شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

فصلنامه تخصصی

دانش آزمایشگاهی ایران

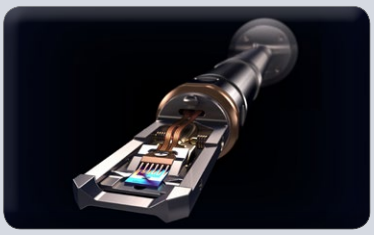
سال هشتم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۹ ■ شماره پیاپی ۳۱

ISSN 2538-3450

مطالعات مبتنی بر الکتروانسفالوگرافی کمّی در علوم شناختی

- تقدیر از پژوهشگران منتخب و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی با حضور دکتر ستاری
- حمایت شبکه آزمایشگاهی از خانواده ۱۰۰ هزار نفری اعضای باشگاه مشتریان

جایگاه و اهمیت مقایسات بین آزمایشگاهی در فعالیت‌های آزمایشگاهی



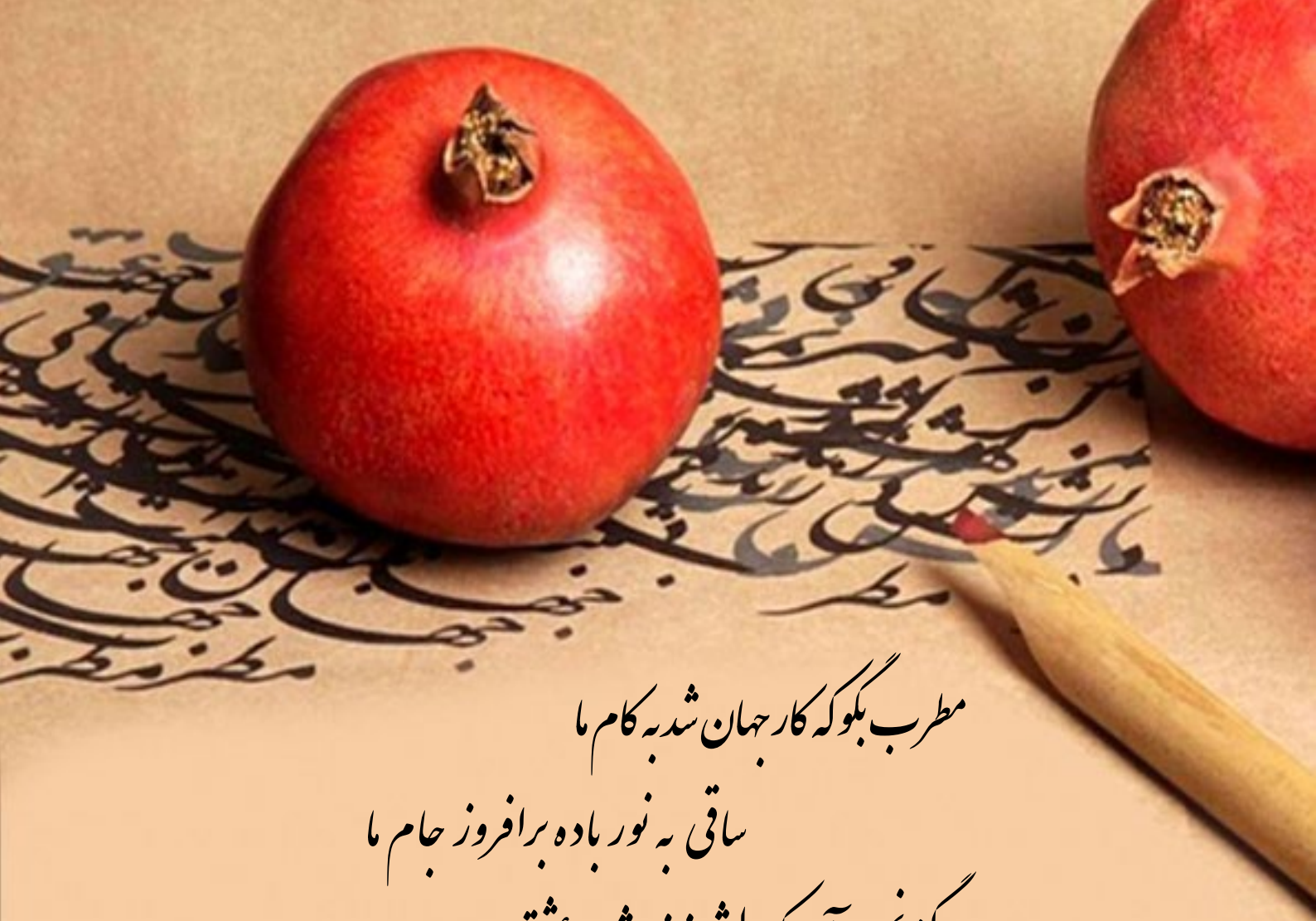
کاربردهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا / بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در حوزه‌های مختلف

آشنایی با روش آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری با تمرکز بر دستگاه کوانتومتر

مروری بر روش‌های ورود نمونه به دستگاه پلاسمای جفت شده القایی نشری و جرمی بر پایه مهپاش‌های بادی

برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی سنگ

www.IJLK.ir
info@ijlk.ir



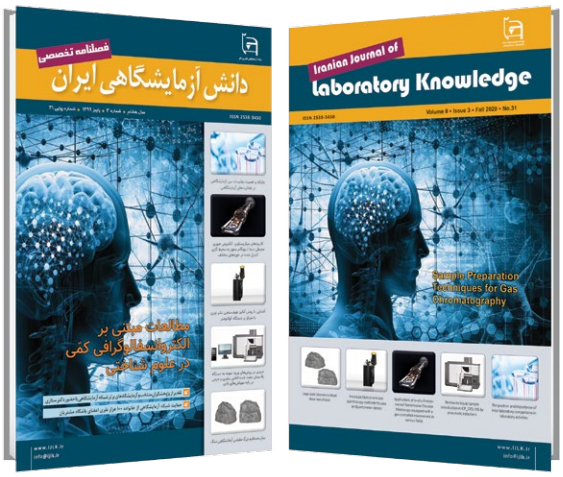
مطرب بگو که کار جهان شد به کام ما

ساقی به نور باده برافروز جام ما

هرگز نمیرد آن که دلش زنده شد به عشق

ثبت است بر جریده عالم دوام ما

یلدا مبارک



فصلنامه تخصصی

دانش آزمایشگاهی ایران

سال هشتم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۹ ■ شماره پیاپی ۳۱

ISSN 2538-3450

صاحب امتیاز: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

سردبیر: رضا اسدی فرد

مدیرمسئول : مجتبی نسب

مدیریت اجرایی: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

دبیر مقالات: داود قرایلو

همکاران این شماره: ملیحه غفاری، مسعود کازرانی‌نژاد
محمد همایونی، سمیه میرجلیلی، رضا باقری، بهزاد ناطق‌پور
مرتضی اسدالله‌زاده تنسوان، محسن آقابابایی، ساناز شبیکه
اعظم کاوسی، سمیه حنیفه سامانی، مهشید رحیمی‌فرد
رقیه حجی‌پور، محمود نادری

طراحی و صفحه آرایی : سیمین رفیع‌پور لنگرودی

ویراستار: زینب زرینچه

نشانی: تهران . صندوق پستی ۳۴۴-۱۴۵۶۵

تلفن: ۰۲۱ ۶۳۱۰۳۴۵۳

پایگاه اینترنتی: www.IJLK.ir

پست الکترونیکی: info@ijlk.ir

شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

فهرست مطالب

اخبار

تقدیر از پژوهشگران منتخب و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی با حضور دکتر سورنا ستاری ۲

حمایت شبکه آزمایشگاهی از خانواده ۱۰۰ هزار نفری اعضای باشگاه مشتریان ۳

استاندارد

روش اندازه گیری مساحت سطح پودرهای فلزی توسط دستگاه‌های جذب فیزیکی بر اساس استاندارد B922 ۴

مقالات

جایگاه و اهمیت مقایسات بین آزمایشگاهی در فعالیت‌های آزمایشگاهی ۶

آشنایی با روش آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری با تمرکز بر دستگاه کوانتومتر ۱۰

برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی سنگ ۱۷

کاربردهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا / بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در حوزه‌های مختلف ۲۴

مروری بر روش‌های ورود نمونه به دستگاه پلاسمای جفت شده القایی نشری و جرمی بر پایه مهپاش‌های بادی ۳۸

مطالعات مبتنی بر الکتروانسفالوگرافی کمی در علوم شناختی ۴۸

تقدیر از پژوهشگران منتخب و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی با حضور دکتر سورنا ستاری

در ۱۳ مهرماه ۱۳۹۹ و با حضور دکتر سورنا ستاری، معاون علمی و فناوری رئیس جمهور، از ۱۰ پژوهشگر منتخب عضو باشگاه مشتریان شبکه و ۱۰ آزمایشگاه برتر عضو شبکه آزمایشگاهی، تقدیر شد.

به گزارش پایگاه خبری شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی، دکتر سورنا ستاری، معاون علمی و فناوری رئیس جمهور، در مراسم تقدیر از پژوهشگران منتخب و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی ضمن بیان دلایل اهمیت ایجاد شبکه آزمایشگاهی در کشور افزود: «آن چیزی که پژوهش را انجام می‌دهد، محقق و پژوهشگر است و دستگاه ها، صرفا ابزار هستند».

معاون علمی و فناوری رییس جمهور، شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی را شبکه‌ای بالغ توصیف کرد و گفت: «در حال حاضر بیش از ۱۰۰ هزار نفر از اعضای هیئت علمی، پژوهشگران و شرکت‌های دانش بنیان، عضو باشگاه مشتریان این شبکه هستند و می‌توانند از خدمات بیش از ۱۷ هزار تجهیز آزمایشگاهی در بستر شبکه آزمایشگاهی استفاده نمایند». سورنا ستاری ادامه داد: «به صورت جدی از شبکه آزمایشگاهی حمایت می‌کنیم تا محققان در دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها بتوانند از خدمات آن بهره‌مند شوند».

دکتر سورنا ستاری، شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی را شبکه مهمی در حوزه فعالیت‌های پژوهشی دانست و افزود: «فعالیت‌های این شبکه باید به طور جدی گسترش و توسعه یابد». وی همچنین با بیان تخفیف‌ها و اعتبارات شبکه آزمایشگاهی برای اعضای هیئت علمی، دانشجویان و پژوهشگران کشور، از عزم جدی آن معاونت برای کاهش هزینه‌های پژوهشی در کشور خبر داد و گفت: «در حال حاضر تمامی اعضای هیئت علمی می‌توانند از تخفیف ۵۰ درصدی خدمات آزمایشگاهی با ثبت نام در باشگاه مشتریان این شبکه استفاده نمایند». وی این اعتبارات را برای اعضای بنیاد ملی نخبگان، اعضای فدراسیون سرآمدان علمی ایران و دانشجویان دکتری که در خارج از کشور تحصیل نموده‌اند، تا ۹۰ درصد اعلام کرد.

در ادامه این مراسم با حضور معاون علمی و فناوری رئیس جمهور، از پژوهشگران منتخب عضو باشگاه مشتریان و آزمایشگاه‌های برتر شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی، با اهدای لوح تقدیر و جوایزی تقدیر شد.

شایان ذکر است در ابتدای این مراسم، دکتر رضا اسدی فرد، مدیر شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، ضمن تشکر از حمایت‌های معاون علمی و فناوری رئیس جمهور، گزارشی از روند رشد و دستاوردهای این شبکه ارائه کرد.

همچنین دکتر پرویز دوامی، رئیس هیئت مدیره بنیاد علوم کاربردی رازی، رتبه اول آزمایشگاه های عضو شبکه آزمایشگاهی، در بخشی از این مراسم، در ارتباط با نحوه مدیریت آزمایشگاه‌ها برای دستیابی به نتایج مطلوب، مطالبی را ارائه کرد.

حمایت شبکه آزمایشگاهی از خانواده ۱۰۰ هزار نفری اعضای باشگاه مشتریان

باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی در طول بیش از ۵ سال فعالیت، ارائه خدمات کیفی و کارآمد آزمایشگاهی به بیش از ۱۰۰ هزار عضو از پژوهشگران، دانشگاهیان، فناوران و شرکت‌های دانش بنیان و خلاق را تسهیل کرده است.

به گزارش شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، توفیق یک پژوهش و خلق محصول نوآورانه، از مسیر آزمایش می‌گذرد و وجود یک ظرفیت آزمایشگاهی کارآمد و اثربخش است که می‌تواند راه را برای توسعه پژوهش هموار کند.

بر این اساس باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی با هدف بهبود کیفی و افزایش کمی خدمات آزمایشگاهی در حوزه فناوری های راهبردی کار خود را از شهریورماه ۱۳۹۴ آغاز کرده و خدمات متنوع و کارآمدی را به اعضای حقیقی و حقوقی خود ارائه کرده است. جمع بزرگ پژوهشگران و دانشگاهیان متقاضی این خدمات توانسته اند زیر چتر حمایتی باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، خدمت آزمایشگاهی مورد نیاز خود را به آسانی در قالب طرح‌های تخفیف متنوع دریافت کنند.

اعضای باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی

استقبال خانواده پژوهش کشور از این باشگاه نشان دهنده ظرفیت بالای فعالیت آزمایشگاهی در کشور است، به طوری که در سال جاری تاکنون بیش از ۲۳ هزار عضو جدید به اعضای باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی افزوده شده است.

این استقبال موجب شده است باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، میزبان بیش از ۱۰۰ هزار عضو از میان پژوهشگران، مراکز آزمایشگاهی، شرکت‌های دانش‌بنیان و فناور شود. از این تعداد بیش از ۹۶ هزار عضو حقیقی و حدود ۶ هزار عضو حقوقی هستند.

بخش قابل توجهی از اعضای باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی را دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد با سهم ۳۸ درصدی از کل اعضای این باشگاه، به خود اختصاص داده‌اند. دانشجویان مقطع دکتری، اعضای هیئت علمی و دانشجویان کارشناسی، به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند.

در حال حاضر و پس از گذشت ۵ سال از آغاز فعالیت باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، استان‌های تهران، خراسان رضوی، اصفهان، آذربایجان شرقی و فارس به ترتیب بیشترین عضو هیئت علمی را در این باشگاه دارند.

همچنین از میان پژوهشگران، اعضای هیئت علمی و دانشجویان دانشگاه های کشور که عضو باشگاه مشتریان شده‌اند، بیش از ۱۵ درصد آنها در دانشگاه‌های آزاد اسلامی، دانشگاه تهران، صنعتی امیرکبیر، علم و صنعت و فردوسی مشهد مشغول تحصیل و تدریس هستند. همچنین، رشته‌های تحصیلی شیمی و مهندسی شیمی، مهندسی مواد، فیزیک و زیست شناسی، بیش‌ترین سهم از نظر تعداد محققان فعال در این باشگاه را به خود اختصاص داده‌اند.

حمایت‌های ویژه باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی

باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، با ارائه تسهیلات و حمایت‌های استفاده از خدمات به اعضای خود، راه را برای پژوهش‌های کیفی و کارآمد هموارتر کرده است. این تسهیلات در قالب طرح‌های تخفیف دوره‌ای و بلندمدت ارائه می‌شود و در هر فصل برای گروه‌های گوناگون، حمایت‌های مالی ویژه‌ای در نظر گرفته شده است.

تازه‌ترین این طرح‌ها، تسهیلات ویژه اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها و دانشجویان در فصل پاییز است. بر همین اساس اعضای هیئت علمی سراسر کشور در پاییز ۱۳۹۹ با عضویت در باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی از اعتبار دریافت خدمات آزمایشگاهی به میزان ۵۰ درصد هزینه خدمات تا سقف مبلغ ۴۰ میلیون ریال بهره‌مند شده‌اند. در این فصل دانشجویان تحصیلات تکمیلی نیز با ثبت نام در این باشگاه از اعتبار ۳۰ میلیون ریالی استفاده نموده و طرح های پژوهشی خود را با هزینه کمتری به سرانجام رساندند.

همچنین در فصل پاییز و به مناسبت روز دانشجو و هفته پژوهش، اعتبار هدیه ۵ میلیون ریالی برای تمامی پژوهشگران و دانشگاهیان سراسر کشور در نظر گرفته شد و اعضای جوان هیئت علمی دانشگاه‌های سراسر کشور که کم‌تر از ۵ سال از تاریخ شروع فعالیت آن‌ها به عنوان هیئت علمی گذشته است نیز از اعتبار ۶۰ میلیون ریالی بهره‌مند شدند.

در زیست‌بوم پویا و پرشتاب نوآوری، پژوهشگران، دانشجویان، اعضای هیئت علمی، فعالان فناور شرکت‌های دانش‌بنیان و خلاق، صنایع و استارتاپ‌ها به خدمات آزمایشگاهی برای پیشبرد کار فناورانه و پژوهشی خود نیازی مبرم دارند. باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی با تسهیل دسترسی به خدمات آزمایشگاه‌ها، به شرکت‌ها و محققان دانشگاهی کمک کرده تا بتوانند دسترسی سریع‌تر، ساده‌تر و ارزان تری به خدمات آزمایشگاهی داشته باشند.

مترجم
ملیحه غفاری
maliheghafari7@gmail.com
۱. کارشناسی ارشد مهندسی مواد
۲. کارشناس آزمایشگاه مرکزی پژوهشگاه مواد و انرژی، کارگروه آنالیز سطح

روش اندازه گیری مساحت سطح پودرهای فلزی توسط دستگاه‌های جذب فیزیکی

بر اساس استاندارد B922

این روش آزمون اندازه گیری مساحت سطح پودرهای فلزی با استفاده از روش‌های عمومی قابل کاربرد برای بسیاری از دستگاه‌های جذب فیزیکی تجاری را پوشش می دهد که شامل روش‌های گاززدایی نمونه‌ها برای مواد لیست شده و همچنین شامل دستورالعمل های عمومی اضافه برای گاززدایی سایر فلزات است و معادله چند نقطه ای Emmett، Brunnauer وTeller (روش BET) به همراه تقریب یک نقطه ای معادله BET اساس تمام محاسبات را تشکیل می دهد.

تمام واحدهای عددی بر اساس واحد SI (m2/kg) است مگر اینکه نرم افزار دستگاه خاصی، مساحت سطح را بر اساس واحدهای دیگری گزارش دهد که در گزارش نهایی ارائه می شود. بسیاری از دستگاه ها سطح ویژه را به صورت m^2/gr به جای استفاده از واحد صحیح آن در SI که m^2/kg است گزارش می دهند.

این استاندارد ادعای عنوان کردن تمام ملاحضات ایمنی را ندارد مگر در جاهایی که در ارتباط با استفاده از آن باشد. این از وظایف کاربر این استاندارد است که ملاحضات ایمنی متناسب را برقرار کند و قبل از استفاده محدودیت های متناسب با کاربرد را تعیین نماید.

خلاصه ای از روش آزمون

نمونه با وزن مشخص (که حداقل سطح مورد نیاز برای نتایج قابل اطمینان برای دستگاه مورد استفاده را دارا باشد) در شرایط مناسب قبل از آنالیز گاززدایی می شود. مهم است که قسمت مورد آزمون، نمایانگر نمونه جامد بزرگتری که از

آن گرفته شده است باشد. نمونه جامد قبل از انجام هرگونه نمونه گیری باید هموژن شده باشد. جمع آوری چندین نمونه کوچک و ترکیب آنها باعث افزایش قابلیت اطمینان فرایند نمونه گیری می‌شود.

ابتدا جانمونه ای خالی و تمیز را به همراه درپوش آن با دقت ۰/۱ mg وزن کنید. وزن جانمونه ای خالی را گزارش کنید. سپس نمونه مورد آزمون را داخل جا نمونه ای بریزید. مقدار نمونه باید برای براوردن حداقل مساحت سطحی که توسط کارخانه تعیین شده است کافی باشد. بعد از آن جانمونه‌ای آماده شده را به پورت گاززدایی دستگاه وصل کنید. آون و یا وسیله گرمایشی را در اطراف جانمونه ای برای مدت زمان مناسب قرار دهید. برنامه گاززدایی را بر طبق دستورالعمل کارخانه شروع کنید. به دستگاه حرارتی و یا آون برای دمای گاززدایی اولیه برنامه دهید. دما را متناسب با نمونه افزایش دهید و اجازه دهید گاززدایی نمونه تا رسیدن به سطح خلاء از قبل تعیین شده و یا رسیدن به سیگنال آشکار ساز و یا برای مدت زمان گاززدایی تعیین شده و یا هر دو انجام شود. نمونه در مقایسات بین آزمایشگاهی به مدت دو ساعت در دمای ۲۰۰°C گاززدایی شده اند.

این روش آزمون می تواند برای تعیین سطح داخلی و یا خارجی یک پودر و یا جامد تنها بعد از زدودن سطح آنها از مولکولهایی که بصورت فیزیکی جذب آن شده اند، استفاده شود. نمونه های جذب شده روی سطح مواد ، برای مثال آب و یا ترکیبات آلی فرار ، از جذب فیزیکی مولکول‌های گاز مورد استفاده برای تعیین مساحت سطح جلوگیری می‌کنند. بنابراین حذف آلودگی های قبل از آنالیز مساحت سطح ضروری است. بطور عمومی ، این گاززدایی با خلاء انجام می شود. گاز زدایی می تواند با استفاده از افزایش دما بطوری‌که منجر به تغییرات غیر قابل برگشت نمونه نشود، تسریع شود.

بعد از انجام گاززدایی آون و یا دستگاه های حرارتی را از جانمونه ای ها جدا می کنیم. اجازه دهید جا نمونه ای ها تا دمای محیط خنک شوند. سپس جانمونه ای ها را با دقت ۰/۱ mg برای تعیین وزن نمونه و جا نمونه ای وزن کنید. وزن جا نمونه ای خالی را از این وزن کم کنید تا وزن نمونه گاز زدایی شده به دست آید.

بر طبق دستورالعمل کارخانه نمونه هایی که به درستی آماده شده اند را در داخل پورت دستگاه آنالیز قرار دهید. (به انضمام تمام تجهیزات لازم). از گاز نیتروژن به عنوان گاز جذب شونده برای تمام آزمون ها استفاده شود. از هلیم برای تعیین فضای خالی بالای نمونه در صورت نیاز از ابزارهای حجمی استفاده کنید. از نیتروژن مایع به عنوان سرمازا استفاده کنید.

آنالیز BET چند نقطه ای: حجم گاز جذب و یا واجذب در واحد Cm^3 تعیین می شود که بر اساس دما و فشار استاندارد (STP) برای حداقل ۴ فشار نسبی در طول محدوده تغییرات خطی BET که از خصوصیات ایزوترم و جذب و واجذب فیزیکی فلز می باشد، تصحیح شده است. محدوده خطی محدوده ایست که منجر به حداقل مربع ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۹ و یا بالاتر در ارتباط با تبدیل BET و فشار نسبی می شود. معمولا محدوده خطی شامل فشار استاندارد بین ۰/۰۵ و ۰/۳۰ می‌باشد.

آنالیز BET تک نقطه‌ای: حجم گاز جذب و یا واجذب در واحد Cm^3 تعیین می‌شود که بر اساس دما و فشار استاندارد در بالاترین فشار نسبی در محدوده تغییرات خطی BET از ایزوترم و یا جذب و واجذب فیزیکی تصحیح شده است. معمولا فشار نسبی ۰/۳ استفاده می شود (ممکن است که نیاز باشد در ابتدا آنالیز چند نقطه ای BET به منظور تعیین فشار نسبی بهینه تک نقطه ای انجام شود).

محاسبات بر اساس معادله BET است که با دستگاه مورد استفاده برای تعیین سطح مورد نیاز است. مساحت سطح مقطع برای ماده جذب شونده ۰/۱۶۲ Cm^2 برای گاز نیتروژن است. برای سایر گازهای جذب شونده غیر از نیتروژن، از مقادیر توصیه شده توسط کارخانه تولید دستگاه استفاده می شود و این مقادیر به همراه مقادیر مساحت سطح BET گزارش می شود.

برای انجام محاسبات از ابزارهای آنالیز استفاده می شود. نرم افزار دستگاه به طور خودکار با استفاده از وزن نهایی نتایج را برای گزارش های انتخاب شده محاسبه می کند.

برای گزارش داده ها ابتدا مشخصات نمونه را کامل کنید. نقاط ایزوترم را به صورت نسبت حجم گاز جذب شده و واجذب شده به فشار نسبی جمع آوری کنید. ذکر کنید که از کدام نمودار جذب و یا واجذب استفاده شده است. هر واحدی که غیر از واحد استاندارد استفاده شده است را ذکر کنید. گاز مورد استفاده را اگر مساحت سطح مقطع آن غیر از نیتروژن است آنالیز کنید. مساحت سطح ویژه BET اگر از هر واحد دیگری غیر از واحد استاندارد استفاده شده ذکر شود. جرم نهایی نمونه اگر از هر واحد دیگری غیر از واحد استاندارد استفاده شده ذکر شود. روش گاززدایی نمونه شامل زمان کل و دمای گاززدایی ذکر شود.

دقت روش آزمون B922 به طور کامل تعیین نشده است. انحراف استاندارد تکرارپذیر برای مساحت سطح ویژه تک نقطه ای یک نمونه کاربید تنگستن ۰/۰۶ درصد ± انحراف استاندارد نسبی تعیین شده است. بر اساس آنالیزها در یک آزمایشگاه و برای یک نمونه نیکل ۱/۴ درصد ± انحراف استاندارد نسبی است. هیچ اطلاعاتی در انحراف روش این آزمون برای اندازه گیری مساحت سطح ویژه نباید ارائه شود. زیرا هیچ نمونه فلزی که دارای مقدار مرجع قابل قبول باشد موجود نیست.

نویسندگان
مسعود کازرانی‌نژاد[۱و۴*]
محمد همایونی[۲و۵]
سمیه میرجلیلی[۳و۴]
*m_kazeraninejad@yahoo.com

جایگاه و اهمیت مقایسات بین آزمایشگاهی در فعالیت‌های آزمایشگاهی

واژه‌های کلیدی
ISO/IEC 17025، کنترل کیفیت، آزمون مهارت، عملکرد آزمایشگاه.

چکیده

ارزیابی مستقل و منظم از عملکرد فنی آزمایشگاه برای کسب اطمینان از اعتبار اندازه‌گیری‌ها یا آزمون‌ها ضروری است. یک رویکرد مشترک برای این ارزیابی مستقل، استفاده از طرح‌های آزمون مهارت (PT) مستقل است که این آزمون کمک بسزایی به مشارکت کنندگان به‌منظور ارزیابی صحت اندازه‌گیری آن‌ها می‌کند. از همین رو، استقرار استاندارد ملی و بین‌المللی ISO/IEC 17025 یکی از مهمترین اهداف آزمایشگاه‌های کالیبراسیون است که تمامی الزامات قانونی آن مبتنی بر تحلیل آماری بوده و مستلزم شناخت آزمایشگاه‌ها از دانش روش‌های آزمون و شناخت رفتار دستگاه‌های اندازه‌گیری است که با آزمون‌های مختلفی سنجیده شده و در نهایت میزان رضایت‌بخشی مجموعه بیان می‌شود. هر چند عملکرد رضایت‌بخش و بالعکس الزاماً به معنای صلاحیت یا عدم صلاحیت یک مجموعه آزمایشگاهی نیست، با این حال می‌توان از این نتایج در بهبود کیفیت عملکرد بهره جست.

مقدمه

ارزیابی مستقل و منظم از عملکرد فنی آزمایشگاه برای کسب اطمینان از اعتبار اندازه‌گیری‌ها و آزمون‌ها ضروری است و باید به‌عنوان بخشی از راهبرد کیفیت در نظر گرفته شود.

یک رویکرد مشترک برای این ارزیابی مستقل، استفاده از طرح‌های آزمون مهارت[۶] یا در اصطلاح PT است. طرح PT، سیستمی برای ارزیابی عینی عملکرد یک آزمایشگاه با استفاده از ابزارهای خارجی است که شامل مقایسه نظام‌مند نتایج یک آزمایشگاه با نتایج دیگر آزمایشگاه‌ها است. هدف اصلی طرح PT، کمک به مشارکت‌کنندگان به‌منظور ارزیابی صحت اندازه‌گیری‌هایشان است [۱]. علاوه‌بر این، مشارکت در یک طرح PT مناسب برای آزمایشگاه‌هایی که به دنبال اثبات شایستگی خود از طریق تأیید صلاحیت برای استاندارد ISO/IEC 17025 هستند، لازم است [۲].

استقرار الزامات استاندارد ملی و بین‌المللی ISO/IEC 17025 در ایران یکی از مهمترین اهداف آزمایشگاه‌های آزمون یا کالیبراسیون محسوب می‌شود. از مهمترین چالش‌های پیش روی این آزمایشگاه‌ها در استقرار این استاندارد یا حفظ گواهی تایید صلاحیت خود، اجرای الزامات بندهای مربوط به کنترل میانی[۷] دستگاه‌های اندازه‌گیری و روش‌های آزمون و کالیبراسیون و همچنین مشارکت در برنامه‌های آزمون مهارت و مقایسات بین آزمایشگاهی[۸] است. منظور از مقایسات بین آزمایشگاهی، سازماندهی، اجرا و ارزیابی اندازه‌گیری‌ها یا آزمون‌ها روی اقلام یکسان یا مشابه از سوی دو یا تعداد بیشتری آزمایشگاه است [۳].

PT با فراهم آوردن یک شاهد عینی برای صلاحیت و شایستگی مشارکت کننده نقش بسیار ارزشمندی را در این زمینه ایفا می‌کند. به علاوه، مشارکت در طرح‌های PT نه تنها اطلاعاتی را در رابطه با عملکرد سیستم تجزیه‌ای ارائه می‌کند، بلکه در رابطه با دیگر جنبه‌های سیستم مدیریت نظیر دریافت داده‌ها، گزارش‌دهی نتیجه و غیره نیز اطلاعاتی را عرضه می‌کند. PT فرصتی برای مقایسه‌های بین داده‌های مشارکت کننده‌ها و مقایسه نتایج آنها با مقادیر اسمی (یا دیگر معیارهای عملکرد) یا عملکرد آزمایشگاه‌های همکارشان فراهم می‌کند. نتایج یک چنین مشارکتی ممکن است به تأییدی مبنی بر رضایت‌بخش بودن عملکرد یا هشدار برای بررسی مشکلات بالقوه در این زمینه، منجر شود.

مطابق با شرایط از قبل تعیین شده، تمامی این الزامات مبتنی بر تحلیل آماری بوده و علاوه‌بر آنکه لازم است آزمایشگاه از دانش روش‌های آزمون یا شناخت رفتار دستگاه‌های اندازه‌گیری برخوردار باشد، آشنایی با روش‌های کنترل کیفیت مبتنی بر مفاهیم آماری و آماره‌های مختلف نیز ضروری است [۴].

روش‌های کنترل کیفیت در آزمایشگاه‌ها

به کارگیری روش‌های کنترل کیفیت به‌منظور پایش قابلیت اطمینان اندازه‌گیری‌ها برای آزمایشگاه مهم است. برای آزمایشگاه‌های دارای تأیید صلاحیت و یا آزمایشگاه‌هایی که به دنبال تأیید صلاحیت بوده، این اقدامات جنبه بسیار مهمی محسوب می‌شوند. شرکت در PT یکی از این اقدامات است. PT با فراهم آوردن یک شاهد عینی برای صلاحیت و شایستگی مشارکت‌کننده نقش بسیار ارزشمندی را در این زمینه ایفا می‌کند. این دلیل و یا شاهد عینی می‌تواند برای بهبود عملکرد مشارکت‌کنندگان و یا اطمینان‌دهی به توانایی مشارکت‌کنندگان برای اجرای یک اندازه‌گیری خاص مورد استفاده قرار گیرد.

به این نکته باید توجه شود که هدف PT فقط اجرای خوب یا بد آزمایش‌ها نیست، بلکه هدف اصلی آن است که مشارکت‌کننده‌ها از حضورشان در طرح‌های PT مطالب تازه‌ای آموخته و از این اطلاعات برای بهبود کیفیت اندازه‌گیری‌شان استفاده کنند.

به‌طور کلی، روش‌های کنترل کیفیت در آزمایشگاه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- کنترل کیفیت داخلی[۹]؛
- کنترل کیفیت بیرونی[۱۰].

آزمون‌های آماری و نمودارهای کنترلی مختلفی در کنترل کیفیت داخلی و بیرونی استفاده می‌شود. عناوین برخی از این آزمون‌ها و نمودارهای کنترلی به ترتیب عبارتند از:

- آزمون t معیاری برای ارزیابی گرایش در اندازه‌گیری؛
- آزمون F برای مقایسه انحراف استانداردهای دو روش اندازه‌گیری (آزمون دقت)؛
- تکرارپذیری و تجدیدپذیری معیارهایی برای محاسبه دقت اندازه‌گیری؛
- نمودار کنترلی شیوهارت[۱۲] نمودار میانگین؛
- نمودار کنترلی R (نمودار کنترل گستره)؛
- آماره‌های zeta و En برای مقایسه عملکرد دو آزمایشگاه مختلف؛
- آماره‌های Q و D برای مقایسه عملکرد دو آزمایشگاه مختلف.

راهبرد مشارکت در آزمون‌های مقایسه‌ای

زمینه‌های شایستگی فنی یک آزمایشگاه می‌تواند از طریق یک روش اندازه‌گیری، یک ویژگی و یک فرآورده تعریف شود [۵]. وقتی آزمایشگاهی در حال ایجاد راهبرد مشارکت در آزمون مهارت است، باید جنبه‌های زیر را اعمال کند:

- استفاده منظم از مواد مرجع (گواهی‌دار)؛
- مقایسه آنالیز با روش‌های مستقل؛
- مشارکت در توسعه روش/صحه‌گذاری و یا مطالعات تعیین ویژگی ماده مرجع؛
- استفاده از اقدامات کنترل کیفیت داخلی؛
- دیگر مقایسه‌های درون/بین‌آزمایشگاهی، برای مثال آنالیز نمونه‌های کور درون آزمایشگاه.

مشارکت آزمایشگاه‌ها در طرح آزمون‌های مقایسه‌ای

استفاده اصلی این طرح برای آزمایشگاه‌ها، ارزیابی عملکرد اجرای اندازه‌گیری‌ها یا کالیبراسیون‌های خاص است. نتایج و اطلاعات به‌دست آمده از مشارکت در این طرح، میزان رضایت‌مندی عملکرد آزمایشگاه را نشان می‌دهد. ضمن اینکه نتایج آن می‌تواند به شکل یک شاخص برای وجود مشکلات بالقوه مطرح و براساس آن تصمیمات لازم اتخاذ شود.

با این حال، کاربرد نتایج این آزمون خیلی گسترده‌تر از تعیین صلاحیت آزمایشگاه است. آزمایشگاه‌ها، به شکل‌های زیادی می‌توانند از مشارکت در این طرح سود ببرند [۶] که به بعضی از آنها در ذیل اشاره شده‌است:

- شناسایی مشکلات اندازه‌گیری؛
- مقایسه روش‌های اجرایی؛
- مقایسه قابلیت‌های اپراتور؛
- مقایسه دستگاه‌های آنالیزی؛
- بهبود عملکرد؛
- آموزش پرسنل؛
- تبادل اطلاعات با برگزارکننده آزمون؛
- ایجاد اطمینان در پرسنل، مدیریت و کاربران خارجی خدمات آزمایشگاهی؛
- عدم قطعیت اندازه‌گیری؛
- معیاری از کنترل کیفیت داخلی؛
- تصدیق عملکرد روش.

تعیین کارایی آزمایشگاه در انجام آزمایش با مقایسات بین آزمایشگاهی

آزمون‌های کفایت تخصصی که در ایران به نام آزمون‌های مهارت نیز شناخته می‌شوند، یکی از ابزارهای کارآمد به‌منظور کنترل و تضمین کیفیت نتایج آزمون در آزمایشگاه‌های آزمون و کالیبراسیون محسوب می‌شوند. آزمایشگاه‌ها می‌توانند برای بررسی درستی نتایج آزمون‌های خود در این مقایسات بین آزمایشگاهی شرکت نمایند. به‌طور معمول، برگزارکنندگان آزمون مهارت، مقادیری از یک نمونه همگن را بین هر یک از شرکت کنندگان توزیع می‌کنند و شرکت‌کنندگان مواد را در شرایط خاصی آنالیز نموده و نتایج را به برگزارکننده گزارش می‌دهند. برگزارکننده آزمون مهارت، نتایج شرکت‌کنندگان را گردآوری کرده و با رعایت استانداردهای مربوطه، داده‌های شرکت‌کنندگان را بررسی آماری نموده و در نهایت، شرکت‌کنندگان را از نتایج به‌دست آمده مطلع می‌کنند. به‌طور معمول، نتیجه آزمون مهارت به‌صورت نمره‌ای که نشان دهنده میزان درستی نتایج هر آزمایشگاه است، گزارش می‌شود. آزمون‌های مهارت یکی از روش‌های بسیار مناسب برای بررسی درستی نتایج آزمون یک آزمایشگاه است و در استاندارد ISO/IEC 17025 نیز این روش کنترل کیفی برای بررسی درستی نتایج آزمون به آزمایشگاه‌ها توصیه شده‌است. از آنجا که در آزمون مهارت، آزمایشگاه‌های شرکت کننده، آزمون خواسته شده را انجام داده و نتایج را گزارش می‌کنند، در واقع تمام بخش‌های درگیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت. به‌عنوان مثال، توانایی پرسنل درگیر در آزمون، تجهیزات به کار گرفته شده، مواد مورد استفاده در آزمون، روش آزمون، محاسبات و گزارش‌دهی نتایج. در واقع هدف از برگزاری آزمون مهارت، کمک به آزمایشگاه‌ها برای پی بردن و رفع نادرستی‌های بزرگ غیرقابل قبول در نتایج آزمون آن‌ها است. به‌عبارت دیگر، آزمون مهارت یک سیستم بررسی نتایج آزمون را فراهم می‌کند و در این سیستم، اگر آزمایشگاهی نیاز به بهبود و یا اصلاح روش‌های آزمون داشته باشد، مشخص شده و به آن‌ها اعلام خواهد شد. در گزارش نهایی آزمون مهارت برای هر شرکت کننده، یک گزارش اختصاصی تهیه می‌شود که حاوی اطلاعات و خلاصه‌های آماری است و نشان‌دهنده میزان درستی نتایج آن آزمایشگاه در مقایسه با سایر آزمایشگاه‌ها است. اطلاعات و تحلیل‌های تکمیلی دیگری نیز درخصوص مقایسه روش‌های آزمون مورد استفاده سایر شرکت‌کنندگان، مقایسه بین تجهیزات به کار گرفته شده توسط سایر آزمایشگاه‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آزمون، تهیه و برای شرکت کنندگان ارسال می‌شود. این اطلاعات برای بهبود، اصلاح و طرح‌های توسعه آزمایشگاه‌ها بسیار مفید است.

نتایج و محاسبات اثبات یکنواختی و پایداری نمونه‌های مورد استفاده در آزمون مهارت و اصول آماری به کار گرفته شده برای تحلیل نتایج نیز از جمله مواردی است که در گزارش نهایی به اطلاع شرکت کنندگان خواهد رسید. یکی از ویژگی‌های برجسته آزمون‌های مهارت، محرمانه بودن نتایج این آزمون‌ها بوده به طوری که هر آزمایشگاه در آزمون مهارت دارای یک کد اختصاصی است و در گزارش‌ها و نتایج، آزمایشگاه‌ها با کد مشخص می‌شوند. از این رو، هیچ آزمایشگاهی از اطلاعات سایر آزمایشگاه‌های شرکت کننده مطلع نخواهد شد. به‌منظور امنیت بیشتر اطلاعات شرکت کنندگان، فرآیند آزمون از طریق اینترنتی و با نام کاربری و کلمه عبور اختصاصی که به هر آزمایشگاه اختصاص داده می‌شود، اجرا خواهد شد و از داده‌ها در هر شبانه‌روز دو مرتبه نسخه پشتیبان تهیه می‌شود.

نمونه‌های مورد استفاده در آزمون مهارت حتی‌المقدور باید بسیار نزدیک به موادی باشد که به‌طور معمول مورد تجزیه قرار می‌گیرند؛ بنابراین، نتایج آزمون مهارت، توانایی آزمایشگاه‌ها را

در شرایط معمول فعالیت‌شان نشان می‌دهد. نمونه‌های مورد استفاده باید یکنواخت بوده و از پایداری کافی برخوردار باشند تا بتوان از آنها در آزمون مهارت استفاده نمود. شواهد و داده‌های اثبات کننده یکنواختی و پایداری نمونه‌های مورد استفاده در آزمون مهارت باید به اطلاع شرکت کنندگان برسد.

تفسیر آزمایشگاهی نتایج

مشارکت در طرح آزمون‌های مقایسه‌ای به خودی خود ارزش چندانی ندارد، مگر اینکه آزمایشگاه بتواند از ارزیابی عملکرد و اطلاعات عمومی ارائه شده در گزارش طرح آزمون‌های مقایسه‌ای استفاده کند. آزمایشگاه نه تنها باید ارزیابی عملکرد به‌دست آمده را بپذیرد، بلکه خود نیز باید آن را ارزیابی و تفسیر کند و از ارائه هر گونه تفسیرهای غلط و نابجا اجتناب نماید. درباره تفسیر نتایج آزمون‌های مقایسه‌ای نکات کلیدی وجود دارد. نتیجه یک آزمون فقط به پذیرش یا رد یک اندازه‌گیری نمی‌پردازد و درباره یادگیری به کمک نتایج نیز نکاتی را به ما می‌آموزد. یک عملکرد رضایت‌بخش در یک دوره، برای آزمایشگاهی که در آن تمام آزمایشگاه‌ها عملکرد رضایت‌بخش دارند، لزوما به معنای سطح بالای شایستگی و مهارت نیست.

در این حالت، انحراف استاندارد ارزیابی مهارت می‌تواند خیلی بزرگ باشد. به همین ترتیب، عملکرد نارضایت‌بخش در یک دوره لزوما به این معنا نیست که آزمایشگاه فاقد صلاحیت است، بلکه باید این نتیجه مطالعه و درس‌هایی از آن گرفته شود تا دوباره شاهد عملکرد نارضایت‌بخش نباشیم. با این حال، عملکرد ضعیف پیوسته به وجود مشکلات عمده در آزمایشگاه‌ها و فرآیند اندازه‌گیری اشاره داشته و در این صورت، آزمایشگاه در مورد اینکه آیا باید این روش را برای آن اندازه‌گیری خاص تا زمان حل مشکلات ادامه دهد یا نه، توجه جدی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

از مزایا و اهداف اصلی شرکت در آزمون مهارت می‌توان به تایید شایستگی آزمایشگاه، ارزیابی عملکرد آزمایشگاه با روشهای کمی و معتبر آماری و مقایسه با آزمایشگاه‌های مشابه، شناسایی مسائل و مشکلات آزمون، بهبود عملکرد آزمایشگاه، مقایسه روش‌ها و دستورالعمل‌های مختلف یک آزمون، مقایسه توانایی‌های آزمون کنندگان، تعیین دقت و صحت روش آزمون، عدم قطعیت روش آزمون، تولید مواد مرجع، افزایش سطح آگاهی کارکنان و افزایش سطح اعتماد و رضایت نهادهای تایید صلاحیت اشاره نمود.

در واقع هدف از برنامه‌های آزمون مهارت، تایید و تصدیق توانمندی آزمایشگاه در انجام یک آزمون خاص است تا درجه قابل قبولی از اطمینان را برای مشتریان در خصوص نتایج آزمون فراهم کند.آزمون مهارت این امکان را برای آزمایشگاه میسر می‌سازد تا نتایج آزمون خود را به‌صورت مکرر و در بازه‌های زمانی پیوسته با یکدیگر مقایسه نماید.

به‌منظور تفسیر نتایج شرکت کنندگان و امکان مقایسه با مقدار تخصیص، نتایج آزمون مهارت به آماره‌های عملکردی تبدیل شده و علاوه‌بر قابل درک بودن برای شرکت کنندگان، می‌توانند از موارد ساده تا تبدیل‌های آماری پیچیده متغیر باشند.

پی‌نوشت

۱. دکتری شیمی تجزیه، شرکت تولیدی و تحقیقاتی آبسار کویر
۲. کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران
۳. کارشناس مهندسی صنایع، شرکت تولیدی و تحقیقاتی آبسار کویر
۴. عضو کارگروه آنالیز عنصری
۵. عضو کارگروه استاندارد و کالیبراسیون

6. Proficiency-Testing Programmes (PT)
7. Intermediate Check
8. Inter laboratory Comparisons
9. Internal Quality Control (IQC)
10. External Quality Control (EQC)
11. Shewhart Chart

مراجع

[1] ISO 5725-1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results.

[2] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

[3] ISO/IEC 17043:2010, Conformity assessment — General requirements for proficiency testing.

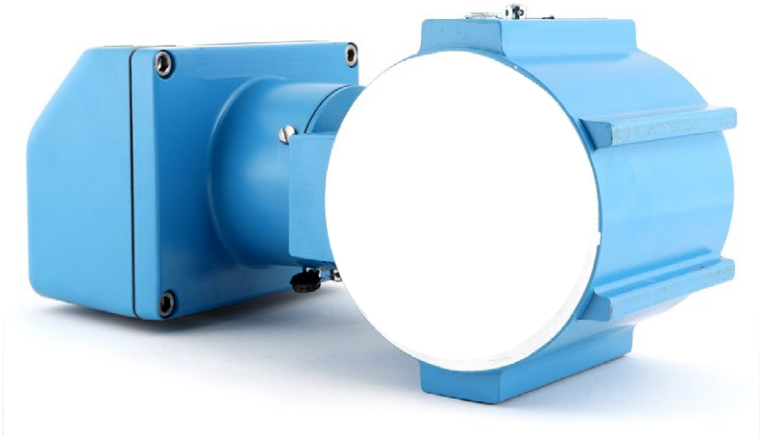
[4] ISO 13528:2005, Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.

