

میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope - SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) یکی از قدرتمندترین ابزارها برای مطالعه ریخت‌شناسی سطح در مقیاس میکرو و نانو است. این دستگاه به جای نور از پرتو الکترونی متمرکز برای تصویربرداری استفاده می‌کند و به دلیل عمق میدان زیاد و قدرت تفکیک بسیار بالا، تصاویری سه‌بعدی و با جزئیات استثنایی از سطوح نمونه ارائه می‌دهد.

۱. هدف و کاربرد (Purpose and Applications)

SEM با اسکن کردن سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی متمرکز و اندازه‌گیری سیگنال‌های حاصل از برهمکنش الکترون‌ها با نمونه، تصویر تشکیل می‌دهد. این دستگاه در طیف گسترده‌ای از علوم و صنایع کاربرد دارد. کاربردهای اصلی در آزمایشگاه:

کاربرد	زمینه
بررسی ریزساختار فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، شکست‌نگاری	علوم مواد
آنالیز نانوذرات، نانولوله‌ها، نانوسیم‌ها و سایر نانو ساختارها	نانوتکنولوژی
مطالعه بافت‌های زیستی، سلول‌ها، میکروارگانیسم‌ها (پس از آماده‌سازی مناسب)	زیست‌شناسی و پزشکی
شناسایی عیوب ساختاری، بررسی کیفیت پوشش‌ها و اتصالات	صنعت الکترونیک
مطالعه سطوح کانی‌ها، فسیل‌ها و ساختارهای سنگی	زمین‌شناسی
بررسی آثار انگشت، الیاف، ذرات شلیک گلوله	پزشکی قانونی

مزایای کلیدی SEM نسبت به میکروسکوپ نوری: قدرت تفکیک بسیار بالاتر (تا ۰,۴ نانومتر در دستگاه‌های پیشرفته)، عمق میدان بیشتر (بیشتر نمونه در فوکوس است)، و بزرگنمایی قابل کنترل تا بیش از ۲۰۰,۰۰۰ برابر.

۲. اصول عملکرد و اجزای اصلی (Working Principle & Components)

SEM از یک تفنگ الکترونی برای تولید پرتو الکترونی استفاده می‌کند. این پرتو توسط عدسی‌های الکترومغناطیسی متمرکز و توسط سیم‌پیچ‌های اسکن، به صورت نقطه به نقطه روی سطح نمونه حرکت داده می‌شود. برهمکنش الکترون‌های اولیه با نمونه، تولید سیگنال‌های مختلفی می‌کند که توسط آشکارسازهای مناسب جمع‌آوری و به تصویر تبدیل می‌شوند.

اجزای اصلی دستگاه

جدول اجزای اصلی و عملکرد آنها

جزء	توضیح و عملکرد
تفنگ الکترونی (Electron Gun)	منبع تولید الکترون. انواع مختلف شامل تفنگ نشر میدانی (FEG) برای قدرت تفکیک بسیار بالا و تفنگ تنگستنی معمولی.
عدسی‌های کندانسور (Condenser Lenses)	عدسی‌های الکترومغناطیسی که پرتو الکترونی را متمرکز کرده و جریان پرتو (و در نتیجه اندازه نقطه) را کنترل می‌کنند.
عدسی شیئی (Objective Lens)	آخرین عدسی که پرتو را روی نمونه فوکوس می‌کند. مهم‌ترین عدسی از نظر کیفیت تصویر.
سیم‌پیچ‌های اسکن (Scan Coils)	پرتو الکترونی را به صورت شبکه‌ای (رفت و برگشتی) روی سطح نمونه حرکت می‌دهند.
آشکارساز الکترون‌های ثانویه (SE Detector)	الکترون‌های با انرژی پایین (کمتر از ۵۰ eV) که از سطح نمونه گسیل می‌شوند را آشکار می‌کند. اطلاعات توپوگرافی سطح با جزئیات عالی ارائه می‌دهد.
آشکارساز الکترون‌های پس‌پراکنده (BSE Detector)	الکترون‌های با انرژی بالا که از برهمکنش الاستیک با هسته اتم‌ها بازمی‌گردند را آشکار می‌کند. اطلاعات تضاد اتمی (تفاوت عدد اتمی) ارائه می‌دهد.
آشکارساز EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)	اشعه ایکس مشخصه عناصر را آنالیز کرده و ترکیب عنصری نمونه را تعیین می‌کند.
محفظه خلأ (Vacuum Chamber)	فضایی که نمونه در آن قرار می‌گیرد. خلأ بالا از برخورد الکترون‌ها با مولکول‌های هوا جلوگیری می‌کند.
سیستم کامپیوتری و نرم‌افزار	کنترل دستگاه، دریافت سیگنال‌ها، تشکیل تصویر، ذخیره و آنالیز داده‌ها.

