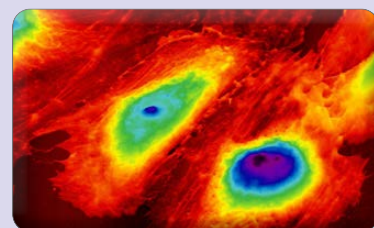


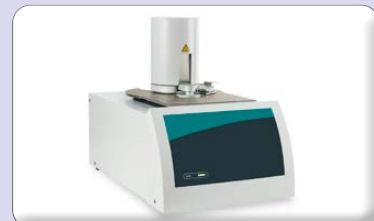
دانش آزمایشگاهی ایران

سال سیزدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۴ ■ شماره پیاپی ۴۹

ISSN 2538-3450



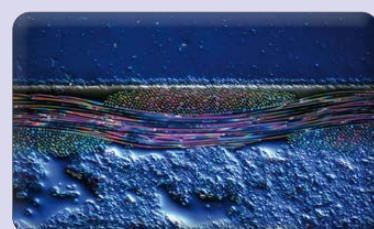
کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در تحقیقات زیستی؛ با مروری بر کاربرد آن در دندانپزشکی محافظه کارانه و اندودنتیکس



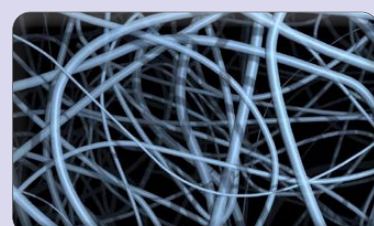
گرماسنجی روبشی تفاضلی - تجزیه گرمایی روش‌هایی برای تشخیص‌یابی بسیار



چگونه انتخاب گرید، کیفیت تصاویر TEM را تعیین می‌کند؟



روش‌های استفاده از رنگ و معرف‌های رنگی در آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی



تهیه ابرجاذب پلیمری پلی‌اکریلیک اسید/ پلی‌وینیل الکل به روش الکتروریسی بدون نازل و بررسی عوامل موثر دستگاهی بر مورفولوژی آن

کاربردهای میکروسکوپ
الکترونی عبوری به همراه
هوش مصنوعی در حوزه‌های
علمی و صنعتی مختلف

اعتبار ویژه حمایتی شبکه آزمایشگاهی برای شرکت‌های دانش‌بنیان نوپا

پیگیری توسعه شبکه‌سازی آزمایشگاه‌ها در برنامه‌های جمعی

نویسنده

ساناز شبیکه^{۱،۲*}

۱. کارشناس آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی
عبوری دانشگاه شیراز

۲. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی
عبوری

*researchers4u@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

کاربردهای میکروسکوپ الکترونی عبوری به همراه هوش مصنوعی در حوزه‌های علمی و صنعتی مختلف

واژه‌های کلیدی

هوش مصنوعی، میکروسکوپ الکترونی
عبوری، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق.

چکیده

روش‌های هوش مصنوعی^۱، به ویژه یادگیری ماشین^۲ و یادگیری عمیق^۳، به دلیل توانایی در پردازش داده‌های بزرگ، شناسایی الگوهای پیچیده و خودکارسازی کارهایی که به‌طور سنتی نیاز به تخصص انسانی دارند، در بسیاری از حوزه‌های علمی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این روش‌ها تنها محدود به شناسایی تصاویر نمی‌شوند، بلکه به مدل‌سازی پیش‌بینی، دسته‌بندی داده‌ها و حتی بهینه‌سازی فرآیندهای تجربی نیز گسترش یافته‌اند. ارتباط هوش مصنوعی با تحقیقات علمی به سرعت در حال گسترش است؛ زیرا این روش‌ها، روش‌های سنتی را تکمیل می‌کنند و راه‌حل‌های سریع‌تر، دقیق‌تر و مقیاس‌پذیرتری ارائه می‌دهند. در این زمینه، تأثیر هوش مصنوعی بر تحقیقات علمی در حوزه‌های مختلفی از جمله فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی و علوم محیط‌زیست گسترش یافته است. یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در این حوزه‌ها مرزهای جدیدی را در حل مشکلات و کشف‌های علمی گشوده است. یکی از امیدوارکننده‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه‌های ذکر شده، ترکیب شدن آن با فناوری‌های تصویربرداری پیشرفته مانند میکروسکوپ الکترونی عبوری^۴ است. میکروسکوپ الکترونی عبوری ابزاری ضروری برای صنایعی است که در زمینه‌های علم مواد، فناوری نانو، تولید نیمه‌هادی‌ها و کاربردهای زیست‌پزشکی فعالیت می‌کنند. با این حال، پیچیدگی و حجم داده‌های تولید شده با دستگاه‌های TEM چالش‌های زیادی را در پردازش داده‌ها، تفسیر تصاویر و تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند. روش‌های هوش مصنوعی مذکور به همراه بینایی کامپیوتری، به‌طور فزاینده‌ای برای غلبه بر این چالش‌ها به کار گرفته می‌شوند و به این ترتیب اثربخشی TEM در تحقیق و توسعه صنعتی را افزایش می‌دهند. در این مقاله، به برخی از حوزه‌های تحقیقاتی علمی و صنعتی که هوش مصنوعی در آنها تأثیرگذار است پرداخته و چگونگی ارتباط این کاربردها با TEM را بررسی خواهیم کرد.

هم‌افزایی هوش مصنوعی و میکروسکوپی الکترونی عبوری در حوزه‌های تحقیقاتی و صنعت مدرن از جایگاه قابل توجهی برخوردار است. ظهور هوش مصنوعی (AI) تاثیر عمیقی بر بسیاری از رشته‌های علمی داشته است و روش‌های جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها را متحول کرده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در کنار میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) که یک روش تصویربرداری قدرتمند است و برای مشاهده مواد در مقیاس اتمی و زیراتمی استفاده شده، نمایان می‌شود. دستگاه TEM وضوح بی‌نظیری را فراهم می‌کند و ساختارهای پیچیده مواد و نمونه‌های زیستی را آشکار می‌سازد، اما مقادیر زیادی از داده‌های پیچیده‌ای را تولید می‌کند که تجزیه و تحلیل دستی آن‌ها به‌طور معمول زمان‌بر است. ادغام هوش مصنوعی با TEM این چالش را حل کرده و مزایای تحول‌آفرینی در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی ارائه می‌دهد. در علم مواد، تجزیه و تحلیل تصاویر TEM با کمک هوش مصنوعی به محققان این امکان را می‌دهد تا نانوساختارها و نقص‌ها در مواد را با سرعت و دقت بی‌سابقه شناسایی کنند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند به‌طور خودکار ویژگی‌هایی مانند مرزهای دانه، جابجایی‌ها و نقص‌های بلوری را شناسایی و طبقه‌بندی کنند. عواملی که تاثیر زیادی بر عملکرد مواد در کاربردهای مختلف دارند. این موضوع برای صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی و الکترونیک اهمیت زیادی دارد، جایی که توسعه مواد مقاوم‌تر و بادوام‌تر از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین هوش مصنوعی کارایی TEM در تحقیقات زیستی را افزایش می‌دهد و تجزیه و تحلیل آنی ساختارهای سلولی، پروتئین‌ها و ویروس‌ها را در مقیاس اتمی ممکن می‌سازد. با خودکارسازی تفسیر پیچیده تصاویر، هوش مصنوعی به کشف سازوکارهای بیماری، تعاملات دارویی و پویایی‌های مولکولی کمک می‌کند و سرعت تحقیقات پزشکی و بیومدیکال را افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، هوش مصنوعی می‌تواند به ترسیم ساختار پروتئین‌ها در طراحی دارو کمک کند و به‌طور بالقوه روند توسعه درمان‌های جدید را تسریع بخشد. در زمینه فناوری‌نانو، توانایی هوش مصنوعی در تجزیه و تحلیل داده‌های TEM افق‌های جدیدی را برای طراحی و سنتز نانومواد پیشرفته با ویژگی‌های سفارشی باز کرده است. چه در باتری‌های ذخیره‌سازی انرژی، چه در نیمه‌هادی‌ها یا مواد حسگر محیطی، ترکیب هوش مصنوعی و TEM این امکان را فراهم می‌کند که ویژگی‌های مقیاس نانو که بر خواص مواد تاثیر می‌گذارند، به سرعت شناسایی شوند و کشف فناوری‌های نسل بعدی تسریع یابد. علاوه‌بر این، توانایی هوش مصنوعی در بهبود کیفیت تصاویر TEM از طریق روش‌هایی مانند حذف نویز و تصویربرداری فوق قدرت تفکیک تأثیرات قابل توجهی بر کنترل کیفیت در تولید دارد. به‌ویژه در تولید نیمه‌هادی‌ها، TEM تقویت‌شده با هوش مصنوعی امکان بازرسی دقیق‌تر از میکروچیپ‌ها و بردهای مدار را فراهم می‌کند و از این طریق عملکرد بهتر و بازدهی بالاتری در دستگاه‌های الکترونیکی تضمین می‌شود. از سرعت بخشیدن به تجزیه و تحلیل داده‌ها گرفته تا امکان دستیابی به درک عمیق‌تر از سیستم‌های پیچیده مواد و زیست‌شناسی، ترکیب هوش مصنوعی و TEM در حال شکل‌دهی به آینده تحقیق و صنعت است. با خودکارسازی وظایف وقت‌گیر، بهبود وضوح و کشف الگوهای پنهان در داده‌ها، هوش مصنوعی به محققان این امکان را می‌دهد که به کشفیات مهم‌تری دست یابند و این کار را به‌گونه‌ای کارآمدتر و با اعتماد به نفس بیشتری انجام دهند.

کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری به همراه هوش مصنوعی در حوزه علم مواد و فناوری نانو

بکارگیری میکروسکوپ الکترونی عبوری و هوش مصنوعی با یکدیگر در این حوزه عبارتند از:

■ کشف و طراحی مواد

الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی ویژگی‌های مواد نوآورانه با تجزیه و تحلیل داده‌های موجود از ترکیب مواد و ویژگی‌های مرتبط با آنها کمک می‌کنند. مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند رفتار مواد را در مقیاس اتمی شبیه‌سازی کنند که این امر به‌طور مستقیم به TEM مرتبط است، زیرا در TEM

در علم مواد، روش‌های هوش مصنوعی، به ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی ویژگی‌های مواد، طراحی مواد جدید و بهینه‌سازی فرآیندهای تجربی استفاده می‌شود. از آنجا که رفتار مواد به‌طور ذاتی پیچیده است و به‌طور معمول، مدل‌سازی تحلیلی آن دشوار است، مدل‌های هوش مصنوعی برای شناسایی الگوها در داده‌های بزرگ و پیش‌بینی رفتار مواد در شرایط مختلف استفاده می‌شوند. برخی از مزایای

فراهم می‌کند.

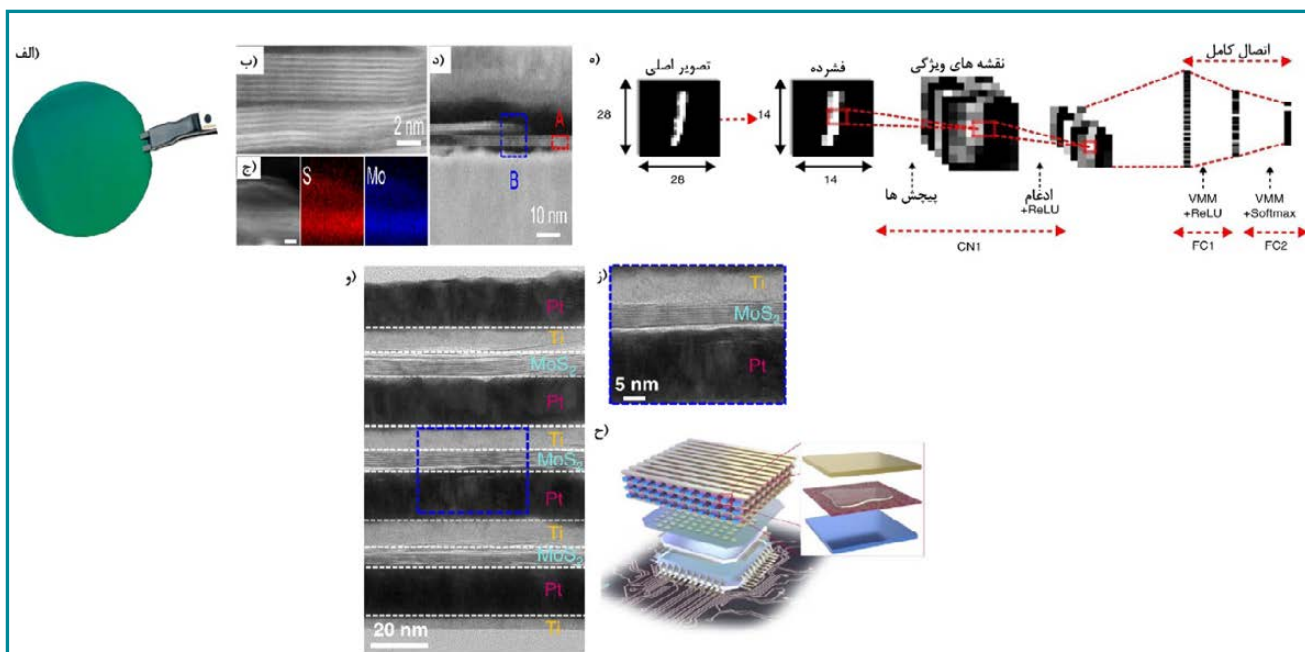
به‌منظور درک بهتر خواننده محترم برخی از مطالعات موردی انجام پذیرفته در این حوزه در قسمت ذیل ارائه شده‌است:

یکی از مسائل مهم در این حوزه، شناسایی و طبقه‌بندی نقص‌ها در مواد دوبعدی مانند گرافن برای کاربردهای حیاتی است، اما این امر با تجزیه و تحلیل TEM سنتی می‌تواند زمان‌بر و از لحاظ ذهنی دشوار باشد. به همین دلیل محققان با بکارگیری هوش مصنوعی و مدل‌های یادگیری عمیق برای تجزیه و تحلیل خودکار تصاویر TEM و شناسایی انواع مختلف نقص‌ها (جای خالی، نابجایی و غیره) با دقت و سرعت بالا استفاده می‌کنند. این امر به درک تأثیر نقص‌ها بر خواص مواد و بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت کمک می‌کند. مطالعه موردی منتشر شده در مجله ارتباطات طبیعت^۵، از یک شبکه عصبی پیچشی^۶ برای تجزیه و تحلیل تصاویر TEM از دی‌سولفید مولیبدن^۷ تک لایه استفاده کرده و به دقت بالایی در شناسایی و طبقه‌بندی انواع مختلف نقص‌ها دست یافته است (شکل (۱)).

به‌طور معمول ساختار و ویژگی‌های اتمی در اولویت قرار دارند. به‌عنوان مثال، هوش مصنوعی برای پیش‌بینی چگونگی تعامل عناصر مختلف در مقیاس اتمی به‌منظور ایجاد مواد با ویژگی‌هایی خاص مانند استحکام، رسانایی یا انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود. این اطلاعات می‌تواند به محققان کمک کند تا مواد مناسب برای تحقیقات بیشتر با استفاده از TEM را انتخاب کنند.

■ مدل‌سازی پیش‌بینی نانو ساختارها

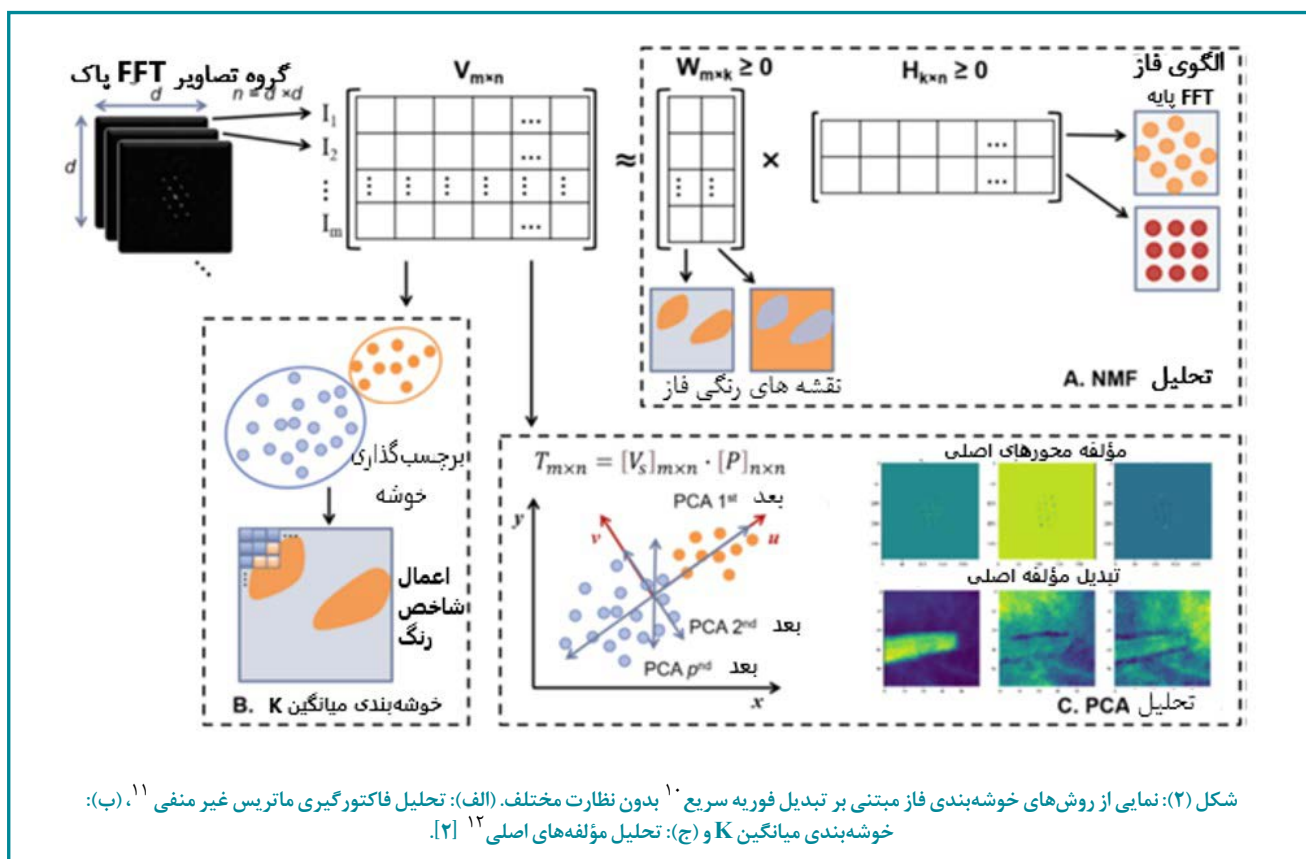
مدل‌های یادگیری عمیق به‌طور فزاینده‌ای برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی ویژگی‌های نانو ساختارها مانند نانوذرات، نانوسیم‌ها و نانوکامپوزیت‌ها قبل از انجام آزمایش‌های فیزیکی استفاده می‌شوند. این پیش‌بینی‌ها می‌توانند به‌طور قابل توجهی زمان و هزینه مربوط به فرآیند کشف مواد را کاهش دهند. پس از شناسایی یک نانوماده امیدوارکننده، TEM می‌تواند برای تأیید ساختار اتمی، اندازه، شکل و توزیع آن استفاده شود که یک حلقه بازخورد قوی بین پیش‌بینی‌های هوش مصنوعی و تأیید تجربی



شکل (۱): (الف): تصویر نوری از لایه نازک مقاومت حافظه‌دار از جنس مولیبدن دی‌سولفید (MoS₂) در مقیاس و بزرگ. (ب): تصویر سطح مقطعی میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی میدان تاریک حلقوی با زاویه بالا^۸ از نانوصفحات MoS₂. (ج): نگاشت عنصری از لایه MoS₂ مورد نظر. (د): تصویر سطح مقطعی HAADF-STEM از ناحیه پیوند لایه نازک MoS₂. (ه): شبکه عصبی پیچشی عمیق سه لایه‌ای. (و): تصاویر سطح مقطعی TEM از پشته کامل مقاومت حافظه‌دار (مستطیل نقطه‌چین آبی رنگ نشان‌دهنده وجود نقص است). (ز): تصویر سطح مقطعی TEM از لایه میانی مقاومت حافظه‌دار پشته‌ای. (ح): نمایی از دیگرام آرایه سه‌بعدی مقاومت حافظه‌دار پشته‌ای به همراه اتصالات داخلی فلزی و مدارات منطقی [۱].

