

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

# بررسی اثر تابش‌های چشمه‌ی $^{192}\text{Ir}$ بر تشکیل نانوساختارهای اکسید روی

نگارنده: محمد کاظم صادقی

استاد راهنما

دکتر مسلم سوهانی

استاد مشاور

دکتر مرتضی ایزدی فرد

شهریور ۱۳۹۷



## شکر و قدردانی

از تمام اساتید و دوستانی که در طول دوره تحصیلات تکمیلی همواره به بنده کمک کردند بسیار متشکرم. از استاد دکتر مصطفی عباسی، دکتر محمد رضا شجاعی و دکتر حسین توکلی ضهران که در این مدت از راهنمایی ها و کمک هایشان دریغ نکردند و همچنین از استاد کرامت الله دکتر حسن حس آبادی که الگوی رفتار خوش و تمثیل کامل این ضرب المثل "هر چه دخت پیاور تر سرب زیر تر" بودند بسیار سپاس گزارم.

همچنین از جناب آقای مهندس شهیدی و آقای مهندس عسکری که از هیچ گلی دریغ نکردند و در تمامی مراحل مشورت و کمک هایشان بسیار سودمند بود بسیار متشکرم.

از همه مهم تر از استاد مشاورم جناب استاد دکتر مرتضی ایزدی فرد که با صبر و حوصله بنده را حیات می کردند کمال تشکر را دارم. در آخر نیز از آقای دکتر مسلم سوخانی که بنده را راهنمایی کردند و با اخلاق خوب و صبر و حوصله همیشه به بنده امید می دادند و مثل پدری مهربان رفتار می کردند تشکر می کنم.



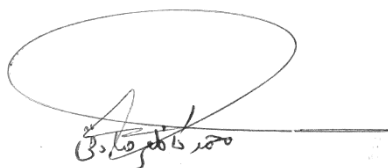
## تعمدنامه

اینجانب محمد کاظم صادقی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی اثر تابش های چشمه‌ی <sup>192</sup>Ir بر تشکیل نانوساختارهای اکسید روی تحت راهنمایی دکتر مسلم سوهانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University Of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیر گذار بوده است در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۹۷/۰۶/۱۳

امضای دانشجو



### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تابش‌های یونساز، به ویژه یون‌های سنگین می‌توانند تغییرات شدیدی در ویژگی‌های ماده ایجاد کنند. ذرات بارداری که از ماده می‌گذرند، بر اثر برهم‌کنش‌های کولنی، گسیل تابش ترمزی، برهم‌کنش‌های هسته‌ای و در انرژی‌های خیلی زیاد با گسیل تابش چرنکوف انرژی از دست می‌دهند. وقتی یک ذره‌ی پرانرژی همانند الکترون یا یون به اتم‌های هدف برخورد می‌کند، اثرات مختلفی می‌تواند رخ دهد. اثرات این برخورد عبارتند از: برانگیختگی و یونش اتم‌ها، شکستن پیوندها، تولید فونون‌های نوسانی، جابه‌جایی اتم‌ها در هدف‌های حجیم، کندوپاش<sup>۱</sup> اتم‌ها از سطح و گسیل فوتون‌ها، برای مثال پرتوهای ایکس. در نتیجه می‌توان از این روش برای تولید مواد با خواص جدید و تأثیر بر رشد ساختارهای جدید مثلاً نانوساختارها استفاده کرد.

پرتوهای حاصل از چشمه‌های رادیواکتیو به علت دارا بودن انرژی و خاصیت یونسازی می‌توانند برای تابش‌دهی در موارد مختلف استفاده شوند. ما با استفاده از دو چشمه‌ی مسطح امرسیوم و سزیم سطح نمونه‌های از جنس فلز روی را در آزمایش‌های مختلف با زمان‌های متفاوت تابش‌دهی کردیم. آزمایشات در سه بخش انجام شد. بخش اول در دمای ۳۰ الی ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. آزمایش دوم فقط با هدف مشاهده‌ی میزان رشد نانوساختار ZnO در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. آزمایش سوم نیز به وسیله‌ی کوره تیوبی و در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد و در هر مرحله سه نمونه در کوره قرار گرفت که یک نمونه با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷، نمونه‌ی دوم با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شدند و نمونه سوم بدون تابش و فقط به عنوان شاهد استفاده شد. در آنالیز نمونه‌ها نیز از طیف رامان، آنالیز XRD، آنالیز EDAX و تصاویر FESEM استفاده شد.