انواع حالت‌های خلأ

حالت	توضیح	کاربرد
High Vacuum (HiVac)	خلأ بالا (فشار بسیار پایین) - حالت استاندارد و رایج	نمونه‌های رسانا یا نمونه‌های غیررسانای پوشش داده شده
Low Vacuum (LowVac)	فشار متوسط در محفظه نمونه	نمونه‌های غیررسانا بدون نیاز به پوشش‌دهی. گاز در محفظه بار سطحی را خنثی می‌کند
ESEM (Environmental SEM)	فشار بالاتر تا ۳۰ تور، امکان تصویربرداری از نمونه‌های مرطوب	نمونه‌های زیستی مرطوب، مواد حاوی مایعات و روغن‌ها

۳. تهیه نمونه (Sample Preparation)

تهیه صحیح نمونه برای SEM حیاتی است. کیفیت تصویر نهایی به طور مستقیم به آماده‌سازی مناسب نمونه بستگی دارد.

اصول کلیدی آماده‌سازی

الف) خشک کردن (Drying)

نمونه باید کاملاً خشک باشد، زیرا آب در خلأ تبخیر شده و محفظه را آلوده می‌کند.

روش آماده‌سازی	نوع نمونه
در صورت خشک بودن، نیاز به آماده‌سازی خاصی ندارند	نمونه‌های جامد
خشک کردن در دمای ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد در آون مخصوص	نمونه‌های مایع و نیمه‌جامد
تثبیت شیمیایی (با آلدئیدها)، دهیدراتاسیون با الکل‌های غلیظ، خشک کردن نقطه بحرانی	نمونه‌های زیستی
خشک کردن انجمادی (Freeze Drying)	نمونه‌های حساس به حرارت

علل رد نمونه در مرحله خشک کردن: وجود رطوبت باقیمانده، تبخیر نمونه در خلأ، تغییر شکل شدید در حین خشک شدن، چسبندگی یا ناپایداری نمونه.

ب) رسانا کردن - Coating) برای نمونه‌های نارسانا)

نمونه‌های غیررسانا (مانند پلیمر، شیشه، سرامیک، نمونه‌های زیستی) زیر پرتو الکترونی باردار شده و تصویر مخدوش می‌شود. برای حل این مشکل، سطح نمونه با یک لایه نازک از ماده رسانا پوشانده می‌شود.

روش پوشش	توضیح	کاربرد
طلاپوشی (Sputter Coating)	رایج‌ترین روش. پوشش طلا با ضخامت قابل تنظیم	نمونه‌های نارسانای عمومی
کربن پوشی (Carbon Coating)	پوشش کربن خلوص بالا	آنالیز EDS پیک‌های طلا تداخل ندارند)
پلاتین یا پالادیوم	دانه‌بندی ریزتر برای بزرگنمایی بالا	تصویربرداری با بزرگنمایی بسیار بالا

ضخامت پوشش: معمولاً چند نانومتر تا چند ده نانومتر. پوشش بیش از حد ضخیم جزئیات سطح را می‌پوشاند. علل رد نمونه در مرحله پوشش: آلودگی سطح با روغن یا گرد و غبار، واکنش شیمیایی نمونه با شرایط پوشش، هندسه نامناسب نمونه برای پوشش یکنواخت.

ج) نصب نمونه (Mounting)

نمونه باید محکم روی پایه نمونه (Stub) نصب شود تا در حین جابجایی و تصویربرداری حرکت نکند.