[5] EA-4/18, Guidance on the level and frequency of proficiency testing participation.

[6] ILAC Brochure: 2008, Benefits for laboratories participating in proficiency testing programs.

[۷] سایت پژوهشکده ارزیابی کیفیت و سامانه های مدیریت – مرکز آزمون مهارت استاندارد

نویسندگان
رضا باقری[1*]
مرتضی اسدالله‌زاده تنسوان[1]
*re.ba14220@gmail.com



آشنایی با روش آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری با تمرکز بر دستگاه کوانتومتر

چکیده

طیف‌سنجی نشر نوری[2] یکی از روش‌های قدیمی بررسی مواد است که برای آنالیز کمی و کیفی فلزات، آلیاژها، سنگ‌ها، مواد معدنی و غیره استفاده می‌شود. در این روش، حد تشخیص در حد پیکوگرم برای خیلی از عناصر قابل دستیابی است. اساس عملکرد این روش مبتنی بر تهییج الکترون، تغییر سطح انرژی الکترون و ساطع شدن فوتوالکترون است. مقدار انرژی فوتوالکترون‌های ساطع شده، شناسنامه ماده به شمار می‌آید. دستگاه کوانتومتر یکی از دستگاه‌هایی است که از این فناوری استفاده می‌کند. این دستگاه شامل منبع تهییج، بخش جدا کننده فوتوالکترون‌ها و بخش آشکارساز است. بخش جداکننده از فناوری گریتینگ و بخش آشکارکننده از فناوری لوله‌های تقویت کننده فوتون استفاده می‌کند.

واژه‌های کلیدی

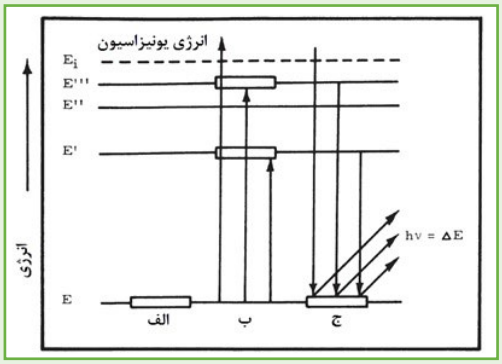
طیف‌سنجی نشر نوری، کوانتومتر، گریتینگ، لوله تقویت کننده فوتون.

مقدمه

طیف‌سنجی نشر نوری یکی از روش‌های به نسبت قدیمی آنالیز است که برای آنالیز کمی و کیفی استفاده می‌شود. در ابتدا از شعله به‌عنوان منبع نور برای OES استفاده می‌شد. در دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ به علت قابلیت تهییج بیشتر، استفاده از قوس یا جرقه غالب شد. در دهه ۱۹۶۰، پلاسمای جفت شده القایی[۳] برای اولین بار به‌عنوان منبع نوری به OES اضافه شد. در حال حاضر پلاسمای جریان مستقیم[۴]، پلاسمای ماکروویو[۵] و پلاسمای لیزر القا شده[۶] نقش مهمی به‌عنوان منبع نوری OES ایفا می‌کنند. این روش، محدوده طول موج ماوراءبنفش، مرئی و مادون قرمز را شامل می‌شود [۱].

اگرچه OES روش قدیمی آنالیز به حساب می‌آید، اما هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربردهای منحصر به فرد و جدیدی در سال‌های اخیر داشته است. این روش به‌طور گسترده‌ای در زمینه آنالیز فلزات یا آلیاژها، سنگ‌ها و مواد معدنی و ضایعات در مباحث مربوط به محیط‌زیست استفاده می‌شود [۱]. مطالعات اخیر در مورد OES بیشتر مربوط به تجهیزات جدید بوده و شامل ارتقاء عملکرد تجهیزات مانند حد تشخیص و محدوده دینامیک خطی، بهینه‌سازی شرایط تجربی شامل متغیرهای تجهیزات و رفع تداخل ناشی از عناصر همراه یا پیوند مولکولی یا پس‌زمینه است [۲]. در این روش، از گاز خنثی مانند آرگون استفاده می‌شود. البته این روش را می‌توان در اتمسفر هوا بدون گاز اضافی نیز انجام داد. در این روش حد تشخیص در حد پیکوگرم برای خیلی از عناصر قابل دستیابی است. حساسیت برای عناصری مانند هافمیم و تنگستن که به سختی تهییج می‌شوند نیز قابل ارتقاء است [۱].

طیف نشر نوری عناصر با جابجایی الکترون‌های لایه‌های دورتر از هسته اتم بوجود می‌آید. این پدیده در شکل (۱) با مقایسه حالت پایه و حالت تهییج شده نشان داده شده‌است. یک الکترون در یک اتم مشخص، با عدد کوانتومی و انرژی مشخص تعریف شده‌است. زمانی که انرژی الکتریکی، نوری یا حرارتی به اتم وارد می‌شود، الکترون‌ها از لایه کم انرژی به لایه پرانرژی منتقل می‌شوند. بعد از مدت زمان کوتاهی الکترون تهییج شده به حالت اولیه خود باز می‌گردد. اختلاف انرژی الکترون در دو لایه به‌صورت تابش الکترومغناطیس ساطع می‌شود. طبق قانون بقای انرژی، انرژی فوتون ساطع شده (hυ) باید برابر با اختلاف انرژی الکترون در دو لایه (EΔ) باشد. h ثابت پلانگ و υ فرکانس نوسان است [۳].



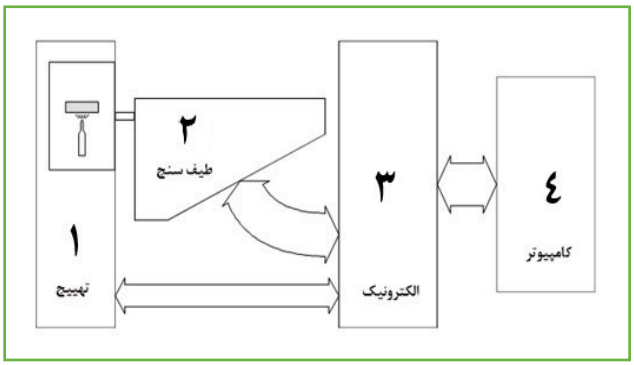
شکل (۱): دیاگرام سطح انرژی الکترونی. (الف): حالت پایه، (ب): تهییج و (ج): نشر [۱].

با توجه به قانون بور، الکترون‌ها در حالت کوانتومی مخصوص خود پایدار هستند. بنابراین، در زمان تهییج، اختلاف انرژی و فرکانس خاص برای آنها تعریف شده‌است. این پدیده، وجود طیف خطی مشخص برای هر اتم را توجیه می‌کند. به‌عنوان مثال، در مورد آهن، حدود ۵۰۰۰ خط نوری ثبت شده‌است. با توجه به اینکه احتمال این انتقالات الکترونی زیاد است، خطوط خاصی برای شناسایی طیف هر عنصر تعریف می‌شود. به‌طور کلی، یک دستگاه طیف‌سنج نشری شامل ۳ جزء است که عبارتند از: منبع تهییج، بخش جدا کننده و بخش آشکارساز. تمام دستگاه‌هایی که از این فناوری استفاده می‌کنند، دارای این سه بخش هستند [۴].

دستگاه کوانتومتر

اولین مدل از این دستگاه در سال ۱۹۸۲ توسط شرکت ترمو فیشر[۷] ساخته شد. این دستگاه که برای آنالیز نمونه‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌صورت تک پایه و چند پایه قابل طراحی است. از ویژگی‌های مهم این دستگاه می‌توان به دقت، صحت و سرعت آنالیز بالا اشاره نمود. این دستگاه در کمتر از ۴۰ ثانیه نمونه را آنالیز می‌کند. این دستگاه از آشکارسازهای PMT برای آنالیز فلزات استفاده می‌کند که نسبت به آشکارسازهای بار جفت شده[۸] از دقت بالاتری برخوردار هستند. این دستگاه در محدوده طول موج nm ۴۷۰-۱۷۰ کار می‌کند. شکل (۲) نمایی از بخش‌های مختلف دستگاه و چگونگی ارتباط آن‌ها را نشان می‌دهد. بخش (۱) منبع ولتاژ بالا است که انرژی لازم برای تهییج الکترون را تامین می‌کند.

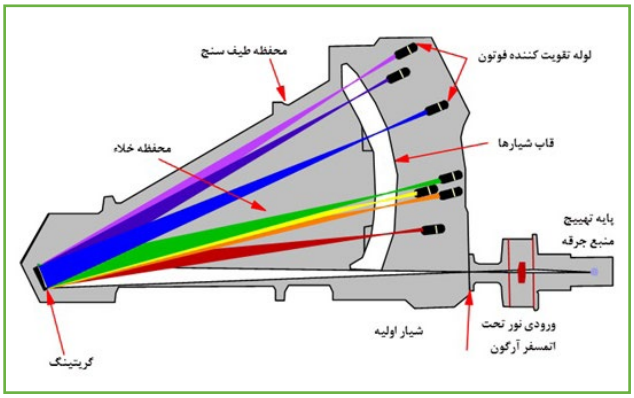
بخش (۲) مربوط به طیف‌سنج و بخش (۳) تجهیزات الکترونیک را نشان می‌دهد. نتایج در بخش (۴) تحلیل و نمایش داده می‌شود [۵].



شکل (۲): نمایی از بخش‌های مختلف دستگاه کوانتومتر و ارتباط بین آن‌ها [۵].

سازوکار آنالیز نمونه‌های فلزی با دستگاه کوانتومتر

شکل (۳) نمایی از بخش تهییج، سیستم نوری و آشکارسازهای دستگاه را نشان می‌دهد [۵].



شکل (۳): نمایی از بخش تهییج، سیستم نوری و آشکارساز دستگاه کوانتومتر [۵].

تهییج نمونه

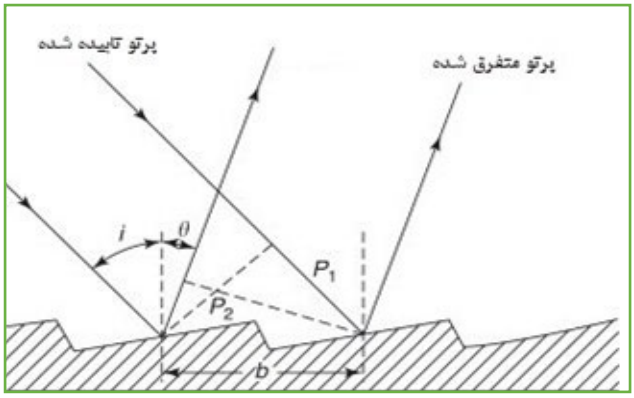
نمونه فلزی که سطح آن پرداخت شده‌است، در محل مناسب روی استند دستگاه قرار می‌گیرد. فاصله مناسب سطح نمونه تا الکترود تنگستنی برای تشکیل منطقه پلاسما ۳ mm است. برای ایجاد قوس پایدار، جریان گاز آرگون بین نمونه و الکترود برقرار می‌شود. بعد از شروع آنالیز و اعمال پتانسیل الکتریکی، تخلیه الکتریکی بین نمونه و الکترود با سرعت ۴۰۰ discharge/S ایجاد می‌شود. در مرحله اول[۹] حدود ۲۰ ثانیه ولتاژ ۸ KV و در مرحله بعد حدود ۵ ثانیه ولتاژ ۵۰۰ V با فرکانس ۴۰۰ Hz اعمال می‌شود. به‌منظور جلوگیری از گرم شدن بیش از حد استند، سیستم آبگرد برای آن تعبیه شده‌است. در این مرحله، فوتون‌های ناشی از تهییج اتم‌های سطح نمونه از عدسی که در اتمسفر گاز آرگون با دبی ۳/۵ lit/min قرار دارد عبور کرده و متمرکز می‌شوند. فوتون‌های متمرکز شده با عبور از دریچه اولیه که دهانه آن ۲۰ µm است، وارد محفظه خلاء طیف‌سنج می‌شوند [۵].

گریتینگ

دسته فوتون‌های ورودی به محفظه خلاء برای جدا شدن و تفکیک از یکدیگر به گریتینگ برخورد می‌کنند. گریتینگ یک وسیله نوری بسیار ساده است که براساس اصل تداخل سازنده کار می‌کند. گریتینگ‌ها به دلیل سهولت ساخت و خواص پراکنده کننده‌شان به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۶]. ساده‌ترین شکل آن از یک سطح نوری تشکیل شده که روی آن تعداد زیادی شیارهای مساوی با فاصله ایجاد شده‌است. فاصله خطوط باید کوچک و بسیار دقیق باشد [۷]. یک پرتو چند رنگ که بر گریتینگ تابیده می‌شود با توجه به محتوای طیفی آن از هم جدا می‌شود [۶]. جهت این پرتوها به فاصله شیارها و طول موج نور بستگی دارد [۸ و ۹].

اصول گریتینگ توسط جیمز گریگوری، در حدود یک سال پس از آزمایش منشور نیوتون کشف شد [۱۰]. اولین گریتینگ ساخته دست بشر در حدود سال ۱۷۸۵ توسط مخترع فیلادلفیایی به نام دیوید ریتنهاوس ساخته شد [۱۱]. در پایان قرن نوزدهم، گریتینگ‌های مقعر توسط هنری آگوستوس رولند به تولید رسید [۱۲].

گریتینگ‌ها ممکن است از نوع انعکاسی مانند آینه و یا عبوری مانند لنز باشند. نوع عبوری کاربرد گسترده‌ای در طیف‌سنجی نوری ندارند. گریتینگ‌های انعکاسی به گریتینگ صفحه‌ای و مقعر تقسیم می‌شوند. مزیت گریتینگ مقعر نسبت به گریتینگ صفحه‌ای، توانایی تولید خطوط طیفی تمیز (کاملا تفکیک شده) بدون کمک لنزها یا آینه‌های اضافی است. این ویژگی باعث می‌شود پرتوهای نوری در مناطق مادون قرمز و ماوراءبنفش با عبور از لنز جذب نشوند و آنالیز با دقت بیشتری انجام شود. اصول فیزیکی گریتینگ‌های انعکاسی در شکل (۴) نشان داده شده‌است [۷].



شکل (۴): اصول فیزیکی گریتینگ انعکاسی [۷].

یک گریتینگ ایده‌آل از مجموعه شیارها با فاصله b تشکیل شده‌است که باید از طول موج مورد نظر پهن‌تر باشد تا باعث پراش شود. یک موج صفحه‌ای از نور تک رنگ با طول موج λ را در نظر بگیرید. هر شیار در گریتینگ به‌عنوان یک منبع برای پخش کردن نور عمل می‌کند. پس از برهم‌کنش نور با گریتینگ، نور پراش یافته از مجموع امواج متداخل که از هر شیار در گریتینگ سرچشمه می‌گیرد، تشکیل می‌شود. در یک نقطه معین در فضا که ممکن است نور پراش یافته از آن عبور کند، فاصله تا هر شیار در گریتینگ متفاوت است که منجر به متفاوت بودن فاز امواج می‌شود. در نتیجه، امواج یا یکدیگر را تقویت و یا تضعیف می‌کنند که به ترتیب باعث تولید پیک و دره می‌شود. وقتی اختلاف مسیر بین نور از شیارهای مجاور برابر با نیمی از طول موج λ/۲ باشد، امواج غیرهم‌فاز هستند و یکدیگر را تضعیف می‌کنند. به همین ترتیب، وقتی اختلاف مسیر λ است، فازها با هم جمع می‌شوند و پیک اتفاق می‌افتد. برای یک پرتو که به‌طور معمول روی گریتینگ قرار می‌گیرد، مقدار بیشینه در زاویه θ_m رخ می‌دهد، که از رابطه زیر پیروی می‌کند [۶ و ۷]:

$$\frac{b \sin \theta_m}{\lambda} = |m| \qquad (۱)$$

که در آن: θ_m زاویه بین پرتو پراش یافته و بردار نرمال گریتینگ، b فاصله مرکز یک شیار تا مرکز شیار مجاور و m یک عدد صحیح است که حالت انتشار را نشان می‌دهد. می‌توان نشان داد که اگر یک موج صفحه‌ای در هر زاویه دلخواه θ_i تابیده شود، معادله گریتینگ (رابطه (۱)) به رابطه (۲) تبدیل می‌شود [۷]:

$$b(\sin \theta_i - \sin \theta_m) = m\lambda \qquad (۲)$$

در مورد این معادلات فرض شده‌است هر دو طرف گریتینگ با یک محیط (به‌عنوان مثال، هوا) در تماس است.

قدرت تفکیک (R) یک ابزار نوری نشان‌دهنده توانایی جدا کردن خطوط با فاصله نزدیک در یک طیف است که برابر با حاصل تقسیم طول موج (λ) بر کوچکترین اختلاف (Δλ) که در دو طول موج قابل تشخیص است. به‌عنوان مثال، برای یک گریتینگ با عرض ۱۰ سانتی‌متر و ۱۰۰۰۰ شیار در سانتی‌متر، قدرت تفکیک ۱۰۰۰۰۰ است [۷].

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \qquad (۳)$$

در ابتدا، گریتینگ‌های با وضوح بالا توسط موتورهای دقیق با کیفیت بالا ایجاد می‌شدند که ساخت آنها کاری سخت و زمان‌بر بود. هنری جوزف گریسون برای ساخت گریتینگ، ماشینی را طراحی کرد و در سال ۱۸۹۹ موفق به تولید گریتینگ با ۱۲۰ هزار خط در اینچ شد [۱۳]. روش دیگر برای تولید گریتینگ، استفاده از یک ژل حساس به نور است که بین دو لایه قرار می‌گیرد. این گریتینگ‌ها که گریتینگ هولوگرافی فاز حجمی[۱۰] نامیده می‌شوند، هیچ شیار فیزیکی ندارند؛ اما در عوض دارای یک مدولاسیون تناوبی از ضریب شکست داخل ژل هستند. با این کار بسیاری از اثرات پراکندگی سطح که به‌طور معمول در انواع دیگر گریتینگ‌ها دیده می‌شود، از بین می‌رود [۱۴].

از گریتینگ در تصویربرداری نوری در طول موج‌های خاص از نمونه‌های زیستی یا پزشکی استفاده می‌شود. می‌توان یک گریتینگ انعکاسی را برای تجزیه و تحلیل خاص طول موج ساطع شده از مولکول‌های سلول‌های بیمار در نمونه استفاده کرد. در فناوری‌های فیبر نوری، الیاف برای عملکرد مطلوب در طول موج‌های خاص طراحی می‌شوند. طیف وسیعی از گریتینگ‌های انعکاسی برای انتخاب طول موج برای چنین کاربردی در دسترس است [۱۵].

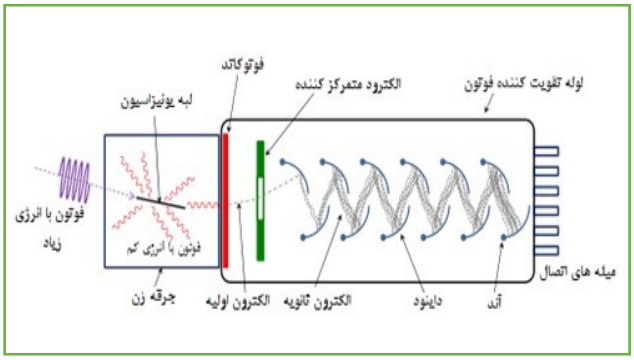
آشکارساز

لوله‌های تشدید کننده نوری[۱۱]، از خانواده لوله‌های در خلاء، آشکارسازهای فوق‌العاده حساس به نور در طول موج‌های ماوراءبنفش، مرئی و نزدیک به مادون قرمز هستند. این آشکارسازها جریان تولید شده با برخورد نور را در چندین مرحله تا ۱۰۰ میلیون برابر (۱۶۰ db) تشدید می‌کنند. به این ترتیب می‌توان حتی فوتون‌های اولیه که شار نوری کمی دارند، آشکار کرد. شکل (۵) یک PMT را نشان می‌دهد. PMT ها برای کاربردهای حساس که نیاز به تشخیص نویز کم وجود دارد، بسیار مناسب هستند [۱۶].

شکل (۵): لوله تشدید کننده نوری (PMT) [۱۶].

ساختار PMTها

PMها به‌طور معمول حاوی فوتوکاتد، چندین دایـنود و آند هستند که در محفظه شیشه‌ای خلاء شده (با استفاده از آب‌بند بسیار محکم شیشه به فلز) قرار دارند. فوتون‌ها به ماده فوتوکاتد که در داخل پنجره ورودی دستگاه قرار دارد، برخورد کرده تا الکترون‌ها را تحریک کنند. فوتوکاتد یک لایه رسانای نازک قرار داده شده به روش رسوب فاز بخار[۱۲] است. در نتیجه اثر فوتوالکتریک، الکترون‌ها از سطح فوتوکاتد خارج می‌شوند. این الکترون‌ها با الکترود متمرکز کننده به سمت تشدید کننده الکترون هدایت می‌شوند؛ جایی که الکترون‌ها با روند انتشار ثانویه تکثیر می‌شوند. تکثیرکننده الکترون از تعدادی الکترود به نام دایـنود تشکیل شده‌است. هر یک از دایـنودها با ولتاژ در حدود ۱۰۰ ولت نسبت به دایـنود قبلی در یک پتانسیل مثبت نگه داشته می‌شود. یک الکترون اولیه با انرژی فوتون ورودی حدود ۳ الکترون‌ولت، منهای تابع کار فوتوکاتد، فوتوکاتد را ترک می‌کند (شکل (۶)) [۱۶]. با ورود گروهی از فوتون‌های اولیه، گروه کوچکی از الکترون‌های اولیه ایجاد می‌شوند. الکترون‌های اولیه توسط میدان الکتریکی به سمت دایـنود اول حرکت می‌کنند. آنها هرکدام با انرژی جنبشی ۱۰۰ ev وارد هر دایـنود می‌شوند که این انرژی با استفاده از اعمال اختلاف پتانسیل فراهم می‌شود. با برخورد به دایـنود اول، الکترون‌های کم انرژی بیشتری ساطع می‌شوند و این الکترون‌ها نیز به سمت دایـنود دوم شتاب می‌گیرند. هندسه زنجیره دایـنود به‌گونه‌ای است که با تولید تعداد زیادی الکترون در هر مرحله، آبشاری از الکترون‌ها ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر در هر مرحله به طور متوسط ۵ الکترون جدید برای هر الکترون ورودی تولید شود و ۱۲ مرحله دایـنود وجود داشته باشد، در آخرین مرحله انتظار می‌رود که برای هر الکترون اولیه حدود ۱۰۸ الکترون ایجاد شود. آبشار الکترون‌ها در نهایت به آند برخورد می‌کنند. تعداد زیاد الکترون که به آند می‌رسد، منجر به یک پالس جریان تیز[۱۳] می‌شود که به راحتی قابل تشخیص است [۱۷].



شکل (۶): نمایی از یک فوتو مولتی‌پلایر تیوب (PMT) به همراه یک دستگاه جرقه‌زنی. این ترتیب برای تشخیص اشعه گاما است [۱۷].

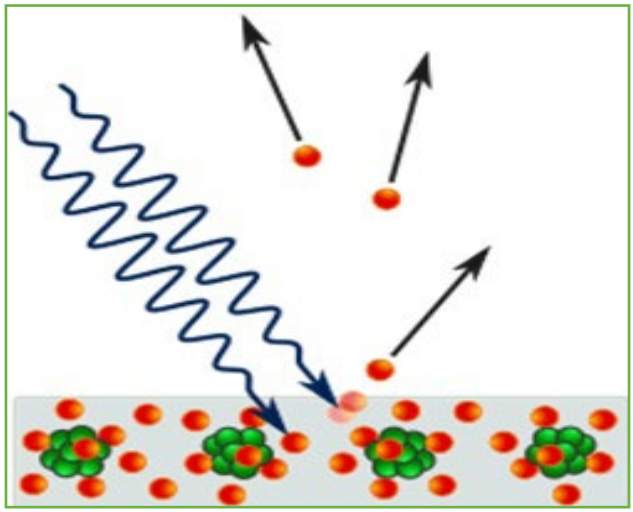
به‌طور خلاصه می‌توان گفت، فوتون‌های ورودی به یک PMT مراحل زیر را طی می‌کنند:

۱. فوتون‌ها از طریق پنجره ورودی وارد لوله می‌شوند؛
۲. فوتون‌ها، الکترون‌های روی دایـنودها را تحریک می‌کنند و باعث ساطع شدن فوتوالکترون می‌شوند؛
۳. انتشار ثانویه روی هر دایـنود چندین بار تکرار می‌شود؛
۴. الکترون‌های ثانویه از آخرین دایـنود روی آند تجمع می‌کنند؛
۵. یک جریان تیز با آشکارسازهای الکترونیکی، آشکار می‌شود [۱۸].

PMT با دو پدیده علمی مستقل به نام اثر فوتوالکتریک و انتشار ثانویه کار می‌کند. در ادامه در مورد این دو پدیده بحث خواهد شد.

اثر فوتوالکتریک

هنگامی که یک فوتون به فوتوکاتد برخورد می‌کند، الکترون‌های داخل ماده می‌توانند مقداری از انرژی فوتون‌ها را به دست آورند و تحریک شوند و به‌عنوان یک الکترون تحریک شده درون ماده نفوذ می‌کنند. ممکن است این الکترون‌ها به سطح ماده برسند. الکترون‌هایی که انرژی‌شان از تابع کار ماده بیشتر است، در خلاء رها می‌شوند. الکترون‌هایی که به این روش ساطع می‌شوند، فوتوالکترون نامیده می‌شوند. شکل (۷) انتشار الکترون از یک صفحه فلزی را نشان می‌دهد. انتشار الکترون‌های رسانشی از فلزات به یک مقدار الکترون ولت (eV) کوانتای نوری (نور مرئی با طول موج کوتاه یا اشعه ماوراءبنفش) نیاز دارد [۱۹ و ۲۰].



شکل (۷): انتشار الکترون از یک صفحه فلزی ناشی از کوانتای نوری - فوتون‌ها [۲۱].

از نظر تاریخی، اثر فوتوالکتریک با آلبرت اینشتین در ارتباط است که با تکیه بر این پدیده اصول مکانیک کوانتوم را در سال ۱۹۰۵ بوجود آورد؛ دستاوردی که در سال ۱۹۲۱

منجر به کسب جایزه نوبل برای وی شد [۱۹]. در تئوری الکترومغناطیسی کلاسیک، اثر فوتوالکتریک به انتقال انرژی از امواج نوری پیوسته به یک الکترون نسبت داده می‌شود. در این تئوری، تغییر در شدت نور باعث تغییر انرژی جنبشی الکترون‌های ساطع شده می‌شود و نور با شدت کم باعث تاخیر در انتشار می‌شود؛ در نتیجه نیاز است تا الکترون‌ها انرژی کافی برای ترک مواد را جمع کنند. نتایج تجربی، با این نظریه مغایرت دارد. این نتایج نشان می‌دهند که الکترون‌ها تنها در مواقعی که نور از فرکانس آستانه‌ای فراتر رود، جابجا می‌شوند. کمتر از این مقدار، بدون توجه به شدت نور یا مدت زمان قرار گرفتن در معرض نور، هیچ الکترونی از ماده ساطع نمی‌شود. از آنجا که پرتوی با فرکانس پایین نمی‌تواند انرژی مورد نیاز برای تولید فوتوالکترون‌ها را مانند انرژی نور از یک موج مداوم ایجاد کند، اینشتین پیشنهاد کرد که پرتو نور، موجی نیست که در فضا پخش می‌شود، بلکه مجموعه‌ای از امواج گسسته – فوتون‌ها است [۲۰ و ۲۱].

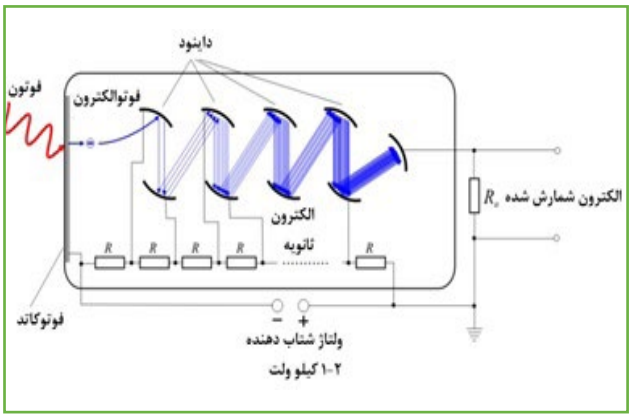
انتشار ثانویه

استفاده از انتشار ثانویه برای تقویت سیگنال‌ها پس از جنگ جهانی اول توسط جوزف اسلپیان در سال ۱۹۱۹ پیشنهاد شد. تقویت جریان نوری در دستگاه‌های تشدید کننده نوری از طریق انتشار ثانویه انجام می‌شود [۲۲].

انتشار ثانویه در فیزیک پدیده‌ای است که طی آن، ذرات اولیه با انرژی کافی هنگامی که به یک سطح برخورد یا از آن عبور می‌کنند باعث انتشار الکترون می‌شوند که به آن الکترون ثانویه گفته می‌شود. در این حالت، تعداد الکترون‌های ثانویه ساطع شده در هر ذره اتفاقی را بازدهی انتشار ثانویه می‌نامند. از انتشار الکترون ثانویه در لوله‌های تشدید کننده نوری و لوله‌های تقویت کننده تصویر استفاده می‌شود تا تعداد کمی فوتوالکترون تولید شده توسط انتشار عکس را تقویت کرده و باعث حساسیت بیشتر لوله شود [۲۲]. برای استفاده از انتشار ثانویه به‌عنوان یک سازوکار تشدید کننده برای فوتوالکترون‌ها، الکترون‌های اولیه نیاز به شتاب گرفتن دارند. نیروی محرکه شتاب توسط یک میدان الکتریکی بین دو دینود تولید می‌شود. میدان الکتریکی و متعاقب آن، مسیرهای الکترونی به شکل دینود بستگی دارد. شکل (۸) سازوکار انتشار ثانویه در PMT را نشان می‌دهد [۲۳].

برای بهینه‌سازی انتشار ثانویه، الکترود ساخته شده از فولاد زنگ نزن، مس-بریلیم یا نیکل، توسط ماده‌ای که ساطع کننده ثانویه نامیده می‌شود، پوشش داده می‌شود. این مواد شامل آنتیمونید فلزات قلیایی، اکسید بریلیم، اکسید منیزیم، فسفید گالیوم و فسفید آرسنید-گالیوم است [۱۸].

از PMTها همراه با دستگاه‌های جرقه‌زنی برای تشخیص تشعشع یونیزاسیون در آزمایش‌های فیزیک، در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی برای اندازه‌گیری شدت و طیف مواد ساطع کننده نور مانند نیمه‌هادی‌های مرکب، در دستگاه‌های آنالیز خون مورد استفاده در آزمایشگاه‌های پزشکی و همچنین در دوربین گاما نیز استفاده می‌شود [۱۸].



شکل (۸): انتشار ثانویه مورد استفاده در یک لوله نوری: الکترون‌های اولیه ساطع شده، هنگامی که نور با فوتوکاتد (اولین دینود) برخورد می‌کند، ساخته می‌شوند و این الکترون‌ها، الکترون‌های بیشتری را هنگامی که به دینود دوم برخورد می‌کنند، ایجاد می‌کنند. هر الکترون برخوردی، الکترون‌های ثانویه متعددی را تولید می‌کند [۲۳].

قطر آشکارسازهای بعضی از دستگاه‌ها ۲۸ mm است که دارای پوششی از جنس کوارتز هستند. به‌منظور جلوگیری از تخلیه هاله‌ای[۱۴] و سرویس راحت‌تر، بیرون محفظه خلاء قرار گرفته‌اند.

پرتوهای متفرق شده قبل از ورود به PMTها، از دریچه‌های ثانویه‌ای که برای هر PMT تعبیه شده‌است، عبور می‌کنند. تعداد و اندازه این دریچه‌ها عبارتست از: ۱ عدد ۲۰ µm، ۱۸ عدد ۲۵ µm، ۸ عدد ۳۷ µm و ۷ عدد ۵۰ µm [۵].

نتیجه‌گیری

کوانتومتر دستگاهی برای آنالیز نمونه‌های جامد فلزی است که از فناوری طیف نشر نوری استفاده می‌کند. این دستگاه به‌صورت تک پایه و چند پایه قابل طراحی است. این دستگاه می‌تواند آنالیز نمونه را در کمتر از ۴۰ ثانیه با دقت بالا انجام دهد. صحت نتایج این دستگاه به کالیبراسیون صحیح آن بستگی دارد. در بعضی از مدل‌های دستگاه از آشکارسازهای PMT برای آنالیز فلزات استفاده می‌کند که مناسب آنالیز عناصر با درصد جرمی بسیار کم است. آنالیز عنصر پایه از تفریق حاصل جمع ناخالصی‌ها از صد بدست می‌آید. این دستگاه مشابه با سایر تجهیزات مجهز به OES، از سه بخش اصلی تشکیل شده‌است که عبارتست از: منبع تغذیه برای تهییج، جداکننده پرتوها و آشکارساز.

پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مواد، کارشناس آزمایشگاه شمش آلومینیوم شرکت آلومینای ایران

2. Optical Emission Spectroscopy (OES)
3. Induced Couple Plasma (ICP)
4. Direct Current Plasma (DCP)
5. Microwave Plasma (MP)
6. Laser Induced Plasma (LIP)
7. Thermo Fisher
8. Charge-Coupled Detector
9. Pre-Integration
10. Volume Phase Holographic Grating (VPH)
11. Photomultiplier Tube (PMT)
12. vapor-deposited
13. spike
14. Corona-discharge

مراجع

[1] Langheinrich, A. P., Blair Roberts, D., (1971). Modern Methods of Geochemical Analysis; chapter 7. Plenum Press, New York.

[2] Kirchhoff, G., Bunsen, R., (1860). Chemical Analysis by Means of Spectral Observations. Annual. Physic Chem. 110, 161.

[3] Richtmyer, F. K., Kennard, E. H., Lauritsen, T., (1955). Introduction to Modern Physics. McGraw-Hill, New York.

[4] Harrison, G. R., (1939). Wavelength Tables. John Wiley & Sons, New York.

[5] ARL3460 Manual

[6] Magnusson, R., (2017). Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition).

[7] Burgess, C., (2005). Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition).

[8] Srinivasarao, M., (1962). Nano-Optics in the Biological World: Beetles, Butterflies, Birds, and Moths. Chemical Reviews, 99 (7): 1935–1962.

[9] Kinoshita, S., Yoshioka, S., Miyazaki, J., (2008). Physics of structural colors. Reports on Progress in Physics. 71 (7).

[10] Gregory, J., Jordan, S., (1841). Correspondence of Scientific Men of the Seventeenth Century. Oxford University Press. pp 251–255.

[11] Hopkinson, F., Rittenhouse, D., (1786). An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse. Transactions of the American Philosophical Society, (2) 201–206.

[12] Klaus, H., (1890). The Discovery of the Redshift of Solar Fraunhofer Lines by Rowland and Jewell in Baltimore around. Historical Studies in the Physical and Biological Sciences. 23 (2): 219–277.

[13] Richard, F., (1985). The Strange Theory of Light and Matter. Princeton University Press. ISBN 978-0691083889.

[14] Zhida, X., Kevin, H., Ibrahim, K., (2014). Liquid refractive index sensing independent of opacity using an optofluidic diffraction sensor. Optics Letters. 39 (20): 6082–6085.

[15] George, S., (2000). the Command of Light: Rowland's School of Physics and the Spectrum. Philadelphia. American Philosophical Society, ISBN 978-08716-923-82.

[16] Photonics, H., (2004). Photomultiplier Tubes Basics and Applications.

[17] Hamamatsu, H., (2006). Photomultiplier Tubes. Construction and Operating Characteristics. Connections to External Circuits, 39 (29).

[18] Polyakov, S. V., (2013). Experimental Methods in the Physical Sciences, Chapter 3- Photomultiplier Tubes. 45: 69-82.

[19] Hertz, H., (1887). About the influence of ultraviolet light on the electrical discharge. Annals of Physics. 267 (8): 983–1000.

[20] Julius, E., Hans, G., (1889). About the discharge of negative electrical bodies by sunlight and daylight. Annals of Physics, 274 (12): 497.

[21] Einstein, A., (1905). About a heuristic point of view concerning the identity and transformation of light. Annals of Physics, 322 (6): 132–148.

[22] Bruining, H., (1954). Physics and applications of secondary electron emission. McGraw-Hill Book Co., Inc.

[23] Kollath, R., (1956). Secondary electron emission of solids irradiated by electrons, Encyclopedia of Physics, Vol. 21, p. 232 – 303.

نویسندگان
بهزاد ناطق‌پور[1*]
محسن آقابابایی[1]
*behzad.nateghpour@gmail.com

برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی سنگ

واژه‌های کلیدی
برش مستقیم سنگ، دستگاه بزرگ مقیاس برش آزمایشگاهی سنگ، مقاومت برشی بتن غلتکی، مقاومت برشی شاتکریت.

چکیده

رفتار مکانیکی یک توده سنگ به‌طور عمده تحت تأثیر ناپیوستگی‌های موجود است. سازه‌های ژئوتکنیکی نزدیک سطح آزاد، مانند پی سدها، نیروگاه‌ها، سطوح شیبدار و دیوار تونل‌ها، به شدت متأثر از خواص این ناپیوستگی‌ها است؛ به‌خصوص زمانی که ماده سنگ از مقاومت بالایی برخوردار باشد، این تأثیر شدت می‌یابد. آزمایش برش مستقیم، رایج‌ترین آزمایش برای بدست آوردن عوامل مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها بوده که مفیدترین اطلاعات برای تحلیل و برآورد پروژه‌های مهندسی سنگ از طریق آن فراهم می‌شود. همچنین یکی از عوامل مهم در سدهای بتن غلتکی، مقاومت برشی درز بین لایه‌های بتن است. این عامل از آزمایش برش مستقیم روی مغزه‌های بتنی حفر شده در بدنه سد بتن غلتکی به دست می‌آید. در بین آزمایش‌های برش مستقیم، دقیق‌ترین آزمایش، برش مستقیم برجا است؛ اما با این وجود، به دلیل هزینه بالای انجام این آزمایش یا در برخی موارد، عدم دسترسی به محل برای انجام آزمایش، به‌طور عمده از روش‌های آزمایشگاهی آزمایش برش مستقیم استفاده می‌شود. آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی نیز در دو مقیاس کوچک و بزرگ قابل انجام است. در مواقعی که پروژه در دست مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار باشد، با بهره‌گیری از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی می‌توان شبیه‌سازی بهتری از روش برجا ایجاد نمود و نتایج دقیق‌تری بدست آورد. امروزه بیشتر آزمایش‌هایی که اهمیت کمتری دارند توسط دستگاه‌های برش کوچک مقیاس انجام می‌گیرند. در این راستا، به‌منظور بدست آوردن نتایج آزمایشگاهی هر چه دقیق‌تر نسبت به روش برجا و با هزینه‌ای به مراتب کمتر، شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد اقدام به ساخت دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاهی نموده است. این دستگاه که در نوع خود بی‌نظیر است، قابلیت آزمایش نمونه‌ای تا ابعاد ۳۵ × ۳۵ سانتی‌متر را داراست.

مقدمه

رفتار توده سنگ‌ها بیشتر با حضور ناپیوستگی‌ها یا صفحات ضعف که بلوک‌های سنگی در توده سنگ را از هم جدا می‌سازند، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این صفحات شامل صفحات لایه‌بندی، درزه‌ها، نواحی برشی[۲] و گسل‌ها است. به‌طور کلی، برای طراحی هر سازه یا پی سنگی، به‌منظور پایدارسازی و دست‌یابی به شرایط ایمن، باید به این ناپیوستگی‌ها توجه نمود. همچنین به‌طور خاص در اعماق کم که مقدار تنش‌ها پایین است، رفتار توده سنگ بیشتر براساس لغزش روی این سطوح ضعف کنترل می‌شود. بنابراین، فهم جنبه‌های مختلف این ناپیوستگی‌ها بسیار مهم است [۱].

یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های یک ناپیوستگی، مقاومت برشی سطح آن است. تعیین مقدار مقاومت برشی با قابلیت اعتماد و صحت بالا از مسائل مهم مهندسی سنگ است. این مسئله در طراحی شیروانی‌های سنگی به حالت بحرانی می‌رسد، چرا که تغییرات بسیار کم در مقاومت برشی ممکن است به تعیین اشتباه ارتفاع ایمن یک شیروانی منجر شود که لطمه‌های اقتصادی و جانی به همراه خواهد داشت. همچنین مقاومت برشی یکی از خواص مهم بتن در سدهای بتن غلتکی[۳] نیز بوده و به‌طور معمول با معیار موهر-کلمب که بر پایه چسبندگی و مقاومت اصطکاکی است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. عامل مقاومت برشی در بتن غلتکی شامل مقاومت برشی توده بتن و مقاومت برشی ناپیوستگی بین لایه‌ها می‌شود. تعیین عوامل مقاومت برشی شبیه به روش رایج در مهندسی سنگ است [۲].

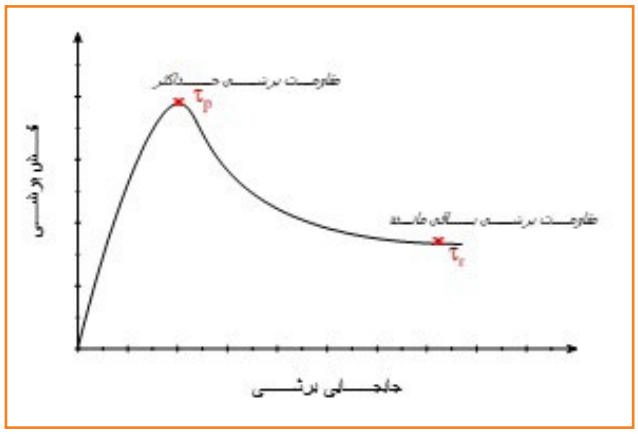
شاتکریت[۴] نوعی بتن مرکب از سیمان، ماسه و خرده سنگ است که به کمک هوای فشرده اجرا شده و در اثر سرعت زیاد به‌صورت دینامیکی فشرده می‌شود. از آنجا که شاتکریت به بیشتر سنگ‌ها به‌خوبی می‌چسبد، لذا لایه نازکی از آن به شکل سطحی مقاوم به‌منظور تقویت سطوح به‌کار گرفته می‌شود؛ به این ترتیب، ترکیبی از سنگ و سطح تقویت شده به‌وجود آمده که بارهای وارده را به‌صورت مقاومت‌های چسبندگی و برشی، به سنگ‌های پایدار مجاور منتقل می‌سازد. به‌علاوه مقاومت برشی مناسب شاتکریت منجر به جلوگیری هر چه ایمن‌تر سقوط قطعات سست سنگی می‌شود [۳]؛ بنابراین، اطلاع از مقدار مقاومت برشی شاترکریت از اهمیت بالایی برخوردار است. لازم به ذکر است که این عامل مقاومتی نیز همانند بتن غلتکی از روش رایج تعیین مقاومت برشی در مهندسی سنگ به‌دست می‌آید.

به‌طور کلی، بررسی و مطالعه خواص ناپیوستگی‌های سنگی از دو روش آزمون‌های صحرایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی، صورت می‌گیرد. در حال حاضر، با وجود اینکه نتایج آزمایش‌های صحرایی به واقعیت نزدیک‌تر هستند اما به دلیل دشواری انجام آزمایش‌های صحرایی و قیمت بسیار بالای تجهیزات و خدمات، از این روش فقط در پروژه‌های بسیار گران قیمت و حساس استفاده می‌شود. بنابراین، مطالعه ناپیوستگی‌ها در بیشتر پروژه‌ها از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. حال، روش برش آزمایشگاهی نیز به دو طریق بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس تقسیم‌بندی می‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقیاس نمونه انتخابی بر نتایج آزمایش برش تأثیرگذار است. بنابراین، انتخاب نمونه بزرگ مقیاس و نیروی اعمالی مشابه با شرایط واقعی برای دست‌یابی به نتایج هر چه دقیق‌تر ضروری به نظر می‌رسد و این امر مستلزم به کارگیری تجهیزات برش بزرگ مقیاس متناسب با این نمونه‌ها است.

آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی

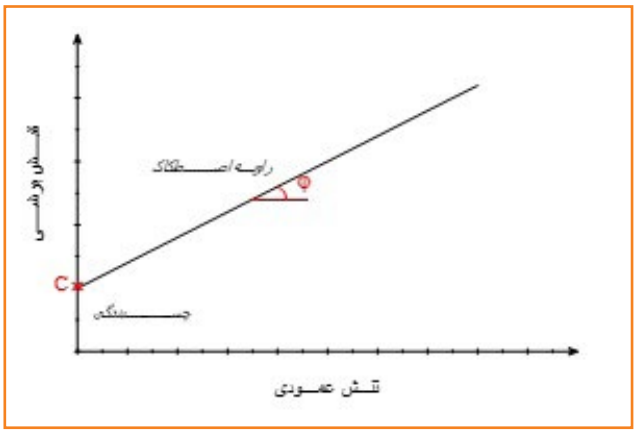
آزمایش برش سنگ

آزمایش برش مستقیم برای تعیین ویژگی ناپیوستگی‌ها به کار گرفته می‌شود. در این آزمایش به‌طور معمول بار ثابتی به‌صورت عمود (σ) بر ناپیوستگی اعمال شده و نیروی برشی برای ایجاد جابه‌جایی در امتداد ناپیوستگی به نمونه اعمال می‌شود. با اندازه‌گیری همزمان مقدار جابه‌جایی‌های قائم، افقی سطح ناپیوستگی و مقدار نیروی برشی (τ) و ترسیم آنها در نمودار تنش برشی-جابه‌جایی برشی، می‌توان مقاومت برشی بیشینه مقدار و مقاومت برشی سطح ناپیوستگی را محاسبه نمود (شکل (۱)).