---

<sup>1</sup> Sputtering

**کلمات کلیدی:** دُر جذب شده، رشد نانوساختار ZnO ، کد Geant4، چشمه ی  $^{192}\text{Ir}$ ، پهنای

لبه ی دُر، ماسک جاذب

## فهرست مقالات مستخرج

۱- صادقی، محمدکاظم و سوهانی، مسلم؛ بررسی تأثیر ماسک به پهنای لبه‌ی دُز حاصل از

چشمه‌ی بتا، بیست و چهارمین کنفرانس هسته‌ای ایران، اسفند ۱۳۹۶

## فهرست مطالب

ل	فهرست جداول
م	فهرست اشکال
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ تاریخچه .....
۶	۲-۱ نانوساختارها .....
۷	۳-۱ اکسید روی .....
۸	۴-۱ تابش های یونساز .....
۸	۵-۱ اثر تابش بر نانومواد .....
۹	۶-۱ چشمه ی $^{192}\text{Ir}$ .....
۱۱	۷-۱ چشمه ی $^{90}\text{Sr}$ .....
۱۲	۸-۱ اهداف .....
۱۳	فصل دوم: روش های رشد و آنالیز نانوساختارها
۱۴	۱-۲ مقدمه .....
۱۴	۲-۲ روش های سنتز نانومواد .....
۱۶	۱-۲-۲ انباشت بخار فیزیکی (PVD) .....
۱۷	۲-۲-۲ انباشت بخار شیمیایی (CVD) .....
۲۲	۳-۲-۲ روش الکتروشیمیایی انباشت لایه ی نازک .....
۲۲	۴-۲-۲ انباشت الکترولیتی کاندی .....
۲۳	۵-۲-۲ انباشت بدون الکتروود .....

۲۳	..... ۶-۲-۲ لیتوگرافی
۲۳	..... ۷-۲-۲ آسیاب کردن
۲۴	..... ۸-۲-۲ گرم کردن با امواج ماکروویو
۲۵	..... ۲-۲ برهم کنش های الکترون با سطح
۲۸	..... ۴-۲ روش های آنالیز سطح
۲۹	..... ۱-۴-۲ طیف سنج پراش پرتو ایکس (XRD)
۳۱	..... ۲-۴-۲ طیف سنجی رامان (Raman Spectroscopy)
۳۲	..... ۳-۴-۲ میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)
۳۴	..... ۴-۴-۲ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

## فصل سوم: شبیه سازی ، کد شبیه ساز Geant4، محاسبات دز جذبی و شبیه سازی ماسک

۳۷	جاذب در پرتو دهی رادیواکتیو
۳۸	..... ۱-۳ مقدمه
۳۹	..... ۲-۳ انواع مدل ها
۴۰	..... ۳-۳ ضرورت و مزایای استفاده از شبیه سازی
۴۱	..... ۴-۳ انواع شبیه سازی
۴۴	..... ۵-۳ مراحل اساسی یک مطالعه ی شبیه سازی
۴۸	..... ۶-۳ روش مونت کارلو
۴۹	..... ۷-۳ ابزار مونت کارلوی Geant4
۵۱	..... ۱-۷-۳ تاریخچه ی Geant4
۵۱	..... ۲-۷-۳ خلاصه ای از طرح Geant4
۵۳	..... ۸-۳ شبیه سازی و محاسبات دُز جذبی
۶۷	..... ۹-۳ شبیه سازی ماسک جاذب در پرتو دهی رادیواکتیو

۶۸.....	۱-۹-۳ تعاریف و محاسبات
۶۹.....	۲-۹-۳ شبیه سازی هندسه و چشمه رادیواکتیو
۷۹.....	۱۰-۳ جمع بندی

## ۸۱ فصل چهارم: آزمایشات و آنالیز نمونه ها

۸۲.....	۱-۴ آماده سازی نمونه ها
۸۳.....	۲-۴ شرح آزمایش
۸۳.....	۱-۲-۴ آزمایش اول
۸۶.....	۲-۲-۴ آزمایش دوم
۸۷.....	۳-۲-۴ آزمایش سوم
۹۰.....	۳-۴ تحلیل و آنالیز نمونه ها
۹۰.....	۱-۳-۴ آنالیز XRF
۹۱.....	۲-۳-۴ آنالیز XRD
۹۸.....	۳-۳-۴ طیف رامان
۱۰۳.....	۴-۳-۴ آنالیز پنجم: تصاویر FESEM
۱۲۴.....	۵-۳-۴ آنالیز EDAX
۱۲۵.....	۴-۴ جمع بندی

