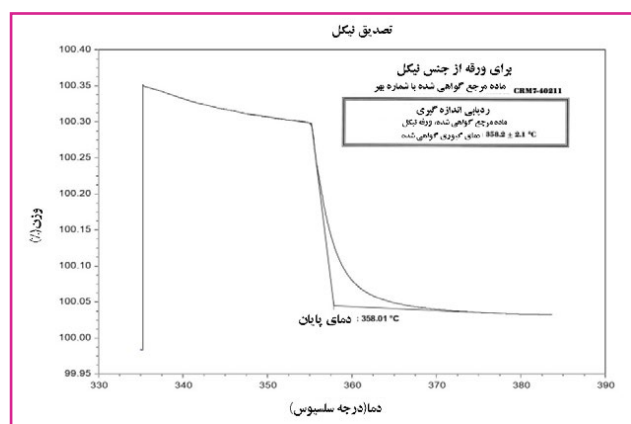
### واسنجی جرم/وزن

واسنجی وزن را می‌توان به روش‌های زیر انجام داد:

فاصله تقریبی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، در محدوده دمایی ۱۵۰ تا ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد فراهم می‌کنند. شرکت تی‌ای اینسترومنتس<sup>۳۲</sup> توزیع‌کننده انحصاری جهانی این مواد مرجع دمای کیوری است (شکل‌های (۱۳) و (۱۴)).



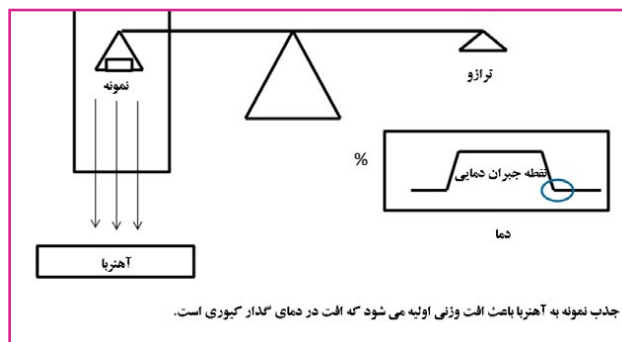
شکل (۱۳): نمونه‌ای از واسنجی دمایی دستگاه TGA با ماده مرجع نیکل [۱].



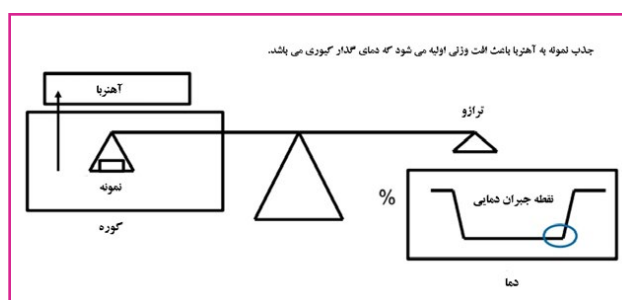
شکل (۱۴): تصدیق دمایی TGA با نیکل (نقطه کیوری) [۱].

## آنالیز اگزالات کلسیم به‌عنوان ماده مرجع استاندارد

اگرچه اگزالات کلسیم به‌طور کلی به‌عنوان یک ماده استاندارد پذیرفته نشده‌است، اما در عمل برای انجام مقایسه‌های بین‌آزمایشگاهی کاربرد دارد. شرایط آزمون، از جمله نوع ظرف آزمون، نوع گاز پاک‌کننده و نرخ جریان آن و همچنین نرخ گرمایش، باید با دقت کنترل شوند. به‌طور ویژه، جرم نمونه در حدود ۵ میلی‌گرم، اندازه ذرات، و چگونگی قرارگیری نمونه در ظرف آزمون نیازمند کنترل دقیق است. آزمون باید در چندین نوبت تکرار شود تا تعداد داده‌ها برای انجام تحلیل آماری کفایت داشته باشد. تغییرات وزن و دماهای قله حاصل از تحلیل بررسی می‌شوند تا عملکرد کاربر و دستگاه ارزیابی شود. در صورت بروز هرگونه مشکل در عملکرد، انجام دوباره تحلیل اگزالات کلسیم ضروری است.



شکل (۱۰): پیکربندی ترازوی عمودی دستگاه تحلیل گر گرمایز سنجی [۱].

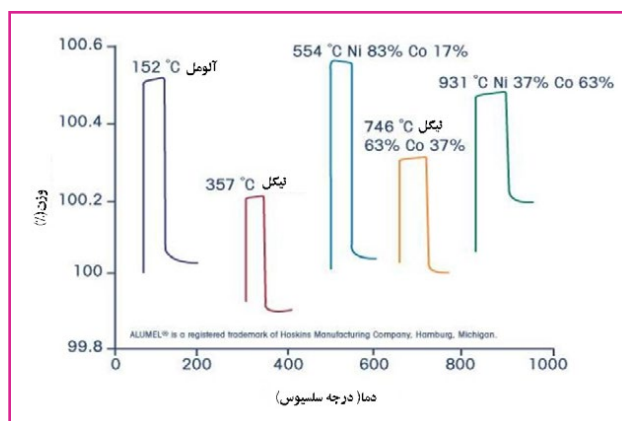


شکل (۱۱): پیکربندی ترازوی افقی دستگاه تحلیل گر گرمایز سنجی [۱].

## ۳۰ مواد مرجع دمای کیوری

کنفدراسیون بین‌المللی آنالیز گرمایی و گرماسنجی<sup>۳۱</sup> مجموعه‌ای شامل شش ماده مرجع دمای کیوری گواهی شده و قابل ردیابی را برای واسنجی دمایی دستگاه‌های گرمایز سنجی ارائه کرده است (شکل (۱۲)). این مواد مرجع شامل موارد زیر هستند:

- ◆ Alumel: 153 °C
- ◆ Ni83Co17: 555 °C
- ◆ Ni37Co63: 931 °C
- ◆ Nickel: 358 °C
- ◆ Ni63Co37: 747 °C
- ◆ Cobalt: 1116.0 °C



شکل (۱۲): استانداردهای کیوری با قابلیت ردیابی به ICTAC [۱].

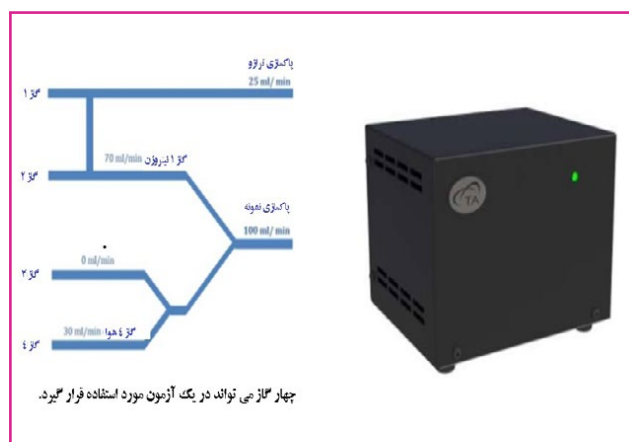
این مواد مرجع امکان واسنجی دما را در بازه‌هایی با

گازهایی که به صورت معمول در TGA/SDT استفاده می شوند عبارتند از:

- ◀ نیتروژن ( $N_2$ ): بی اثر، ارزان و به راحتی در دسترس؛
- ◀ هلیوم ( $He$ ): بی اثر و به طور معمول در ترکیب با طیف سنجی جرمی<sup>۳۸</sup> (TGA-MS) استفاده می شود؛
- ◀ آرگون ( $Ar$ ): بی اثر؛
- ◀ هوا/اکسیژن ( $O_2$ ): هنگام مطالعه پایداری اکسایشی مواد استفاده می شود و گاهی وضوح رویدادهای کاهش وزن را بهبود می بخشد.

#### ♦ مازول تحویل گاز ترکیبی

این مازول برای استفاده در برخی دستگاهها کاربرد دارد و امکان ترکیب دو گاز به عنوان گاز اصلی پاک کننده نمونه در طول آزمون را فراهم می کند. گازهایی مانند نیتروژن، هلیوم، آرگون، اکسیژن، هوا، دی اکسید کربن، مونوکسید کربن و ترکیبی شامل ۴ درصد هیدروژن و ۹۶ درصد نیتروژن را می توان با هم ترکیب کرد. در یک آزمون می توان از حداکثر چهار گاز به صورت هم زمان استفاده نمود (شکل (۱۵)). ترازو و جریان گاز پاک کننده نمونه به مدل دستگاه وابسته است (شکل (۱۶)).



شکل (۱۵): مازول تحویل گاز ترکیبی [۱].



شکل (۱۶): نمای پشت پل مازول تحویل گاز ترکیبی [۱].

#### آزمون آلودگی گاز پاک کننده $N_2$ با اکسیژن

این آزمون با استفاده از اگزالات مس<sup>۳۹</sup> انجام می شود

#### واسنجی و تصدیق استاندارد دستگاه SDT

پس از نصب اولیه دستگاه، هر بار که نوع سامانه گرمایش کوره، نرخ گرمایش آزمون یا نوع گاز خروجی تغییر کند، انجام دوباره واسنجی ضروری است. واسنجی های قابل انجام شامل واسنجی وزنی برای سیگنال وزن در آنالیز گرمایز سنجی و تنظیم سیگنال آنالیز گرمایی تفاضلی<sup>۳۳</sup> برای پردازش داده های مربوط به اختلاف دما<sup>۳۴</sup> است. واسنجی دما در دستگاه SDT با استفاده از استانداردهای نقطه ذوب یا نقطه کیوری مشابه دستگاه TGA انجام می شود و به طور معمول از استانداردهای نقطه ذوب استفاده می شود. واسنجی جریان گرمایی در آنالیز گرمایی تفاضلی نیز امکان پذیر است. ظرفیت حرارتی معکوس در دستگاه های دارای قابلیت<sup>۳۵</sup> MDSC مانند SDT ۶۵۰ نیز قابل انجام است. برای سیگنال DTA، هنگام استفاده از SDT به عنوان DSC-TGA نیازی به واسنجی جداگانه نیست؛ این آزمون به طور معمول از همان خط مبنای به دست آمده برای TGA استفاده می کند.

در واسنجی وزن، جریان گرما و ثابت سلول، آنالیز براساس منحنی ظرفیت گرمایی یا قوت کبود<sup>۳۶</sup> در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد انجام می شود. برای این منظور، سه آزمون آزمایشی مورد نیاز است: دو آزمون برای تولید منحنی جریان گرما و یک آزمون برای اصلاح واسنجی از طریق واسنجی ثابت سلول با استفاده از یک استاندارد فلزی شناخته شده، مانند روی (Zinc). در واسنجی ظرفیت گرمایی معکوس<sup>۳۷</sup> با استفاده از MDSC، منحنی واسنجی ظرفیت گرمایی با اجرای یک نمونه یا قوت کبود در محدوده دمایی مورد نظر و با شرایط مدوله شده مناسب ایجاد می شود. سپس منحنی ظرفیت گرمایی معکوس جمع آوری شده در برابر مقادیر واقعی ظرفیت گرمایی یا قوت کبود در همان محدوده دمایی کالیبره می شود.

#### ملاحظات ابزاری

##### ♦ ملاحظات انتخاب سخت افزار و گاز

ماژول تحویل گاز و کنترل کننده های جریان جرمی، با داشتن دریچه های گاز در پشت پنل خود، هر دو ناحیه نمونه و ناحیه ترازو را پاک سازی می کنند. گاز اصلی (گاز (۱)) باید یک گاز بی اثر مانند نیتروژن، هلیوم یا آرگون باشد. دریچه دوم گاز (گاز (۲)) زمانی استفاده می شود که نیاز به گاز پاک سازی متفاوت باشد یا جایگزینی گاز لازم باشد؛ به صورت معمول این گاز هوا یا اکسیژن است. نوع گاز از طریق بخش ابزار دقیق نرم افزار کنترل به کنترل کننده جریان جرمی اختصاص داده شده و پیش از آزمون در صفحه تنظیمات انتخاب می شود.

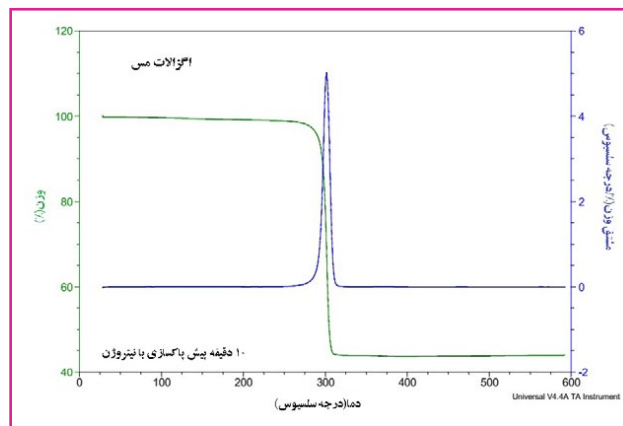


از ظروف آزمون پلاتینی و نرخ گرمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، این مقدار نباید بیش از ۵۰ میکروگرم باشد.

تا تعیین کند آیا گاز پاک‌کننده اصلی (نیتروژن) با اکسیژن مخلوط شده است یا خیر (شکل (۱۷)).

### عوامل مؤثر بر خط مبنا

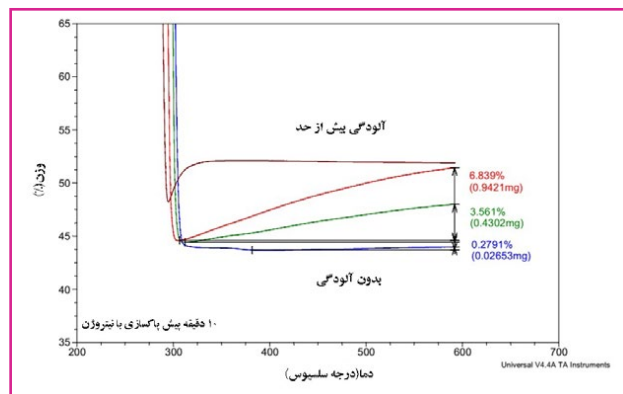
عوامل مؤثر بر خط مبنا شامل پایداری میز یا محل قرارگیری دستگاه، وضعیت سیم یا میله آویزان عمودی، وضعیت لوله آویزان عمودی، تراز بودن دستگاه TGA، تمیز بودن کوره، و نرخ جریان گاز پاک‌کننده است. شکل (۱۹)، خط مبنا برای ظرف آزمون خالی پلاتینی با نرخ گرمایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): آزمون آلودگی گاز پاک‌کننده  $N_2$  با اکسیژن [۱].

### تأثیر اکسیژن بر اگزالات مس

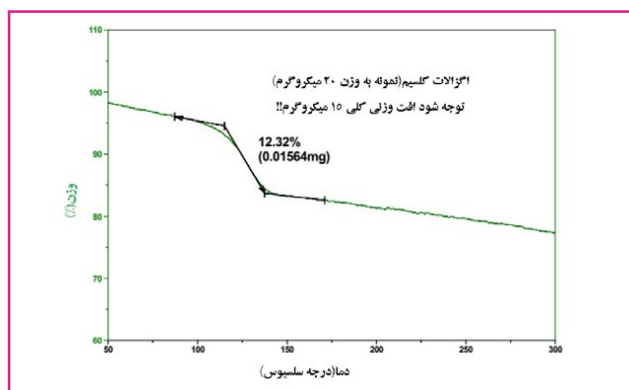
برای این آزمون، جرم قابل توجهی از اگزالات مس مورد نیاز است و آزمون پس از یک دقیقه پیش‌پاکسازی<sup>۴۰</sup> انجام می‌شود. درصدهای مختلف آلودگی اکسیژن در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۱۸): تأثیر اکسیژن بر اگزالات مس [۱].

### بررسی حساسیت ترازو

در این آزمون، مقدار ۱۲۰ میکروگرم از اگزالات کلسیم<sup>۴۳</sup> در دستگاه گرم می‌شود تا میزان کاهش وزن مورد انتظار اندازه‌گیری و دقت عملکرد ترازو بررسی شود (شکل (۲۰)). همچنین می‌توان این بررسی را با استفاده از ۲۷ میکروگرم سدیم تارتارات<sup>۴۴</sup> انجام داد (شکل (۲۱)).



شکل (۲۰): آزمون حساسیت ترازو با استفاده از ۱۲۰ میکروگرم اگزالات کلسیم [۱].

### تأیید عملکرد خط مبنا

تأیید عملکرد خط مبنا<sup>۴۱</sup> روشی مناسب برای ارزیابی کارایی دستگاه TGA است. این آزمون به‌ویژه برای اندازه‌گیری کاهش وزن‌های کوچک مرتبط با تبخیر یا مقادیر کم باقیمانده اهمیت دارد. برای این منظور، ظرف آزمون باید تمیز، خالی و با وزن صفر شده در محدوده دمایی مورد نظر قرار گیرد و با نرخ گرمایش مناسب آزمایش شود. سپس نمودار وزن بر حسب میکروگرم در مقابل دما رسم می‌شود. رانش پویا<sup>۴۲</sup> برای برخی دستگاه‌ها باید کمتر از ۱۰ میکروگرم باشد و در دستگاه‌های TGA هنگام استفاده

ترفتالات<sup>۴۵</sup> با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بررسی شده‌است. مطابق شکل (۲۲)، درصد جزئی مواد فرار موجود در نمونه نمایش داده شده‌است.

### آماده‌سازی نمونه

برای آماده‌سازی نمونه در آزمون TGA، جرم نمونه باید در یک بازه مشخص انتخاب شود. به صورت معمول مقدار ۱۰ تا ۲۰ میلی گرم نمونه برای بیشتر کاربردها مناسب است. برای اندازه‌گیری مواد فرار یا مقدار باقیمانده، می‌توان از ۵۰ تا ۱۰۰ میلی گرم نمونه استفاده کرد. به عنوان نمونه، اگر انحراف خط مبنای دستگاه TGA حدود  $\pm 25$  میکروگرم باشد، این مقدار معادل ۰/۲۵ درصد از جرم یک نمونه ۱۰ میلی گرمی خواهد بود.

### اهمیت اندازه ذرات TGA، تجزیه NaCl

برای کاهش اثرات الکتریسیته ساکن در دستگاه TGA، استفاده از موجین یا پنس برنجی توصیه می‌شود. پیش از هر نوبت آزمون، ظرف نمونه تمیز باید صفر شود و یک آزمون خالی انجام گیرد. نمونه لازم است به صورت یکنواخت در کف ظرف آزمون توزیع شود. برای نمونه‌های مایع، استفاده از ظرف دربسته با درپوش دارای سوراخ ریز مناسب است.

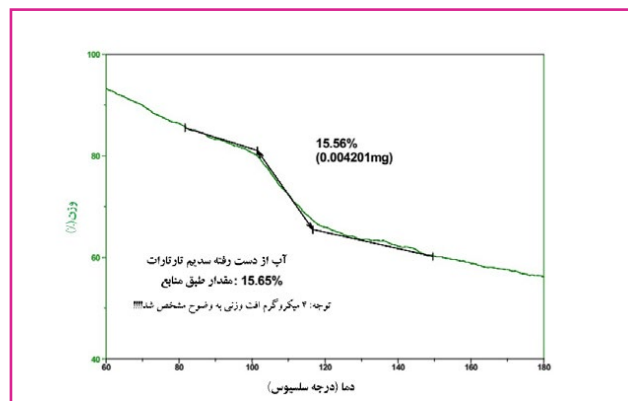
### ظروف آزمون نمونه

#### ♦ انتخاب ظرف آزمون

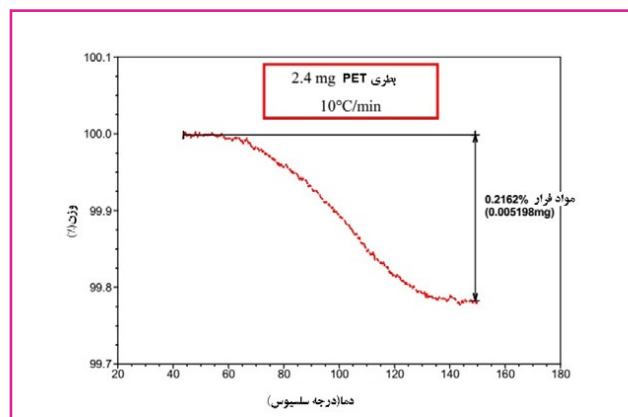
جنس ظرف آزمون می‌تواند از مواد مختلفی انتخاب شود که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند. ظروف پلاتینی برای بیشتر مواد مناسب هستند، به راحتی تمیز می‌شوند و غیرمتخلخل‌اند؛ با این حال باید توجه داشت که با بسیاری از فلزات قابلیت آلیاژ شدن دارند. ظروف آلومینا یا سرامیکی برای مواد خورنده، معدنی و نمونه‌های با جرم بالاتر کاربرد دارند، اما به دلیل تخلخل، به راحتی آلوده می‌شوند. ظروف آلومینیومی ویژه آزمون TGA برای استفاده یک بار مصرف طراحی شده‌اند، هزینه کمتری دارند و با وجود محدودیت دمایی، تا دمای حداکثر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده هستند (شکل (۲۳)).

#### ♦ انواع و اندازه‌های ظروف آزمون نمونه

ظروف آزمون پلاتینی در حجم‌های ۴۰ و ۱۱۰ میکرولیتر عرضه می‌شوند و ظروف آلومینا نیز در حجم‌های ۴۰ و ۹۰



شکل (۲۱): آزمون حساسیت ترازو با استفاده از ۲۷ میکروگرم سدیم تارتارات [۱].



شکل (۲۲): آنالیز مواد فرار ۴/۲ میلی گرم از بطری PET با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه [۱].



شکل (۲۳): انواع ظروف آزمون TGA [۱].

### آنالیز مواد فرار با حساسیت زیاد

در این آزمون، مقدار ۴/۲ میلی گرم از بطری پلی‌اتیلن

الیاف شیشه استفاده کرد. مواد باقی مانده نیز با یک حلال آلی مانند استون یا الکل پاک می شوند. پیش از استفاده مجدد، باید از خشک بودن کامل ظرف آزمون اطمینان حاصل نمود.

### ملاحظات شرایط محیطی دستگاه TGA

از قرار دادن دستگاه در نزدیکی کانال های گرمایشی یا سامانه های تهویه هوا باید خودداری شود. همچنین نصب دستگاه روی میزهای دارای کثو یا میزهای نزدیک به در توصیه نمی شود. برای دستیابی به بهترین عملکرد، استفاده از یک میز سنگی صاف و پایدار برای استقرار دستگاه مناسب است.

### چرا از آنالیز گازهای متصاعد شده استفاده می شود؟

دستگاه TGA تغییرات وزن نمونه را اندازه گیری می کند که روشی کمی به شمار می آید. جداسازی، شناسایی و تعیین مقدار محصولات تخریب، به ویژه گازهای خروجی، دشوار است. اتصال مستقیم به روش های شناسایی مانند طیف سنجی جرمی و طیف سنجی فروسرخ با تبدیل فوری این مشکل را کاهش می دهد. آنالیز هم زمان TGA و بررسی گازهای متصاعد شده<sup>۴۶</sup> برای کاربردهای معمول مناسب است. از این روش می توان برای بررسی ترکیب، ارزیابی خطر و شناسایی پلیمرها استفاده کرد. همچنین، محصولات طبیعی مانند آلاینده ها در خاک، مواد اولیه زغال سنگ و خاک رس قابل شناسایی هستند. در مطالعه کاتالیزورها، این آنالیز برای بررسی محصولات، محصولات جانبی و بازده تبدیل کاربرد دارد. مواد معدنی نیز برای توضیح واکنش ها، استوکیومتری و فرآیندهای آذرفشانی<sup>۴۷</sup> قابل بررسی هستند. در داروسازی، TGA-EGA برای سنجش پایداری، میزان حلال باقیمانده و ارزیابی فرمولاسیون به کار می رود. برای این آنالیز، دستگاه نیازمند یک خط انتقال گرم<sup>۴۸</sup> است تا گازهای خروجی هنگام انتقال از TGA به تجهیزات شناسایی، در حالت بخار باقی بمانند.

### پیوند دادن

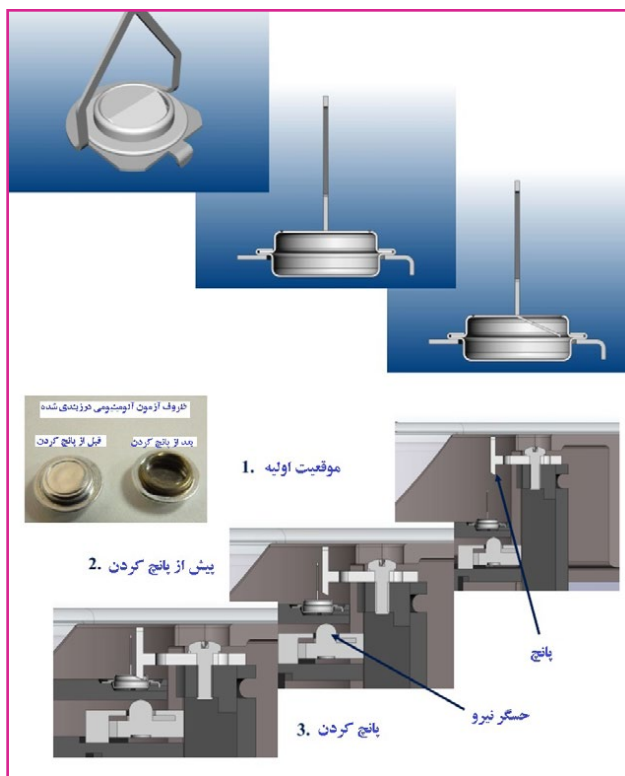
پیوند دادن<sup>۴۹</sup> به فرآیند اتصال دو یا چند ابزار به یکدیگر برای افزایش اطلاعات قابل دستیابی از یک نمونه اشاره دارد. پیوند آنالیزهای گراموزن سنجی با طیف سنجی های جرمی و طیف سنجی های فروسرخ با تبدیل فوری سابقه طولانی دارد. همچنین بیش از یک دستگاه می تواند به خروجی TGA متصل شود (شکل (۲۶)).

میکرولیتتر در دسترس هستند (شکل (۲۴)).



شکل (۲۴): ظروف آزمون پلاتینی و آلومینا با حجم های مشخص [۱].

♦ ظروف آزمون آلومینیومی درزبندی شده (بدون منفذ) در برخی موارد لازم است نمونه در ظرف آزمون به طور کامل ایزوله و غیرقابل نفوذ شود. شکل (۲۵)، ظروف آزمون آلومینیومی بدون منفذ و چگونگی پرس کردن آن ها برای ایجاد درزبندی و ایزوله سازی ظرف را نشان می دهد.



شکل (۲۵): ظروف آزمون آلومینیومی درزبندی شده (بدون منفذ) و روش پرس آن ها [۱].

### تمیز کردن ظروف آزمون نمونه TGA

تمام ظروف آزمون نمونه، به جز انواع آلومینیومی، قابلیت استفاده مجدد دارند. در صورت استفاده از ظروف پلاتینی یا آلومینا، می توان از شعله مشعل برای سوزاندن بقایای مواد آلی بهره برد. ظروف آلومینیومی نباید در معرض شعله قرار گیرند. خاکستر باقی مانده لازم است به صورت مکانیکی برداشته شود و برای این کار می توان از برس دستگاه DSC ساخته شده از



می‌شوند. طیف‌سنجی جرمی (MS) و طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه (FTIR) از این نوع محسوب می‌شوند. طیف‌های غیرپیوسته<sup>۵۱</sup> تنها در یک زمان مشخص از آزمایش به دست می‌آیند. طیف‌سنجی جرمی متصل به کروماتوگرافی گازی (GC/MS) نمونه‌ای از این دسته است؛ در این روش، تزریق گاز به دستگاه GC و زمان لازم برای جداسازی ترکیبات باید در نظر گرفته شود.