شکل (۱): نمودار کلی مقاومت برشی-جابه‌جایی برشی برای یک درزه طبیعی.

چنانچه مقادیر مقاومت برشی نهایی به‌دست آمده در آزمایش‌های مختلف نسبت به تنش قائم ترسیم شود، یک منحنی تقریباً خطی به‌دست می‌آید که مطابق با معیار موهر-کلمب، شیب آن نشانگر زاویه اصطکاک حداکثر (φ) و عرض از مبدأ آن نشانگر چسبندگی سطح برش (C) است (شکل (۲)).



شکل (۲): نمودار کلی رفتار تنش برشی-تنش نرمال مطابق با معیار موهر-کلمب.

به این ترتیب مقاومت برشی نهایی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۴]:

$$\tau = C + \sigma \tan(\varphi) \qquad (۱)$$

چنانچه مقاومت برشی ماندگار بر حسب تنش قائم ترسیم شود، رابطه‌ای خطی به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\tau_r = \sigma \tan(\varphi_r) \qquad (۲)$$

مطالب بالا در مورد ناپیوستگی‌هایی که به‌طور مصنوعی روی سنگ ایجاد می‌شود، صادق است، اما سطح ناپیوستگی طبیعی دارای زبری و ناصافی‌های زیادی است که باعث تغییر رفتار سنگ می‌شود. تأثیر زبری ناپیوستگی را می‌توان با استفاده از مدلی که توسط پاتون ارائه شده مورد بررسی و تحلیل قرار داد. در این مدل زبری سطح تحت عامل «i» معرفی شده‌است و مدل رفتاری به‌صورت زیر بیان می‌شود:

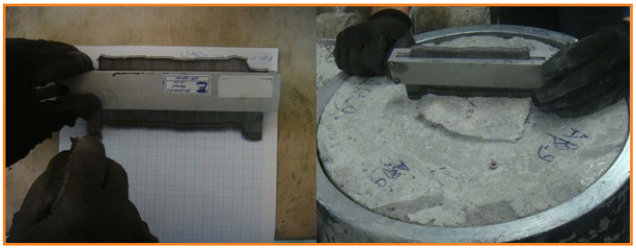
$$\tau = \sigma \tan(\varphi + i) \qquad (۳)$$

این رابطه تا زمانی‌که پدیدهٔ اتساع در برش رخ می‌دهد می‌تواند معتبر باشد. اما با بالا رفتن تنش قائم بر سطح ناپیوستگی و افزایش تنش برشی، دیگر لغزش روی سطوح شیب‌دار دندانه‌ها اتفاق نمی‌افتد؛ در این حالت، تنش برشی باعث بریده شدن دندانه‌ها شده و برش روی ماده سنگی بکر اتفاق می‌افتد. انتقال از حالت اتساع به برش توسط لادانی و آرشامبولت مورد مطالعه قرار گرفت. بارتون (۱۹۷۲) براساس آزمایش‌های دقیقی که روی ناپیوستگی‌های زبر مصنوعی انجام داد، روش دیگری را برای پیش‌بینی مقاومت برشی ناپیوستگی‌های زبر ارائه نمود. رابطه زیر توسط بارتون پیشنهاد شد [۵]:

$$\tau = \sigma_n \tan[\varphi_r + JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n}] \qquad (۴)$$

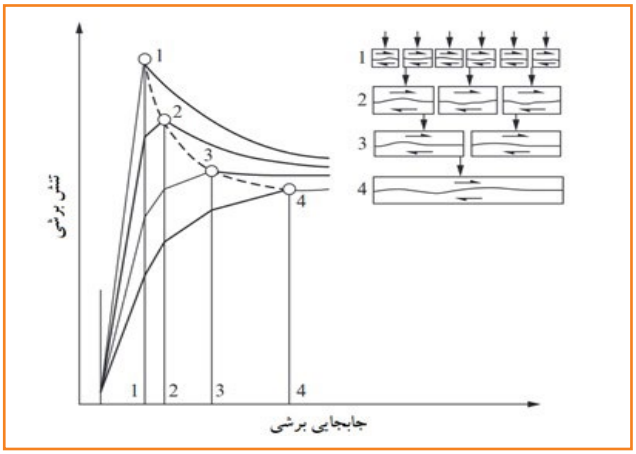
که در آن: JRC ضریب زبری ناپیوستگی بوده و از صفر برای سطوح کاملاً صاف تا ۲۰ برای سطوح خیلی زبر تغییر می‌کند، JCS مقاومت فشاری مؤثر دیواره ناپیوستگی و φr زاویه اصطکاک ماندگار است.

در مواردی که سطح ناپیوستگی هوازده نباشد JCS برابر با مقاومت فشاری سنگ بکر در نظر گرفته می‌شود. همچنین روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[۵] برای تعیین JCS مبنی بر استفاده از چکش اشمیت است. ضریب زبری ناپیوستگی با استفاده از مقایسه ظاهر ناپیوستگی در امتداد برش با پروفیل‌های استاندارد منتشر شده توسط بارتون و چوبی (۱۹۷۷) به‌دست می‌آید [۶]. ظاهر ناپیوستگی نیز به کمک شانه بارتن ترسیم می‌شود (شکل (۳)).



شکل (۳): استفاده از شانه بارتن برای رسم پروفیل سطح درزه و محاسبه JRC.

بارتن و چوبی نشان دادند که JRC و JCS به‌صورت معناداری تحت تأثیر مقیاس هستند؛ به‌طوری که با افزایش طول ناپیوستگی، سطح تماس دیواره‌ها افزایش یافته و به همان نسبت نقطه بیشینه مقدار نمودار مقاومت برشی-جابجایی برشی ملایم‌تر می‌شود (شکل (۴)).



شکل (۴): تأثیر مقیاس بر مقاومت برشی حداکثر [۸].

نتیجه افزایش سطح تماس دیواره‌ها، کاهش مقادیر JRC و JCS و به‌دنبال آن، کاهش مقاومت نهایی برشی با افزایش مقیاس است. بارتن و بندیس در سال ۱۹۸۲ ضرایب تصحیح زیر را به‌منظور تعمیم نتایج آزمایشگاهی به حالت واقعی ارائه کردند [۷]:

$$JRC_n = JRC_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02JRC_0} \quad (۵)$$

$$JCS_n = JCS_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03JRC_0} \quad (۶)$$

در این روابط: ۰ و n به ترتیب مربوط به مقیاس آزمایشگاهی (نمونه با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر) و بلوک‌های برجا هستند.

آزمایش برش شاتکریت

شاتکریت کاربرد گسترده‌ای در کارهای عمرانی و معدنی داشته و از آن با هدف نگهداری موقت و یا نهایی استفاده می‌شود. اولین نقش شاتکریت که شاید موثرترین نقش آن نیز باشد، جلوگیری از ریزش بلوک‌های کوچک و به دنبال آن بلوک‌های بزرگ و گسترش شکستگی بوده و تعامل واقعی بین سنگ و شاتکریت بسیار پیچیده است. با این حال تعامل بین سنگ و شاتکریت وابسته به مقاومت و خواص مکانیکی حاکم بر سطح ناپیوستگی است. مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی به‌منظور تعیین مقاومت و سختی بین شاتکریت و سنگ به کار می‌رود، به‌طوری که آزمون برش مستقیم مکمل آزمون‌های کششی و فشارشی شاتکریت و سنگ است. همچنین حالت خاصی از این آزمایش، بررسی عوامل سطح دو شاتکریت بوده که در بازه‌های زمانی متفاوت اجرا شده‌اند. در این آزمایش به‌منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر، بار قائم بسیار پایینی انتخاب می‌شود. ازجملهٔ ویژگی‌های اصلی که بر مقاومت سطح ناپیوستگی سنگ و شاتکریت تأثیرگذار هستند می‌توان از سختی، چسبندگی و زاویه اصطکاک نام برد. انجام این نوع آزمایش شبیه به آزمون برش در سنگ بوده و متأثر از مقیاس است. با توجه به اینکه اندازه نمونه‌های این آزمایش قطری بیش از ۱۸ سانتی‌متر دارند، لذا آزمایش این نمونه‌ها مستلزم به‌کارگیری دستگاه برش بزرگ مقیاس است [۹].

آزمایش برش آزمایشگاهی بتن غلتکی

بتن متراکم شده با غلتک یا بتن غلطکی، بتنی با اسلامپ صفر بوده که با ارتعاش توسط غلتک‌ها محکم و سفت می‌شود. کاربرد عمده این نوع بتن در سدسازی و راهسازی است. در سدهای بتن غلتکی، حجم عظیم بتن‌ریزی و اجرای آن در چند مرحلهٔ متوالی، موجب می‌شود تا ناپیوستگی‌هایی در سازه بتنی سد به وجود آید. مقدار مقاومت برشی در محل ناپیوستگی بین لایه‌ها، مقداری تعیین کننده در طراحی است. مقاومت برشی بتن غلتکی در محل ناپیوستگی بین لایه‌ها ممکن است کمتر از مقادیر نظیر آن در بتن حجیم متعارف باشد و همچنین این احتمال وجود دارد که در پروژه‌های مختلف، بسیار متغیر باشد. باید توجه داشت که مقدار چسبندگی از سطح یک لایه تا سطح لایه دیگر به مقدار زیادی تغییر می‌کند در حالی که مقدار زاویه اصطکاک معمولاً در همه سطوح کاملا یکسان است [۲].

دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

همانگونه که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، استفاده از دستگاه برش بزرگ مقیاس دارای اهمیت فراوانی است. شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد با تکیه بر دانش مهندسی و توان فنی خود اقدام به طراحی و ساخت اولین دستگاه برش بزرگ مقیاس سنگ در ایران نموده و در پروژه‌های عمرانی متعددی به‌کار برده است. این دستگاه قابلیت اعمال فشار ۱۰۰ مگاپاسکال در راستای قائم و موازی سطح برش را دارا بوده و با مجهز بودن به حسگرهای متعدد، مقادیر فشار و جابه‌جایی به‌صورت کاملاً دیجیتال و پیوسته ثبت می‌شوند. در محفظه برش این دستگاه، امکان جای‌گیری نمونه‌ای که ابعاد آن ۳۵ × ۳۵ سانتی‌متر است، وجود دارد. قالب‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌ها با قالب‌های مخصوص این دستگاه و با ملات سیمان انجام می‌گیرد (شکل (۵)).

شکل (۵): نمایی از دستگاه برش بزرگ مقیاس و تجهیزات جانبی.

نمونه‌ای از مغزه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر که برای انجام آزمایش انتخاب شده و همچنین پس از آماده‌سازی در شکل (۶) نشان داده شده‌است.

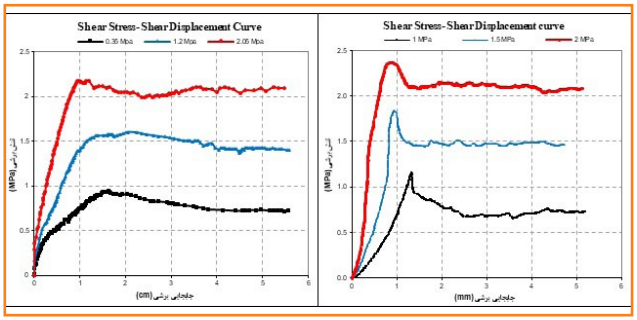
شکل (۶): مغزه سنگ دارای درزه طبیعی با قطر ۱۵ سانتی‌متر (سمت راست)، درزه طبیعی پس از قالب‌گیری و آماده‌سازی برای انجام آزمایش برش مستقیم (سمت چپ).

از جمله مزایای دیگر آزمایش نمونه‌های بزرگ، اندازه‌گیری مقدار JRC در چند راستا است (شکل (۷)). در نمونه‌های کوچک مقیاس به‌طور معمول، به دلیل محدودیت سطح برش، تنها یک JRC در راستای برش اندازه‌گیری می‌شود. اما از آنجایی که مقدار JRC در عرض نمونه نیز در حال تغییر است، لذا محاسبه چند JRC در راستای برش و در نظر گرفتن مقدار میانگین آن سبب بهبود ارزیابی هر چه بهتر این عامل کلیدی برای سنگ مورد آزمایش می‌شود.

شکل (۷): اندازه‌گیری سه مقدار JRC در راستای برش برای یک نمونه بزرگ مقیاس.

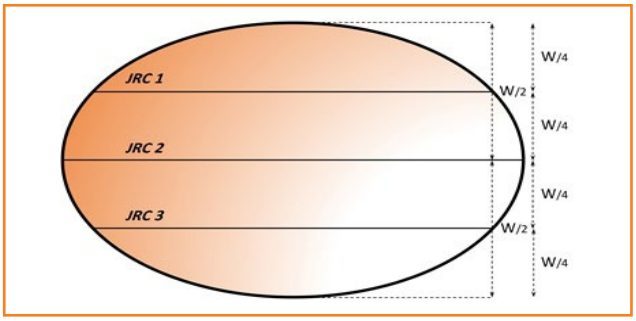
مقایسه نتایج برش مستقیم بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس

مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش (۲-۱)، اثر مقیاس در نمودار تنش برشی-جابجایی برشی قابل مشاهده است. در شکل (۸) نمودار تنش برشی-جابجایی برشی برای دو نمونه کوچک و بزرگ مقیاس نمایش داده شده‌است؛ رفتار این نمونه‌ها که به‌ترتیب از مغزهٔ ۴۸ میلی‌متری و ۱۵۰ میلی‌متری، اگرچه از لحاظ فرم کلی شبیه به‌هم هستند اما تفاوتی اساسی دارند؛ در واقع، نقطهٔ تنش برشی حداکثر در نمونه بزرگ مقیاس نسبت به نمونه کوچک مقیاس، پهن شدن است و از حالت نوک تیز خارج شده‌است.



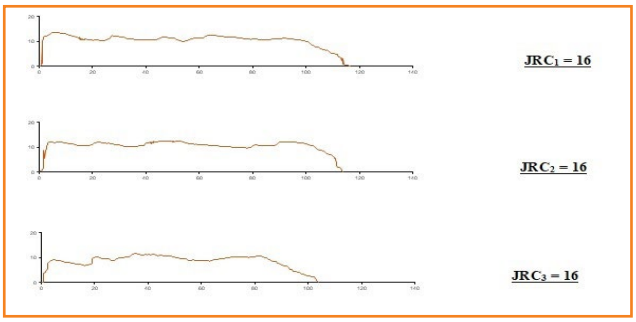
شکل (۸): نمودار تنش برشی-جابجایی برشی مربوط به نمونه‌ای که از مغزهٔ ۴۸ میلی‌متری تهیه شده‌است (سمت راست) و نمودار تنش برشی-جابجایی برشی مربوط به نمونه‌ای که از مغزهٔ ۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده‌است (سمت چپ).

در صورتی که سطح یک نمونه درزه به‌طور ایده‌آل یک بیضی فرض شود، می‌توان در فواصل یکسان عرضی، از هر سطح سه عدد JRC در راستای برش برای آن سطح محاسبه نمود (شکل (۹)).



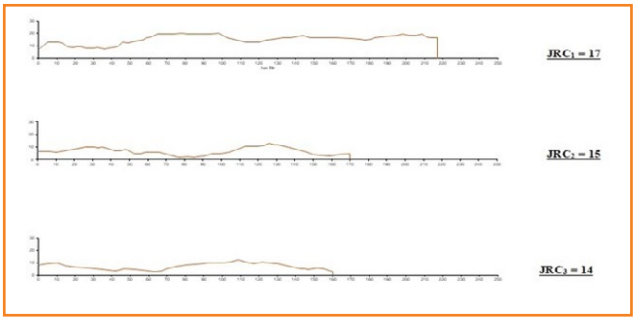
شکل (۹): نمایی از چگونگی اندازه‌گیری چند JRC روی یک سطح درزه.

پروفیل‌های JRC و مقادیر آنها که مربوط به یک درزه طبیعی در مغزه‌ای با قطر ۴۸ میلی‌متر بوده، در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است.



شکل (۱۰): پروفیل مربوط به نمونه‌ای که از مغزهٔ ۴۸ میلی‌متری تهیه شده‌است (حالت قبل از انجام آزمایش برش مستقیم).

همچنین در شکل (۱۱) پروفیل‌های JRC و مقادیر آنها برای درزهٔ طبیعی موجود در مغزه ۱۵۰ میلی‌متری نشان داده شده‌است. با مقایسه پروفیل‌های مربوط به مغزه ۴۸ میلی‌متری (نمونه کوچک مقیاس) و پروفیل‌های مربوط به مغزه ۱۵۰ میلی‌متری (نمونه بزرگ مقیاس)، مشخص می‌شود که تغییرات JRC در نمونه کوچک مقیاس بسیار محدود و در بعضی موارد صفر است (مانند نمونهٔ مثال زده شده در شکل (۱۰))؛ اما تغییرات میزان JRC برای نمونه بزرگ مقیاس قابل چشم‌پوشی نیست (برای نمونه مثال زده شده در شکل (۱۱) تا سه عدد متفاوت است).



شکل (۱۱): پروفیل مربوط به نمونه‌ای که از مغزهٔ ۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده‌است (حالت قبل از انجام آزمایش برش مستقیم).

مطالعات انجام شده با استفاده از دستگاه برش بزرگ مقیاس

از زمان ساخت دستگاه برش بزرگ مقیاس توسط شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد تاکنون، از این دستگاه در انجام مطالعات پروژه‌های عمرانی متعددی استفاده شده‌است. از جمله مهمترین این پروژه‌ها می‌توان به پروژه‌های سد پیرتقی، سد خرسان «۲»، سد چم‌شیر، سد آزاد و سد شفارود، اشاره نمود. در جدول شماره (۱)، اطلاعاتی در خصوص این پروژه‌ها و تعداد آزمایش‌های انجام شده برای هر یک از آنها توسط دستگاه برش بزرگ مقیاس ارائه شده‌است.

جدول (۱): مشخصات کلی پروژه‌های مورد مطالعه توسط شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد برای انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی [۱۰].

پروژه	نوع سازه	محل	ظرفیت اسمی نیروگاه	تعداد آزمایش‌های برش بزرگ مقیاس
سد پیرتقی	بتنی قوسی	در فاصله‌ای حدود ۵۰ کیلومتری شرق میانه و ۴۵ کیلومتری جنوب‌غرب خلخال، روی رودخانه قزل‌اوزن در استان اردبیل واقع شده است.	۱۶۰ مگاوات	۲۲
سد خرسان «۲»	بتنی دو قوسی	در جنوب باختری لردگان، در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است	۵۸۰ مگاوات	۳۵
سد چم‌شیر	بتن غلتکی	در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر دوگنبدان (گچساران)، مرکز شهرستان گچساران، استان کهگیلویه و بویر احمد واقع شده است	۱۷۶ مگاوات	۲۱
سد آزاد	خاکی با رویه سنگریزه‌ای	در ۷۵ کیلومتر غرب شهرستان سنندج واقع شده است	۵۰۰ مگاوات	۳۰
سد شفارود	بتن غلتکی	در غرب گیلان، در فاصله ۲/۵ کیلومتری شهرستان رضوانشهر و ۶۵ کیلومتری کلان شهر رشت واقع شده است	۶۰/۷ مگاوات	۱۲

نتیجه‌گیری

امروزه با وجود استانداردهای متعدد در مهندسی سنگ که چگونگی ابعاد و اندازه نمونه مناسب برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی را تعریف کرده‌اند، اما هنوز اثر مقیاس نمونه از نتایج آزمایش حذف نشده‌است. البته در بیشتر موارد با رعایت حداقل ابعاد لازم برای انجام آزمایش می‌توان تا حد امکان از هزینه‌ها کاست و به نتایجی با دقتی نسبی دست یافت. با این حال، در مواقعی که آزمایش‌ها مربوط به سازه‌ای باشد که از اهمیت بالایی برخوردار بوده و دقت به‌خصوصی مورد نظر است، با فاصله گرفتن از ابعاد حداقلی می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت؛ به‌طوری که با افزایش اندازهٔ نمونه شبیه‌سازی بهتری از حالت برجا و واقعی نمونه سنگی صورت می‌گیرد. از طرفی، اگر افزایش اندازه نمونه به‌گونه‌ای باشد که انجام آزمایش در آزمایشگاه ممکن باشد، قطعاً دقت مورد نظر با هزینه‌ای کمتر از آزمایش‌های برجا برآورده می‌شود.

آزمایش برش مستقیم از جمله مهمترین آزمایش‌های مقاومتی برای مصالح سنگی بوده که به‌طور خاص به مقیاس وابسته است. با توجه به نیاز برآورد دقیق مقاومت برشی مصالح سنگی و بتن برای پروژه‌های عظیم عمرانی در سطح ملی، شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد اقدام به ساخت دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس نموده است. نتایج به‌دست آمده از این دستگاه که ابعاد نمونه‌های آن تا ۷ برابر بزرگتر از نمونه‌های آزمایش‌های معمول بوده، از دقت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین آزمایش‌های برش با این دستگاه در کسری از هزینه‌های آزمایش برش برجا انجام می‌گیرد. نوآوری‌هایی این چنین که با تکیه بر دانش مهندسی و توان فنی در کشور صورت می‌گیرد، گامی بزرگ در راستای خودکفایی صنعت ملی محسوب می‌شود. همچنین در کنار تلاش متخصصان و فعالان عرصه صنعت، لازم است تا از چنین طرح‌هایی با اجرای سیاست‌های کلان حمایت شود.

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد مکانیک سنگ شرکت مهندسین مشاور آزمونه فولاد، بخش ژئوتکنیک و مقاومت مصالح

2. Shear zones

3.. Roller Compacted Concrete

4. Shotcrete

5. Iranian Society of Rock Mechanics

مراجع

[1] M. Behnia, B. Nateghpour, J. Tavakoli, and M. S. Broujerdi, “Comparison of experimental and empirical methods for estimating the shear strength of rock joints based on the statistical approach,” Environmental Earth Sciences, vol. 79, no. 14, pp. 1-15, 2020.

[۲] ا. احسانی زنور و ع. متولی کهنه شهری، بتن غلتکی در سدسازی: براساس ترجمه‌ای از آئین‌نامه انجمن مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا، چاپ اول، انتشارات فروزش، تبریز، ۱۳۸۶.

[۳] ح. مدنی، تونل‌سازی: طراحی و اجرای سیستم نگهداری (جلد چهارم)، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۳.

[۴] ا. فهیمی‌فر و ح. سروش، آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها (جلد ۱)، چاپ اول، نشر شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری و مرکز نشر پرفسور حسابی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (واحد تفرش)، تهران، ۱۳۸۰.

[5] N. Barton, “Review of a new shear-strength criterion for rock joints,” Engineering geology, vol. 7, no. 4, pp. 287-332, 1973.

[6] N. Barton and V. Choubey, “The shear strength of rock joints in theory and practice,” Rock mechanics, vol. 10, no. 1-2, pp. 1-54, 1977.

[7] N. Barton and S. Bandis, “Effects of block size on the shear behavior of jointed rock,” in The 23rd US symposium on rock mechanics (USRMS), 1982: American Rock Mechanics Association.

[8] L. Zhang, Engineering properties of rocks. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2016.

[9] D. Saiang, L. Malmgren, and E. Nordlund, “Laboratory tests on shotcrete-rock joints in direct shear, tension and compression,” Rock mechanics and rock engineering, vol. 38, no. 4, pp. 275-297, 2005.

[۱۰] خشرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۹)، فهرست طرح های اجرایی، http://daminfo.wrm.ir/fa/manage-ment/abniroo.

نویسندگان
ساناز شبیکه[1*]
*researchers4u@yahoo.com

کاربردهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا / بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در حوزه‌های مختلف

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام، سلول گازی مهر و موم شده، کاتالیزور، هیدروژن دهی/هیدروژن زدایی، برهم‌کنش، تبخیر، اکسیداسیون وکاهش.

چکیده

همان‌طور که در مقاله پیشین با عنوان «معرفی اصول عملکرد و ساختارهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام[3] مجهز به محیط گازی کنترل شده» منتشر شده در شماره ۳۰-تابستان ۹۹ فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران نیز ذکر شد، برخلاف میکروسکوپ الکترونی عبوری مرسوم[4] نمونه مورد نظر درون میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده می‌تواند در معرض گازها و فشارها و دماهای مختلف قرار گیرد. همین امر، فرصت‌های منحصربفردی را برای دستیابی به سطح جدیدی از فرآیند تحلیل مواد فراهم می‌آورد. این نوع میکروسکوپ، ابزاری ارزشمند برای درک رفتار نمونه‌های مختلف در مقیاس اتمی محسوب می‌شود. میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی مجهز به محیط گازی کنترل شده علاوه بر اینکه قابلیت اندازه‌گیری پویا نانوساختارها در طول فرآیندهای واکنشی را فراهم آورده، رویکرد دنبال کردن و پیگیری درجا/بهنگام تغییرات شیمیایی و ساختاری به وقوع پیوسته در شرایط اعمال گازها، فشارها و دماهای مختلف را نیز برای محققان امکان‌پذیر می‌سازد. گازهای مورد استفاده برای نمونه‌ها در حوزه‌های تحقیقاتی و صنعتی تاثیر قابل توجهی بر پیکربندی مواد جامد و سیر تکاملی سیستم‌های واکنش‌گر دارند. استفاده از این روش برای فناوری‌های مختلف مبتنی بر نانومواد نظیر: ذخیره/کاربرد/تبدیل موثر انرژی، حمل و نقل، تولید مواد غذایی و حفاظت از محیط زیست [۱] و غیره ضروری است. میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام دربرگیرنده محیط گازی برای بررسی نمونه‌ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند در فناوری‌های مختلف مبتنی بر نانومواد نظیر: تبدیل انرژی موثر، حمل و نقل، تولید مواد غذایی و حفاظت محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات عملی و کاربردی بدست آمده از مشاهده تعاملات گاز-جامد درون میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام منجر به پیدایش نگرش جدیدی در زمینه رشد، ویژگی‌ها و کارکرد نانومواد نظیر: کاتالیزورها، سلول‌های سوختی و مولکول‌های زیستی می‌شود. لذا بررسی نمونه‌ها به‌صورت درجا/بهنگام در شرایط اعمال گازهای مورد نیاز درون میکروسکوپ ETEM از اهمیت بسزایی برخوردار است. برخی از کاربردهای گسترده میکروسکوپ مذکور در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

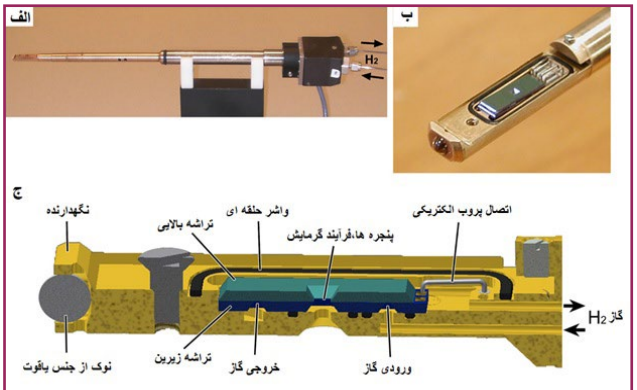
مقدمه

گونه‌های مختلف گاز در مهمترین فرآیندهای زندگی روزمره و همچنین در مواردی نظیر: تولید شیمیایی، بهبود عملکرد اگزوز اتومبیل، سلول‌های سوختی، حسگرهای گاز، شکست فلز و غیره نقش بسزایی دارند. ساختار فیزیکی و شیمیایی یک نوع ماده به احتمال زیاد در طول فرآیند سنتز، ترمیم و استفاده، واکنش پیچیده‌ای به گازها نشان داده و همین امر مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن را به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین، به‌منظور طراحی و بهینه‌سازی کارکردهایی معین دستیابی به اطلاعات مربوط به سیر تکاملی ساختار فیزیکی و شیمیایی درون محیط‌های گازی الزامی است. لازم به ذکر است که روش‌های تحقیقاتی مرسوم بیشتر پس از وقوع واکنش یا به‌صورت جزء به جزء جداگانه انجام می‌پذیرند. بدین معنی که محققان باید فرآیند واکنش را متوقف نموده، نمونه را از طبقه مورد نظر خارج کرده و سپس مشخصات و ویژگی‌های آن را بررسی کنند. این روش‌ها علاوه‌بر زمان‌بر بودن، امکان اعمال یک واکنش کامل بر نمونه را نیز تضمین نمی‌کنند. در ضمن، این احتمال وجود دارد که مشخصه‌یابی ساختارهای مورد نظر با استفاده از روش‌های پس از وقوع واکنش، نماینده حالت‌های فعال واقعی آشکار شده در طول واکنش‌های مربوطه نباشد. از زمان اختراع میکروسکوپ الکترونی عبوری توسط ارنست روسکا[۵] در سال ۱۹۳۱ این دستگاه به‌عنوان رویکردی قدرتمند برای ارزیابی و مشخصه‌یابی ساختار سطح/انبوهه و ترکیب مواد در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه عملیات درون CTEM در شرایط خلاء بالا انجام پذیرفته، لذا دستیابی به اطلاعاتی درباره تغییرات ساختاری و شیمیایی در شرایط محیطی (به‌خصوص محیط گازی) امکان‌پذیر نیست. این احتمال وجود داشته که مواد در حال بررسی در شرایط خلاء و شرایط محیطی واقعی دربرگیرنده ویژگی‌ها و مشخصات متفاوتی باشند. به همین دلیل، برای دستیابی به اطلاعاتی کاربردی درباره آنها باید به جای شرایط آزمایشگاهی، بستری فراهم نموده که شرایط محیط واقعی این مواد شبیه‌سازی شود. این امر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام با محیط کنترل شده[۶] محقق می‌شود. به همین منظور، آزمون‌های ETEM درجا/بهنگام در چند دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. لازم به ذکر است، آزمون‌های انجام پذیرفته در محیط گازی ETEM درجا/بهنگام نسبت به آزمون‌های انجام شده در خلاء بالا میکروسکوپ الکترونی عبوری مرسوم (Torr 10^{-6} – 10^{-10}) پیچیده‌تر هستند [۲]. یکی از روش‌های ابتدایی برای کمینه‌سازی اختلاف فشار و حفظ قدرت تفکیک‌پذیر منحصربفرد میکروسکوپ الکترونی عبوری[۷]، محدود نمودن گاز حول نمونه است. این روش با نام سلول باز[۸] شناخته شده که به‌طور معمول به‌منظور حفظ خلاء ستون TEM و محیط گازی حول نمونه مورد نظر از سیستم پمپ کنترل اختلاف فشار[۹] استفاده می‌کند. به دلیل هزینه بالا و کارائی پایین اصلاح ستون TEM برای نگاه داشتن خلاء و دیگر معایب این روش، بسیاری از محققان (تقریباً از سال ۱۹۳۵) از جمله نخستین آنها که مارتون[۱۰] بود، پیشنهاد اصلاح نگهدارنده‌های نمونه یا قطبک‌های شیئی میکروسکوپ الکترونی عبوری را ارائه نمودند. در نهایت، روشی مطلوب با نام سلول مهر و موم شده گازی[۱۱] ارائه شد. در این روش، نگهدارنده‌های نمونه TEM به‌گونه‌ای اصلاح شدند که با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت قدرت تفکیک‌پذیری تصاویری مطلوب فراهم آورند. خواننده محترم باید به‌منظور آشنایی هر چه بیشتر با اصول کاری روش‌های مذکور به مقاله پیشین با عنوان «معرفی اصول عملکرد و ساختارهای میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده» منتشر شده در شماره ۳۰-تابستان ۹۹ فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران مراجعه نماید. در دهه‌های بعدی، هر دو روش مذکور به دلیل پیشرفت‌های به وقوع پیوسته در زمینه اصلاح مطلوب ابیراهی و قابلیت یکپارچه‌سازی فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به سرعت توسعه یافتند. در ادامه این مقاله، کاربردهای مختلف ETEM درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده بررسی می‌شوند.

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی فرآیندهای هیدروژن دهی/هیدروژن زدایی

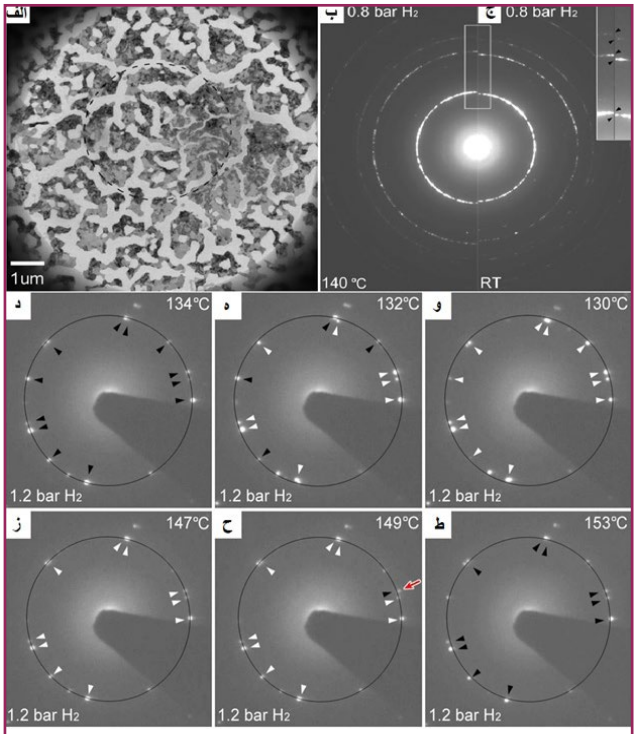
هنگام کار کردن با هیدروژن به‌عنوان سوخت (به‌خصوص در صنعت خودروسازی)، به دلیل اینکه چگالی این نوع هیدروژن نسبت به هیدروژن فشرده به‌طور قابل توجهی بالاتر بوده، نیاز به بکارگیری مواد ذخیره کننده هیدروژن احساس می‌شود [۵-۳]. فشار مجاز در کاربردهای صنعت خودروسازی bar ۱۰-۱ است. به‌منظور ارتقاء نیروی محرکه و اصلاح ترمودینامیک/ گرما پویایی فرآیند هیدروژن دهی، بیشتر تحقیقات کنونی بر بکارگیری نانومواد ذخیره کننده هیدروژن متمرکز شده‌اند [۶ و ۷]. بررسی فرآیند هیدروژن دهی/هیدروژن زدایی در مقیاس اتمی به‌منظور درک بهتر اثرات نانوساختار الزامی است. روش‌های درجا/بهنگام مختلفی برای بررسی فرآیند مورد نظر و همچنین دستیابی سریع به نتایج آزمایش آزموده شده‌اند. به‌عنوان مثال، از روش پراش پرتو ایکس پودری درجا/بهنگام[۱۲] برای مشاهده تغییرات شبکه توری مواد ذخیره کننده هیدروژن با بیشینه مقدار فشار برابر با ۵۰ Mbar استفاده می‌شود [۱۱-۸]. اگر چه گزارش‌هایی مبنی بر بررسی مواد ذخیره کننده هیدروژن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری ارائه شده‌اند [۱۲ و ۱۳]، اما تنها تعداد معدودی از محققان در حوزه کنترل فرآیند هیدروژن دهی/ هیدروژن زدایی از ETEM درجا/بهنگام استفاده کرده‌اند. البته این امر تعجب برانگیز نیست، زیرا عملیات TEM به‌طور معمول در خلأ بسیار بالا انجام پذیرفته و فراهم آوردن شرایط فشار مناسب (به‌عنوان مثال: bar ۱) به تمهیدات ویژه‌ای

نیازمند است. با استفاده از میکروسکوپ‌های ETEM می‌توان نمونه را با فشارهایی تا بیشینه مقدار حول ۰/۰۱ bar مشاهده نمود. این فشار بسیار کم است؛ بنابراین، به‌منظور بررسی مواد ذخیره کننده هیدروژن در فشارهایی حداقل به اندازه ۴/۵ bar درون ETEM درجا/بهنگام، باید تجهیزاتی تعبیه شوند. این تجهیزات معرفی شده توسط کریمر[۱۳] و همکاران مبتنی بر نانوراکتور[۱۴] سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[۱۵] شکل گرفته و نخستین مرتبه برای ذرات کاتالیزوری درون ETEM درجا/بهنگام بکار برده شد (شکل (۱)). همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نانوراکتور مبتنی بر MEMS حاوی دو تراشه سیلیکونی[۱۶] با غشاهای مربعی شکل نیترید سیلیکون[۱۷] به ضخامت ۱ mm و تنش پایین بوده که هر یک از این تراشه‌ها نیز دربرگیرنده پنجره‌های بسیار باریک نیترید سیلیکون (با ضخامتی حدود ۲۰ nm) است. یکی از تراشه‌ها (به‌طور معمول تراشه زیرین) علاوه‌بر دربرگیری گرماساز از جنس پلاتینیوم[۱۸] به‌منظور اعمال حرارت‌های مختلف به نمونه، حاوی یک ورودی و خروجی برای وارد و خارج ساختن گاز مورد نظر نیز است [۱۴].



شکل (۱): (الف): نگهدارنده نمونه حاوی نانوراکتور مبتنی بر فناوری MEMS (سیستم‌های میکروالکترومکانیکی). (ب): نانوراکتور تعبیه شده درون نگهدارنده نمونه مورد نظر. (ج): طراحی داخلی نانوراکتور [۱۴].

تاداهیرو یوکوساوا[۱۹] و همکاران [۱۴] با استفاده از سلول گازی نوع MEMS مهر و موم شده موفق به مشاهده و بررسی فرآیند هیدروژن دهی/هیدروژن زدایی پالادیم[۲۰] با دقت ثابت و قدرت تفکیک‌پذیری نانومتری شدند (شکل ۲). آنها با موفقیت رفتارهای هیدروژن دهی ذرات منحصر به فرد را از یکدیگر تمیز دادند. پرتو الکترونی مورد نظر در شرایط عادی کاری و فشارهایی برابر با ۷۵۰ Torr و ۲۴۰۰ Torr تاثیر مخربی بر فرآیند تعیین دماهای هیدروژن زدایی Pd نمی‌گذارد. رابطه میان فرآیند هیدروژن زدایی و فشار برای آزمایش‌های حجمی که وجود فشارهای متغیر در آنها اجتناب‌ناپذیر بوده، مطلوب است. درصورت وقوع تغییر بسیار سریع در دما، تعیین سریع‌تر دمای فرآیندهای هیدروژن دهی و هیدروژن زدایی امکان‌پذیر خواهد بود.

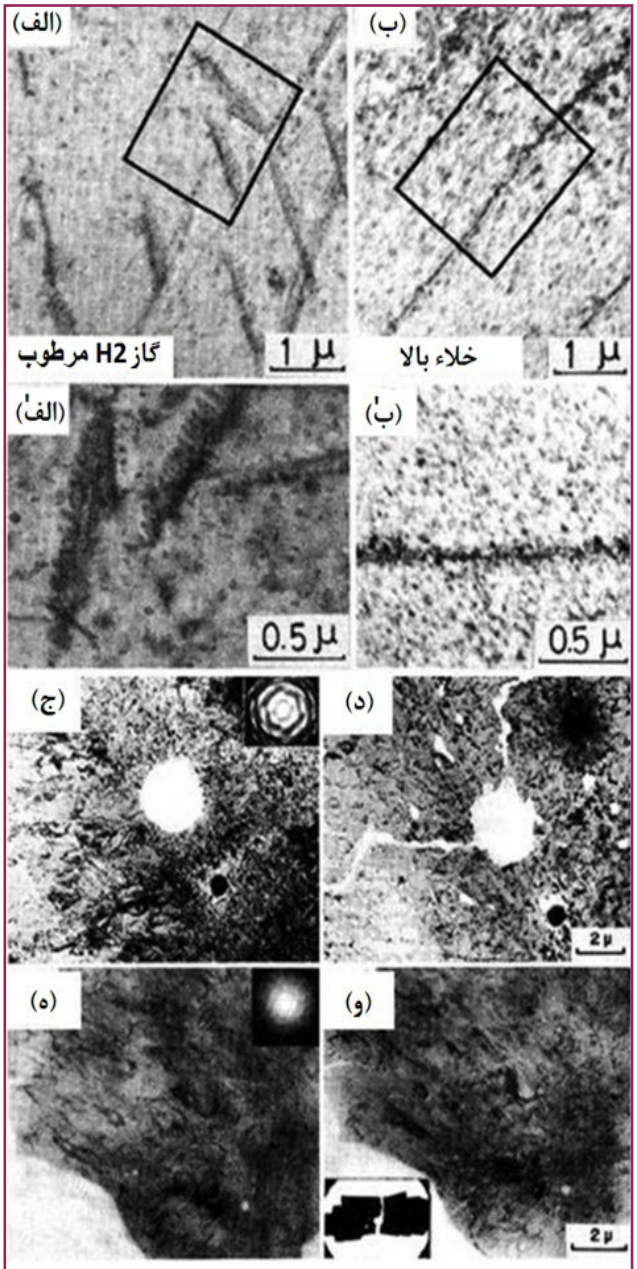


شکل (۲): (الف): تصویر میدان روشن TEM از جزایر پالادیوم (Pd) درون نانوراکتور. (ب) و (ج): الگوهای پراش الکترونی ناحیه منتخب ثبت شده در شرایط وجود فشار هیدروژن ۰/۸ bar و دماهایی به ترتیب برابر با ۱۴۰ و دمای اتاق. (د) تا (و): نمایش فرآیند هیدروژن دهی توسط الگوهای پراش الکترونی ناحیه منتخب[۲۱] چند ذره پالادیوم ثبت شده در شرایط فشار ۱/۲ bar و دماهایی به ترتیب برابر با ۱۳۴ °C، ۱۳۲ °C و ۱۳۰ °C. (ز) تا (ط): نمایش فرآیند هیدروژن زدایی با الگوهای پراش الکترونی ناحیه منتخب چند ذره پالادیوم ثبت شده در شرایط فشار bar ۱/۲ و دماهایی به ترتیب برابر با ۱۴۷ °C، ۱۴۹ °C و ۱۵۳ °C. انعکاس‌های نمایش داده شده با پیکان‌های سفید و سیاه به ترتیب از فازهای α و β حاصل شده‌اند [۱۴].

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی برهم‌کنش‌ها میان مواد و گازها

در سال ۱۹۷۶، هیروشی فوجیتا[۲۲] و همکاران [۱۵] به‌منظور مشاهده واکنش میان گاز H_2 و آهن یک سلول گازی مهر و موم شده برای میکروسکوپ الکترونی کلاس 3MV طراحی و استفاده نمودند (شکل (۳-الف)). پس از وقوع آسیب تابش الکترون در خلاء، عیوب ثانویه حول نابجایی‌ها که در شکل (۳-الف) دربرگیرنده ساختارهای خطی بوده، ظاهر می‌شوند. درصورت تابش الکترون با شدتی برابر با 2×10^{19} e/sec.cm^2 (شکل (۳-الف)) که بزرگ شده قسمت مشخص شده در شکل (۳-الف) بوده و قرار دادن ورق آهنی در معرض گاز H_2[۲۳] مرطوب ~۱۲۰۰ Torr به مدت تقریباً ۳۰ دقیقه، ساختارهایی

مشابه برگ سرخس حول هر یک از خطوط نابجایی شکل می‌گیرد. این ساختارهای شبیه برگ سرخس کاملاً متفاوت از ساختارهای موجود در شکل (۳-ب) است، بنابراین، به احتمال زیاد نوعی هیدرید[۲۴] (ترکیب هیدروژن‌دار) آهن (Fe) با رابطه‌ای نزدیک با تردی[۲۵] هیدروژنی آهن مورد نظر است.



شکل (۳): واکنش میان گاز H_2 مرطوب و یک ورق آهنی. تصاویر (الف) و (ب): به ترتیب پس از تابش الکترونی سنگین در گاز H_2 مرطوب با فشاری برابر با ۱۲۰۰ Torr و محیط خلاء 1×10^{-6} Torr تهیه شده‌اند. تصاویر (الف') و (ب'): نیز به ترتیب بزرگ شده چارچوب مشخص شده در شکل‌های (الف) و (ب) هستند. (ج) و (د): نمایش تبخیر فولاد ضد زنگ نوع ۱۸/۸ در دمای ۶۵۰ °C در خلاء برابر با 1×10^{-6} Torr. (ه) و (و): نمایش تبخیر فولاد ضد زنگ نوع ۱۸/۸ در دمای ۷۰۰ °C درون محیط گاز آرگون - H_2 (۱۰ درصد حجمی) با فشاری برابر با ۷۶۰ Torr [۱۵].