## ۱۲۷ پیوست ها

۱۲۸.....	۱-۵ پیوست ۱: نتیجه ی آنالیز XRF
۱۲۹.....	۲-۵ پیوست ۲: نتایج آنالیز EDAX
۱۳۱.....	۱-۲-۵ نمونه ی S105
۱۳۲.....	۲-۲-۵ نمونه ی S110
۱۳۴.....	۳-۲-۵ نمونه ی S115
۱۳۵.....	۴-۲-۵ نمونه ی S120

۱۳۷ .....	S125	۵-۲-۵ نمونه ی
۱۳۸ .....	S130	۶-۲-۵ نمونه ی
۱۴۰ .....	S135	۷-۲-۵ نمونه ی
۱۴۱ .....	S140	۸-۲-۵ نمونه ی
۱۴۲ .....	S145	۹-۲-۵ نمونه ی
۱۴۴ .....	S155	۱۰-۲-۵ نمونه ی
۱۴۵ .....	S209	۱۱-۲-۵ نمونه ی
۱۴۷ .....	S210	۱۲-۲-۵ نمونه ی
۱۴۸ .....	S211	۱۳-۲-۵ نمونه ی
۱۵۰ .....	S221	۱۴-۲-۵ نمونه ی
۱۵۱ .....	S222	۱۵-۲-۵ نمونه ی
۱۵۳ .....	S223	۱۶-۲-۵ نمونه ی
۱۵۴ .....	S235	۱۷-۲-۵ نمونه ی
۱۵۶ .....	S236	۱۸-۲-۵ نمونه ی
۱۵۷ .....	S237	۱-۲-۵ نمونه ی



## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: روش های تحلیل سطح و اطلاعاتی که می توانند به دست بدهند. .... ۲۹
- جدول ۱-۴: مشخصات نمونه های استفاده شده در آزمایش اول و شرایط مراحل انجام آزمایش. .... ۸۶
- جدول ۲-۴: مشخصات نمونه های استفاده شده در آزمایش دوم و شرایط انجام آزمایش. .... ۸۷
- جدول ۳-۴: مشخصات نمونه های استفاده شده در آزمایش سوم و شرایط آزمایش. زمان رشد یک ساعت بوده است. .... ۸۹
- جدول ۴-۴: تحلیل عنصری بدست آمده از آنالیز XRF نمونه خام پولیش خورده با کد S110. .... ۹۰
- جدول ۵-۴: نتایج آنالیز XRD نمونه ها. .... ۹۶
- جدول ۶-۴: جدول اندازه بلورک های ZnO رشد یافته در نمونه هایی که در طیف XRD آنها صفحات ZnO مشاهده شده است. در تمام نمونه های داخل جدول دوقله اول (زاویه های ۳۱ و ۳۴ درجه) در محاسبات در نظر گرفته شده اند. .... ۹۷
- جدول ۷-۴: تحلیل عنصری EDAX نمونه ها. .... ۱۲۴

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: اولین عکس گرفته شده با X-ray که رونتگن از دست همسرش گرفت. انگشتر وی در این عکس کاملاً مشخص است [۲]..... ۳
- شکل ۲-۱: ساعد پیر کوری و آسیبی که ناشی از تابش رادیوم بر روی آن بوجود آمد [۱]..... ۴
- شکل ۳-۱: لامپ اشعه X ساخته شده توسط کمپانی زیمنس و هالکس [۶]..... ۵
- شکل ۴-۱: واپاشی  $^{192}\text{Ir}$  به ترازهای برانگیخته  $^{192}\text{Pt}$  و  $^{192}\text{Os}$  ..... ۱۰
- شکل ۵-۱: نمودار واپاشی  $^{90}\text{Sr}$  به  $^{90}\text{Y}$  و سپس واپاشی به  $^{90}\text{Zr}$  [۳۴]..... ۱۱
- شکل ۱-۲: روش های مختلف بکار گرفته شده برای تهیه نانومواد اکسید فلزی [۴۱]..... ۱۵
- شکل ۲-۲: الگویی از یک سیستم PVD تبخیری. چشمه و زیرلایه در محفظه خلاء قرار گرفته اند [۴۲]..... ۱۷
- شکل ۳-۲: لایه نشانی در فرآیند CVD [۴۴]..... ۱۸
- شکل ۴-۲: شکل الکترون پراکنده شده ی برگشتی..... ۲۶
- شکل ۵-۲: سمت راست توصیفی از تولید اشعه ی X از ماده و سمت چپ گسیل الکترون اوزه را نشان می دهد..... ۲۷
- شکل ۶-۲: پدیده هایی که در اثر تابش پرتوی الکترونی به ماده صورت می پذیرد..... ۲۸
- شکل ۷-۲: پراش پرتوی ایکس توسط یک بلور..... ۳۱
- شکل ۸-۲: اجزای یک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM). انحرافات عمودی اهرم بازویی با انحراف انعکاسی نور لیزر از پشت کانتیلیور، آشکار می شود..... ۳۶
- شکل ۱-۳: مراحل یک مطالعه ی شبیه سازی ..... ۴۵