### انواع پیوند دادن: TGA همراه با طیف‌سنجی جرمی

استفاده از TGA همراه با طیف‌سنجی جرمی (MS) مزایایی دارد که شامل پیوستگی اطلاعات و حساسیت بالاتر نسبت به طیف‌سنجی فروسرخ است. اندازه‌گیری گازهایی که در فروسرخ قابل جذب نیستند، در این روش امکان‌پذیر است و پاسخ سریع از طریق انتقال گازها به داخل لوله‌های مویین فراهم می‌شود. با این حال، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد؛ به عنوان مثال، نمی‌توان بین مولکول‌هایی با وزن مولکولی مشابه، مانند  $N_2$  و CO، تمایز قائل شد. علاوه بر این، تجزیه و تفسیر داده‌ها گاهی دشوار است. این موارد از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شوند.

در این خصوص طیف‌سنج جرمی چهارقطبی<sup>۵۲</sup> با وضوح واحد برای آنالیز گازهای خروجی (EGA) مناسب‌تر است. سامانه تشخیص چهارقطبی شامل یک منبع یون بسته، فیلتر جرمی چهارقطبی، محدوده کاری ۱ تا ۳۰۰ واحد جرم اتمی<sup>۵۳</sup> و آشکارساز دوگانه با صفحه فاراده<sup>۵۴</sup> و میکروکانال است.

### TGA همراه با طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه (FTIR)

استفاده هم‌زمان TGA با طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه (FTIR) مزایایی دارد که شامل پیوستگی داده‌ها و سهولت انجام تفریق طیفی است. علاوه بر این، جستجوی کتابخانه‌ای طیف‌ها واضح است و امکان پیچیدگی‌زدایی<sup>۵۵</sup> طیف‌ها فراهم می‌شود. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد: تشخیص گازهایی که فاقد گشتاور دو قطبی هستند، مانند  $N_2$  یا  $O_2$ ، امکان‌پذیر نیست و جمع‌آوری داده‌های FTIR نیازمند زمان مشخصی است. یک مثال از کاربرد این روش، آنالیز توزین گرمایی و طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه اکسید پلی‌فنیلین<sup>۵۶</sup> است؛ این بسیار مهندسی دارای مقاومت حرارتی بالا و ویژگی‌های مکانیکی مطلوب، به ویژه استحکام کششی مناسب است و نتایج آن در شکل (۲۷) نشان داده شده است.



شکل (۲۶): دستگاه‌های قابل اتصال به TGA شامل طیف‌سنج جرمی، طیف‌سنج فروسرخ با تبدیل فوریه و کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی جرمی [۱].

### مقایسه روش‌های تحلیل گازهای خروجی TGA

تجزیه نمونه در کوره توسط دستگاه TGA انجام می‌شود و گازهای خروجی (اغلب مخلوطی از گازها) به دستگاه تشخیص ثانویه ارسال می‌شوند. اما برای نوع تشخیص باید دید هر نوع دستگاه ثانویه کدام موارد را بررسی می‌کند.

در طیف‌سنجی جرمی (MS)، گازهای خروجی به یون‌ها تجزیه شده و قطعات یونی براساس نسبت جرم به بار ( $m/z$ ) شناسایی می‌شوند. با این حال، این روش قادر به تمایز قطعات یونی با همان  $m/z$ ، مانند ۲۸ برای  $N_2$  یا CO نیست.

در طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه (FTIR)، دستگاه جذب انرژی در اعداد موجی مختلف را اندازه‌گیری می‌کند، اما مولکول‌هایی که تغییر گشتاور دو قطبی ندارند، مانند  $N_2$  یا  $O_2$ ، قابل شناسایی نیستند.

برای مخلوط گازها، استفاده از کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC/MS) تضمین می‌کند که طیف جرمی مربوط به یک ترکیب خالص به دست آید و شناسایی دقیق ترکیبات ممکن شود.

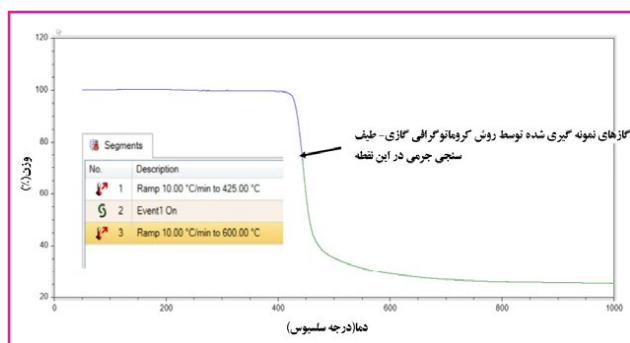
### مجموعه طیف‌های پیوسته در مقابل طیف‌های غیر پیوسته

طیف‌های پیوسته<sup>۵۷</sup> شامل مجموعه‌ای از طیف‌ها هستند که در طول زمان و در جریان آزمایش به صورت مداوم ثبت

جرمی (GC-MS) مزایایی دارد که شامل جداسازی شیمیایی دقیق و امکان جستجوی ساده در کتابخانه‌های طیفی است. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد: این روش زمان‌بر است و قابلیت اندازه‌گیری مداوم<sup>۶۰</sup> ندارد. همچنین، برای عملکرد صحیح نیاز به رابط ردشفت دارد.

### تشریح یک آزمایش GC/MS: پلی‌فنیل اکسید

شکل (۲۸) نشان‌دهنده جمع‌آوری داده‌های آزمون GC-MS از طریق TGA است. این شکل بیان می‌کند که گازهای خروجی در نقطه‌ای مشخص از منحنی کاهش وزن، توسط دستگاه آنالیز ثانویه جمع‌آوری و تحلیل می‌شوند. پس از تزریق گاز، دمای آن دستگاه GC-MS با نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از ۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.



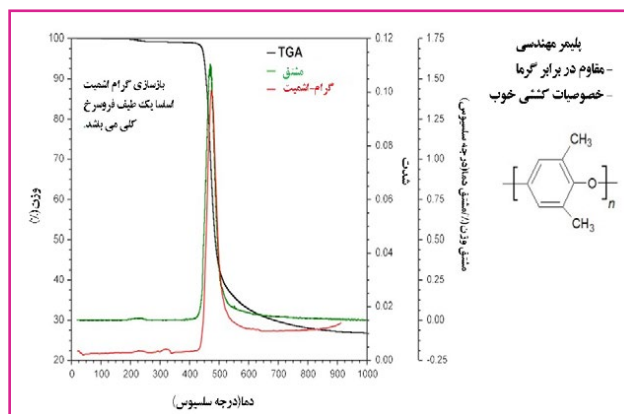
شکل (۲۸): منحنی TGA پلی‌فنیل اکسید و نقطه جمع‌آوری داده‌های آزمون GC-MS [۱].

### آنالیز گاز تکامل‌یافته (EGA) - پیونددهی با TGA

نمونه‌ای از پیونددهی کامل دستگاه‌های معرفی شده برای آنالیز ثانویه در شکل (۲۹) نشان داده شده است. اتصال گازهای خروجی از TGA به دستگاه‌های ثانویه از طریق خط انتقال گرم انجام می‌شود.



شکل (۲۹): آنالیز TGA همراه با FTIR و GC-MS [۱].



شکل (۲۷): تبدیل داده‌های آزمون TGA به طیف FTIR [۱].

### آنالیز گاز تکامل‌یافته (EGA) همراه با TGA/FTIR

گازهای تولید شده در طول تجزیه گرمایی نمونه، از طریق یک خط انتقال گرم به داخل سلول گازی هدایت می‌شوند که تابش فروسرخ از آن عبور می‌کند. جذب و کل بسامد فروسرخ به‌صورت تابعی از زمان در یک آرایه ثبت و به‌عنوان فایل گرم-اشمیت<sup>۵۷</sup> ذخیره می‌شود. این فایل با نرم‌افزار بازسازی گرم-اشمیت<sup>۵۸</sup>، بازسازی می‌شود. بازسازی گرم-اشمیت به‌صورت معمول مشابه مشتق منحنی کاهش وزن نسبت به دما در آزمایش TGA است. طیف‌های FTIR منفرد با انتخاب نقاط روی محور زمان در بازسازی گرم-اشمیت، که واحد شدت را بر حسب زمان نمایش می‌دهد، به‌دست می‌آیند. این طیف‌ها را می‌توان با استفاده از پایگاه‌های داده طیفی ارائه شده توسط فروشنده جستجو و گونه‌های شیمیایی را شناسایی کرد.

### جستجوی کتابخانه FTIR

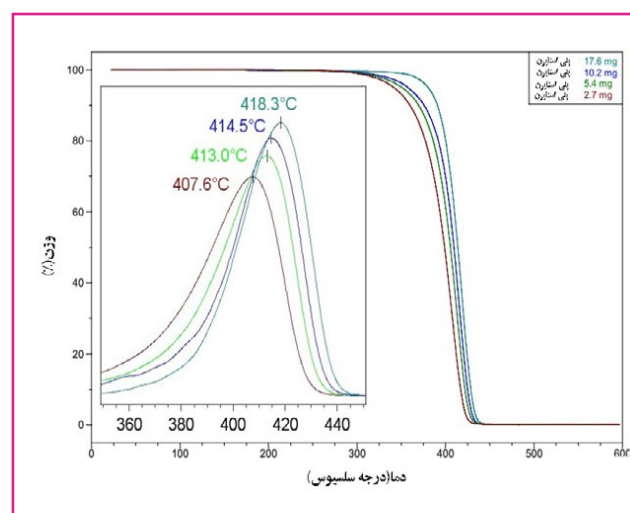
کتابخانه‌های طیفی بهترین تطابق را بین طیف‌های منفرد و داده‌های ارائه شده فراهم می‌کنند. در صورتی که چندین جزء در طول یک رویداد کاهش وزن واحد آزاد شوند، طیف‌ها روی یکدیگر همپوشانی می‌کنند که ممکن است موجب بروز مشکلاتی شود. وجود کتابخانه‌های قابل جستجو، تحلیلگر را از انجام بررسی انتقادی نتایج جستجو معاف نمی‌کند. نرم‌افزار ترمو نیکولت اف‌تی‌آر<sup>۵۹</sup> قادر است طیف‌ها را به حداکثر چهار جزء مجزا تفکیک کند. چگونگی نمایش و استفاده از این قابلیت را می‌توان در وبینارهای شرکت تی‌ای اینسترومنتس مشاهده کرد.

### گرمایز سنجی همراه با کروماتوگرافی گازی و طیف‌سنجی جرمی

استفاده از TGA همراه با کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی

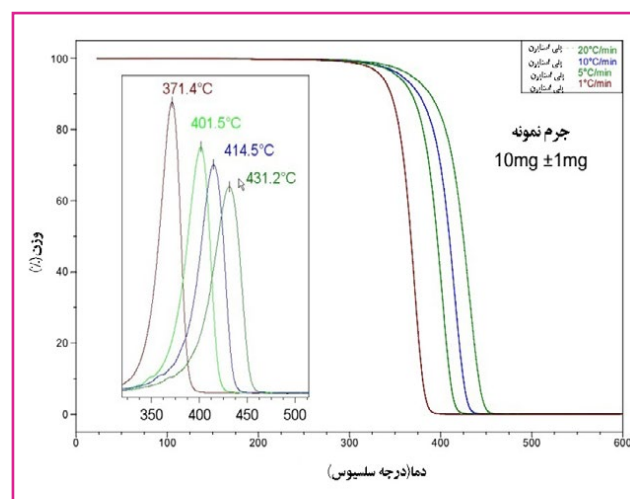
## ملاحظات عمومی، اثرات تجربی

منحنی‌های TGA منحنی‌های «اثر انگشت» نیستند. از آنجا که بیشتر رویدادهای ثبت شده در TGA ماهیتی جنبشی دارند، یعنی به دمای مطلق و زمان صرف شده در آن دما وابسته‌اند، هر عامل تجربی که بر نرخ واکنش تأثیرگذار باشد، شکل و دمای گذار منحنی را تغییر خواهد داد. این عوامل شامل جرم نمونه، نرخ گرمایش، گاز پاک‌کننده و حجم، شکل و ریخت‌شناسی<sup>۶۱</sup> نمونه هستند. اثر این عوامل در شکل‌های بعدی نمایش داده شده‌است. مطابق شکل (۳۰)، افزایش جرم نمونه باعث افزایش دمای تجزیه مشاهده شده می‌شود.



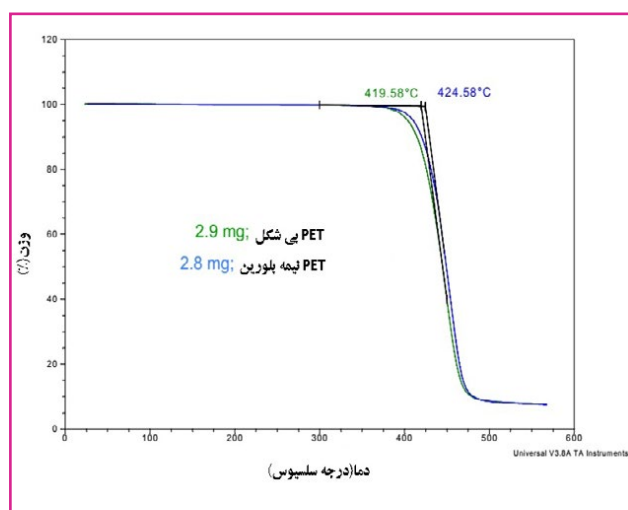
شکل (۳۰): منحنی‌های TGA پلی‌استایرن با جرم‌های مختلف نمونه، نشان‌دهنده افزایش دمای تجزیه با افزایش جرم نمونه [۱].

مطابق شکل (۳۱)، افزایش نرخ گرمایش باعث افزایش دمای تجزیه مشاهده شده در پلی‌استایرن می‌شود.



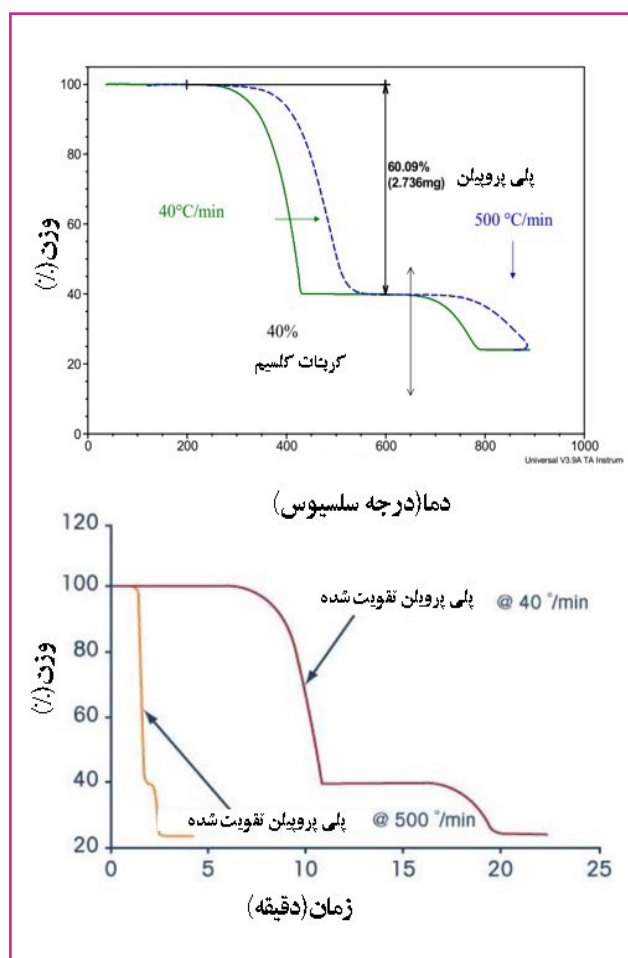
شکل (۳۱): تأثیر نرخ‌های مختلف گرمایش بر منحنی TGA پلی‌استایرن [۱].

اثرات ریخت‌شناسی نمونه بر نتایج TGA برای پلی‌اتیلن ترفتالات در شکل (۳۲) نشان داده شده‌است.



شکل (۳۲): تأثیر ریخت‌شناسی نمونه بر منحنی TGA پلی‌اتیلن ترفتالات [۱].

شکل (۳۳) نشان‌دهنده تأثیر نرخ گرمایش زیاد بر منحنی TGA پلی‌پروپیلن همراه با کرنات کلسیم است.



شکل (۳۳): تأثیر نرخ گرمایش بر نتیجه آزمون TGA پلی‌پروپیلن با کرنات کلسیم [۱].



## نتیجه گیری

آنالیز توزین گرمایی، که به طور معمول با عنوان TGA شناخته می شود، روشی تحلیلی برای بررسی ویژگی های گرمایی و ترکیب مواد است. در این روش، تغییرات وزن نمونه به عنوان تابعی از دما اندازه گیری می شود تا اطلاعات دقیقی درباره پایداری گرمایی، فرآیندهای تجزیه و تفکیک و میزان مواد تبخیرشونده به دست آید. آنالیز TGA یکی از پرکاربردترین روش ها در شناسایی مواد شیمیایی است و ابزار مناسبی برای بررسی رفتار مواد در مواجهه با گرما محسوب می شود. در این روش، تغییرات وزن نمونه های مختلف در معرض حرارت کنترل شده سنجیده می شود. هدف اصلی این آنالیز، مطالعه میزان پایداری نمونه در برابر گرما است، اما در عمل می توان اطلاعات مفید دیگری نیز از جمله میزان رطوبت، تبلور، دمای تخریب و سایر ویژگی های حرارتی نمونه ها به دست آورد.

## پی نوشت

1. Thermogravimetric Analysis (TGA)
2. Calibration
3. Verification
4. Evolved Gas Analysis (EGA)
5. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
6. Rate of Weight Change
7. Atmosphere
8. Desorption
9. Absorption
10. Differential Scanning Calorimetry–Thermogravimetric Analysis (DSC-TGA)
11. Endothermic
12. Exothermic
13. Transition
14. Fusion
15. Simultaneous Thermal Analyzer (SDT)
16. Purge Gas
17. Dynamic Weighing
18. Baseline Drift
19. Schematic
20. Balance
21. Ballistic
22. Curie Point
23. Evolved Vapor Analysis (EVA)
24. Infrared Furnace (IR)
25. Weight Calibration
26. Temperature Calibration
27. Purge Gas
28. Offset
29. Paramagnetic
30. Curie Temperature Reference Materials
31. International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC)
32. TA Instruments
33. Differential Thermal Analysis (DTA)
34. Delta T
35. Modulated DSC
36. Sapphire
37. Reverse Heat Capacity Calibration
38. Mass Spectrometry (MS)
39. Copper Oxalate
40. Pre-purge
41. Baseline Performance Verification
42. Dynamic Drift
43. Calcium Oxalate
44. Sodium Tartrate
45. Polyethylene Terephthalate (PET)
46. Evolved Gas Analysis (EGA)
47. Pyrotechnics
48. Heated Transfer Line
49. Hyphenation
50. Continuous Spectra
51. Discrete Spectra
52. Quadrupole Mass Spectrometer (QMS)
53. Atomic Mass Unit (AMU)
54. Faraday
55. Deconvolution
56. Polyphenylene Oxide (PPO)
57. Gram-Schmidt
58. Gram-Schmidt Reconstruction
59. ThermoNicolet FTIR
60. Continuous Measurement
61. Morphology

## نویسندگان

ندا سادات فعال نظری<sup>۱\*</sup>، مجتبی تقی پور<sup>۲</sup>

۱. کارشناس آزمایشگاه ایکس ری مرکز خدمات دانشگاه

صنعتی شریف، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳. عضو کارگروه تخصصی پرتو ایکس

\*n.nazari@sharif.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸

## واژه‌های کلیدی

آنالیز مواد، روش‌های آنالیزی، توسعه زیرساخت  
آزمایشگاهی، نرخ به‌کارگیری روش آنالیز، تحلیل  
تولیدات علمی.

## نقشه راه توسعه زیر ساخت‌های آنالیز مواد در ایران: تحلیل آماری مقالات ISI در پنج سال اخیر و مقایسه جهانی-منطقه‌ای

چکیده

این پژوهش با هدف ارائه تحلیلی کاربردی از الگوی به‌کارگیری روش‌های منتخب آنالیز مواد، بر پایه داده‌های آماری موسسه اطلاعات علمی<sup>۱</sup> در پایگاه اطلاع‌رسانی وب‌آوساینس<sup>۲</sup> طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۶، تدوین شده‌است. با استخراج تعداد مقالات مرتبط با کلید واژه‌های هر روش و محاسبه «درصد به‌کارگیری روش آنالیز در مقالات» که نسبت به حوزه‌های پژوهشی مرتبط نرمال‌سازی شده‌است، جایگاه ایران در هر فناوری آنالیز، در قیاس با کشورهای جهان و منطقه، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که در روش‌های آنالیزی کم‌خطر، پرتقاضا و قابل پشتیبانی به‌عنوان مثال، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری<sup>۳</sup>، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴</sup>، آنالیز پراش پرتو ایکس<sup>۵</sup>، استحکام سطح<sup>۶</sup> و کروماتوگرافی گازی<sup>۷</sup> مزیت نسبی قابل توجهی برای ایران وجود دارد که این امر، بازتاب سیاست‌های توسعه تجهیزات پرتکرار در دانشگاه‌ها و منطق اقتصادی بازار خدمات آزمایشگاهی در کشور است. در مقابل، در روش‌های سرمایه‌بر و تکیه‌دار بر دانش پایه و تخصصی به‌عنوان مثال، طیف‌سنجی رامان<sup>۸</sup>، طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس<sup>۹</sup>، طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته و میکروسکوپ کانفوکال<sup>۱۱</sup> نشانه‌هایی از استقبال نسبی کم‌تر در زنجیره آنالیز مشاهده می‌شود. این مقاله، علاوه بر ارائه تحلیل وضعیت هر ابزار آنالیزی در سطح جهان و منطقه، مجموعه‌ای از سیاست‌های کلان برای تکمیل ظرفیت دستگاهی، ارتقای نیروی انسانی، تنوع‌بخشی به خدمات، فرهنگ‌سازی در استفاده از روش‌های نادیده گرفته شده و تقویت رابطه میان دانشگاه و صنعت را پیشنهاد می‌کند.

## مقدمه

آنالیز مواد و آزمون‌های پیشرفته آزمایشگاهی، نه تنها زیرساخت تولید دانش تجربی هستند، بلکه شاخصی از توانمندی فناورانه و قدرت علمی هر کشور به شمار می‌روند. کشورها در توسعه تجهیزات آزمایشگاهی، به‌طور معمول میان دو منطق تصمیم‌گیری در نوسان هستند: (الف) - منطق «پوشش گسترده و کم خطر» برای روش‌های پرتکرار و خدمات‌پذیر و (ب) - منطق «عمق‌بخشی و راهبردی» برای روش‌های سرمایه‌بر و دانش‌بر که مستلزم نیروی انسانی متخصص هستند.

از دیدگاه سیاست‌گذاری، ارزیابی صرف تعداد مقالات کافی نیست؛ زیرا ممکن است یک کشور با اتکا به چند روش متداول، تولید مقاله بالایی داشته باشد، اما در لایه‌های عمیق‌تر آنالیز مواد (مانند شیمی سطح، تعیین ساختار مولکولی دقیق و تصویربرداری پیشرفته ساختاری) دچار شکاف باشد. بنابراین، سنجش هم‌زمان «حجم استفاده» و «شدت/سهم نسبی استفاده» از فناوری‌های آنالیزی در پژوهش‌ها و خروجی‌های منتشر شده در قالب مقالات ISI، می‌تواند تصویری دقیق‌تر از جهت‌گیری‌های تجهیزاتی مراکز تحقیقاتی، منطق بازار خدمات آزمایشگاهی، و حلقه‌های نادیده گرفته شده از این ظرفیت ملی ارائه کند. این مقاله با همین هدف، سبد روش‌های آنالیزی منتخب آزمایشگاهی را تحلیل و نقشه راهی برای سیاست‌های کلان توسعه تجهیزاتی ترسیم می‌کند.

## ● روش‌شناسی جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

بیانگر «مقیاس تولید علمی» و «حجم استفاده» از آن فناوری است.

- شاخص درصد استفاده نرمال‌سازی شده  
برای محاسبه «درصد استفاده نسبی» هر روش در مقالات هر کشور، ابتدا بیست حوزه پژوهشی برتر مرتبط با هر روش، شناسایی و سپس، تعداد کل مقالات هر کشور در همین حوزه‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه استخراج شد. در نهایت، تعداد مطلق مقالات هر روش برای یک کشور، بر تعداد کل مقالات آن کشور در حوزه‌های پژوهشی مرتبط تقسیم و درصد به‌دست آمد. مقدار بالای این شاخص می‌تواند دلالت بر استاندارد شدن، دسترسی خوب و بلوغ روش‌شناختی داشته باشد؛ اما گاهی نیز نشانه عدم توازن و تکیه بی‌رویه بر یک ابزار به‌جای استفاده از روش‌های مکمل است.

## ● مبانی تفسیر نتایج آماری

نقطه آغاز تحلیل، رتبه (۱۶) ایران در تولید کل مقالات ISI در بازه مورد مطالعه است که به‌عنوان «خط پایه» یا «مرجع» در نظر گرفته شد. بر این اساس، جایگاه ایران در دو شاخص «تعداد مطلق» و «درصد استفاده» برای هر روش نسبت به این خط پایه بررسی شد. روش‌هایی که رتبه ایران در آن‌ها بهتر (پایین‌تر) از ۱۶ بود، در دسته «پرتکرار/استون فقرات» و آن‌هایی که رتبه ضعیف‌تری (بالتر از ۱۶) داشتند، در دسته «کم‌تکرار/ غفلت شده» و یا کم‌نفوذ» طبقه‌بندی شدند. رتبه‌بندی استفاده از روش‌های آنالیزی در جدول (۱) ارائه شده است.

## ● چارچوب تحلیل و دسته‌بندی روش‌ها

## ● منبع داده و بازه زمانی

منبع داده‌ها، مقالات نمایه شده در پایگاه وب‌آوساینس<sup>۱۲</sup> است [۱] و بازه زمانی تحلیل، سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۶ در نظر گرفته شد.

## ● راهبرد جستجو و کلید واژه‌ها

برای هر روش آنالیزی، در بخش جستجوی پیشرفته<sup>۱۳</sup> پایگاه، محدودیت زمان انتشار (۲۰۲۱-۲۰۲۶) و جستجوی کلید واژه روش در بخش «همه زمینه‌ها»<sup>۱۴</sup> انتخاب شد.

## ● اعتبارسنجی راهبرد جستجو

به‌منظور اطمینان از اینکه جستجوی روش در بخش «همه زمینه‌ها» نماینده «استفاده واقعی از روش آنالیزی در فرآیند پژوهش» است، ارزیابی نمونه‌ای روی مقالات دو روش منتخب انجام شد. نتایج نشان داد درصد بالایی از مقالات بازایی شده، از ابزار آنالیزی مورد نظر در کار پژوهشی استفاده کرده‌اند و الگوی توزیع کشورها معتبر و بدون تفاوت معنادار با کل جامعه آماری است. بر این اساس، این راهبرد به‌عنوان روش استخراج داده پذیرفته شد.