روش نصب	نوع نمونه
چسب کربن یا مس دوطرفه	نمونه‌های جامد
پاشیدن پودر روی چسب + دمیدن هوای فشرده برای حذف ذرات سست	نمونه‌های پودری
چسب رسانا یا خمیر نقره	نمونه‌های بزرگ یا نامنظم
چسباندن بلوک رزین روی پایه	نمونه‌های تثبیت شده در رزین

علل رد نمونه در مرحله نصب: عدم تطابق با ابعاد استاندارد پایه، اتصال سست، ذرات پودر ناپایدار، ارتفاع بیش از حد مجاز، تداخل با حرکت. Stage

خلاصه معیارهای رد نمونه

مرحله	علت رد نمونه
خشک کردن	رطوبت باقیمانده، نمونه چسبنده، تغییر شکل
پوشش	آلودگی سطح، واکنش شیمیایی، پوشش غیریکنواخت
نصب	اندازه بیش از حد، اتصال سست، ارتفاع زیاد، ذرات سست

۴. روش کار گام به گام (Step-by-Step Procedure)

این روش بر اساس SOP های استاندارد دانشگاه‌های معتبر تهیه شده است.

□ مرحله ۰: نکات ایمنی – بسیار حیاتی

خطر	نکته ایمنی
اشعه ایکس	SEM دستگاه تولیدکننده پرتو است. محفظه باید به خوبی محافظت شده باشد. نرخ مواجهه نباید از ۰.۵ mrem/hr در فاصله ۵ سانتی متری از دستگاه تجاوز کند
ولتاژ بالا	هرگز داخل محفظه را با دست خالی لمس نکنید. هنگام کار با ولتاژ بالا احتیاط کنید
قفل‌های ایمنی (Interlocks)	هرگز قفل‌های ایمنی درب محفظه را غیرفعال نکنید
دستکش	هنگام جابجایی نمونه و لمس محفظه از دستکش نیتریل استفاده کنید
محفظه تحت فشار/خلأ	هرگز درب محفظه را هنگامی که تحت فشار است باز نکنید. منتظر بمانید تا خنثی سازی کامل شود

مرحله ۱: آماده‌سازی نمونه (Sample Preparation)

- نمونه را طبق دستورالعمل بخش ۳ آماده کنید (خشک، پوشش‌دهی، نصب روی Stub)
- اطمینان حاصل کنید که نمونه از نظر الکتریکی به پایه نمونه (Stub) متصل است
- با استفاده از گیج ارتفاع، ارتفاع نمونه را بررسی کنید تا با Stage و آشکارسازها تداخل نداشته باشد

مرحله ۲: راه‌اندازی دستگاه (Startup)

- سیستم را روشن کنید – کامپیوتر و کنترلر SEM را روشن کنید
- ثبت اطلاعات در لاگ‌بوک – تاریخ، نام کاربر، نام نمونه، ولتاژ شتاب‌دهنده، ساعت ورود و خروج را ثبت کنید
- ورود به نرم‌افزار – با نام کاربری و رمز عبور وارد نرم‌افزار کنترل شوید
- Stage را به حالت Home برگردانید – در حالی که تصویر دوربین مادون قرمز را زیر نظر دارید، Stage را به موقعیت Home ببرید

مرحله ۳: بارگذاری نمونه و اواکوییشن (Venting & Pumping)

باز کردن محفظه: (Venting)

۱. دکمه **Vent** را در کنسول Vacuum نرم‌افزار بزنید
۲. پیام تأیید نمایش داده می‌شود - **“Really vent the chamber?”** - روی **Yes** کلیک کنید
۳. نشانگر وضعیت Vacuum از سبز → زرد (در حال خنثی‌سازی) → قرمز (محفظة باز است) تغییر می‌کند
۴. پس از اتمام، درب محفظه را با احتیاط باز کنید

نصب نمونه:

۱. نمونه را روی **Stage** قرار دهید (اگر از **Stub** استفاده می‌کنید، پین **Stub** را در محل مناسب روی **Stage** وارد کنید)
۲. اطمینان حاصل کنید که نمونه محکم و پایدار است
۳. درب محفظه را ببندید

ایجاد خلأ: (Pumping)