شکل ۳-۲: هندسه ی مسأله. مکعب بزرگ جهان و صفحه ی کوچک قرار گرفته در وسط هدف Zn است؛ چشمه نیز در ۱ cm از هدف بر روی محور Z تعیین شده است. ۵۶.....

شکل ۳-۳: هندسه ی مسأله بعد از اجرا شدن برنامه با چشمه ی Ir. پرتوهای سبز رنگ گاما و قرمزها الکترون هستند. ۶۰.....

شکل ۳-۴: خروجی رسم شده داده های شبیه سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش بندی  $50^*50$  برای سطح هدف تولید شده اند. در این شبیه سازی مقدار دُز جذب شده گاما صفر بدست آمده است. ۶۲.....

شکل ۳-۵: خروجی رسم شده داده های شبیه سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش بندی  $20^*20$  برای سطح هدف تولید شده اند. در این شبیه سازی مقدار دُز جذب شده گاما در هدف صفر بدست آمده است. ۶۳.....

شکل ۳-۶: خروجی رسم شده داده های شبیه سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش بندی  $10^*10$  برای سطح هدف تولید شده اند. در این شبیه سازی مقدار دُز جذب شده گاما در هدف صفر بدست آمده است. ۶۳.....

شکل ۳-۷: خروجی رسم شده داده های شبیه سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی متری از هدف Zn قرار گرفته است. در این شبیه سازی ماده ی جهان هوا در نظر گرفته شده است. این مقادیر با مش بندی  $50^*50$  برای سطح هدف تولید شده اند. مقدار دُز جذب شده گاما روی هدف صفر بدست آمده است. ۶۴.....

شکل ۳-۸: خروجی رسم شده داده های شبیه سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه ی مسطح  $^{137}\text{Cs}$  با قطر ۲/۲ cm در حالتی که چشمه در یک سانتی متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش بندی  $50^*50$  برای سطح هدف تولید شده اند. در این شبیه سازی مقدار دُز جذب شده گاما صفر بدست آمده است. ۶۴.....

شکل ۳-۹: نمایی از هندسه ی شبیه سازی. مکعب بزرگ جهان، چشمه (C)، صفحه ی قرار گرفته در وسط (A) هدف و مکعب قرار گرفته بین چشمه و هدف (B) ماسک است. ۶۹.....

- شکل ۳-۱۰: میزان پهنای لبه ی دُز به پارامتر  $A$ . پارامتر  $A$  نسبت میزان فاصله ی چشمه تا هدف به فاصله ی ماسک تا هدف است. چشمه ی نقطه ای در فاصله ی  $10\text{ cm}$  از هدف و ضخامت ماسک  $4\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. .... ۷۱
- شکل ۳-۱۱: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=10$ . .... ۷۲
- شکل ۳-۱۲: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=5$ . .... ۷۲
- شکل ۳-۱۳: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=1.25$ . .... ۷۳
- شکل ۳-۱۴: بستگی پهنای لبه ی دُز به ضخامت ماسک برای  $A=2$ . .... ۷۳
- شکل ۳-۱۵: مقایسه بین چشمه ی نقطه ای با چشمه های مسطح با قطر ۲ الی ۵ میلیمتر. پارامتر  $A$  نسبت فاصله ی چشمه تا هدف به فاصله ی ماسک تا هدف است. چشمه در فاصله ی  $10\text{ cm}$  از هدف قرار گرفته و ضخامت ماسک  $4\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. .... ۷۵
- شکل ۳-۱۶: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۲ میلیمتر، ماسک با ضخامت ۴ میلیمتر و  $A=5$ . .... ۷۶
- شکل ۳-۱۷: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۳ میلیمتر، ماسک با ضخامت ۴ میلیمتر و  $A=5$ . .... ۷۶
- شکل ۳-۱۸: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۴ میلیمتر، ضخامت ماسک ۴ میلیمتر و  $A=5$ . .... ۷۷
- شکل ۳-۱۹: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلیمتر، ضخامت ماسک ۴ میلیمتر و  $A=5$ . .... ۷۷
- شکل ۳-۲۰: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلیمتر، ضخامت ماسک ۴ میلیمتر و  $A=10$ . .... ۷۸
- شکل ۳-۲۱: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی. چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلیمتر، ضخامت ماسک ۴ میلیمتر و  $A=1.43$ . .... ۷۸
- شکل ۴-۱: دستگاه استفاده شده در آزمایش اول و دوم به همراه کپسول اکسیژن و نیتروژن. .... ۸۴