## ● شاخص تعداد مطلق مقالات

این شاخص، تعداد مقالات هر کشور را که در آن‌ها از یک روش مشخص استفاده شده است، نشان می‌دهد و به‌صورت عمده



جدول (۱): رتبه استفاده از هر روش آنالیزی در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

ردیف	موضوع	رتبه ایران در تعداد مقالات انتشار یافته	رتبه ایران در درصد استفاده از روش آنالیزی در مقالات
۱	تمامی موضوعات	۱۶	-
۲	آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)	۳	۱
۳	میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)	۴	۱
۴	آنالیز استحکام سطح (BET)	۴	۳
۵	آنالیز عنصری طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP) <sup>۱۵</sup>	۶	۶
۶	آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)	۷	۶
۷	آنالیز کروماتوگرافی گازی (GC)	۸	۴
۸	میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) <sup>۱۶</sup>	۱۱	۹
۹	میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) <sup>۱۷</sup>	۱۴	۴
۱۰	طیف‌سنجی رامان	۱۴	۲۷
۱۱	طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) <sup>۱۸</sup>	۱۵	۱۶
۱۲	طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS)	۱۹	۳۱
۱۳	طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته (NMR)	۱۹	۳۱
۱۴	میکروسکوپ کانفوکال	۳۵	۲۵

تحلیل هر روش در این بخش بر پایه چهار محور اصلی انجام می‌شود:

۱. جایگاه ایران در مقایسه با کشورهای پیشرو جهانی؛
۲. جایگاه ایران در مقایسه با کشورهای همسایه و منطقه؛
۳. پیام سیاستی استخراج شده (سیاست تجهیزاتی، زیست‌بوم پژوهشی، بازار خدمات)؛
۴. پیشنهاد‌های اجرایی (تکمیل ظرفیت، ارتقای پرسنلی، تنوع خدمات، فرهنگ‌سازی استفاده از روش آنالیزی مشخص و ارتباط با صنعت).

### ● تحلیل روش محور و توصیه‌های سیاستی

در این بخش، برای هر روش، وضعیت ایران در جهان و منطقه بررسی شده و در محورهای مختلف تحلیل می‌شود.

#### ● طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR): روش اصلی در شناسایی گروه‌های عاملی

در روش FTIR، ایران از نظر شمار مقاله‌ها و درصد کاربرد، در رتبه‌های نخست جهان قرار دارد. این وضعیت نشان می‌دهد FTIR در ایران به ابزاری رایج و استاندارد در تولید مقاله تبدیل شده و در زیست‌بوم دانشگاهی و خدمات آزمایشگاهی فراگیری بالایی دارد (شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب)).

براساس داده‌های جدول (۱) و برای آنکه نتایج در سیاست‌گذاری تجهیزاتی و برنامه‌ریزی خدمات آزمایشگاهی کاربرد داشته باشند، روش‌ها در دو دسته کلی (الف) و (ب) طبقه‌بندی می‌شوند:

#### ◀ دسته (الف) - روش‌های ستون فقرات و پرتکرار: FTIR، SEM، BET، ICP، XRD، GC، AFM، TEM، XRF

قرار گرفتن ابزارها در این دسته نشان می‌دهد که سیاست تجهیزاتی دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها و همچنین منطق بازار خدمات، بیشتر به سمت دستگاه‌های چندمنظوره، خدمات‌پذیر و درآمدزا با خروجی قابل چاپ سریع، جهت‌گیری کرده است.

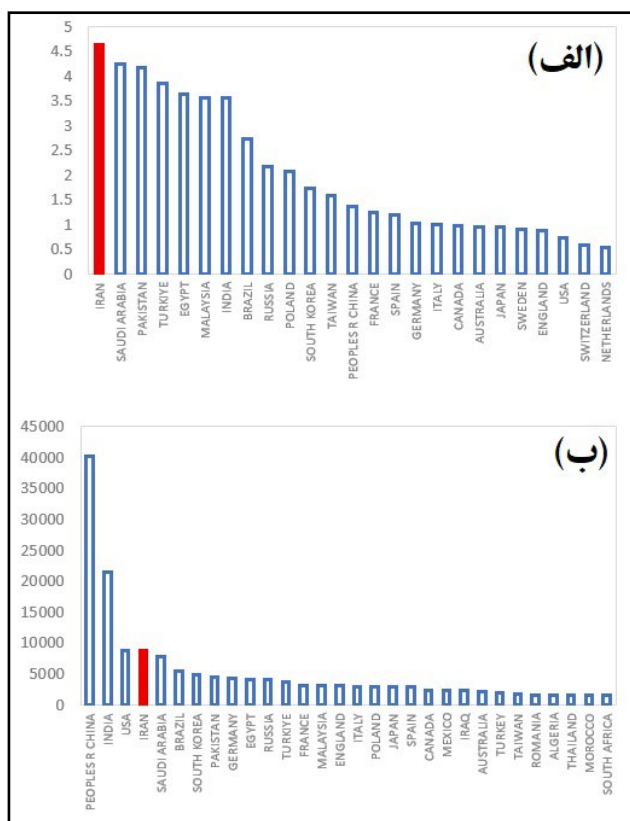
#### ◀ دسته (ب) - روش‌های کم‌نفوذ یا مغفول‌مانده: شامل رامان<sup>۱۹</sup>، XPS، NMR و میکروسکوپ کانفوکال.

ضعف در این فناوری‌ها حاکی از عمق کمتر زنجیره آنالیز در لایه‌های حیاتی مانند شیمی سطح، شناسایی ساختار مولکولی دقیق و تصویربرداری پیشرفته زیستی است که بیشتر ناشی از محدودیت در زیرساخت، دانش فنی و نیروی انسانی متخصص است و نه صرفاً کمبود تقاضا. یافته‌ها حاکی از آن است که در برخی روش‌های پرتکرار، کشور به مرحله‌ای رسیده که مسئله اصلی دیگر تنها خرید دستگاه جدید نیست، بلکه «تکمیل ظرفیت عملیاتی»، «استانداردسازی کیفیت خروجی» و «توسعه خدمات ارزش‌افزوده» (تحلیل، تفسیر، مشاوره) و «اتصال مؤثر به صنعت» است.

#### ● اصول مشترک در تفسیر هر روش

## ● میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM): پرکاربردترین روش در بررسی ریخت‌شناسی

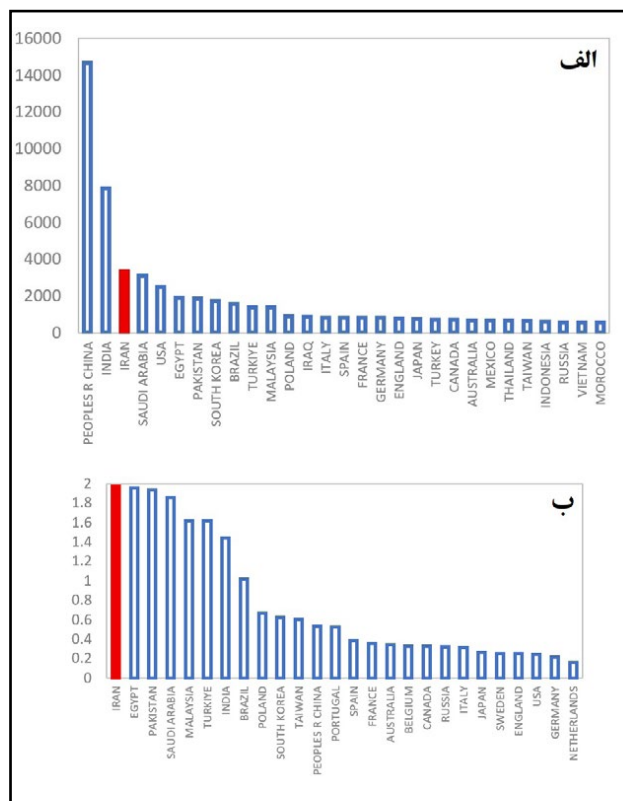
در بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ایران هم در شاخص تعداد مطلق و هم در شاخص درصد کاربرد در میان کشورهای جهان و در منطقه نیز در بین کشورهای پیشرو قرار می‌گیرد (شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب)). این وضعیت نشان می‌دهد که SEM در ایران «ابزار پایه» صرف نیست، بلکه در بسیاری از حوزه‌ها به روش اصلی و تعیین‌کننده در فرآیند مقاله‌سازی تبدیل شده‌است.



شکل (۲): (الف) آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز SEM در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

در مقایسه جهانی، کشورهای پیشرفته ممکن است در شمار مقالات، در جایگاه بالاتر اما در شاخص کاربرد، درصد پایین‌تری نشان دهند؛ زیرا SEM در آن کشورها در کنار زنجیره‌ای از روش‌های مکمل (شیمی سطح، ساختار مولکولی، آنالیزهای پیشرفته) پراکنده می‌شود. درصد بالای ایران، افزون بر بازتاب دسترسی گسترده، می‌تواند نشانه‌ای از «وابستگی» و عدم توازن در مجموعه بررسی‌ها نیز باشد.

در مقایسه منطقه‌ای، ایران در شدت کاربرد میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در کنار عربستان، ترکیه، مصر و پاکستان قرار دارد و در برخی شاخص‌ها از آن‌ها سریع‌تر پیش می‌رود. خطر پرتکرار بودن SEM در مجموعه بررسی‌های کشور باعث شده‌است که این دستگاه به جایگزین دیگر روش‌های لازم به‌عنوان مثال، شیمی سطح یا ساختار دقیق تبدیل شود. خروجی این آنالیز، تمرکز



شکل (۱): (الف) آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز FTIR در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

در مقایسه جهانی، کشورهایی با تولید علمی بسیار بالا (به‌عنوان مثال، چین و هند) به دلیل مقیاس بزرگ تولید مقاله، در آمار مطلق پیش‌تاز هستند؛ اما قرار گرفتن ایران در رتبه‌های بالای درصد استفاده نشان می‌دهد که طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل‌فوری در ایران فراتر از یک ابزار رایج در مجموعه ابزارهای تجزیه‌ای بدل شده‌است. در مقایسه منطقه‌ای نیز ایران در برابر کشورهای پرمقاله منطقه مانند عربستان، مصر و پاکستان، مزیت نسبی آشکاری دارد. ترکیب «رتبه بسیار بالا در مطلق» و «رتبه ۱ در درصد» به این معناست که FTIR در کشور فراگیر و در دسترس است (به‌طور تقریبی، در بیشتر دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها وجود دارد)، کم‌هزینه و کم‌خطر بوده (خرید، نگهداری و کار با آن آسان‌تر است) و به‌عنوان کمینه داده استاندارد برای مقاله‌نویسی در حوزه‌های گوناگون مانند پلیمر، شیمی، مواد پزشکی، دارو، نانو، سرامیک، محیط‌زیست و غیره جا افتاده‌است. این موفقیت، نشان‌دهنده سیاست «پوشش گسترده تجهیزات کم‌خطر و پرآزاد» است. با این حال، تکیه بیش از حد بر آن، خطر جایگزینی این روش به جای روش‌های مکمل دقیق‌تر به‌عنوان مثال، NMR و یا XPS را دارد که در نتیجه، کیفیت استدلال‌های شیمیایی کاهش می‌یابد.

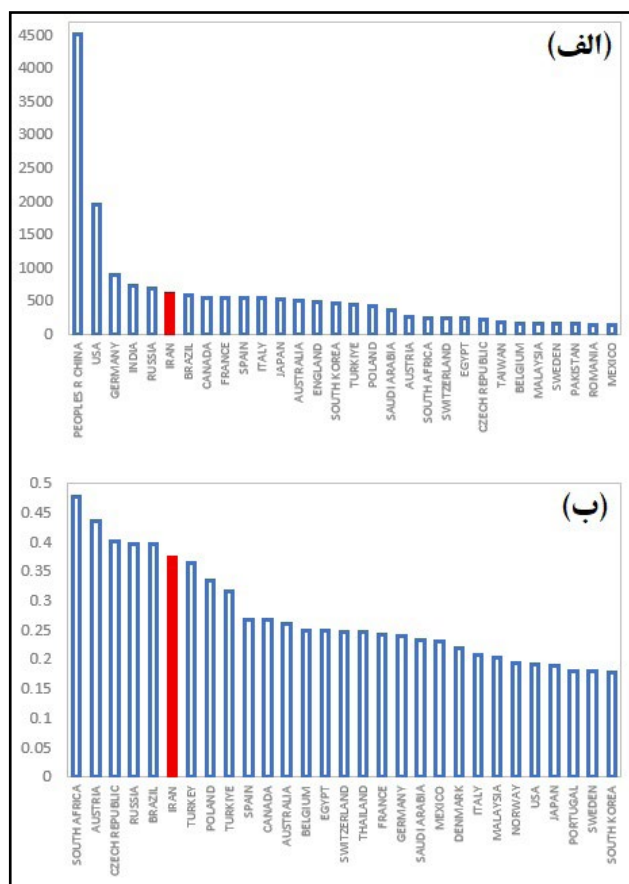
◀ **توصیه‌ها:** استانداردسازی گزارش‌دهی، توسعه خدمات ارزش افزوده (تفسیر تخصصی طیف) و اتصال هدفمند به صنایع پلیمر، دارو و غذا.

در قیاس جهانی، اندازه‌گیری‌های مبتنی بر BET در کشورهایی مانند ایران همراه با تمرکز پژوهشی در حوزه‌هایی همچون نانو و مواد متخلخل، کاتالیست‌ها، جاذب‌ها، محیط، انرژی (باتری و ابرخازن)، مواد کربنی، داربست‌های آلی فلزی<sup>۲۲</sup> و ژئولیت سهم بالایی داشته که در این حوزه‌ها بسیار پرخرجی هستند. از طرفی استفاده از تجهیزات دستگاهی این روش آنالیزی به نسبت کم‌خطرتر از روش‌های دارای خلاء پیشرفته است، اپراتوری ساده‌تر (نسبت به TEM/XPS) داشته و بستر بازار خدماتی مناسبی برای پروژه‌های فراوان دارد.

● **توصیه‌ها:** استانداردسازی آماده‌سازی نمونه و انجام آزمون برای تولید گزارش کامل از خواص نمونه. از منظر ظرفیت انعقاد قراردادهای صنعتی در زمینه کسب‌وکار، BET ظرفیت قراردادهای صنعتی در جذب آلاینده، کربن فعال و ارزیابی کاتالیست را دارد.

### ● پلاسما جفت‌شده القایی (ICP): ستون مهم آنالیز عنصری محلول و پیوند با صنعت

آنالیز ICP در ایران، چه در شمار مطلق کاربردها و چه در درصد کاربرد، جایگاه رقابتی دارد و نسبت به بسیاری کشورها و همچنین در مقایسه منطقه‌ای از وضعیت مناسبی برخوردار است (رتبه ۶) در هر دو شاخص (شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب)).

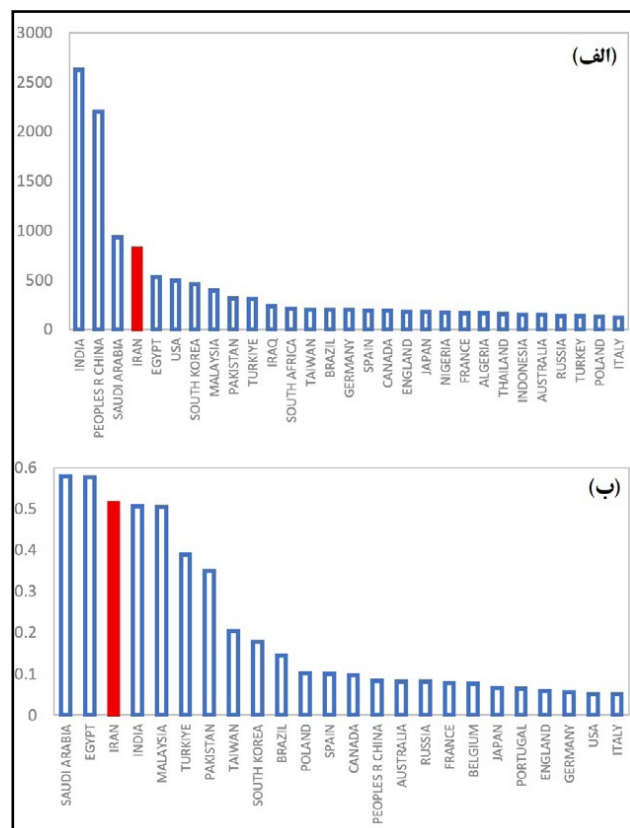


شکل (۴): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز ICP در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

بر تصویربرداری صرف بدون گسترش سامان‌مند بررسی‌های مکمل به‌عنوان مثال، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)<sup>۲۰</sup>، پراش الکترون‌های به عقب رانده شده (EBSD)<sup>۲۱</sup> و دیگر روش‌ها است. ● **توصیه‌ها:** تکمیل ظرفیت کاربری دستگاه‌ها، ارتقای کیفیت با استقرار استانداردهای مرتبط و کالیبراسیون دستگاه‌ها و خدمات پیشرفته برای ارتقای عمق نتایج خروجی توسعه داده شود. همچنین ارتباط با صنایع در حوزه متالورژی، خوردگی، پوشش و کنترل کیفیت فلزات می‌تواند سبب خدمات SEM را از «تصویربرداری صرف» به «تحلیل مسئله‌محور» ارتقا دهد.

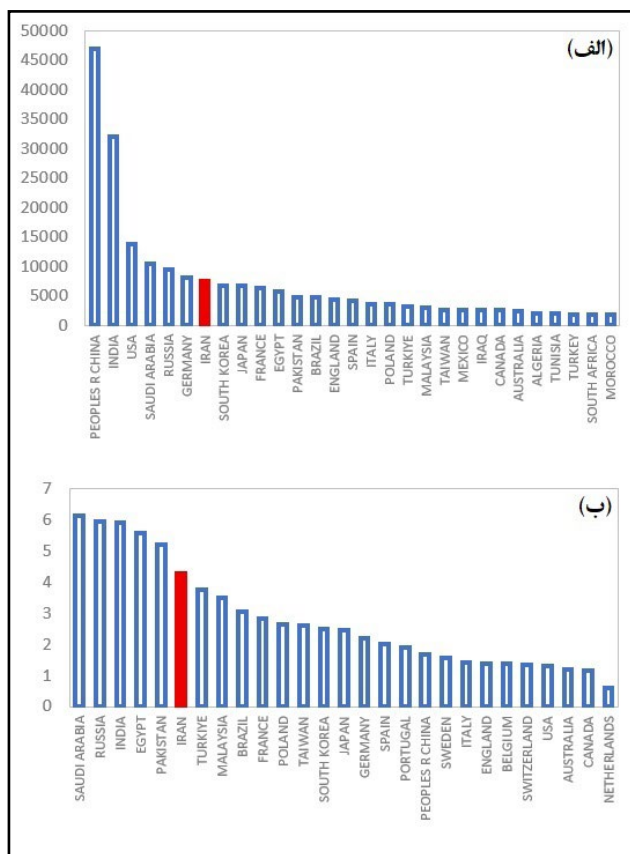
### ● جذب فیزیکی گازها (BET): مزیت ایران در حوزه مواد متخلخل، جذب و ذخیره‌سازی انرژی

در اندازه‌گیری‌های مبتنی بر نظریه بروناتر، امت و تالر (BET)، ایران رتبه چهارم جهان را به خود اختصاص داده است. این به آن معناست که از دیدگاه «شمار کاربرد BET در مقاله‌ها»، ایران به جایگاه بسیار بالایی دست یافته و حتی از بسیاری کشورهای صنعتی جلوتر است. در منطقه، عربستان بالاتر از ایران جای دارد، اما ایران پس از عربستان و پیش از مصر قرار گرفته است. در شاخص درصد کاربرد نیز ایران در رده‌های بالای جهانی و منطقه‌ای جای می‌گیرد؛ از این رو، BET در ایران نسبت به مجموعه پژوهش‌های مرتبط، سهم بسیار بالایی را به خود اختصاص می‌دهد (شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب)).



شکل (۳): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز BET در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].





شکل (۵): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز XRD در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

پایه و بر ابزارهایی که خدمات و خروجی قابل انتشار سریع و بدون نیاز به تحلیل پیچیده ایجاد می‌کنند و همچنین بر کمبود نسبی روش‌های مکمل عمیق‌تر تمرکز داشته باشد. در مقایسه، کشورهای پیشرو جهانی، به‌طور معمول XRD را در سطوح پیشرفته‌تر (کمی‌سازی با روش ریتولد<sup>۲۳</sup>، تحلیل بافت و ریزساختار و آنالیز در دمای غیر محیطی) به کار می‌گیرند.

❖ **توصیه‌ها:** آموزش تحلیل‌های پیشرفته XRD، استانداردسازی روش آزمون براساس استانداردهای منتشر شده ملی و بین‌المللی و توسعه خدمات صنعتی در صنایع سیمان، فولاد، سرامیک و معدن.

#### ● کروماتوگرافی گازی (GC): روشی کاربردی با قابلیت درآمدزایی صنعتی

در آنالیز GC، ایران در شمار مطلق مقاله‌ها رتبه ۸ و در درصد کاربرد نیز جایگاه چهارم را به خود اختصاص داده است و در منطقه در گروه کشورهای پرکاربرد قرار می‌گیرد. چین، آمریکا و هند از دیدگاه شمار مقاله‌ها پیش‌تر هستند، اما در شدت کاربرد، کشورهای در حال توسعه منطقه‌ای پیشی می‌گیرند. ایران در این شاخص جهانی در رده بالا قرار می‌گیرد (شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)).

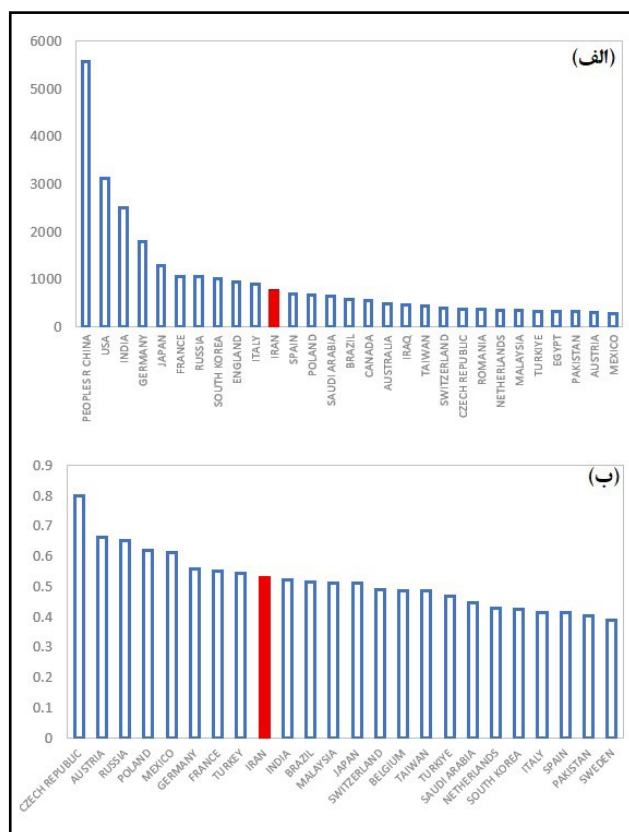
این الگو نشان می‌دهد که سیاست توسعه این روش در کشور موفق بوده و اکنون نقطه تمرکز باید از توسعه کمی به سمت تکمیل ظرفیت کاربری، استانداردسازی روش، ارتقای نیروی انسانی و صنعتی‌سازی خدمات (ارائه گزارش‌های قابل استناد براساس استاندارد) منتقل شود؛ به‌طوری که ICP به یکی از ستون‌های پایدار ارتباط دانشگاه و صنعت تبدیل شود. این آنالیز به‌طور معمول در حوزه‌های محیط‌زیست و پایش فلزات سنگین، معدن/ متالورژی و کنترل عناصر، غذا/دارو و کنترل کیفیت، مواد و کاتالیست‌ها (بارگذاری فلزات، ناخالصی‌ها) کاربرد دارد. بنابراین، بالا بودن هم‌زمان آمار مطلق و درصد مقالات در ایران به این معناست که سامانه کاربران واقعی (پژوهش و خدمات آزمایشگاهی) به‌گونه‌ای فراگیر و نه فقط در چند مرکز محدود، وجود دارد. به‌طور معمول، این روش، نسبت به روش‌های گران‌قیمت (به‌عنوان مثال، NMR/XPS) خطر بهره‌برداری پایین‌تری دارد و به همین دلیل در سیاست‌های تجهیزاتی «موفق‌تر» دیده می‌شود.

❖ **توصیه‌ها:** استقرار نظام استاندارد و استانداردسازی نمونه‌سازی و کالیبراسیون، حرکت به سمت اعتباربخشی آزمایشگاه و طراحی بسته‌های صنعتی برای صنایع مرتبط.

#### ● پراش پرتو ایکس (XRD): زیرساخت شناسایی ترکیبات بلورین و تحلیل ساختاری مواد

در آنالیز XRD، ایران در میانه ده کشور اول جهان قرار دارد (حدود رتبه ۷). در شاخص آمار مطلق مقالات، ایران از بسیاری از کشورهای مهم اروپایی و آسیایی بالاتر نیست، اما در سطح «کشورهای پرتولید» قرار می‌گیرد. در شاخص درصد کاربرد نیز ایران در جمع شش کشور نخست قرار دارد (حدود رتبه ۶). این به آن معناست که XRD در ایران سهم بالایی از مجموعه پژوهش‌های مرتبط را به خود اختصاص داده است. اما در مقایسه با کشورهای پیشرفته‌ای مثل آمریکا، هلند، کانادا، استرالیا، آلمان و ژاپن می‌توان گفت که در آن کشورها XRD «ابزاری پایه» در کنار زنجیره متنوع ابزارها است اما در کشورهای در حال توسعه به‌عنوان روش اصلی شناخته می‌شود (شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب)).

