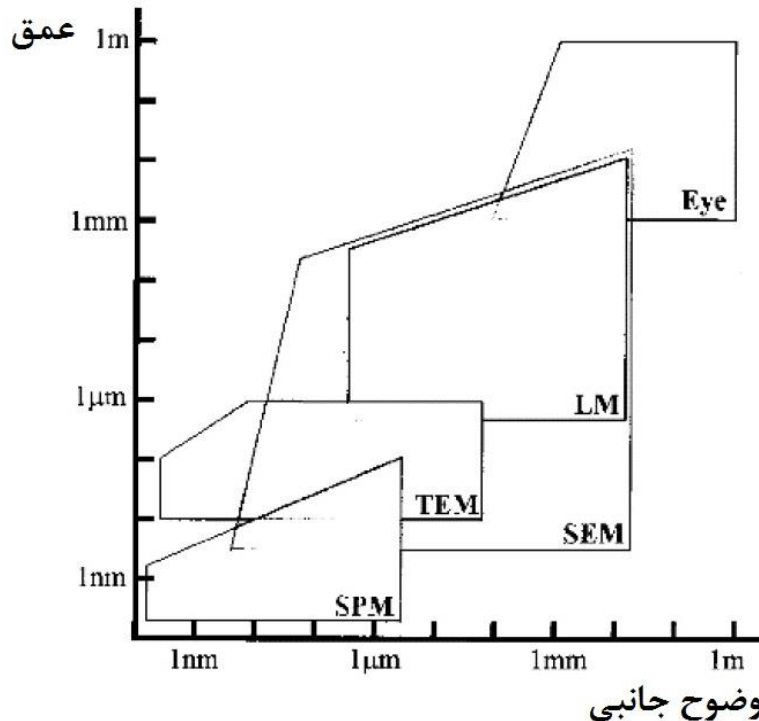


مقدمه‌ای بر SEM و برهم‌کنش پرتوی الکترونی با نمونه

امروزه روش‌های مختلفی جهت شنا سایی و آنالیز مواد وجود دارد که یکی از معروف‌ترین آن‌ها، روش‌های میکروسکوپی است. در این روش‌ها می‌توان تصاویر بزرگنمایی شده از نمونه به دست آورد. میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM که از گروه میکروسکوپ‌های الکترونی است، از معروف‌ترین روش‌های میکروسکوپی به شمار می‌رود که علاوه بر تهیه تصاویر بزرگنمایی شده، در صورتی که به تجهیزات اضافی مجهز شود، می‌تواند برای آنالیز شیمیایی و دیگر بررسی‌ها نیز به کار گرفته شود. مبنای عملکرد این میکروسکوپ، برهم‌کنش پرتوی الکترونی با ماده است. پرتوهای ساطع شده از این برهم‌کنش می‌تواند جهت بررسی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۱-مقدمه

با استفاده از روش‌های میکروسکوپی، تصاویر با بزرگنمایی بالا از ماده به دست می‌آید تا بتوان جزئیات آن را با دقت مطالعه کرد. قدرت تفکیک تصاویر میکروسکوپی با توجه به نوع پرتوی مورد استفاده مشخص می‌شود. به عنوان مثال، با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری، قدرت تفکیکی در حدود ۱ میکرومتر یا حتی ۲۰۰ نانومتر و با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی، STM، AFM و یونی با وضوح بالا در حدود یک نانومتر تا چند انگستروم قابل دسترسی است. در همین رابطه، دقت عمودی و افقی برخی از مهم‌ترین روش‌های میکروسکوپی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱ - طرحی که نشان‌دهنده وضوح عمودی و افقی روش‌های مختلف تصویربرداری است. ملاحظه می‌شود که بسیاری از روش‌ها خصوصاً در محدوده ۱۰۰-۱۰ نانومتر هم‌پوشانی دارند. با این حال این روش‌ها لزوماً از قسمت یکسانی از نمونه تصویر تهیه نمی‌کنند. به عنوان مثال،

SEM و TEM هر دو هم‌پوشانی زیادی دارند، ولی اولی از سطوح و دومی از داخل ماده تصویر تهیه می‌کند [۱].

۲- میکروسکوپ‌های الکترونی

میکروسکوپ‌های الکترونی به خاطر محدودیت میکروسکوپ‌های نوری توسعه پیدا کرده‌اند. در میکروسکوپ نوری شاید بتوان با تغییر انحنای سطح عدسی‌ها (میزان تقعر و تحدب) و تعداد آن‌ها بزرگنمایی تصاویر را به هر مقدار زیاد کرد، اما به علت بلند بودن طول موج نور، عملاً تصاویر در بزرگنمایی‌های بالای ۲۰۰۰ وضوح خود را از دست می‌دهند. منظور از وضوح یا حد تفکیک (resolution) کمترین فاصله بین دو نقطه‌ای است که بتوان آن‌ها را از هم تفکیک کرد. میکروسکوپ‌های نوری معمولی، بزرگنمایی ماکزیمم، ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ برابر و قدرت تفکیک ۰٫۲ میکرون دارند که این باعث محدودیت استفاده از این دستگاه‌ها می‌شود. به عنوان مثال، برای دیدن ساختار سلول‌های آلی به بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر نیاز است که به وسیله میکروسکوپ نوری با طول موج امواج مرئی قابل دستیابی نیست.