۱. دکمه **Pump** را در کنسول Vacuum بزنید
۲. سیستم شروع به تخلیه محفظه می‌کند. وضعیت در **Status Console** قابل مشاهده است
۳. حداقل ۱۵ دقیقه صبر کنید تا خلأ به سطح مطلوب برسد
۴. پس از اتمام، نشانگر سبز می‌شود

مرحله ۴: روشن کردن پرتو و تنظیمات اولیه

۱. روشن کردن ولتاژ شتاب‌دهنده: **(HV)** روی دکمه **HV** در کنسول **Electron Column** کلیک کنید
۲. تنظیم ولتاژ شتاب‌دهنده: برای شروع، ۱۰ کیلوولت برای اکثر مواد مناسب است
۳. تنظیم **Working Distance (WD): Stage Z** را تا فاصله کاری حدود ۱۰ میلی‌متر تنظیم کنید
۴. انتخاب آشکارساز: برای شروع، آشکارساز **SE** الکترون ثانویه را انتخاب کنید
۵. بزرگنمایی را کم کنید: با فشار دادن کلید “-” روی صفحه کلید عددی، بزرگنمایی را به کمترین مقدار برسانید

مرحله ۵: فوکوس، تنظیمات و تصویربرداری

تنظیم اولیه تصویر:

۱. برای تینس و کنتراست: با استفاده از کنترل‌های **Detectors Console**، تصویر را روی صفحه تنظیم کنید.
کلید **F9** را برای **Auto Contrast Brightness (ACB)** بزنید
۲. فوکوس: **(Focus)** دکمه سمت راست ماوس را نگه داشته و موس را چپ/راست حرکت دهید

۳. بزرگنمایی را افزایش دهید: از کلید “+” روی صفحه کلید عددی استفاده کنید

تنظیمات پیشرفته برای بزرگنمایی بالا:

کلید میانبر	روش تنظیم	پارامتر
دکمه سمت راست ماوس	مانند مرحله قبل – فقط حرکات ظریف	فوکوس دقیق (Fine Focus)
Shift + دکمه سمت راست	کلید Shift + دکمه سمت راست ماوس	استیگماتیسم (Stigmator)
F9	تنظیم دستی یا Auto	برایتنس / کنتراست

اصل طلایی: ابتدا در بزرگنمایی پایین فوکوس کنید، سپس بزرگنمایی را افزایش دهید و دوباره فوکوس کنید. هنگام کار در بزرگنمایی بالا، هرگز از فوکوس درشت استفاده نکنید.

مرحله ۶: انتخاب بهینه ولتاژ شتاب دهنده

ولتاژ شتاب دهنده باید بر اساس نوع نمونه انتخاب شود:

توضیح	ولتاژ شتاب دهنده پیشنهادی	نوع نمونه
کاهش آسیب و شارژ سطحی	۲-۶ کیلوولت	پلیمر، شیشه، نمونه‌های حساس به پرتو
نتایج بهینه در مطالعات تجربی	۵ کیلوولت	فلزات سبک (آلومینیوم، برنج)
نفوذ بیشتر برای جزئیات بهتر	> ۱۰ کیلوولت	فلزات سنگین (مس، نقره، قلع)
قدرت تفکیک بالا	۳۰ کیلوولت	نمونه‌های رسانا (طلا، مس)

مرحله ۷: تنظیم Spot Size

Spot Size (اندازه نقطه پرتو) تأثیر مستقیم بر قدرت تفکیک و نسبت سیگنال به نویز دارد:

Spot Size	کاربرد	مزایا	معایب
کوچک (۳-۴)	بزرگنمایی بالا، قدرت تفکیک بالا	تصاویر شارپ، جزئیات ریز	نسبت سیگنال به نویز پایین تر
متوسط (۵-۶)	تصویربرداری عمومی – نقطه شروع خوب	تعادل بین کیفیت و نویز	—
بزرگ (۶-۷)	بزرگنمایی پایین، آنالیز EDS	سیگنال قوی، نویز کم	قدرت تفکیک پایین

نکته: هر زمان Spot Size را تغییر دادید، برای بهینه‌سازی کیفیت تصویر، باید Contrast و Brightness را دوباره تنظیم کنید.