XRD از نظر سیاست‌گذاری تجهیزاتی به‌صورت معمول «کم‌خطر و پرکاربرد» است. این روش، روشی پایه‌ای است و به‌عنوان روش آنالیز ضروری برای مواد، شیمی، سرامیک، معدن، نانو، کاتالیست، انرژی شناخته می‌شود. پراش پرتو ایکس، در دانشگاه، صنعت و همچنین در خدمات آزمایشگاهی بازار ثابتی دارد. بنابراین، بالا بودن درصد XRD در ایران می‌تواند ناشی از خرید گسترده دستگاه‌های



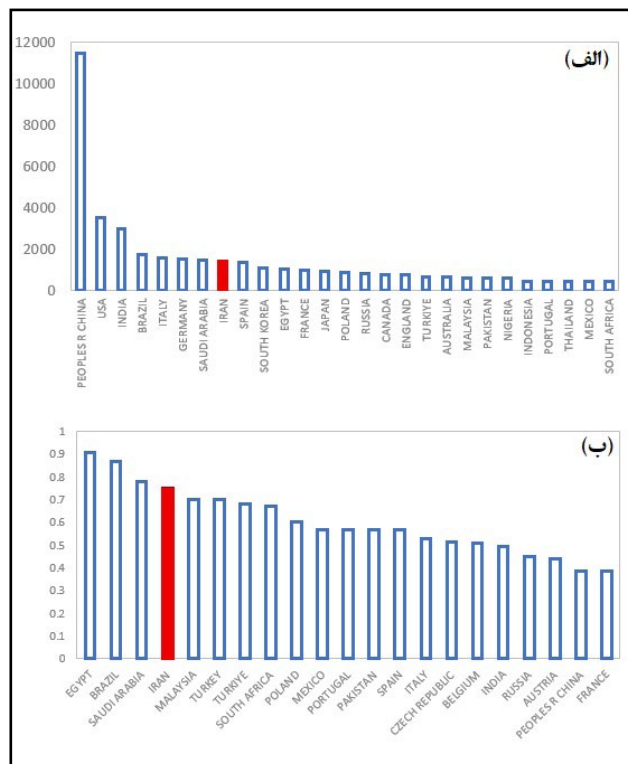
شکل (۷): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز AFM در مقالات ISI براساس داده های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

بررسی با میکروسکوپ نیروی اتمی برای نانومواد، فیلم های نازک، پلیمرها، زیست مواد، سطح و زبری یا توپوگرافی بسیار مهم است. این روش خدمات قابل ارائه ای دارد، اما به اندازه میکروسکوپ الکترونی روبشی فراگیر نیست و مشتریان تخصصی تری را هدف می گیرد. بنابراین، بالا بودن سهم AFM در مقاله های ایران به این معناست که تمرکز پژوهشی ایران روی نانومواد، سطح، پوشش و فیلم نازک بالا است و AFM دقیقاً در این سامانه به کار می رود. سیاست تجهیزاتی ایران در لایه «سطح و نانوتوپوگرافی» تا اندازه ای موفق بوده است. همچنین حمایت از تولید کننده تجهیزات داخلی این دستگاه برای تولید و خرید آن، دسترسی به AFM را در پژوهش کشور آسان تر کرده است.

◀ **توصیه ها:** آموزش تخصصی مدهای پیشرفته و تفسیر نتایج و اتصال به صنایع مرتبط پوشش ها، پلیمرها و سطوح.

#### ● میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM): عمق سنجی بالا با تمرکز بر زیر ساخت های نانومتری

در آنالیز TEM، از دیدگاه شمار مطلق مقاله ها، ایران در کنار کشورهای پیشرو جای نمی گیرد. اما از دیدگاه شدت کاربرد، ایران در میان چند کشور نخست جای دارد. در منطقه، به نظر می رسد TEM به عنوان ابزاری برای ارتقای سطح مقاله ها در چند کشور (مصر، عربستان، ایران) نقش چشمگیرتر نسبت به کشورهای پیشرفته بازی می کند که می تواند نشانه رقابت برای «کیفیت سازی» با ابزار



شکل (۶): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز GC در مقالات ISI براساس داده های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

آنالیز GC برخلاف SEM/XRD که «مواد محور» هستند، بیشتر به حوزه های شیمی تجزیه، محیط زیست، آب و خاک، صنایع غذایی، دارویی، آرایشی، نفت، گاز، پتروشیمی، سلامت، سم شناسی و آلاینده ها پیوند می خورد. از دیدگاه تجهیزاتی، این دستگاه به نسبت استاندارد و خدمات پذیر است. ولی در صورت استفاده از کروماتوگرافی گازی همراه با طیف سنجی جرمی<sup>۲۴</sup>، پیچیدگی و هزینه افزایش می یابد. بازار خدماتی این روش بیرون از دانشگاه (صنعت، کنترل کیفیت و آزمایشگاه های مرجع) بسیار بزرگ است. بنابراین، بالا بودن سهم GC در مقاله ها می تواند نشان دهنده پیوند قوی تر پژوهش با نیازهای کاربردی و صنعتی این حوزه در کشور باشد.

◀ **توصیه ها:** شبکه سازی آزمایشگاه های GC، تقویت خدمات صنعتی برای صنایع مرتبط و در صورت امکان توسعه ظرفیت GC-MS در مراکز مرجع.

#### ● میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM): بلوغ نسبی در حوزه نانو-سطوح

در آزمون AFM، ایران رتبه ۱۱ را در تولید مقاله به خود اختصاص داده است و در شاخص درصد استفاده، ایران در میان ده کشور نخست جهان جای می گیرد (حدود رتبه ۹) و از کشورهایی مثل عربستان، کره جنوبی، ایتالیا، اسپانیا بالاتر بوده و در منطقه از جایگاه بهتری برخوردار است. این به آن معناست که AFM در ایران تا اندازه ای استاندارد شده و به درون پیکره پژوهش راه یافته است (شکل های (۷-الف) و (۷-ب)).

TEM در ایران احتمالاً به صورت متمرکز به کار می رود (چند قطب دانشگاهی، پژوهشگاه یا شبکه محدود خدمات دهنده)، اما همان قطب ها برای چاپ مقاله نقش کلیدی دارند؛ بنابراین، دسترسی محدود ولی سهم بالای مجموعه پژوهش در بررسی داده های آماری آن به چشم می خورد و TEM را به ابزار کلیدی اعتبارساز تبدیل کرده است. در مقایسه جهانی، شکاف اصلی به طور معمول در دسترسی پایدار به تجهیز، آماده سازی نمونه پیشرفته (به عنوان مثال، لاملا<sup>۲۵</sup> یا میکروسکوپ یونی متمرکز<sup>۲۶</sup> در صورت نیاز) و استانداردسازی تحلیل (پراش<sup>۲۷</sup> و در صورت وجود، EDS) پیش می آید. در منطقه، ایران در کنار کشورهای پیرامیه مانند عربستان و چند کشور دیگر رقابت می کند.

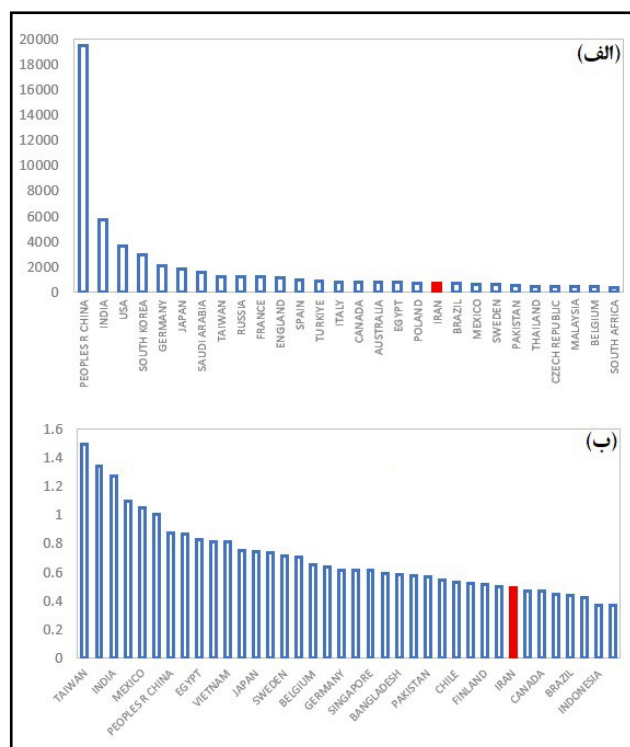


برخی کشورها با تمرکز بر توسعه حالت‌های نقشه‌برداری<sup>۲۸</sup> طیف‌سنجی رامان و کاربردهای تخصصی (به‌عنوان مثال، کربن و انرژی) سهم نسبی بالاتری از مقاله‌های این روش را در مجموعه پژوهش خود دارند. در منطقه نیز ممکن است کشورهایی مانند عربستان، مصر یا پاکستان در شدت کاربرد پیشتر باشند.

❖ **توصیه‌ها:** فرهنگ‌سازی روش‌شناختی (این که چه زمانی این روش در پژوهش لازم است)، آموزش تفسیر طیف و استانداردسازی گزارش‌دهی، توسعه خدمات پیشرفته (نقشه‌برداری و رامان درجا<sup>۲۹</sup>) و طراحی مشوق‌های هزینه‌ای برای پروژه‌های انرژی، کربن و فوتوکاتالیست.

### ● طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS): حلقه مفقوده در تحلیل شیمی سطح و شناسایی حالت‌های شیمیایی

در آنالیز XPS، ایران هم در شمار مطلق مقاله‌ها و هم در درصد کاربرد، رتبه‌های بالایی به خود اختصاص داده است (به ترتیب ۱۹ و ۳۱). در منطقه نیز عربستان، مصر و ترکیه از شرایط بهتری برخوردار هستند. جالب آنکه درصد کاربرد XPS در کشورهایی مانند آمریکا و انگلستان نیز پایین است؛ اما تفاوت کلیدی در اینجا است که آمریکا و انگلستان شاید شمار مطلق بالایی داشته باشند ولی درصد کاربردشان پایین است، زیرا مجموعه بررسی‌های آن‌ها بسیار گوناگون است. در ایران، هم شمار مطلق و هم درصد کاربرد پایین‌تر است. این بدان معناست که XPS نه تنها در مجموعه پژوهش در اولویت نیست، بلکه در کشور کاربرد ناچیزی دارد (شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب)).



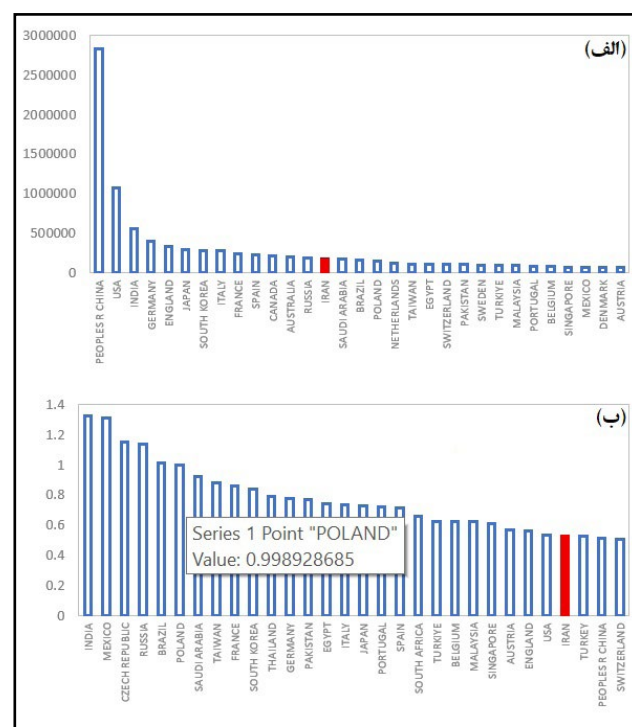
شکل (۱۱): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز XPS در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

و کنترل کیفیت، پژوهش مقاله‌محور انجام دهد. احتمال دارد بخشی از کارکرد XRF در ایران در بخش صنعتی و کنترل کیفیت خارج از مقالات نمایه شده در وبگاه WOS رخ دهد و کمتر در مقاله‌ها دیده شود. در مقایسه جهانی، کشورهایی مانند برزیل و روسیه در درصد کاربرد بالاتر جای دارند که از تمرکز بیشتر بر حوزه‌های معدن و زمین‌شناسی ناشی می‌شود.

❖ **توصیه‌ها:** تمرکز بر کاربردهای صنعتی (به‌عنوان مثال، معدن، سیمان و یا فلزات)، استانداردسازی و کالیبراسیون بین‌آزمایشگاهی، ایجاد بسته خدماتی ترکیبی از XRF و XRD برای مواد معدنی و کنترل کیفیت مواد اولیه.

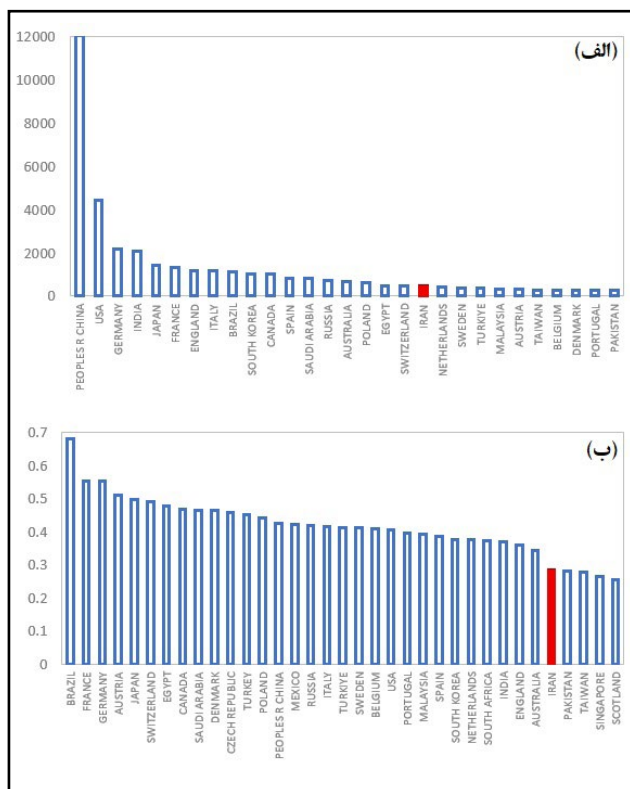
### ● طیف‌سنجی رامان: ابزار تحلیل ساختاری کمتر مورد توجه در سبب پژوهشی

در آنالیز رامان، ایران در شمار مطلق مقاله‌ها رتبه ۱۴ را به خود اختصاص داده است و نزدیک به هم‌تراز عربستان جای می‌گیرد و از جایگاه قابل قبولی برخوردار است؛ اما در شاخص درصد کاربرد، کاهش چشمگیری به چشم می‌خورد (رتبه ۲۷)؛ یعنی کاربرد آن در مقاله‌ها بسیار پایین است (شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب)).



شکل (۱۰): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز رامان در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

این الگو به این معنا است که طیف‌سنجی رامان در ایران به‌عنوان روش مکمل استاندارد در حوزه‌های مرتبط (مواد کربنی، نیمه‌رساناها، اکسیدها، تنش و فازهای آمورف) به‌طور نظام‌مند جای‌نیافته است. همچنین کیفیت خروجی‌ها یا عدم دسترسی عملی، استفاده از آن را محدود کرده است. در مقایسه جهانی،



شکل (۱۲): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز NMR در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

آنالیز NMR در ایران به روشی استاندارد و فراگیر تبدیل شده‌است و این امر می‌تواند به علت دسترسی محدود به تجهیز باشد (تمرکز در چند مرکز، زمان انتظار، هزینه خدمات) بنابراین، این عوامل موجب شده‌است که پژوهشگران در بسیاری پروژه‌ها، به جای NMR از مسیرهای جایگزین برای اثبات ساختار استفاده کنند. در مقایسه جهانی، کشورهایی با سامانه قوی در شیمی آلی، دارو و زیست‌مولکول قوی، NMR را به‌عنوان ابزاری متداول برای شناسایی ساختار و کنترل کیفیت به کار می‌گیرند. در منطقه نیز برخی کشورها با سرمایه‌گذاری در مراکز مرجع توانسته‌اند نفوذ بالاتری ایجاد کنند.

◀ **توصیه‌ها:** ایجاد مراکز مرجع NMR با مدل اشتراک‌گذاری ملی و تعرفه‌گذاری شفاف؛ تقویت روش آزمون و آموزش؛ اتصال به صنعت دارو و مواد شیمیایی ویژه و طراحی سازوکار مالی برای پایداری هزینه‌های نگهداری.

### ● میکروسکوپ کانفوکال، شکاف در تصویربرداری پیشرفته و پژوهش‌های بین‌رشته‌ای زیستی

در آنالیز با میکروسکوپ کانفوکال، ایران از دیدگاه شمار مطلق مقاله‌ها و نیز درصد کاربرد، جایگاهی بسیار پایینی دارد. ایران حتی در سطح منطقه نیز در این زمینه جایگاه نخست را ندارد و پس از عربستان، ترکیه و مصر قرار می‌گیرد. در مقایسه جهانی، کشورهایی که در علوم زیستی و مهندسی پزشکی پیشرفت دارند، کانفوکال را به‌عنوان زیرساخت پایه تصویربرداری به کار می‌گیرند و

در ایران، XPS نسبت به سایر روش‌های آنالیزی کم‌نفوذتر است. این الگو به‌طور معمول با عوامل ذیل سازگاری دارد:

- هزینه و پیچیدگی عملیاتی بالاتری دارد؛ به این معنا که XPS هم در خرید و هم در نگهداری، قطعه، سیستم خلاء و کالیبراسیون حساسیت بیشتری نسبت به سایر دستگاه‌های آنالیزی دارد.

- نیاز شدید به آماده‌سازی نمونه و همچنین دانش و تفسیر تخصصی دارد؛ اگر مهارت تحلیل طیف و استانداردهای سطحی کم باشد، مقاله‌ها کمتر به سمت XPS می‌روند.

- بازار خدمات محدودتری دارد. روش‌های آنالیزی به‌عنوان مثال، SEM و XRD مشتری دائمی دارند اما XPS مشتری کمتر اما تخصصی‌تر دارد. بنابراین، در الگوی «درآمد خدماتی سریع» جذابیت کمتری پیدا می‌کند.

- جایگزین‌های غیرمستقیم برای XPS در مقاله‌نویسی وجود دارد. در بسیاری از پروژه‌ها، پژوهشگر با سایر روش‌های آنالیزی کار را تکمیل و XPS را حذف می‌کند؛ به ویژه هنگامی که دسترسی به آن دشوار باشد.

در ایران، مجموعه تجهیزات در لایه «آنالیز سطح و شیمی سطح» به نسبت ناقص یا کم‌عمق به نظر می‌رسد. در مقایسه جهانی، کشورهایی که در حوزه باتری، کاتالیست، خوردگی، پوشش‌ها و نیمه‌رساناها دارای رقابت هستند، XPS را به‌عنوان ابزار استاندارد اثبات حالت‌های شیمیایی و ترکیب سطحی به کار می‌گیرند. در منطقه نیز سرمایه‌گذاری هدفمند در برخی کشورها می‌تواند شدت کاربرد را افزایش داده باشد.

◀ **توصیه‌ها:** جلوگیری از خریدهای پراکنده و حرکت به سمت ایجاد چند مرکز مرجع XPS با بودجه سرویس پایدار؛ تربیت «تحلیل‌گر طیف» (نه فقط اپراتور)؛ استانداردسازی روش آزمون و گزارش‌دهی و تعریف پروژه‌های مشترک صنعت-دانشگاه در خوردگی/پوشش/کاتالیست برای ایجاد تقاضای پایدار.

### ● روزنانه مغناطیسی هسته (NMR): زیرساخت سرمایه‌بر برای شیمی دقیق و داروسازی

در NMR نیز ایران در هر دو شاخص شمار مطلق مقاله‌ها و درصد کاربرد، جایگاه پایینی به خود اختصاص داده است. کشورهای پیشرفته اروپایی در درصد استفاده NMR جایگاه بالایی دارند؛ که نشان‌دهنده این است که NMR در آن کشورها ابزاری رایج و استاندارد در زنجیره شناسایی ساختار به شمار می‌رود. ایران در درصد کاربرد این تجهیز جایگاه پایینی دارد؛ یعنی NMR در ایران نقش اصلی در «ساختاردهی نتایج» ندارد. کاربرد NMR در ایران حتی نسبت به برخی کشورهای منطقه نیز کمتر است (شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب)).

● کانفوکال به‌طور معمول بدون وجود «سامانه کاربر» شامل گروه‌های زیستی توانمند و سازوکارهای استاندارد، فقط با خرید دستگاه توسعه نمی‌یابد؛ بلکه رشد آن مستلزم شکل‌گیری هم‌زمان زیرساخت‌های آموزشی و شبکه‌های همکاری است. این وضعیت بیشتر حاصل ترکیب دو عامل است: (الف) - غلبه رویکرد مودم‌محور در سیاست‌های تجهیزاتی بسیاری از دانشگاه‌ها که آن‌ها را به سمت آزمون‌ها و تجهیزات پرمخاطب سوق داده است و (ب) - وابستگی کانفوکال به یک سامانه زیستی - تصویربرداری (به‌عنوان مثال، سازوکارهای فلورسانس، آماده‌سازی نمونه‌های زیستی و تحلیل تصویر) که بدون مدیریت پژوهش میان‌رشته‌ای شکل نمی‌گیرد و پایدار نمی‌ماند.

❖ **توصیه‌ها:** ایجاد مراکز مشترک علوم زیستی - مواد با مدیریت حرفه‌ای و ساختار حکمرانی شفاف؛ توسعه آموزش‌های تخصصی در زمینه تحلیل تصویر و استانداردسازی گزارش‌دهی پژوهشی و طراحی و اجرای برنامه‌های حمایتی هدفمند برای پروژه‌های میان‌رشته‌ای در حوزه زیست‌فناوری - مواد.

## ● سیاست کلان توسعه تجهیزات و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌ها

### ● گذار از «خرید تجهیزات» به «مدیریت بهره‌وری ظرفیت‌ها»

یافته‌ها نشانگر آن است که در روش‌های تحلیلی پرکاربرد، چالش اصلی دیگر صرفاً افزایش تعداد تجهیزات نیست، بلکه تمرکز بر تکمیل ظرفیت بهره‌برداری و ارتقای کیفیت خدمات ضروری است. انعقاد قراردادهای همکاری با صنایع و استانداردسازی گزارش‌های تحلیلی نیز می‌تواند به‌عنوان راهکارهایی مؤثر مد نظر قرار گیرد. بدون اجرای این اقدامات، افزایش تعداد تجهیزات منجر به بهبود «کیفیت» یا «اثرگذاری در سطح صنعتی» نخواهد شد.

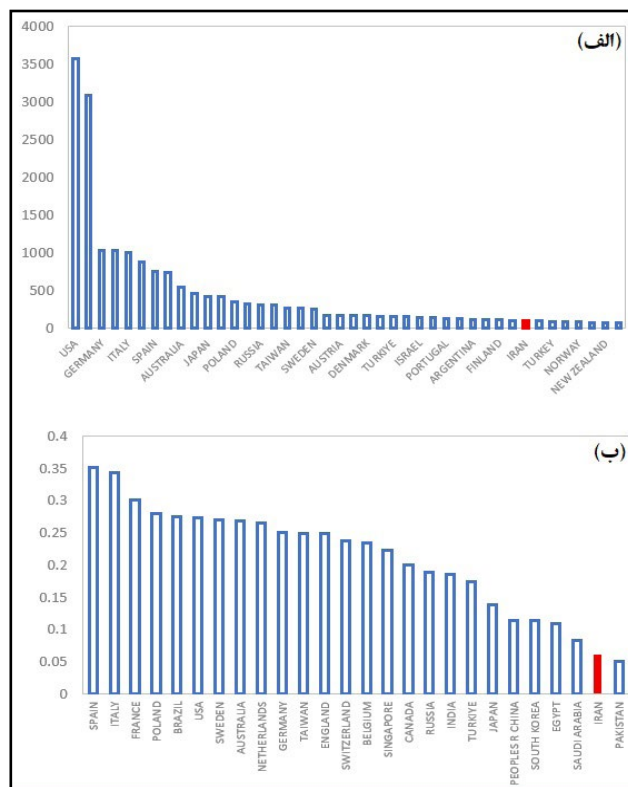
### ● ارتقای سرمایه انسانی و ترسیم مسیر شغلی؛ پیش‌شرط به‌کارگیری روش‌های پیشرفته

روش‌های کم‌نفوذ (به‌عنوان مثال، XPS، NMR، کانفوکال و تا حدی طیف‌سنجی رامان) بیش از هر چیز به «دانش تخصصی بهره‌برداری و نیروی انسانی ماهر» وابسته‌اند. سیاست‌گذاری موفق در این حوزه‌ها، مستلزم تفکیک نقش اپراتور و تحلیل‌گر داده، تعریف مسیرهای شغلی روشن، ایجاد نظام آموزشی برنامه‌ریزی شده و فراهم آوردن انگیزه‌های لازم برای ماندگاری نیروهای متخصص است.

### ● تنوع‌بخشی خدمات و تحول در مدل کسب‌وکار آزمایشگاهی

به‌منظور پایدارسازی هزینه‌های نگهداری و ارتقای کیفیت خدمات، ضروری است که دامنه خدمات از «اندازه‌گیری خام» فراتر

درصد کاربرد بالاتری نشان می‌دهند. در منطقه نیز برخی کشورها (با سرمایه‌گذاری در مراکز پزشکی و دانشگاهی) ممکن است از ایران پیش‌تر باشند (شکل‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب)).



شکل (۱۳): (الف): آمار مطلق و (ب): درصد استفاده از آنالیز کانفوکال در مقالات ISI براساس داده‌های پایگاه WOS در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶ [۱].

به‌طور معمول، کانفوکال یک روش «آنالیز کلاسیک» مانند SEM و یا XRD نیست؛ بلکه بیشتر در حوزه‌های زیست‌مواد، سلول و بافت، مهندسی پزشکی، میکروبیولوژی/ بیوشیمی/ داروسازی، پلیمرهای زیستی، تصویربرداری فلورسانس، برهم‌کنش سطح-سلول و برخی حوزه‌های فوتونیک و اپتیک پیشرفته نقش محوری ایفا می‌کند. بنابراین، پایین بودن درصد و شمار مقاله‌های ایران به یکی از این معناها اشاره دارد:

● ترکیب موضوعی پژوهش کشور بیشتر به سمت مواد، نانو، کاتالیست و جذب رفته است تا زیست‌تصویربرداری و پژوهش‌های سلولی.

● سیاست تجهیزاتی دانشگاهی در ایران بیشتر روی دستگاه‌های پرخدمات موادمحور سرمایه‌گذاری کرده تا تجهیزات تصویربرداری زیستی با نیاز به زیرساخت و سازوکارهای خاص (فلورسانس، نمونه‌سازی، اتاق تاریک یا لیزر، نگهداری).

● در ایران، سیاست تجهیز مراکز دانشگاهی به‌طور عمده بر دستگاه‌های موادمحور پرکاربرد استوار بوده و از تجهیزات تصویربرداری سلولی که نیازمند زیرساخت‌های پیچیده (مانند محیط‌های فلورسانس، اتاق‌های تاریک، سامانه‌های لیزری و نگهداری‌های فنی) هستند، غفلت شده است.



می‌تواند به افزایش هدفمند استفاده از این روش‌ها منجر شود.

### ● برقراری ارتباط مؤثر با صنعت و ارتقای استانداردهای کیفی

ایجاد پیوند پایدار با بدنه صنعت، مستلزم اعتبارسنجی روش‌های مورد استفاده، تضمین قابلیت ردیابی داده‌ها و حرکت به سوی انطباق با استانداردهای معتبر آزمایشگاهی نظیر استاندارد ISO/IEC 17025 برای آزمایشگاه‌های منتخب است. روش‌های تحلیلی مانند ICP، GC، XRF، XRD و حتی SEM در حوزه بررسی مقاطع شکست یا خوردگی، ظرفیت بالایی برای تعریف و اجرای قراردادهای صنعتی دارند. علاوه بر این، روش‌هایی نظیر XPS و کانفوکال، در صورت طراحی پروژه‌هایی مسئله‌محور و متمرکز بر رفع نیازهای مشخص صنعتی، قادر به ایجاد تقاضای پایدار خواهند بود.

رفته و به سمت «خدمت ارزش‌افزوده» حرکت کند. این خدمات ارزش‌افزوده شامل فرآیندهایی چون نمونه‌سازی، اندازه‌گیری، تحلیل داده و ارائه گزارش استاندارد است. این رویکرد برای تجهیزات پیشرفته‌ای مانند TEM، XPS و NMR حیاتی بوده و برای دیگر روش‌های پرکاربرد نیز مزیت رقابتی قابل توجهی ایجاد می‌نماید.