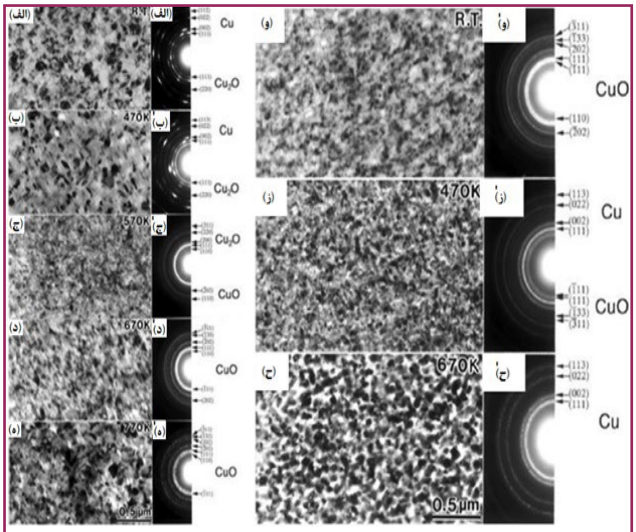
▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای جلوگیری از تبخیر نمونه

به‌منظور جلوگیری از تبخیر نمونه در دماهای بالا از سلول گازی مهر و موم شده هیروشی فوجیتا و همکاران [۱۵] استفاده شده‌است. در این صورت آسیب وارد شده به فلزات و آلیاژها در طول فرآیند تابکاری/بازپخت[۲۶] با دماهای فوق‌العاده بالا درون خلاء به حداقل می‌رسد. فرآیند جلوگیری از تبخیر فولاد/ فلز ضد زنگ نوع ۱۸/۸ در جریان اعمال شرایط تابکاری در شکل‌های (۳-ج) و (۳-و) نمایش داده شده‌است. همان‌طور که در شکل (۳-د) قابل مشاهده است، در شرایط اعمال دمای ۶۵۰ °C نمونه مورد نظر (شکل (۳-ج)) در محیط خلاء 1×10^{-6} Torr تا حدی تبخیر می‌شود. اما درصورت بکارگیری گاز ۷۶۰ Torr متشکل از گاز خالص آرگون و گاز H2 (۱۰ درصد حجمی) فرآیند تبخیر نمونه حتی در شرایط اعمال دماهای فوق‌العاده بالا (بیشتر از ۷۰۰ °C) نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های (۳-ه) و (۳-و) نمایش داده شده، ریزساختارهای درون نمونه مورد نظر حتی با حضور لایه گازی به ضخامت ~۱۰۰ μm نیز به وضوح قابل مشاهده هستند.

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی اکسیداسیون و کاهش فلزات

با استفاده از عنصر گرمایشی و گازهای محصور شده می‌توان فرآیندهای اکسیداسیون و کاهش یافتن درون سلول‌های گازی مهر و موم شده را به‌صورت درجا/بهنگام مشاهده نمود. برای درک هر چه بهتر دو فرآیند ذکر شده، مثالی در شکل (۴) ارائه و فرآیند اکسیداسیون لایه نازک فلز مس[۲۷] درون سلول گازی مهر و موم شده به طراحی ام. کوماتسو[۲۸] و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۵ نمایش داده شده‌است. در آغاز، همان‌طور که در شکل میدان روشن (۴-الف) قابل مشاهده است مقدار کمی اکسید مس[۲۹] در طول فرآیند تبخیر شکل گرفته و الگوی پراش الکترونی ناحیه منتخب متناظر نیز در شکل (۴-الف') ارائه شده‌است. سپس اکسیژن با ۹/۷۵ Torr به سلول مربوطه وارد شده و نمونه نیز به تدریج تا دمای ۴۷۰ °K گرم شد. اکسید مس روی سطح لایه مذکور هسته‌زایی[۳۰] می‌کند (شکل‌های (۴-ب) و (۴-ب')). همزمان با افزایش دما، مس به‌صورت ذرات اکسید بسیار ریز اکسیده می‌شود (شکل‌های (۴-ج) و (۴-ج')). پس از اعمال دمای ۶۷۰ °K بر نمونه، تمام ذرات مذکور به اکسید مس تبدیل می‌شوند (شکل‌های (۴-د) و (۴-د')). هنگام رسیدن دمای نمونه به ۷۷۰ K دانه‌های اکسید مس بزرگتر

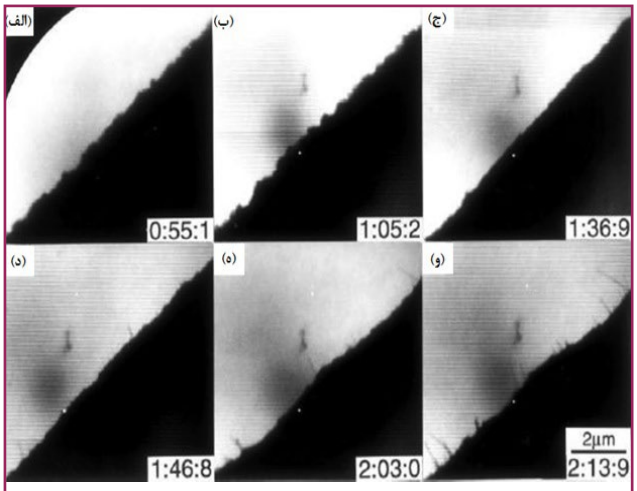
می‌شوند (شکل‌های (۴-ه) و (۴-ه')). فرآیند کاهش اکسید مس نیز به‌صورت درجا/بهنگام درون شکل (۴) قابل مشاهده است. لایه مربوطه به‌طور تدریجی در محیط گاز H_2 با Torr ۹/۷۵ دوباره گرم می‌شود. همزمان با افزایش دادن بیشتر دمای نمونه، اکسید مس در دمای ۶۷۰°K به‌طور کامل به مس کاهش می‌یابد (شکل‌های (۴-ح) و (۴-ح')) [۱۷].



شکل (۴): مراحل متوالی رشد اکسید روی فیلم/لایه نازک مس به ضخامت ۱۰۰ nm در محدوده دمای اتاق و ۷۷۰ K~ در شرایط حضور $1/3 \times 10^{3}$ Pa از گاز اکسیژن (O_2) نمایش داده شده‌است. شکل‌های (الف) تا (ه): تصاویر میدان روشن را نمایش می‌دهند. شکل‌های (الف') تا (ه'): تصاویر الگوی پراش الکترونی سطح منتخب متناظر را نمایش می‌دهند. مراحل متوالی فرآیند کاهش اکسید مس بین دمای اتاق و ۶۷۰ K~ در شرایط حضور $1/3 \times 10^{3}$ Pa از گاز H_2 نیز نمایش داده شده‌است. شکل‌های (و) تا (ح): تصاویر میدان روشن و شکل‌های (و') تا (ح'): تصاویر الگوی پراش الکترونی سطح منتخب متناظر را ارائه می‌دهند [۱۶].

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی رشد درجا/بهنگام نانوساختارها

فرآیند نظارت درجا/بهنگام بر روند رشد ویسکرها/باریکه‌های مویی مانند اکسید مس (CuO) درون سلول گازی مهر و موم شده متعلق به ام. کوماتسو و همکاران [۱۶] انجام پذیرفته است. با مشاهده یک سری از تصاویر الکترونی می‌توان مراحل متوالی فرآیند رشد ویسکرهای[۳۱] اکسید مس را در شرایط اعمال فشار ۳۰ Torr گاز O_2 را به دقت بررسی کرد (شکل (۵)). ابتدا یک لایه اکسید غیر یکنواخت روی سطح Cu مورد نظر شکل گرفت که این امر منجر به حصول لبه دندانه‌دار (شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب)) می‌شود. پس از ۴۰ ثانیه لایه اکسید مورد نظر با لبه‌ای صاف‌تر به حالت ثبات می‌رسد (شکل (۵-ج)). سپس ویسکرها به تدریج روی لایه اکسید رشد می‌کنند (شکل‌های (۵-د) و (۵-ه)).

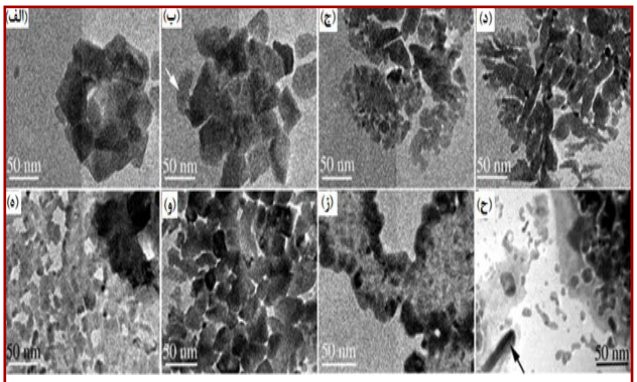


شکل (۵): مراحل متوالی رشد ویسکرهای اکسید Cu در شرایط اعمال فشار ۳۰ Torr از گاز O_2 [۱۶].

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی فرآیندهای برهم‌کنش با گازهای یونیزه/اتمی

یکی از نخستین گزارش‌های مربوط به برهم‌کنش‌های گاز یونیزه/اتمی القاء شده با پرتو الکترونی TEM توسط لی سان[۳۲] و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۱ ارائه شده‌است. شار الکترون ارتقاء یافته قادر است غلظت در حال کاهش یافتن یون‌های اکسیژن و الکترون‌ها را افزایش دهد. درست زیر آستانه‌ای معین، فرآیند اکسیداسیون بر واکنش و پاسخ سیستم غالب شده و منجر به وقوع فرآیند برهم‌کنش شتابی میان یون‌های نقره و اکسیژن می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های (۶-ج) تا (۶-ه) نمایش داده شده، میانگین اندازه ذرات دانه‌ای شکل نقره همواره در حال کاهش یافتن است. ذرات دانه‌ای شکل نقره در شرایط چگالی جریان برابر با ۰/۴۴ $A\,cm^{-2}$ به‌صورت میله‌ای شکل ظاهر می‌شوند (شکل‌های (۶-ج) تا (۶-د)). ذرات دانه‌ای شکل نقره در شرایط چگالی جریان برابر با ۰/۶۵ cm A-۲ به ساختار زاویه‌ای فشرده‌تری تبدیل می‌شوند (شکل (۶-ه)). به دلیل افزایش یافتن فوگاسیته[۳۳] یا بی دوامی اکسیژن با غلظت‌های بالاتری از اکسیژن اتمی و یونیزه، تمام فاز اکسید نقره[۳۴] در شرایط چگالی‌های جریان بیشتر از ۰/۶۵ $A\,cm^{-2}$ به‌صورت (AgO) اکسیده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۶-ز) مشاهده می‌شود، در شرایط چگالی جریان بالاتر از $A\,cm^{-2}$ ۰/۷۵ بخش قابل توجهی از فاز غیر بلوری حاصل خواهد شد. به محض افزایش یافتن چگالی جریان الکترونی به بالاتر از مقدار ۰/۷۷ $A\,cm^{-2}$، ذرات دانه‌ای شکل جدید با ساختار دوقلو از فاز بخار مورد نظر ظاهر می‌شوند (شکل (۶-ح)). برهم‌کنش میان نانوذرات و گاز مورد نظر حول ذرات مربوطه گرادیان/شیب غلظتی تشکیل داده که به‌صورت یک حلقه روشن دور هر ذره دانه‌ای شکل نقره مشاهده می‌شود. از مشاهده عرض

نواحی تخلیه اکسید نقره در فاز گاز مورد نظر می‌توان اینگونه برداشت نمود که برهم‌کنش شیمیایی قوی میان فازهای بخار و جامد وجود دارد. فاز بخار AgO در بیشتر موارد با صفحات دو بعدی عمود بر پرتو مورد نظر هم‌تراز شده که متعاقباً منجر به حصول خوشه‌هایی از نقره جدید ناشی از رسوب شیمیایی ناپایدار یا جاروب تصادفی یک منطقه می‌شود (شکل (۶-ح)). قابل توجه است که رقابت میان اکسیداسیون و فرآیند کاهش القایی پرتوی الکترونی گرما و حرارت را افزایش می‌دهد. درصورت وجود شارهای بسیار بالا از اکسیژن یونیزه شده، اثر حرارتی قادر است موجب وقوع فرآیند تبخیر محلی در سطح مورد نظر و همچنین برهم‌کنش درجا/بهنگام کندوپاشی یونی در مقیاس نانو شود. بررسی موارد فوق، فرآیندهای ریزساختار مختلفی را در رابطه با روند اکسید شدن نقره[۳۵] در معرض گونه‌های گاز اتمی و یونیزه شده، آشکار ساخته است. لازم به ذکر است که پرتو الکترونی، منبع مهمی برای فرآیند اکسیداسیون و کاهش محسوب می‌شود. استفاده از رویکرد سلول مهر و موم شده فرصت‌هایی نظیر: مشاهده زود هنگام و بلادرنگ فرآیند پویایی‌شناسی در مقیاس نانو مرتبط با فرآیند اکسیداسیون درون گاز اتمی و یونیزه شده، حرکت فشار نسبی فاز گازی و وقوع برهم‌کنش‌ها میان فازهای بخار و متراکم یک ماده را فراهم می‌کند. در این رویکرد می‌توان علاوه‌بر بکارگیری گاز یونیزه شده به‌منظور دستکاری ساختار نانو و شیمیایی مواد، فرآیندهای برهم‌کنش با گاز اتمی و یونیزه شده را نیز شبیه‌سازی کرد.

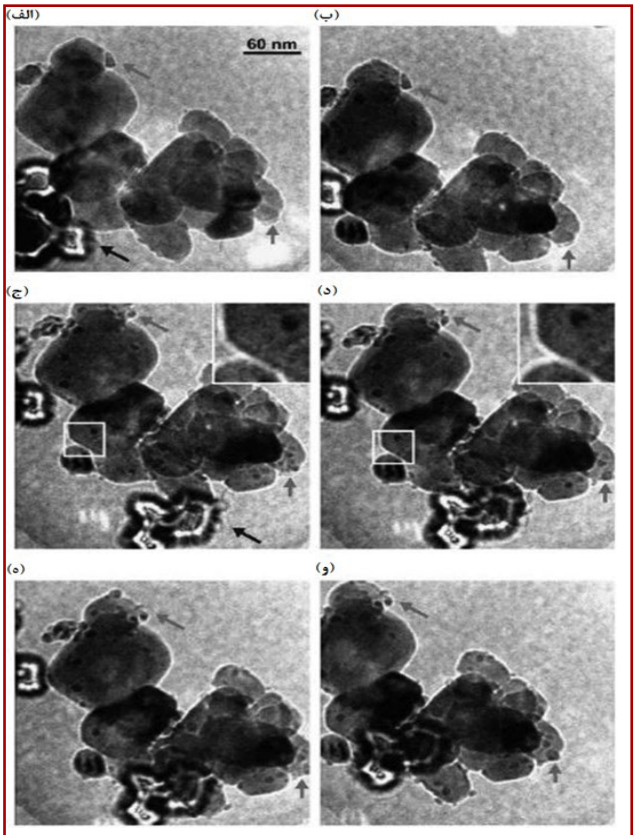


شکل (۶): ریزساختار منطقه مورد بررسی درون یک سلول پر شده از هوا پس از (الف): گذشت ۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض ۰/۱۸ $A\ cm^{-2}$ چگالی جریان، (ب): گذشت ۲۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض ۰/۱۸ $A\ cm^{-2}$ چگالی جریان (پیکان سفید به ذره دانه‌ای شکل جدید اشاره می‌کند)، (ج): گذشت ۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A\ cm^{-2}$ ۰/۴۴ چگالی جریان، (د): گذشت ۲۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A\ cm^{-2}$ ۰/۴۴ چگالی جریان، (ه): گذشت ۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A\ cm^{-2}$ ۰/۶۶ چگالی جریان، (و): گذشت ۲۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A\ cm^{-2}$ ۰/۶۶ چگالی جریان، (ز): گذشت ۲۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A\ cm^{-2}$ ۰/۷۲ چگالی جریان و (ح): گذشت ۲۰ ثانیه و قرار گرفتن در معرض $A^{-2}\ cm$ ۰/۸ چگالی جریان (پیکان سیاه به همترازی عمودی فاز بخار AgO اشاره می‌کند) نمایش داده شده‌است [۱۸].

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای مشاهده پویا کاتالیزورها و برهم‌کنش‌های کاتالیزوری

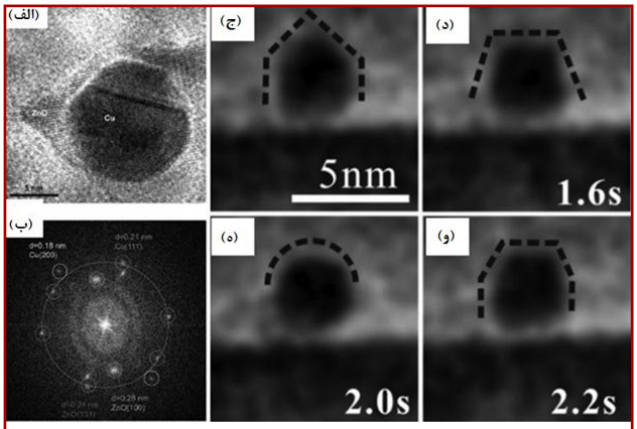
یکی از نخستین تلاش‌ها برای مشاهده یک کاتالیزور درون سلول گازی مهر و موم شده توسط پارکینسون[۳۶] و همکاران [۱۹] در سال ۱۹۸۹ انجام شده‌است. آنها با استفاده از سلول گازی مهر و موم شده دربر گیرنده شکافی باریک و دستگاه TEM با ولتاژ ۴۰۰ KV در شرایط جریان داشتن گاز نیتروژن (۲۰ Torr) موفق به ثبت تصاویری از شبکه توری بلور اکسید سریم[۳۷] (۰/۳۱ nm) شدند. در این هنگام تمیز دادن اطلاعات ساختارهای مهم شیمیایی در مقیاس ۰/۳ nm ~ امکان‌پذیر شد. همین امر، امید جدیدی به‌منظور انجام آزمایش‌های دینامیکی بنیادین در زمینه فعال‌سازی، برهم‌کنش و غیرفعال‌سازی سیستم‌های گاز/جامد در مقیاسی نزدیک به سطح اتمی را برای دانشمندان فراهم می‌آورد. ۱۷ سال بعد اس. جیورجیو[۳۸] و همکاران [۲۰] موفق به دستیابی به مشاهدات درجا/بهنگام در مقیاس اتمی در طول یک برهم‌کنش شیمیایی شدند. برای نخستین مرتبه، خوشه‌های Au و Pd مستقر بر لایه دی‌اکسید تیتانیوم[۳۹] و کربن آمورف[۴۰] با استفاده از سلول گازی مهر و موم شده با قدرت تفکیک پذیری (۱۱۱) حاشیه شبکه توری قابل مشاهده بودند. در TEMهای مرسوم به دلیل وجود خلاء بسیار بالا متاسفانه آلایش خوشه Au بسیار بالا بود، اما درصورت به گردش درآوردن گاز H_2 با فشار Torr ۳ در دمای اتاق حول نمونه مورد نظر علاوه‌بر حذف شدن آلاینده‌ها، شبکه بلورین درون خوشه مربوطه نیز به وضوح قابل مشاهده خواهد بود. خوشه مورد نظر در جو کاهنده یکسان پس از حرارت دیدن تا ۳۵۰ °C وجه‌دار[۴۱] شده، سپس تا دمای اتاق خنک می‌شود. در سال ۲۰۰۸ [۲۱] قدرت تفکیک پذیری مشاهدات درجا/بهنگام کاتالیزورها به واسطه بکارگیری نانوراکتور نوع MEMS به‌طور قابل توجهی بهینه شد. از همه مهم‌تر نانوراکتور مذکور منجر به تسهیل مشاهده و بررسی مستقیم فرآیند رشد و تحرک نانوبلور Cu در مقیاس زمانی زیر ثانیه و دمای بالاتر(°C ۵۰۰) و فشار گاز بیشتر (گاز H_2 با فشار Torr ۹۰۰) می‌شود. تصاویر درجا/بهنگام TEM نمایانگر حاشیه‌های متناوب شبکه توری اتمی درون نانوبلورهای Cu با فاصله‌بندی ۰/۱۸ nm بوده که همین امر گواهی بر محدودیت قدرت تفکیک‌پذیری مکانی سیستم مورد نظر است. به‌طور معمول از سیستم نانوبلورهای Cu مستقر بر اکسید روی[۴۲] به‌عنوان کاتالیزور برای فرآیند سنتز متانول و همچنین تبدیل هیدروکربن‌ها درون سلول‌های سوختی استفاده می‌شود. در ضمن، این سیستم را می‌توان به‌عنوان نمونه اولیه گروه صنعتی مهم کاتالیزورهای فلزی واسطه سه بعدی نیز در نظر گرفت. در اینجا کاتالیزور مورد نظر درون جو H_2 تا بیشینه مقدار

دمای عملیاتی مجاز یعنی ۵۰۰ °C حرارت داده می‌شود. دانه‌های بلور اکسید روی با قطر ۱۰۰-۲۰ nm به‌صورت اشکالی فشرده ظاهر می‌شوند (شکل (۷-الف)). CuO نیز به‌صورت دسته‌های کوچکتری از اشکال بی‌قاعده و نامنظم در حاشیه‌های ZnO مذکور نمایان می‌شوند.



شکل (۷): تصاویر متوالی از فرآیند رشد و تحرک نانوبلور Cu مستقر روی ZnO در طول فرآیند حرارت‌دهی از دمای اتاق به ۵۰۰ °C در شرایط وجود گاز H_2 با فشار ۹۰۰ Torr نانوبلورها (دربرگیرنده کنتراست سیاه‌تر) از CuO (پیکان‌های خاکستری) ایجاد می‌شوند. نانوبلورها پس از فرآیند رشد تحرک گذرایی را به نمایش می‌گذارند (مربع سفید رنگ). دانه‌های بلور پنجره مقابل از تمرکز خوبی برخوردار نیستند (پیکان‌های سیاه رنگ در شکل‌های (الف) و (ج)). فریم‌ها به ترتیب در (الف): دمای اتاق، (ب): ۲۶۰ °C، (ج): ۳۳۰ °C، (د): ۳۶۵ °C، (ه): ۴۱۰ °C، و (و): ۵۰۰ °C ثبت شده‌اند. میانگین تمام فریم‌ها از چهار تصویر پیاپی به‌دست آمده است. زمان پرتودهی برای تصویربرداری برابر با ۰/۱۴۵ثانیه است [۲۱].

همزمان با افزایش دما به ۲۶۰ °C ~، دسته‌های CuO به چندین ذره متفاوت با قطر ۱۰-۵ nm (شکل‌های (۷-ب) تا (ه)) تقسیم می‌شوند. وضعیت نانوبلورهای مورد نظر از تصاویر TEM با قدرت تفکیک‌پذیری اتمی تهیه شده در طول اعمال گاز H_2 با فشار ۹۰۰ Torr در دمای ۵۰۰ °C قابل بررسی است. حاشیه‌های متناوب شبکه توری اتمی در دانه‌های بلور ZnO روشن‌تر و همچنین نانوبلورهای Cu تاریک‌تر به وضوح قابل مشاهده هستند (شکل (۸-الف)). حاشیه‌های متناوب شبکه توری با فاصله‌بندی ۰/۱۸ nm و ۰/۲۱ nm (متناظر با صفحات (۱۱۱) و (۲۰۰) Cu) را می‌توان درون نانوبلورهای مربوطه [۲۲] با تبدیل فوریه تصویر TEM مورد نظر ثبت نمود (شکل (۸-ب)).



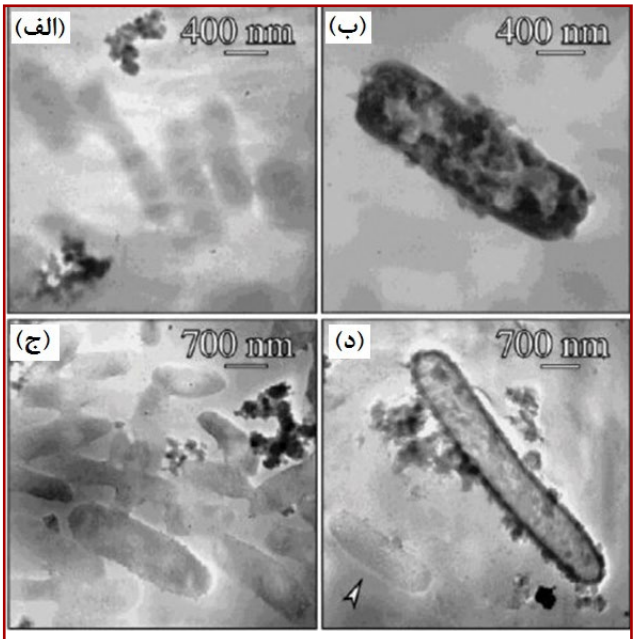
شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک پذیری بالا[۴۳] نمایانگر کاتالیزور Cu/ZnO در شرایط قرار گرفتن در معرض فشار ۹۰۰ Torr گاز هیدروژن و دمای ۵۰۰ °C. (الف): این تصویر حاشیه‌های متناوب شبکه توری نانوبلورهای Cu بهم پیچیده و لایه پشتیبان ZnO را نمایش می‌دهد. (ب): تبدیل فوریه تصویر (الف). نقاط روشن نماینده مجموعه‌ای از حاشیه‌های شبکه توری هستند. فاصله بین حاشیه‌های مذکور متناظر با فاصله مورد نظر تا مبداء بوده و ماهیت بلورشناسی مربوطه را آشکار می‌کند. دایره قرمز رنگ بزرگ متناظر با فرآیند فاصله‌گذاری nm ۰/۲۱ است. کوچکترین فاصله‌بندی قابل مشاهده شبکه توری مورد نظر برابر با nm ۰/۱۸ است. (ج) تا (و) [۲۳]: تصاویر متوالی درجا/بهنگام TEM تهیه شده از کاتالیزور نانوذرات طلا تعبیه شده روی دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2). زمان نمایش داده شده در گوشه سمت راست پایینی تصاویر (د) تا (و) متناظر است با فواصل اندازه‌گیری شده از زمان ثبت تصویر (ج) [۲۱].

یک سال بعد، سلول گازی مهر و موم شده از نوع MEMS طراحی شده توسط تاداهیرو کاواساکی[۴۴] و همکاران [۲۳] به‌منظور بررسی درجا/بهنگام کاتالیزور نانوذرات طلا مستقر روی TiO_2 درون TEM بکار برده شد. به‌منظور ایجاد دی‌اکسید کربن (CO_2) روی سطح کاتالیزور مذکور، یک درصد مونوکسید کربن (CO) برای ایجاد واکنش با O_2 درون هوای خشک اعمال می‌شود. شکل‌های (۸-ج) تا (۸-و) ریخت‌شناسی نانوذره طلا را نمایش می‌دهند. با در نظر گرفتن فاصله زمانی ۰/۴ s بین تصاویر (۸-د) و (۸-ه) و فاصله زمانی ۰/۲ s میان تصاویر (۸-ه) و (۸-و) می‌توان تغییر شکل کاملاً محسوس نانوذره طلا مورد نظر در مدت زمان کوتاهی را مشاهده نمود. وجوه[۴۵] مختلفی از نانوذره طلا مذکور در شکل‌های (۸-ج)، (۸-د) و (۸-و) آشکار شده‌اند. برخی مواقع وجوه مذکور ناپدید شده و در نتیجه نانوذره طلای مربوطه همانند تصویر (۸-ه) شکلی کروی به خود می‌گیرد. البته لازم به ذکر است که حاشیه‌های متناوب شبکه توری نانوذره طلا به دلیل پراکندگی الکترون با گاز پر فشار قابل رویت نیستند. جدیدترین تصویربرداری از رفتار نوسانی نانوذرات Pt کاتالیز کننده اکسیداسیون CO توسط اس. بی. وندلبو[۴۶] و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۴] گزارش شده‌است. سری تصاویر TEM از نانوذرات Pt در محدوده ورود و خروج به/از منطقه واکنش با نرخی سریع‌تر (۱-۲ فریم در ثانیه) از

نوسانات واکنشی (برای مشاهده مستقیم نانوذرات مربوطه در مقیاس زمانی تعیین شده) تهیه شده‌است. در طول واکنش نوسانی نانوذرات مورد نظر در نزدیکی ورودی منطقه واکنش از شکلی ثابت و کروی‌تر برخوردار هستند.

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای بررسی نمونه‌های زیستی

سلول‌های گازی مهر و موم شده، نمونه‌ها را درون لایه‌ای نازک از گاز پوشینه/کپسوله نموده و به این صورت همانند شرایط خلاء از تخریب نمونه‌ها جلوگیری به عمل می‌آورند. بنابراین، سلول‌های مذکور را می‌توان برای بررسی نمونه‌های زیستی نیز به کار برد. سلول گازی مهر و موم شده در حوزه زیستی برای نخستین بار توسط اچ. جی. هید[۴۷] در سال ۱۹۶۲ [۲۵] بکار گرفته شد. درصورت بکارگیری نمونه‌های آلی باید از افزایش فرآیند حذف کربن بیش از نرخ مجاز ناخالصی/آلایش که به تخریب نمونه مورد نظر منجر شد، جلوگیری شود. درصورت پرهیز از اعمال گرمایش غیرضروری حتی در فشارهای Torr ۲۰۰-۱۰۰ می‌توان از تبخیر سریع آب موجود درون نمونه جلوگیری کرد. این امر با ثبت تصاویر TEM از قطرات کوچک آب درون هوا در شرایط فشار Torr ۱۰۰ اثبات شده‌است. اگر در فشاری معین به جای هوا از هیدروژن[۴۸]، هلیوم[۴۹]، نیتروژن[۵۰] و یا آرگون[۵۱] استفاده شود و ناحیه روشن شده مدنظر نیز با بکارگیری متمرکز کننده دوگانه به قطری تقریباً برابر با ۲ um کاهش یابد، آنگاه می‌توان از وقوع فرآیند حذف کربن در نمونه جلوگیری کرد. در سال ۲۰۰۱، تی. ال. دالتون[۵۲] و همکاران [۲۶] از سلول گازی مهر و موم شده درجا/بهنگام برای بررسی کاهش فلز سنگین کروم شش ظرفیتی[۵۳] توسط باکتری شوانلا اوندنیسس[۵۴] استفاده کردند. باکتری‌های حاصل شده از محیط‌های کشت، شسته شده و به‌صورت مستقیم درون سلول گازی مهر و موم شده قرار می‌گیرد و در فشار Torr ۹۷/۵ از هوای اشباع شده از بخار آب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده گونه‌هایی از باکتری‌های میله‌ای شکل تاژک‌دار و غیرهاگزا را به نمایش گذاشتند (شکل (۹)). در طول بررسی، در حالی که سلول‌ها آب خود را حفظ کرده بودند، مواد پلیمری خارج سلولی[۵۵] نیز مرطوب باقی مانده و همانند کپسول دربرگیرنده سلول‌های مورد نظر ظاهر شد. اما پس از چند دقیقه قرار گرفتن در معرض پرتو الکترونی، سلول‌ها به دلیل تخریب اولیه پیوندهای ضعیف زیست مولکولی واندروالس[۵۶] آسیب خواهند دید. تصویربرداری مستقیم TEM درجا/بهنگام دو جمعیت باکتری شوانلا اوندنیسس را درون محیط‌های کشت مورد نظر آشکار می‌کند: یک باکتری با کنتراست پایین در تصویر (شکل‌های (۹-الف) و (۹-ج)) و یک باکتری حاوی ذراتی با چگالی الکترونی بالا (شکل‌های (۹-ب) و (۹-د)). پس از بررسی بیشتر مشخص شد که باکتری‌های دارای پوشش سطحی از نوع گرم منفی بوده و همچنین به دلیل چگالی بالای الکترون پوشش سلولی (شکل (۹-د)) در محدوده‌ای که طول مسیر پرتو الکترونی بیشتر بوده به‌صورت بسیار تاریک‌تر از پس زمینه مشاهده می‌شود. پوشش سلولی مربوط به سلول‌های بدون غلاف در مقایسه با باکتری‌های غلاف‌دار از کنتراست تصویری بسیار پایینی برخوردار هستند. افزایش کنتراست بدین معنی است که پوشش سلولی با استفاده از جذب عناصری با جرم سنگین نظیر: کروم[۵۷] اشباع شده‌است. پیوند عناصر سنگین درون پوشش سلولی رابطه‌ای مستقیم با کاهش کروم دارد.



شکل (۹): نمایش باکتری شیوانلا اونیدنسیس درون سلول گازی مهر و موم شده محیطی در فشار Torr ۱۰۰؛ (الف) و(ج): باکتری مورد نظر در تصویربرداری میدان روشن با استفاده از EC-TEM از کنتراست پایینی برخوردار است، باکتری آغشته به ذراتی با چگالی الکترون بالا نیز در تصاویر (ب) و (د) نمایش داده شده‌است. سر پیکان سفید رنگ در قسمت (د) تصویر به باکتری با کنتراست پایین به‌منظور مقایسه با باکتری آغشته به ذراتی با چگالی الکترون بالا اشاره می‌کند. بیشترین پس زمینه پراکنده با کنتراست پایین در قسمت (الف) تصویر قابل مشاهده است که نمایش دهنده مواد پلیمری خارج سلولی احاطه کننده سلول‌های مورد نظر است [۲۶].

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/ بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در فرآیند تخریب در طول کاتالیز: عمل‌آوری استوالد

کاتالیزورهای مبتنی بر ذره به‌طور معمول ابتدا عملکرد بالایی را نمایش داده اما به تدریج با گذشت زمان و در شرایط واکنش این عملکرد آنها کاهش می‌یابد. این امر در اصل به دلیل وقوع پدیده‌های تف جوشی[۵۸] و عمل‌آوری[۵۹] به همراه اتلاف ناحیه بزرگی از سطح فعال صورت می‌پذیرد. به‌منظور شفاف‌سازی توضیحات مذکور، اس. هلوگ[۶۰] و همکاران رفتار انقباضی نانوذرات Pt مستقر روی اکسید آلومینیوم با فرمول Al_2O_3 پشتیبان در شرایط حضور گاز شکل‌دهی اکسیژن (O_2) و نیتروژن (N_2) را

بررسی نموده‌اند (شکل (۱۰)) [۲۷]. آنها از طریق بررسی تعداد بسیار زیادی از نانوذرات به این نتیجه رسیدند که در شرایط ذکر شده، اندازه ذرات بزرگ افزایش یافته است در حالی که اندازه ذرات کوچکتر به تدریج کاهش یافته و در نهایت ناپدید می‌شوند. چنین فرآیندی به فرآیند عمل‌آوری استوالد معروف بوده که با هدف کمینه‌سازی انرژی آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پدیده در دیگر سیستم‌های کاتالیزوری دیگر نیز مشاهده شده‌است. به‌عنوان مثال، نانوذرات Fe (که به‌طور معمول به‌عنوان کاتالیزور برای فرآیند رشد نانولوله‌های کربنی[۶۱] مورد استفاده قرار گرفته) نیز در طول فرآیند رشد کاتالیز شده نانولوله‌های کربنی شاهد وقوع پدیده عمل‌آوری استوالد هستند [۲۸].

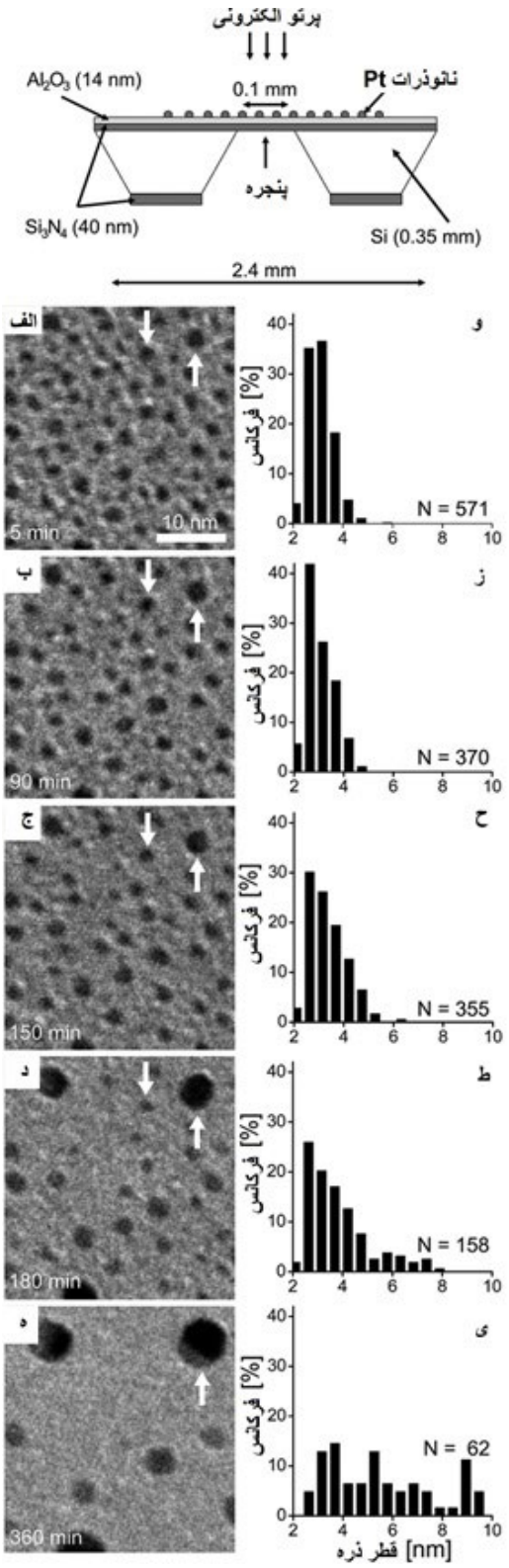
کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در فرآیند اکسیداسیون CO فاز گازی

نانوذرات اکسید فلز/فلز به‌طور گسترده به‌عنوان کاتالیزورها برای واکنش اکسیداسیون CO مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طول فرآیند اکسیداسیون CO به‌طور معمول دو پدیده روی سطح نانوذرات مذکور به وقوع می‌پیوندد:

۱. شکل‌گیری زیرلایه‌ای از اکسید زیر بیرونی‌ترین لایه نانوذرات فلزی به دلیل نفوذ اکسیژن به درون فلز [۲۹]؛

۲. بازسازی سطح نانوذرات به‌صورت ترمودینامیکی به دلیل جذب ترجیحی مولکول‌های CO توسط وجوه مربوطه در طول فرآیند کاتالیز [۳۰].

تغییر گازهای واکنشگر نزدیک کاتالیزورها منجر به وقوع تغییرات در مواد جذب شونده گازی روی سطوح مورد نظر می‌شود. این تغییرات به احتمال زیاد انرژی سطح معینی را اصلاح نموده که همین امر منجر به وقوع فرآیند بازسازی سطح نانوذرات می‌شود. بررسی سیستم اکسید سریم/طلا (Au/CeO_2) به‌عنوان کاتالیست اکسیداسیون CO، پدیده بازسازی اتمی وجوه نانوذرات {100Au}در طول فرآیند اکسیداسیون کاتالیزوری CO را آشکار می‌سازد [۳۱]. مولکول‌های CO جذب شده در مکان‌های بالایی اتم‌های Au که به‌طور فشرده به شکل شش ضلعی نمایان است، چسبیده و منجر به وقوع فرآیند بازسازی سطح می‌شوند. این وجوه بازسازی شده {100Au} فرآیند جذب CO به‌منظور دستیابی به پوششی سراسری روی سطح Au را تسهیل می‌کنند. در شکل (۱۱)، با استفاده از قدرت تفکیک پذیری اتمی ETEM درجا/بهنگام تغییر اتم‌های سطح مورد نظر در طول فرآیند اکسیداسیون CO نمایش داده شده‌است. با توجه به این مسئله که نانوذرات Au در معرض گاز شکل‌دهی هوا/CO در شرایط خلاء قرار گرفته، لذا لایه سطحی Au در جهت طول از ۰/۲۰ nm به ۰/۲۵ nm در هوا/CO افزایش می‌یابد (شکل (۱۱-ب)). به دلیل این پیکربندی پیوند کششی میان لایه سطحی و زیرلایه مورد نظر، سطح بازسازی شده نانوذرات



شکل (۱۰): نمایی از استقرار کاتالیزور مدل Pt/Al_2O_3 درون میکروسکوپ الکترونی عبوری. (الف) تا (ه): تصاویر TEM ثبت شده به روش درجا/بهنگام نمایش دهنده گذر زمان در یک ناحیه از کاتالیزور مدل Pt/Al_2O_3 هنگام قرار گرفتن در معرض فشار هوای ۱۰ mbar و دمای ۶۵۰ C° این تصاویر در واقع مقاطع ۴۰×۴۰ nm^2 از تصاویر اصلی TEM با محدوده کامل برابر با ۱۳۰×۱۳۰ nm^2 هستند. به‌منظور درک بهتر فرآیند کاهش و افزایش اندازه دو نانوذره توسط دو پیکان نمایش داده شده‌است [۲۷].

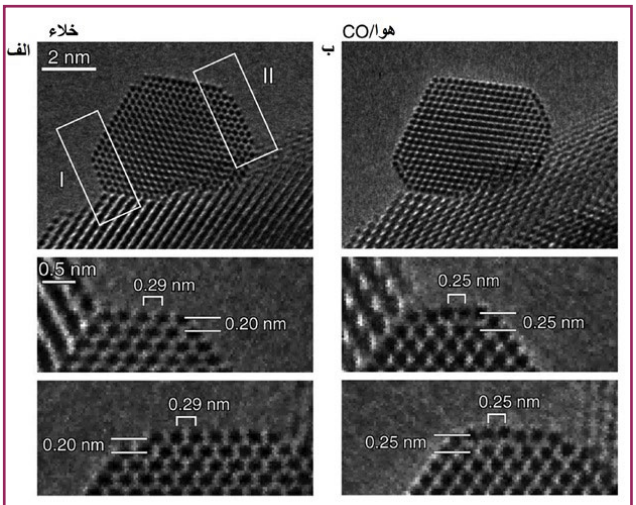
Au منجر به جذب مولکول‌های CO بیشتری در مقایسه با سطح اصلی می‌شود. نانوذرات Au تنها با وجوه Au(۱۰۰) و Au(۱۱۱) به ساختار هشت وجهی بریده شده تبدیل می‌شود. یکی دیگر از موارد مشابه مربوط به بازسازی سطح Cu روی زیرلایه ZnO در طول فرآیند سنتز متانول می‌شود. هنگامی که ذرات مس در معرض هیدروژن قرار می‌گیرند، آنگاه ترجیح می‌دهند شکل هندسی با سطوح (۱۰۰)، (۱۱۰)، و (۱۱۱) را تشکیل دهند. پس از اعمال بخار آب با فرمول (H_2O) به دلیل تغییر انرژی سطح مورد نظر بعد از جذب گونه‌های هیدروکسید (OH)، ذرات مذکور به شکل کروی تبدیل شدند. درصورت جایگزینی CO به جای بخار H_2O، ذرات مورد نظر به‌صورت وجه‌دار ظاهر می‌شوند.

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده در فرآیند شکافت آب فتوکاتالیستی

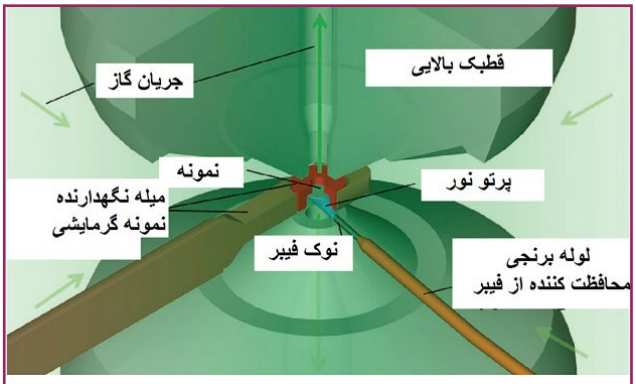
تولید شرایط واکنش مربوط به کاربردهای فتوکاتالیستی درون ETEM به بکارگیری منبع نوری نیازمند بوده که توانایی پدید آوردن محدوده‌ای از طول موج‌ها و شدت‌های قابل مقایسه با طول موج‌ها و شدت‌های موجود در نور خورشید را داشته باشد. به‌طور معمول می‌توان نمونه را با استفاده از منبع نور پهن باند خارجی و از طریق یک فیبر نوری داخلی درون ETEM در معرض نور مرئی و نور فرابنفش قرار داد (شکل (۱۲)) [۳۲]. برخی از محققان تمرکز خود را به سمت بررسی مواد نوری و فتوکاتالیست‌های درون میکروسکوپ الکترونی عبوری در شرایط پیوسته به همراه تابش با شدت کمتر معطوف ساخته‌اند.

نگهدارنده‌های نمونه TEM ویژه‌ای به‌منظور اعمال نور لیزر بر نمونه با استفاده از عدسی‌ها یا فیبرهای نوری طراحی و تولید شده‌اند [۳۳]. لازم به ذکر است، نگهدارنده نمونه TEM مجهز به فیبر نوری علاوه‌بر حفظ قابلیت انعطاف‌پذیری یک نگهدارنده معمولی، قابلیت بکار گرفته شدن درون هر گونه TEM (حتی TEMای که از ابتدا به‌عنوان ETEM طراحی نشده باشد) را نیز ارائه می‌دهد. کروتزیر[۶۲] و همکاران با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی مجهز به منبع نور با شدت بالا تغییرات سطح TiO_2 را مشاهده نمودند [۳۲]. ابتدا ذره TiO_2 با سطوح {۱۰۱} و {۰۰۲} در معرض نور قرار می‌گیرند (شکل (۱۳-الف)). سطح اولیه ذرات بلورینگی مطلوبی را نشان می‌دهند.

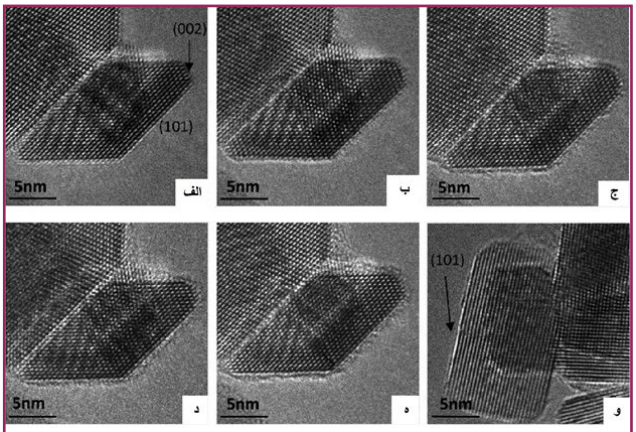
پس از اعمال H_2O و تابش نور به مدت ۱ ساعت، سطح ذره TiO_2 با ظاهر لایه بهم/نامنظم ریخته از حالت صاف خارج شد. بعد از تابش نور به مدت ۷ ساعت، لایه بهم ریخته بهتر نمایان می‌شود. تصویر تهیه شده با قدرت تفکیک‌پذیری اتمی نشان داده که اتم‌های موجود در بیرونی‌ترین لایه به‌طور قابل توجهی نامنظم شده‌اند (شکل (۱۳-ج)). ساختار نامنظم نفوذ بیشتری به درون زیرلایه‌ها پیدا می‌کند. پس از ۴۰ ساعت تابش نور، یک لایه آمورف[۶۳] پدیدار می‌شود (شکل (۱۳-ه)). انجام تحلیل‌های



شکل (۱۱): بازسازی سطح وجوه Au(۱۰۰) در شرایط فرآیند اکسیداسیون CO [۳۱].