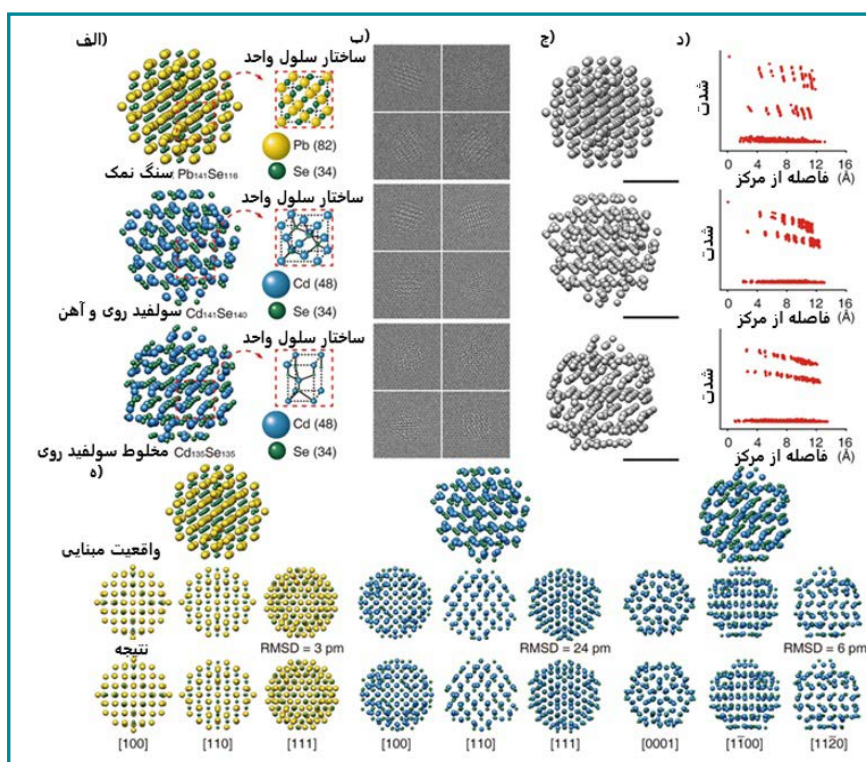
خودکار فازهای مختلف در مواد پیچیده استفاده می‌شوند. به همین منظور، محققان از یادگیری ماشین برای تجزیه و تحلیل الگوهای پراش الکترون به‌دست آمده از TEM برای شناسایی و نقشه‌برداری فازهای مختلف در آلیاژهای فلزی استفاده کرده‌اند که به بهینه‌سازی خواص مکانیکی آنها کمک می‌کند. نمونه‌ای از شناسایی و نقشه‌برداری فاز ماده در شکل (۲) ارائه شده است.

یکی از مسائل مهم دیگر، شناسایی و نقشه‌برداری فاز ماده است. تعیین فازهای مختلف موجود در یک ماده و توزیع فضایی آنها برای درک رفتار آن ضروری است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین، برای تجزیه و تحلیل داده‌های TEM به‌عنوان مثال، الگوهای پراش الکترون، نقشه‌های طیف‌سنجی انرژی پراکنده-اشعه ایکس^۹ برای شناسایی و نقشه‌برداری



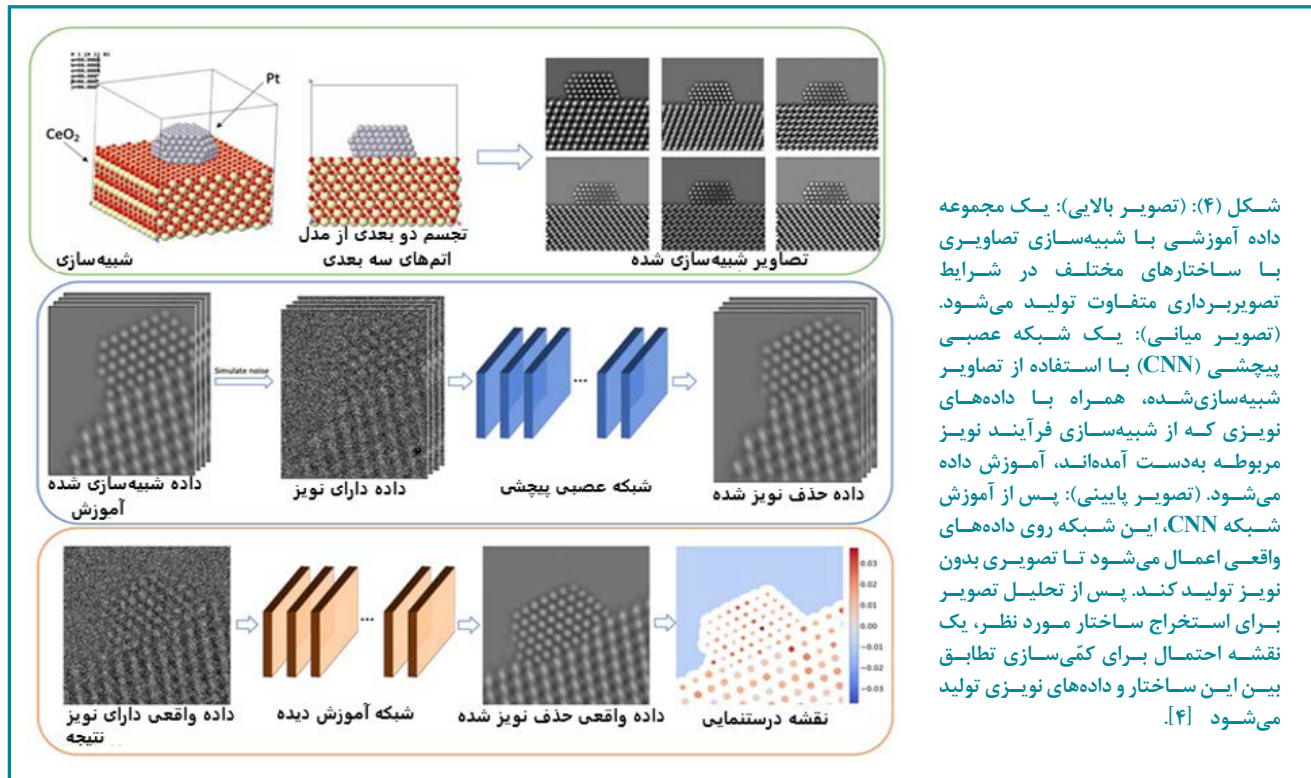
منظور دانشمندان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بازسازی ساختار سه‌بعدی نانوذرات از مجموعه‌ای از تصاویر TEM استفاده کرده‌اند که بینش‌هایی در مورد شکل، اندازه و ساختار داخلی آنها ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، در شکل (۳) نمونه‌ای از بازسازی سه‌بعدی ساختار اتمی برخی از نانومواد با استفاده از تصاویر TEM و هوش مصنوعی نمایش داده شده‌است.

یکی از مسائل مهم دیگر در این حوزه، بازسازی سه‌بعدی ساختار اتمی نانومواد از تصاویر TEM است. این امر به دلیل محدودیت تصویربرداری TEM می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. برای حل این مسئله می‌توان از روش‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری ماشین و سنجش فشرده برای بازسازی ساختارهای اتمی سه‌بعدی از مجموعه‌ای از تصاویر TEM دوبعدی (توموگرافی الکترون) استفاده کرد. به همین



مدل‌های یادگیری عمیق برای حذف مؤثر نویز از تصاویر TEM نمونه‌های زیستی استفاده شده‌اند و جزئیات ظریف‌تر را آشکار کرده و نسبت سیگنال به نویز را بهبود بخشیده‌اند. در شکل (۴)، یکی از روش‌های شده شده با عنوان شبکه عصبی پیچشی برای حذف نویز از تصویر TEM گرفته شده از اکسید سریم^{۱۷} و پلاتینیوم^{۱۸} استفاده شده‌است.

یکی از مسائل مهم دیگر، وجود نویز در تصاویر TEM است. تصاویر TEM به دلایل مختلف می‌توانند نویز داشته باشند که می‌تواند مانع از تجزیه و تحلیل دقیق شود. روش‌های حذف نویز مبتنی بر هوش مصنوعی برای حذف نویز از تصاویر TEM ضمن حفظ ویژگی‌های مهم استفاده می‌شوند و کیفیت تصاویر را برای تجزیه و تحلیل بیشتر بهبود می‌بخشند.