مرحله ۸: اصلاح استیگماتیسم (Astigmatism Correction)

استیگماتیسم باعث تاری و وابستگی فوکوس به جهت می‌شود. برای اصلاح:

۱. در بزرگنمایی بالا (بیش از ۵۰۰۰ برابر) کار کنید
۲. از نمونه‌ای با جزئیات ریز (مانند نانوذرات) استفاده کنید
۳. با تمرکز از روی فوکوس (**Overfocus**) به زیر فوکوس (**Underfocus**) عبور کنید
۴. اگر جهت تاری تغییر کرد (عمودی \leftrightarrow افقی)، استیگماتیسم وجود دارد
۵. Stigmator X و Y را تنظیم کنید تا تاری در تمام جهات یکسان شود

مرحله ۹: ذخیره تصویر (Image Capture)

۱. تصویر را با استفاده از دکمه **Snapshot (F2)** ذخیره کنید
۲. فرمت ذخیره‌سازی **TIFF**: برای آنالیز بعدی، **JPEG** برای گزارش‌ها
۳. اطلاعات مرتبط (مقیاس بزرگنمایی، ولتاژ شتاب‌دهنده، WD) را یادداشت کنید

مرحله ۱۰: اتمام کار و خاموش کردن (Shutdown)

۱. **HV** را خاموش کنید - دکمه **HV** را بزنید تا پرتو خاموش شود
۲. **Stage** را به **Home** برگردانید
۳. محفظه را **Vent** کنید - در صورت نیاز به خارج کردن نمونه
۴. داده‌ها را ذخیره و نرم‌افزار را ببندید
۵. کامپیوتر را خاموش کنید
۶. لاگ‌بوک را تکمیل کنید - زمان خروج و مشاهدات را ثبت کنید

۴. پردازش تصویر و آنالیز نرم‌افزارهای رایج

کاربرد	نرم‌افزار
کنترل و تصویربرداری در دستگاه‌های FEI/Thermo Fisher	xT Microscope Control
آنالیز رایگان تصاویر (SEM اندازه‌گیری، شمارش ذرات)	ImageJ / Fiji
آنالیز سطح و زبری، پردازش تصویر رایگان	Gwyddion
آنالیز عنصری و تهیه نقشه‌های توزیع عناصر	EDS Software

اندازه‌گیری‌های رایج

اندازه‌گیری	روش
اندازه ذرات (Particle Size)	رسم خط بر روی ذره - نرم‌افزار طول را محاسبه می‌کند
زبری سطح (Surface Roughness)	آنالیز توپوگرافی (در صورت کالیبراسیون صحیح)
توزیع اندازه ذرات	استفاده از ابزارهای Particle Analysis
ترکیب عنصری	آنالیز - EDS طیف و نقشه عنصری

آنالیز EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

این قابلیت امکان شناسایی عناصر موجود در نمونه را فراهم می‌کند:

پارامتر	توضیح
نوع سیگنال	اشعه ایکس مشخصه هر عنصر
کاربرد	شناسایی عناصر از بور (B) تا اورانیوم (U)
عمق آنالیز	حدود ۱-۳ میکرومتر
نوع آنالیز	نقطه‌ای (Point)، خطی (Line Scan)، نقشه‌برداری (Mapping)
مدت زمان آنالیز	حدود ۶۰ دقیقه برای SEM + EDS کامل

۶. عیب‌یابی مشکلات رایج (Troubleshooting)

مشکل	علت احتمالی	راه‌حل
تصویر تاری یا نویز زیاد	Spot Size خیلی کوچک، Gains پایین	Spot Size را افزایش دهید، Gains را افزایش دهید
شارژ سطحی (نقاط روشن/تاریک ناگهانی)	نمونه نارسا	نمونه را با طلا بپوشانید، ولتاژ را کاهش دهید، سرعت اسکن را افزایش دهید
انحراف پرتو در لبه نمونه	نمونه ارتفاع زیاد	WD را تنظیم کنید، نمونه را با زاویه کمتری نصب کنید
تصویر در فوکوس نیست	فوکوس نادرست، استیگماتیسم	فوکوس را دوباره تنظیم کنید، استیگماتیسم را اصلاح کنید
نویز پس‌زمینه بالا	ولتاژ خیلی کم، Spot Size خیلی کوچک	ولتاژ را افزایش دهید، Spot Size را افزایش دهید
حرکت تصویر در حین اسکن	نمونه لق است، Stage ناپایدار	نمونه را محکم کنید، Stage را بررسی کنید
تشخیص داده نشدن عناصر در EDS	ولتاژ برای تحریک عناصر خیلی کم	ولتاژ شتاب‌دهنده را افزایش دهید (≥ 15 kV برای فلزات سنگین)