### ● فرهنگ‌سازی به‌کارگیری روش‌های کمتر استفاده شده و تدوین مشوق‌های سیاستی

کاهش درصد استفاده از برخی روش‌های تحلیلی، همواره نشان‌دهنده عدم وجود تجهیزات کافی نیست؛ گاه این وضعیت ناشی از کمبود فرهنگ روش‌شناختی و فقدان مهارت در تفسیر و تحلیل خروجی‌های حاصل از روش است. تدوین روش‌های استاندارد تحلیل، برگزاری کارگاه‌های منظم و ارائه مشوق‌های مالی (به‌عنوان مثال، حمایت‌های اعتباری در به‌کارگیری روش‌های پیشرفته)

### نتیجه‌گیری

براساس رتبه‌بندی روش‌محور استخراج‌شده از پایگاه وب‌آوساینس (دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۶)، تصویر جامعی از وضعیت کنونی تحلیل در ایران نمایان می‌شود. کشورمان در روش‌های کم‌خطر، پرتکرار و خدمات‌پذیر، ستون فقراتی مستحکم بنا نهاده و در برخی از این روش‌ها، جایگاهی بسیار ممتاز در سطح جهانی کسب کرده است. در نقطه مقابل، در روش‌هایی که نیازمند سرمایه‌گذاری کلان، دانش عمیق یا وابستگی به سامانه‌های تخصصی هستند، نشانه‌هایی از نفوذ اندک و وجود حلقه‌های مفقوده مشاهده می‌شود. سیاست پیشنهادی این مقاله، بر انتقال تمرکز از «توسعه کمی پراکنده» به سمت اولویت‌بخشی به «تکمیل ظرفیت، استانداردسازی، شبکه‌سازی مراکز مرجع، ارتقای سرمایه انسانی و تنوع‌بخشی به خدمات» استوار است. این رویکرد، ضمن تثبیت و تقویت مزیت‌های کنونی ایران در روش‌های پرکاربرد، زمینه را برای تعمیق پژوهش‌ها، افزایش قابلیت رقابت‌پذیری در عرصه بین‌المللی و برقراری ارتباطی مؤثرتر و پایدارتر با بدنه صنعت فراهم خواهد آورد.

### پی‌نوشت

- |   |  |
|---|--|
| 1. Institute for Scientific Information (ISI)             | copy (ICP-OES)                                   |
| 2. Web of Science   | 16. Atomic Force Microscopy (AFM)                |
| 3. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)    | 17. Transmission Electron Microscopy (TEM)       |
| 4. Scanning Electron Microscopy (SEM)                     | 18. X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)        |
| 5. X-ray Diffraction (XRD)                                | 19. Raman  |
| 6. Brunauer Emmett Teller (BET)                           | 20. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)         |
| 7. Gas Chromatography (GC)                                | 21. Electron Backscatter Diffraction (EBSD)      |
| 8. Raman Spectrometry                                     | 22. Metal Organic Framework                      |
| 9. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)                 | 23. Rietveld Method                              |
| 10. Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)         | 24. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) |
| 11. Confocal Microscope                                   | 25. lamella                                      |
| 12. Web of Science (WOS)                                  | 26. Focused Ion Beam (FIB)                       |
| 13. Advanced Search                                       | 27. Diffraction                                  |
| 14. All Fields  | 28. Mapping                                      |
| 15. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectros- | 29. In-situ                                      |

### مراجع

[1] Clarivate Analytics, "Web of Science." [Online]. Available: <https://www.webofscience.com>

## نویسنده

داود قرایلو<sup>۱</sup>\*۱. مدیر فنی آزمایشگاه TEM، مرکز خدمات  
آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف

\*Davoud.Gharailou@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

# بررسی برخی خطاهای رایج در کار با میکروسکوپ الکترونی عبوری و راههای پیشگیری از آنها

## واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ الکترونی عبوری، خطاهای تصویربرداری،  
آماده‌سازی نمونه، تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا.

## چکیده

میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۱</sup> یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای مشخصه‌یابی در علم مواد است که امکان بررسی ساختار درونی مواد را در مقیاس نانومتری و حتی اتمی فراهم می‌کند. با وجود توانمندی بالای این روش، دقت و اعتبار نتایج آن به شدت تحت تأثیر خطاهای گوناگون در مراحل آماده‌سازی نمونه، تصویربرداری و تحلیل داده‌ها قرار دارد. در این مقاله، برخی از مهم‌ترین خطاهای رایج در کار با TEM و اثر آنها بر تفسیر نتایج بررسی شده‌است. در بخش آماده‌سازی نمونه، عواملی مانند ضخامت نامناسب نمونه، نازک‌سازی بیش از حد، آلودگی سطح، انتخاب نامناسب گرید، توزیع غیریکنواخت نانوذرات، خشک‌کردن غیراستاندارد و آسیب‌های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این عوامل می‌توانند موجب ایجاد آثار کاذب<sup>۲</sup>، تغییر در ساختار ظاهری نمونه یا کاهش کیفیت تصویربرداری شوند. در مرحله تصویربرداری نیز خطاهایی نظیر تنظیم نادرست فوکوس، آستیگماتیسم<sup>۳</sup> اصلاح نشده، هم‌راستاسازی نامناسب ستون الکترونی، انتخاب نامناسب بزرگنمایی، رانش نمونه و انتخاب نادرست ولتاژ شتاب‌دهنده بررسی شده‌اند که همگی می‌توانند به کاهش وضوح و ایجاد اعوجاج داده‌های تصویری منجر شوند. همچنین در بخش تحلیل داده‌ها، خطاهای مهمی از جمله تفسیر نادرست آثار کاذب، تحلیل مبتنی بر یک تصویر منفرد، اندازه‌گیری بدون کالیبراسیون و نتیجه‌گیری آماری بر پایه تعداد محدودی از ذرات مورد توجه قرار گرفته‌اند. در تحلیل‌های پیشرفته نیز به چالش‌هایی مانند آلودگی هیدروکربنی، هم‌پوشانی پیک‌ها و انتخاب نامناسب ناحیه در تحلیل عنصری<sup>۴</sup> اشاره شده‌است.

## مقدمه

در این مقاله تلاش شده‌است برخی از مشکلاتی که طی سال‌ها فعالیت عملی و تجربی به‌صورت متداول در حوزه تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی عبوری مشاهده شده‌اند، برای پژوهشگران و علاقه‌مندان این حوزه تشریح شوند. هدف این مقاله، شناسایی و تبیین برخی از مهم‌ترین خطاهای رایج در فرآیند کار با TEM و بررسی اثر آنها بر کیفیت و تفسیر نتایج است. همچنین کوشش شده‌است با ارائه دیدگاهی کاربردی، به کاربران کمک شود تا از تکرار خطاهای متداول جلوگیری نموده و دقت تحلیل‌های خود را افزایش دهند. این نوشتار می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای بهبود کیفیت داده‌های حاصل از TEM مورد استفاده قرار گیرد. در تصویربرداری با TEM خطاهای متعددی وجود دارند که بخشی از آنها به آماده‌سازی نمونه، بخشی به تصویربرداری و بخشی دیگر به تحلیل داده‌ها مربوط می‌شوند. در این مقاله، مهم‌ترین خطاهای هر بخش به‌صورت جداگانه بررسی خواهند شد.

## خطاهای مربوط به آماده‌سازی نمونه

## • ضخامت بیش از حد نمونه

یکی از مهم‌ترین و در عین حال رایج‌ترین خطاها در کار با میکروسکوپ الکترونی عبوری، استفاده از نمونه‌ای با ضخامت بیش از حد مجاز است. اساس عملکرد TEM بر عبور پرتو الکترونی از میان نمونه استوار است؛ بنابراین، اگر ضخامت نمونه زیاد باشد، بخش قابل توجهی از الکترون‌ها درون ماده جذب یا پراکنده خواهند شد و در نتیجه، به آشکارساز<sup>۵</sup> نمی‌رسند. این مسئله، سبب کاهش شدید کیفیت تصویر و از دست رفتن بخشی از اطلاعات ساختاری نمونه می‌شود. ضخامت مناسب نمونه به جنس ماده، ولتاژ شتاب‌دهنده دستگاه و نوع تحلیل مورد نظر بستگی دارد، اما در بسیاری از کاربردها ضخامت نمونه باید در محدوده چند ده تا حداکثر حدود ۱۰۰ نانومتر باشد. هنگامی که ضخامت نمونه از این مقدار بیشتر شود، پدیده «پراکندگی چندگانه الکترون‌ها» رخ می‌دهد. در این شرایط، الکترون‌ها چندین بار با اتم‌های موجود در نمونه برهم‌کنش می‌کنند و مسیر اولیه خود را از دست می‌دهند. این مسئله موجب کاهش وضوح تصویر، افت کنتراست و دشوار شدن تفسیر نتایج خواهد شد.

یکی از نشانه‌های ضخامت بیش از حد نمونه، مشاهده نواحی بسیار تیره در تصویرهای TEM است. همچنین در تصویرهای با تفکیک‌پذیری بالا<sup>۶</sup> صفحات بلوری به‌خوبی قابل مشاهده نیستند و الگوهای پراش الکترونی<sup>۸</sup> نیز ممکن است به‌صورت مبهم یا همراه با پس‌زمینه شدید ظاهر شوند. در تحلیل‌های عنصری مانند طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس<sup>۹</sup> نیز افزایش ضخامت نمونه می‌تواند دقت نتایج را کاهش دهد، زیرا سیگنال‌های تولید شده تحت تأثیر جذب و پراکندگی الکترون‌ها قرار می‌گیرند. این مشکل به‌صورت معمول در مراحل آماده‌سازی نمونه ایجاد می‌شود. استفاده نادرست از روش‌هایی مانند پولیش مکانیکی<sup>۱۰</sup>، پولیش یونی<sup>۱۱</sup> یا برش با پرتو یونی متمرکز<sup>۱۲</sup> می‌تواند سبب باقی‌ماندن بخش‌هایی با ضخامت نامناسب شود. برای پیشگیری از این خطا، لازم است ضخامت نمونه پیش از تصویربرداری ارزیابی شود و در صورت امکان، نواحی نازک‌تر برای تصویربرداری و تحلیل انتخاب شوند. توجه به این نکته ساده می‌تواند تفاوت میان یک تصویر معمولی و یک تصویر باکیفیت در مقیاس اتمی را رقم بزند؛ تفاوتی که گاهی مسیر یک پروژه پژوهشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل (۱) نمایی از دستگاه اولتراماکروتوم برای ایجاد لایه نازک نشان داده می‌شود.



شکل (۱): برش زدن و ایجاد لایه نازک با دستگاه اولتراماکروتوم.

## • نازک‌سازی بیش از حد نمونه

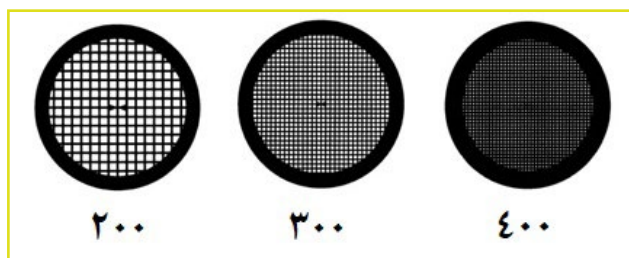
اگرچه نازک بودن نمونه یکی از الزامات اصلی تصویربرداری در میکروسکوپ الکترونی عبوری است، اما نازک‌سازی بیش از حد نیز می‌تواند مشکلات جدی ایجاد کند. در این شرایط، نمونه به اندازه‌ای نازک می‌شود که استحکام مکانیکی خود را از دست داده و در برابر پرتو الکترونی آسیب‌پذیر می‌شود. چنین نمونه‌ای ممکن است هنگام انتقال، نصب روی گرید یا حتی هنگام تصویربرداری دچار پارگی، ترک‌خوردگی یا سوراخ‌شدگی شود. یکی از پیامدهای مهم نازک‌سازی بیش از حد، تخریب ساختار نمونه در اثر تابش الکترون‌ها است. این مسئله به‌ویژه در مواد حساس مانند پلیمرها، مواد زیستی و برخی نانو ساختارها اهمیت بیشتری دارد. همچنین کاهش بیش از اندازه ضخامت نمونه می‌تواند موجب کاهش کنتراست تصویر و دشوار شدن تشخیص جزئیات ساختاری شود. این خطا به‌طور معمول در مراحل پولیش یونی، برش فوق‌نازک یا آماده‌سازی با پرتو یونی متمرکز رخ می‌دهد. کنترل دقیق فرآیند نازک‌سازی و پایش مداوم ضخامت نمونه، نقش مهمی در پیشگیری از این مشکل و دستیابی به تصویرهایی با کیفیت و قابل اعتماد دارد.

## • آلودگی سطح نمونه

آلودگی سطح نمونه یکی از خطاهای رایج در آماده‌سازی نمونه برای میکروسکوپ الکترونی عبوری است که می‌تواند کیفیت تصویر و دقت تحلیل را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این آلودگی‌ها ممکن است از منابع مختلفی مانند گردوغبار محیط، چربی و اثر انگشت، بقایای حلال‌ها، روغن پمپ‌های خلاء یا مواد آلی باقی‌مانده از فرآیند آماده‌سازی نمونه ناشی شوند. هنگام تصویربرداری، این آلاینده‌ها می‌توانند به‌صورت لکه‌های تیره یا روشن، نواحی نامنظم و حتی ساختارهای کاذب در تصویر ظاهر شوند و پژوهشگر را در تفسیر نتایج دچار خطا



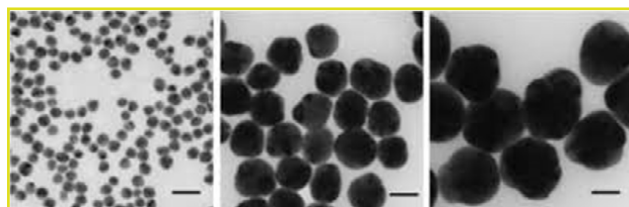
TEM نه تنها به دستگاه، بلکه به همین انتخاب به ظاهر ساده نیز وابسته است. در شکل (۲) سه گرید با مش‌های مختلف نشان داده شده‌است.



شکل (۲): نمایی از سه نوع گرید با مش‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰.

### • توزیع غیریکنواخت نانوذرات

نانوذرات به دلیل انرژی سطحی بالا تمایل دارند به یکدیگر بچسبند و به‌صورت خوشه‌ها یا تجمع‌های بزرگ ظاهر شوند. در چنین شرایطی، اندازه‌گیری دقیق ابعاد ذرات، بررسی مورفولوژی و تحلیل توزیع اندازه ذرات با خطا همراه خواهد بود و نتایج به‌دست آمده نمایانگر واقعی کل نمونه نخواهند بود. یکی از مؤثرترین راهکارها برای پیشگیری از این مشکل، استفاده از دستگاه اولتراسونیک پیش از تهیه نمونه است. امواج فراصوت با ایجاد پدیده کاویتاسیون<sup>۱۶</sup> در مایع، نیروهای چسبندگی میان ذرات را کاهش داده و کلوخه‌های تشکیل شده را از یکدیگر جدا می‌کنند. این فرآیند موجب پراکندگی بهتر نانوذرات در حلال و افزایش یکنواختی توزیع آن‌ها روی گرید می‌شود (شکل (۳)). البته زمان و توان اولتراسونیک باید با دقت کنترل شود، زیرا اعمال انرژی بیش از حد می‌تواند به برخی نانو ساختارهای حساس آسیب برساند. استفاده صحیح از اولتراسونیک نقش مهمی در دستیابی به تصاویری دقیق و قابل اعتماد در TEM دارد.



شکل (۳): نمونه‌ای از تصویر نانوذرات نقره با تجمع‌های مختلف.

### • خشک کردن نامناسب نمونه

هنگامی که حلال به‌صورت غیراستاندارد تبخیر می‌شود، نیروهای کشش سطحی سبب جابه‌جایی و تجمع نانوذرات در بخش‌های مشخصی از گرید می‌شوند. این پدیده که با نام اثر حلقه قهوه<sup>۱۷</sup> شناخته می‌شود، موجب توزیع غیریکنواخت ذرات و ایجاد خطا در تحلیل اندازه و مورفولوژی خواهد شد. از

کنند. افزون بر این، برخی آلودگی‌های آلی در اثر تابش پرتو الکترونی به تدریج به رسوبات کربنی تبدیل می‌شوند و لایه‌ای ناخواسته روی سطح نمونه ایجاد می‌کنند که به مرور زمان کیفیت تصویر را کاهش می‌دهد. برای پیشگیری از این مشکل، لازم است نمونه‌ها در محیطی تمیز آماده و نگهداری شوند، از تماس مستقیم دست با گریدها جلوگیری شود و پیش از ورود نمونه به دستگاه، مراحل پاک‌سازی و خشک‌سازی با دقت انجام گیرند. رعایت این نکات ساده نقش مهمی در دستیابی به تصاویری دقیق و قابل اعتماد دارد.

### • انتخاب نامناسب گرید

گرید بستری است که نمونه روی آن قرار می‌گیرد و انتخاب نادرست آن می‌تواند کیفیت تصویرها، دقت تحلیل‌ها و حتی پایداری نمونه را تحت تأثیر قرار دهد. یکی از خطاهای رایج، استفاده از گریدی است که با نوع نمونه یا هدف آزمایش سازگاری ندارد. به‌عنوان مثال، در بررسی نانوذرات بسیار کوچک یا مواد دوبعدی مانند گرافن، استفاده از گریدهای معمولی ممکن است موجب کاهش کنتراست یا دشوار شدن مشاهده جزئیات ساختاری شود. در چنین مواردی، گریدهای دارای فیلم کربنی<sup>۱۳</sup> گزینه مناسبی به‌شمار می‌روند. لایه نازک کربنی از نمونه پشتیبانی می‌کند و مانع سقوط یا جابه‌جایی ذرات ریز در حفره‌های گرید می‌شود. با این حال، همین لایه کربنی ممکن است در برخی تحلیل‌های حساس، بخشی از سیگنال زمینه را ایجاد کند.

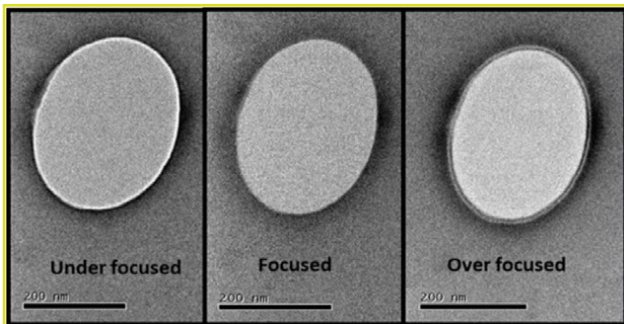
گریدهای هولی<sup>۱۴</sup> دارای مجموعه‌ای از حفره‌های منظم در فیلم کربنی هستند. این نوع گریدها امکان تصویربرداری از نمونه در نواحی معلق روی حفره‌ها را فراهم می‌کنند و به این ترتیب، اثر زمینه ناشی از فیلم کربنی کاهش می‌یابد. به همین دلیل، گریدهای هولی در تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا، تحلیل ساختارهای اتمی و همچنین مطالعه‌های کرایو TEM کاربرد گسترده‌ای دارند. نوع پیشرفته‌تر این گریدها، گریدهای لیزی<sup>۱۵</sup> هستند که شبکه‌ای نامنظم از حفره‌ها و پل‌های کربنی دارند. این ساختار امکان انتخاب نواحی با ابعاد گوناگون را فراهم می‌کند و برای مطالعه نانوسیم‌ها، نانولوله‌ها، مواد دوبعدی و ذراتی که نیاز به معلق بودن در فضای آزاد دارند، بسیار مناسب است. با این حال، به دلیل نامنظم بودن ساختار، یافتن ناحیه مناسب برای تصویربرداری ممکن است زمان‌بر باشد.

انتخاب نادرست گرید می‌تواند به مشکلاتی مانند کاهش کنتراست، افزایش نویز زمینه، آسیب دیدگی نمونه یا حتی تفسیر نادرست نتایج منجر شود. از این رو، پژوهشگر باید پیش از آغاز آزمایش، نوع نمونه، ابعاد ذرات، حساسیت تحلیل و هدف نهایی تصویربرداری را با دقت بررسی کرده و گرید متناسب با آن را انتخاب کند. در بسیاری از موارد، کیفیت نهایی داده‌های

## خطاهای حین تصویربرداری

## • تنظیم نادرست فوکوس

تنظیم صحیح فوکوس یکی از مهم‌ترین مهارت‌های کاربر در میکروسکوپ الکترونی عبوری است. حتی اگر نمونه به خوبی آماده شده باشد و دستگاه در بهترین شرایط عملکردی قرار داشته باشد، فوکوس نامناسب می‌تواند سبب از دست رفتن جزئیات ارزشمند ساختاری شود. در TEM، فوکوس به‌طور عمده از طریق تنظیم جریان عدسی شیئی<sup>۱۹</sup> انجام می‌شود و کوچک‌ترین تغییر در این عامل می‌تواند تأثیر محسوسی بر کیفیت تصویر داشته باشد (شکل (۴)).



شکل (۴): نمایش دو حالت فوکوس بیش از حد و فوکوس کمتر از حد در تصویرهای سمت چپ و راست. تصویر میانی، نمونه را با فوکوس مناسب نشان می‌دهد.

در حالت ایده‌آل، پرتوهای الکترونی عبوری از نمونه باید در صفحه تصویر به‌درستی همگرا شوند. هنگامی که نمونه در وضعیت فوکوس کم یا فوکوس بیش از حد قرار گیرد، تصویر دچار تاری می‌شود و مرزهای ساختاری وضوح خود را از دست می‌دهند. این مسئله در تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا مشاهده صفحات بلوری و آرایش اتمی به تنظیم دقیق فوکوس وابسته است. یکی از پیامدهای فنی فوکوس نامناسب، تغییر تابع انتقال کنتراست<sup>۲۰</sup> است. در این شرایط، برخی فرکانس‌های فضایی تقویت و برخی دیگر تضعیف می‌شوند و در نتیجه تصویر ثبت‌شده ممکن است بازتاب دقیقی از ساختار واقعی نمونه نباشد. به همین دلیل، در تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری با تفکیک‌پذیری بالا<sup>۲۱</sup> گاهی فاصله صفحات بلوری یا شکل نقص‌های بلوری تحت تأثیر شرایط فوکوس قرار می‌گیرند.

از نشانه‌های رایج فوکوس نامناسب می‌توان به کاهش وضوح لبه‌ها، محو شدن جزئیات ریز، تغییر غیرطبیعی کنتراست و مشاهده هاله‌های روشن یا تیره در اطراف ساختارها اشاره کرد. کاربران دستگاه به‌صورت معمول با استفاده از

جمله روش‌های غیراستاندارد می‌توان به خشک کردن با هوای فشرده، قرار دادن گرید زیر سشوار یا منابع گرمایی مستقیم، تابش شدید نور یا افزایش بیش از حد دما اشاره کرد. این روش‌ها ممکن است سبب ایجاد ترک، رسوب ناخالصی‌ها یا تغییر ساختار برخی نانومواد حساس شوند. بهترین روش، خشک شدن تدریجی نمونه در محیطی تمیز و عاری از گردوغبار یا استفاده از خشک‌کن‌های خلاء در شرایط کنترل‌شده است. گاهی یک مرحله خشک کردن نامناسب می‌تواند تمام زحمات آماده‌سازی نمونه را بی‌اثر کند؛ موضوعی که پژوهشگران به‌طور معمول پس از مشاهده تصویرها متوجه آن می‌شوند، نه پیش از آن.

## • آسیب مکانیکی هنگام آماده‌سازی

آسیب مکانیکی یکی از خطاهای کمتر مورد توجه در آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری است که می‌تواند به ایجاد عیب‌های مصنوعی و تفسیر نادرست نتایج منجر شود. از آنجا که بسیاری از نمونه‌های مورد استفاده در TEM بسیار نازک و شکننده هستند، اعمال تنش‌های مکانیکی در مراحل آماده‌سازی، انتقال یا نصب روی گرید ممکن است سبب ایجاد ترک، خراش، خمیدگی یا حتی شکستگی نمونه شود. این عیب‌ها گاهی در تصویرهای TEM به‌عنوان مرزدانه، نقص بلوری یا ساختارهای واقعی ماده تفسیر می‌شوند و اعتبار نتایج پژوهش را زیر سؤال می‌برند. پژوهشگران باید توجه داشته باشند که هرگونه آسیب ایجادشده در فرآیند آماده‌سازی ممکن است تا مرحله تصویربرداری باقی بماند و به سختی از ویژگی‌های واقعی نمونه قابل تشخیص باشد. به همین دلیل، کار با ابزارهای ظریف، استفاده از تجهیزات مناسب و رعایت اصول جابه‌جایی نمونه اهمیت زیادی دارد. پنج مورد از رایج‌ترین عوامل ایجاد آسیب مکانیکی عبارتند از: اعمال فشار بیش از حد با پنس هنگام برداشتن یا جابه‌جایی گرید؛

◀ پولیش مکانیکی نامناسب که می‌تواند سبب ایجاد خراش‌ها و ترک‌های سطحی شود؛  
◀ برش نادرست نمونه در مراحل نازک‌سازی یا آماده‌سازی اولیه؛

◀ ارتعاش و ضربه هنگام حمل‌ونقل نمونه میان مراحل مختلف آزمایش؛

◀ تنش‌های ناشی از قرار دادن نمونه روی نگهدارنده<sup>۱۸</sup> که می‌تواند موجب خم‌شدگی یا شکست موضعی شود.

کاهش این آسیب‌ها نیازمند دقت بالا، تجربه عملی و استفاده از روش‌های استاندارد آماده‌سازی است، زیرا حتی کوچک‌ترین آسیب مکانیکی نیز می‌تواند در مقیاس نانومتری به خطایی بزرگ در پژوهش تبدیل شود.

## ◀ نمونه‌های زیستی

نمونه‌های زیستی مانند سلول‌ها، بافت‌ها، ویروس‌ها و پروتئین‌ها نیز نسبت به تابش الکترونی بسیار حساس هستند. برخورد الکترون‌ها می‌تواند موجب تخریب مولکول‌های زیستی، تغییر آرایش پروتئین‌ها و آسیب به غشاهای سلولی شود. به همین دلیل، در مطالعه‌های زیستی به‌صورت معمول از روش کرایو میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده می‌شود تا نمونه در دمای بسیار پایین نگهداری شده و میزان آسیب پرتویی کاهش یابد. از نشانه‌های آسیب پرتویی در نمونه‌های زیستی می‌توان به کاهش وضوح جزئیات، تغییر شکل ساختارها و ایجاد نواحی تخریب‌شده اشاره کرد.

## ◀ نمونه‌های فلزی

فلزات و آلیاژها به‌طور معمول مقاومت بیشتری در برابر تابش الکترونی دارند، اما این موضوع به معنای مصونیت کامل آن‌ها نیست. در بزرگنمایی‌های بالا و زمان‌های تابش طولانی، انرژی پرتو می‌تواند موجب جابه‌جایی اتم‌ها از محل اولیه خود شود. همچنین در برخی نانومواد فلزی، رشد دانه‌ها، مهاجرت اتمی یا تغییر در ساختار عیب‌های بلوری مشاهده شده‌است. این تغییرات ممکن است پژوهشگر را به تفسیر نادرست ساختارهای ایجادشده در اثر تابش پرتو به‌عنوان ساختار واقعی ماده سوق دهند. به همین دلیل، در تمامی انواع نمونه‌ها توصیه می‌شود زمان تابش و شدت پرتو تا حد امکان کاهش یابد و تنظیمات دستگاه پیش از آغاز تصویربرداری نهایی انجام شوند. در TEM گاهی مشاهده طولانی‌تر به معنای مشاهده بهتر نیست، بلکه ممکن است به معنای تخریب تدریجی همان ساختاری باشد که قرار است بررسی شود.