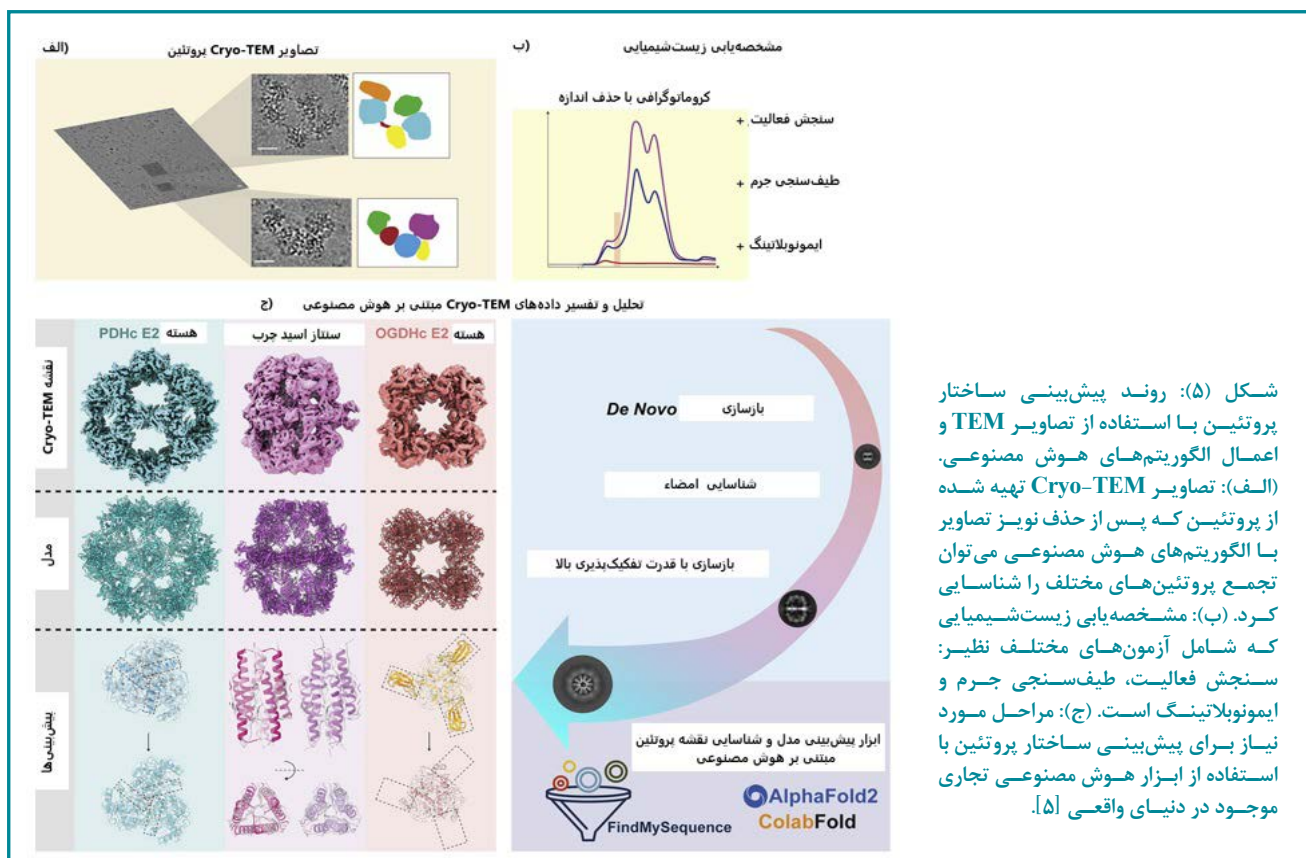
در حالی که پیش‌بینی‌های هوش مصنوعی به‌طور مستقیم با TEM ارتباط ندارند، مدل‌های ساختاری تولید شده توسط هوش مصنوعی می‌توانند راهنمایی برای آزمایش‌های TEM باشند. محققان می‌توانند از این پیش‌بینی‌ها برای انتخاب پروتئین‌ها یا ساختارهای زیستی به‌منظور تصویربرداری با TEM استفاده کنند و به این ترتیب مطالعات هدفمندتر و کارآمدتری انجام دهند. در زیست‌شناسی ساختاری، میکروسکوپ الکترونی عبوری کرایو (Cryo-TEM) به روشی غالب برای تعیین ساختارهای پیچیده ماکرومولکولی و پروتئین‌ها تبدیل شده‌است. روش‌های هوش مصنوعی، به ویژه شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، برای بهبود داده‌های میکروسکوپ الکترونی برودتی^{۲۳} از طریق افزایش وضوح تصاویر و اصلاح اعوجاج‌ها استفاده می‌شوند. در حالی که cryo-TEM به تجزیه و تحلیل ماکرومولکول‌های زیستی متمرکز است، هوش مصنوعی نقش مهمی در بهبود کیفیت تصویر، کاهش نویز و بهبود وضوح ایفا می‌کند. بینش‌های به‌دست آمده از پردازش مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند برای تفسیر دقیق‌تر داده‌های پیچیده زیستی استفاده شود و خطای انسانی را کاهش دهد و قابلیت تکرارپذیری را بهبود بخشد. در شکل (۵) نمونه‌ای از روند پیش‌بینی ساختار پروتئین با استفاده از تصاویر Cryo-TEM و اعمال الگوریتم‌های هوش مصنوعی نمایش داده شده‌است.

کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری به همراه هوش مصنوعی در حوزه زیست‌شناسی و بیوانفورماتیک

نقش هوش مصنوعی در زیست‌شناسی ساختاری و بیوانفورماتیک^{۱۹} در حال تحول است، زیرا محققان به دنبال درک سیستم‌های زیستی پیچیده در سطح مولکولی هستند. روش‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی و شبکه‌های عصبی برای حل ساختارهای پروتئینی، پیش‌بینی عملکرد پروتئین‌های ناشناخته و تجزیه و تحلیل داده‌های ژنومی در مقیاس بزرگ به کار می‌روند. برخی از مزایای بکارگیری میکروسکوپ الکترونی عبوری و هوش مصنوعی با یکدیگر در این حوزه عبارتند از:

پیش‌بینی ساختار پروتئین و تحلیل داده‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری کرایو^{۲۰}

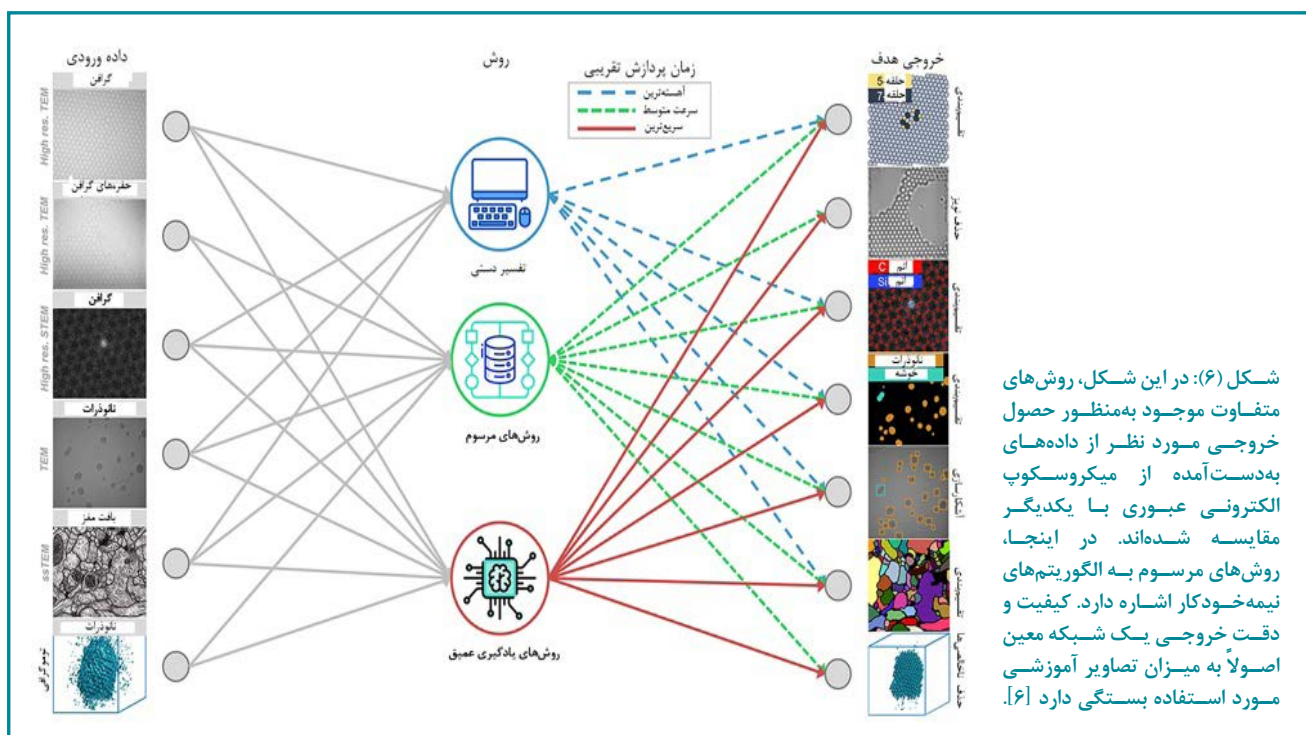
الگوریتم‌های هوش مصنوعی فرآیند پیش‌بینی ساختار پروتئین‌ها از دنباله‌های آمینو اسیدی را به‌طور انقلابی متحول کرده‌اند. نمونه معروف این الگوریتم‌ها آلفافولد^{۲۱} است که توسط شرکت دیپ‌ماینده^{۲۲} توسعه یافته و در پیش‌بینی ساختار سه‌بعدی پروتئین‌ها دقت بی‌سابقه‌ای را به‌دست آورده است.