شکل (۱۲): نمایی از طرح کلی میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام. یک فیبر نوری قرار گرفته درون لوله مسی، نور را برای اعمال بر نمونه فراهم می‌آورد [۳۲].



شکل (۱۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری ذرات TiO_2 در دمای ۱۵۰ C°. (الف): در شرایط بدون آب، (ب) تا (ه): در شرایط اعمال بخار آب به مدت: (ب) ۱ ساعت، (ج) ۷ ساعت، (د) ۲۰ ساعت و (ه) ۴۰ ساعت، (و): در شرایط اعمال بخار آب به مدت ۴۰ ساعت بدون پرتو الکترونی [۳۲].

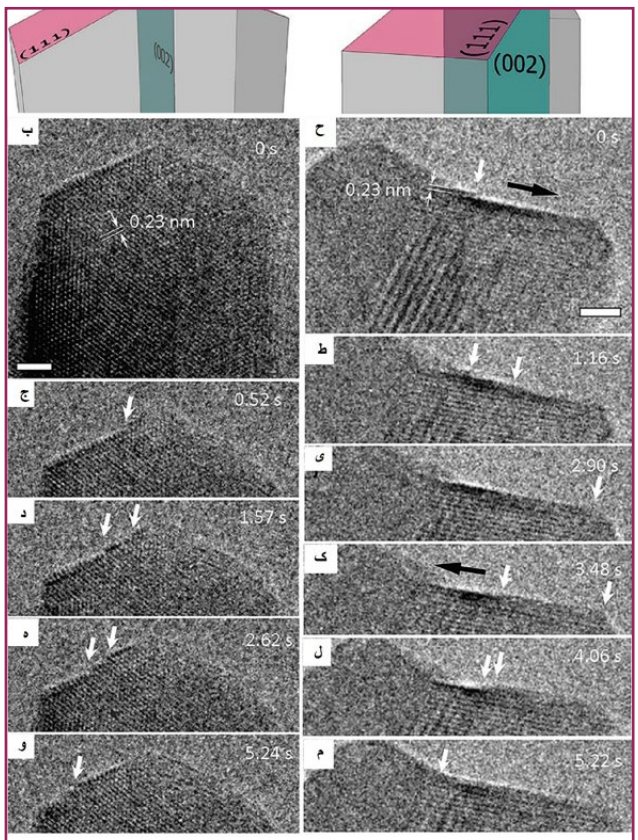
بیشتر با استفاده از روش طیف‌سنجی فتوالکترون پرتو ایکس[۶۴]، حضور گونه‌های Ti3+ درون لایه سطحی آمورف را نمایان ساخته، بدین معنی که شکافت آب در طول فرآیند فتوکاتالیز از رویه کاهش TiO_2 استفاده کرده است. تاکنون واکنش‌های شیمیایی

فاز گازی مختلفی توسط ETEM بررسی شده‌اند، اما چالش اصلی هنوز احتمال اثرگذاری گاز ورودی بر قدرت تفکیک‌پذیری تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری است. هنگامی که الکترون‌ها از گاز موجود درون ناحیه حول نمونه عبور نموده، درصد بسیار زیادی از آنها از طریق پراکندگی با مولکول‌های گاز برهم‌کنش داشته و همین امر منجر به کاهش قدرت تفکیک‌پذیری تصویر نهایی می‌شود. از آنجایی که مولکول‌های گاز فضاهای حول نمونه‌ها را پر کرده، لذا پراکندگی با الکترون‌ها درون فضاهای مذکور نیز رخ داده و در نهایت یونیزه شدن مولکول‌های گاز مورد نظر منجر به ظهور پلاسما نزدیک ناحیه نمونه مذکور می‌شود. این پلاسما به‌طور قابل توجهی بر موج الکترونی و همچنین قدرت تفکیک‌پذیری تصویر نهایی تاثیرگذار است. چالش‌های دیگر مربوط به مشاهده واکنش شیمیایی فاز گازی درون ETEM عبارتند از: تولید گونه‌های گاز واکنشگر با استفاده از گازهای یونیزه شده، افزایش واکنش شیمیایی ناخواسته و نامطلوب در سطح مواد مورد نظر و ایجاد تداخل در رفتار واکنش.

▣ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری محیطی درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده برای رشد بخار-مایع-جامد در فرآیند شکل‌گیری نانوسیم‌ها

فرآیند بخار-مایع-جامد[۶۵] [۳۵] در اصل برای سنتز نانوسیم‌ها[۶۶] که برای تولید نانوتجهیزات الکترونیکی و نانوحسگرها ضروری است مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند رشد VLS، مواد اولیه از نفوذ فاز گازی تامین شده و به‌منظور تولید NW یک فاز یوتکتیک[۶۷] مایع را با دانه/بذر جامد تشکیل می‌دهند. طول رشد NW در حالت VLS به چند میکرومتر می‌رسد. فرآیندهای رشد VLS به‌منظور تولید NWها چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما درک پویایی سیر تکاملی ساختار NW در طول فرآیند رشد این NWها به دلیل کمبود روش‌های مشاهده درجا/بهنگام هنوز مبهم است. البته تحقیقات جدیدی در رابطه با بررسی فرآیند رشد VLS درون ETEM مجهز به سلول گازی در حال انجام است. اف. راس[۶۸] و همکاران به‌منظور مشاهده فرآیند رشد VLS نانوسیم‌های سیلیکونی (Si) و درک سازوکار آن که شامل رسوب‌دهی دانه‌های فلزی، شکل‌گیری قطرات یوتکتیکی[۶۹] و رشد نانوسیم‌های Si روی دانه/بذرهای مورد نظر بوده از قابلیت فاز گازی میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام مجهز به سلول گازی استفاده نمودند. قابلیت تصویربرداری مستقیم از هر مرحله به‌صورت بلادرنگ فرصت تعیین کمیت پویایی شناسی فرآیند رشد را برای محققان فراهم می‌آورد. در این مقاله [۳۴]، به‌منظور بررسی فرآیند رشد VLS نانوسیم‌های Si درون ETEM از Au به‌عنوان کاتالیزور و دی سیلان[۷۰] (Si_2H_6) نیز به‌عنوان منبع Si در فشاری پایین‌تر از Torr ۱۰-۵ و دمایی حدود ۶۰۰°C استفاده شده‌است. درصورت تصویربرداری بلادرنگ از کل فرآیند رشد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام اختلاف قطر نانوسیم‌های مورد نظر به‌طور شفاف نمایان می‌شود. فرآیند رشد نانوسیم‌های Si از دانه/بذرهای Au در سطح طولی دربرگیرنده هندسه دندانه‌ای شکل بوده، بدین معنی که وجوه رشد یافته با جهت رشد موازی نیستند. اخیراً استک[۷۱] و همکاران با استفاده از تصویربرداری با قدرت تفکیک‌پذیری اتمی موجود درون میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام موفق به مشاهده رشد یک جفت دولایه از نانوسیم‌های گالیم نیترید[۷۲] بر دانه/بذرهای Au شدند. فرآیند رشد نانوسیم‌های Si بذردار در مقایسه با فرآیند رشد نانوسیم اکسید فلز بدون کاتالیزور دارای شرایط کاملاً متفاوتی است. در فرآیند رشد نانوسیم CuO، رشد لایه به لایه در نوک نانوسیم مذکور درون میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام مجهز به سلول گازی تصویربرداری شده‌است. تصویربرداری از سینتیک رشد نانوسیم CuO با قدرت تفکیک‌پذیری فضایی بالا درون تک لایه ۰/۲۳ نانومتری که در واقع نمایشگر رشد اتمی لایه به لایه صفحه (۱۱۱) بوده در مقیاس اتمی انجام پذیرفته است (نشان داده شده با پیکان در شکل‌های (۱۴-ب) و (۱۴-ح)).

مراحل رشد از یک سمت به سمت دیگر انتشار می‌یابد. لازم به ذکر است در هیچ یک از مراحل مربوطه از ذرات کاتالیزور در فرآیند رشد نانوسیم مورد نظر استفاده نشده‌است. بنابراین، به غیر از روش کاتالیزوری، روش به واسطه قطره و سازوکار رشد ریشه، این رویکرد را می‌توان به‌عنوان یک روش رشد نوین در نظر گرفت.



شکل (۱۴): نمایش رشد نانوسیم CuO در دو جهت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری درجا/بهنگام مجهز به سلول گازی. مقیاس خطی تصاویر برابر با ۲ nm است [۳۵].

نتیجه‌گیری

به‌منظور درک بهتر تغییرات شیمیایی و ساختاری در طول وقوع واکنش‌های شیمیایی گاز-جامد استفاده از ETEM درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده الزامی است. این روش به‌خصوص برای نانومواد‌هایی که بررسی آنها با استفاده از دیگر رویکردها امکان‌پذیر نبوده (نظیر: واکنش کاتالیزوری، خوردگی، واکنش‌پذیری رابط و غیره) کاربردی محسوب می‌شود. تغییرات ساختاری با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک‌پذیری بالا و الگوهای پراش وابسته به دما و زمان نمایش داده می‌شوند. تصاویر با قدرت تفکیک‌پذیری بالا اطلاعات مفیدی درباره سازوکارهای در سطح اتمی در طول فرآیندهای واکنشی فراهم می‌آورند. بررسی شفاف ساختارهای فازهای میانی (پایدار یا شبه پایدار) شکل گرفته در طول واکنش شیمیایی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. از توضیحات ذکر شده می‌توان اینگونه برداشت کرد که ETEM درجا/بهنگام مجهز به محیط گازی کنترل شده قابلیت نظارت مستقیم بر حالت‌های فعال نانومواد درون جو گازی را برای محققان حوزه‌های مختلف فراهم آورده است. در این مقاله، برخی از کاربردهای میکروسکوپ مذکور در حوزه‌های تحقیقاتی و صنعتی مختلف به‌طور تفصیلی بررسی شده‌اند. خواننده محترم می‌تواند با مطالعه این مقاله یک دیدگاه کلی درباره کاربردهای ETEM مذکور بدست آورده و بر این اساس نیازمندی‌های تحقیقاتی خود را برآورده سازد.

پی‌نوشت

۱. لیسانس الکترونیک، کارشناس آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری دانشگاه شیراز

۲. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی عبوری

3. In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy (ETEM)
4. Conventional Transmission Electron Microscopy (CTEM)
5. Ernst Ruska
6. in-situ Controlled Environment Transmission Electron Microscopy
7. Transmission electron microscopy (TEM)
8. Open cell
9. differential pumping system
10. Marton
11. sealed gas cell
12. In-situ XRD
13. Creemer
14. Nanoreactor
15. Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)
16. Silicon (Si) Chip
17. Silicon nitride (SiN)
18. Platinum (Pt)
19. Tadahiro Yokosawa
20. Palladium (Pd)
21. SELECTED AREA ELECTRON DIFFRACTION PATTERN (SAEDP)
22. Hiroshi Fujita
23. Hydrogen
24. hydride
25. embrittlement
26. Annealing
27. Copper (Cu)
28. M. Komatsu
29. Copper oxide (CuO)
30. nucleate
31. whiskers
32. Li Sun
33. fugacity
34. Silver(I) oxide (Ag2O)
35. Ag
36. Parkinson GM.
37. Ceria (Cerium(IV) oxide)
38. Giorgio S.
39. Titanium Dioxide (Ti02)
40. amorphous carbon
41. faceted
42. Zinc oxide (ZnO)
43. High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)
44. Tadahiro Kawasaki
45. facets
46. Vendelbo SB
47. Heide HG
48. Hydrogen H2
49. Helium (He)
50. Nitrogen (N2)
51. Argon (Ar)
52. Daulton TL
53. Hexavalent chromium (Cr(VI))
54. Shewanella oneidensis (S. oneidensis)
55. Extracellular Polymeric Substance (EPS)
56. Van der Waals
57. Chromium (Cr)
58. sintering
59. ripening
60. S. Helveg
61. Carbon Nanotubes (CNT)
62. Crozier
63. amorphous
64. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)
65. Vapor–Liquid–Solid (VLS)
66. Nanowire (NW)
67. eutectic
68. F. Ross
69. eutectic droplets
70. disilane
71. Stach
72. Gallium nitride (GaN)

مراجع

[1] Jinschek JR. Advances in the environmental transmission electron microscope (ETEM) for nanoscale in situ studies of gas-solid interactions. Chemical Communications. 2014;50:2696–706.

[2] Recent advances in gas-involved in situ studies via transmission electron microscopy. By: Ying Jiang, Wentao Yuan, and Zhaoyong Zhang.

[3] L.Schlapbach,A.Z ¨ uttel, Nature414(2001)353.

[4] A.Z ¨ uttel, Naturwissenschaften91(2004)157.

[5] D. Chandra, J.J. Reilly, R. Chellappa, Journal of Minerals Metallurgy and Materials 58 (2006) 26.

[6] V. Berube, G. Radtke, M. Dresselhaus, G. Chen, International Journal of Energy Resources 31 (2007) 637.

[7] A. Pundt, R. Kirchheim, Annual Review of Material Resources 36 (2006) 555.

[8] P.H.L. Notten, J.L.C. Daams, A.E.M. De Veirman, A.A. Staals, Journal of Alloys and Compounds 209 (1994) 85.

[9] M. Suleiman, N.M. Jisrawi, O. Dankert, M.T. Reetz, C. Bahtz, R. Kirchheim, A. Pundt, Journal of Alloys and Compounds 356-356 (2003) 644.

[10] J. Nakamura, K. Iwase, H. Hayakawa, Y. Nakamura, E. Akiba, Physical Chemistry C 113 (2009) 5853.

[11] V. Azambuja, S. Miraglia, D. Fruchart, S. Tavares, D. dos Santos, M. Mezouar, Journal of Alloys and Compounds (2005) 77.

[12] M. Porcu, A.K. Petford-Long, J.M. Sykes, Journal of Alloys and Compounds 453 (2008) 341.

[13] M. Danaie, D. Mitlin, Journal of Alloys and Compounds 476 (2009) 590.

[14] Yokosawa T, Alan T, Pandraud G, Dam B, Zandbergen H. In-situ TEM on (de)hydrogenation of Pd at 0.5–4.5 bar hydrogen pressure and 20–400°C. Ultramicroscopy. 2012;112:47–52.

[15] Hiroshi F, Masao K, Isao I. A universal environmental cell for a 3MV-class electron microscope and its applications to metallurgical subjects. Japanese Journal of Applied Physics. 1976;15:2221.

[16] Komatsu M, Mori H. In situ HVEM study on copper oxidation using an improved environmental cell. Journal of Electron Microscopy. 2005;54:99–107.

[17] In Situ Environmental TEM in Imaging Gas and Liquid Phase Chemical Reactions for Materials Research. Authors: Jianbo Wu, Hao Shan, Wenlong Chen, Xin Gu, Peng Tao, Chengyi Song, Wen Shang, and Tao Deng.

[18] Sun L, Noh KW, Wen J-G, Dillon SJ. In situ Transmission Electron Microscopy Observation of Silver Oxidation in Ionized/Atomic Gas. Langmuir. 2011;27:14201–6.

[19] Parkinson GM. High resolution, in-situ controlled atmosphere transmission electron microscopy (CA-TEM) of heterogeneous catalysts. Catal Lett. 1989;2:303–7.

[20] Giorgio S, Sao Joao S, Nitsche S, Chaudanson D, Sitja G, Henry CR. Environmental electron microscopy (ETEM) for catalysts with a closed E-cell with carbon windows. Ultramicroscopy. 2006;106:503–7.

[21] Creemer JF, Helveg S, Hoveling GH, Ullmann S, Molenbroek AM, Sarro PM, et al. Atomic-scale electron microscopy at ambient pressure. Ultramicroscopy. 2008;108:993–8.

[22] Creemer JF, Helveg S, Kooyman PJ, Molenbroek AM, Zandbergen HW, Sarro PM. A MEMS reactor for atomic-scale microscopy of nanomaterials under industrially relevant conditions. Microelectromechanical Systems, Journal of. 2010;19:254–64.

[23] Kawasaki T, Ueda K, Ichihashi M, Tanji T. Improvement of windowed type environmental- cell transmission electron microscope for in situ observation of gas-solid interactions. Review of Scientific Instruments. 2009;80:113701.

[24] Vendelbo SB, Elkjær CF, Falsig H, Puspitasari I, Dona P, Mele L, et al. Visualization of oscillatory behaviour of Pt nanoparticles catalysing CO oxidation. Nat Mater. 2014;13:884–90.

[25] Heide HG. Electron microscopic observation of specimens under controlled gas

pressure. The Journal of Cell Biology. 1962;13:147–52.

[26] Daulton TL, Little BJ, Lowe K, Jones-Meehan J. In situ environmental cell–transmission electron microscopy study of microbial reduction of chromium(VI) using electron energy loss spectroscopy. Microscopy and Microanalysis. 2001;7:470–85.

[27] S. B. Simonsen, I. Chorkendorff, S. Dahl, M. Skoglundh, J. Sehested, S. Helveg, J. Am. Chem. Soc. 2010, 132, 7968.

[28] C. Klinke, J.-M. Bonard, K. Kern, J. Phys. Chem. B 2004, 108, 11357.

[29] Y. L. G. A. Somorjai, Introduction to Surface Chemistry and Catalysis, Wiley, New York 2010.

[30] P. L. Hansen, J. B. Wagner, S. Helveg, J. R. Rostrup-Nielsen, B. S. Clausen, H. Topsoe, Science 2002, 295, 2053.

[31] H. Yoshida, Y. Kuwauchi, J. R. Jinschek, K. J. Sun, S. Tanaka, M. Kohyama, S. Shimada, M. Haruta, S. Takeda, Science 2012,335, 317.

[32] L. Zhang, B. K. Miller, P. A. Crozier, Nano Lett. 2013, 13, 679.

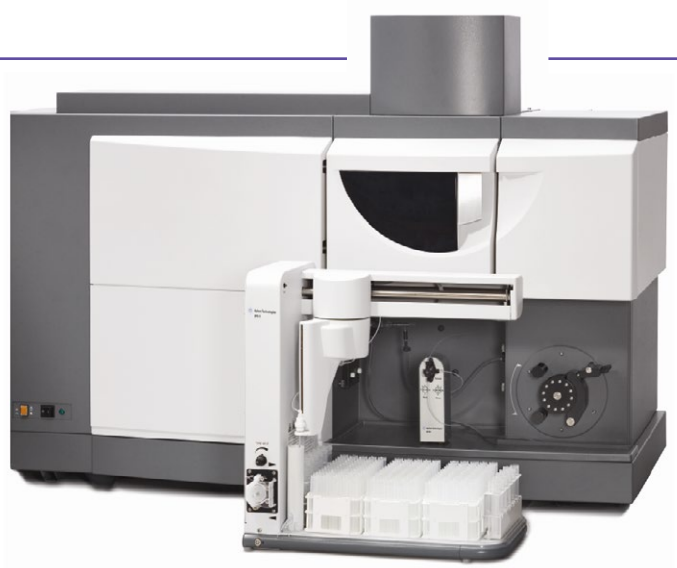
[33] B. K. Miller, P. A. Crozier, Microsc. Microanal. 2013, 19, 461.

[34] S. Kodambaka, J. Tersoff, M. C. Reuter, F. M. Ross, Phys. Rev. Lett. 2006, 96, 096105.

[35] S. Rackauskas, H. Jiang, J. B. Wagner, S. D. Shandakov, T. W. Hansen, E. I. Kauppinen, A. G. Nasibulin, Nano Lett. 2014,14, 5810.

مروری بر روش‌های ورود نمونه به دستگاه پلاسمای جفت شده القایی نشری و جرمی بر پایه مهپاش‌های بادی

نویسندگان
اعظم کاوسی[۱و۳*]
سمیه حنیفه سامانی[۲و۳]
*Azamkavosi@yahoo.com



واژه‌های کلیدی
ورود نمونه به ICP؛ مهپاش بادی؛ مقادیر کم نمونه؛ طیف‌سنج نشری نوری؛ طیف‌سنج جرمی.

چکیده

از سازوکارهای ورود نمونه از نظر کارکرد تولید آئروسل، حساسیت مهپاش به بافت نمونه، کاربری آسان و محدوده کاربردی جریان مایع وگاز به‌عنوان پاشنه آشیل اسپکترومتری اتمی نام برده می‌شوند. هر چند باید اذعان داشت که سیستم‌های ورود نمونه فعلی با حالت ایده‌آل آن فاصله زیادی دارند. امروزه به دلیل افزایش نیاز به آنالیز نمونه‌هایی با مقدار کم و همین طور افزایش استفاده از سیستم‌های تلفیقی و ترکیب مستقیم روش‌های جداسازی با دستگاه‌های آنالیز، کوچک‌سازی سیستم‌های ورود نمونه (توسعه میکرو مهپاش‌ها) به‌صورت یکی از اهداف اصلی در آمده است. تعداد زیادی از مهپاش‌های جدید مانند مهپاش‌های میکروی هم مرکز و طرح‌های مهپاشی ورود مستقیم نمونه براساس ساختارهای کلاسیک اما با رویکردی پیشرفته‌تر و توسعه یافته‌تر برای مهپاشی نمونه‌های مایع با مقدار کم ارائه شده‌اند. میکرو مهپاش‌ها قادر به تولید آئروسل با قطرات ریزتر از مقدار ناچیز نمونه خواهند بود؛ ولی نسبت به مهپاش‌های مرسوم، بیشتر مستعد گرفتگی یا بسته شدن هستند. برای رفع این نقصان، مهپاش‌هایی با سازوکار نوین و متفاوت طراحی و ساخته شده‌اند. در این مقاله به بررسی انواع مهپاش‌های بادی خواهیم پرداخت.

پلاسمای جفت شده القایی مجهز به طیف‌سنجی نوری[۴] و جرمی[۵] به‌عنوان مهمترین ابزار تجزیه شیمیایی مواد معدنی شناخته می‌شوند. از نخستین کاربردهای تجزیه‌ای[۶] ICP تاکنون پیشرفت‌های بزرگی اتفاق افتاده است. ژنراتورهای[۷] RF پایدارتر، طیف‌سنج‌های مدرن‌تر و سیستم‌های تشخیصی (شناساگرها) که براساس پیشرفت‌های به‌دست آمده در میکروالکترونیک ساخته شده‌اند، باعث توسعه همه جانبه در عملکرد چنین دستگاه‌هایی شده‌اند. اما ورود نمونه مایع کماکان مانند سیستمی است که در قرن ۱۹ طراحی شده بود. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در مورد استفاده از سیستم‌های نوین ورود نمونه به پلاسما انجام شده‌است.

مقدمه

ورود نمونه مایع، رایج‌ترین راه برای ورود نمونه به شعله‌ها و پلاسماهای تجزیه‌ای است. امروزه سیستم‌های ورود نمونه مختلفی برای اهداف خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در چندین مقاله به سیستم‌های ورود نمونه رایج پرداخته شده‌است. برای مثال، یک مقاله مروری از مهپاشی بادی[۸] در طیف سنجی اتمی در سال ۱۹۸۸ نوشته شد [۱]. مقاله دیگری با تمرکز ویژه بر ورود میکروجریان از نمونه توسط تودلی[۹] در سال ۲۰۰۶ ارائه شد [۲]. در این مقاله سعی بر این است که بررسی کاملی از مطالعات برجسته انجام شده اخیر در این زمینه ارائه شود.

ورود نمونه مایع (ملاحظات عمومی)

بیشتر دستگاه‌های ICP-OES و ICP-MS برای نمونه‌های مایع طراحی شده‌اند. فرم ایده‌آل برای ورود نمونه به پلاسما فرم گازی است؛ بنابراین، باید از نمونه‌های مایع، آئروسل با شرایط و ویژگی‌های مناسب تولید شود. آئروسل با استفاده از مهپاش‌های بادی ایجاد می‌شود که در آن، نمونه مایع ضمن عبور از یک شکاف باریک، در معرض فشار گاز با سرعت بالا قرار می‌گیرد و به قطرات بسیار ریز شکسته می‌شود.

اندازه ذرات نه تنها در مرحله حلال‌زدایی بلکه در مرحله تبخیر، اتم‌سازی و یونش تاثیرگذار خواهد بود؛ بنابراین، استفاده از محفظه افشانه به‌عنوان فیلتر آئروسل به‌منظور بهینه‌سازی آئروسل خارج شده از مهپاش برای ورود به پلاسما (ICP) ضروری است. محفظه افشانه به‌عنوان فیلتر آئرودینامیک براساس اندازه ذرات عمل می‌کند. آئروسل ایده‌آل باید دارای توزیع یکپارچه[11] باشد. اگر ویژگی‌های ابتدایی آئروسل تولید شده مطابق با پیش نیازهای ICP باشد، استفاده از محفظه افشانه[10] منتفی خواهد شد. اما پیش نیازهای مهم و زیادی برای آئروسل ایده‌آل وجود دارد. مقایسه ویژگی‌های آئروسل تولید شده با استفاده از مهپاش بادی و آئروسل ایده‌آل برای طیف‌سنجی اتمی در جدول (۱) آورده شده‌است. علاوه‌بر اندازه، سرعت ذرات (مانند زمان باقی ماندن نمونه در ناحیه داغ پلاسما) نیز از اهمیت زیادی برخوردار است [۲].

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های آئروسل تولید شده با مهپاش بادی و آئروسل ایده‌آل [۲].

آئروسل تولید شده با مهپاش بادی	آئروسل ایده‌آل طیف‌سنجی اتمی
قطرات درشت d > ۱۰۰ µm	قطرات ریز d < ۱۰ µm
آئروسل با سرعت بالا	سرعت قطرات تا حد امکان کم
(سرعت قطرات بالای ۸۰ ms^{-1})	شبیه سرعت گاز در محفظه افشانه (۲ ms^{-1})
تولید قطرات با قطر چند ده نانومترتا چند صد میکرومتر[12]	تولید قطرات با قطر یکسان
تولید قطرات با دانسیته عددی ناهمسان	تولید قطرات با دانسیته عددی یکسان
تاثیر ویژگی‌های فیزیکی نمونه (کشش سطحی و گرانروی) روی آئروسل	ویژگی‌های مشابه قطرات بدون توجه به ترکیب نمونه

با بزرگتر شدن قطره‌ها احتمال برخورد و تجمیع قطره‌ها بیشتر شده و در نتیجه، کیفیت آئروسل کاهش می‌یابد. برخورد و تجمیع قطره‌ها نسبت مستقیم با چگالی عددی قطره دارد. در تولید آئروسل نه تنها چگالی عددی کم قطره‌ها، بلکه توزیع یکنواخت قطره‌ها در مکان و زمان، مورد نظر است. در غیر این صورت، تجمیع قطره‌ها در بعضی نواحی (تراکم بالا) کیفیت آئروسل را پایین می‌آورد [۳]. بیشتر سیستم‌های ورود نمونه به شدت تحت تاثیر بافت نمونه است. در حالی که آئروسل ایده‌آل تحت تاثیر غلظت آنالیت، مقدار کل ماده حل شده و ویژگی‌های فیزیکی محلول نمونه قرار نمی‌گیرد. این نکته باید در روش‌های پیشرفته تلفیقی مانند سیستم شیبی جریان حلال در HPLC-ICP-MS[13] مورد توجه قرار بگیرد [۴].

ویژگی‌های آئروسل

واضح است که ویژگی‌های آئروسل کارایی سیستم ورود نمونه را تعیین می‌کند. پراکندگی اندازه قطرات مهپاش‌های بادی متداول با مدل‌های ریاضی قابل پیش‌بینی هستند. شناخته شده‌ترین معادلات ارائه شده توسط نوکییاما تاناساوا[14] وابستگی متوسط قطر ذرات آئروسل به (الف): خواص فیزیکی مایع و گاز مورد استفاده در مهپاش، (ب): شرایط عملکرد مهپاش (سرعت جریان مایع و گاز) و (ج): عوامل هندسی مهپاش مانند قطر خروجی لوله موئین مایع را نشان می‌دهد [۵]. اما سال‌ها بعد، معادله اصلاح شده توسط کرز[15] به جای این معادلات ارائه شد. در این معادله، متغیرهای تاثیرگذار زیادی (قطر خروجی مایع، کشش سطحی، چگالی و گرانروی مایع، سرعت جریان مایع و گاز) به‌عنوان عوامل موثر بر ویژگی‌های آئروسل در نظر گرفته شده‌اند [۶].

محدودیت‌های مهپاش بادی

ویژگی‌های آئروسل تولید شده با مهپاش‌های بادی به‌طور چشمگیری متفاوت با آئروسل ایده‌آل برای ورود به پلاسما است. نمونه مایع با استفاده از جریان گاز با سرعت بالا برای خروج از روزنه مهپاش شتاب داده می‌شود. اگر انرژی جنبشی گاز بر گرانش و کشش سطحی مایع غلبه کند، آن را می‌شکند و قطره‌های کوچکتر ایجاد می‌کند. اندازه قطر قطرات تولید شده با این روش توزیع گسترده‌ای از صفر تا چند صد میکرومتر دارد. تعداد و قطر میانگین قطرات آئروسل‌های ابتدایی به اندازه‌ای بزرگ هستند که باید توسط محفظه افشانه مناسب برای ورود به طیف‌سنج اتمی فیلتر شوند [۱].

مطابق شکل (۱) قطره‌های با قطر بیشتر از استاندارد در محفظه افشانه با دیواره‌ها برخورد می‌کنند و قطره‌ها با قطر کمتر از قطر بحرانی از محفظه عبور کرده و به‌عنوان آئروسل ثالث[16] (اندازه قطر همگن‌تر و ریزتر) به پلاسما وارد می‌شوند. تجمیع قطره‌ها و تبخیر حلال از اتفاقات دیگری است که در محفظه روی می‌دهد. بعضی قطره‌ها در اثر گرانش ته‌نشین شده و خارج می‌شوند. به‌طور تقریبی، ۹۸

درصد از آئروسل ابتدایی تبدیل به فاضلاب می‌شود. به نظر می‌رسد باید سیستمی با مصرف بهینه نمونه و تولید آئروسل با ویژگی‌های ایده‌آل جایگزین روش ساده حذف قطره‌ها با اندازه نامناسب شود.

روش‌های تلفیقی[۱۸] مانند CE-ICP-MS و HPLC طرح‌های جدید برای انتخاب و بهینه‌سازی روش‌های ورود نمونه هستند. در این روش‌ها جریان شوینده‌ها[۱۹] به‌طور معمول به شکل شویش شیبی تغییر کرده و در نتیجه گرانروی و کشش سطحی محلول مهپاش شده در طول اندازه‌گیری تغییر می‌کند. بنابراین، استفاده از استاندارد داخلی و یا تعبیه یک ستون دیگر[۲۰] با شویش شیبی برعکس ستون اولیه ضروری به نظر می‌رسد [۶].

تولید کننده‌های رایج آئروسل پیوسته

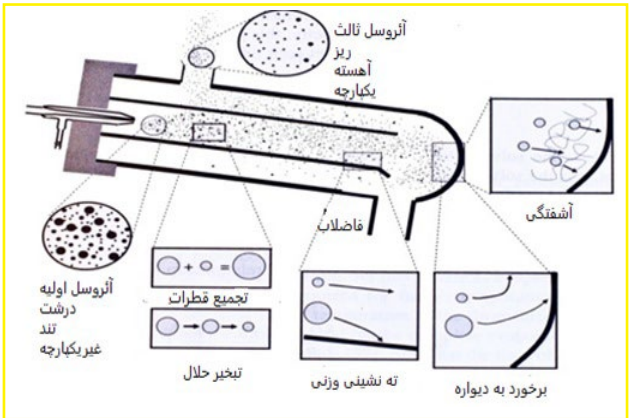
اولین بار مفهوم مهپاش بادی برای اهداف تجزیه‌ای در سال ۱۸۷۹ ارائه شد [۷]. چندین طراحی هندسی متفاوت از مهپاش‌های بادی وجود دارد. این مهپاش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی (الف): مهپاش‌های هم مرکز[۲۱] و (ب): مهپاش‌های جریان متقاطع[۲۲] تقسیم کرد [۱]. شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) انواع مختلفی از این دو نوع مهپاش را نشان می‌دهند.

■ مهپاش‌های هم مرکز

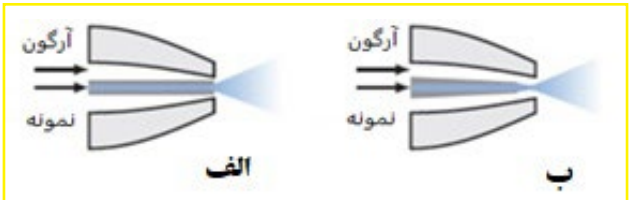
مهپاش‌های هم مرکز، قدیمی‌ترین و متنوع‌ترین طراحی برای مهپاش‌ها هستند. بیشتر این مهپاش‌ها از مواد مختلفی مانند شیشه، کوارتز و تفلون (مقاوم در مقابل هیدروفلوئوریک اسید) تهیه می‌شوند. مهپاش تمرکز/تارشدن جریان از جدیدترین طراحی‌های مهپاش‌های هم مرکز است [۸]. بیشتر دستگاه‌های ICP به‌منظور پایداری بیشتر پلاسما و سهولت کاربری، با مهپاش‌های هم مرکز و محفظه افشانه دوعبوره[۲۵] تجهیز می‌شوند. سیگنال به نویز پایین و تکرارپذیری طولانی مدت با استفاده از این نوع مهپاش قابل حصول خواهد بود؛ اگر چه مصرف نمونه زیاد، از محدودیت‌های این سیستم ورود نمونه است. این مهپاش‌ها برای نمونه‌هایی با مقدار متوسط نمک و ذرات حل شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

■ مهپاش‌های بابینگتون[۲۶]، جریان متقاطع و V-groove

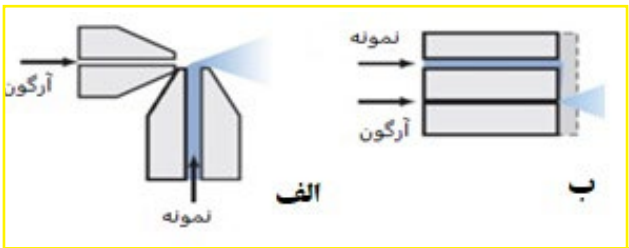
این سه نوع مهپاش برای نمونه‌هایی با گرانروی بالا، نمونه‌های حاوی مقدار زیاد ماده جامد حل شده و یا حتی نمونه‌های دوغابی استفاده می‌شوند. شکل (۵) نمونه‌ای از مهپاش بابینگتون را نشان می‌دهد.



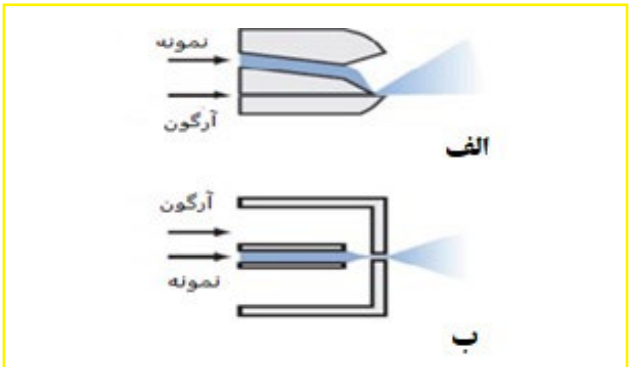
شکل (۱): نمای کلی مراحل انتقال و فیلتراسیون در محفظه افشانه از نوع اسکات[۱۷] [۹].



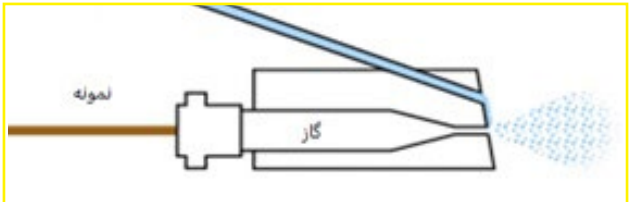
شکل (۲): دو نوع مهپاش هم مرکز، (الف): بدون تورفتگی و (ب): با تورفتگی [۹].



شکل (۳): دو نوع طراحی راست گوشه (الف): جریان متقاطع و (ب): V-groove [۹].



شکل (۴): مهپاش، (الف): عبور موازی[۲۳] و مهپاش (ب): تمرکز/ تار شدن جریان[۲۴] [۹].



شکل (۵): مهپاش بابینگتون [۹].

■ **محفظه افشانه**

بیشتر مهپاش‌های مرسوم با سرعت بالای مکش نمونه، آئروسل غیر یکپارچه (از نظر اندازه و سرعت قطرات) تولید می‌کنند. بنابراین، محفظه افشانه مانند فیلتر عمل کرده و با حذف قطرات بزرگ با سرعت خیلی بالا و خیلی پایین، آئروسلی با پراکندگی کم از نظر اندازه و سرعت قطرات تولید می‌کند. از آنجا که هر مهپاش آئروسلی با ویژگی‌های خاص تولید می‌کند، باید محفظه افشانه‌های مخصوص برای هر مهپاش طراحی شده و به‌منظور حصول بهترین نتیجه با هم ترکیب شوند. یکی از مواردی که باید مورد نظر قرار بگیرد این است که حجم محفظه باید متناسب با سرعت جریان مایع خروجی از مهپاش باشد. به‌طور کلی دو نوع محفظه افشانه یکی برای مهپاش‌های سرعت جریان بالا و دیگری متناسب با کاربردهای میکروجریان ساخته می‌شوند.

به‌طور کلی، محفظه افشانه به‌عنوان حد واسط عمل کرده و آئروسل خارج شده از مهپاش را اصلاح و برای ورود به پلاسما آماده می‌کند. برای کاهش مصرف زیاد نمونه باید از محفظه‌های افشانه (به‌عنوان فیلتر کننده قطرات درشت) صرف نظر کرد و فقط ازمحفظه‌های افشانه برای «انتقال آئروسل» بدون هیچ گونه «فیلتراسیونی» بهره جست. از طرفی، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به علت محدودیت ورود حلال به پلاسما، استفاده از سیستم ورود نمونه میکرو جریان پیشنهاد می‌شود.

روش‌های جدید و پیشرفته تولید آئروسل

در مهپاش‌های رایج مقدار زیادی از نمونه توسط مهپاش به آئروسل تبدیل می‌شود که قسمت اعظم آن در محفظه افشانه فیلتر می‌شود و فقط مقدار ناچیزی از نمونه مهپاش شده سیگنال اندازه‌گیری شده را ایجاد می‌کند. اشکال اساسی روش‌های مرسوم، حساسیت پایین ناشی از بازدهی کم انتقال نمونه و همچنین احتمال بالای گرفتگی مهپاش‌ها در نمونه‌های حاوی نمک زیاد است. امروزه نیاز به سیستم‌هایی برای آنالیز مقادیر میکرو و یا نانو از نمونه، مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور معمول، به دلیل مطالعات و بررسی‌های قانونی و یا ملاحظات امنیتی (شیمی هسته‌ای و یا سم‌شناسی) مقدار نمونه محدودی برای آنالیز در اختیار قرار می‌گیرد. از طرفی، به دلیل توسعه کاربرد مواد در مقیاس نانو (تک سلول‌ها، نانوذرات) روش‌های تجزیه‌ای که بیشترین حساسیت و مصرف نمونه کمتری دارند، مورد نیاز هستند. بنابراین، تقاضا برای روش‌های حساس آنالیز و بررسی نمونه‌هایی با حجم میکرولیتر یا حتی کمتر، افزایش یافته است.

از طرفی در سال‌های اخیر، تلفیق روش‌های جداسازی جریان کم با ICP-OES/MS رشد یافته است. در این موارد برای کسب نتیجه بهینه، سیستم ورود نمونه علاوه‌بر حساسیت بالا، نیازمند جداسازی با کروماتوگرافی و یا الکتروفورز موئین است [۹]. به همین دلیل توسعه میکرومهپاش‌ها پیش رو قرار گرفت. این میکرومهپاش‌ها با وجود سرعت نمونه‌برداری کم، آئروسل خوبی تولید می‌کنند. اما این مهپاش‌ها در نمونه‌هایی که حاوی ماده جامد محلول (TDS)[۲۷] زیادی هستند بیشتر مستعد گرفتگی و یا بسته شدن هستند.

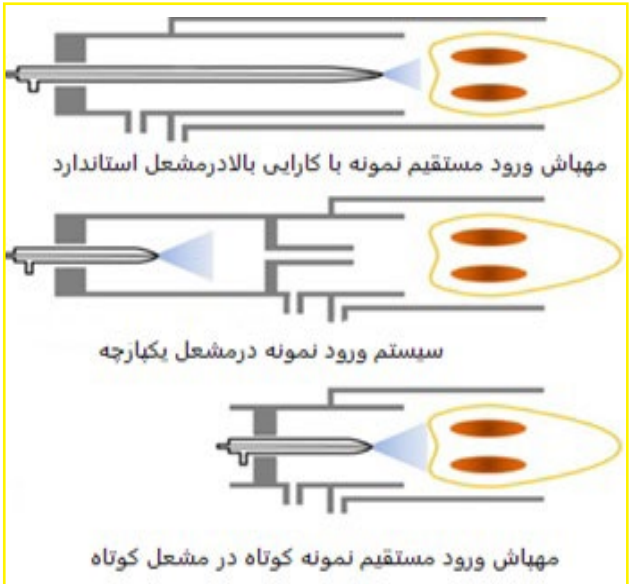
■ **مهپاش‌های میکرو – هم مرکز**

مهپاش‌های هم مرکز رایج‌ترین مهپاش‌ها هستند. تعداد زیادی مقاله از سیستم‌های نوینی که از نبولایزرهای میکرو – هم مرکز استفاده می‌کنند، منتشر شده‌است. یکی از این طراحی‌ها، مهپاش هم مرکز با کارایی بالا[۲۸] است. این مهپاش برای کاربردهای میکرو جریان ($1-10\ \mu L\ min^{-1}$) طراحی شده‌است.

شکل اصلاح شده‌ای از این مهپاش نیز با عنوان مهپاش هم مرکز با عملکرد بالا-روزنه بزرگ[۲۹] برای استفاده در نمونه‌های با TDS بالا با سرعت جریان ($0/25-0/8\ mL\ min^{-1}$) طراحی شده‌است.

■ **مهپاش‌های تزریق مستقیم / مشعل یکپارچه**

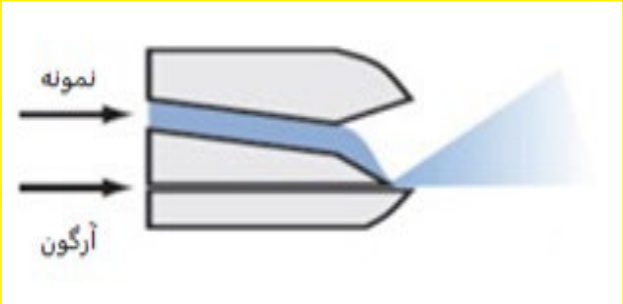
در سال‌های اخیر مهپاش‌های ورود مستقیم نمونه[۳۰] و مشعل یکپارچه[۳۱] و مهپاش ورود مستقیم با بازدهی بالا[۳۲] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. قطر ذرات آئروسل اولیه در این مهپاش‌ها به اندازه کافی کوچک هستند تا بدون استفاده از محفظه افشانه به‌طور مستقیم به پلاسما وارد شوند. حساسیت، دقت و حد تشخیص در مهپاش‌های ورود مستقیم مشابه و یا بهتر از مواردی است که از یک مهپاش جریان متقاطع در کنار محفظه افشانه دوعبوره برای ورود نمونه استفاده می‌شود. از طرفی، مطابق شکل (۶) نمونه به‌طور کامل به پلاسما وارد شده و زمان شستشو در این نوع سیستم ورود نمونه کاهش می‌یابد. یکی از معایب این سیستم، ورود مقدار زیاد حلال به پلاسماست که باعث ایجاد شرایط ناپایدار در پلاسما شده که افزایش تداخل‌های غیرطیفی را به دنبال خواهد داشت [۱۰].



شکل (۶): طراحی مهپاش DIHEN (بالا)، TISIS (وسط)، short DIN (پایین) [۹].

■ مهپاش عبور موازی

اخیرا انواع زیادی از مهپاش‌های عبور موازی معرفی شده‌اند. امروزه طراحی‌های قبلی بهینه شده و با عنوان مهپاش‌های عبور موازی ارتقا یافته[۳۳] نامیده می‌شوند. مهپاش اینیامیست[۳۴] با جریان بین ($0/2$-$50\ \mu L\ min^{-1}$) نمونه‌ای از این مهپاش‌هاست که به علت باریک بودن مسیر عبور نمونه برای نمونه‌های شامل (TDS) بالا مناسب نیست؛ به همین دلیل باید به‌طور دائمی یک فیلتر در سر راه لوله موئین نمونه‌برداری قرار بگیرد. مطابق شکل (۷) در مهپاش‌های موازی، برخلاف مهپاش‌های هم مرکز، مسیر عبور نمونه و گاز با هم موازی است و آئروسل تولید شده به شکل محوری از مهپاش خارج نمی‌شوند؛ به همین دلیل زاویه محفظه افشانه متصل به این مهپاش بسیار مهم و تاثیرگذار خواهد بود. در تحقیقی از مهپاش میرامیست[۳۵] استفاده شده و مشخص شد که حساسیت بهینه ICP-MS در شرایطی که جهت گاز ورودی به مهپاش در زاویه ۱۵ درجه نسبت به ورودی نمونه باشد، حاصل خواهد شد [۱۱]. بهترین نتایج با قرار دادن جهت اسپری مهپاش رو به بالا حاصل می‌شود. بهتر است که مهپاش به‌طور کامل به محفظه افشانه وارد نشده و فقط حدود ۱۰-۱۵ mm وارد شود. در این مهپاش ورود نمونه‌های مختلف و مراحل شست وشو سخت و وقت‌گیر خواهد بود. بنابراین، بهتر است از این سیستم به‌عنوان حدواسط برای استفاده از ICP-MS در آنالیزهای تزریق جریان[۳۶] و یا روش‌های جداسازی با سرعت جریان بسیار ناچیز[۳۷] استفاده شود.