در میکروسکوپ‌های الکترونی به جای نور از پرتوی الکترونی استفاده می‌شود. از آن جایی که طول موج الکترون می‌تواند بسیار کوتاه باشد، پس در میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توان به بزرگنمایی بسیار بالا دست یافت (تا حد یک میلیون برابر در بعضی از میکروسکوپ‌های الکترونی). در واقع میکروسکوپ‌های الکترونی بر اساس قوانین امواج الکترومغناطیس کار می‌کنند و مانند تمام میکروسکوپ‌ها از لنزهای شیبی و چشمی تشکیل شده‌اند، با این تفاوت که در میکروسکوپ‌های الکترونی، به جای نور از شار الکترون (پرتوهای الکترونی) پرتوهای استفاده می‌گردد. علاوه بر این، لنزها نیز در این نوع میکروسکوپ‌ها از نوع لنزهای الکترومغناطیس هستند که با لنزهای نوری متفاوت هستند. از نگاه تاریخی، اولین نوع از میکروسکوپ‌های الکترونی ابداع شده، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM=Transmission Electron Microscope) است که مکانیزم عملکرد آن دقیقاً مانند یک میکروسکوپ عبوری نوری است، با این تفاوت که در آن به جای نور از یک پرتوی الکترونی و به جای لنزهای نوری از لنزهای مغناطیسی استفاده می‌شود [۲،۳].

۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی که به آن Scanning Electron Microscope یا به اختصار SEM می‌گویند، یکی از انواع بسیار معروف میکروسکوپ‌های الکترونی است که خصوصاً کاربردهای بسیاری در فناوری نانو پیدا کرده است. نخستین تلاش‌ها در زمینه توسعه میکروسکوپ‌های روبشی به سال ۱۹۳۵ باز می‌گردد که ماکس نول (Max Knoll) در آلمان پژوهش‌هایی در زمینه پدیده‌های الکترونیک نوری انجام داد و تصویری را بر اساس کانتراست کانالی الکترونی (electron channelling contrast) از فولاد سیلیسیومی به دست آورد. مانفرد وان آردن (Manfred von Ardenne) تحقیقات بیشتری را بر روی اصول فیزیکی SEM و برهم‌کنش آن با نمونه انجام داد و توانست در سال ۱۹۳۸ با اضافه کردن سیم پیچ‌های روبشی به یک TEM، میکروسکوپ الکترونی عبوری - روبشی بسازد. با این حال دستگاه او از نظر عملی مورد استقبال قرار نگرفت. استفاده از SEM برای مطالعه نمونه‌های ضخیم غیرشفاف اولین بار توسط ژورکین (Zworykin) و همکاران در سال ۱۹۴۲ در ایالات متحده آمریکا انجام شد.

توسعه بیشتر SEM توسط پروفیسور چارلز اُتلی (Charles Oatley) و همکارش گری استوارت (Gary Stewart) در دانشگاه کمبریج بریتانیا به انجام رسید و در سال ۱۹۶۵ برای اولین بار به صورت تجاری روانه بازار شد [۴،۵].

ساخت SEM سبب شد تا محققان بتوانند نمونه‌ها را به سادگی و با وضوح بیشتری مطالعه کنند. بمباران نمونه با پرتوی الکترونی سبب می‌شود تا از نمونه الکترون‌ها و فوتون‌هایی خارج و به سمت آشکارسازها رها شوند که در آن قسمت تبدیل به سیگنال می‌شوند. حرکت پرتو بر روی نمونه مجموعه‌ای از سیگنال‌ها را فراهم می‌کند که بر این اساس میکروسکوپ می‌تواند تصویر متقابل از سطح نمونه را به صورت لحظه به لحظه بر صفحه نمایش دهد. بنابراین مکانیزم عملکرد SEM با میکروسکوپ‌های نوری کاملاً متفاوت است.

در ابتدا مزیت اصلی دستگاه SEM، تهیه تصاویر میکروسکوپی به طور مستقیم از نمونه‌های جامد با وضوح و قدرت تفکیک و تمرکز بهتر در مقایسه با میکروسکوپ‌های نوری بود.