■ تحلیل خودکار تصاویر

حجم بالای داده‌های تولید شده توسط میکروسکوپ‌های الکترونی شامل TEM و cryo-EM نیاز به تجزیه و تحلیل گسترده‌ای دارد که می‌تواند با کمک هوش مصنوعی به‌طور چشمگیری تسریع شود. الگوریتم‌های شناسایی تصویر، از جمله مدل‌های یادگیری عمیق، می‌توانند ساختارهای زیستی را از تصاویر TEM طبقه‌بندی و تقسیم‌بندی کنند و ارگانل‌ها،

پروتئین‌ها یا اجزای سلولی را با دقت بالا شناسایی کنند. این خودکارسازی نه تنها در زمان صرفه‌جویی می‌کند بلکه دقت و ثبات نتایج را افزایش می‌دهد که در مطالعات با بازده بالا اهمیت زیادی دارد. به‌منظور درک بهتر این موضوع در شکل (۶)، روش‌های موجود استخراج خروجی مورد نظر از داده‌های به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



■ شناسایی خودکار مورفولوژی نانوذرات (به‌خصوص پلاتین) برای طراحی کاتالیزور

عبوری همچنین در علوم محیط‌زیست تأثیرات قابل توجهی دارند، جایی که برای مدل‌سازی تغییرات اقلیمی، نظارت بر اکوسیستم‌ها و بهینه‌سازی مدیریت منابع استفاده می‌شوند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ از تصاویر ماهواره‌ای، شبکه‌های حسگر و مدل‌های اقلیمی به کار می‌روند تا به دانشمندان در پیش‌بینی روندهای محیط‌زیستی کمک کنند. برخی از کاربردهای بکارگیری هوش مصنوعی به همراه میکروسکوپ الکترونی عبوری در این حوزه عبارتند از:

■ مدل‌سازی و پیش‌بینی اقلیمی

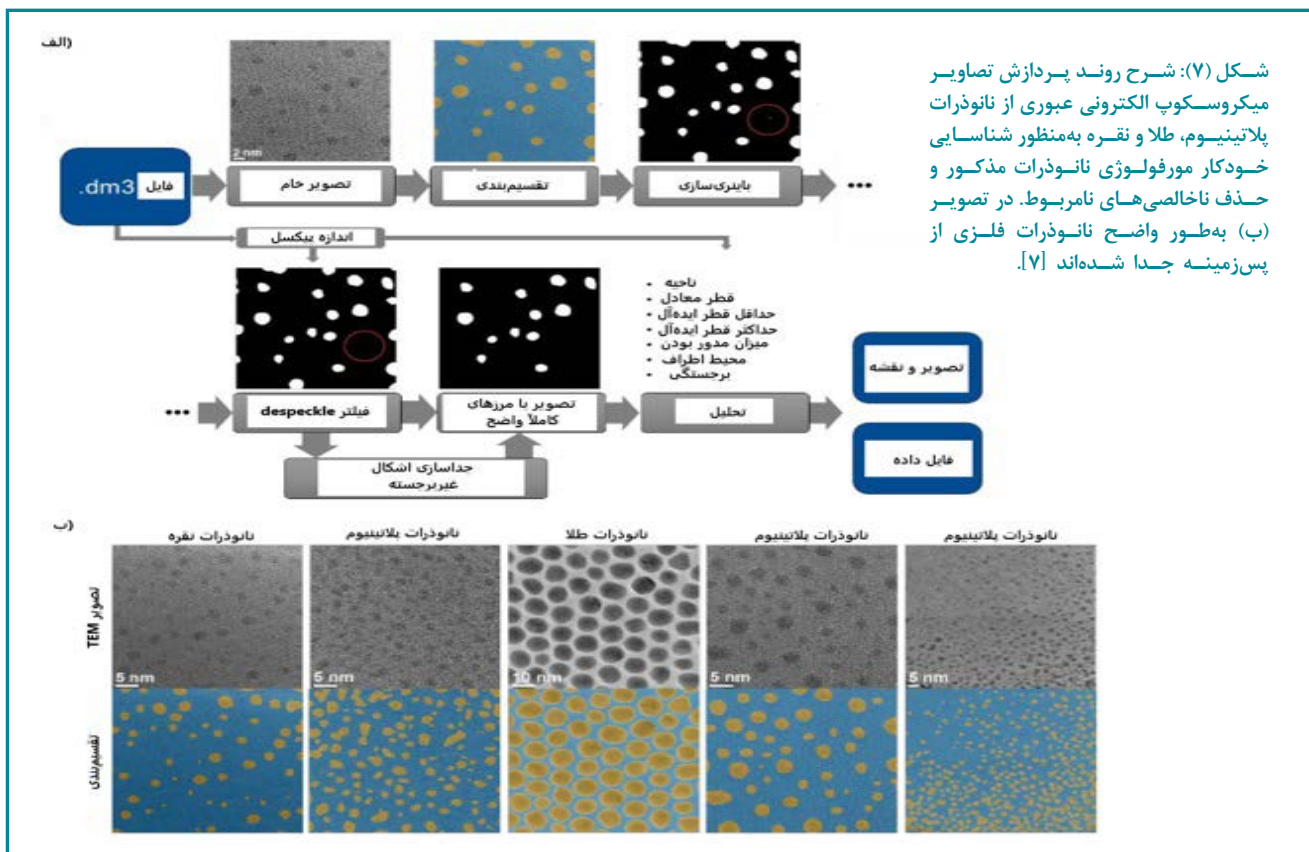
در علم اقلیم‌شناسی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تغییرات بلندمدت محیطی براساس داده‌های اقلیمی تاریخی به کار می‌روند. این مدل‌ها به محققان کمک می‌کنند تا از چگونگی تغییر متغیرهایی مانند دما، سطح دی‌اکسید کربن و جریان‌های اقیانوسی که ممکن است در طول زمان اتفاق افتاده باشد، درک بهتری داشته باشند. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند برای طراحی مواد با کارایی انرژی بیشتر یا بهینه‌سازی راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی استفاده شوند، جایی که تصویربرداری TEM نقش کلیدی در تأیید ساختار و ویژگی‌های مواد جدید برای کاهش تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. در این حوزه برای حصول نتایجی مطلوب‌تر از بکارگیری هوش مصنوعی درون TEM می‌توان روی موارد ذیل تمرکز کرد:

♦ شناسایی و طبقه‌بندی تصاویر: مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند انواع مختلف ذرات و مواد را در تصاویر TEM شناسایی کرده و کارایی تحلیل داده‌ها را افزایش دهند.

نانوذرات پلاتین کاتالیزورهای مهمی در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی است. فعالیت کاتالیزوری آنها به شدت تحت تأثیر ساختار شکلی (مورفولوژی) آنها قرار دارد. تجزیه و تحلیل دستی تصاویر TEM برای تعیین مورفولوژی نانوذرات، زمان‌بر و از لحاظ ذهنی دشوار است. محققان یک شبکه عصبی پیچشی (CNN) را روی مجموعه بزرگی از داده‌های تصاویر TEM مربوط به نانوذرات پلاتین با مورفولوژی‌های مختلف (به‌عنوان مثال، مکعبی، هشت وجهی، بیست وجهی) آموزش دادند. این CNN آموزش دیده قادر است به‌طور خودکار مورفولوژی نانوذرات پلاتین جدید را از تصاویر TEM آنها با دقت بالا طبقه‌بندی کند. این امر، امکان غربالگری سریع روش‌های سنتز مختلف را به‌منظور بهینه‌سازی تولید کاتالیزور برای اشکال دلخواه و در نتیجه، فعالیت، فراهم می‌کند. این رویکرد خودکار به‌طور قابل توجهی فرآیند شناسایی را تسریع می‌کند و محققان را قادر می‌سازد تا به سرعت، شرایط سنتزی که نانوذرات پلاتین با مطلوب‌ترین خواص کاتالیزوری تولید کرده را شناسایی کنند. این امر، توسعه کاتالیزورهای کارآمدتر را سرعت می‌دهد. در شکل (۷)، رویه شناسایی خودکار مورفولوژی نانوذرات پلاتینیوم، طلا و نقره درون تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری با استفاده از هوش مصنوعی نمایش داده شده‌است.

■ کاربرد هوش مصنوعی در علوم محیط‌زیست و تحقیقات اقلیمی

روش‌های هوش مصنوعی به همراه میکروسکوپ الکترونی



کاربرد هوش مصنوعی در فیزیک و فیزیک ذرات

هوش مصنوعی به‌طور فزاینده‌ای در فیزیک، به ویژه در زمینه‌هایی مانند مکانیک کوانتومی، فیزیک ذرات و اخترفیزیک استفاده می‌شود. استفاده از یادگیری ماشین در این حوزه‌ها به‌طور معمول شامل پردازش داده‌های بزرگ، بهینه‌سازی تنظیمات آزمایشگاهی و شناسایی پدیده‌های نادر است که روش‌های سنتی قادر به شناسایی آنها نیستند.

پردازش داده‌ها در شتاب‌دهنده‌های ذرات

در فیزیک ذرات، آزمایش‌هایی مانند آنهایی که در LHC^{۲۴} (برخورد دهنده هادرونی بزرگ) انجام می‌شود، مقادیر عظیمی از داده‌ها را تولید می‌کنند. روش‌های هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری عمیق، برای پردازش و تجزیه و تحلیل این داده‌ها به‌منظور شناسایی الگوها، ناهنجاری‌ها و کشفیات احتمالی به کار می‌روند. این تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به فیزیک‌دانان کمک می‌کند تا به نتایج امیدوارکننده‌تر توجه کنند و طراحی مواد جدید برای آزمایش‌های انرژی بالا را هدایت کنند. TEM می‌تواند برای تحلیل مواد مورد استفاده در آشکارسازهای ذرات و اطمینان از یکپارچگی ساختاری و عملکرد آنها در شرایط بحرانی و شدید استفاده شود.

کشف مواد کوانتومی

مواد کوانتومی دربرگیرنده ویژگی‌های منحصر به فرد ناشی از اثرات مکانیک کوانتومی یک محور مهم تحقیقاتی در فیزیک معاصر محسوب می‌شوند. مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی ویژگی‌های این مواد، از جمله ابررسانایی، رفتار توپولوژیک و مغناطیسی به کار می‌روند. پس از شناسایی یک ماده کوانتومی جدید، TEM نقش حیاتی در تأیید ساختار اتمی آن ایفا نموده و اطمینان حاصل می‌کند که ویژگی‌های ماده در بنیادی‌ترین سطوح درک شده‌است. سپس دوباره از هوش مصنوعی برای تفسیر هر چه بهتر تصاویر حاصل شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده می‌شود (شکل ۸).

♦ استخراج ویژگی‌های خودکار: هوش مصنوعی می‌تواند ویژگی‌های کلیدی از تصاویر TEM، مانند اندازه ذرات، شکل و ترکیب شیمیایی را به‌صورت خودکار استخراج کرده و به درک بهتر پدیده‌های آب و هوایی کمک کند.

♦ مدل‌سازی پیش‌بینی: هوش مصنوعی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار ذرات در شرایط جوی خاص از داده‌های TEM استفاده کند. این امر به دانشمندان کمک می‌کند تا تأثیرات آنها را بر تغییرات اقلیمی بهتر درک کنند.