- شکل ۴-۲: مخزن و نحوه ی قرارگیری نمونه ها داخل آن قبل از تابش دهی با چشمه ی سزیم  
 ۱۳۷..... ۸۴
- شکل ۴-۳: چشمه ی Am در حال تابش دهی به سطح نمونه. چشمه دقیقاً در بالای نمونه ی مورد  
 نظر قرار گرفته است و نمونه سمت چپ تابش نمی بیند. .... ۸۵
- شکل ۴-۴: کوره ی تیوبی استفاده شده در آزمایش. .... ۸۸
- شکل ۴-۵: دستگاه XRD مدل D8 ADVANCE مستقر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان در  
 حال آنالیز نمونه ها. .... ۹۱
- شکل ۴-۶: نمودار پیک های XRD نمونه ی S110. در شکل پیک های صفحات Zn مشخص شده  
 است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی شود. .... ۹۲
- شکل ۴-۷: نمودار پیک های XRD نمونه ی S120. در شکل پیک های صفحات Zn مشخص شده  
 است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی شود. .... ۹۲
- شکل ۴-۸: نمودار پیک های XRD نمونه ی S135. در شکل پیک های صفحات Zn مشخص شده  
 است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی شود. .... ۹۳
- شکل ۴-۹: نمودار پیک های XRD نمونه ی S150. در شکل پیک های صفحات Zn مشخص شده  
 است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی شود. .... ۹۳
- شکل ۴-۱۰: نمودار پیک های XRD نمونه های S209، S210 و S211. در شکل پیک های صفحات  
 Zn با رنگ آبی مشخص شده است. در این نمونه ها پیک ZnO مشاهده نمی شود. .... ۹۴
- شکل ۴-۱۱: نمودار پیک های XRD نمونه های S221، S222 و S223. در شکل پیک های صفحات  
 ZnO با رنگ قرمز و پیک های مربوط به Zn با رنگ آبی مشخص شده است. .... ۹۴
- شکل ۴-۱۲: نمودار پیک های XRD نمونه های S235، S236 و S237. در شکل پیک های صفحات  
 ZnO با رنگ قرمز و پیک های Zn با رنگ آبی مشخص شده است. .... ۹۵
- شکل ۴-۱۳: دستگاه طیف سنج رامان دانشگاه صنعتی شاهرود. برای طیف گیری رامان نمونه ها از  
 این دستگاه استفاده شده است. .... ۹۸
- شکل ۴-۱۴: طیف رامان نمونه ای که فقط پولیش داده شده است. .... ۹۹

شکل ۴-۱۵: طیف رامان نمونه S160 که تابش دهی نشده و فقط ۱۵ ساعت در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  در جو اکسیژن قرار گرفته است. .... ۹۹

شکل ۴-۱۶: طیف رامان نمونه S209 که تابش دهی نشده و فقط ۱ ساعت در کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  در جو اکسیژن بوده است. .... ۱۰۰

شکل ۴-۱۷: طیف رامان نمونه S210 که ۱۶ ساعت با چشمه ی سزیم  $137$  تابش دهی شده، سپس ۱ ساعت در کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  در جو اکسیژن بوده است. .... ۱۰۰

شکل ۴-۱۸: طیف رامان نمونه S211 که ۱۶ ساعت با چشمه ی امرسیوم  $241$  تابش دهی شده، سپس ۱ ساعت در کوره با دمای  $300^{\circ}\text{C}$  در جو اکسیژن بوده است. .... ۱۰۱