اما بعدها قدرت اجرایی و عملیاتی دستگاه توسعه یافت و به روش‌های تجزیه و تحلیل، نظیر اشعه ایکس برای تعیین ترکیب شیمیایی و کانال‌های الکترونی (electron channeling) جهت تشخیص وضعیت بلوری مجهز گردید. شکل ۲ نمونه‌ای از یک SEM مرسوم را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - تصویری از یک دستگاه SEM امروزی [۶]

۴- برهم کنش نمونه و پرتوی الکترونی

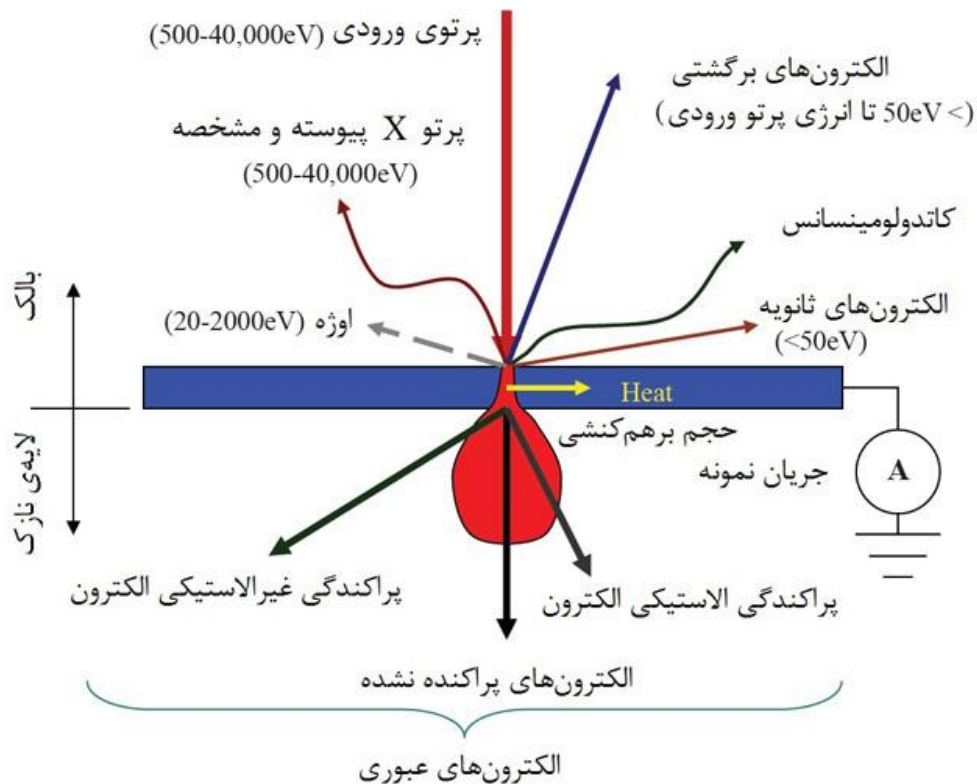
اصول عملکرد SEM بر سه اصل استوار است که به صورت زنجیروار با هم در ارتباط هستند [۵]

۱- برهم کنش پرتوی الکترونی با نمونه

۲- امکان تولید و کنترل مشخصه‌های پرتوی الکترونی روبشگر در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

۳- امکان آشکارسازی پرتوهای ساطع شده از سوی نمونه در اثر برهم کنش آن با پرتوی الکترونی ورودی

وقتی پرتوی الکترونی روبشی با نمونه برخورد می‌کند، بین آن‌ها برهم کنش روی می‌دهد. نتیجه آن، ساطع شدن پرتوهایی است که با کمک آشکارسازها دریافت و شناسایی می‌شوند و مشخصات ماده را آشکار می‌سازند. شکل ۳ شماتیکی از پرتوهایی که از نمونه ساطع می‌شود را نشان می‌دهد [۵]. نوع اطلاعاتی که از این طریق به دست می‌آید به برهم‌کنش پرتو و نمونه بستگی دارد. به همین دلیل لازم است جزئیات این برهم‌کنش را بررسی کنیم. موارد ۲ و ۳ در بخش‌های بعد شرح داده خواهند شد.



شکل ۳ - برهم کنش پرتوی الکترونی و نمونه [۷]

در SEM، پرتوهای الکترونی ورودی به نمونه معمولاً حاوی الکترون‌هایی با انرژی ۱ تا ۵۰ الکترون ولت هستند که هنگام برخورد با ماده، رفتارهای بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در برهم‌کنش نمونه و الکترون، الکترون می‌تواند [۲]

۱- بی تأثیر بوده و از نمونه عبور کند،

۲- به طور الاستیکی پراکنده شود؛ تغییری در انرژی آن به وجود نیامده، اما جهت آن تغییر کند،

۳- پراش یافته و انکسار یابد؛ در یک جهت ترجیحی که توسط ساختار بلوری نمونه تعیین می‌شود، پخش گردد،

۴- به طور غیرالاستیکی پراکنده شود؛ در انرژی و جهت آن تغییر ایجاد گردد،

۵- جذب شود.

در صورت اتفاق افتادن موارد ۴ و ۵، الکترون‌های ثانویه یا پرتوهای الکترومغناطیسی (اشعه X یا نور) منتشر می‌شود یا این که حرارت آزاد می‌گردد.