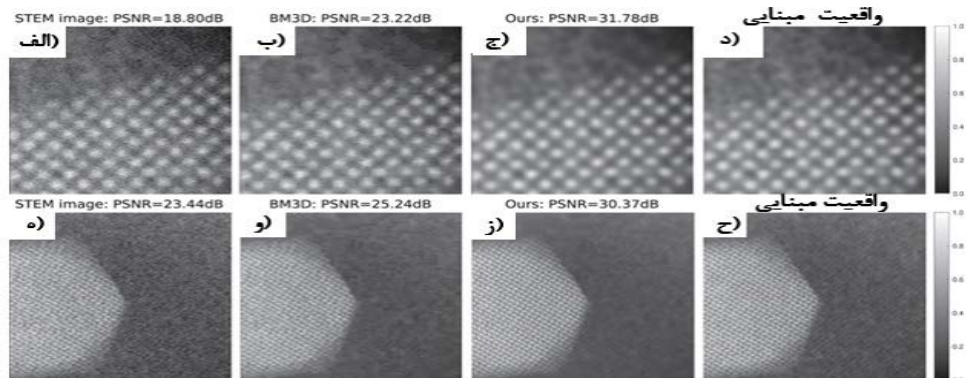
همچنین هوش مصنوعی می‌تواند به تحلیل داده‌های TEM در زمان واقعی نیز کمک کند و این امکان را برای دانشمندان فراهم می‌آورد که تغییرات محیطی را به‌طور زنده نظارت کنند. به‌عنوان مثال:

♦ نظارت بر کیفیت هوا: هوش مصنوعی می‌تواند با استفاده از داده‌های TEM به نظارت بر آلاینده‌ها و ذرات معلق در زمان واقعی کمک کند که به‌طور مستقیم با پیش‌بینی‌های مدل‌های آب و هوایی مرتبط است.

♦ ادغام داده‌های زنده: هوش مصنوعی می‌تواند داده‌های TEM را با دیگر منابع داده‌های محیطی (مانند داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هواشناسی) ادغام کند تا مدل‌های آب و هوایی در زمان واقعی ایجاد کند.

نظارت محیطی با حسگرهای از راه دور

فناوری‌های سنجش از راه دور مانند ماهواره‌ها و پهپادها به‌طور معمول داده‌های عظیمی در مورد پوشش گیاهی، کیفیت هوا و منابع آبی جمع‌آوری می‌کنند. مدل‌های هوش مصنوعی برای پردازش این داده‌ها به‌منظور شناسایی تغییرات محیطی، آلاینده‌ها و ارزیابی تنوع زیستی استفاده می‌شوند. در حالی که این کاربرد بیشتر بر نظارت در مقیاس کلان متمرکز است، دانشی که از مدل‌های هوش مصنوعی در حوزه محیط‌زیست به‌دست می‌آید می‌تواند به‌طور غیر مستقیم در توسعه مواد و فناوری‌های جدیدی مانند سیستم‌های جذب کربن کمک کند که سپس با استفاده از دستگاه TEM برای بررسی ویژگی‌های ساختاری آنها تجزیه و تحلیل می‌شوند.



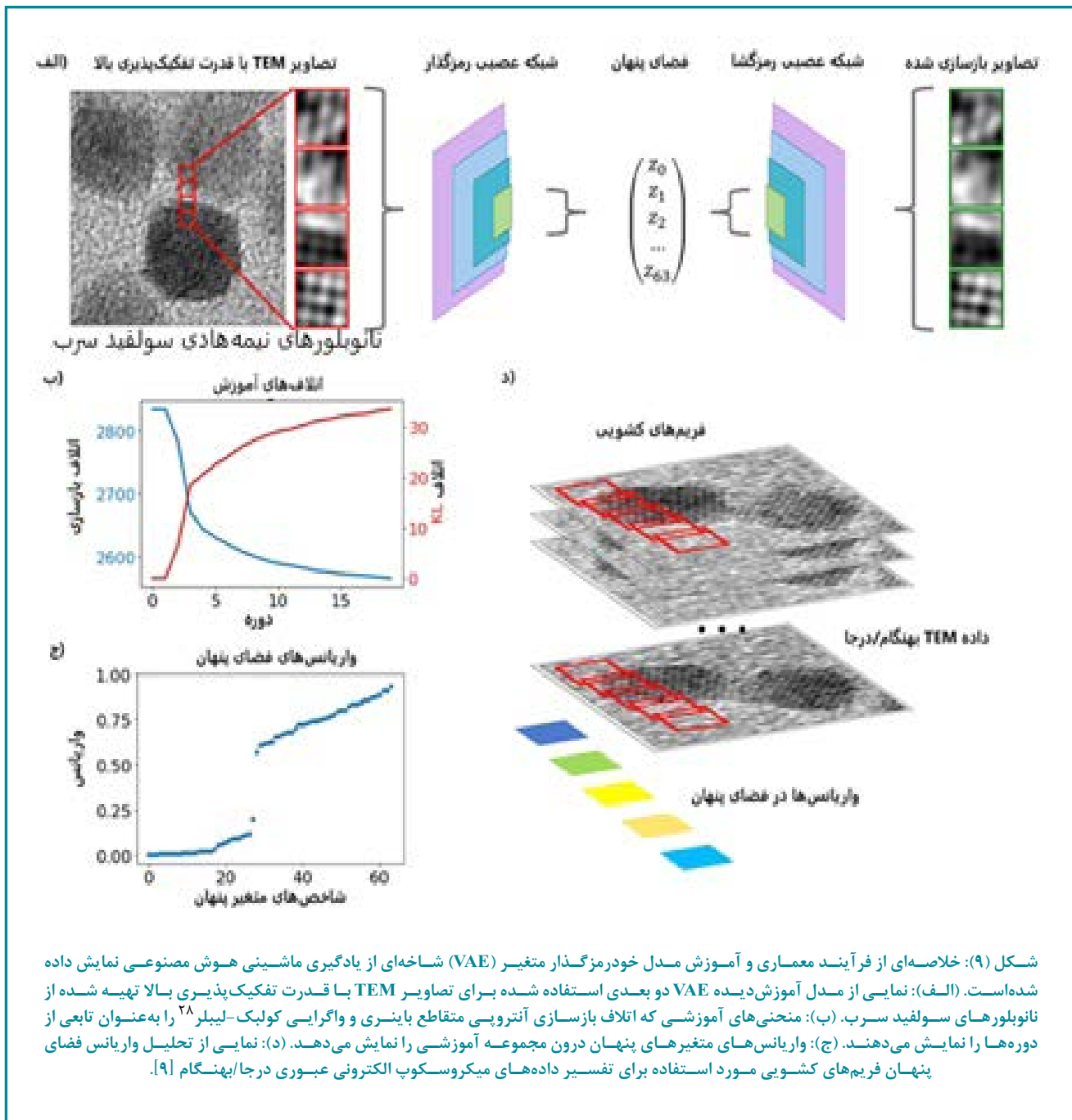
شکل ۸: مقایسه اعمال دو روش یادگیری عمیق به نام شبکه عصبی پیچشی (CNN) و الگوریتم تطبیق بلاک و پالایش سه‌بعدی (BM3D)^{۲۵} بر تصاویر ماده کوانتومی گرافنی (ردیف بالایی با بزرگنمایی بسیار بالا و ردیف پایینی با بزرگنمایی پایین) تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی نمایش داده شده‌است. (الف) و (ه): تصاویر شبیه‌سازی شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (STEM)^{۲۶} هستند. (ب) و (و): خروجی الگوریتم BM3D هستند. (ج) و (ز): خروجی شبکه CNN هستند. (د) و (ح): تصاویر واقعیت مبنایی STEM هستند [۸].

■ کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری مبتنی بر هوش مصنوعی در صنایع مختلف

■ صنعت داروسازی، نانوپزشکی و انتقال دارو

انتقال و تحویل دارو از طریق TEM به همراه هوش مصنوعی می‌تواند رفتار حامل‌های دارویی (مانند لیپوزوم‌ها یا نانوذرات) را در بدن و یا در سلول‌های کشت‌شده مشاهده نمود و اطلاعات مهمی در مورد چگونگی تحویل دارو به مکان‌های خاص در بدن به‌دست آورد. همچنین تصویربرداری از ویروس‌ها با TEM و هوش مصنوعی برای مطالعه ویروس‌ها در مقیاس مولکولی کاربرد دارد و به توسعه داروهای ضد ویروس، واکسن‌ها و ابزارهای تشخیصی کمک بسزایی می‌کند. در شکل (۹)، یکی از تحقیقات انجام شده در زمینه تصویربرداری از نانوبلورهای نیمه‌هادی سولفید سرب با استفاده از هوش مصنوعی الگوریتم‌های یادگیری عمیق و خودرمزگذارهای متغیر^{۲۷} به‌منظور تفسیر هر چه دقیق‌تر آن برای بکارگیری هدفمندتر آن در صنعت

صنعت داروسازی از TEM پیشرفته با هوش مصنوعی برای طراحی سریع‌تر داروها، به‌ویژه در حوزه نانوپزشکی، جایی که خواص مواد در مقیاس نانو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، استفاده می‌کند. استفاده از TEM مبتنی بر هوش مصنوعی برای تصویربرداری از نانوذرات استفاده شده در سیستم‌های انتقال دارو برای شخصی‌سازی نانوذرات بسیار حیاتی است. هوش مصنوعی می‌تواند اندازه، شکل و خواص سطحی این نانوذرات را تجزیه و تحلیل کند و طراحی آنها را برای درمان هدفمند بهینه کند. ردیابی



داروسازی نشان داده شده‌است.

■ صنعت نیمه‌هادی

ترکیب میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) با هوش مصنوعی به‌خصوص یادگیری عمیق (DL) تحولی چشمگیر در صنعت نیمه‌هادی ایجاد نموده و فرآیندهای تحلیل و تولید را بهبود بخشیده است. میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) امکان تصویربرداری با وضوح بالا در سطح اتمی را فراهم می‌کند و این امکان را برای بررسی دقیق مواد و دستگاه‌های نیمه‌هادی فراهم می‌آورد. الگوریتم‌های یادگیری عمیق قادر به تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده هستند و کارهایی را که قبلاً به‌صورت دستی انجام می‌شد، به‌طور خودکار انجام می‌دهند. در بخش نیمه‌هادی، یادگیری عمیق در زمینه‌های زیر کاربرد دارد:

♦ **شناسایی نقص:** مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند نقص‌ها را شناسایی و طبقه‌بندی کنند، که به بهبود کنترل کیفیت کمک می‌کند.