شکل ۴-۱۹: طیف رامان نمونه S223 که تابش دهی نشده و فقط ۱ ساعت در کوره با دمای  $700^{\circ}\text{C}$  در جو اکسیژن بوده است. .... ۱۰۱

شکل ۴-۲۰: طیف رامان ZnO. .... ۱۰۲

شکل ۴-۲۱: میکروسکوپ FESEM استفاده شده جهت تهیه ی تصاویر FESEM از نمونه ها. .... ۱۰۴

شکل ۴-۲۲: دستگاه مورد استفاده برای لایه نشانی طلا بر روی نمونه ها جهت آماده سازی برای گرفتن تصاویر FESEM. .... ۱۰۴

شکل ۴-۲۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S110. این نمونه فقط پولیش خورده، تحت تابش نبوده و شرایط رشد را نداشته است. .... ۱۰۵

شکل ۴-۲۴: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S105. این نمونه ۴ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم  $137$  تابش دهی شده و سپس ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۰۶

شکل ۴-۲۵: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S115. این نمونه تابش دهی نشده است و فقط ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۰۷

شکل ۴-۲۶: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S120. این نمونه ۱۱ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم  $137$  تابش دهی شده و سپس ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۰۸

شکل ۴-۲۷: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S140. این نمونه تابش ندیده و فقط ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۰۹

شکل ۴-۲۸: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S130. این نمونه ۱۱ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم  $137^\circ\text{C}$  تابش دهی شده و سپس ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $100^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۰

شکل ۴-۲۹: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S145. این نمونه تابش ندهده و فقط ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $100^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۱

شکل ۴-۳۰: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S125. این نمونه ۴ ساعت در دمای محیط با چشمه ی امرسیوم  $241^\circ\text{C}$  تابشدهی شده و سپس ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۲

شکل ۴-۳۱: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(1\mu\text{m})$ ,  $b(2\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S135. این نمونه تابش ندیده و فقط ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $30^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۳

شکل ۴-۳۲: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(500\text{nm})$ ,  $b(1\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S155. این نمونه هیچگونه تابش رادیواکتیوی ندیده و فقط ۱۵ ساعت در جو اکسیژن با دمای  $70^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۴

شکل ۴-۳۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(500\text{nm})$ ,  $b(1\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S209. این نمونه تابش دهی نشده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $300^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۵

شکل ۴-۳۴: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(500\text{nm})$ ,  $b(1\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S210. این نمونه ۱۶ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم  $137^\circ\text{C}$  تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $300^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۶

شکل ۴-۳۵: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $d(200\text{nm})$ ,  $c(500\text{nm})$ ,  $b(1\mu\text{m})$ ,  $a(10\mu\text{m})$ ) برای نمونه ی S211. این نمونه ۱۶ ساعت در دمای محیط با چشمه ی امرسیوم  $241^\circ\text{C}$  تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $300^\circ\text{C}$  قرار گرفته است. .... ۱۱۷

شکل ۴-۳۶: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ,  $c(500nm)$ ,  $d(200nm)$ ) برای نمونه ی S221. این نمونه ۲۲ ساعت در دمای محیط با چشمه ی امرسیوم ۲۴۱ تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $700^{\circ}C$  قرار گرفته است. .... ۱۱۸

شکل ۴-۳۷: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ,  $c(500nm)$ ,  $d(200nm)$ ) برای نمونه ی S222. این نمونه ۲۲ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم ۱۳۷ تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $700^{\circ}C$  قرار گرفته است. .... ۱۱۹

شکل ۴-۳۸: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ,  $c(500nm)$ ,  $d(200nm)$ ) برای نمونه ی S223. این نمونه تابش دهی نشده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $700^{\circ}C$  قرار گرفته است. .... ۱۲۰

شکل ۴-۳۹: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ,  $c(500nm)$ ,  $d(200nm)$ ) برای نمونه ی S235. این نمونه ۸۹ ساعت در دمای محیط با چشمه ی امرسیوم ۲۴۱ تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $500^{\circ}C$  قرار گرفته است. .... ۱۲۱

شکل ۴-۴۰: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ) برای نمونه ی S236. این نمونه ۸۹ ساعت در دمای محیط با چشمه ی سزیم ۱۳۷ تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $500^{\circ}C$  قرار گرفته است. به دلیل چروک شدگی و تغییر شدید مورفولوژی سطح، میکروسکوپ قابلیت تهیه ی تصاویر با مقیاس کوچک تر را نداشت. .... ۱۲۲