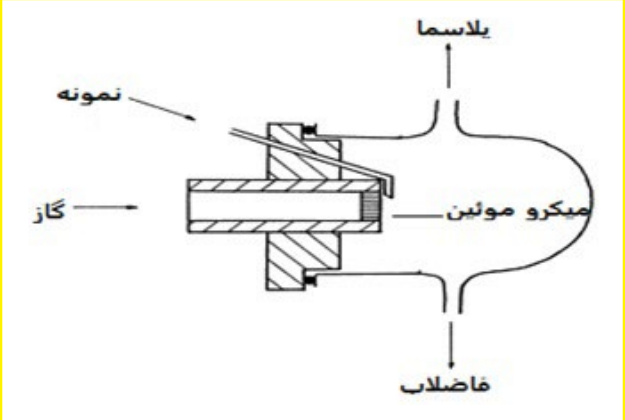
شکل (۷): مهپاش عبور موازی [۱۱].

■ مهپاش‌های جریان متقاطع

در این مهپاش از یک آرایه قابل تعویض شامل هزاران خروجی میکروموئین[۳۸]، در مسیر عبور گاز استفاده می‌شود که می‌تواند بازده آئروسل را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. از سوی دیگر، موقعیت لوله موئین نمونه نسبت به مواردی که یک تک شکاف خروجی گاز وجود دارد آن چنان حساس و بحرانی نیست. این آرایه در جریان (20-$500\ \mu L\ min^{-1}$) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطابق شکل (۸) در مرکز یک صفحه شیشه‌ای پیرکس به قطر ۹ mm یک مستطیل با ابعاد ۳*۶ mm قرار دارد که در آن ۲۰۰۰ شکاف لوله موئین موازی با قطر ۱۰ mμ تعبیه شده‌است. این صفحه شیشه‌ای از پشت به راحتی به گاز وصل شده و گاز ورودی پس از عبور از آرایه به محلول نمونه برخورد و آن را اسپری می‌کند. محلول نمونه با استفاده از پمپ پریستالتیک در جلوی جریان گاز خروجی از این آرایه قرار می‌گیرد و پس از آن مهپاش به‌طور مستقیم به یک محفظه افشانه متصل می‌شود. هر شکاف لوله موئین مانند یک مهپاش بابینگتون عمل می‌کند و همه شکاف‌ها از یک گاز و محلول نمونه یکسان تغذیه می‌شوند. ساختار این مهپاش (عدم عبور نمونه از لوله موئین) تاثیر به سزایی در کاهش میزان گرفتگی و بسته شدن مهپاش دارد [۱۲].

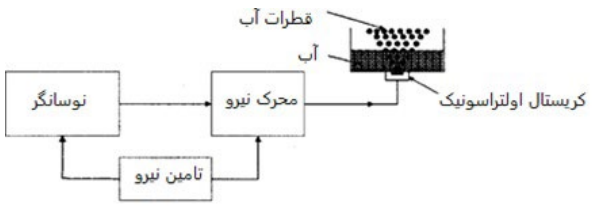
با تغییر در تعداد و اندازه شکاف‌ها می‌توان از این میکرو آرایه‌ها در جریان گاز ($0/3$-$3\ \mu L\ min^{-1}$) استفاده کرد. این مهپاش آئروسلی با پراکندگی کم در قطر قطرات ایجاد می‌کند و از طرفی در شرایط مناسب حدود تشخیص، حساسیت و دقت نسبت به مهپاش‌های هم مرکز مطلوب‌ترخواهد بود [۱۲].



شکل (۸): نمایی از مهپاش جریان متقاطع [۱۲].

■ مهپاش اولتراسونیک[۳۹]

در این نوع مهپاش از امواج صوتی تولید شده با استفاده از یک نوسانگر (کوارتزی) پیزوالکتریک در میدان مغناطیسی متناوب برای تبدیل مایع به قطرات ریز (اندازه میکرونی) استفاده می‌شود. شکل (۹) عملکرد این مهپاش را نمایش می‌دهد. نوسانگر کوارتزی دایره‌ای شکل و با ضخامتی در حدود (۷-۱۴ mm) است. صفحه کوارتزی در یک لوله حاوی روغن ترانسفورماتور قرار دارد که در بالای آن یک صفحه نازک برنجی در نقش الکترود دوم قرار گرفته است. در بیشتر موارد، تنظیم شدت و توان ارتعاش با تغییر دامنه ارتعاش انجام می‌شود. افزایش فرکانس ارتعاش باعث کاهش اندازه قطرات می‌شود. افزایش شدت روی اندازه بی‌تاثیر بوده ولی زمان مهپاشی را کاهش می‌دهد [۱۳].



شکل (۹): نمایی از مهپاش اولتراسونیک [۱۳].

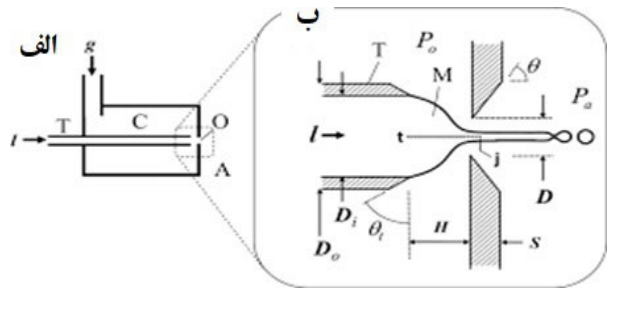
در مهپاش‌های ورود مستقیم نمونه (اولتراسونیک) علاوه‌بر حذف تاثیرات مخرب محفظه افشانه (اثر حافظه، بالا رفتن نویز و پهن‌شدگی خطوط نشری)، بازده انتقال نمونه ۱۰۰ درصد است. از طرفی، نوع جدیدتر این مهپاش با افزودن یک سیستم لوله داغ و کندانسور (حلال زدا) از ورود مقدار زیاد حلال که باعث ناپایداری و سرد شدن پلاسما می‌شود، جلوگیری می‌کند. بازده انتقال آئروسل در مهپاش اولتراسونیک تقریبا ۱۰ برابر مهپاش‌های بادی است.

■ مهپاش‌های تمرکز / تار شدن جریان[۴۰]

جالب‌ترین مهپاش بادی، مهپاش تمرکز و تار شدن جریان است. این روش در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. مطابق شکل (۱۰) ابعاد بحرانی این مهپاش فاصله لوله موئین تا صفحه (H) و قطر روزنه (D) و قطر جت (Dj) است. اما ضخامت و شکل صفحه و دیواره لوله موئین نیز مهم هستند. مهپاش تمرکز جریان توانایی غلبه بر محدودیت‌های مهپاش‌های بادی مانند نیاز به کاهش قطر لوله موئین نمونه برای تولید اسپری مناسب در اندازه جریان میکرولیتر را دارد. همان‌طور که قبلا گفته شد، کاهش قطر لوله موئین باعث افزایش احتمال گرفتگی مهپاش برای نمونه‌های حاوی TDS بالا و افزایش خطر بسته شدن مسیر مهپاش می‌شود. شکل(۱۱) نمایی از دو جریان تمرکز/محو شدن را نشان می‌دهد.

در مهپاش‌های تمرکز جریان، به علت شکل هندسی مهپاش، مایع خروجی از لوله موئین به شکل هلال درآمده و در اثر افت فشار از داخل محفظه به خارج محفظه (در حال خروج از روزنه‌ای با قطر کمتر از لوله موئین نمونه) باریک شده و به شکل مخروطی در می‌آید. این افت فشار باعث تشکیل یک جریان سریع مایع[۴۱] در ۱/۳ قطر روزنه خروجی شده و قطرات یکپارچه (قطرات با قطر و سرعت یکسان) تولید می‌شوند [۸].

یکی از فواید این نوع مهپاش، وجود جریان گاز در اطراف جریان سریع مایع است که مانع از هر گونه تماس مایع با دیواره روزنه شده و از گرفتگی یا مسدود شدن مهپاش جلوگیری خواهد شد. قطر جریان سریع مایع به هیچ عنوان تابع قطر لوله موئین نمونه نیست.

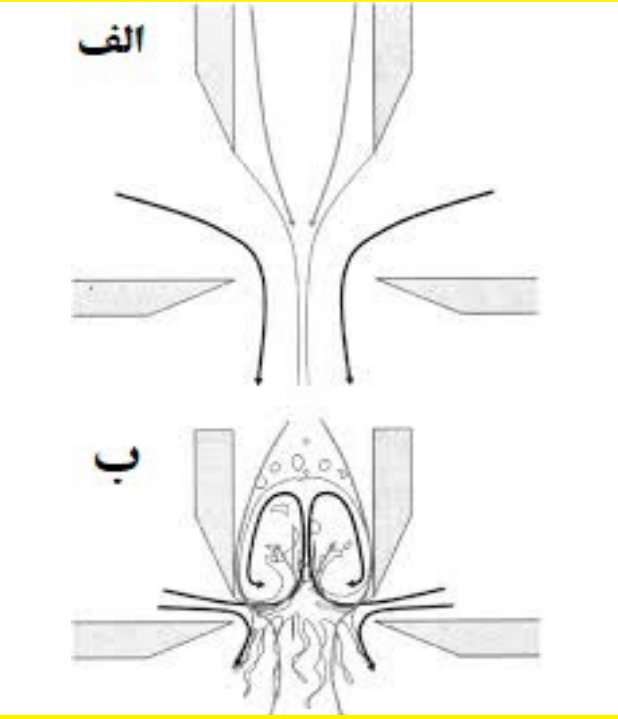


شکل (۱۰): طراحی هندسی مهپاش تمرکز/ تارشدن جریان [۹].

گانان-کالووبا توجه به ویژگی‌های فیزیکی محلول نمونه و عوامل هندسی، تولید قطره را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله تصریح شده‌است که تنوع و تغییرات دقیق شرایط کاربری با تغییر در سازوکار تولید قطرات بر ویژگی‌های آئروسل تاثیرگذار خواهد بود [۸]. در استفاده از این مهپاش، سه مد مختلف کاربری قابل حصول است:

۱. مد تمرکز جریان؛
۲. مد تمرکز جریان آشفته[۴۲]؛
۳. مد تار جریان شدن

تغییرات جریان‌ها با دو عامل (عدد وبر[۴۳] و نسبت فاصله لوله موئین تا صفحه به قطر روزنه H/D) بیان می‌شوند که در آن عدد وبر وابسته به کشش سطحی، چگالی و نرخ جریان محلول نمونه و همچنین افت فشار روزنه است.



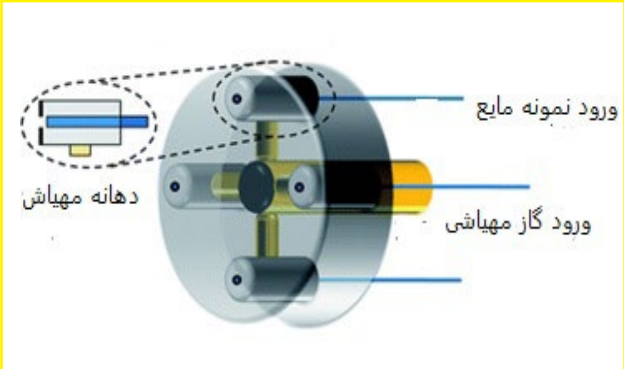
شکل (۱۱): نمایی از (الف): تمرکز جریان و (ب): تار شدن جریان [۸].

به‌طور کلی، در قطر روزنه D بین ۲۰۰-۵۰ µm و ضخامت صفحه ۷۵-۵۰ µm مد «تمرکز جریان» غالب شده و باعث تولید قطرات با توزیع حجمی باریک خواهد شد. مد «تمرکز جریان آشفته» حالت گذار است. حالت «جریان تارشونده» در روزنه‌های بزرگتر و ضخامت بزرگتر صفحه (۷۵<S<۴۰۰ µm و ۱۰۰<D<۷۰۰ µm) شکل می‌گیرد. این سازوکار باعث ایجاد اسپری با یکپارچگی کمتر ولی ریزتر خواهد شد. در این سازوکار با نرخ جریان ثابت مایع و گاز میانگین قطر قطرات ۴-۲ برابر کمتر از دو حالت دیگر است [۸].

■ مهپاش چند حالته (مولتی مد)

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از تحقیقات در مورد روش‌های ورود نمونه دومدی، سه‌مدی و یا چند مد انجام شده‌است که در آن از چند مهپاش به‌طور همزمان برای ورود نمونه استفاده شده‌است. در این مطالعات، روش‌های مهپاشی متفاوت (مهپاش‌های هم مرکز، عبور جریان موازی و مهپاش‌های اولتراسونیک) در کنار هم مورداستفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها برای اندازه‌گیری گونه‌های فرار با استفاده از روش‌های کالیبراسیون آنلاین مطابق با بافت و یا تولید هیدرید[۴۴] آنلاین به کار گرفته می‌شود.

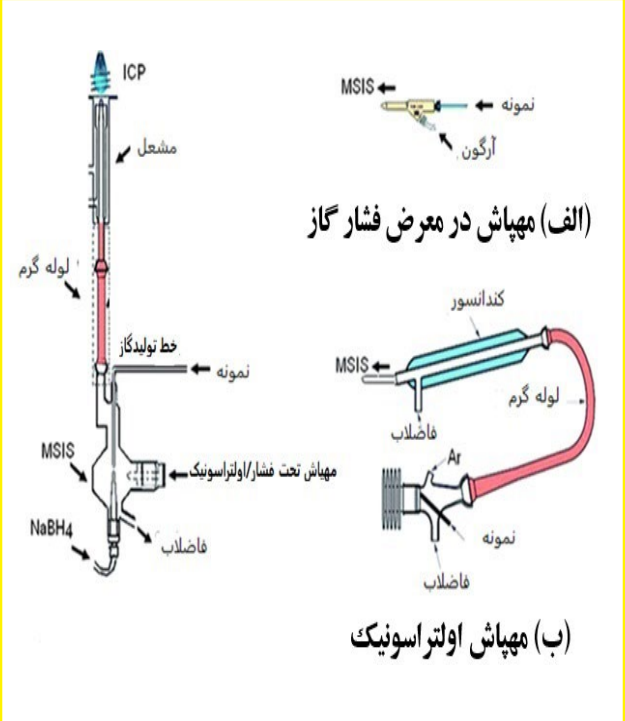
در تحقیق کواچه[۴۵] یک مهپاش چهارگانه[۴۶] از نوع جریان متمرکز ارائه شد. مطابق شکل (۱۲) این مهپاش دارای چهار ورودی مجزا و یک ورودی گاز مشترک است. هر یک از چهار مهپاش از نظر قطر و سرعت میانگین قطرات، آئروسل‌های متفاوتی تولید می‌کنند. از طرفی، مشارکت هر یک از مهپاش‌ها در آئروسل نهایی یکسان نیست. بالاترین مشارکت (حدود ۶۰ درصد) برای نازلی است که کوچکترین اندازه و بیشترین سرعت قطرات را نسبت به دیگر نازل‌ها دارد. نتایج آنالیز با این سیستم ورود نمونه با نتایج حاصل شده از سیستم مهپاش استاندارد مقایسه شد و به جز در بعضی عناصری که راحت یونیزه می‌شوند (K, Li, Ba) تفاوت قابل توجهی در حساسیت دیده نشد. با کاهش RSD[۴۷] (انحراف استاندارد نسبی) حد تشخیص بیشتر عناصر در مهپاش با چهار ورودی مجزا بهبود قابل توجهی نشان می‌دهد [۱۴].



شکل (۱۲): نمای کلی مهپاش تمرکز جریان (چند مد) [۱۴].

در مطالعه اسفاو[۴۸] مطابق شکل (۱۳) سیستم دیگری شامل خط تولید بخار[۴۹]، یک مهپاش بادی برای ورود عامل احیا کننده ($NaBH_4$) و ورودی سوم شامل یک مهپاش بادی دیگر و یا مهپاش اولتراسونیک است که همگی به محفظه افشانه متصل می‌شوند. در این سیستم از یک تیوب پیش تبخیر[۵۰] قبل از ورود به پلاسما استفاده شده‌است. نمونه مایع می‌تواند از (الف): مهپاش بادی و یا (ب): مهپاش اولتراسونیک وارد شود و نمونه گازی از مسیر تولید بخار به سیستم وارد خواهد شد.

بیشتر سیستم‌های ورود نمونه چند حالته[۵۱] حد تشخیص بهتری برای فرم‌های هیدرید و غیر هیدرید از خود نشان می‌دهند و دلیل این ارتقاء در مراحل تحریک و یونیزاسیون، به وجود محصول جانبی (گاز هیدروژن) حاصل از مراحل تولید بخار شیمیایی نسبت داده می‌شود. این فرضیه توسط ویلتشه[۵۲] مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که افزایش شدت سیگنال برای تعدادی از عناصر در هر دو فرم هیدرید و غیر هیدرید دیده شده‌است و این افزایش شدت با افزودن گاز هیدروژن با جریان ($10\ ml\ min^{-1}$) به گاز حامل آرگون با حضور و بدون حضور $NaBH_4$ مشاهده می‌شود. این افزایش نه تنها به علت انتقال بهتر نمونه گازی شکل نسبت به آئروسل مرطوب بلکه به علت تاثیر هیدروژن بر مراحل تحریک و یونیزاسیون در پلاسماست [۱۵]. یک دلیل ناشناخته برای ارتقای حساسیت در سیستم‌های ورود نمونه چند مد می‌تواند تاثیر مفید افزودن گاز هیدروژن در گاز حامل آرگون ICP باشد [۱۶].



شکل (۱۳): مهپاش مولتی - مد (سمت چپ)، (الف): مهپاش بادی (ب): مهپاش اولتراسونیک [۹].

نتیجه‌گیری

سیستم ورود نمونه از دیدگاه عملکرد قابل حصول در انتقال آئروسل، حساسیت مهپاش به بافت نمونه، کاربری آسان و محدوده کاربردی برای جریان مایع و گاز، به‌عنوان محدودیت طیف‌سنجی جرمی و نشری نام برده می‌شود. عوامل ذکر شده، تنها چند نمونه از شرایط بحرانی برای آنالیز با ICP-MS و یا ICP-OES هستند .

مهپاش‌های جدید در ترکیب با محفظه افشانه‌های مناسب، براساس رویکردها و روش‌های متفاوت (مهپاش عبور موازی، مهپاش حرارتی با کمک مایکروویو و سیستم ورود نمونه چند حالته) معرفی شده‌اند. تعداد زیادی از مهپاش‌های جدید مانند مهپاش‌های میکرو، هم مرکز و طرح‌های مهپاش ورود مستقیم نمونه براساس ساختارهای کلاسیک اما با رویکردی پیشرفته‌تر و توسعه یافته‌تر برای مهپاشی نمونه‌های مایع ارائه شده‌اند.

تحقیقات اخیر در زمینه ورود نمونه به اسپکترومتر اتمی و جرمی نشان می‌دهد که کوچک‌سازی سیستم‌های ورود نمونه روندی اساسی است که دلیل این امر، افزایش نیاز به آنالیز مقدار کم نمونه بدون رقیق‌سازی و همچنین توسعه روش‌های تلفیق روش‌های جداسازی جریان کم با دستگاه‌های آنالیز دیگر مانند ICP-MS و یا الکتروفورز موئین است. بیشتر سیستم‌های پیشنهادی قادر هستند که مقدار جریان مایع را تا عدد تک رقمی در محدوده $\mu L\ min^{-1} - nL\ min^{-1}$ کاهش داده و امکان کاربردهای بیشتر و جدیدتری را فراهم آورده‌اند.

در بیشتر روش‌های ورود نمونه، با کاهش سرعت جریان مایع در محدوده میکرو و یا حتی نانو در ICP-OES,MS (مطابق آنچه که در بخش‌های (۳-۱) تا (۳-۷) اشاره شد) سیگنال به نویز افزایش و تکرارپذیری طولانی مدت کاهش می‌یابد. افزایش سیگنال به نویز به کاهش چگالی عددی قطره‌ها در جریان کم نمونه نسبت داده می‌شود. با افزایش غیر یکپارچگی آئروسل و کاهش چگالی عددی قطره‌ها، نوسانات سیگنال و در پی آن RSD افزایش یافته و در نتیجه تکرارپذیری کاهش می‌یابد. به همین دلیل تعداد کمی از تحقیقات اخیر روی توسعه و تغییر شرایط مهپاشی بادی تمرکز می‌کنند.

سیستم‌های ارتقاء یافته جدید برای تولید آئروسل در جریان کم مایع، نیازمند طراحی قطر خروجی کوچکتر در لوله موئین نمونه هستند. در نتیجه این کوچک‌سازی دستگاهی، تحمل مهپاش برای نمونه‌های حاوی ذرات و مقادیر بالاتر ماده جامد حل شده کاهش خواهد یافت. نوآوری مهپاش تمرکز / تار شدن جریان که قادر به تولید آئروسل به‌طور قابل مقایسه‌ای ریزتر، با جریان قابل تغییر نمونه در محدوده $\mu L^{-1}\ min$ است، اخیرا به‌عنوان تولید کننده آئروسل پیوسته و بادی معرفی شد. در این مهپاش جدید و تجاری، اندازه قطرات به قطر لوله موئین بستگی ندارد و فاصله لوله موئین تا صفحه مهم‌تر است. بنابراین، آئروسل‌های ریزتر بدون مشکلاتی که قبلا در مورد لوله موئین‌های روزنه کوچک ذکر شد، تولید می‌شود.

معمولا با کاهش سرعت جریان مایع و کاهش چشمگیر چگالی عددی قطره‌ها، افزایش سیگنال به نویز و کاهش مشارکت نمونه در ایجاد سیگنال در یک زمان ماندگاری مشخص شناساگر[۵۳] مشاهده می‌شود. برای مثال، یک سیستم e200-nDS با پایین‌ترین سرعت جریان قابل دسترسی ۰/۰۵ µL/min، قادر به تولید یکپارچه ۱۲۷۰ قطره با اندازه ۵ µm در زمان ماندگاری ۰/۱ s است در حالی که در سرعت جریان ۱ ml/min تعداد قطره‌ها ۱۰۷ * ۲/۵ در همان زمان ماندگاری شناساگر است. باید توجه داشت که در سرعت جریان کم مایع، ضرورت بیشتری برای معرفی آئروسل یکپارچه به پلاسما وجود دارد. علت این ضرورت این است که با کاهش چگالی عددی قطره‌ها، کسر جرم تنها یک قطره نسبت به جرم کل آئروسل افزایش می‌یابد. بنابراین، با کاهش چگالی عددی، مشارکت نسبی یک قطره در سیگنال نهایی اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. پس با کاهش چگالی عددی قطره‌ها و افزایش غیر یکپارچگی قطره‌ها RSD افزایش خواهد یافت.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت، مهپاش‌های جدید یا براساس روش‌های کلاسیک اما توسعه یافته‌تر طراحی می‌شوند و یا این که با رویکرد و روش جدید طراحی می‌شوند. کاهش میزان مصرف نمونه، بازدهی بالای انتقال نمونه، تکرارپذیری بالا، کاهش احتمال گرفتگی و مسدود شدن مهپاش و تولید یکپارچه قطرات (اندازه و سرعت یکسان قطره‌ها) از مهم‌ترین مسائلی هستند که در طراحی مهپاش‌های جدید در نظر گرفته می‌شوند.

پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد شیمی تجزیه، آزمایشگاه ICP_OES سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

۲. کارشناسی ارشد شیمی معدنی، آزمایشگاه ICP_OES سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

۳. عضو کارگروه تخصصی آنالیز عنصری

4. Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES)

5. inductively coupled plasma-mass-spectrometry (ICP-MS)

6. Inductively Coupled Plasma

7. Radio Frequency (RF)

8. Pneumatic nebulizer

9. Todoli

10. Spray chamber

11. Monodisperse

12. Polydisperse

13. High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

14. Nukiyama-Tanasawa

15. Gras

16. Tertiary aerosol

17. Scott-type

18. Hyphenated techniques

19. Eluents

20. Post-column

21. Concentric nebulizer

22. Cross-flow nebulizer

23. Parallel pass nebulizer

24. Focusing/blurring flow nebulizer

25. Double pass spray chamber

26. Babington nebulizer

27. Total Dissolved solid

28. High performance concentric nebulizer (HPCN)

29. Large bore high performance concentric nebulizer (LB_HPCN)

30. Direct-Injection Nebulizer (DIN)

31. Torch-Integrated Sample Introduction System (TISIS)

32. Direct Injection High Efficiency Nebulizer (DIHEN)

33. Enhanced Parallel Path Nebulizer

34. Enyamist

35. Miramist

36. Flow injection

37. Ultra-low flow

38. Micro capillary

39. Ultrasonic Nebulizer

40. flow focusing/blurring

41. Liquid Jet

42. Turbulent flow -focus

43.Weber

44. Hydride generation

45. Kovache

46. quadruple

47. Relative Standard Deviation

48. Asfaw

49. Vapor Generation line(VG line)

50. Pre-evaporation tube(PET)

51. multi-mode

52. Wiltsche

53. Detector dwell time

مراجع

[1] B .l Sharp, pneumatic nebulizers and spray chamber for inductively coupled plasma spectrometry. A review.part1.Nebulizers,J, Anal At.Spectrom,3 (1988),613-652

[2] J.L. Todoli , J.M. Memert ,Liquid sample introduction in ICP Spectrometry. Elsevier, Amesterdam, 2008

[3] R.H. Clifford, P.Sohal, H.Liu,A. Montasser, Diagnostic studies on desolvated aerosols from ultrasonic nebulizers, Spectrochim. Acta Part B47 (1992)1107-1122

[4] C. Agatemor,D . Beauchem , Matrix effects in inductively coupled plasma mass spectrometry :a review,Anal.Chim.Acta.706(2011)66-83

[5] S.Nukiyama,Y.Tanasawa,Experiments on the Atomization of liquids in air stream, Trans.Soc.Meech,Eng.4,5 and6 (1950)1938-1940

[6] L.Gras,M.Alvarez,A.Canals, Evaluation of new models for drop size distribution prediction of aerosols in atomic spectrometry :pneumatic nebulizers,J.Anal.At spectrum.17(2002)524-529

[7] C.Gouy, Photometric research on colored flames ,Ann.Chim.Phys.18(1879)5-101

[8] A.M.Gana-Calvo,Generation of steady liquid micronthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams,phys,Rev.left.80(1998)285-288

[9] N.H. Bings,J.O. Orlandini von Niessen, J.N. Schaper, Liquid sample introduction in inductively coupled plasma atomic emission and mass spectrometry –critical review, J, Spectrochimica Acta part B,100,(2014) 14-37

[10] D.Goitom,E.Bjorn,Noise characteristic and analytical precision of inductively coupled plasma mass spectrometry using a Vulkan direct injection nebulizer for sample introduction ,J.Anal.At. Spectrom.21(2006)168-176

[11] E.G.Yanes,N.J.Miller-Ihli, Use of parallel path nebulizer for capillary-based microseparation techniques coupled with an inductively coupled plasma mass spectrometer for speciation measurements, Spectrochim, Acta Part B 59(2004)883-890

[12] K.Jankowski,A.Karas, D.Pysz,A.P. Ramsza,W.Sokolowska, Efficient use of the NAR-1 pneumatic nebulizer in plasma spectrometry at sub-milliliter liquid consumption rates,J.Anal.At.Spectrom.23(2008) 1290-1293

[13] K.Kahen,K.Jorbachi,A.Montaser, Desolvation-induced non-linearity in the analysis of bromine using an ultrasonic nebulizer with membrane desolvation and inductively coupled plasma mass spectrometry J.Anal. At ,Spectrom.21(2006)588-591

[14] N.Kovachev,B.Almagro,M.Angel Aguirre,M.Hidalgo,A.M.Ganan-Calvo,A.Canals, Development and characterization of a flow focusing multi nebulization system for Sample introduction in Icp-based spectrometric techniques,J.Anal.At.Spectrom.24(2009)1213-1221

[15] H.Wiltsche ,I.B.Brenner, K.Prattes,G.Knapp, Characterization of a multimode sample introduction system(MSIS) for multielement analysis of trace elements in high alloy steels and nickel alloys using axially viewed hydride generation ICP-OES .J.Anal.At.Spectrom.23(2008)1253-1262

[16] N.Elwaer,H.Hintelmann,precise selenium isotope ratios measurement using a multimode sample introduction system(MSIS)coupled with multicollector inductively couped plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS),J.Anal.At.Spectrom.23(2008)1392-1396 ve multi-element analysis by ICP_OES,J.Anal. At.Spectrom.27(2012)80-9

نویسندگان
سمیه حیثیت‌طلب[1*]
مریم محمدی‌کیا[2]
*heysieattalab@gmail.com

مطالعات مبتنی بر الکتروانسفالوگرافی کمّی در علوم شناختی

واژه‌های کلیدی
علوم شناختی، انسفالوگرافی، EEG

چکیده

الکتروانسفالوگرافی[3] معیاری برای تغییرات الکتریکی در مغز است که بیانگر اسپایک‌ها، جریان‌های گذرا، رویدادهای تصادفی و ریتم‌ها است. در روند عصب‌درمانی با بکارگیری آناتومی مغز، آزمون‌های روان‌شناختی، سنجش‌های رفتاری، الگوهای فعالیت‌های ویژه مغز ثبت می‌شود که در آن تمرکز روی ریتم‌ها و فعالیت‌های باندهای فرکانسی دلتا، تتا، آلفا، بتا، گاما و ریتم حسی حرکتی[4] است. الگوی ناحیه‌ای هم‌زمان و ناهم‌زمان این باندهای فرکانسی، وضعیت‌های شناختی و رفتاری خاص فرد را توصیف می‌کند. از این رو، با اندازه‌گیری ترکیب ریتم‌های آهسته و سریع نواحی سر می‌توان گستره درگیری فعالیت قشری را شناسایی نمود. EEG به تنهایی به دلیل تفکیک‌پذیری فضایی ضعیف با وجود وضوح زمانی بالا نمی‌تواند به‌عنوان یک روش تصویربرداری مطالعه عملکرد مغز استفاده شود. در سال‌های اخیر، برای افزایش درک عملکرد مغز انسان چندین روش تصویربرداری غیرتهاجمی مغز با وضوح مکانی بالا از جمله توموگرافی نشر پوزیترون[5]، توموگرافی کامپیوتری[6] و تصویربرداری رزونانس مغناطیسی عملکردی[7] استفاده شده‌است. اما با وجود وضوح خوب مکانی، وضوح زمانی این روش‌ها ضعیف است. بنابراین، به‌منظور درک بهتر عملکرد و ساختار عمقی‌تر مغز می‌توان EEG را با هر کدام از روش‌های تصویربرداری تلفیق نمود. از طرفی قابل تجزیه و تحلیل بودن فرکانس سیگنال‌های EEG با شناسایی ناهنجاری‌های عملکرد عصبی مغز، امکان تلفیق با تحریک مغناطیسی[8] مغز و نوروفیدبک را برای ارتقاء شناختی و رفتاری فراهم می‌کند. در این مطالعه، به معرفی EEG و تلفیق آن با روش‌های غیرتهاجمی به‌منظور شناسایی ارتباط برخی ساختارهای مغزی با الگوهای فعالیت عصبی ناهنجار و همچنین ارتقاء عملکرد شناختی، رفتاری در اثر مداخلات پردازش عصبی EEG می‌پردازیم.

مقدمه

سیستم اعصاب مرکزی[۹] یا به‌طور اختصاصی مغز انسان از میلیاردها سلول تشکیل شده‌است که بخش عمده آن را نورون‌ها تشکیل می‌دهند. نورون‌ها به هنگام فعالیت، جریان‌های الکتریکی متغیر با زمان تولید می‌کنند. می‌توان دو شکل اصلی فعالیت نورونی را در نظر گرفت؛ دپولاریزاسیون سریع غشاهای نورونی که به پتانسیل عمل[۱۰] منجر می‌شود و بواسطه هدایت الکتریکی یونی وابسته به ولتاژ یون‌های سدیم و پتاسیم روی می‌دهد و تغییرات آهسته‌تر در پتانسیل غشا که در اثر فعالیت سیناپسی و عملکرد چندین سیستم انتقال دهندهٔ عصبی است که به پتانسیل پس‌سیناپسی منجر می‌شود. پتانسیل‌های عمل در مقایسه با پتانسیل‌های پس‌سیناپسی دارای توزیع پتانسیل میدان کوچکتر (نفوذ کمتر در محیط خارج سلولی) و استمرار کمتر (حدود ۱ میلی‌ثانیه در مقایسه با پتانسیل‌های پس‌سیناپسی که از ۱۵ تا بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه ادامه می‌یابند) هستند. از این رو، پتانسیل‌های پس‌سیناپسی در کورتکس جمع شده و به سطح جمجمه انتشار می‌یابند و برآیند آن‌ها در آنجا با عنوان EEG ثبت می‌شود [۱].

نورون‌هایی که بیشتر مسئول تولید EEG شناخته می‌شوند که میدان‌های آن‌ها بتوانند برآیند قابل اندازه‌گیری مانند نورون‌های هرمی شکل کورتکس داشته باشند. لذا الکترودهای قرار گرفته روی جمجمه جمع زمانی و مکانی پتانسیل‌های پس‌سیناپسی نورون‌های قشری را ثبت نموده و شامل تغییرات پتانسیل آهسته و همزمان در نواحی وسیع قشری هستند [۳-۲] که با استفاده از سلول‌های هرمی که به موازات یکدیگر و به‌صورت عمود بر صفحه جمجمه قرار گرفته‌اند، تولید شده‌اند [۴]. مطالعات پیرامون EEG با کشف جریان‌های الکتریکی زیستی آغاز شد. در سال ۱۷۸۶، پروفسور گالوانی (استاد آناتومی دانشگاه بولونیا در ایتالیا) بررسی اعصاب محیطی ماهیچه قورباغه‌ها را انجام داد. اولین سیگنال EEG انسانی در سال ۱۹۲۴ توسط دکتر هانس برگر (استاد روانپزشکی در دانشگاه ینا[۱۱] در آلمان) با کمک الکترودهایی در سطح جمجمه EEG، از پوست سر پسرش ثبت شد [۵]. وی دو نوع متفاوت از امواج فیلتر شده را تشخیص داد، یعنی آلفا و بتا. ۱۰ هرتز به‌عنوان ریتم برگر شناخته شده‌است [۶]. برگر کشف کرد که تفکر و هوشیاری با فراوانی امواج بتا همراه است و طیف آن از محدوده ۱۳ هرتز (Hz) تا ۳۰ هرتز است. وی معتقد بود که نابهنجاری در امواج مغزی منعکس کننده اختلالات بالینی است [۷]. در ادامه در سال ۱۹۴۹ منشاء ریتم‌های EEG مطرح شد [۸].

ریتم‌های مغزی

سیگنال‌های مغزی که به روش EEG ثبت می‌شوند را براساس بازه‌های فرکانسی به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌کنند و به هر کدام از این بخش‌ها ریتم سیگنال مغزی می‌گویند. تحقیقات نشان می‌دهند که پهنای باندهای فرکانسی، یک بعدی مستقل بوده و قسمت‌های تعیین کننده و ساختار کل EEG خام را تشکیل می‌دهد. نتیجه آنالیز طیفی یک موج پیچیده مانند مقادیر انرژی در باندهای فرکانسی مختلف است. حدود ۹۸ درصد انرژی انسان در محدوده فرکانسی ۳۰-۰ هرتز قرار می‌گیرد، لذا انجام آنالیز طیفی روی ریتم‌ها و فعالیت‌های فرکانسی متعارفی مانند دلتا، تتا، آلفا، بتا، گاما و ریتم SMR است [۹].

■ دلتا (۴ - ۰/۱ هرتز)

امواج دلتا آهسته‌ترین ریتم مغزی بوده و دارای پایین‌ترین فرکانس و بالاترین دامنه در بین ریتم‌های مغزی هستند؛ به‌طور معمول در نیم‌کره راست مغز تولید شده و با فرآیندهای ناخودآگاه مرتبط است. دلتا با خواب در ارتباط بوده و به‌صورت عمده در نوزادان موج مسلط است. در زمان تولد حدود ۴۰ درصد دامنه در باند فرکانسی دلتا بوده و تنها حدود ۱۰ درصد دامنه EEG در باند فرکانسی آلفا است [۱۰]. امواج دلتا به‌طور کلی در مراحل ۳ و ۴ خواب عمیق تولید شده و در تنظیم ضربان قلب، عملکرد کلیه و گوارش دخیل است. برخی از فعالیت‌ها و یا وضعیت‌هایی که با ریتم دلتا مرتبط دانسته عبارتند از: بازیابی قوای جسم و ذهن، جلوگیری از روند پیری، خواب عمیق، همدلی، تولید هورمون رشد، عملکرد سیستم ایمنی، اختلال یادگیری، بیش‌فعالی[۱۲] و فرآیندهای ناخودآگاه است [۹].

■ تتا (۸ - ۴ هرتز)

محل مشاهده امواج تتا، جای ثابت و مشخصی در مغز نیست و در همه قسمت‌های مغز دیده می‌شود. امواج تتا هنگامی ظاهر می‌شوند که فرد از وضعیت هوشیاری به سمت خواب آلودگی می‌رود. لذا بیشتر افراد، هنگامی وضعیت تتا را تجربه می‌کنند که به‌طور کاملا ناآگاه هستند. حالاتی همچون خلاقیت، تجربه احساسات و خیالبافی نیز با افزایش فعالیت تتا به ویژه در نیمکره راست مرتبط دانسته شده‌است. تتا علاوه‌بر این که با خلاقیت و تکانشی بودن[۱۳] در ارتباط است، با حواس‌پرتی، عدم توجه، خیال‌پردازی، افسردگی و اضطراب نیز مرتبط است. تتای افراطی یا نامتقارن دو نیمکره،

منعکس کننده افسردگی، اضطراب و دیگر اختلالات عاطفی است (به‌طور معمول دامنه تتای دو نیمکره در دو طرف برابر است). اختلالات امواج آهسته به‌طور معمول منعکس کننده تتای افراطی است. با این وجود، دلتا (۴-۱ هرتز) و آلفای آهسته (۱۰-۸ هرتز) نیز در دسته امواج آهسته قرار می‌گیرند. EEG آهسته با تفکر مبهم، زمان واکنش آهسته، محاسبات ضعیف، قضاوت ضعیف و ضعف در کنترل تکانه همراه است [۹]. برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که موج تتا نقش مهمی در شکل‌گیری حافظه بازی می‌کند. به نظر می‌رسد موج تتا از فعالیت‌های معمول هیپوکامپ ناشی می‌شود که شامل رمز گردانی اطلاعات و حمایت از تثبیت حافظه است، از این رو نقش مهمی در انعطاف‌پذیری[۱۴] بلند مدت همراه با تثبیت حافظه بازی می‌کند [۱۱].

■ آلفا (۱۲ - ۸ هرتز)

امواج آلفا به‌طور معمول به پتانسیل دندریت‌های سوما نسبت داده می‌شوند. طیف این موج در بیداری ۱۳-۹ هرتز و در خواب حدود ۸-۷ هرتز است. آلفا در لوب پس‌سری، آهیانه‌ای و قسمت خلفی لوب گیجگاهی وضوح بیشتری دارد. حداقل دو شکل امواج آلفا وجود دارد که ممکن است عملکردشان در چرخه خواب و بیداری متفاوت باشد. تمرکز آلفا در لوب پس‌سری است و از آنجا منشاء می‌گیرد، اگرچه اخیرا از تالاموس به‌عنوان منشاء این امواج یاد می‌شود [۱۲]. نوع ثانویه موج آلفا در طی خواب با حرکات سریع چشم[۱۵] است و برخلاف شکل بیداری امواج آلفا، این شکل از امواج آلفا در محل پیشانی مرکزی مغز بیشتر مشاهده می‌شود. تحقیقات نشان داده که ریتم آلفا یک قسمت نرمال خواب REM و بیانگر یک دوره نیمه برانگیختگی است که به شکل معکوس با شدت خواب REM مرتبط است. علاوه‌بر ریتم آلفای قشر بصری، فعالیت‌های امواج مو یا ریتم مو، ریتم‌های حسی-حرکتی از سیگنال‌های الکتریکی مغز با محدوده فرکانسی ۷/۵ – ۱۲/۵ هرتز هستند که در ناحیه کورتکس حرکتی مغز مشاهده می‌شوند [۱۳]. ریتم مو منعکس کننده عملکرد نورون‌های آینه‌ای است [۱۴]. در حالت استراحت این امواج دارای توان ماکزیمم هستند و هنگامی که فرد فعالیت حرکتی خاصی را انجام دهد یا انجام حرکتی را متصور شود، از مقدار توان این امواج کاسته می‌شود. این امواج در تحقیقات مرتبط با یادگیری حرکات و همچنین طراحی سیستم‌های رابط مغز - ماشین[۱۶] نقش مهمی را ایفا می‌کنند [۱۳].

آلفا با مراقبه و حس آرامش درونی همراه است. در کودکانی که خیال‌باف یا افسرده هستند، دامنه‌های بلند در نواحی قدامی مغز به‌طور متداول دیده می‌شود. دامنه‌های بلند در لوب پیشانی ممکن است در بیش‌فعالی/ نقص توجه[۱۷]، افسردگی یا دیگر اختلالات دیده شود. به‌طور معمول، دامنه‌های آلفا در نواحی خلفی بالاتر و در نواحی قدامی مغز پایین‌تر است [۱۵]. اگر صرفاً دامنه آلفا با چشم بسته کاهش یابد، به‌طور معمول به معنای خواب آلودگی است [۱۶]. آلفای خلفی ممکن است در اختلالات اضطرابی مثل اختلال اضطراب فراگیر[۱۸] افزایش یابد. فرکانس‌های مسلط بالاتر از میانگین آلفا ممکن است منعکس کننده هوش بسیار بالا و یا احتمالاً اضطراب و بی‌خوابی باشد. گاهی اوقات در بزرگسالان، آلفا ریتم غالب خلفی[۱۹] است [۱۶]. وقتی فرد مسن‌تر می‌شود به‌طور معمول در طول زندگی یک فرکانس ۱۰ هرتز یکنواخت را نگه می‌دارد. با این وجود، یک پیشرفت معمولی دارد که شامل کاهش تدریجی فرکانس PDR است. PDR آهسته‌تر ممکن است نشان‌دهنده بیماری نباشد ولی درجه‌ای از اختلال کارکرد مغز را منعکس می‌کند [۹]. میزان PDR آلفا باید در دو نیمکره برابر باشد، در غیر اینصورت باید به نواقص شناختی مشکوک شد.

■ ریتم حسی حرکتی (۱۵ - ۱۲ هرتز)

ریتم SMR حالتی از جهت‌یابی درونی را منعکس می‌کند که برخی به آن بتای پایین[۲۰] می‌گویند. SMR واقعی در کورتکس حسی-حرکتی بروز پیدا می‌کند. دامنه با ثابت ماندن افزایش یافته و با حرکت کاهش می‌یابد [۱۷]. فعالیت بتا به‌طور معمول بتا ۱ برای فرکانس‌های پایین (به‌طور مثال، ۱۲-۱۶Hz یا ۱۵-۱۸Hz)، بتا ۲ برای فرکانس‌های متوسط (به‌طور مثال، ۱۸-۲۴ Hz) و بتا ۳ برای فرکانس‌های بالاتر (به‌عنوان مثال، ۲۴-۳۰ Hz، ۳۰ - ۴۰ Hz) دیده می‌شود [۱۸].

■ بتا (۲۱ - ۱۳ هرتز)

بتا شامل فعالیت موج تند یا هر فعالیت منظم بیشتر از ۱۳ هرتز است [۱۵]. این موج با متمرکز شدن، جهت‌یابی خارجی، تحلیل و یا حالت تفکر آرام مرتبط است. فرکانس‌های غالب بتا در بزرگسالان بیشتر از کودکان است [۱۹]. در طی خواب آلودگی، دامنه بتا ممکن است افزایش یابد [۱۶]. بتای افراطی در بسیاری از اختلالات مرسوم مانند ADD، اختلال وسواسی-جبری، اختلالات خواب، دندان قروچه، اختلالات یادگیری، اختلالات اضطرابی، افسردگی و بسیاری مشکلات روان‌پزشکی دیگر دیده می‌شود [۹].

■ بتای بالا (۳۲ - ۲۰ هرتز)

بتای بالا با عملکرد بهینه، پردازش شناختی، نگرانی، اضطراب، تفکر بیش از حد، نشخوار ذهنی و همراه است. بتای افراطی ۳۲-۲۰ هرتز می‌تواند نشانه برخی اختلالات و یا بر این موضوع اشاره داشته باشد که مغز در حال جبران تتای افراطی است [۹].