♦ **بهینه‌سازی فرآیند:** با تجزیه و تحلیل داده‌های تولید، الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند فرآیندهای تولید را بهینه کرده و به افزایش بهره‌وری و عملکرد کمک کنند.

بنا به دلایل ذیل ادغام TEM با DL قابلیت‌های هر دو فناوری را تقویت می‌کند:

♦ **متروگرافی خودکار:** الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند تصاویر TEM را پردازش کرده و داده‌های کمی استخراج کنند، که این امر امکان اندازه‌گیری و تحلیل خودکار را فراهم می‌آورد. برای مثال، میکروسکوپ عبوری الکترونی ترمو فیشر ساینترفیک^{۲۹} مدل مترپوس^{۳۰۶} از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای خودکارسازی متروگرافی استفاده می‌کند و بهره‌وری را در تولید نیمه‌هادی افزایش می‌دهد.

♦ **تحلیل پیشرفته نقص‌ها:** مدل‌های یادگیری عمیق که با تصاویر TEM آموزش دیده‌اند، قادر به شناسایی و طبقه‌بندی نقص‌ها با دقت بالا هستند و این امر تحلیل سریع خرابی‌ها را تسهیل می‌کند و کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد. مطالعات نشان داده‌اند که از یادگیری عمیق برای تحلیل تصاویر TEM در سطح اتمی استفاده شده‌است که ترکیبات شیمیایی را شناسایی کرده و تحولات محلی را دنبال می‌کند.

♦ **تصویربرداری پیشرفته:** روش‌های یادگیری عمیق می‌توانند تصاویر TEM را بهبود دهند و وضوح و کنتراست را افزایش دهند، این ویژگی برای تحلیل ویژگی‌های مقیاس نانو در مواد نیمه‌هادی بسیار مفید است. مطالعات نشان داده‌اند که یادگیری عمیق می‌تواند تصاویر SEM را بهبود بخشد، که اغلب در کنار TEM برای تحلیل جامع استفاده می‌شوند.

در حالی که ترکیب TEM و DL مزایای زیادی به همراه دارد، اما چالش‌هایی نیز در این زمینه وجود دارد، که برخی از آنها عبارتند از:

♦ **کیفیت و کمیت داده‌ها:** برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق مؤثر، داده‌های با کیفیت و دارای برچسب‌گذاری دقیق ضروری است.

♦ **منابع محاسباتی:** پردازش مجموعه‌های داده بزرگ TEM به قدرت محاسباتی زیادی نیاز دارد.

پیشرفت‌های آینده ممکن است بر بهبود الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای پردازش داده‌های TEM متنوع و پیچیده متمرکز شود، که ابزارهای تحلیلی قوی‌تر و کارآمدتری را در صنعت نیمه‌هادی به ارمغان خواهد آورد. در نتیجه، ترکیب TEM و هوش مصنوعی در حال متحول ساختن صنعت نیمه‌هادی است. این امر با خودکارسازی تحلیل‌ها، بهبود شناسایی نقص‌ها و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، که به پیشرفت فناوری نیمه‌هادی کمک کرده به وقوع می‌پیوندد.

■ صنعت انرژی

بکارگیری میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) با هوش مصنوعی پیشرفت‌های چشمگیری در صنعت انرژی ایجاد کرده است که باعث بهبود تحلیل و توسعه مواد مورد استفاده در فناوری‌های انرژی می‌شود. این ترکیب اجازه می‌دهد تا شناسایی دقیق مواد در سطح اتمی صورت گیرد و عملکرد و بهره‌وری در فناوری‌های انرژی بهبود یابد.

برخی از کاربردهای کلیدی استفاده از میکروسکوپ عبوری الکترونی با هوش مصنوعی برای این حوزه عبارتند از:

♦ **شخصی‌سازی مواد:** میکروسکوپ عبوری الکترونی تصویربرداری با وضوح بالا از مواد و همچنین امکان تحلیل دقیق ساختار و ویژگی‌های آن‌ها را فراهم می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند این تصاویر را پردازش کنند تا الگوها و ناهنجاری‌ها را شناسایی کرده و توسعه مواد پیشرفته برای کاربردهای انرژی را تسهیل کنند.

♦ **تحقیقات باتری:** در توسعه باتری‌های لیتیوم-یونی، TEM همراه با یادگیری عمیق به درک بهتر مواد الکترود و رفتار آن‌ها در حین چرخه‌های شارژ و تخلیه کمک می‌کند. این ترکیب به طراحی باتری‌هایی با چگالی انرژی بالاتر و طول عمر بیشتر کمک می‌کند.

♦ **توسعه کاتالیزور:** برای سلول‌های سوختی و دیگر فرآیندهای کاتالیستی، تصویربرداری TEM همراه با یادگیری عمیق، امکان مشاهده ساختار کاتالیزورها و تعاملات آن‌ها در سطح اتمی را فراهم می‌کند. این بینش برای توسعه کاتالیزورهای کارآمدتر ضروری است.

♦ **مواد انرژی خورشیدی:** TEM، هنگامی که با

♦ **شناسایی و تحلیل نقص‌ها:** در صنعت خودروسازی، اطمینان از یکپارچگی مواد، امری حیاتی است. TEM همراه با یادگیری عمیق می‌تواند شناسایی و تحلیل نقص‌ها را در مواد خودکار کند، مانند ذرات نانو که روی سطوح متخلخل قرار گرفته‌اند. این روش به بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی قطعات خودرویی کمک می‌کند. مطالعه‌ای نشان داده که از یادگیری عمیق برای شناسایی خودکار و اندازه‌گیری اندازه ذرات در تصاویر TEM استفاده شده‌است که موجب بهبود کارایی فرآیندهای کنترل کیفیت می‌شود.

♦ **تحلیل سطح مواد:** TEM همراه با یادگیری عمیق می‌تواند ویژگی‌های سطحی مواد استفاده شده در تولید خودرو را تحلیل کند. این تحلیل برای توسعه پوشش‌ها و درمان‌هایی که دوام و عملکرد قطعات خودرو را افزایش می‌دهند، ضروری است. به‌عنوان مثال، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۳۵} برای تعیین ترکیب‌های شیمیایی و منابع آلودگی در مواد خودرویی استفاده شده که به تضمین کیفیت و عیب‌یابی فرآیند کمک کرده است.

♦ **مدل‌سازی پیش‌بینی:** مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند تصاویر TEM را پردازش کرده و رفتار مواد را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. این قابلیت به طراحی موادی با ویژگی‌های مطلوب، مانند مقاومت بیشتر یا مقاومت حرارتی، برای کاربردهای خاص خودرویی کمک می‌کند. پیشرفت‌های اخیر استفاده از یادگیری عمیق برای پیش‌بینی ارتفاع ستون‌ها و ترکیب عنصری در مواد را نشان داده است که اطلاعات ارزشمندی برای طراحی مواد خودرویی فراهم می‌آورد.

پیشرفت‌های اخیر در این حوزه عبارتند از:

♦ **استفاده از یادگیری عمیق در میکروسکوپ‌های الکترونی در حال رشد است که به دلیل در دسترس بودن آشکارسازهای سریع با نرخ فریم کیلوهرتز، منجر به تولید مجموعه داده‌های بزرگی شده‌است که نمی‌توان آن‌ها را با الگوریتم‌های دستی پردازش کرد.** یادگیری عمیق برای حل مشکلات مختلف مرتبط با میکروسکوپ الکترونی، از جمله حذف نویز و ترمیم تصاویر، به کار رفته است که به تحلیل مواد در صنعت خودروسازی کمک می‌کند.

♦ **پیشرفت‌های اخیر در روش‌های یادگیری ماشین به میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی و میکروسکوپ پروب روبشی اعمال شده‌است که تحلیل مواد در سطح اتمی را بهبود می‌بخشد.** این پیشرفت‌ها تأثیرات قابل توجهی برای صنعت خودروسازی دارند و امکان شناسایی دقیق‌تر مواد استفاده شده در تولید خودرو را فراهم می‌کنند.

یادگیری عمیق ترکیب می‌شود، امکان تحلیل مواد نیمه‌هادی استفاده شده در سلول‌های خورشیدی را فراهم می‌کند. این ترکیب به شناسایی نقص‌ها و بهینه‌سازی ویژگی‌های مواد برای بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی کمک می‌کند.

برخی از پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه عبارتند از:

♦ **پژوهشگران نرم‌افزار اتم‌ای^{۳۱} را توسعه داده‌اند که از یادگیری عمیق برای تحلیل تصاویر الکترونی و تصاویر پروب اسکن استفاده می‌کند.** این ابزار تجزیه و تحلیل پایان به پایان را فراهم می‌آورد و اطلاعات فیزیکی قابل اندازه‌گیری مانند موقعیت و نوع هر اتم در یک نمونه را ارائه می‌دهد. همچنین اتم‌ای^{۳۱}، امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها در زمان واقعی را فراهم می‌آورد که می‌تواند به‌طور مستقیم در شبیه‌سازی‌های نظری برای کسب بینش‌های عمیق‌تر در مورد ساختار مواد یکپارچه استفاده شود.

♦ **پیشرفت‌های یادگیری ماشین منجر به آزمایش‌های خودکار در میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی^{۳۲} شده‌است.** این توسعه‌ها امکان جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها را به‌طور کارآمدتر فراهم می‌آورد و کشف و بهینه‌سازی مواد برای کاربردهای انرژی را تسریع می‌کند.

♦ **ترکیب یادگیری عمیق با روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی در TEM، امکان توسعه میکروسکوپ‌های الکترونی خودران را فراهم کرده است.** این سیستم‌ها می‌توانند به‌طور خودکار داده‌ها را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کنند که به‌طور چشمگیری بهره‌وری تحلیل مواد در تحقیقات انرژی را افزایش می‌دهد.