## • نادیده گرفتن رانش نمونه

رانش نمونه<sup>۲۳</sup> به جابه‌جایی تدریجی و ناخواسته نمونه در طول تصویربرداری با TEM گفته می‌شود. این پدیده یکی از دلایل رایج کاهش کیفیت تصاویر، به‌ویژه در بزرگنمایی‌های بالا و تصویربرداری با تفکیک‌پذیری اتمی است. در بسیاری از موارد، کاربر دستگاه تصور می‌کند مشکل از فوکوس یا تنظیمات دستگاه است، در حالی که عامل اصلی، حرکت آرام نمونه در میدان دید است. رانش نمونه به‌صورت معمول در اثر انبساط و انقباض حرارتی نگهدارنده نمونه، تغییرات دمایی پس از ورود نمونه به ستون میکروسکوپ، ارتعاش‌های مکانیکی محیط، ناپایداری گونیومتر<sup>۲۴</sup> یا حتی شارژ الکتریکی سطح نمونه ایجاد می‌شود. در نمونه‌های بسیار نازک و سبک، شدت این اثر می‌تواند بیشتر باشد.

نشانه اصلی رانش نمونه، جابه‌جایی تدریجی تصویر روی صفحه نمایش است. در بزرگنمایی‌های پایین ممکن است این

نواحی دارای جزئیات ریز، الگوهای پراش یا قابلیت فوکوس خودکار دستگاه، تنظیم نهایی فوکوس را انجام می‌دهند. در عمل، خطای فوکوس نه تنها کیفیت بصری تصویر را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند به برداشت‌های نادرست درباره اندازه ذرات، فاصله بین صفحه‌ای<sup>۲۵</sup> و حتی نوع ساختار بلوری منجر شود. به همین دلیل، فوکوس صحیح در میکروسکوپ الکترونی عبوری صرفاً یک تنظیم نوری نیست، بلکه بخشی از فرآیند تولید داده‌های علمی قابل اعتماد به‌شمار می‌رود.

## • انتخاب نامناسب بزرگنمایی

یکی از خطاهای رایج، تصویربرداری تنها در بزرگنمایی‌های بسیار بالا یا بسیار پایین است. در بزرگنمایی‌های کم، اگرچه میدان دید وسیع‌تری در اختیار پژوهشگر قرار می‌گیرد، جزئیات مهمی مانند مورفولوژی سطح، نقص‌های ساختاری یا مرز دانه‌ها ممکن است به خوبی قابل مشاهده نباشند. در مقابل، استفاده از بزرگنمایی‌های بسیار بالا می‌تواند سبب شود تصویر تنها بخش کوچکی از نمونه را نشان دهد و در نتیجه، اطلاعات به‌دست‌آمده نمایانگر واقعی کل نمونه نباشند. این مسئله به‌ویژه در بررسی نانوذرات اهمیت دارد، زیرا قضاوت درباره اندازه و توزیع ذرات بر پایه تعداد محدودی از آن‌ها می‌تواند به نتایج آماری نادرست منجر شود. روش استاندارد آن است که تصویربرداری به‌صورت مرحله‌ای انجام گیرد؛ ابتدا در بزرگنمایی‌های پایین برای ارزیابی کلی نمونه و سپس در بزرگنمایی‌های بالاتر برای بررسی جزئیات ساختاری. انتخاب هوشمندانه بزرگنمایی، یکی از شرط‌های اصلی برای تفسیر صحیح داده‌های TEM است.

## • زمان تابش بیش از حد

اگرچه پرتو الکترونی ابزار اصلی تصویربرداری در میکروسکوپ الکترونی عبوری است، اما همین پرتو در صورت تابش طولانی‌مدت می‌تواند به نمونه آسیب برساند و ساختار واقعی آن را تغییر دهد. شدت این آسیب به نوع ماده بستگی دارد و در نمونه‌های پلیمری، زیستی و فلزی رفتارهای متفاوتی مشاهده می‌شود.

## ◀ نمونه‌های پلیمری

پلیمرها از حساس‌ترین مواد در برابر پرتو الکترونی هستند. تابش طولانی‌مدت می‌تواند سبب شکستن زنجیره‌های مولکولی، تخریب پیوندهای شیمیایی و کاهش جرم نمونه شود. در تصویرهای TEM این آسیب‌ها به‌طور معمول به‌صورت جمع‌شدگی ساختار، ایجاد حفره، تغییر شکل ذرات یا کاهش تدریجی کنتراست ظاهر می‌شوند. در برخی موارد، حتی ساختار اولیه پلیمر به‌طور کامل از بین می‌رود و تصویر ثبت شده دیگر نمایانگر واقعی نمونه نخواهد بود.



کشیدگی ساختارها در یک جهت مشخص، هاله‌های نامتقارن اطراف ذرات یا کاهش وضوح جزئیات ظاهر می‌شود. در تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا، این خطا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. حتی مقدار کمی آستیگماتیسم می‌تواند سبب محو شدن صفحات بلوری، کاهش وضوح آرایش اتمی و اختلال در اندازه‌گیری فاصله‌های بین‌صفحه‌ای شود. همچنین در تصویرهای پراش الکترونی، حلقه‌ها یا نقاط پراش ممکن است به شکل بیضوی یا کشیده دیده شوند؛ نشانه‌ای که به‌طور معمول وجود آستیگماتیسم را آشکار می‌کند.

به همین دلیل، اصلاح آستیگماتیسم یکی از مراحل ضروری پیش از تصویربرداری نهایی به‌شمار می‌رود. کاربر باید در بزرگنمایی مناسب و روی ناحیه‌ای دارای جزئیات کافی، تنظیم‌های استیگماتور را انجام دهد تا تصویر به بیشترین میزان وضوح و تقارن برسد. نادیده گرفتن این مرحله می‌تواند کیفیت داده‌ها را به‌طور جدی کاهش دهد و حتی به تفسیر نادرست ساختارهای نانومتری منجر شود. در بسیاری از موارد، تصویری که «خارج از فوکوس» به نظر می‌رسد، در واقع نتیجه آستیگماتیسم اصلاح‌نشده است، نه تنظیم نادرست فوکوس.

#### • هم‌راستاسازی نامناسب ستون الکترونی

در میکروسکوپ الکترونی عبوری، پرتو الکترونی باید به‌صورت دقیق در امتداد محور اپتیکی ستون حرکت کند تا بهترین کیفیت تصویر و بیشترین تفکیک‌پذیری حاصل شود. اگر اجزای اپتیکی دستگاه، از جمله تفنگ الکترونی، عدسی‌های کندانسور و عدسی‌های الکترومغناطیسی به درستی هم‌راستا نباشند، پرتو از مسیر ایده‌آل خود منحرف می‌شود. این وضعیت که به آن ناترازی<sup>۲۸</sup> گفته می‌شود، می‌تواند سبب کاهش روشنایی، افت کنتراست، ایجاد اعوجاج در تصویر و کاهش وضوح جزئیات شود. در تصویرهای حاصل از ستون نامنظم، توزیع شدت پرتو یکنواخت نیست و برخی نواحی تصویر روشن‌تر یا تیره‌تر از حد انتظار دیده می‌شوند. همچنین کیفیت الگوهای پراش و تحلیل‌های پیشرفته نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به همین دلیل، انجام تنظیم‌های هم‌راستاسازی پیش از تصویربرداری دقیق، یکی از مراحل ضروری در بهره‌برداری صحیح از TEM به‌شمار می‌رود.

#### • انتخاب اشتباه ولتاژ شتاب‌دهنده<sup>۲۹</sup>

ولتاژ شتاب‌دهنده یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی در میکروسکوپ الکترونی عبوری است که انرژی الکترون‌های تابیده‌شده به نمونه را تعیین می‌کند. انتخاب نامناسب این پارامتر می‌تواند سبب کاهش کیفیت تصویر، افت کنتراست یا حتی آسیب به نمونه شود. بسیاری از کاربران تصور می‌کنند که ولتاژ

حرکت محسوس نباشد، اما در بزرگنمایی‌های چند صد هزار تا چند میلیون برابر، حتی جابه‌جایی چند نانومتری نیز می‌تواند موجب تاری تصویر شود. در تصویربرداری HRTEM، رانش نمونه سبب محو شدن صفحات بلوری، کاهش وضوح اتمی و افت کیفیت داده‌ها می‌شود. همچنین هنگام ثبت تصویرها با زمان نوردی طولانی یا تهیه نقشه‌های عنصری<sup>۲۵</sup>، رانش می‌تواند موجب اعوجاج تصویر و خطا در مکان‌یابی عنصرها شود.

برای کاهش این مشکل، به‌طور معمول پس از قرار دادن نمونه در دستگاه، چند دقیقه تا چند ده دقیقه به دستگاه فرصت داده می‌شود تا به تعادل حرارتی برسد. استفاده از نگهدارنده‌های پایدار، کاهش ارتعاش‌های محیطی و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای اصلاح رانش نیز از راهکارهای رایج به‌شمار می‌روند. بسیاری از دستگاه‌های مدرن دارای سامانه‌های اصلاح رانش هستند که جابه‌جایی‌های جزئی را به‌صورت خودکار جبران می‌کنند. نادیده گرفتن رانش نمونه می‌تواند سبب شود تصویری که ظاهراً دارای وضوح پایین است، به اشتباه به کیفیت نمونه یا عملکرد دستگاه نسبت داده شود. در حالی که گاهی تنها چند دقیقه انتظار برای پایدار شدن نمونه می‌تواند تفاوت میان یک تصویر معمولی و یک تصویر با وضوح اتمی را رقم بزند.

#### • آستیگماتیسم<sup>۲۶</sup> اصلاح‌نشده

آستیگماتیسم در میکروسکوپ الکترونی عبوری به حالتی گفته می‌شود که در آن عدسی‌های الکترومغناطیسی نمی‌توانند پرتو الکترونی را به‌صورت یکنواخت در تمام جهت‌ها متمرکز کنند. در حالت ایده‌آل، پرتوهای الکترونی باید در یک نقطه واحد به فوکوس برسند، اما در حضور آستیگماتیسم، فوکوس در جهت‌های مختلف یکسان نیست. در نتیجه، تصویر به جای آنکه کاملاً واضح و متقارن باشد، در یک جهت کشیده یا تار به نظر می‌رسد. این پدیده می‌تواند در اثر نقص‌های جزئی در میدان مغناطیسی عدسی‌ها، آلودگی قطعات داخلی ستون میکروسکوپ، ناهمگنی‌های الکترومغناطیسی یا حتی تغییرات جزئی در شرایط کاری دستگاه ایجاد شود. آستیگماتیسم تقریباً در همه میکروسکوپ‌های الکترونی تا حدی وجود دارد، به همین دلیل دستگاه‌ها به سامانه‌ای به نام استیگماتور<sup>۲۷</sup> مجهز هستند تا این اعوجاج اصلاح شود.

زمانی که آستیگماتیسم به درستی اصلاح نشود، تصویر حتی در بهترین شرایط فوکوس نیز وضوح مطلوب نخواهد داشت. کاربر ممکن است بارها فوکوس را تنظیم کند، اما همچنان لبه‌ها تار به نظر برسند یا جزئیات ریز به خوبی قابل مشاهده نباشند. در تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری، آستیگماتیسم اصلاح‌نشده به‌طور معمول به‌صورت

## خطاهای مربوط به تحلیل و تفسیر

## • اشتباه گرفتن آرتیفکت‌ها با ساختار واقعی

آرتیفکت‌ها ویژگی‌هایی هستند که در اثر خطاهای فنی در فرآیند تصویربرداری ایجاد می‌شوند، اما در تصویر، ظاهری شبیه به ساختارهای واقعی ماده دارند. اگر پژوهشگر این پدیده‌ها را به‌درستی تشخیص ندهد، ممکن است به نتایج علمی نادرست برسد. آرتیفکت‌ها می‌توانند از منابع مختلفی ناشی شوند. آلودگی‌های کربنی ایجاد شده در اثر تابش طولانی پرتو الکترونی، بقایای حلال روی گرید، ترک‌های ناشی از آماده‌سازی، آسیب‌های مکانیکی، رانش نمونه و حتی تنظیم‌های نامناسب فوکوس یا آستیگماتیسم از جمله عوامل رایج ایجاد آرتیفکت هستند. به‌عنوان مثال، رسوبات کربنی گاهی به شکل نانوذرات یا پوشش‌های سطحی دیده می‌شوند و ممکن است با ساختار واقعی نمونه اشتباه گرفته شوند. در تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری با تفکیک‌پذیری بالا نیز شرایط تصویربرداری می‌تواند الگوهای ایجاد کند که شبیه صفحات بلوری یا نقص‌های شبکه‌ای به نظر برسند. به همین دلیل، تفسیر یک تصویر منفرد بدون استفاده از روش‌های تکمیلی مانند آنالیز عنصری می‌تواند گمراه‌کننده باشد. برای جلوگیری از این خطا، لازم است تصویرها از چند ناحیه مختلف نمونه ثبت شوند و نتایج با سایر روش‌های مشخصه‌یابی مقایسه شوند. در TEM، مشاهده یک ساختار در تصویر لزوماً به معنای وجود واقعی آن در نمونه نیست؛ گاهی دستگاه یا فرآیند آماده‌سازی چیزی را نشان می‌دهد که در ماده وجود ندارد. تشخیص این تفاوت یکی از مهم‌ترین مهارت‌های کاربر حرفه‌ای TEM به‌شمار می‌رود.

## • تحلیل براساس یک تصویر منفرد

از آنجا که میدان دید در میکروسکوپ الکترونی عبوری بسیار کوچک است، هر تصویر تنها بخش بسیار ناچیزی از کل نمونه را نشان می‌دهد. بنابراین، این احتمال وجود دارد که ناحیه انتخاب شده نمایانگر واقعی ساختار کلی نمونه نباشد. به‌عنوان مثال، ممکن است تصویری از ناحیه‌ای با تراکم بالای نانوذرات ثبت شود و پژوهشگر نتیجه بگیرد که کل نمونه دارای چنین توزیعی است. یا ممکن است یک ناحیه با بلورینگی بالا انتخاب شود، در حالی که بخش عمده نمونه، ساختاری متفاوت داشته باشد.

همچنین آرتیفکت‌ها، تجمع موضعی ذرات، تغییرهای ضخامت نمونه یا حتی آسیب‌های ناشی از پرتو الکترونی می‌توانند در یک ناحیه خاص دیده شوند و به اشتباه به کل نمونه تعمیم داده شوند. این خطا به‌ویژه در اندازه‌گیری توزیع

بالاتر همیشه بهتر است، اما در عمل انتخاب ولتاژ باید متناسب با نوع نمونه و هدف آزمایش انجام گیرد.

## ◀ ولتاژ ۸۰ کیلو الکترون‌ولت (۸۰ kV)

ولتاژ ۸۰ کیلو الکترون‌ولت به‌طور معمول برای نمونه‌های حساس به پرتو الکترونی استفاده می‌شود. مواد زیستی، پلیمرها، گرافن و بسیاری از مواد دوبعدی در ولتاژهای بالا ممکن است دچار تخریب ساختاری شوند. استفاده از ۸۰ کیلو الکترون‌ولت احتمال آسیب پرتویی و جابه‌جایی اتم‌ها را کاهش می‌دهد و برای مطالعاتی که حفظ ساختار نمونه اهمیت زیادی دارد، گزینه مناسبی است. البته قدرت نفوذ الکترون‌ها در این ولتاژ کمتر است، بنابراین نمونه باید به نسبت نازک باشد.

## ◀ ولتاژ ۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت (۲۰۰ kV)

ولتاژ ۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت (۲۰۰ kV) رایج‌ترین شرایط کاری در بسیاری از آزمایشگاه‌های TEM محسوب می‌شود و نوعی نقطه تعادل میان قدرت نفوذ، تفکیک‌پذیری و میزان آسیب پرتویی ایجاد می‌کند. بیشتر مطالعه‌های مربوط به نانوذرات، سرامیک‌ها، آلیاژها، مواد نیمه‌رسانا و تحلیل‌های متداول HRTEM در این ولتاژ انجام می‌شوند. در بسیاری از مراکز پژوهشی، دستگاه‌های TEM با ولتاژ ۲۰۰ کیلوولت به‌عنوان استاندارد اصلی تصویربرداری پیشرفته شناخته می‌شوند.

## ◀ ولتاژ ۳۰۰ کیلو الکترون‌ولت (۳۰۰ kV)

این ولتاژ برای نمونه‌های ضخیم‌تر و مطالعه‌هایی که به بیشترین قدرت نفوذ و بالاترین تفکیک‌پذیری نیاز دارند به‌کار می‌رود. تصویربرداری اتمی، توموگرافی الکترونی<sup>۲۰</sup>، بررسی‌های پیشرفته در مواد فلزی و برخی آزمایش‌های کرایو میکروسکوپ الکترونی عبوری در این محدوده ولتاژی انجام می‌شوند. افزایش انرژی الکترون‌ها امکان عبور از نمونه‌های ضخیم‌تر را فراهم می‌کند، اما در مقابل می‌تواند احتمال ایجاد آسیب پرتویی را در برخی مواد افزایش دهد.

بنابراین، انتخاب ولتاژ شتاب‌دهنده باید براساس ماهیت نمونه انجام شود. برای مواد حساس و سبک، ۸۰ کیلوولت اغلب مناسب‌تر است؛ برای بیشتر کاربردهای عمومی و پژوهش‌های فناوری‌نانو، ۲۰۰ کیلوولت بهترین توازن را فراهم می‌کند؛ و برای مطالعه‌های پیشرفته با نیاز به نفوذ و تفکیک‌پذیری حداکثری، ۳۰۰ کیلوولت گزینه مناسب‌تری است. انتخاب نادرست ولتاژ می‌تواند باعث شود بخشی از اطلاعات ساختاری از دست برود یا خود نمونه پیش از پایان تصویربرداری آسیب ببیند؛ تناقضی که میکروسکوپ الکترونی عبوری را به حوزه‌ای میان فیزیک و مهندسی تبدیل می‌کند.

کیفیت پایین تصویر، بلکه از اعتماد به عددهایی ناشی می‌شوند که به درستی کالیبره نشده‌اند.

### خطاهای دیگر

علاوه بر خطاهای رایجی که در آماده‌سازی نمونه، تصویربرداری و تحلیل داده‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری رخ می‌دهند، مجموعه‌ای از خطاهای پیشرفته‌تر نیز وجود دارد که به‌طور معمول در پروژه‌های پژوهشی سطح بالا مشاهده می‌شوند. این خطاها اگرچه کمتر مورد توجه کاربران مبتدی قرار می‌گیرند، اما می‌توانند تأثیر مستقیمی بر اعتبار نتایج علمی داشته باشند و حتی به انتشار نتایج نادرست در مقاله‌های پژوهشی منجر شوند. آلودگی ناشی از هیدروکربن‌های داخل محفظه نیز از مشکلات شناخته شده میکروسکوپ الکترونی عبوری محسوب می‌شود. مولکول‌های آلی باقی‌مانده در ستون یا روی نمونه، در اثر تابش پرتو الکترونی تجزیه شده و رسوبات کربنی ایجاد می‌کنند. این رسوبات به تدریج روی سطح نمونه انباشته می‌شوند و می‌توانند با نوساختارهای واقعی اشتباه گرفته شوند.

در حوزه تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا، تفسیر اشتباه تصاویر HRTEM یکی از چالش‌های جدی است. این تصویرها به‌طور مستقیم تصویر اتم‌ها نیستند، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده پرتو الکترونی با نمونه و شرایط اپتیکی دستگاه هستند. به همین دلیل، تفسیر صحیح آن‌ها نیازمند دانش کافی در زمینه تابع انتقال کنتراست، شرایط فوکوس و شبیه‌سازی تصاویرها است.

از سوی دیگر، خطا در اندازه‌گیری فاصله بین‌صفحه‌ای می‌تواند به شناسایی اشتباه فازهای بلوری منجر شود. این خطا به‌طور معمول در اثر کالیبراسیون نامناسب، کیفیت پایین تصویر یا انتخاب نادرست صفحات بلوری رخ می‌دهد.

در آنالیز عنصری نیز مشکلات متعددی وجود دارد. هم‌پوشانی پیک‌ها در طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس یکی از مهم‌ترین آن‌هاست. برخی عناصر دارای خطوط مشخصه نزدیک به یکدیگر هستند و در صورت تفسیر نادرست طیف، امکان شناسایی اشتباه عناصر وجود دارد. همچنین انتخاب نادرست ناحیه برای آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی می‌تواند باعث شود داده‌های به‌دست‌آمده نمایانگر واقعی کل نمونه نباشند.

در مطالعه‌های ریزساختاری نیز اشتباه در تشخیص مرزدهانه‌ها از خطاهای رایج است. تغییرهای کنتراست، خمیدگی شبکه بلوری یا آرتیفکت‌های تصویربرداری گاهی به‌عنوان مرزدهانه واقعی تفسیر می‌شوند. این موضوع می‌تواند در تحلیل خواص مکانیکی و رفتار مواد تأثیر قابل توجهی داشته باشد. در نهایت، نتیجه‌گیری آماری از تعداد کم ذرات یکی از

اندازه نانوذرات بسیار رایج است. در بسیاری از مقاله‌های معتبر، اندازه‌گیری صدها ذره از چندین ناحیه مختلف توصیه می‌شود تا نتایج از اعتبار آماری کافی برخوردار باشند. به همین ترتیب، برای تأیید وجود یک فاز بلوری یا نقص ساختاری، باید تصویرها و الگوهای پراش از نقاط مختلف نمونه بررسی شوند. روش صحیح آن است که تصویرها در بزرگنمایی‌های مختلف و از چندین ناحیه مستقل ثبت شوند و سپس نتایج با داده‌های تکمیلی مانند پراش الکترونی ناحیه انتخابی<sup>۳۱</sup>، طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس یا سایر روش‌های مشخصه‌یابی مقایسه شوند. در میکروسکوپ الکترونی عبوری، یک تصویر می‌تواند بسیار زیبا و چشمگیر باشد، اما از نظر علمی لزوماً نماینده کل نمونه نیست. پژوهش خوب بر پایه تکرارپذیری و شواهد متعدد استوار است، نه براساس جذاب‌ترین تصویری که روی نمایشگر ظاهر می‌شود.

### • اندازه‌گیری بدون کالیبراسیون

در میکروسکوپ الکترونی عبوری، بسیاری از اطلاعات کمی از جمله اندازه نانوذرات، ضخامت لایه‌ها، فاصله بین صفحات بلوری<sup>۳۲</sup> و ابعاد عیوب ساختاری، از روی تصاویر به‌دست می‌آیند. اگر مقیاس تصویر به درستی کالیبره نشده باشد، همه این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند دچار خطا شوند. کالیبراسیون به معنای تطبیق بزرگنمایی نمایش داده شده توسط دستگاه با ابعاد واقعی نمونه است. اگر این تطبیق به درستی انجام نشود، ممکن است ذره‌ای که در واقع ۲۰ نانومتر قطر دارد، ۱۸ یا ۲۲ نانومتر اندازه‌گیری شود. چنین اختلافی شاید کوچک به نظر برسد، اما در پژوهش‌ها می‌تواند به نتیجه‌گیری‌های نادرست درباره خواص ماده منجر شود. این مشکل گاهی پس از تعمیر دستگاه، تغییر دوربین، به‌روزرسانی نرم‌افزار یا استفاده از تصویرهای ذخیره شده در بزرگنمایی‌های مختلف رخ می‌دهد. همچنین برخی کاربران بدون بررسی نوار مقیاس<sup>۳۳</sup> یا بدون استفاده از نمونه‌های استاندارد کالیبراسیون، به‌صورت مستقیم اقدام به اندازه‌گیری می‌کنند.

در تصاویر HRTEM اهمیت این موضوع دوچندان است. به‌عنوان مثال، تشخیص فازهای بلوری بیشتر براساس اندازه‌گیری فاصله بین صفحات شبکه‌ای انجام می‌شود. اگر کالیبراسیون نادرست باشد، فاصله اندازه‌گیری شده با مقادیر مرجع تطابق نخواهد داشت و ممکن است فاز ماده به اشتباه شناسایی شود. برای جلوگیری از این خطا، لازم است کالیبراسیون دستگاه به‌صورت دوره‌ای با استفاده از نمونه‌های استاندارد انجام و صحت نوار مقیاس پیش از هر تحلیل بررسی شود. در TEM، حتی اگر تصویر کاملاً واضح و با کیفیت باشد، بدون کالیبراسیون معتبر نمی‌توان به اندازه‌گیری‌های حاصل از آن اعتماد کامل داشت. بسیاری از خطاهای پژوهشی نه از



مستقل باشند. در واقع، اگر این مقاله به خطاهای عمومی میکروسکوپ الکترونی عبوری اختصاص داشته باشد، مجموعه خطاهای پیشرفته‌ای مانند آسیب پرتویی، تفسیر تصویرهای HRTEM، مشکلات EDS و تحلیل‌های آماری می‌تواند پایه نگارش مقاله‌ای دیگر قرار گیرد؛ موضوعی که برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی، کارشناسان آزمایشگاهی و پژوهشگران حرفه‌ای ارزش آموزشی فراوانی خواهد داشت.

رایج‌ترین مشکلات در پژوهش‌های نانومواد است. گاهی پژوهشگر تنها با اندازه‌گیری چند ده ذره درباره کل نمونه نتیجه‌گیری می‌کند، در حالی که برای دستیابی به نتایج آماری معتبر، به‌طور معمول باید تعداد بسیار بیشتری از ذرات و نواحی مختلف نمونه بررسی شوند.

هر یک از این موارد به تنهایی دارای جزئیات فنی گسترده‌ای هستند و می‌توانند موضوع یک مقاله آموزشی

## نتیجه‌گیری

میکروسکوپ الکترونی عبوری یکی از قدرتمندترین ابزارهای شناخته شده در علم مواد و فناوری نانو است که امکان مشاهده ساختار مواد در مقیاس اتمی را فراهم می‌کند. با این حال، همان‌طور که در بررسی خطاهای مختلف مشاهده شد، کیفیت و اعتبار داده‌های به‌دست‌آمده از TEM تنها به توانایی دستگاه وابسته نیست، بلکه به مجموعه‌ای پیچیده از عوامل مرتبط با آماده‌سازی نمونه، شرایط تصویربرداری و چگونگی تفسیر داده‌ها بستگی دارد. هر یک از خطاهای مطرح شده می‌توانند به تنهایی موجب تغییر اساسی در نتایج پژوهش شوند و در صورت بی‌توجهی، مسیر تفسیر علمی را به‌طور کامل منحرف کنند.