■ گاما (۳۰۰ - ۴۰ هرتز)

۴۰ هرتز، جزعی از پهنای باند گاماست. افزایش فعالیت ۴۰ هرتز، در کودکان و بزرگسالان، در طی انجام آزمون حل مسئله دیده می‌شود. به‌طور معمول اختلالات یادگیری یا نواقص روانی با فقدان گاما همراه است. گاما به سازماندهی

مغز، افزایش یادگیری و هوشیاری ذهن کمک می‌کند. وقتی مغز باید فعال باشد، این موج فعال شده و زمانی که آزمون خاصی برای انجام وجود ندارد، غیرفعال می‌شود [۲۰]. یکی از جالب‌ترین روش‌های آنالیز جدید، فعالیت ۴۰ هرتزی (هم‌آهنگی گاما) است. هم‌آهنگی گاما با پردازش شناختی در تمام سطوح مغز مرتبط بوده و با الکترودهای جداگانه EEG قابل مشاهده است (برای مثال، بین دو نیمکره). بنابراین، به نظر می‌رسد که هم‌آهنگی گاما سازوکار مهمی به‌منظور سازماندهی نواحی مختلف مغز است [۲۱].

دامنه سیگنال‌های EEG

تفاوت در مقادیر مطلق که در نواحی الکترودی مختلف ثبت شده‌اند، دارای ارزش کلینیکی است. در آزمودنی‌های سالم تفاوت دامنه معیاری از میانگین فرد قلمداد می‌شود. به نظر می‌رسد که اختلاف دامنه مذکور در یک محدوده نرمال قرار دارد و بازتاب کننده مقدار تمایز عملکردی مغز است. درصورت بروز اختلال یا نارسایی، این مقدار می‌تواند کم یا زیاد شود. نسبت‌های دیگر مانند نسبت تتا به بتا، آلفا به بتا و یا تتا به آلفا نیز دارای کاربرد کلینیکی هستند. EEG روشی غیرتهاجمی برای مطالعه فعالیت مغزی است که از وضوح زمانی بالایی برخوردار بوده و راه را برای تشخیص بسیاری از اختلالات نورولوژیکی و دیگر ناهنجاری‌های بدن انسان هموار می‌سازد [۹].

الکتروانسفالوگرافی کمّی

توسعه علوم کامپیوتری در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی، راه را برای ارزیابی و کمّی‌سازی دقیق عوامل EEG هموار ساخت و به تولد الکتروانسفالوگرافی کمّی[۲۱] انجامید. QEEG تجزیه و تحلیل جامعی از فرکانس‌ها یا پهنای باندهای فرکانسی افراد است که در EEG خام نشان داده شده‌است. QEEG، با هدف پر رنگ ساختن مولفه‌های خاص امواج، تبدیل فرمت داده EEG، انتقال داده به حوزه دیگری که در آن اطلاعات بیشتری آشکار می‌شوند و یا ارائه نتایج عددی مرتبط با EEG که متعاقباً برای مقایسه یا گزارش مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام می‌شود [۲۲]. نرم‌افزار پایگاه QEEG عوامل ذکر شده را بررسی می‌کند:

۱. توزیع فرکانسی؛
۲. دامنه سیگنال‌های EEG؛
۳. مختصات مکانی وقوع پدیده‌های مشخص در سیگنال؛
۴. مورفولوژی شکل موج؛
۵. تقارن بین نیمکره‌ای (تقارن ولتاژ، فرکانس، شکل موج برای نواحی متشابه)؛
۶. طبیعت وقوع شکل موج (تصادفی، متوالی، پیوسته)؛
۷. تنظیم دامنه و فرکانس؛
۸. واکنش‌پذیری (تغییرات در یک عامل و پیرو آن تغییر در وضعیت فرد).

کاربردهای بالینی QEEG

آکادمی نورولوژی[۲۲] و همچنین انجمن نوروسایکولوژی بالینی آمریکا[۲۳]، QEEG را به‌عنوان مکمل EEG در شرایط زیر معرفی کرده است: بررسی تشنج‌ها و پیک‌های صرع، بررسی تشنج‌های ناشی از صرع در بیماران با خطر بالا و بستری شده در بخش مراقبت‌های ویژه[۲۴] ارزیابی پیش از جراحی در بیماران مبتلا به صرع مقاوم به دارو، تشخیص عوارض حاد داخل جمجمه‌ای در حین جراحی، ارزیابی بیماران دارای علائم بیماری‌های قلبی-عروقی، بررسی شدت زوال عقل، آسیب‌های مغزی و EEGهای سرپایی [۲۳]. از طرفی برخی، تحقیقات QEEG را به‌منظور بررسی موارد زیر بکار گرفته‌اند:

- سندرم پس از ضربه مغزی[۲۵]؛
- آسیب مغزی خفیف یا متوسط؛
- اختلال کمبود توجه؛
- اسکیزوفرنی؛
- افسردگی؛
- اعتیاد به الکل؛
- تینیتوس یا وزوز گوش؛
- بررسی پاسخ‌های درمانی به داروهای روان‌گردان [۲۳].

صرع

QEEG می‌تواند برای تشخیص قطعی تشنج‌های ناشی از صرع و تشخیص افتراقی زیر گروه‌های آن به کار گرفته شود. بررسی‌های انجام شده روی EEG نشان می‌دهد، خواص آماری و رفتار دینامیکی سیگنال، در هنگام وقوع تشنج کاملاً تغییر می‌کند [۲۴]. نتایج تحقیقات ژئونکا و همکاران نشان داد که انواع تشنج‌ها الگوهای خاص QEEG دارند که باعث افزایش دقت تشخیص می‌شود و عدم توازن امواج با صرع‌های کانونی ۹۴ درصد همبستگی دارد [۲۵]. نقش دیگر QEEG بر روند بیماری صرع، ارزیابی واکنش‌ها نسبت به درمان دارویی ضد صرع با روش الکتروانسفالوگرام با رویکرد دارویی[۲۶] است. براساس تعاریف انجمن بین‌المللی فارماکو-الکتروانسفالوگرافی روش دارویی EEG، روش بررسی کمّی و کیفی اثرات مواد مختلف روی سیستم عصبی مرکزی[۲۷] در تحقیقات داروشناسی بالینی و آزمایشگاهی، سم‌شناسی عصبی، تحقیقات درمانی و دیگر زمینه‌های علمی است [۲۶]. تحقیقات نشان داده‌اند که داروها می‌توانند روی امواج مغزی تاثیرگذار باشند [۲۶]. نخستین تحقیق پیرامون اثرات داروهای ضدتشنج مبین کاهش سرعت EEG، افزایش فعالیت امواج دلتا و تتا، کاهش باندهای فرکانس بالا و به‌طور کلی، کاهش سرعت ریتم بیشتر امواج هستند [۲۶ و ۲۷]. مشکلات شناختی[۲۸] در ۷۰ الی ۸۰

درصد بیماران مبتلا به صرع رخ می‌دهد. کاربرد QEEG در تشخیص و ارزیابی CIها می‌تواند باعث افزایش درک ما درباره پاتوفیزیولوژی تغییرات شناختی در بیماران صرع شود؛ در بعضی از تحقیقات، ارتباط بین قدرت مطلق توان ثبت شده، فعالیت‌های شناختی و انسجام[۲۹] امواج داخل و بین نیم کره‌ها (در افراد بالای ۱۸ سال) مطرح شده‌است؛ قدرت مطلق تمام باندهای فرکانسی در بیماران مبتلا به صرع افزایش یافته و انسجام امواج درون و بین نیمکره‌های مغز در باند تتا بیماران نسبت به افراد سالم بالاتر است [۲۸].

سکته مغزی[۳۰]

از مشخصه‌های سکته مغزی افراد، داشتن ریتم‌های مغزی غیرنرمال است. اولین QEEG بررسی ناهنجاری‌های ناشی از سکته مغزی مبین افزایش چشمگیر نسبت تتا به بتا در نیم‌کره آسیب دیده مغز بود. در گروه‌های کنترل آزمایش که افراد سالم هستند، توازن بالایی بین همه عوامل وجود دارد [۲۹]. میزان فعالیت موج آلفا لوب فرونتال بدلیل اینکه می‌تواند شاخص ظرفیت توجه[۳۱] باشد، با عملکرد و اختلالات شناختی بعد از سکته مغزی مرتبط است [۳۰]. نسبت تتا به آلفا و عدم تقارن شاخص آلفا در سکته مغزی افزایش می‌یابد [۳۱].

آسیب دیدگی مغزی[۳۲]

در آسیب‌های مغزی قسمت زیادی از تغییرات حاد در الکتروانسفالوگرافی بعد از سه ماه ناپدید می‌شوند. و حدود ۹۰ درصد این تغییرات یک سال پس از تروما از بین می‌روند [۳۲ و ۳۳]. رایج‌ترین ناهنجاری در QEEG که توسط بیماران دارای آسیب‌های مغزی گزارش می‌شوند شامل: کاهش میانگین فرکانس آلفا [۳۸-۳۴]، افزایش میزان تتا [۴۲-۳۹] و افزایش نسبت تتا به آلفا است [۳۵، ۴۳ و ۴۴].

انسفالوپاتی[۳۳]

QEEG ممکن است بعضی جنبه‌های نوروفیزیولوژیک مرتبط با تغییر شرایط هوشیاری را مشخص کند. توان نسبی در باند فرکانس آلفای QEEG برای تشخیص و ارزیابی انسفالوپاتی (مانند بیماری کروتزفلد_جیکوب[۳۴] اورمی[۳۵] انسفالوپاتی ناشی از هیپوکسی/ ایسکمی[۳۶] و همچنین برای تشخیص افتراقی دلیریوم[۳۷] استفاده می‌شود [۴۵]. عوامل رایج و مورد استفاده برای این کار عبارتند از: فعالیت تتا، توان نسبی باند فرکانس دلتا و میزان فعالیت در باند فرکانس آهسته [۴۶-۴۸].

بخش مراقبت‌های ویژه (ICU)

QEEG می‌تواند یک روش تشخیصی مکمل برای EEG در تشخیص ناهنجاری‌های جدا و متفاوت باشد. پژوهش‌هایی با هدف بررسی استفاده از QEEG در بخش مراقبت‌های ویژه، شرایط پاتولوژیک زیر را آنالیز کرده‌اند: اندارترکتومی کاروتید[۳۸]، مشکلات عروقی-مغزی (بخصوص در عارضه‌های حاد داخل جمجمه)، شرایطی که جریان خونی‌مغزی بیماران کما رفته دچار مشکل می‌شود [۳۲]. انجمن نورولوژی آمریکا استفاده از QEEG در بخش مراقبت‌های ویژه را در شرایط زیر توصیه می‌کند [۴۵ و ۴۹]:

- بیماران با خطر بالای سکته‌های مغزی ایسکمیک؛
- خونریزی حاد داخل جمجمه؛
- فشار خون حاد داخل جمجمه و یا وازواسپاسم؛
- کنترل و تشخیص وضعیت صرع در بیماران با خطر بالا تیراسیون باربیتورات‌ها[۳۹]؛
- انجام درمان‌های آنتی اپیلپتیک برای دلایل غیرتشنج؛
- مانیتول تراپی[۴۰] برای فشار خون بالای داخل جمجمه؛ و

همچنین می‌تواند تعیین کننده جداسازی دستگاه‌های حمایتی حیات از بیمار باشد [۵۰].

اختلالات یادگیری و توجه[۴۱]

پژوهش‌های زیادی بر نقش مهم QEEG در تشخیص اختلالات یادگیری اشاره کرده‌اند [۴۵، ۵۱ و ۵۲]. انجمن AAN، QEEG را بعنوان روش تشخیص اختلالات یادگیری توصیه می‌کند که می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی و درمان مشکلات توجه و بیش‌فعالی داشته باشد. کودکان و بزرگسالان مبتلا به ADHD، افزایش توان در باند فرکانس‌های تتا و دلتا را در آزمایش خود نشان داده‌اند. در همین حال، افراد مسن مبتلا به ADHD نسبت به گروه آزمایش، کاهش توان فرکانس بتا دارند [۵۳ و ۵۴]. برخی از تحقیقات افزایش تتا به بتا را در نقطه الکترودگذاری Cz ملاک تشخیص ADHD معرفی نموده‌اند [۵۷-۵۵].

افسردگی

عدم توازن امواج آلفای لوب فرونتال[۴۲] نشانگری مهم در واکنش‌های احساسی و اختلالات احساسات است. تحقیقات، ارتباط معناداری را بین FAA و سیستم فعال‌سازی رفتاری نشان داده‌اند؛ کاهش فعالیت این سیستم، افراد را مستعد ابتلا به انواع مشخصی از افسردگی می‌کند [۵۸]. بنابراین، FAA می‌تواند در پیش‌بینی بیماری در افرادی که خطرهای سایکوپاتولوژیکی (به‌طور مشخص دارای اختلال در سازوکار انگیزه) دارند، ارزشمند باشد. شایان ذکر است FAA نیمکره راست با اضطراب و FAA چپ با فقدان لذت[۴۳]، همچنین با عدم تقارن در موج آهسته پیشانی گیجگاهی[۴۴] مرتبط است [۵۹ و ۶۰]. عدم توازن آلفا فرونتال، نشانگری مشترک در ارتباط با انواع خاصی از افسردگی است [۶۱ و ۶۲]. همچنین کاهش

کوهرنس باندهای فرکانس دلتا و تتا بین نیمکره‌ای مغز [۶۳ و ۶۴]، افزایش قدرت مطلق در باندهای دلتا و تتا در نیمکره راست [۶۵]، افزایش تتا در نواحی مغز خلفی [۶۶] و تغییرات در فعالیت بتا [۶۵، ۶۹-۶۷] از دیگر نشانگرهای افسردگی است.

اضطراب

FAA با اضطراب نیز ارتباط دارد. بیماران دارای اضطراب الگوی فعالیت بیشتر موج آلفا در لوب فرونتال سمت راست دارند که در افراد عادی این میزان کمتر است [۷۰]. افرادی که ترس از اجتماع دارند و یا دچار پنیک می‌شوند، فعالیت آلفای بیشتری در لوب فرونتال راست دارند [۷۱ و ۷۲]. FAA ارتباط بارزی با اختلالات ناشی از اضطراب دارد. عدم توازن در بخش آهیانه گیجگاهی[۴۵] اختلالات اضطراب و افسردگی مشاهده می‌شود [۷۰].

زوال عقل[۴۶]

زوال عقل ناهنجاری‌های موجود در QEEG به‌طور معمول در مراحل میانه و شدید آلزایمر مشخص می‌شوند. رایج‌ترین تغییرات به‌طور معمول، تغییر در موج‌های تتا و دلتا، در فعالیت‌های پس زمینه (به‌صورت ناخودآگاه) و کاهش فرکانس آلفای مرکزی هستند [۷۳]. تحقیقات همبستگی معکوس بین مراحل اختلالات شناختی با کاهش توان در باندهای فرکانس پایین را نشان داده‌اند [۷۴]. برخی تحقیقات روی کاهش فعالیت‌های امواج آلفا و بتا تاکید می‌کنند [۷۵ و ۷۶]. علاوه‌بر این، ریتم آلفا-مانند (کاهش باند فرکانس آلفا در بیماران آلزایمری) می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر تشخیصی استفاده شود [۷۷]. نقش QEEG در تشخیص و ارزیابی زوال عقل می‌تواند قابل مقایسه و هم سطح با بکارگیری روش‌های تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری انتشار تک فوتون[۴۷] و MRI باشد [۴۵].

دیگر اختلالات اعصاب و روان

دیگر اختلالات اعصاب و روان و بررسی امواج ساطع شده که با الکترودها جذب می‌شوند، می‌تواند در بیماری پارکینسون به‌عنوان روشی موثر ارزیابی شرایط بیمار استفاده شود. کاهش نسبی توان در امواج دلتا، تتا، آلفا و بتا، کاهش قدر مطلق توان تتا، آلفا، بتا در قسمت‌های قدامی و عدم توازن امواج در داخل نیمکره در تتا، آلفا، بتا همراه با فعالیت داخل نیمکره راست در مقالات آورده شده‌است [۷۸]. تحقیقات نشان داد که پتانسیل‌های QEEG در تشخیص اختلال پردازش مرکزی شنوایی کودکان موثر است. در این پژوهش، تغییر در قدرت مطلق توان باندهای امواج دلتا، تتا، بتای پایین و بتای متوسط دیده شد [۷۹]. QEEG به‌طور معمول در مطالعه اختلالات طیف اوتیسم[۴۸] مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن نشانگرهای کمی با تغییرات عملکرد مغز تغییر می‌کنند [۸۳-۸۰]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که سرکوب ریتم مو سبب نقایص اجتماعی مشاهده شده در ASD است [۸۶-۸۴].

عصب درمانی[۴۹]

در حوزه درمان اختلالات روان‌شناختی، پژوهش‌های نوروفیزیولوژیکی با بررسی ارتباط بین موج نگار الکتریکی مغز، سازوکارهای زیربنایی تالاموکورتیکال[۵۰] مغز و حالات روان‌شناختی، نشان داده‌اندکه ایجاد نوسانات و تغییرات بهینه در ریتم و فرکانس امواج مغزی، با استفاده از روش‌های عصب درمانی، می‌تواند تغییرات بهینه‌ای در حالات روان‌شناختی ایجاد کند [۸۷].

این روش حتی می‌تواند به‌عنوان روشی درمانی از طریق بازخوردهای عصبی همچون نوروفیدبک یا تحریک مغناطیسی یا الکتریکی مغز به کار گرفته شود. هدف برنامه‌های آموزشی نوروفیدبک، بهبود سطح خودتنظیمی افراد و در نتیجه، بالا بردن عملکرد آنها است. در طی این فرآیند انواع فعالیت‌های مغزی (امواج آلفا، بتا، تتا و دلتا) که در شرایط معمول، غیرقابل مشاهده و غیرقابل مهار هستند، برای درمانگر و بیمار محسوس و قابل مشاهده می‌شوند. این فرآیند موجب آگاهی به نوع و شکل موج مغزی شده و امکان مقایسه آن را با امواج نرمال و یا نابهنجار (با بسامد بالاتر و یا پایین‌تر)، فراهم می‌آورد و موجب تغییر و اصلاح آن در روند درمان می‌شود [۸۸].

تحریک مغناطیسی مغز روشی ایمن و غیرتهاجمی تحریک الکترومغناطیسی مغز است. این میدان مغناطیسی متغیر جریانی را درون مغز القاء نموده و این جریان درون غشاء نورون‌ها نفوذ می‌کند و منجر به وقوع پتانسیل عمل می‌شود [۸۹]. تحقیقات مبین آن است که تحریک مغناطیسی می‌تواند باعث تغییر در قدرت نوسانات سیگنال EEG شده [۹۰] و به‌منظور درمان برخی از بیماری‌های عصبی و روانشناختی به کار رود [۹۱ و ۹۲].

تحریک الکتریکی مغز با جریان مستقیم روشی کاملا غیرتهاجمی است که می‌تواند با استفاده از یک جریان ضعیف الکتریکی، تغییرات موقتی در تحریک‌پذیری مناطق قشری مغز ایجاد کند [۹۴ و ۹۳]. تحریک الکتریکی مغز مجموعه‌ای از اثرات دپلاریزه کننده، هیپرپلاریزه کننده بر فعالیت آکسون‌ها دارد و عملکرد سیناپسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۹۵] که در بیماری‌های مختلف، مانند افسردگی، درد مزمن، سکته مغزی و بیماری پارکینسون موثر است [۹۹-۹۶].

QEEG در حوزه بازاریابی[۵۱]

بازاریابی عصبی، از انواع جدید بازاریابی است. هدف نورومارکتینگ و یا بازاریابی عصبی، درک بهتر عملکرد مغز

مشتریان است تا بتواند از این رهگذر، عملیات بازاریابی و فروش را بهبود بخشد. تفکری که در نورومارکتینگ وجود دارد، این است که تصمیم‌گیری برای خرید لزوما یک تصمیم‌گیری منطقی نیست، بلکه این تصمیم‌گیری در اعماق مغز شکل گرفته و بر اساس ترکیبی از افکار و احساسات است [۱۰۰]. از این رو، یکی از کاربردهای بازاریابی عصبی، میزان اثربخشی تبلیغات بازرگانی است که از طریق گرفتن EEG افراد، واکنش مناطق مختلف مغز به محرک تبلیغاتی اندازه‌گیری می‌شود. تحقیقات نشان داد که فعالیت آلفای فرونتال چپ مغز با محرک مثبت و فعالیت فرونتال راست با محرک منفی مطابقت داشته که بیانگر عدم تقارن دو نیمکره مغز است [۱۰۱]. تحقیقات نشان داده‌اند، افرادی که شکل گرم را ترجیح می‌دهند با دیدن تصاویر سفید، گرم و سرد (اعم از گرد و تیز) در الکترودهای مذکور موج آلفای بیشتری تولید می‌کند که این امر می‌تواند در جذب افراد طی تبلیغات موثر باشد [۱۰۲].

EEG در روش‌های یادگیری عمیق مغز[۵۲]

برنامه‌های این شبکه‌ها در حوزهٔ تصویربرداری عصبی در حال پیشرفت هستند و تلاش می‌شود از آنها برای تحقیق در فعالیت‌های شناختی، تشخیص صرع و احساسات انسان استفاده شود. شبکه‌های یادگیری عمیق لایه‌های پنهان زیادی دارند، هر لایه نمایهٔ ساده شده‌ای از داده‌های ورودی را به لایه بعدی انتقال می‌دهد. به این نوع شبکه‌های عصبی به کار رفته در DL شبکه‌های عصبی عمیق (ژرف) نیز گفته می‌شود. انواع مختلفی از ساختارهای یادگیری عمیق با استفاده از سیگنال‌های EEG برای یافتن اختلالات مغز انسان و وضعیت احساسی و روانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. گروه علوم اعصاب، این سیگنال‌ها را به‌منظور کشف اختلالات و تشخیص احساسات انسانی با روش‌های مختلف یادگیری عمیق پردازش می‌کند. الگوریتم‌های بزرگ یادگیری عمیق از جمله شبکهٔ عصبی پیچشی یا همگشتی[۵۳]، خودرمزگذار[۵۴]، شبکهٔ عصبی بازگشتی یا مکرر[۵۵]، شبکهٔ باور عمیق[۵۶]، ماشین بولتزمن محدودشده[۵۷]، شبکه پرسپترون چندلایه[۵۸]، شبکه عصبی بهینه عمیق، EEG-FMRI بر پایه یادگیری عمیق، امکانات گسترده‌ای را به‌منظور تصویربرداری عصبی برای این گروه فراهم می‌کنند. مدل‌های یادگیری عمیق را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از نقاط تجسم کرد که هر یک از آنها براساس ورودی‌های گره تصمیم می‌گیرند. این نوع شبکه شبیه به سیستم عصبی زیستی است و هر گره به‌عنوان یک نورون در یک شبکه بزرگتر عمل می‌کند. یادگیری عمیق زیرمجموعه‌ای از ماشین یادگیری است که قدرت و انعطاف زیادی بدست آورده است زیرا جهان را به‌عنوان سلسله مراتب تودرتویی از مفاهیم یا ایده‌ها، به‌گونه‌ای که هر ایده یا مفهوم در ارتباط با مفهومی ساده‌تر تعریف می‌شود، بازنمایی می‌کند و بازنمودهای انتزاعی‌تر در ارتباط با بازنمودهایی که کمتر انتزاعی هستند محاسبه می‌شوند. یادگیری عمیق به دلیل ظرفیت یادگیری بازنمودهای خوب از داده‌های خام، نویدبخش کمک به درک سیگنال‌های EEG است [۱۰۳].

EEG در رابطهای مغزی - رایانه‌ای

BCI یا رابط مغز - ماشین، سیستم‌هایی هستند که بدون استفاده از عضلات و اندام‌ها و فقط با استفاده از ثبت سیگنال‌های EEG با رایانه‌ها ارتباط برقرار می‌کنند. هدف اولیه ساخت این سیستم‌ها، به وجود آوردن توانایی ارتباط با دنیای خارج برای معلولینی است که فقط مغز آنها سالم مانده و تمام اندام‌های دیگر آنها از کار افتاده باشد [۱۰۴-۱۰۶]. این سیستم‌ها به‌طور معمول به بخش‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- ثبت سیگنال[۵۹]: در ابتدا باید فعالیت‌های مغز به یکی از روش‌های گفته شده ثبت شود؛
- پردازش سیگنال[۶۰]: بعد از ثبت سیگنال باید به‌گونه‌ای این سیگنال‌ها پردازش شوند تا بتوانیم آنها را به زبان رایانه تبدیل کنیم. این بخش به دو قسمت زیر تقسیم می‌شود:

(الف): استخراج ویژگی[۶۱]: در ابتدا باید اطلاعات مفیدی را از سیگنال‌های ثبت شده استخراج کنیم. به این اطلاعات ویژگی‌ها گفته می‌شود؛

(ب): ترجمه[۶۲]: در انتها باید بتوانیم براساس ویژگی‌های به‌دست آمده، هر سیگنال ثبت شده را به یکی از کاربردهایی که برای رایانه تعریف کرده‌ایم، نسبت دهیم؛

- کاربرد[۶۳]: هدف اصلی و نهایی این است که بتوانیم برنامه‌ای بسازیم که کاربر بتواند با استفاده از آن با دنیای بیرون ارتباط برقرار کند.

EEG در تشخیص هویت بیومتریک[۶۴]

انواع فنوتیپ‌های روانی، رفتاری و شناختی با الگوهای عملکرد مناطق مختلف مغزی همبستگی دارد که می‌توان آن را با fMRI بررسی کرد. بررسی ارتباط اتصال فنوتیپ با اتصال عملکردی با استفاده از EEG نشان می‌دهد که برای برنامه‌های BI به لحاظ دقت همانند fMRI مناسب هستند و می‌توانند فنوتیپ‌های فردی چون هوش را نیز پیش‌بینی کنند [۱۰۷].

تلفیق QEEG با مدالیته‌های تصویربرداری مغزی

تصویربرداری تلفیقی (چند روشی) که اکنون در جهان مرسوم است شامل استفاده از دو دستگاه مانند تلفیق fMRI با EEG، fMRI با TMS و غیره است. این تلفیق‌ها می‌توانند به دو صورت آنلاین (تصویربرداری از مغز بیمار با هر دو روش به‌طور همزمان) یا آفلاین (یک بار تصویربرداری با یک دستگاه و

سپس با دستگاه دیگر) باشد [۱۰۸ و ۱۰۹] تصویربرداری به دو روش به‌طور همزمان (آنلاین) هم از بُعد تکنیکی و هم موقع تفسیر دشوار است، اما مزایای مضاعفی در خود دارد و اطلاعات ارزشمندتر و بیشتری را جداگانه نسبت به تصویربرداری با هر دو روش، به ما ارائه می‌کند. دلیل ارزشمندتر بودن تصویربرداری همزمان این است که همان بیمار در یک شرایط محیطی یکسان، وضعیت، حالت ذهنی، راحتی، تغییرات توجهی یکسان و تحت تاثیر متغیرهای خارجی یکسان قرار خواهد داشت؛ در حالی که اگر یک بار با یک روش تصویربرداری کنیم و پس از آن در نوبت بعد با روش دیگر و بخواهیم نتایج این دو را با هم مقایسه کنیم به نتایج قاطعی نمی‌رسیم چون ممکن است بیمار در نوبت اول در یک وضعیت ذهنی بوده و پس از چند ساعت که تصویربرداری بعدی را انجام می‌دهیم وضعیت ذهنی بیمار، شرایط محیطی و غیره تغییر کرده باشد.

EEG با وجود وضوح زمانی بالا، به دلیل تفکیک‌پذیری فضایی ضعیف، نمی‌تواند به‌عنوان یک روش تصویربرداری برای مطالعه عملکرد مغز استفاده شود. در سال‌های اخیر، چندین روش تصویربرداری غیرتهاجمی از جمله PET، Spect و تصویربرداری fMRI، که همه آنها تصاویر مغزی را با وضوح مکانی بالا ارائه می‌دهند برای توسعه درک بهتر از عملکرد مغز انسان استفاده شده‌است. اما با وجود وضوح خوب مکانی، وضوح زمان این روش‌ها ضعیف است. از این رو، از EEG که دارای دقت زمانی به نسبت بسیار بالا است را می‌توان با هرکدام از روش‌های تصویربرداری برای درک بهتر عملکرد و ساختار عمقی‌تر مغز استفاده نمود.

تلفیق EEG طیف مادون قرمز نزدیک[۶۵]

در این روش، یک طیف‌سنج به مادون قرمز نزدیک با ترکیب EEG-fNIRS برای رمزگشایی دستور مغز از ناحیه پیشانی به‌منظور ارتباط مغز و رایانه استفاده می‌شود [۱۱۰]. EEG دارای توانایی پاسخ سریع به محرکات است، اما فاقد قدرت تفکیک فضایی مناسب است؛ از طرف دیگر fNIRS سرعت تصویربرداری ضعیفی دارد ولی کیفیت فضایی خوبی را ارائه می‌دهد. در نتیجه، می‌توان با ادغام آنها از مزیت‌های هر دو روش بهره برد و عملکرد کلی رابط مغزی-رایانه‌ای را ارتقاء بخشید. نتایج تحقیقات نشان داد که ثبت اطلاعات مغزی همزمان EEG و fNIRS هنگام تصویربرداری از فعالیت‌های حرکتی مغزی نسبت به استفاده از تنها یک روش، منجر به طبقه‌بندی و تفسیر بهتری از تصاویر گوناگون مغزی (مثلا بازوی راست در مقابل بازوی چپ) می‌شود [۱۱۱]. انجام چنین تصویربرداری‌هایی از فعالیت‌های حرکتی مغز مستلزم این است که حسگرهای EEG و هم fNIRS روی قسمت‌های مشترکی از مغز (قشر حرکتی مغز) گذاشته شود. می‌توان از الگوهای متفاوت برای اتصال حسگرهای هر دستگاه استفاده کرد و اینگونه هر سیگنال را از ناحیه متفاوتی دریافت و اندازه‌گیری کرد. به‌عنوان مثال، می‌توان از فرد خواست تا یک محاسبه ریاضیاتی را در ذهنش انجام دهد، که این فعالیت با fNIRS در لوب پره فرونتال ردیابی می‌شود؛ همچنین وی با تصور حرکت دادن دست راست یا چپ در ذهنش، ناحیه قشر حرکتی خود را تحریک کند که این نوع فعالیت با استفاده از نوار مغزی دریافت و پردازش می‌شود [۱۱۲]. این روش می‌تواند به ما در افتراق بین انواع مختلف دستورهای مغزی کمک کند و دقت کلی رابط‌های مغزی - رایانه‌ای را ارتقاء بخشد.

تلفیق EEG و الکترواکولوگرام[۶۶]

الکترواکولوگرام فعالیت الکتریکی چشم را با الکترودهایی که در بالا و پایین چشم و نیز چپ و راست آن قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌کند. الکترودهایی که در طرفین چپ و راست قرار می‌گیرند حساس به اختلاف پتانسیل و در نتیجه زاویه افقی چشم هستند. در نتیجه، الکترواکولوگرام نوعی ردیاب حرکات چشم است. رایج‌ترین کاربرد EOG، حذف آرتیفکت‌های پلک زدن از داده‌های EEG با روش‌های آماری تحلیل عاملی و تحلیل مولفه‌های مستقل است [۱۱۳]. به غیر از کاربرد حذف آرتیفکت‌ها، EOG در ادغام با EEG به کار می‌رود. به‌عنوان مثال، با توجه به آنکه تعداد پلک زدن متناسب با میزان خستگی است، یکی از کاربردهای EOG برای اندازه‌گیری تعداد پلک‌زدن‌ها و به‌طور همزمان اندازه‌گیری میزان خستگی مغز به کمک EEG است؛ بدین طریق هم EEG و هم تعداد پلک‌ها در EOG میزان خستگی فرد را نشان خواهند داد [۱۱۴]. چنین روشی میزان خستگی و بار کاری شخص را به‌طور بسیار دقیق‌تری نمایان خواهد ساخت. یکی دیگر از کاربردها این است که از EEG و EOG به‌طور همزمان اما به‌صورت مستقل استفاده کرد؛ بدین صورت که فردی بتواند به کمک EOG با حرکات چشمش یک بازوی رباتیک را حرکت دهد و نیز به کمک EEG با تصور ذهنی، دست رباتیک را باز و بسته کند. در واقع هنگام استفاده همزمان از EEG و EOG، اتصال الکترودهای الکترواکولوگرام الزامی نیست؛ زیرا آرتیفکت‌های چشمی نیز در نوار مغز ثبت می‌شوند و می‌توان آثار فعالیت‌های الکتریکی چشم را بدون نیاز به الکترودهای الکترواکولوگرام، در نوار مغزی بررسی کرد. بر این اساس، پژوهشگران نوعی ویلچر را اختراع کرده‌اند که فرد می‌تواند با تصور ذهنی، ویلچر را حرکت دهد [۱۱۵].

تلفیق EEG و EMG[۶۷]

الکترومیوگرافی اندازه‌گیری سیگنال‌های تولیدی ماهیچه‌ها است. فعالیت‌های الکتریکی عضلات بارها سبب ایجاد نویز روی نوار مغزی می‌شوند؛ برای مثال، الکترودهای نوار مغزی که نزدیک پشت سر متصل می‌شوند، می‌توانند تحت تاثیر فعالیت‌های الکتریکی عضلات گردن قرار گیرد. الکترودهای

پیشانی نیز می‌توانند تحت تاثیر فعالیت‌های عضلات فک قرار گیرند. مهم‌ترین کاربرد الکترومیوگرافی همانند الکترواکولوگرافی، حذف آرتیفکت‌ها از نوار مغزی است. با این حال، دلایل و ایده‌های دیگری نیز برای ادغام EEG و EOG وجود دارد؛ چنین ادغام‌هایی کاربردهایی نظیر آنچه که در الکترواکولوگرام بحث کردیم، دارند. برای مثال، بعضی اعمال یک دستگاه یا عضو مصنوعی می‌تواند با نوار مغزی کنترل شود و بعضی حرکات دیگر آن در کنترل سیگنال‌های الکترومیوگرافی عضلات فکی باشد [۱۱۶].

تلفیق EEG با fMRI

fMRI تصاویر کنتراست مغز را در واکنش اکسیژناسیون خون[۶۸] وابسته به سطح خون طی دوره‌های استراحت و انجام کارهای مخصوص مطالعه به ثبت می‌رساند. از مزایای fMRI می‌توان به تفکیک‌پذیری فضایی بالا (۱ mm) و توانایی به تصویر کشیدن ساختارهای عمقی‌تر مغز (برخلاف EEG که به‌طور عمده بازتابی از فعالیت کورتکس است) اشاره کرد. به‌طور معمول با این روش هر ۲ تا ۳ ثانیه می‌توان یک تصویر عملکردی کامل از مغز گرفت [۱۱۷].

اساس تصویر fMRI مقایسه آماری واکنش BOLD بین یک فاز «استراحت» ایده‌آل و یک فاز اجرای کار است. اگر چه این تصویر به‌طور مستقیم فعالیت الکتریکی عصبی را نمی‌سنجد اما به جای آن بازتابی از تغییرات ثانویه متابولیک و همودینامیکی است که نتیجه این فعالیت عصبی هستند. علاوه‌بر این، واکنش BOLD مغز بسیار آهسته‌تر (به‌طور معمول ۲/۵ تا ۶ ثانیه) از تغییرات الکتریکی تقریباً فوری مرتبط با فعالیت عصبی است. به همین دلیل بکارگیری هم‌زمان EEG و fMRI علاوه‌بر ترکیب مزایای هر دو، معایب آن‌ها را نیز دور می‌زند [۱۱۸]. برای کاربردهایی که نیاز به موقعیت‌یابی دقیق درون مغز دارند شواهد fMRI هم‌زمان بهتر می‌تواند راه حل مسئله معکوس موقعیت‌یابی منبع EEG را محدود نماید. اخیراً fMRI برای مطالعه پدیده‌های مختلف EEG مثل ریتم آلفای خلفی و پتانسیل‌های برانگیخته هم مورد استفاده قرار گرفته است. وضعیت‌های ذهنی مثل توجه و خستگی، نقش مهمی در پویایی عصبی زمینه‌ای دارند؛ عاملی که روش‌های بازسازی کنونی fMRI بیشتر افراد آن را نادیده می‌گیرند. به دلیل این که EEG بازتاب مستقیم بعضی از این وضعیت‌های ذهنی است، ترکیب کردن آن با روش تولید تصاویر fMRI منجر به بازتاب دقیق‌تر پویایی‌شناسی عصبی واقعی می‌شود. هدف نهایی ترکیب EEG با fMRI، استخراج اطلاعات تکمیلی در این دو پایگاه داده جداگانه به‌منظور درک بهتر پویایی‌شناسی عملکردی مغز است. کاربرد هم‌زمان EEG-fMRI در مطالعات مربوط به خواب و صرع استفاده شده‌است [۱۱۹]. بدون شناسایی رویدادها با وضوح زمانی بالا توسط EEG، تجزیه و تحلیل از داده‌های fMRI امکان‌پذیر نخواهد بود.

تلفیق EEG با TMS

تحریک مغناطیسی ترانس کرانیال[۶۹] مغز یک روش تحریک غیرتهاجمی به‌منظور بررسی فرآیندهای عصبی درون مغز است [۱۲۰]. ترکیبی از TMS و EEG طراحی آزمایش‌های غیرتهاجمی حالات مغز را امکان‌پذیر ساخته است [۱۲۱]. به‌طور خاص، TMS-EEG برای بررسی نوروفیزیولوژی بالینی با/بدون درمان در طیف وسیعی از اختلالات از جمله اسکیزوفرنی، افسردگی اساسی، اختلال دو قطبی، اعتیاد، اختلالات طیف اوتیسم و اختلال بیش فعالی کمبود توجه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲۲]. ترکیب هم‌زمان EEG-TMS می‌تواند بینش چگونگی تعامل مناطق عصبی در طول شناخت را نشان داده و به ما این امکان را دهد که نقش پایه‌ای ناحیه خاص مغز را در رفتار بررسی کنیم و همچنین به بررسی چه موقع و چگونگی تاثیر فعالیت یک منطقه مغز بر فعالیت در منطقه دیگر بپردازیم. استفاده هم‌زمان و ادغام TMS و EEG به پژوهشگران کمک می‌کند تا تحریکات مغزی، ارتباطات و تعاملات مغزی که پیوسته با فاصله زمانی رخ می‌دهند و نیز وضعیت لحظه‌ای مغز بیمار را بررسی کنند [۱۲۳].

جریان الکتریکی که با تحریک مغناطیسی در مغز بیمار القا می‌شود، می‌تواند غشاء نورون‌ها را دپلاریزه کند، در نتیجه کانال‌های یونی وابسته به ولتاژ باز شده و پتانسیل عمل در نورون‌ها شروع می‌شود. در ادامه، سیناپس‌ها فعال می‌شوند که این فعال‌شدن‌ها به‌طور هم‌زمان در EEG قابل مشاهده است. الکتروانسفالوگرام نمودارهای خطی از جریان‌های الکتریکی پس‌سیناپسی را که دریافت نموده و رسم می‌کند. با محاسبات عددی سیگنال‌های دریافتی توسط الکتروانسفالوگرام می‌توان به موقعیت‌یابی فعالیت‌های موضعی و ارتباطات عملکردی مناطق مختلف دستگاه عصبی پرداخت. EEG وضعیت تحریک‌پذیری افزایش یافته مغز را نمایان می‌کند و در نتیجه با تنظیم کردن فاز و قدرت تحریک TMS، می‌توان اثربخشی این تحریک را روی بیمار ارتقاء داد. از طرفی اگر تنظیم فرکانس تحریک TMS اعمال شده به سر بیمار با فرکانس‌های ویژه برخی اعمال (که نوسانات ویژه‌یشان شناخته شده‌اند) تا نوسانات مغزی بیمار به شکلی تغییر کند که با نوسانات اعمال شده به سر بیمار همگام و هم ریتم شود، عملکرد شبکه‌های مرتبط افزایش خواهد یافت [۱۲۴].

تلفیق EEG با تحریک الکتریکی[۷۰]

روش TES شامل استفاده از جریان‌های الکتریکی ضعیف مستقیم به سر برای چند دقیقه است. این جریان‌ها یک میدان الکتریکی را تولید می‌کنند که فعالیت عصبی را با توجه

به مدت زمان، شدت و روش‌های کاربردی تحریک جریان مستقیم[۷۱]، تحریک جریان متناوب متقاطع[۷۲] یا تحریک نویز تصادفی[۷۳] تعدیل می‌کند [۱۲۵].

از روش تلفیقی TES-EEG می‌توان برای بررسی اثرات جانبی کانونی TES بر فعالیت عصبی در قشر هدف استفاده کرد. تلفیق TES و EEG اطلاعات مربوط به وضوح زمانی بالا را در مورد تغییر/تعدیل‌های ناشی از TES بر فعالیت قشری مغز که مربوط به مراحل مختلف پردازش است، فراهم می‌کند. استفاده از EEG در ترکیب با TES، می‌تواند درک دقیق‌تری از سازوکارهای عصبی درگیر در این تغییرات را نشان دهد.

واقعیت نهفته شده در کاربرد TES-EEG این است که سیگنال‌های مشاهده شده به‌طور مستقیم با فعالیت الکتریکی عصبی همراه هستند. ثبت EEG، پتانسیل الکتریکی ناشی از جریان گذرای سیناپسی سلول‌های عصبی را که توسط TES اصلاح شده (یا نشده) را منعکس می‌کند. از این طریق به شناسایی مناطق مغزی که مستقیم یا غیرمستقیم تحت تأثیر TES هستند، کمک می‌کند [۱۲۴].

تلفیق EEG با PET

اندازه‌گیری متابولیسم گلوکز مغزی انسان[۷۴] با PET و فعالیت الکتریکی مغز انسان با EEG از بین بردن فعالیت سیناپسی، هر دو روش باید در توزیع مکانی مغزی آنها مرتبط باشد. افراد سالم در واقع الگوهای مکانی متابولیکی و عصبی الکترونیک مشابه را نشان می‌دهند. الگوهای فضایی GluM و EEG با متابولیسم گلوکز همبستگی دارد [۱۲۶]. EEG اطلاعات مکانی مشابهی درباره عملکرد مغز به‌عنوان GluM-PET ارائه می‌دهد. همچنین از این تلفیق می‌توان در بررسی ارتباط عملکردی امواج (ریتم آلفا) EEG و متابولیسم گلوکز مغزی قبل و بعد از مصرف داروهای CNS پرداخت که می‌تواند به‌عنوان روشی امیدوار کننده، برای بررسی حلقه‌های بازخورد قشر-تالامو-کورتیکال در بیماری‌های عصبی روانی باشد[۱۲۷].

تلفیق EEG و پتانسیل‌های وابسته به رخداد[۷۵]

EEG می‌تواند برای مشخص کردن چگونگی تغییر فعالیت مغز در طول زمان در پاسخ به یک رویداد (پتانسیل مربوط به رویداد: ERP) استفاده شود. ERPها به‌طور مستقیم پاسخ الکتریکی کورتکس را نسبت به رخدادهای حسی، حرکتی یا شناختی سنکرون شده تولید شده و به‌صورت نوسانات ولتاژ در سیگنال EEG خود را نشان می‌دهد [۱۲۸].

پتانسیل مربوط به رویداد یا ERP در واقع بررسی واکنش مغز به محرک‌ها در کمتر از یک ثانیه است و امکان ارزیابی کارکرد مغز در بیماران مبتلا به اختلالات شناختی را فراهم می‌آورد. در این روش با دادن یک تحریک مناسب (دیداری، شنیداری، شناختی و غیره به فرد سیگنال مغزی) ناشی از ادراک آن تحریک ثبت می‌شود. ویژگی‌های ERP داشتن دقت زمانی بالا در حد چند میلی‌ثانیه بوده و روشی غیرتهاجمی است که از EEG استفاده می‌کند و ابزار مفیدی برای آزمودن تعامل بین شناخت و هیجان، تشخیص و آسیب‌شناسی اختلالات عصبی-روانی از جمله افسردگی، اضطراب و اختلالات خلقی، بیش‌فعالی، اوتیسم، اختلالات یادگیری، آلزایمر، اختلالات حرکتی فلج مغزی و غیره است [۱۲۸].

نتیجه‌گیری

QEEG ابزاری مهم برای تشخیص بهبود بالینی و ارزیابی پاسخ به درمان است. همان‌طور که مطالعات نشان داده‌اند EEG پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای کاربردهای بالینی به عنوان نشانگرهای زیستی بیماری‌ها دارد که می‌تواند به‌عنوان پیش‌بینی کننده، تشخیصی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات اخیر که با تلفیق روش‌های تصویربرداری همچون EEG با fNIRS، fMRI، TCS، ERP، TMS، EOG، MEG و یا PET انجام شد، از کاربردهای امیدوارکننده فعالیت‌های نوسانی مغز پرده برداشت. نوسانات مغزی به‌عنوان عامل اصلی در تعدادی از الگوهای مداری بنیادین مغز تاکید دارند و نوسانات مغزی را محرک عملکردها مغز می‌دانند [۱۲۹] که هدف مناسب و جالبی برای مداخلات عصبی مغز بیماران هستند.

تلفیق همزمان EEG با این دستگاه‌ها فرصت خوبی برای پژوهش‌های آینده است که می‌توان به کمک آن اسرار جدیدی از ارتباط فعالیت امواج مغز در فرکانس‌های مختلف با فعالیت مغز و فعل و انفعالات آن با شبکه‌های کارکردی گسترده مغزی پرده برداشت. ادغام روش‌های تصویربرداری مختلف یک دید ماکروسکوپی کامل‌تر و بهتری را از وضعیت مغز بیمار ارائه می‌کند. در نتیجه استفاده همزمان از دو روش اعتبار را افزایش می‌دهد و برخی نویزها را بر طرف می‌کند. مهم‌تر از آن، تلفیق همزمان به ما اجازه می‌دهد تا با دقت بیشتری به پاسخ بسیاری از سوالات مان بپردازیم و بتوانیم اطلاعات را با روش‌های ویژه و خاصی تجزیه و تحلیل کنیم و به یک درک بنیادین از فعالیت‌های مغزی و رفتارهای مرتبط با آن برسیم.