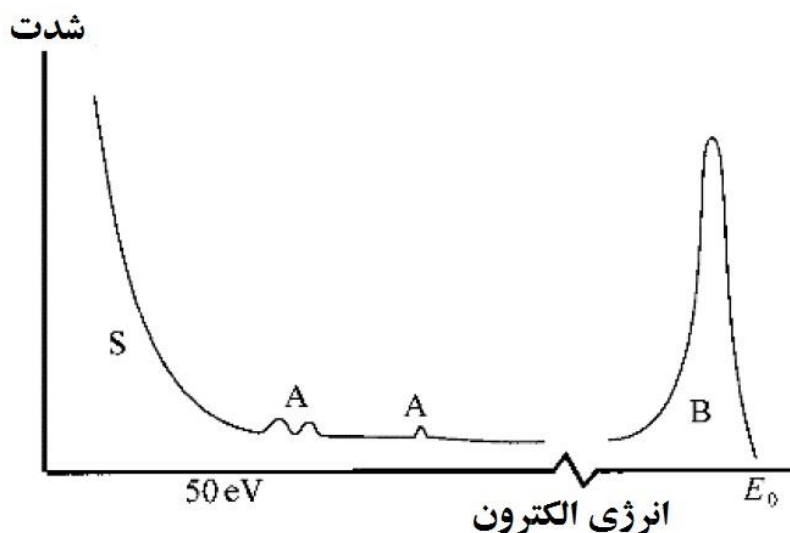
کانتراست (contrast) قابل رؤیت در هر یک از موارد مزبور، به جز در مورد شماره یک، ممکن است ایجاد شود. معمولاً در نمونه‌های غیربلوری، کانتراست از تأثیرات ۲، ۴ یا ۵ است. مورد شماره ۴ دلخواه نیست؛ چون هنگامی که انرژی الکترون تغییر می‌کند، طول موج آن نیز تغییر کرده و در نتیجه فاصله کانونی عدسی‌ها تغییر پیدا می‌کند؛ یعنی سبب می‌شود لنزها عیب رنگی (کروماتیک) بروز دهند.

حالت ۳ به طور عمده برای مقایسه و بررسی ساختارهای بلوری ورق‌های فلزی نازک یا ذرات رسوبی به کار می‌رود. این شیوه علاوه بر ایجاد کانتراست ساختاری و تمیز جهت ترجیحی پخش الکترون‌ها، اطلاعاتی نیز در مورد ساختار بلوری ارائه می‌دهد. بدین منظور می‌توان پراش الکترونی و الگوهای کیکوچی (Kikuchi) را ثبت کرده و تصاویر جداگانه‌ای با استفاده از میدان دید تاریک از پرتوهای پراکنده شده به دست آورد. برای حصول اطلاعات بیشتر، استفاده از میدان روشن یا پرتوهای الکترونی عبور یافته مفید است [۲]. اما عمده‌ترین برهم‌کنش‌ها و خصوصاً آن مواردی که در SEM مطرح هستند، موارد ۲ و ۴ هستند که به طور دقیق‌تر عبارتند از [۵]:

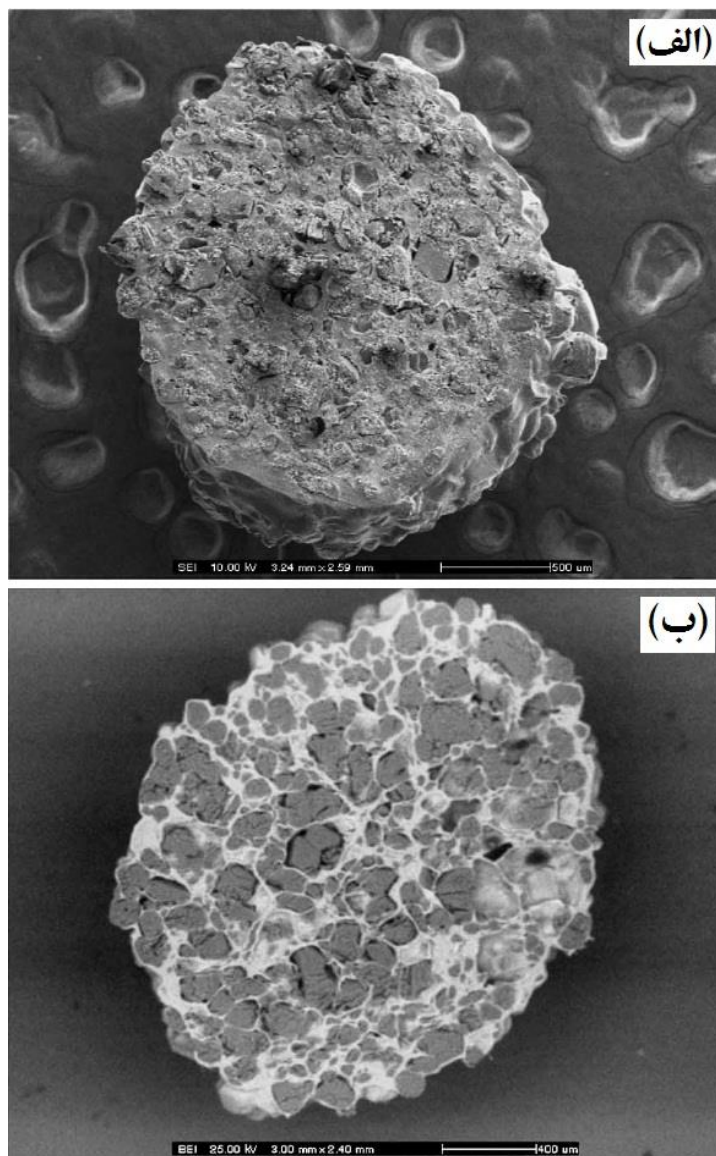
۱- **پراکندگی الاستیکی**: تغییر جهت حرکت پرتوی الکترونی ضمن از دست دادن مقدار قابل اغمازی انرژی. پراکندگی الاستیکی عمدتاً در برخورد پرتوی الکترونی با هسته اتم رخ می‌دهد و باعث انحراف قابل توجهی در مسیر پرتوی الکترونی ورودی به ماده می‌شود.