در مرحله آماده‌سازی نمونه، عواملی مانند ضخامت نامناسب، نازک‌سازی بیش از حد، آلودگی سطح، انتخاب نادرست گرید، توزیع غیریکنواخت نانوذرات، خشک کردن غیراستاندارد و آسیب‌های مکانیکی همگی می‌توانند ساختار واقعی نمونه را دچار تغییر کنند یا آرتیفکتهایی ایجاد کنند که به اشتباه به‌عنوان ویژگی‌های واقعی ماده تفسیر شوند. این خطاها نشان می‌دهند که آماده‌سازی نمونه نه یک مرحله ساده، بلکه بخشی حیاتی از فرآیند پژوهش بوده که دقت در آن به‌طور مستقیم بر کیفیت خروجی تأثیر گذار است.

در مرحله تصویربرداری، تنظیم نادرست عواملی مانند فوکوس، آستیگماتیسم، هم‌راستاسازی ستون الکترونی، انتخاب بزرگنمایی و ولتاژ شتاب‌دهنده نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت تصویر دارند. حتی کوچک‌ترین خطا در این تنظیم‌ها می‌تواند سبب کاهش وضوح، ایجاد اعوجاج یا از دست رفتن اطلاعات ساختاری شود. علاوه بر این، پدیده‌هایی مانند رانش نمونه و آسیب پرتویی الکترونی نیز می‌توانند در حین تصویربرداری، ساختار واقعی نمونه را تغییر دهند و داده‌های ثبت شده را غیرقابل اعتماد کنند.

در بخش تحلیل داده، خطر اصلی در تفسیر نادرست اطلاعات نهفته است. اشتباه گرفتن آرتیفکتهای ساختار واقعی، تحلیل بر پایه یک تصویر منفرد، اندازه‌گیری بدون کالیبراسیون و نتیجه‌گیری آماری از تعداد محدود ذرات، همگی از خطاهایی هستند که می‌توانند به نتایج گمراه‌کننده منجر شوند. این موارد نشان می‌دهند که میکروسکوپ الکترونی عبوری صرفاً یک ابزار تصویربرداری نیست، بلکه یک سامانه پیچیده تحلیلی است که نیازمند درک عمیق از فیزیک پرتو الکترونی و محدودیت‌های روش است.

در تحلیل‌های پیشرفته‌تر، خطاهایی مانند آلودگی ناشی از هیدروکربن‌ها، تفسیر نادرست تصویرهای HRTEM، خطا در اندازه‌گیری فاصله بین صفحات بلوری، هم‌پوشانی پیک‌ها در EDS، اشتباه در تشخیص مرزدهانه‌ها و انتخاب نادرست ناحیه برای EDS نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. این خطاها نشان می‌دهند که حتی در سطح پیشرفته پژوهش نیز عدم دقت در جزئیات می‌تواند به خطاهای سیستماتیک منجر شود.

در مجموع، بررسی این خطاها نشان می‌دهد که کار با میکروسکوپ الکترونی عبوری نیازمند ترکیبی از مهارت عملی، دانش نظری و نگاه انتقادی به داده‌ها است. هیچ تصویری به تنهایی نباید مبنای نتیجه‌گیری قطعی قرار گیرد و هیچ عددی بدون بررسی شرایط تولید آن قابل اعتماد کامل نیست. در واقع، کیفیت نتایج TEM نه تنها به توان دستگاه، بلکه به دقت کاربر در تمام مراحل آزمایش وابسته است. درنهایت می‌توان گفت TEM ابزاری است که به همان اندازه که دقیق است، در صورت استفاده نادرست می‌تواند گمراه‌کننده باشد و همین ویژگی آن را به یکی از حساس‌ترین و در عین حال ارزشمندترین روش‌های مطالعه مواد در علم امروز تبدیل کرده است.

1. Transmission Electron Microscope (TEM)
2. Artifact
3. Astigmatism
4. Elemental Analysis
5. Detector
6. Multiple Electron Scattering
7. High Resolution
8. Electron Diffraction Patterns
9. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
10. Mechanical Polishing
11. Ion Polishing
12. Focused Ion Beam (FIB)
13. Carbon Film Grids
14. Holey Grids
15. Lacey Grids
16. Cavitation
17. Coffee Ring Effect
18. Holder
19. Objective Lens
20. Contrast Transfer Function (CTF)
21. High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)
22. Interplanar Spacing
23. Sample Drift
24. Goniometer
25. Elemental Mapping
26. Astigmatism
27. Stigmator
28. Misalignment
29. Accelerating Voltage
30. Electron Tomography
31. Selected Area Electron Diffraction (SAED)
32. d-spacing
33. Scale Bar



**نویسنده**

**فاطمه مهدی پور<sup>۱\*</sup>**

۱. مدیر فنی آزمایشگاه ژنتیک، آزمایشگاه صامت  
تک آزما، منطقه آزاد انزلی، ایران

**\*fateme.mehdipour1993@gmail.com**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۶  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰

**واژه‌های کلیدی**

تشخیص گونه، PCR، پرایمر اختصاصی،  
اصالت مواد غذایی، تقلبات گوشتی.

## استفاده صحیح از PCR برای تشخیص تقلبات گوشت دام

چکیده

تشخیص صحیح گونه در فرآورده‌های دامی، از جنبه‌های مهم ایمنی غذایی، کنترل کیفیت و رعایت موازین شرعی به شمار می‌رود. با افزایش تقلبات گونه‌ای، اختلاط عمدی یا سهوی گوشت‌های غیرمجاز و نیز چالش‌های نظارتی در زنجیره تأمین مواد غذایی، استفاده از روش‌های تشخیص مولکولی، به‌ویژه واکنش زنجیره‌ای پلیمرز<sup>۱</sup>، در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت<sup>۲</sup> اهمیت ویژه‌ای یافته است. با این وجود، گزارش‌های متعددی حاکی از آن است که برخی کیت‌های تجاری رایج در تشخیص تمایز بین گوشت الاغ و اسب، با پدیده واکنش پذیری متقاطع<sup>۳</sup> مواجه هستند. این کیت‌ها گاهی اوقات DNA اسب را به اشتباه به‌عنوان DNA الاغ شناسایی می‌کنند. این خطا علاوه بر پیامدهای اقتصادی، حقوقی و بهداشتی، می‌تواند منجر به نقض قابل توجه موازین شرعی شود. علاوه بر این، در این گزارش، یک جفت پرایمر<sup>۴</sup> اختصاصی معرفی شده است که براساس تفاوت‌های گونه‌ای<sup>۵</sup> در ژن سیتوکروم b<sup>۶</sup> طراحی شده است. این پرایمرها قادرند با دقت بالا، صرفاً DNA الاغ را تکثیر نمایند و در سایر گونه‌ها هیچ‌گونه واکنشی نشان نمی‌دهند. این ویژگی، کیت‌های مبتنی بر این پرایمر را به ابزاری قابل اعتماد برای تمایز دقیق گونه‌ها تبدیل می‌کند.

ارزیابی این پرایمر نشان داد که اختصاصیت<sup>۷</sup> و تمایز پذیری<sup>۸</sup> آن نسبت به کیت‌های موجود به‌طور چشمگیری بالاتر است و می‌تواند به‌عنوان یک آزمون دآوری<sup>۹</sup> قابل اتکا در موارد مشکوک مورد استفاده قرار گیرد. به‌کارگیری این پرایمر به ارتقای دقت نتایج، پیشگیری از تقلبات غذایی<sup>۱۰</sup>، افزایش اعتماد مصرف‌کننده، رعایت الزامات شرعی و ارتقای شفافیت در برچسب‌گذاری محصولات دامی کمک می‌کند. همچنین، این ابزار بومی ظرفیت بالقوه‌ای برای به‌کارگیری در استانداردهای ملی، آموزش‌های آزمایشگاهی و نظام نظارتی کشور دارد.



## مقدمه

تشخیص گونه در فرآورده‌های دامی، یکی از موضوعات بنیادین در نظام کنترل کیفیت، تضمین سلامت غذایی و رعایت الزامات دینی و قانونی به شمار می‌رود. در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، اصالت‌سنجی گونه به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی امنیت غذایی مطرح است [۱]. اختلاط عمدی یا سهوی گوشت‌های ارزان‌تر با گونه‌های با ارزش‌تر، از رایج‌ترین انواع تقلبات غذایی محسوب می‌شود که آثار اقتصادی، اجتماعی و اخلاقی قابل توجهی به همراه دارد [۲ و ۳]. افزون بر پیامدهای اقتصادی، بُعد شرعی این مسئله در کشورهای اسلامی اهمیت دوچندانی دارد؛ زیرا مصرف برخی گونه‌ها مانند الاغ اهلی، مطابق احکام شرعی حرام است و وجود آن در فرآورده‌های گوشتی می‌تواند پیامدهای اجتماعی و حقوقی سنگینی ایجاد کند [۴]. روش‌های سنتی تشخیص گونه، شامل رویکردهای فیزیکی، شیمیایی و پروتئینی، در مواجهه با نمونه‌های فرآوری شده یا حرارت دیده، با محدودیت‌هایی در دقت مواجه هستند. در مقابل، روش‌های مولکولی مبتنی بر DNA<sup>۱</sup>، به دلیل پایداری ژنتیکی و حساسیت بالا، در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزین استاندارد روش‌های کلاسیک مطرح شده‌اند [۵ و ۶]. با این وجود، انتخاب ناحیه ژنی مناسب و طراحی پرایمر کاملاً اختصاصی، شرط اساسی موفقیت روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز در تشخیص گونه محسوب می‌شود [۷].

براساس گزارش‌های میدانی و مطالعات مجزا، برخی کیت‌های تجاری رایج برای تشخیص گونه، به‌طور عمده به دلیل طراحی مبتنی بر نواحی محافظت شده ژنومی، در تمایز میان گوشت الاغ و اسب با پدیده واکنش‌پذیری متقاطع مواجه هستند [۸]. این مسئله می‌تواند منجر به گزارش‌های نادرست و در نتیجه، اتخاذ تصمیم‌های نادرست در زنجیره تأمین مواد غذایی شود. در چنین شرایطی، وجود یک جفت پرایمر اختصاصی و قابل اعتماد که قادر به تشخیص دقیق ژنوم الاغ باشد، ضرورتی انکارناپذیر برای تضمین صحت نتایج و جلوگیری از تقلب است.

در این مقاله، یک پرایمر اختصاصی گونه<sup>۱۲</sup> مبتنی بر ژن سیتوکروم b معرفی می‌شود که به‌طور ویژه برای تشخیص دقیق الاغ طراحی شده‌است و می‌تواند در کنار کیت‌های تجاری، نقش یک آزمون داوری را ایفا کند.

## ■ اهمیت اقتصادی-شرعی و نظارتی تشخیص صحیح گونه

### ■ اهمیت شرعی

از منظر فقه اسلامی، گوشت الاغ اهلی حرام بوده و مصرف آن ممنوعیت قطعی دارد [۹]. از این رو، هرگونه اختلاط یا جانشینی آن با گوشت‌های مجاز، برچسب‌گذاری غیرواقعی<sup>۱۳</sup> یا عرضه محصول با منشأ نامشخص، می‌تواند نقض آشکار حقوق مصرف‌کننده و احکام شرعی باشد. این موضوع در مراکز عرضه مواد غذایی، فروشگاه‌ها، واحدهای بسته‌بندی و سردخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تشخیص صحیح گونه، شرط اساسی برای رعایت نظام حلال و پیشگیری از ایجاد شبهه در محصولات پروتئینی به شمار می‌رود.

### ■ اهمیت اقتصادی

تقلب گونه‌ای یکی از سودآورترین انواع تقلب در زنجیره غذایی جهان به شمار می‌رود [۱۰ و ۱۱]. جایگزینی گوشت‌های با ارزش با گوشت‌های ارزان‌تر (به‌عنوان مثال، گوشت الاغ) زیان مالی برای مصرف‌کننده، ایجاد رقابت ناعادلانه برای تولیدکنندگان سالم، کاهش اعتماد عمومی، اختلال در بازار پروتئین و تحمیل هزینه‌های نظارتی را به دنبال دارد. براساس

گزارش‌های بین‌المللی، سود حاصل از تقلب گونه‌ای در برخی کشورها تا ۴۰ درصد ارزش کل فروش برآورد شده‌است.

### ■ اهمیت سلامت و ایمنی غذایی

گوشت الاغ به‌صورت معمول فاقد نظارت رسمی دامپزشکی بوده و ممکن است دارای بار میکروبی بالاتر و بقایای دارویی باشد و در بسیاری از موارد از دام‌های غیرثبت شده تهیه شود؛ از این رو، اختلاط آن با گوشت‌های مجاز تهدیدی مستقیم برای سلامت عمومی محسوب می‌شود [۱۲]. در نتیجه، شناسایی دقیق گونه در فرآورده‌های گوشتی، نه تنها برای پیشگیری از تقلب غذایی، بلکه برای کاهش مخاطرات بهداشتی و تضمین ایمنی مصرف‌کننده ضروری است. به‌کارگیری روش‌های مولکولی دقیق می‌تواند امکان ردیابی منشأ گوشت، پایش مؤثرتر زنجیره تأمین و ارتقای نظام کنترل سلامت غذایی را فراهم سازد.

### ■ اهمیت حقوقی و نظارتی

براساس قوانین سازمان ملی استاندارد ایران، سازمان دامپزشکی و سازمان غذا و دارو، درج اطلاعات نادرست یا همراه‌کننده در مورد منشأ محصولات غذایی، تخلفی قابل

که در تمامی نمونه‌های الاغ، یک باند واضح و اختصاصی مشاهده شد. در مقابل، در گونه‌های غیرالاغ هیچ باندی به‌دست نیامد. همچنین در نمونه‌های مشکوک که کیت تجاری نتیجه‌ای مبهم ارائه کرده بود، پرایمر اختصاصی توانست نتیجه صحیح را مشخص کند. افزون بر این، پایداری عملکرد پرایمر حتی در نمونه‌های حرارت دیده و فرآوری شده نیز حفظ شد.

### ارزیابی اختصاصیت و واکنش‌پذیری متقاطع پرایمر ۹۵ جفت بازی ویژه الاغ

به‌منظور بررسی اختصاصیت پرایمر طراحی شده برای تکثیر قطعه ۹۵ جفت‌بازی مربوط به DNA الاغ، آزمون واکنش‌پذیری متقاطع با استفاده از DNA چندین گونه جانوری انجام شد. واکنش PCR در حضور DNA استخراج شده از گونه‌های گوسفند، گاو، مرغ، خوک، بز، اسب، سگ، گربه، بوفالو، بوقلمون و ماهی، در غلظت ۲۰ تا ۵۰ نانوگرم، انجام گرفت. نتایج نشان داد که پرایمر اختصاصی مورد استفاده قادر به تکثیر DNA هیچ‌یک از گونه‌های غیرهدف نبود و در این نمونه‌ها هیچ باندی مشاهده نشد (شکل (۱)). در مقابل، تنها DNA الاغ یک باند مشخص و واضح در اندازه ۹۵ جفت‌باز ایجاد کرد. این یافته‌ها بیانگر اختصاصیت بالا و عدم واکنش‌پذیری متقاطع پرایمر بوده و تأیید می‌کند که پرایمر طراحی شده توانایی شناسایی انتخابی DNA الاغ را در حضور DNA گونه‌های متعدد دارد.



شکل (۱): ارزیابی احتمال واکنش‌پذیری متقاطع پرایمر اختصاصی ۹۵ جفت بازی الاغ.

واکنش PCR در حضور DNA گونه‌های گوسفند، گاو، مرغ، خوک، بز، اسب، سگ، گربه، بوفالو، بوقلمون و ماهی، در غلظت ۲۰ تا ۵۰ نانوگرم انجام شد. هیچ‌گونه باندی در گونه‌های غیرالاغ مشاهده نشد و تنها نمونه الاغ باند اختصاصی ۹۵ جفت‌باز را ایجاد کرد. به‌منظور تعیین حساسیت روش شناسایی اختصاصی DNA الاغ، واکنش زنجیره‌ای پلیمرز در حضور غلظت‌های مختلف DNA الگو (شامل ۶۷، ۶۷/۶، ۳/۳۵ و ۱/۳۴ نانوگرم بر میکرولیتر)

پیگرد قانونی محسوب می‌شود [۱۳]. بنابراین، وجود روشی دقیق برای تشخیص گونه، به‌عنوان ابزاری ضروری برای داوری اختلافات، برخورد با متخلفان و حصول اطمینان از شفافیت زنجیره تأمین مواد غذایی، اهمیت بالایی دارد.

### چالش‌های علمی در تشخیص مولکولی الاغ و اسب

تشخیص مولکولی گونه‌های نزدیک، به‌ویژه اعضای خانواده اسب‌سانان<sup>۱۴</sup>، به دلیل شباهت ژنتیکی بالا در توالی‌های میتوکندریایی<sup>۱۵</sup>، با دشواری همراه است. مطالعات نشان می‌دهند که میزان همسانی توالی در برخی نواحی DNA الاغ و اسب به بیش از ۹۷ درصد می‌رسد [۱۴]. در نتیجه، پرایمرهای عمومی یا کیت‌های تجاری که بر نواحی محافظت شده متکی هستند، ممکن است در هر دو گونه، آمپلیکون‌های PCR مشابهی ایجاد کنند [۱۵]. این امر می‌تواند به بروز نتایج مثبت کاذب، تفسیر نادرست، اختلاف در داوری نمونه‌ها و درنهایت، کاهش اعتبار نتایج آزمایشگاهی منجر شود.

### پرایمر اختصاصی الاغ: مبانی طراحی و ویژگی‌ها

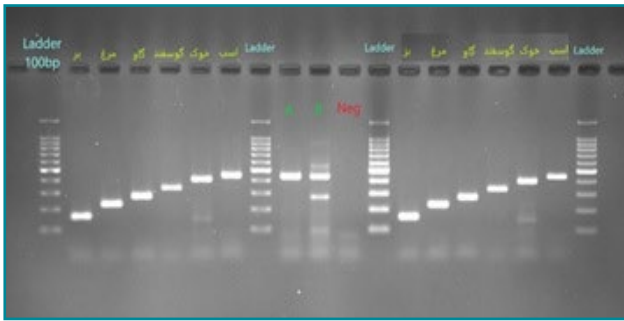
پرایمر اختصاصی معرفی شده، براساس تفاوت‌های نقطه‌ای پایدار در ژن Cyt b طراحی شده‌است؛ ژنی که به دلیل نرخ جهش مناسب و تنوع گونه‌ای بالا، یکی از بهترین اهداف برای طراحی پرایمر به شمار می‌رود [۱۶].

#### ویژگی‌های پرایمر اختصاصی

- ✓ **اختصاصی بودن:** این پرایمر فقط در حضور DNA الاغ، محصول PCR تولید می‌کند و هیچ واکنشی در حضور DNA اسب، گاو، گوسفند، بز و طیور نشان نمی‌دهد؛
- ✓ **کارایی بالا:** حتی در نمونه‌هایی که در معرض حرارت قرار گرفته‌اند (به‌عنوان مثال، در فرآورده‌های حرارتی مواد غذایی)، کارایی خود را حفظ می‌کند؛
- ✓ **کاربرد در کنترل کیفیت:** قابلیت به‌کارگیری در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت مواد غذایی را دارد؛
- ✓ **آزمون داوری:** می‌تواند به‌عنوان یک آزمون داوری برای حل اختلافات بین نتایج حاصل از روش‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

### یافته‌های آزمایشگاهی

ارزیابی پرایمر اختصاصی الاغ در نمونه‌های مختلف نشان داد



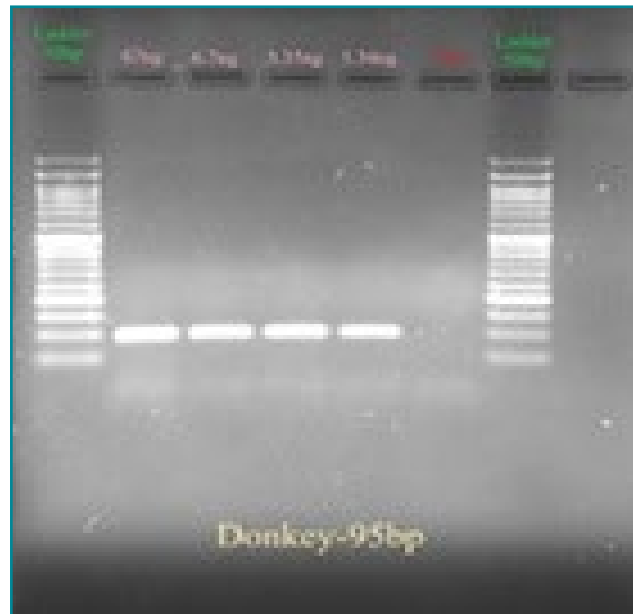
شکل (۳): ارزیابی عملکرد کیت تجاری.

در شکل (۳)، کنترل‌های مثبت مربوط به گونه‌های مختلف در دو سوی ژل و نمونه‌های مجهول (A) و (B) در ناحیه مرکزی قرار داده شدند. نتایج نشان داد که هر دو نمونه مجهول باندی با اندازه ۴۳۹ جفت‌باز، مشابه الگوی اختصاصی گونه اسب، ایجاد کردند. با این حال، بررسی مستقل DNA نشان داد که این نمونه‌ها متعلق به گونه الاغ هستند. این یافته حاکی از آن است که به دلیل عدم وجود پرایمر اختصاصی برای گونه الاغ در طراحی کیت، DNA این گونه در آزمون حاضر به اشتباه به‌عنوان گونه اسب شناسایی می‌شود.

## بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که به‌کارگیری پرایمر اختصاصی برای الاغ می‌تواند بسیاری از چالش‌های رایج در تشخیص گونه را برطرف سازد. بررسی منابع بین‌المللی نیز حاکی از آن است که وجود پرایمر اختصاصی، به‌ویژه برای گونه‌هایی با شباهت ژنتیکی بالا، یکی از الزامات اصلی برای دستیابی به تشخیص دقیق و قابل اعتماد محسوب می‌شود [۱۷ تا ۲۰]. در غیاب چنین پرایمرهایی، احتمال بروز هم‌پوشانی در الگوی باندها و در نتیجه، شناسایی نادرست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، افزودن نشانگرهای اختصاصی برای گونه‌های نزدیک خویشاوند، از جمله الاغ، می‌تواند دقت، حساسیت و اعتبار کاربردی کیت‌های تشخیصی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. علاوه‌بر این، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که نمونه‌های متعلق به الاغ در آزمون مورد استفاده، به دلیل شباهت ناحیه هدف با گونه اسب، به‌صورت نادرست به‌عنوان اسب تفسیر می‌شوند. این موضوع بیانگر آن است که طراحی کیت‌های تشخیصی صرفاً بر پایه تمایز میان گونه‌های دورتر، برای کاربرد در نمونه‌های واقعی و پیچیده کافی نیست و باید تنوع ژنتیکی گونه‌های نزدیک خویشاوند نیز در طراحی پرایمرها مدنظر قرار گیرد. در واقع، نبود یک نشانگر اختصاصی برای الاغ نه تنها موجب کاهش اختصاصیت آزمون می‌شود، بلکه می‌تواند به گزارش نتایج ناصحیح و درنهایت، تفسیر اشتباه منشأ گونه‌ای نمونه‌ها منجر شود.

در هر واکنش انجام شد. نتایج حاصل که در شکل (۲) نشان داده شده‌است، نشان‌دهنده مشاهده باند اختصاصی ۹۵ جفت‌بازی در تمامی غلظت‌های مورد استفاده بود. بر این اساس، حد تشخیص<sup>۱۶</sup> این روش، ۱/۳۴ نانوگرم DNA در هر واکنش تعیین شد. این یافته حاکی از حساسیت بالای روش طراحی شده برای شناسایی مقادیر کم DNA الاغ است. به‌منظور تعیین حساسیت روش، واکنش PCR با استفاده از غلظت‌های مختلف DNA شامل ۶۷، ۶/۷، ۳/۳۵ و ۱/۳۴ نانوگرم بر میکرولیتر در هر واکنش انجام شد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، باند اختصاصی ۹۵ جفت‌بازی در تمامی غلظت‌های DNA قابل مشاهده بود. بر این اساس، حد تشخیص روش برابر با ۱/۳۴ نانوگرم DNA در واکنش تعیین شد.



شکل (۲): ارزیابی حساسیت و حد تشخیص روش PCR با استفاده از پرایمر اختصاصی ۹۵ جفت‌بازی الاغ.

به‌منظور ارزیابی عملکرد کیت تجاری، کنترل‌های مثبت مربوط به گونه‌های مختلف شامل بز (۱۵۷ جفت‌باز)، مرغ (۲۲۷ جفت‌باز)، گاو (۲۷۴ جفت‌باز)، گوسفند (۳۲۹ جفت‌باز)، خوک (۳۹۸ جفت‌باز) و اسب (۴۳۹ جفت‌باز) در دو سوی ژل بارگذاری شدند و نمونه‌های مجهول (A) و (B) در ناحیه میانی ژل قرار گرفتند. مطابق الگوی تفسیری کیت، حضور باند ۴۳۹ جفت‌بازی به‌عنوان شاخص اختصاصی گونه اسب تلقی می‌شود. در این مطالعه، هر دو نمونه (A) و (B) نیز باندی با همین اندازه ایجاد کردند؛ با این حال، بررسی مستقل نوع DNA نشان داد که این نمونه‌ها متعلق به الاغ هستند. این یافته نشان می‌دهد که به‌دلیل عدم طراحی پرایمر اختصاصی برای الاغ در این کیت و نیز شباهت ناحیه هدف با گونه اسب، DNA الاغ در این آزمون به‌صورت گونه اسب شناسایی و گزارش می‌شود.



یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های پیشین نیز همسو است که تأکید کرده‌اند موفقیت آزمون‌های مولکولی در شناسایی گونه‌ها وابسته به انتخاب نواحی ژنی مناسب، طراحی اختصاصی پرایمرها و اعتبارسنجی دقیق آن‌ها بر روی مجموعه‌ای از گونه‌های هدف و غیرهدف است. بنابراین، توسعه و بهینه‌سازی کیت حاضر با افزودن پرایمر اختصاصی الاغ

می‌تواند گام مؤثری در ارتقای عملکرد آن باشد و دامنه کاربرد آن را در شناسایی دقیق‌تر نمونه‌های دارای منشأ نامشخص افزایش دهد. چنین بهبودی به ویژه در مطالعات کنترل کیفیت، اصالت‌سنجی مواد زیستی و تشخیص نمونه‌های حاصل از گونه‌های اهلی که از نظر توالی‌های هدف شباهت بالایی دارند، اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت.

نتایج این مطالعه نشان داد که به‌کارگیری پرایمر اختصاصی برای الاغ، چالش‌های رایج در تشخیص گونه را برطرف کرده و یک ابزار قابل اعتماد برای تشخیص قطعی گونه محسوب می‌شود. بررسی منابع بین‌المللی نیز حاکی از آن است که وجود پرایمر اختصاصی، به‌ویژه برای گونه‌هایی با شباهت ژنتیکی بالا، یکی از الزامات اصلی برای دستیابی به تشخیص دقیق و قابل اعتماد محسوب می‌شود. در غیاب چنین پرایمرهایی، احتمال بروز هم‌پوشانی در الگوی باندها و در نتیجه، شناسایی نادرست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های پیشین همسو است که تأکید کرده‌اند موفقیت آزمون‌های مولکولی در شناسایی گونه‌ها وابسته به انتخاب نواحی ژنی مناسب، طراحی اختصاصی پرایمرها و اعتبارسنجی دقیق آن‌ها بر مجموعه‌ای از گونه‌های هدف و غیرهدف است.