پی‌نوشت

۱. استادیار بخش علوم اعصاب شناختی، دانشکده علوم تربیتی و روان‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲. دانشجوی دکتری علوم اعصاب شناختی، دانشگاه تبریز، پردیس ارس، ایران

3. Electroencephalograms (EEG)
4. ensorimotor rhythm (SMR)
5. Positron emission tomography (PET)
6. Computed tomography (CT)
7. Functional magnetic resonance imaging (fMRI)
8. Trans-cranial magnetic stimulation (TMS)
9. Central nervous system (CNS)
10. Action potential (AP)
11. Universität Jena
12. Attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD)
13. Spontaneity
14. Plasticity
15. Rapid eye movement (REM)
16. Brain–machine interface (BCI)
17. Attention deficit disorder (ADD)
18. General anxiety disorder (GAD)
19. Posterior dominant rhythm (PDR)
20. Low beta
21. Quantitative electroencephalograph (QEEG)
22. American academy of neurology (AAN)
23. American clinical neurophysiology society (ACNS)
24. Intensive care units (ICU)
25. Post-concussion syndrome (PCS)
26.Pharmaco-eeg (IPEG)
27. Central nervous system
28. Cognitive impairment (CI)
29. Coherence
30. Strok
31. Attentional capacity
32. Traumatic brain injury (TBI)
33. Encephalopathy
34. Creutzfeldt-Jacob disease,
35. Uremia
36. Hypoxic-ischemic
37. Delirium
38. Endarterectomy carotid
39. Titration of barbiturates
40. Mannitoltherapy
41. Learning and attention disorders
42. Frontal α asymmetry (FAA)
43. Anhedonia
44. Frontotemporal
45. Parietotemporal
46. Dementia
47. Single photon emission computed tomography (SPECT)
48. Autism spectrum disorder (ASD)
49. Neurotherap
50. Talamocortical
51. Neuromarketing
52. Deep learning techniques
53. Convolution neural network (CNN)
54. Auto encoder (AE)
55. Recurrent neural network (RNN)
56. Deep belief network (DBN)
57. Restricted boltzmann machine (RBM)
58. Multilayer perceptron neural network (MLPNN)
59. Signal acquisition
60. Signal processing
61. Feature extraction
62. Translation
63. Application
64. Biometric identification (BI)
65. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)
66. Electrooculogram (EOG)
67. Electromyography
68. Bold
69. Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS)
70. Transcranial electrical Stimulation (TES)
71. Transcranial direct current stimulation (tDCS)
72. Transcranial alternating current stimulation (TACS)
73. Transcranial random noise stimulation (tRNS)
74. Glucose meter (GluM)
75. Event- related potentials (ERP)

مراجع

[1] C. Bédard, H. Kröger, & A. Destexhe, Modelling extracellular field potentials and the frequency-filtering properties of extracellular space, Biophysical, 86 (2004) 1829–1842.

[2] G. Buzsáki1, C. AAnastassiou, C. Koch, The origin of extracellular fields and currents — EEG, ECoG, LFP and spikes, Nature Reviews Neuroscience, 13(2012) 407-420.

[3] F. Bremer, Conside ´rations sur l'origine et la nature des ''ondes'' ce ´re ´brales, Electroencephalogr, Clin. Neurophysiol, 1(1949) 177–193.

[4] F. Bremer, L'activite ´ e ´lectrique de l'e ´corce ce ´re ´brale, Actualite ´s Scientifiques et Industrielles, 658(1938) 3–46.

[5] Q. Ai, Q. Liu, W. Meng, SQ. Xie, Brain Signal Acquisition and Preprocessing, Advanced Rehabilitative Technology, (2018)105–133.

[6] TH. Buzynski, From EEG to neurofeedback, In J.R. Evans & Arbarbanel (Eds), Introduction to qantitation EEG and neurofeedback , San Diego, CA: Academic Press, (1999) 65- 79.

[7] E. Criswell, Biofeedback and somatics, Novato, CA: Freeperson Press, 1995.

[8]G. Moruzzi, HW. Magoun, Brain stem reticular formation and activation of EEG, Electroencephalography and clinical Neurophysiology, 1(1949) 455-473.

[9] J. NDemos, Getting Started with Neurofeedback, W. W. Norton & Company; 61144th Edition, 2005.

[10] RW. Thatcher, Subthreshold 10-Hz sound suppresses EEG theta: Clinical application for the potentiation of neurotherapeutic treatment of ADD/ADH, Journal of Neurotherapy, 1(1999), 15-22.

[11] S. Chauvette, Slow-wave sleep: Generation and propagation of slow waves, role in long-term plasticity and gating. Université Laval, 2013.

[12] ML. Lörincz, V. Crunelli, SW. Hughes, Cellular dynamics of cholinergically induced alpha (8-13 Hz) rhythms in sensory thalamic nuclei in vitro, J Neurosci, 28(2008) 660-671.

[13] E. Niedermeyer, FL. da Silva, Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields: Lippincott Williams & Wilkins. 2005.

[14] JH. Williams, A. Whiten, T. Suddendorf, DI. Perrett, Imitation, mirror neurons and autism, Neurosci. Biobehav. Rev, 25(2001) 287–295.

[15] WT. Blume, M. Kaibara, Atlas of adult electroencephalography, New York: Raven Press, 1995.

[16] AJ. Rowanm, E. Tolunsky, Primer of EEG with a mini-atlas. Boston: Butterworth Heinemann, 2003.

[17] S. Othmer, SF. Othmer, D A. Kaiser, EEG biofeedback: an emerging model for its global efficacy. In J. R. Evanns & A. Arbarbanel (Eds), Introduction to quantitative EEG and neurofeedback, San Diego, CA: Academic Press, (1999) 243- 310.

[18] W. Klimesch, G. Pfurtscheller, H. Schimke, Pre- and post-stimulus processes in category judgement tasks as measured by event-related desynchronization (ERD), Journal of Psychophysiology, 6 (1992) 185-203.

[19] JF. Lubar, JO. Lubar, Neurofeedback assessment and treatment for attention deficit/ hyperactivity disorders. In J. R. Evans & A. Arbarbanel (Eds.), Introduction to quantitative EEG and neurofeedback, CA: Academic Press, (1999) 103-143.

[20] DC. Hammond, The role of 40 Hz activity and training (question 1), The Journal of Neurotherapy, 4(2000) 95- 100.

[21] J. Johnstone, J. Gunkelman, Use of databases in QEEG evalution, Journal of Neurotherapy, 7(2003) 31-52.

[22] M. Nuwer, Assessment of digital EEG, quantitative EEG, and EEG brain mapping: report of the American Academy of Neurology and the American Clinical Neurophysiology Society, Neurology, 49(1997) 277–292.

[23] D.Constantin, Digital EEG, Quantitative EEG techniques and brain mapping. Conventional and modern electroencephalogram in adult and child, București, Medical Publishing House, (2008) 161-169.

[24] S. Ghosh-Dastidar, H. Adeli, N. Dadmehr, "MixedBand Wavelet-Chaos-Neural Network Methodology for Epilepsy and Epileptic Seizure Detection", IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 54 (2007) 1545-1551.

[25] A. Goenka, A. Boro, E. Yozawitz, Comparative sensitivity of quantitative EEG (QEEG) spectrograms for

detecting seizure subtypes, Seizure, 55(2018) 70-75.

[26] Y. Höller, C. Helmstaedter, K. Lehnertz, Quantitative Pharmaco-Electroencephalography in Antiepileptic Drug Research, CNS Drugs, 32(2018) 839-848.

[27] M. Jobert, J. Wilson, GSF, Ruigt, LS. Prichep, Guidelines for the recording and evaluation of pharmaco-EEG data in man: the international Pharmaco-EEG Society (IPEG), Neuropsychobiology, 66(2012) 201-220.

[28] GM. Tedrus, LM. Negreiros, RS. Ballarim, TA. Marques, LC. Fonseca, Correlations Between Cognitive Aspects and Quantitative EEG in Adults With Epilepsy, Clinical EEG and Neuroscience, 2018.

[29] V. Kopruner, G. Pfurtscheller, LM. Auer, Quantitative EEG in Normals and in Patients with Cerebral Ischemia. Progress in Brain Research, 62(1984)29-50.

[30] E. Schleiger, N. Sheikh, T. Rowland, A. Wong, S. Read, S. Finnigan, Frontal EEG delta/alpha ratio and screening for post-stroke cognitive deficits: The power of four electrodes. Int J Psychophysiol. 94(2014) 19-24.

[31] S. Kanna, J. Heng, Quantitative EEG parameters for monitoring and biofeedback during rehabilitation after stroke. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2009)1689-94.

[32] MR. Nuwer, DA. Hovda, LM. Schrader, PM. Vespa, Routine and quantitative EEG in mild traumatic brain injury. Clin Neurophysiol, 116(2005) 2001-2025.

[33] JN. Ianof, R. Anghinah, Traumatic brain injury: An EEG point of view, Dement Neuropsychol, 11(2017) 3-5.

[34] N. Gosselin, M. Lassonde, D. Petit, S. Leclerc, V. Mongrain, A. Collie, J. Montplaisir, Sleep following sport-related concussions, Sleep Med, 10(2009) 35-46.

[35] A. von Bierbrauer, K. Weissenborn, H. Hinrichs, M. Scholz, H. Künkel, Automatic (computer-assisted) EEG analysis in comparison with visual EEG analysis in patients following minor cranio-cerebral trauma (a follow-up study). EEG EMG Z Elektroenzephalogr Elektromyogr Verwandte Geb, 23(1992) 151-7.

[36] MT. Tebano, M. Cameroni, G. Gallozzi, A. Loizzo, G. Palazzino, G. Pezzini, GF. Ricci, EEG spectral analysis after minor head injury in man, Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 70 (1998) 185-9.

[37] P. Coutin-Churchman, Y. Añez, M. Uzcátegui, L. Alvarez, F. Vergara, L. Mendez, R. Fleitas, Quantitative spectral analysis of EEG in psychiatry revisited: drawing signs out of numbers in a clinical setting,Clin Neurophysiol, 114(2003) 2294-2306.

[38] X-P. Chen, L-Y. Tao, A. CN Chen, Electroencephalogram and evoked potential parameters examined in Chinese mild head injury patients for forensic medicine, Neurosci Bull, 22(2006)165-170.

[39] GW. Fenton, The postconcussional syndrome reappraised, Clin Electroencephalogr, 27(1996) 174-182.

[40] RJ. McClelland, GW. Fenton, W. Rutherford, The postconcussional syndrome revisited, Journal of The Royal Society of Medicine, 87(1994) 508-510.

[41] G. Fenton, RJ. McClelland, A. Montgomery, G. MacFlynn, W. Rutherford, The postconcussional syndrome: social antecedents and psychological sequelae, Br J Psychiatry, 162(1993) 493-497.

[42] EA. Montgomery, GW.Fenton, RJ. McClelland, G. MacFlynn, WH. Rutherford, The psychobiology of minor head injury, Psychol Med, 21(1991) 375-384.

[43] MR. Watson, GW. Fenton, RJ. McClelland, J. Lumsden, M. Headley, WH. Rutherford, The post-concussional state: neurophysiological aspects, Br J Psychiatry, 167(1995) 514-521.

[44] RW. Thatcher, N. Moore, ER. John, F. Duffy, JR. Hughes, M. Krieger, QEEG and traumatic brain injury: rebuttal of the American Academy of Neurology 1997 Report by the EEG and Clinical Neuroscience Society. Clin Electroencephalogr, 30(1999) 94-98.

[45] P. Afonso De Medeiros Kanda, R. Anghinah, MT. Smidth, JM. Silva, The clinical use of quantitative EEG in cognitive disorders, Dementia & Neuropsychologia, 3(2009) 195-203.

[46] SA. Jacobson, AF. Leuchter, DO. Walter, Conventional and quantitative EEG in the diagnosis of delirium among the elderly, J NeurolNeurosurg Psychiatry, 56(1993) 153-158.

[47] RP. Brenner, Utility of EEG in delirium: past views and current practice, Int psychogeriatrics, 3(1991) 211-229.

[48] C. Thomas, U. Hestermann, S. Walther, U. Pfueller, M. Hack, P. Oster, C. Mundt, M. Weisbrod, Prolonged activation EEG differentiates dementia with and without delirium in frail elderly patients, J Neurol Neurosurg Psychiatry, 79(2008)119-125.

[49] FJ. Luccas, R. Anghinah, NI. Braga, LC. Fonseca, ML. Frochtengarten, MS. Jorge, Guidelines for recording/analyzing quantitative EEG and evoked potentials. Part II: Clinical aspects. Arq Neuropsiquiatr, 57(1999) 132-146.

[50] KG. Jordan, Continuous EEG monitoring in the neuroscience intensive care unit and emergency department, J Clin Neurophysiol, 16(199) 14-39.

[51] JR. Hughes, ER. John, Conventional and Quantitative Electroencephalography in Psychiatry, J Neuropsychiatry Clin Neurosci, 11(1999) 190-208.

[52] RJ. Chabot, Fd. Michele, L. Prichep, The role of quantitative electroencephalography in child and adolescent psychiatric disorders, Child Adolesc Psychiatr Clin N Am, 14(2005) 21-53.

[53] Clinical practice guideline: diagnosis and evaluation of the child with attention-deficit/hyperactivity disorder. American Academy of Pediatrics, Pediatrics, 105(2000) 1158-1170.

[54] SM. Bresnahan, JW. Anderson, RJ. Barry, Age-related changes in quantitative EEG in attention-deficit/hyperactivity disorder, Biol Psychiatry, 46(1999) 1690-1697.

[55] SM. Bresnahan, RJ. Barry, Specificity of quantitative EEG analysis in adults with attention deficit hyperactivity disorder, Psychiatry Res, 112(2002) 133-144.

[56] SK. Loo, S. Makeig, Clinical Utility of EEG in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Research Update, J. Neurotherapeutics, 9(2012) 569–587.

[57] CA. Magee, AR. Clarke, RJ. Barry, R. McCarthy, M. Selikowitz, Examining the diagnostic utility of EEG power measures in children with attention deficit/hyperactivity disorder, Clin Neurophysiol, 116(2005):1033-1040.

[58] N. van der Vinne, MA. Vollebregt, MJAM. Van Putten, M. Arns, Frontal alpha asymmetry as a diagnostic marker in depression: Fact or fiction? A meta-analysis, NeuroImage Clin, 16(2017) 79-87.

[59] ML. Morgan, EA .Witte, IA. Cook, AF. Leuchter, M. Abrams, B. Siegman, Influence of age, gender, health status and depression on quantitative EEG, Neuropsychobiology, 52(2005) 71-76.

[60] A. Cantisani, T. Koenig, H. Horn, T. Müller, W. Strik, S. Walther,, Psychomotor retardation is linked to frontal alpha asymmetry in major depression. Journal of Affective Disorders, 188(2015) 167-172.

[61] AM. Hunter, IA. Cook, AF. Leuchter, The pomise of the Quantitative Electroencephalogram as a predictor of antidepressant treatment outcomes in major depressive disorder, Psychiatr Clin North Am, 30(2007)105-124.

[62] D. Spronk, M. Arns, A. Bootsma, R. van Ruth, PB. Fitzgerald, Long term effects of left frontal rTMS on EEG and ERPs in patients with depression, Clin EEG Neurosci, 39(2008)118-124.

[63] RJ. Koek, BI. Yerevanian, KH. Tachiki, JC. Smith, J. Alcock, A. Kopelowicz, Hemispheric asymmetry in depression and mania. A longitudinal QEEG study in bipolar disorder, J Affect Disord, 53(1999)109-122.

[64] AF. Leuchter, IA. Cook, SH. Uijtdehaage, J. Dunkin, RB. Lufkin, C. Anderson-Hanley, et al, Brain structure and function and the outcomes of treatment for depression, J Clin Psychiatry, 58 Suppl 16(1997) 2-31.

[65] AL. Lieber, Diagnosis and subtyping of depressive disorders by quantitative electroencephalography: II. Interhemispheric measures are abnormal in major depressives and frequency analysis may discriminate certain subtypes, Hillside J Clin Psychiatry, 10(1988) 84-97.

[66] JS. Kwon, T. Youn, HY. Jung, Right hemisphere abnormalities in major depression: quantitative electroencephalographic findings before and after treatment, J Affect Disord, 40(1996) 169-173.

[67] D. Pozzi, A. Golimstock, M. Petracchi, H. García, S. Starkstein, Quantified electroencephalographic changes in depressed patients with and without dementia, Biol Psychiatry, 38(1995) 677-683.

[68] ML. Morgan, IA. Cook, AJ. Rapkin, AF. Leuchter, Neurophysiologic changes during estrogen augmentation in perimenopausal depression. Maturitas, 56(2007)54-60.

[69] Z. Haneef, HS. Levin, JD. Frost, EM. Mizrahi, Electroencephalography and quantitative electroencepha-

lography in mild traumatic brain injury, J Neurotrauma, 30(2013) 653-656.

[70] W.Heller, JB. Nitschke, MA. Etienne, GA. Miller, Patterns of regional brain activity differentiate types of anxiety, J Abnorm Psychol, 106(1997)376-385.

[71] RJ. Davidson, JR. Marshall, AJ. Tomarken, JB. Henriques, While a phobic waits: regional brain electrical and autonomic activity in social phobics during anticipation of public speaking, Biol Psychiatry, 47(2000)85-95.

[72] G. Wiedemann, P. Pauli, W. Dengler, W. Lutzenberger, N. Birbaumer, G. Buchkremer, Frontal Brain Asymmetry as a Biological Substrate of Emotions in Patients With Panic Disorders, Arch Gen Psychiatry, 56(1999) 78-84.

[73] MR. Nuwer, G. Comi, R. Emerson, A. Fuglsang-Frederiksen, JM. Guérit, H. Hinrichs, A. Ikeda, FJ. Luccas, P. Rappelsburger, IFCN standards for digital recording of clinical EEG. International Federation of Clinical Neurophysiology, Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 106(1998)259-261.

[74] DW. Klass, RP. Brenner, Electroencephalography of the elderly, J Clin Neurophysiol, 12(1995)116-131.

[75] FH. Duffy, JL. Burchfiel, CT. Lombroso, Brain electrical activity mapping (BEAM): A method for extending the clinical utility of EEG and evoked potential data, Ann Neurol, 5(1979) 309-321.

[76] M. Martin-Loeches, P. Gil, F. Jimenez, FJ. Exposito, F. Miguel, R.Cacabelos, FJ. Rubia, Topographic maps of brain electrical activity in primary degenerative dementia of the Alzheimer type and multiinfarct dementia, Biol Psychiatry, 29(1991) 211-223.

[77] B. Saletu, E. Paulus, J. Grunbergerer, K. Maurer, Correlation maps: on the relation of electroencephalographic slow wave activity to computerized tomography and psycopathometric measurements in dementia in Maurer K. Imaging of Brain in Psychiatry and Related Fieldsed, Berlin, Springer-Verlag, (1993) 263-265.

[78] R. Yuvaraj, M. Murugappan, N. Mohamed Ibrahim, M. Iqbal, K. Sundaraj, K. Mohamad, R. Palaniappan, E. Mesquita, M. Satiyan, On the analysis of EEG power, frequency and asymmetry in Parkinson's disease during emotion processing, Behav Brain Funct, 10(2014) 12.

[79] R. Milner, M. Lewandowska, M. Ganc, E. Włodarczyk, D. Grudzień, H. Skarżyński, Abnormal Resting-State Quantitative Electroencephalogram in Children With Central Auditory Processing Disorder: A Pilot Study, Front Neurosci, 12(2018) 292.

[80] L. Billeci, F. Sicca, K. Maharatna, F. Apicella, A. Narzisi, G. Campatelli, S. Calderoni, G. Pioggia, F. Muratori, On the Application of Quantitative EEG for Characterizing Autistic Brain: A Systematic Review. Front Hum Neurosci, 7(2013) 442.

[81] M. Haller, T. Donoghue, E. Peterson, P. Varma,P. Sebastian, , R. Gao, … B. Voytek, Parameterizing neural power spectra, bioRxiv, 2018.

[82] R. Barnier, G. Dawson, S. Webb, M. Murias, EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder, Brain Cogn, 64(2007) 228–237.

[83] L. M. Oberman, V. S. Ramachandran, J. A. Pineda, (2008). Modulation of mu suppression in children with autism spectrum disorders in response to familiar or unfamiliar stimuli: the mirror neuron hypothesis. Neuropsychologia 46(2008) 1558–1565.

[84] JHG. Williams, A. Whiten, T. Suddendorf, DI. Perrett, Imitation, mirror neurons and autism, Neurosci &. Biobehavioral Review, 25(2001) 287–295.

[85] LM. Oberman, VS. Ramachandran, JA. Pineda, Modulation of mu suppression in children with autism spectrum disorders in response to familiar or unfamiliar stimuli: the mirror neuron hypothesis, Neuropsychologia 46(2008) 1558–1565.

[86] R.Barnier, G. Dawson, S. Webb, M. Murias, EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder,Brain Cogn, 64(2007) 228–237.

[87] MB. Sterman, Physiological origins andfunctional correlates of EEG rhythmic activities. Biofeedback and Self-Regulation, 21 (1996), 3-49.

[88] JD. Gunkelman, J. Johnstone, Neurofeedbackand the brain, J Adult Devel, 12(2005) 93-98.

[89] NR. Williams, JJ. Taylor, S. Kerns, EB. Short, EM. Kantor, MS. George, Interventional psychiatry: why

now? , The Journal of clinical psychiatry, 5(2014) 75-89.

[90] T. Paus, PK. Sipila, AP. Strafella, Synchronization of Neuronal Activity in the Human Primary Motor Cortex by Transcranial Magnetic Stimulation: An EEG Study, J Neurophysiol, 86(2001):1983–1990.

[91] H. Li, J. Wang, C. Li, Z. Xiao, Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) for panic disorder in adults, The Cochrane Library, 2014

[92] W. Klomjai, R. Katz, A. Lackmy-Vallée, Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS), Annals of physical and rehabilitation medicine, 58(2015), 208-213 .

[93] F. Fregni, P. S. Boggio, M. Nitsche, F. Bermpohl, A. Antal, E. Feredoes, et al, Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory, Exp. Brain Res, 166(2005) 23–30

[94] M. A. Nitsche, S. Doemkes, T. Karaköse, A. Antal, D. Liebetanz, N. Lang, Shaping the effects of transcranial direct current stimulation of the human motor cortex, J. Neurophysiol, 97(2007) 3109–3117.

[95] G. Ardolino, B. Bossi, S. Barbieri, A. Priori, Nonsynaptic mechanisms underlie the after-effects of cathodal transcutaneous direct current stimulation of the human brain, J Physiol, 568(2005): 653-63.

[96] R. Lindenberg, V. Renga, L L. Zhu, D. Nair, G. Schlaug, Bihemispheric brain stimulation facilitates motor recovery in chronic stroke patients, Neurology, 75(2010) 2176–2184

[97] A. Antal, W. Paulus, A case of refractory orofacial pain treated by transcranial direct current stimulation applied overhand motor area in combination with NMDA agonist drug intake, Brain Stimul, 4(2011) 117–121.

[98] AF. DaSilva, ME. Mendonca, S. Zaghi, M. Lopes, MF. DosSantos, EL. Spierings, … et al, tDCS-induced analgesia and electrical fields in pain-related neural networks in chronic migraine headache, Headache, 52 (2012)1283–1295

[99] H. Kumru, D. Soler, J. Vidal, X. Navarro, JM. Tormos, A. Pascual-Leone1, et al, The effects of transcranial direct current stimulation with visual illusion in neuropathic pain due to spinal cord injury: an evoked potentials and quantitative thermal testing study, Eur. J. Pain. [Epub ahead of print], 2012.

[100] W. Jennifer, "Neuromarketing: Add It to the Marketing Toolbox", Visibility Magazine, 2010.

[101] G. Bahar, E. Başar, "A review of brain oscillations in perception of faces and emotional pictures", Neuropsychologia, 58 (2014) 33-51.

[102] M. Mahmoodi Meymand , A. Eyvazi Heshmat, A. Aghayousefi, Z. Ostadian khani,The Effect of Customers' Favorite Product Selection on the Alpha Wave: A Study of Shape and Color, J. Neuropsychology, 3 (2017) 87-102.

[103] PD. Merlin, SD. Angelin, GS. Thomas, Deep Learning Techniques for EEG Signal Applications – a Review, IETE Journal of Research, 2020

[104] N. Naseer, K-S. Hong, fNIRS-based brain-computer interfaces: a review, Front. Hum. Neurosci, 9 (2015b) 1-15.

[105] KE. Schroeder, CA.Chestek, Intracortical brain-machine interfaces advance sensorimotor neuroscience, Front. Neurosci, 10(2016) 291.

[106] A. von Luhmann, C. Herff, D. Heger, T.Schultz, Toward a wireless open source instrument: functional near-infrared spectroscopy in mobile neuroergonomics and BCI applications, Front. Hum. Neurosci, 9(2015) 617.

[107] M. Nentwich, L. Ai, J. Madsen, QK. Telesford, S. Haufe, MP. Milham, L. C. Parra, Functional connectivity of EEG is subject-specific, associated with phenotype, and different from fMRI, J.NeuroImage, 218(2020) 1-15.

[108] TO. Bergmann, A. Karabanov, G. Hartwigsen, A. Thielscher, HR. Siebner, Combining non-invasive transcranial brain stimulation with neuroimaging and electrophysiology: current approaches and future perspectives, J. Neuroimage. 140(2016) 4–19.

[109] J. Reithler, JC. Peters, AT. Sack, Multimodal transcranial magnetic stimulation: using concurrent neuroimaging to reveal the neural network dynamics of noninvasive brain stimulation, Prog Neurobiol. 94(2011) 149–65.

[110] M. Jawad khan, K-S. Hong, hybrid eeg–fnirs-Based eight-command Decoding for Bci: application to

Quadcopter control, Frontiers in Neurorobotics, 11(2017) 1-13.

[111] S. Fazli, J. Mehnert, J. Steinbrink, G. Curio, A. Villringer, KR. Muller, B. Blankertz, Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface, NeuroImage, 59(2012) 519–529.

[112] M. jawad Khan, M. Jiyoun Hong, K-S. Hong, Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface, Frontiers in Humen Neuroscience, 8 (2014) 1- 10.

[113] K-S. Hong, M. Jawad Khan, Hybrid brain-computer interface techniques for improved classification accuracy and increased number of commands: a review, Front Neurorobot. 11(2017)1-27.

[114] RN. Khushaba, S. Kodagoda, S. Lal, G. Dissanayake, Uncorrelated fuzzy neighborhood preserving analysis based feature projection for driver drowsiness recognition, Fuzzy Sets Syst, 221(2013) 90–111.

[115] R. Ramli, H. Arof, F. Ibrahim, N. Mokhtar, MYI. Idris, Using finite state machine and a hybrid of EEG signal and EOG artifacts for an asynchronous wheelchair navigation, Expert Syst, 42(2015) 2451–2463.

[116] ST. Foldes, DM. Taylor, Discreet discrete commands for assistive and neuroprosthetic devices, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng, 18(2010) 236–244.

[117] SH. Tong, NV. Thakor, Quantitative EEG Analysis Methods and Clinical Applications. Artech House Series Engineering in Medicine & Biology. Boston- London.2009.

[118] RJ. Huster, S. Debener, T. Eichele, CS. Herrmann, Methods for simultaneousEEG–fMRI: an introductory review, J. Neurosci, 32 (2012) 6053–6060.

[119] CG. Benar, C. Grova, E. Kobayashi, AP. Bagshaw, Y. Aghakhani, F. Dubeau, J. Gotman, EEG–fMRI of epileptic spikes: concordance with EEG source localization and intracranial EEG, NeuroImage, 30 (2006) 1161–1170.

[120] M. Hallet, Transcranial magnetic stimulation: a primer, Neuron, 55 (2007):187–99.

[121] M. Massimini, G. Tononi, R. Huber, Slow waves, synaptic plasticity and information processing: insights from transcranial magnetic stimulation and high-density EEG experiments, Eur J, 29(2009b):1761–70.

[122] S. Tremblay, N C Rogasch, I. Premoli, D M, Blumberger, S. Casarotto, R. Chen, V. Di Lazzaro, F. Farzan, F. Ferrarelli, PB. Fitzgerald, J. Hui, RJ. Ilmoniemi, VK. Kimiskidis, D. Kugiumtzis, P. Lioumis, A. Pascual-Leone, M C. Pellicciari, T. Rajji, Z J. Daskalakis, Clinical utility and prospective of TMS–EEG, Clinical Neurophysiology, 130 (2019) 802–844.

[123] S. Petrichella, N. Johnson, B. He, The influence of corticospinal activity on TMS-evoked activity and connectivity in healthy subjects: a TMS-EEG study, PLoS ONE, 12(2017) 1–18.

[124] G. Thut, TO. Bergmann, F. Fröhlich, SR. Soekadar, J-S. Brittain, A. Valero-Cabré, A. T Sack, C. Miniussi, A. Antal, H. Roman Siebner, U. Ziemann, CS. Herrmann, Guiding transcranial brain stimulation by EEG/MEG to interact with ongoing rain activity and associated functions: A position paper, Clinical Neurophysiology, 128 (2017) 1388-2457.

[125] W. Paulus, Transcranial electrical stimulation (tES-tDCS; tRNS, tACS) methods, Neuropsychol Rehabil, 21(2011) 602-617.

[126] T. Dierksa, V. Jelicc, RD. Pascual-Marquie, LO. Wahlundc, P. Julinc, DE. Lindenb, B. Winblad , A. Nordberg, Spatial pattern of cerebral glucose metabolism (PET) correlates with localization of intracerebral EEG- generators in Alzheimer's disease, Clinical Neurophysiology, 111(2000) 1817-1824.

[127] M. Schreckenberger, Ch. Lange-Asschenfeld, M. Lochmann, K. Mann, T. Siessmeier, H-G. Buchholz, P. Bartenstein, G .Gru¨nderb, The thalamus as the generator and modulator of EEG alpha rhythm: a combined PET/EEG study with lorazepam challenge in humans'', NeuroImage, 22(2004)485.

[128] ES. Kappenman, SJ. Luck, The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components. Online Publication, 2012.

[129] W. Singer, Distributed processing and temporal codes in neuronal networks, Cogn Neurodyn, 3(2009)189–96.

Volume 8 ▪ Issue 3 ▪ Fall 2020 ▪ No.31
Iranian Journal of Laboratory Knowledge

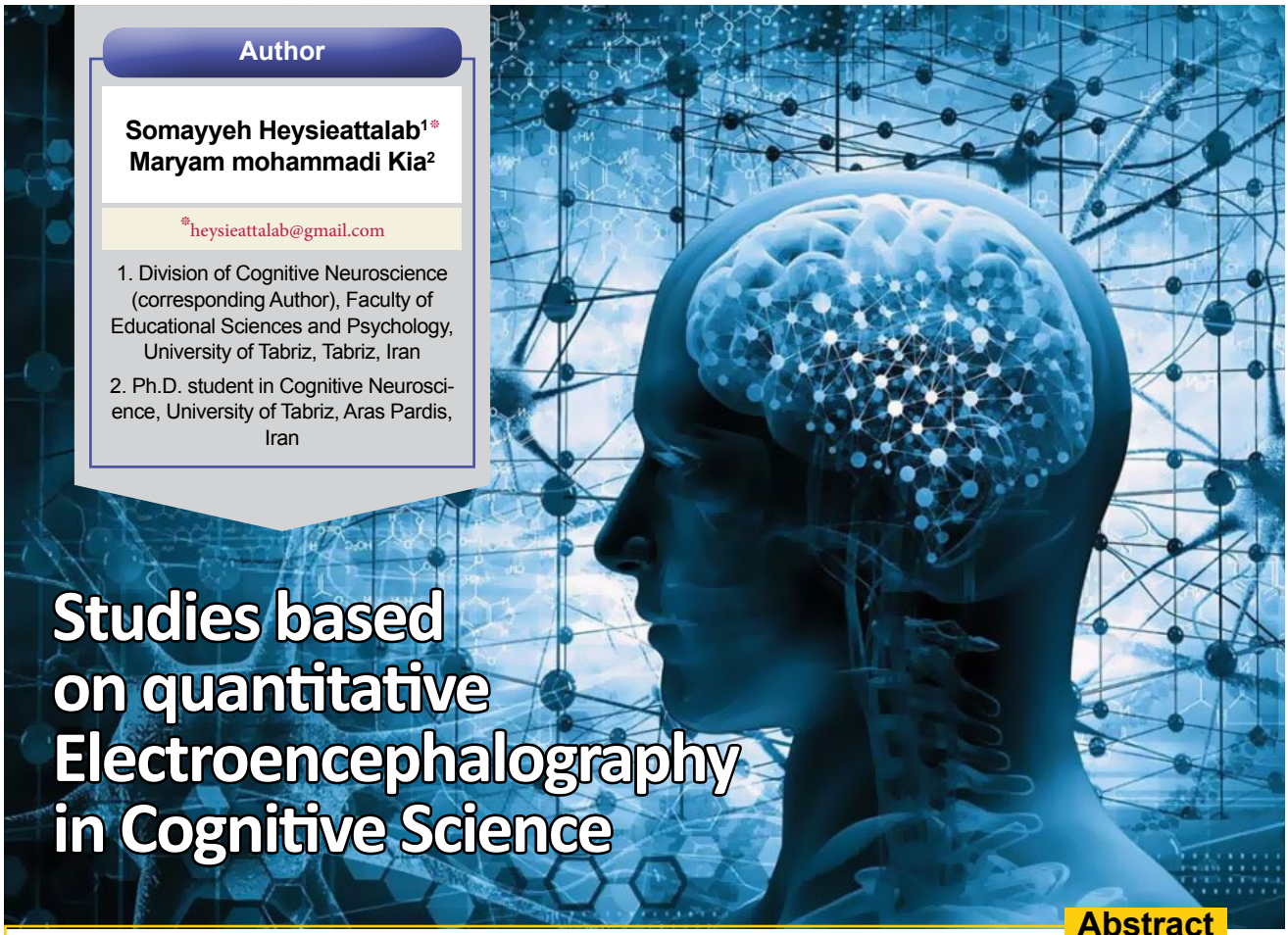
Author

Somayyeh Heysieattalab[1]*
Maryam mohammadi Kia[2]

*heysieattalab@gmail.com

1. Division of Cognitive Neuroscience (corresponding Author), Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2. Ph.D. student in Cognitive Neuroscience, University of Tabriz, Aras Pardis, Iran



Studies based on quantitative Electroencephalography in Cognitive Science

Abstract

Electroencephalography refers to the measurement of electrical changes in the brain that indicate spikes, transient currents, random events, and rhythms. Neurotherapy uses brain anatomy, psychological tests, behavioral measurements, and records the patterns of specific brain activities, with a focus on the rhythms and activities of delta, theta, alpha, beta, and gamma frequency bands as well as sensorimotor rhythms. The synchronous and asynchronous pattern of these frequency bands describes specific cognitive and behavioral states of an individual. Therefore, cortical involvement can be identified by measuring the combination of slow and fast rhythms in different parts of the head. Although EEG has a high temporal resolution, it cannot be used as a single imaging technique to study brain function due to the poor spatial resolution. In recent years, several non-invasive high-resolution spatial brain imaging techniques, including Positron Emission Tomography, Computed Tomography, and Functional Magnetic Resonance Imaging have developed to enhance understanding of the function of the human brain. Despite the desirable spatial resolution, these methods have an unfavorable temporal resolution. Therefore, to better understanding the brain function and studying deeper structures of the brain, EEG can be combined with any of these imaging methods. On the other hand, the analyzae of the frequency of EEG signals by identifying abnormalities in the neuronal function of the brain allows the integration with magnetic stimulation of the brain and neurofeedback for cognitive and behavioral enhancement. In this study, we introduce EEG and integrate it with non-invasive methods to identify the relationship between brain structures and abnormal patterns of neural activity, as well as improving the cognitive-behavioral function due to EEG neuroprocessing interventions.

Keywords

Cognitive Science; Electroencephalography EEG

Author

Azam Kavosi[1,3]*
Somaye Hanife Samani[2,4]

* Azamkavosi@yahoo.com

1. Master of Analytical Chemistry, Geological Survey& Mineral Exploration of Iran
2.Master of Inorganic Chemistry, Geological Survey& Mineral Exploration of Iran
3. Member of Laboratory Network Elemental Analysis experts working group.

Review on Liquid sample introduction in ICP_OES, MS by pneumatic nebulizers

Abstract

Liquid sample introduction is referred to as the Achilles' heel of atomic spectrometry in view of the achievable aerosol transport efficiency, matrix sensitivity of nebulizer, its ease-of-use and its applicable ranges of gas and liquid flow rates. It is accepted, that the technology used for liquid sample introduction is still far from ideal system. The miniaturization of systems utilized for sample introduction has become a major trend. The reason for this might be increasing need to cope with minute amount of sample to be analyzed and to establish the hyphenation of low flow separation techniques with analysis instruments. A large number of novel nebulizers was presented based on classical but further developed and improved approaches for minute amount liquid sample nebulization e.g. the micro-concentric and direct injection designs. Micro nebulizers produce fine aerosols at low sample uptake rates, but they are even more prone for blocking or clogging than conventional systems. Novel nebulizers based on different approaches and techniques were introduced to eliminate this problem. In this paper we will explore different types of pneumatic nebulizers.

Keywords

Sample introduction into ICP; Pneumatic nebulizer; Trace sample; Optical emission spectroscopy; Mass spectroscopy

Volume 8 ■ Issue 3 ■ Fall 2020 ■ No.31 Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Author

SANAZ SHOBIKEH [1,2*]

* researchers4u@yahoo.com

1. B.Sc. of Electronic Engineering, SHIRAZ University Transmission Electron Microscopy laboratory Specialist

2. Laboratory Network TEM Experts working group

Applications of In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy equipped with a gas-controlled environment in various fields

Keywords

In-situ ETEM, Sealed gas cell, Catalysis, Hydrogenation/Dehydrogenation, Interaction, Evaporation, Oxidation and Reduction.

Abstract

As mentioned in previous article published in Iranian Journal of Laboratory knowledge (No. 30-Summer 2020) With the title of 'An introduction to In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy equipped with a gas-controlled environment operational principals and structures' unlike Conventional Transmission Electron Microscope, samples inside in-situ Environmental Transmission Electron Microscopy (ETEM) equipped with controlled gas-environment can be exposed to different gaseous species, pressures and temperatures. Such approach provides researchers with unique opportunities to achieve new level of material analysis. This kind of microscopy is considered valuable equipment for understanding the behavior of different specimens in atomic scale. In-situ ETEM with gaseous environment makes it possible to acquire dynamic measurements of nanostructures during reaction processes and also to follow the structural and chemical changes under different atmosphere, pressure and temperature conditions. Extensively used gaseous species in various research and industrial fields have a significant effect on both the configuration of solid materials and the evolution of reactive systems. Various nanomaterial-based technologies, such as food production, efficient energy conversion, transportation, and environmental protection are dependent on In-situ ETEM for achieving accurate real world results. In order to gain new insights into the growth, properties, and functionality of nano-materials such as biological specimens, catalysts, and fuel cells, obtaining practical information from gas–solid interactions accrued from In-situ ETEM is essential. Thereby in this article some of the more important applications of the ETEM when using a gaseous environment will be reviewed.

Authors

Mohsen Aqababaei[1*]
Behzad Neteqpour[2]

*behzad.nateghpour@gmail.com

1. Senior rock mechanics expert at Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co., Geotechnics and Strength of Materials Division

2. Senior rock mechanics expert at Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co., Geotechnics and Strength of Materials Division

Large scale laboratory direct shear test of rock

Abstract

Discontinuities usually rule the mechanical behavior of a rock mass. The free surface of geotechnical structures such as dam foundations, powerhouses, slopes, and tunnel walls, are also significantly affected by discontinuities. Besides, when the intact material is relatively strong, the effect of discontinuities and their properties would even increase. The direct shear test is a well-known test for determining the shear strength of saw-cut surfaces and natural joints of rocks, which provide the most valuable results for engineering design parameters. The shear strength of concrete layers in Rolling Compacted Concrete dams (RCC dams) is also considered a crucial engineering design parameter. This parameter is additionally determined by direct shear testing on the cored samples of a dam body. The in-situ direct shear test is the most precise direct shear test, among other direct shear test types. However, due to the enormous costs and difficult executive operations of the in-situ direct shear test at sites, the direct shear test would be conducted in the laboratory most of the time. The laboratory direct shear test could be conducted at small and large scales. In case that the subjected project has great importance, by using the large scale laboratory direct shear test, more precise results would be acquired. For this purpose, the Azmouneh Foulad Consultant Engineers Co. has designed and manufactured a large scale direct shear box that can be used for more accurate simulation of the in-situ direct shear test. This shear box, which is unique in its category, is capable of 35×35 cm samples testing.

Keywords

Direct shear of rock, Large scale laboratory direct shear box, RCC shear test, Shotcrete shear test

Volume 8 ■ Issue 3 ■ Fall 2020 ■ No.31 Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Author

Reza Bagheri[1*]
Morteza Asadollah Zadeh Tansoan[2]

*re.ba14220@gmail.com

1. Master of Materials Engineering, Aluminum Laboratory Expert, Iran Alumina Company

Introduce Optical emission spectroscopy methode focuses on Quantometer device

Abstract

Optical emission spectroscopy is one of the old methods of studying materials that is used for quantitative and qualitative analysis of metals, alloys, rocks, minerals, etc. In this method, the detection limit in picograms is achievable for many elements. The basis of the operation of this method is based on electron excitation, change in electron energy level and emission of photoelectrons. The amount of energy of the emitted photoelectrons is the identity of the material. The quantometer is one of the devices that uses this technology. This device includes the excitation source, the photoelectron separator section and the detector section. The separator uses grating technology and the detector uses photo multiplier tube technology.

Keywords

Optical emission spectroscopy, quantometer, grating, photo multiplier tube

Author

Masoud Kazerani nejad[1,4]*
Mohammad Homayouni[2,4]
Somayeh Mirjalili[3,4]

* m_kazeraninejad@yahoo.com

1.Ph.D in Analytical Chemistry. Absar kavir Industrial Production and Research Company

2.Master of Industrial management. Ministry of Industry, Mining and Trade, Organization for Development and Renovation of Mines and Mining Industries of the country

3.Bachelor of Industrial Engineering. Absar kavir Industrial Production and Research Company

4. Laboratory Network Elemental Analysis Expert Workgroup

5. Laboratory Network Standard and Calibration Expert Workgroup

The position and importance of inter laboratory comparisons in laboratory activities

Abstract

A regular independent assessment of the technical performance of a laboratory is necessary to assure the validity of measurements or tests. A common approach to this independent assessment is the use of independent Proficiency Testing (PT) schemes that this test great help to the participants to assess the accuracy of its measurements. Therefore, the establishment of national and international ISO/IEC17025 standards is one of the most important goals of calibration laboratories, that all of its legal requirements are based on statistical analysis and it involves recognizing laboratories of the knowledge of test methods and recognizing the behavior of measuring devices which is measured by various tests and ultimately expressed the satisfactory collection. Although, satisfactory performance and vice versa does not necessarily mean the competence or incompetence of a laboratory complex, However, these results can be used to improve the quality of performance.

Keywords

ISO/IEC 17025, Quality Control, Proficiency-Testing, Laboratory performance.

Contents

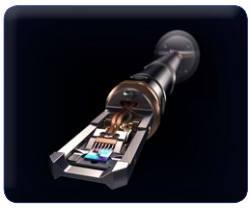
Articles

Studies based on quantitative Electroencephalography in Cognitive Science

›65

Review on Liquid sample introduction in ICP_OES, MS by pneumatic nebulizers

›66



Applications of In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy equipped with a gas-controlled environ-ment in various fields

›67

Large scale laboratory direct shear test of rock

›68

Introduce Optical emission spectroscopy methode fo-cuses on Quantometer device

›69

The position and importance of inter laboratory comparisons in laboratory activities

›70

Iranian Journal of
Laboratory Knowledge

Volume 8 ▪ Issue 3 ▪ Fall 2020 ▪ No.31

ISSN 2538-3450

Concessionaire: Iran Nanotechnology Laboratory Network

Managing Editor: Reza Asadifard

Editor in Chief: Mojtaba Nasab

Executive Management: Iran Nanotechnology Laboratory Network (INLN)

Article Editor: Davoud Gharailou

Authors:
Somayyeh Heysieattalab, Maryam mohammadi Kia, Azam Kavosi, Somaye Hanife Samani, Sanaz Shobikeh, Mohsen Aqababaei Behzad Nateqpour, Reza Bagheri Morteza Asadollah Zadeh Tansoan Masoud Kazerani nejad, Mohammad Homayouni Somayeh Mirjalili

Designer : Simin Rafipour Langroudi

Editor: Zeinab Zarincheh

Iran, Tehran, Po.Box: 14565-344

www.IJLK.ir

Email : info@ijlk.ir

Iran Nanotechnology Laboratory Network

Iran Nanotechnology Laboratory Network

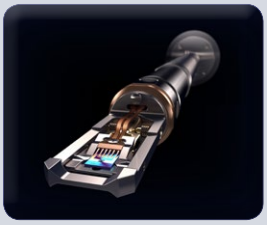
Iranian Journal of Laboratory Knowledge

ISSN 2538-3450

Volume 8 ▪ Issue 3 ▪ Fall 2020 ▪ No.31

Large scale laboratory direct shear test of rock

Introduce Optical emission spectroscopy methode focuses on Quantometer device



Applications of In-situ Environmental Transmission Electron Microscopy equipped with a gas-controlled environment in various fields

Review on Liquid sample introduction in ICP_OES, MS by pneumatic nebulizers

The position and importance of inter laboratory comparisons in laboratory activities

www.IJLK.ir
info@ijlk.ir