۲- **پراکندگی غیرالاستیکی**: از دست دادن انرژی و تغییر قابل اغماض جهت حرکت پرتوی الکترونی. پراکندگی غیرالاستیکی از طریق دو مکانیزم اتفاق می‌افتد: (۱) پراکندگی غیرالاستیکی در برخورد با الکترون‌های باندهای الکترونی اتم ماده و (۲) پراکندگی غیرالاستیکی در برخورد با هسته اتم.

چندرسانه‌ای ۱ نیز پراکندگی الاستیک و غیرالاستیک را نشان می‌دهد. در واقع، هدف برخورد الکترون‌های پرتو الکترونی ورودی، اتم‌های ماده است که خود شامل هسته و الکترون‌های اطراف آن است. در اثر برخورد الاستیک پرتوی الکترونی ورودی با الکترون‌های اتم ماده، جهت حرکت آن‌ها تغییر کرده و امکان برخوردهای بعدی فراهم می‌گردد. اگر پرتوی الکترونی ورودی با الکترون‌های اتم برخورد کند و به صورت غیرالاستیکی پراکنده شود، دو حالت وجود دارد. ممکن است پرتوی الکترونی با الکترون‌های لایه خارجی برخورد کند و انرژی پرتو به آن منتقل شود که باعث می‌شود الکترون آن اتم برانگیخته شود و از لایه الکترونی خارج گردد. طبق تعریف، انرژی الکترون خارج شده از اتم که به آن «الکترون ثانویه» گویند، معمولاً حدود ۵۰ الکترون ولت است. با این حال ۹۰٪ این الکترون‌ها انرژی کمتر از ۱۵ الکترون ولت دارند (شکل ۴). اگر عمق ایجاد الکترون‌های ثانویه کمتر از ۱۰ نانومتر از سطح نمونه باشد، با توجه به این که انرژی سطحی جامدات حدود ۲ تا ۶ الکترون ولت است، عملاً خروج آن‌ها به عنوان «پرتو الکترون‌های ثانویه (SE=Secondary Electrons)» از سطح امکان‌پذیر خواهد بود. اما اگر الکترون‌های ثانویه در عمقی بیش از ۱۰ نانومتر از سطح ماده ایجاد شده باشند، با توجه به برخوردهای بی‌نهایتی که ممکن است در راه رسیدن به سطح، با الکترون‌ها و هسته‌های اتم‌ها داشته باشند، شانس بسیار ناچیزی برای خروج از سطح خواهند داشت. کانتراست موجود در تصاویر حاصل از الکترون‌های ثانویه ناشی از اختلاف در انرژی، تعداد و مسیر آن‌ها است [۵، ۲]. در شکل ۵ (الف) یک تصویر SE از سطح مقطع یک نمونه پودر نشان داده شده است [۸].



شکل ۴ - طیف الکترونی که نشان‌دهنده فراوانی نسبی الکترون‌های ثانویه (S)، اوزه (A) و برگشتی (B) بر حسب انرژی الکترون است. توجه شود که مقیاس انرژی، پیوسته نیست؛ E_0 به طور نمونه بسیار بیشتر از ۵۰ الکترون ولت است [۱].