علاوه‌بر این، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که نمونه‌های متعلق به الاغ در آزمون مورد استفاده، به دلیل شباهت ناحیه هدف با گونه اسب، به‌صورت نادرست به‌عنوان اسب تفسیر می‌شوند. این موضوع بیانگر آن است که طراحی کیت‌های تشخیصی صرفاً بر پایه تمایز میان گونه‌های دورتر، برای کاربرد در نمونه‌های واقعی و پیچیده کافی نیست و باید تنوع ژنتیکی گونه‌های نزدیک خویشاوند نیز در طراحی پرایمرها مدنظر قرار گیرد. نبود یک نشانگر اختصاصی برای الاغ نه تنها موجب کاهش اختصاصیت آزمون می‌شود، بلکه می‌تواند به گزارش نتایج ناصحیح و درنهایت، تفسیر اشتباه منشأ گونه‌ای نمونه‌ها منجر شود.

از منظر عملیاتی، توسعه و بهینه‌سازی کیت حاضر با افزودن پرایمر اختصاصی الاغ می‌تواند گام مؤثری در ارتقای عملکرد آن باشد و دامنه کاربرد آن را در شناسایی دقیق‌تر نمونه‌های دارای منشأ نامشخص افزایش دهد. چنین بهبودی به‌ویژه در مطالعات کنترل کیفیت، اصالت‌سنجی مواد زیستی و تشخیص نمونه‌های حاصل از گونه‌های اهلی که از نظر توالی‌های هدف شباهت بالایی دارند، اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. این پرایمر به دلیل برخورداری از اختصاصیت کامل نسبت به ژنوم الاغ، حساسیت بالا در نمونه‌های حرارت‌دیده و فرآوری شده و پایداری در مواجهه با شرایط مختلف نمونه‌برداری، یک ابزار قابل اعتماد برای تشخیص قطعی گونه محسوب می‌شود. برتری عملکرد این پرایمر نسبت به کیت‌های تجاری که در تمایز الاغ و اسب همواره گزارش‌های متناقض ارائه داده‌اند، نشان می‌دهد که توسعه ابزارهای بومی ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. کاربرد این نشانگر در آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت و مراکز نظارتی می‌تواند خطاهای تشخیصی را به حداقل رسانده و منجر به صدور گزارش‌های دقیق و قابل استناد شود. این مسئله در فرآورده‌های گوشتی آماده مصرف، همبرگرها، سوسیس‌ها، کالباس‌ها و محصولات مخلوط که تشخیص ظاهری و شیمیایی ممکن نیست، اهمیت دوچندان دارد. همچنین این روش می‌تواند به‌عنوان آزمون داوری رسمی در موارد اختلاف بین تولیدکنندگان، نهادهای نظارتی و مراجع قانونی به کار رود.

از منظر اقتصادی، توسعه چنین نشانگری می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش تقلبات گوشتی و جلوگیری از ورود محصولات بی‌کیفیت یا غیرمجاز به بازار باشد. از منظر شرعی، نقش آن در تضمین سلامت حلال و جلوگیری از استفاده ناخواسته از گوشت‌های حرام کاملاً مشخص است. این موضوع سبب تقویت اعتماد عمومی و ارتقای امنیت غذایی می‌شود. درنهایت، این پژوهش می‌تواند نقطه آغاز برنامه‌های گسترده‌تر در طراحی پرایمرهای اختصاصی برای سایر گونه‌ها، توسعه بانک ژنومی ملی، آموزش شبکه آزمایشگاهی و تدوین استانداردهای ملی در حوزه تشخیص مولکولی باشد. توصیه می‌شود نهادهای پژوهشی و نظارتی کشور، این پرایمر را در فرآیندهای جاری خود ادغام کرده و بستر لازم برای توسعه کیت‌های بومی و مقرون به صرفه را فراهم کنند.

## پی‌نوشت

1. Polymerase Chain Reaction (PCR)
2. Quality Control Laboratory
3. Cross-reactivity
4. Primer
5. Species Differentiation
6. Cytochrome b Gene
7. Specificity
8. Discriminatory
9. Referee Test
10. Food Fraud
11. DNA-based Analysis
12. Species-specific Primer
13. Mislabeling
14. Equidae Family
15. Mitochondrial Sequences
16. Limit of Detection (LOD)

## مراجع

- [1] Ballin N.Z., Vogensen F.K., Karlsson A.H., Meat Science, 83 (2009) 165–174.
- [2] Fajardo V., González I., Rojas M., Food Control, 21 (2010) 207–213.
- [3] Ayaz Y., Ayaz M., Eur. Food Res. Technol., 242 (2016) 135–142.
- [4] Al-Mufti S., Razzak M., Saudi J. Biol. Sci., 24 (2017) 1309–1314.
- [5] Druml B., Cichna-Markl M., Food Chem., 239 (2018) 402–409.
- [6] Laube I., Zagon A., Broll M., Eur. Food Res. Technol., 224 (2007) 271–278.
- [7] Soares S., Amorim P., Food Control, 50 (2015) 224–231.
- [8] González I., García T., J. Agric. Food Chem., 49 (2001) 3735–3740.
- [9] Halal Food Standards Board, J. Halal Sci., 5 (2016) 41–50.
- [10] Spink J., Moyer D.C., Compr. Rev. Food Sci. Saf., 10 (2011) 118–157.
- [11] Zhang Y., Wang L., Meat Science, 85 (2010) 144–149.
- [12] Ali M., Kashif M., J. Food Prot., 77 (2014) 1579–1585.
- [13] Cawthorn D., Hoffman L.C., Food Res. Int., 76 (2015) 828–835.
- [14] Matsunaga T., Chikuni K., Meat Sci., 49 (1998) 193–200.
- [15] Abdulmawjood A., Bülte M., J. Food Prot., 65 (2002) 554–559.
- [16] Kocher T.D., Thomas W.K., PNAS, 86 (1989) 6196–6200.
- [17] Gupta S.K., Verma A., J. Appl. Genet., 55 (2014) 483–495.
- [18] Freitas L., Oliveira P., J. Forensic Sci., 62 (2017) 1012–1020.
- [19] Budowle B., van Daal A., Forensic Sci. Int. Genet., 1 (2007) 48–55.
- [20] Hebert P.D., Cywinska A., Proc. R. Soc. B., 270 (2003) 313–322.

## Author

Fatemeh Mehdipour<sup>1\*</sup>

\*fatemeh.mehdipour1993@gmail.com

1. Technical Manager, Genetics Laboratory,  
Samet Tak Azma Laboratory,  
Anzali Free Zone, Iran



## Accurate Application of PCR for the Detection of Meat Species Adulteration

### Abstract

Accurate species identification in meat products is considered one of the important aspects of food safety, quality control, and compliance with religious regulations. With the increasing incidence of species adulteration, intentional or unintentional mixing of unauthorized meats, and regulatory challenges in the food supply chain, the use of molecular diagnostic methods, particularly polymerase chain reaction (PCR), has gained special importance in quality control laboratories. Nevertheless, numerous reports indicate that some commonly used commercial kits for differentiating donkey and horse meat are affected by cross-reactivity. These kits sometimes mistakenly identify horse DNA as donkey DNA. In addition to economic, legal, and health-related consequences, this error may lead to significant violation of religious regulations.

Furthermore, in this report, a pair of species-specific primers is introduced, designed on the basis of interspecies differences in the cytochrome b gene. These primers are able to amplify only donkey DNA with high accuracy and show no reaction with other species. This characteristic makes kits based on these primers a reliable tool for precise species differentiation.

Evaluation of this primer showed that its specificity and discriminatory power are significantly higher than those of existing kits, and it can be used as a reliable confirmatory assay in suspicious cases. The application of this primer contributes to improving the accuracy of results, preventing food adulteration, increasing consumer confidence, ensuring compliance with religious requirements, and improving transparency in the labeling of meat products. In addition, this indigenous tool has potential capacity for application in national standards, laboratory training, and the country's regulatory system.

### Keywords

Species identification, PCR, Species-specific primer, Food authenticity, Meat adulteration.



## Author

Davoud Gharailou<sup>1\*</sup>

\*d.gharailou@sharif.edu

1. Technical Manager, Transmission  
Electron Microscopy Laboratory, Sharif  
University of Technology

# An Investigation of Common Errors in Transmission Electron Microscopy Operations and Their Preventive Strategies

**Abstract**

Transmission electron microscopy (TEM) is one of the most advanced characterization techniques in materials science, enabling the investigation of internal structures at the nanometer and even atomic scale. Despite its high capabilities, the accuracy and reliability of TEM results are strongly influenced by a wide range of errors arising at different stages, including sample preparation, imaging, and data analysis. This article reviews some of the most important and commonly encountered errors in TEM practice and discusses their impact on data interpretation.

In the sample preparation stage, factors such as inappropriate thickness, excessive thinning, surface contamination, incorrect grid selection, non-uniform nanoparticle distribution, non-standard drying procedures, and mechanical damage are examined. These issues can introduce artifacts, alter the apparent morphology of the sample, or significantly degrade imaging quality. During the imaging stage, errors such as improper focus adjustment, uncorrected astigmatism, poor column alignment, incorrect magnification selection, sample drift, and inappropriate accelerating voltage are discussed, all of which can lead to reduced resolution and image distortion.

In the data analysis section, major sources of error include misinterpretation of artifacts as real structures, analysis based on a single image, measurements without proper calibration, and statistically unreliable conclusions derived from a limited number of particles. In more advanced analyses, additional challenges such as hydrocarbon contamination, peak overlap in spectroscopic data, and improper selection of regions in elemental analysis are also highlighted.

**Keywords**

Transmission Electron Microscopy (TEM), Imaging Errors, Sample Preparation, High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)

## Author

Neda F. Nazari<sup>1,3\*</sup>  
Mojtaba Taghipour<sup>2</sup>

\*n.nazari@sharif.ir

1. X-ray Laboratory Expert, Analytical Services Center, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
3. Member of the X-ray Specialist Working Group

## Roadmap for Developing Materials Analysis Infrastructure in Iran: A Statistical Study of ISI Publications Over the Past Five Years with Global and Regional Comparison

## Abstract

This study aims to provide an applied analysis of the utilization patterns of selected materials characterization techniques, based on statistical data from the Institute for Scientific Information available through the Web of Science database over the period 2021 to 2026. By extracting the number of publications associated with the keywords of each technique and calculating the “percentage of method utilization in publications”—normalized with respect to relevant research areas—the position of Iran in each analytical technology is evaluated and compared with global and regional benchmarks.

The results indicate that in low-risk, high-demand, and operationally accessible analytical techniques—such as Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), surface strength analysis, and Gas Chromatography (GC)—Iran demonstrates a significant relative advantage. This trend reflects the development policies favoring widely used equipment in universities, as well as the economic logic governing the laboratory service market in the country.

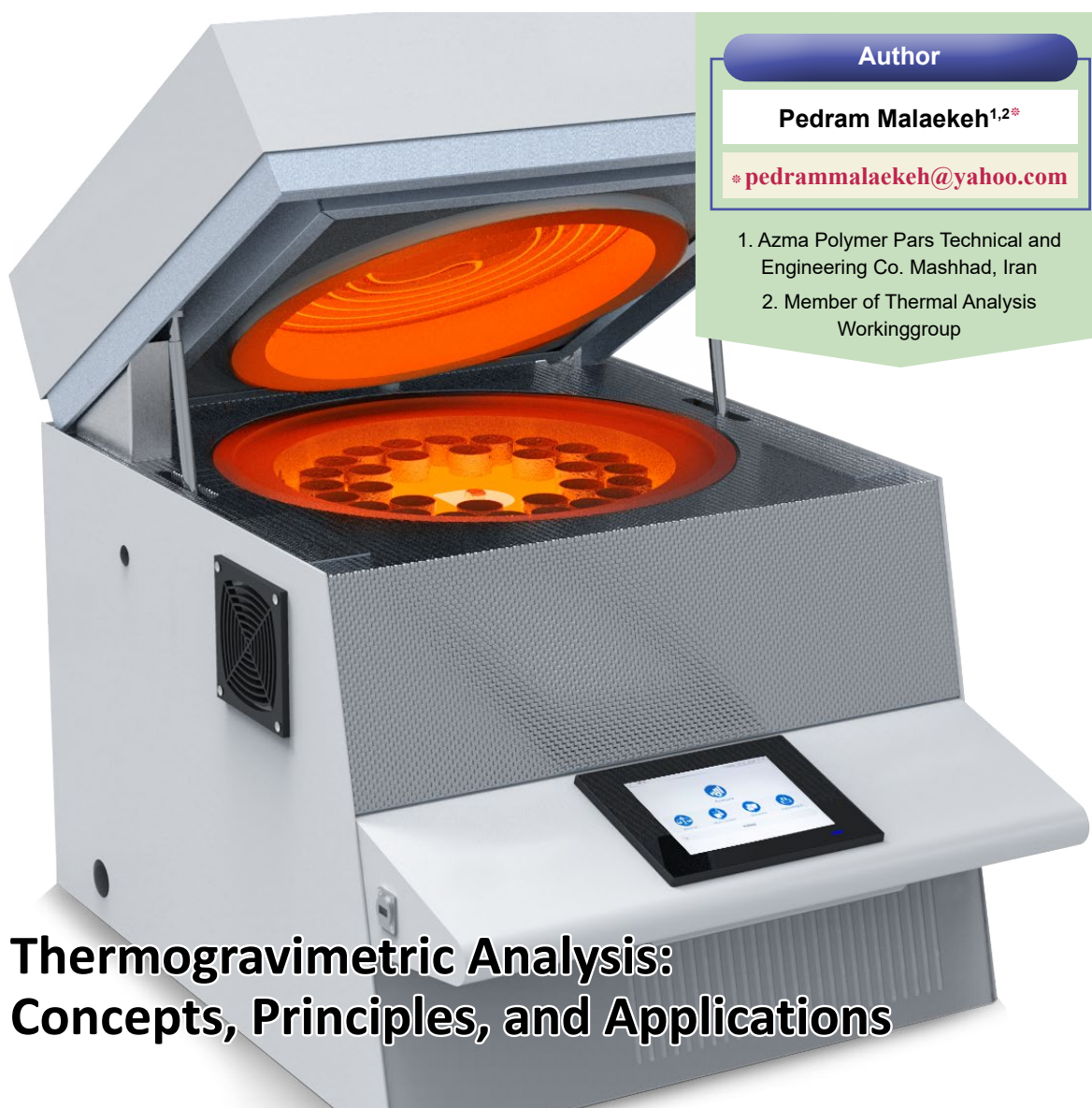
In contrast, for capital-intensive techniques that rely heavily on fundamental knowledge and specialized expertise—such as Raman Spectroscopy, X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy, and Confocal Microscopy—there are indications of relatively lower adoption within the analytical value chain.

In addition to presenting a comprehensive analysis of each analytical tool at global and regional levels, this paper proposes a set of macro-level policies aimed at completing instrumental capacity, enhancing human resources, diversifying laboratory services, promoting the use of underutilized techniques, and strengthening the linkage between academia and industry.

## Keywords

Materials Characterization, Analytical Techniques, Laboratory Infrastructure Development, Method Utilization Rate, Research Output Analysis.





## Author

Pedram Malaekheh<sup>1,2\*</sup>\* [pedrammalaekheh@yahoo.com](mailto:pedrammalaekheh@yahoo.com)

1. Azma Polymer Pars Technical and Engineering Co. Mashhad, Iran

2. Member of Thermal Analysis Workinggroup

## Thermogravimetric Analysis: Concepts, Principles, and Applications

### Abstract

In this article, thermogravimetric analysis or thermal weighing is introduced and the basic principles related to the apparatus and method, including calibration and verification and how to perform them, are explained. The hardware performance of the apparatus will also be reviewed. In addition, applications of thermogravimetric analysis and related ancillary methods, through test devices that can be connected to the TGA, such as evolved gas analysis and exhaust gas analysis combined with Fourier transform infrared spectroscopy, are also reviewed.

### Keywords

Thermogravimetric analysis, calibration, verification, gas analysis.



## Author

Dr. Abdolrasoul Oromiehie<sup>1\*</sup>

\*oromia2000@yahoo.com

1. CEO, Khatam Polymer Company,  
Tehran, Iran

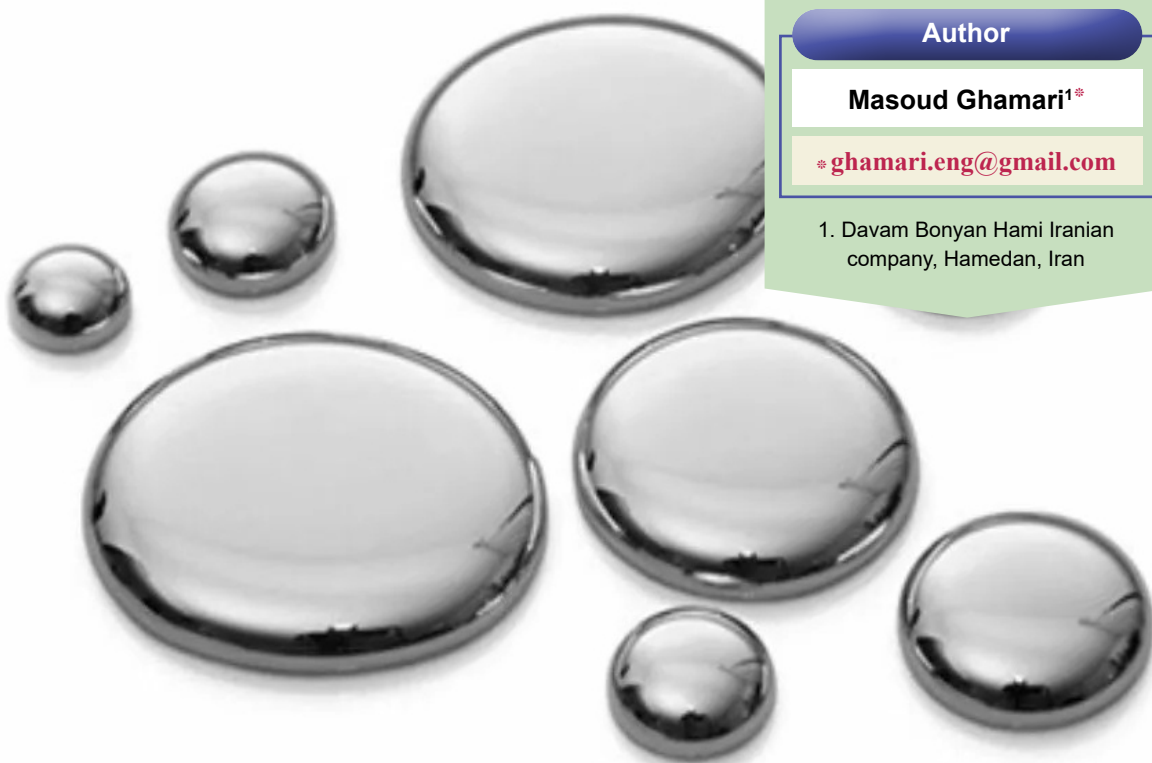
## Introduction to the Safety Data Sheet (SDS) for Chemicals in the Laboratory

### Abstract

The Safety Data Sheet (SDS) is of paramount importance for experts working in chemical and polymer analysis and quality control laboratories. This document provides essential information regarding the properties, hazards, safe handling, transportation, and storage of chemicals, enabling laboratory personnel to identify potential risks. By highlighting hazards such as flammability, toxicity, corrosivity, and health impacts, the SDS empowers experts to select appropriate Personal Protective Equipment (PPE) and execute prompt emergency responses. The application of the SDS in the laboratory includes verifying labels, managing spills, selecting suitable fire extinguishers, and ensuring safe disposal of materials, thereby preparing experts to respond effectively to incidents such as explosions or chemical exposure. Continuous access to the Safety Data Sheet ensures the safe use of both pure substances and mixtures.

### Keywords

Safety Data Sheet, MSDS or SDS, Health Protection, Compliance, and Risk.



## Author

Masoud Ghamari<sup>1\*</sup>

\*ghamari.eng@gmail.com

1. Davam Bonyan Hami Iranian company, Hamedan, Iran

## The Electrical Resistance and the Mercury Intrusion Tests in Investigating the Concrete Behavior in Freez-thaw Cycles

### Abstract

Investigating the freeze–thaw cycles of cement-based materials, including concrete, mortar, and cement paste, is directly related to their pore structure. Even when external conditions, such as moisture or temperature, change, these variations are reflected in the internal structure. The internal structure of cement materials can be studied using both destructive and non-destructive methods. Assessing electrical resistance and performing the mercury intrusion test are two non-destructive methods that have attracted researchers' attention due to their simplicity and ease of use. This review paper reports recent research trends on this subject. First, electrical resistance measurement and the mercury intrusion test are introduced, followed by a review of the current state of research worldwide. Several relevant studies are discussed in the third section. Finally, a summary and conclusions are presented, and future research directions are suggested.

### Keywords

Electrical resistance, mercury intrusion, concrete, structure, building, non-destructive test.



# Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Volume 14 ■ Issue 1 ■ Spring 2026 ■ No.53

ISSN 2538-3450

**Concessionaire:**

Iran Nanotechnology Innovation Council

**Managing Editor:** Alireza Badiee

**Editor in Chief:** Mojtaba Nasab

**Executive Management:** Iran Nanotechnology  
Laboratory Network (INLN)

**Article Editor:** Davoud Gharailou

**Authors:**

Masoud Ghamari, Dr. Abdolrasoul Oromiehie  
Pedram Malaekheh, Neda F. nazari  
Mojtaba Taghipour, Davoud Gharailou  
Fatemeh Mehdipour

**Designer :** Simin Rafipour Langroudi

**Editor:** Zeinab Zarincheh

Iran, Tehran, Po.Box: 14565-344

[www.IJLK.ir](http://www.IJLK.ir)

**Email :** [info@ijlk.ir](mailto:info@ijlk.ir)



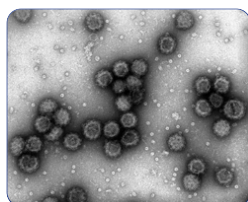
Iran Nanotechnology  
Laboratory Network

## Contents



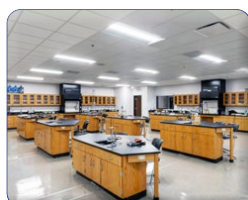
Accurate Application of PCR for the  
Detection of Meat Species Adul-  
teration

>00



An Investigation of Common Errors  
in Transmission Electron Microscopy  
Operations and Their Preventive  
Strategies

>00



Roadmap for Developing Materials Analysis  
Infrastructure in Iran: A Statistical Study  
of ISI Publications Over the Past Five Years  
with Global and Regional Comparison

>00



Thermogravimetric Analysis:  
Concepts, Principles, and Applications

>00



Introduction to the Safety Data  
Sheet (SDS) for Chemicals in the  
Laboratory

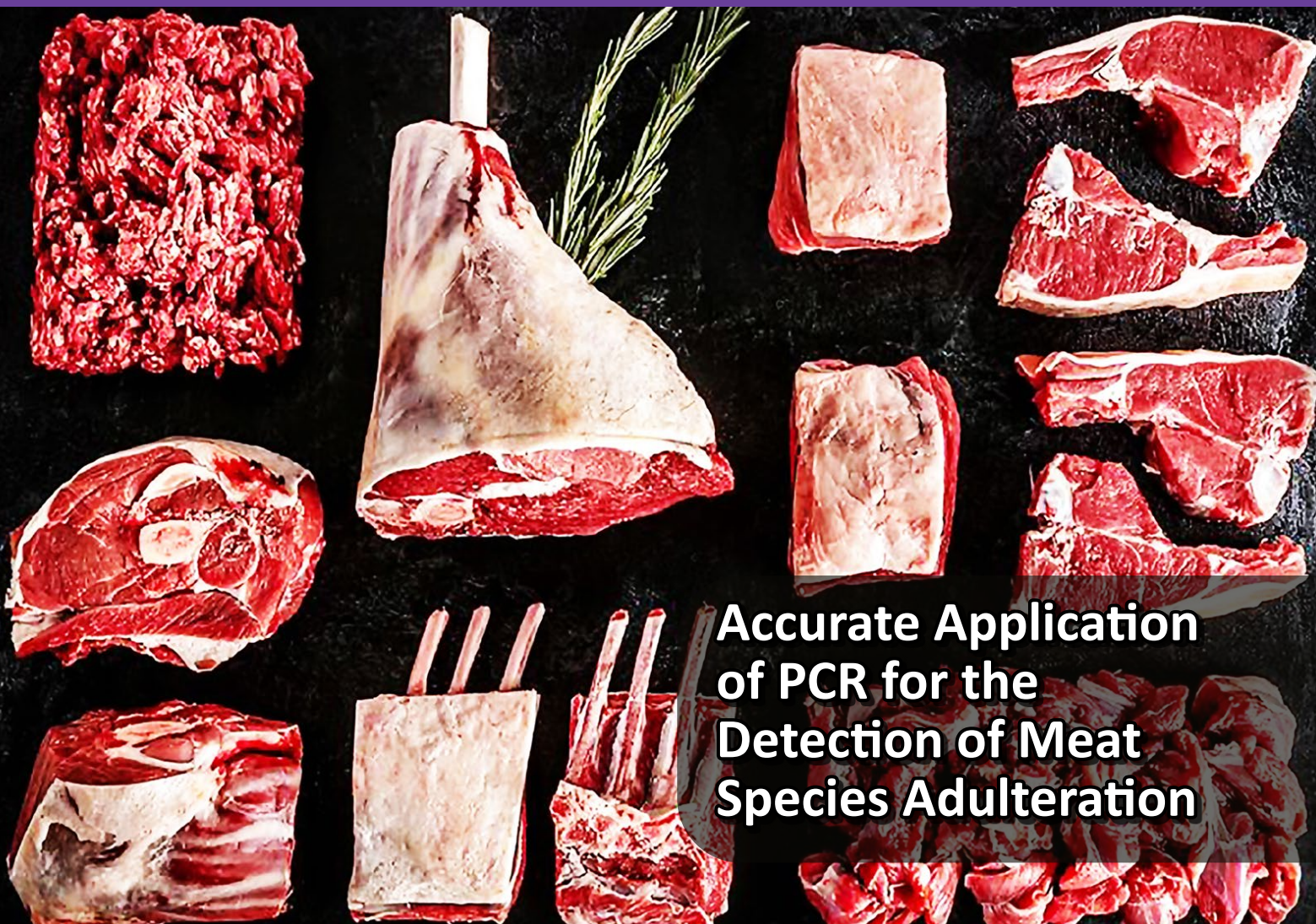
>00



The Electrical Resistance and the  
Mercury Intrusion Tets in Investigating  
the Concrete Behavior in  
Freez-thaw Cycles

>00





## Accurate Application of PCR for the Detection of Meat Species Adulteration



The Electrical Resistance and the Mercury Intrusion Tests in Investigating the Concrete Behavior in Freez-thaw Cycles



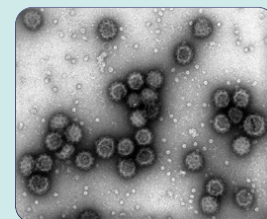
Introduction to the Safety Data Sheet (SDS) for Chemicals in the Laboratory



Thermogravimetric Analysis: Concepts, Principles, and Applications



Roadmap for Developing Materials Analysis Infrastructure in Iran: A Statistical Study of ISI Publications Over the Past Five Years with Global and Regional Comparison



An Investigation of Common Errors in Transmission Electron Microscopy Operations and Their Preventive Strategies