۷. نکات کلیدی برای موفقیت (Key Principles)






توضیح	قانون
وجود آب در خلأ محفظه را آلوده و تصویر را مخدوش می کند	✓ نمونه کاملاً خشک
نمونه های نارسانا را با طلا یا کربن بپوشانید تا از شارژ سطحی جلوگیری شود	✓ نمونه رسانی
فلزات سنگین → ۳۰-۱۰ kV ، مواد آلی/پلیمرها → ۶-۲ kV	✓ انتخاب ولتاژ مناسب
Spot های کوچک (۳-۴) برای وضوح بالا، Spot های بزرگتر (۶-۵) برای بزرگنمایی پایین و EDS	✓ Spot Size بهینه
ابتدا در بزرگنمایی پایین (۵۰۰-۱۰۰) Xفوکوس کنید، سپس بزرگنمایی را افزایش دهید	✓ فوکوس در بزرگنمایی پایین
هرگز قفل های ایمنی را غیرفعال نکنید. از دستکش استفاده کنید	✓ رعایت ایمنی
همیشه لاگ بوک را کامل کنید	✓ ثبت اطلاعات

۸. چک لیست سریع برای کاربران

مرحله	اقدام	انجام شد؟
۱	نمونه خشک شده و روی Stub نصب شده است؟	<input type="checkbox"/>
۲	نمونه نارسانا پوشش داده شده است (طلا/کربن)؟	<input type="checkbox"/>
۳	لاگ بوک پر شده است (نام، نمونه، تاریخ)؟	<input type="checkbox"/>
۴	Stage در موقعیت Home است و ارتفاع با گیج بررسی شده؟	<input type="checkbox"/>
۵	نمونه در محفظه قرار داده شده و درب بسته شده است؟	<input type="checkbox"/>
۶	سیستم Pump شده و خلأ به سطح مطلوب رسیده است (> ۱۵ دقیقه)؟	<input type="checkbox"/>
۷	HV روشن و ولتاژ شتاب دهنده مناسب انتخاب شده است؟	<input type="checkbox"/>
۸	Working Distance حدود ۱۰ میلی متر تنظیم شده است؟	<input type="checkbox"/>
۹	فوکوس و استیگماتیسم در بزرگنمایی بالا اصلاح شده است؟	<input type="checkbox"/>
۱۰	Brightness و Contrast با (F9) Auto یا دستی تنظیم شده است؟	<input type="checkbox"/>
۱۱	تصویر با کیفیت مطلوب ذخیره شده است (TIFF)؟	<input type="checkbox"/>
۱۲	پس از اتمام، HV خاموش و Stage به Home برگشته است؟	<input type="checkbox"/>
۱۳	لاگ بوک تکمیل و زمان خروج ثبت شده است؟	<input type="checkbox"/>

✦ جمع بندی نهایی

میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از قدرتمندترین ابزارها برای مطالعه ریزساختار سطوح در مقیاس میکرو و نانو است. با رعایت اصول زیر می توانید تصاویری با کیفیت و داده های قابل اعتمادی به دست آورید:

۱.  آماده‌سازی صحیح نمونه - نمونه باید خشک، رسانا و محکم نصب شده باشد
۲.  انتخاب بهینه پارامترها - ولتاژ و Spot Size را بر اساس نوع نمونه تنظیم کنید
۳.  اصلاح استیگماتیسم و فوکوس - در بزرگنمایی بالا کار کنید و استیگماتیسم را با Stigmator اصلاح کنید
۴.  استفاده از آشکارسازهای مناسب SE - برای توپوگرافی، BSE برای تضاد اتمی، EDS برای آنالیز عنصری
۵.  رعایت ایمنی و ثبت اطلاعات - از قفل‌های ایمنی محافظت کنید و لاگ‌بوک را کامل کنید