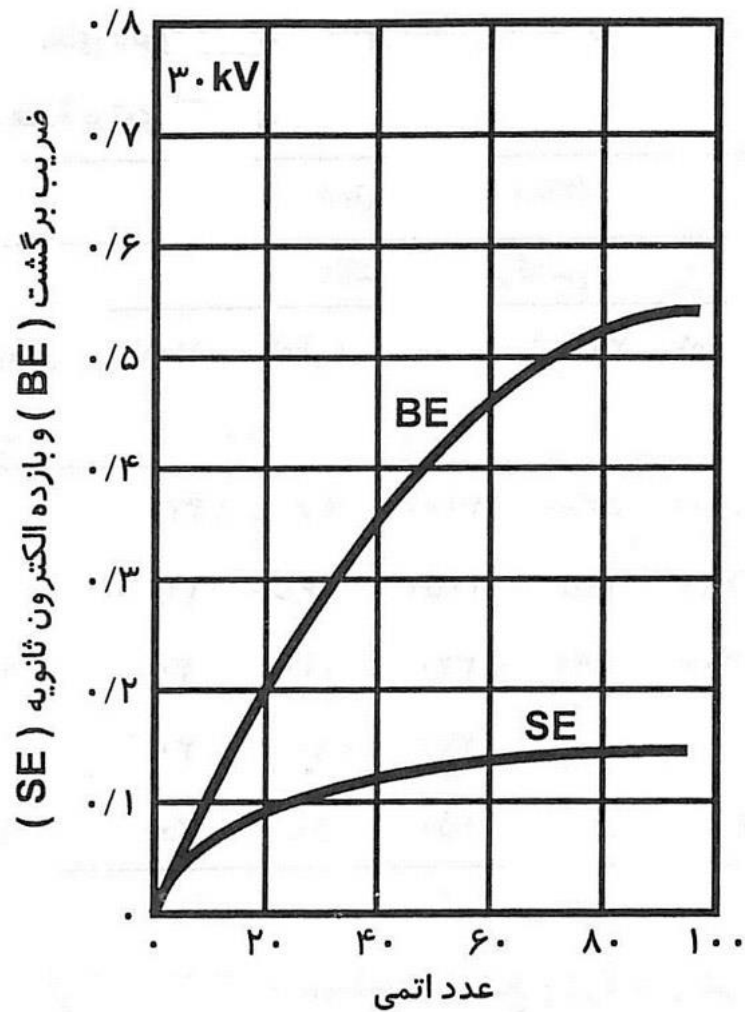


شکل ۵- تصویر (الف) SE و (ب) BSE از سطح مقطع یک ذره SE. برای تصویربرداری در حالت توپوگرافی و مورفولوژی و BSE برای کنتراست توزیع فازی مناسب است [۸].

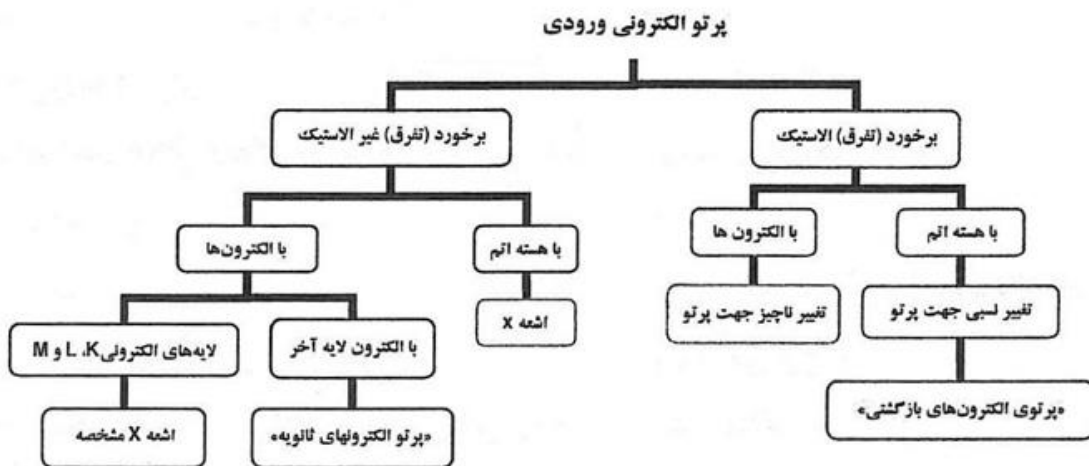
در حالت دوم پراکندگی غیرالاستیکی الکترون‌های پرتوی الکترونی ورودی، خطوط پرتوی X مشخصه (characteristic X-ray) تولید می‌شوند. این وضعیت وقتی رخ می‌دهد که جای خالی الکترون جدا شده از اتم با شرایط خاص به وسیله الکترون دیگر از لایه‌های بالا جایگزین شود. میزان انرژی از دست داده پرتوی الکترونی ورودی در برخورد غیرالاستیک با الکترون‌های اتم می‌تواند برابر با انرژی پیوند الکترون‌های لایه‌های K، L و M باشد و منجر به خروج الکترون لایه‌های مذکور و تابش اشعه X مشخصه شود. همچنین ممکن است به دنبال خروج یک الکترون و جایگزینی جای خالی الکترون با الکترونی از یک تراز انرژی بالاتر، به جای خروج

تفاوت انرژی ترازها به صورت فوتون، انرژی به یک الکترون دیگر انتقال پیدا کند و آن را از اتم خارج کند. این الکترون خروجی به «الکترون اوژه (AE=Auger Electron)» معروف است.