■ صنعت خودروسازی

استفاده از TEM با هوش مصنوعی، پیشرفت‌های قابل توجهی در صنعت خودروسازی ایجاد می‌کند. به‌منظور آشنایی هر چه بیشتر، در قسمت ذیل برخی از کاربردهای مهم هم‌افزایی میکروسکوپ الکترونی عبوری و هوش مصنوعی ذکر شده‌است:

♦ **شخصی‌سازی مواد:** میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) تصویربرداری با وضوح بالا از مواد و همچنین امکان تحلیل دقیق ساختار و ویژگی‌های آن‌ها را فراهم می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند این تصاویر را پردازش کنند تا الگوها و ناهنجاری‌ها را شناسایی کرده و توسعه مواد پیشرفته برای کاربردهای خودروسازی را تسهیل کنند. به‌عنوان مثال، شرکت آتريا اینوویشن^{۳۳} از TEM و میکروسکوپ نیروی اتمی^{۳۴} برای شناسایی پلی‌پروپیلن و ترموپلاستیک وولکانیزه شده EPDM استفاده کرد که به توسعه مواد با ویژگی‌های بهبود یافته برای قطعات خودرویی کمک کرده است.

میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) یک روش تصویربرداری قدرتمند است که از الکترون‌ها به جای نور برای گرفتن تصاویری با وضوح بالا از مواد در سطح اتمی استفاده می‌کند. میکروسکوپ TEM در زمینه‌های مختلفی مانند علم مواد، زیست‌شناسی و فناوری نانو نقشی اساسی داشته است. توانایی آن در تجزیه و تحلیل جزئیات ساختاری ریز در مقیاس‌های بزرگ باعث شده است تا این روش برای محققان و مهندسانی که با مواد نانو و سیستم‌های میکروسکوپی کار می‌کنند، ضروری باشد. با این حال، داده‌های تولید شده توسط TEM بیشتر وسیع و پیچیده هستند و نیاز به ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای تفسیر دارند. اینجاست که هوش مصنوعی (AI) وارد می‌شود. هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL)، پتانسیل زیادی برای خودکارسازی تجزیه و تحلیل و افزایش قابلیت‌های TEM ارائه می‌دهد. روش‌های هوش مصنوعی در TEM به‌طور عمده بر بهبود سرعت، دقت و عمق تجزیه و تحلیل تصاویر تمرکز دارند. هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری عمیق، به غلبه بر چالش‌های موجود در روش‌های سنتی پردازش داده‌های TEM کمک کرده است. ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای کاری TEM منجر به خودکارسازی تصویربرداری، شناسایی نقص‌ها، شناسایی الگوها و حتی پیش‌بینی ویژگی‌های مواد شده است. ترکیب TEM و هوش مصنوعی بیشتر صنایع از جمله: صنعت داروسازی، صنعت خودروسازی، صنعت علم مواد، فناوری نانو و سایر حوزه‌ها را متحول کرده است. هوش مصنوعی توانایی‌های TEM را افزایش می‌دهد و آن را سریع‌تر، دقیق‌تر و قادر به پردازش داده‌های پیچیده می‌کند. در حالی که چالش‌هایی هنوز وجود دارد، آینده هوش مصنوعی در TEM بسیار امیدوارکننده است و پیشرفت‌های مستمر در الگوریتم‌های هوش مصنوعی و فناوری میکروسکوپ، راه را برای کشفیات نوآورانه هموار خواهد کرد.

پی‌نوشت

1. Artificial Intelligence (AI)
2. Machine Learning (ML)
3. Deep Learning (DL)
4. Transmission Electron Microscopy (TEM)
5. Nature Communications
6. Convolutional Neural Network (CNN)
7. Molybdenum disulfide (MOS2)
8. High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscopy (HAADF-STEM)
9. Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS)
10. Fast Fourier Transform (FFT)
11. Non-negative matrix factorization (NMF)
12. Principal component analysis (PCA)
13. Pb
14. Se
15. Cd
16. Root Mean Square Deviation (RMSD)
17. Cerium(IV) oxide (CeO₂)
18. Platinum (Pt)
20. Cryo Transmission Electron Microscopy (Cryo-TEM)
21. AlphaFold
22. DeepMind
23. Cryogenic electron microscopy (cryo-EM)
24. The Large Hadron Collider (LHC)
25. Block-matching and 3D filtering (BM3D)
26. Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM)
27. variational autoencoders (VAE)
28. Kullback-Leibler
29. Thermo Fisher Scientific
30. Metrios 6
31. AtomAI
32. Scanning transmission electron microscopy (STEM)
33. ATRIA Innovation
34. Atomic force microscopy (AFM)
35. scanning electron microscope (SEM)

مراجع

- [1] Baoshan Tang, Hasita Veluri, Yida Li, Zhi Gen Yu, Moaz Waqar, Jin Feng Leong, Maheswari Sivan, Evgeny Zamburg, Yong-Wei Zhang, John Wang & Aaron V-Y. Thean. Wafer-scale solution-processed 2D material analog resistive memory array for memory-based computing. Nature Communications volume 13, Article number: 3037 (2022).
- [2] Sen Liu, Behnam Amin-ahmadi, Rui Liue, Qiaojie Zheng, Xiaoli Zhang. Automated Phase Segmentation and Quantification of High-resolution TEM Image for Alloy Design. ELSEVIER, Materials Characterization, Volume 199, May 2023, 112779.
- [3] Junyoung Heo, Dongjun Kim, Hyesung Choi, Sungin Kim, Hoje Chun, Cyril F. Reboul, Cong T. S. Van, Dominika Elmlund, Soonmi Choi, Kihyun Kim, Younggil Park, Hans Elmlund, Byungchan Han & Jungwon Park. Method for 3D atomic structure determination of multi-element nanoparticles with graphene liquid-cell TEM. NATURE, Scientific Reports volume 13, Article number: 1814 (2023).
- [4] Achraf Chaddad. Revolutionizing Protein Structure Prediction: The Impact of Artificial Intelligence and AlphaFold. African Journal of Biological Sciences 6(Issue 14, Aug 2024):8058.
- [5] Ioannis Skalidis, Fotis L. Kyrilis, Christian Tüting, Farzad Hamdi, Grzegorz Chojnowski, Panagiotis L. Kastritis. Cryo-EM and artificial intelligence visualize endogenous protein community members. ScienceDirect, Volume 30, Issue 4, 7 April 2022, Pages 575-589.e6.
- [6] Kevin P. Treder, Chen Huang, Judy S. Kim and Angus I. Kirkland. Applications of deep learning in electron microscopy. Microscopy, 2022, 71(S1), i100-i115.
- [7] Nina Gumbiowski, Kateryna Loza, Marc Heggen and Matthias Eppel. Automated analysis of transmission electron micrographs of metallic nanoparticles by machine learning. Nanoscale Advances, Volume 5, Issue 8, 11 April 2023, Pages 2318-2326.
- [8] I. Lobato, T. Friedrich, S. Van Aert. Deep convolutional neural networks to restore single-shot electron microscopy images. npj Computational Materials volume 10, Article number: 10 (2024).
- [9] Xingzhi Wang, Chang Yan, Justin C. Ondry, Viraj Bodiwala, Peter Ercius, A. Paul Alivisatos. An artificial intelligence's interpretation of complex high-resolution in situ transmission electron microscopy data. ScienceDirect, Matter, Volume 7, Issue 1, 3 January 2024, Pages 175-190.

Author

Sanaz Shobikeh^{1*}

*researchers4u@yahoo.com

1. Shiraz University Transmission Electron Microscope Laboratory Specialist and TEM Experts work group

Applications of Transmission Electron Microscopy together with Artificial Intelligence in various Scientific and Industrial Fields

Abstract

Artificial Intelligence (AI) techniques, particularly machine learning (ML) and deep learning (DL), have found widespread application across various scientific disciplines due to their ability to handle large datasets, identify complex patterns, and automate tasks that traditionally require human expertise. These AI techniques are not limited to just image recognition but extend to predictive modeling, data classification, and even optimization of experimental workflows.

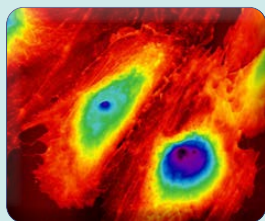
The relevance of AI to scientific research is expanding rapidly, as it complements traditional methodologies by offering faster, more accurate, and more scalable solutions. In this context, AI's influence on scientific research spans multiple domains, from physics and chemistry to biology and environmental science. The integration of AI in these fields has opened new frontiers in problem-solving and discovery. One of the most promising applications of AI lies in its integration with advanced imaging technologies such as Transmission Electron Microscopy (TEM). TEM is an essential tool for industries involved in materials science, nanotechnology, semiconductor manufacturing, and biomedical applications. However, the complexity and volume of data produced by TEM instruments pose significant challenges in terms of data processing, image interpretation, and decision-making. Such AI techniques that mentioned above and also Computer Vision, are increasingly being leveraged to overcome these challenges, thereby enhancing the effectiveness of TEM in industrial research and development (R&D). In this article, we discuss several areas of scientific and industrial research where AI is making an impact and explore how these applications have direct relevance to TEM.

Keywords

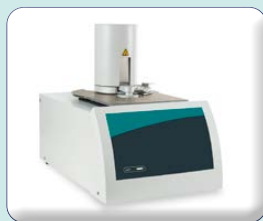
Artificial Intelligence; Transmission Electron Microscopy; Machine Learning; Deep learning.



Investigation of Key Factors Affecting DLS Results and Error Reduction Strategies



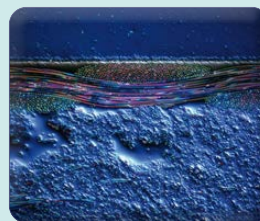
Application of atomic force microscopy in biological research; with a review of its application in conservative dentistry and endodontics.



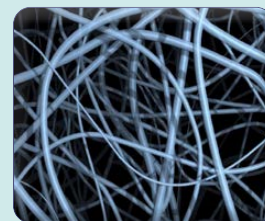
Differential Scanning Calorimetry- Thermal Fractionation Techniques for Polymer Characterization



How Grid Selection Determines the Quality of TEM Images



Investigating the effect of color and color reagents in metallography



Preparation of Polyacrylic acid/ Polyvinyl alcohol Polymer Superabsorbent Using Needleless Electrospinning and Investigation of Effective Device Parameters on Its Morphology