در کنار پراکندگی غیرالاستیکی، پراکندگی‌های الاستیکی هم می‌توانند اتفاق بیافتند. با پراکندگی الاستیک شدید یک پرتوی الکترونی در واکنش با هسته اتم، به خوبی می‌توان امکان تغییر جهت بیش از ۹۰ درجه در مسیر الکترون پرتوی الکترونی را متصور شد. چنین تغییر جهتی می‌تواند امکان بازگشت پرتو به سمت سطح را فراهم سازد. این الکترون‌های بازگشته از داخل نمونه را «الکترون‌های بازگشتی (BSE=Back Scattered Electrons)» می‌نامند. بیشتر الکترون‌های بازگشتی حداقل ۵۰ درصد انرژی الکترون‌های ورودی را دارند (شکل ۴). جالب است که تغییر زاویه در پراکندگی الاستیکی پرتوی الکترونی در برخورد با هسته اتم‌های سنگین، بیشتر از اتم‌های سبک است (شکل ۶). با توجه به تغییر زاویه کمتر پرتوی الکترونی در پراکندگی الاستیکی از هسته با عدد اتمی کمتر، احتمال (یا فراوانی) خروج الکترون‌های بازگشتی از مواد دارای عدد اتمی کمتر (اتم‌های با هسته سبک‌تر) کمتر خواهد بود. به بیان دیگر، در اتم‌های با عدد اتمی کمتر، قبل از این که پرتوی الکترونی با زوایای بیشتر از ۹۰ درجه پراکنده شود و فرصت بازگشت بیابد، به اعماق ماده نفوذ کرده و بخش عمده‌ای از آن جذب می‌شود. اما در اتم‌های با عدد اتمی بیشتر، امکان تغییر زاویه بیش از ۹۰ درجه بیشتر است. در این شرایط، مقدار الکترون‌های بازگشتی بسیار بیشتر از زمانی است که پرتوی الکترونی با یک هسته سبک، به صورت الاستیک برخورد می‌کند. بنابراین مقدار الکترون‌های بازگشتی خارج شده از یک ماده به شدت متأثر از عدد اتمی ماده‌ای است که پرتوی الکترونی به آن وارد شده است. به بیان دقیق‌تر، در تصویر الکترون‌های برگشتی، فازهای حاوی عناصر سنگین، روشن‌تر و فازهای سبک‌تر تیره‌تر دیده می‌شوند [۵]. شکل ۵ (ب) نمونه‌ای از تصویر BSE از سطح مقطع یک ذره را نشان می‌دهد [۸]. اگر پرتوی ورودی با هسته اتم ماده برخورد کند و به صورت غیرالاستیکی پراکنده شود، پرتوی X ساطع می‌شود. شکل ۷ خلاصه‌ای از انواع پراکندگی‌های الکترون‌ها در اثر برهم‌کنش پرتوی الکترونی با نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۶ - ارتباط بین ضریب پراکنده شدن الکترون‌ها و بازده الکترون‌های ثانویه با عدد اتمی مواد [۲]

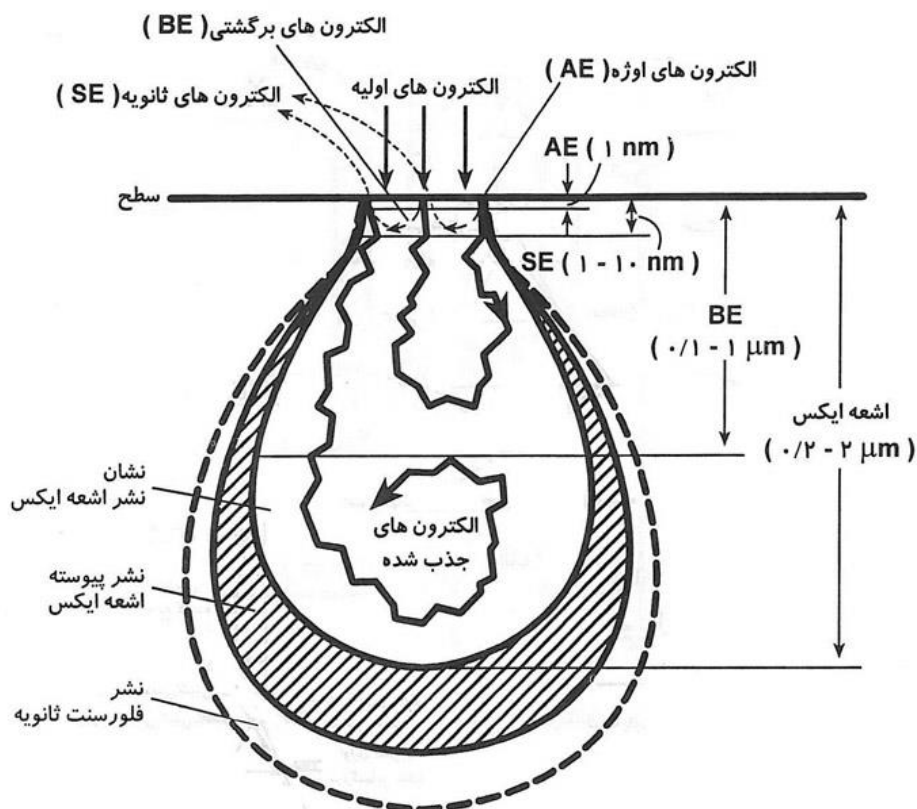


شکل ۷ - خلاصه‌ای از برهم‌کنش الاستیکی و غیرالاستیکی پرتوی الکترونی ورودی و ماده [۵]

با توجه به از دست رفتن انرژی در پراکندگی غیرالاستیک پرتوی الکترونی ورودی در برخورد با الکترون‌های اتم، احتمال خروج الکترون‌های ثانویه از عمق حداکثر ۱۰ نانومتر وجود دارد. از سوی دیگر، در پراکندگی الاستیک پرتوی الکترونی ورودی با هسته اتم، مقدار از دست رفتن انرژی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. بنابراین عمق خروج الکترون‌های بازگشتی بیشتر و در حدود ۲ میکرومتر است. البته باید به خاطر داشت که در هر دو مورد، میزان ساطع شدن الکترون‌های ثانویه و بازگشتی، متأثر از انرژی پرتوی الکترونی ورودی و نوع ماده است [۵].

۴-۱- حجم اندرکنش

با توجه به مکانیزم‌های پراکندگی، می‌توان انتظار داشت که خروج پرتوی الکترون‌های ثانویه از عمق ۱۰ نانومتری و پرتوی الکترون‌های برگشتی از عمق ۲ میکرومتری اتفاق بیفتد. البته این اعداد بسته به شرایط پرتوی الکترونی ورودی و ماده متغیر است. به سادگی می‌توان تصور کرد که پرتوی الکترونی ورودی، به سطح ماده برخورد می‌کند و عمقی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیان سطح و عمق در جمله قبل به وضوح حاکی از وجود یک حجم اندرکنشی (interaction volume) است. شناخت حجم اندرکنشی کار پیچیده‌ای است که علت این پیچیدگی، تنوع و کثرت برخوردهایی است که ممکن است به وقوع بپیوندد. بهترین راه بررسی این حجم، استفاده از اصول ریاضی و آمار است. بر اساس محاسباتی که محققین انجام داده‌اند مشخص شده است که حجم اندرکنشی به صورت گلابی شکل است که در منطقه ورود پرتو به داخل ماده قابل تصور است. این حجم در شکل ۸ به صورت شماتیک نشان داده شده است. خاطر نشان می‌شود که عمق و گستردگی برهم‌کنش به شرایط پرتوی الکترونی و ماده بستگی دارد [۵].



شکل ۸ - عمق نفوذ پدیده‌های مختلف ناشی از برهم‌کنش پرتوی الکترونی و نمونه [۲]

۵- بحث و نتیجه‌گیری

SEM از روش‌های پرکاربرد میکروسکوپی محسوب می‌شود. همانند دیگر میکروسکوپ‌های الکترونی، به دلیل استفاده از پرتوی الکترونی در SEM، حد تفکیک بسیار بالایی قابل دستیابی است. این میکروسکوپ از زمان اختراع آن با پیشرفت‌های چشمگیری همراه بوده است. اساس عملکرد SEM، برهم‌کنش پرتوی الکترونی با ماده است که نشر الکترون‌ها و فوتون‌ها از ماده را به همراه دارد. از جمله مهم‌ترین این پرتوها که برای بررسی ماده استفاده می‌شوند، الکترون‌های ثانویه (برای بررسی مورفولوژی و توپوگرافی) و الکترون‌های برگشتی (با هدف بررسی توزیع فازی) هستند.

1. Goodhew, P. J., Humphreys, J., Beanland, R., "Electron Microscopy and Analysis", 3rd Edition. London: Taylor & Francis, (2001).
۲. ی. خرازی و ا. ش. غفور، "ابزار شناسایی ساختار مواد"، چاپ اول، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۰).
۳. پ. مرعشی، س. کاویانی، ح. سرپولکی و ع. ذوالفقاری، "اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز - ابزار شناسایی دنیای نانو"، ویرایش دوم. چاپ دوم، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۹).
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope.
۵. م. کرباسی، "میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو"، چاپ اول، اصفهان: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، (۱۳۸۸).
6. http://electronmicroscopy.org/images/FE_SEM_Microscope.jpg.
7. <http://academic.uprm.edu/pcaceres/Courses/CHAMINA/HO5.pdf>
8. Sriamornsak, P., Thirawong, N., "Use of back-scattered electron imaging as a tool for examining matrix structure of calcium pectinate", International Journal of Pharmaceutics, Vol. 267, pp. 151–156, (2003).