شکل ۴-۴۱: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(2\mu m)$ ,  $c(1\mu m)$ ) برای نمونه ی S237. این نمونه تحت تابش نبوده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $500^{\circ}C$  قرار گرفته است. به دلیل چروک شدگی و تغییر شدید مورفولوژی سطح، میکروسکوپ قابلیت تهیه ی تصاویر با مقیاس کوچک تر را نداشت. .... ۱۲۳

شکل ۵-۱: تحلیل XRF نمونه خام پولیش خورده. گرفته شده توسط دستگاه آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان. .... ۱۲۸



## فصل اول: مقدمه

فیزیک هسته‌ای شاخه‌ای از علم است که کاربردهای فراوانی در زندگی بشر دارد و استفاده‌های آن در صنعت، پزشکی، نظامی و ... غیر قابل انکار است. امروزه رابطه‌ی علوم با یکدیگر بسیار نزدیک شده است. نانو تکنولوژی یک فناوری مهم، بسیار کاربردی و به سرعت در حال رشد است. پیشرفت نانو تکنولوژی نیازمند روش‌های جدیدی در رشد و سنتز نانوساختارهای کاربردی است، با هدف این که ویژگی‌های ساختاری آنها بهبود پیدا کرده و بهینه‌سازی در ابعاد و کاربردها صورت بگیرد. نانوساختار اکسید روی یک نانوساختار پرکاربرد است که پژوهشگران زیادی بر روی این نانوساختار کار کرده و هنوز این حوزه در حال پیشرفت است.

## ۱-۱ تاریخچه

در سال ۱۸۵۵ هاینریش گایسلر<sup>۱</sup> پمپ خلاء جیوه‌ای را ساخت و کشف کرد که اگر در محفظه‌ای مثل یک لوله شیشه‌ای فاقد هوا تحت ولتاژ بالا تخلیه الکتریکی انجام شود نورهای زیبایی درون لوله تولید خواهد شد. سپس سر ویلیام کروکس<sup>۲</sup> اشعه کاتدی را کشف کرد. در سال ۱۸۵۸ جولیس پلاکر<sup>۳</sup> با استفاده از یک آهنربا پرتوهای کاتدی را خم کرد و در سال ۱۸۶۹ هیتورف<sup>۴</sup> به این نتیجه رسید که این اشعه‌ها در خطوط مستقیم حرکت می‌کنند [۲].

در زمستان سال ۱۸۹۵ ویلهم کنراد رونتگن<sup>۵</sup> اثرات خارجی لوله خلاء را مورد بررسی قرار داد. دقیقاً مشخص نیست که انگیزه‌ی رونتگن<sup>۵</sup> از این آزمایشات چه بود و شاید فقط یک کنجکاوی علمی بوده است. او تجهیزات مناسبی برای بررسی تخلیه ولتاژ بالای الکتریکی در چنین لوله‌های شیشه‌ای خریداری کرد و آزمایش‌هایش را شروع کرد که بطور غیرمنتظره‌ای هنگامیکه پرتوهای کاتدی را با لوله به طول ۶ft تولید می‌کرد متوجه شد که یک صفحه فلئوسنت از جنس باریم پلاتینیوسیانید<sup>۶</sup> که به دور

---

<sup>1</sup> Heinrich Geissler(1814-1879)

<sup>2</sup> Sir William Crookes

<sup>3</sup> Julius Plucker

<sup>4</sup> J.W.Hittorf

<sup>5</sup> Wilhem Conrad Rontgen

<sup>6</sup> Barium Platino Cyanide

از لوله کاتدی قرار گرفته بود تولید نور می کرد [۳]. او لامپ را با کارتن مشکی رنگ پوشاند ولی باز هم ماده فلوئوسنت نور ساطع می کرد. با آزمایشات متفاوت متوجه شد که این اشعه تحت میدان مغناطیسی انحراف پیدا نمی کند و به انواع مختلف ماده نیز نفوذ می کند. وی دست خود را بین لوله و صفحه‌ی فلوئوسنت قرار داد و طرح استخوان دست خود را دید و تقریباً دو هفته بعد از کشف خود اولین عکس x-ray را از دست همسرش گرفت (شکل ۱-۱) [۴].



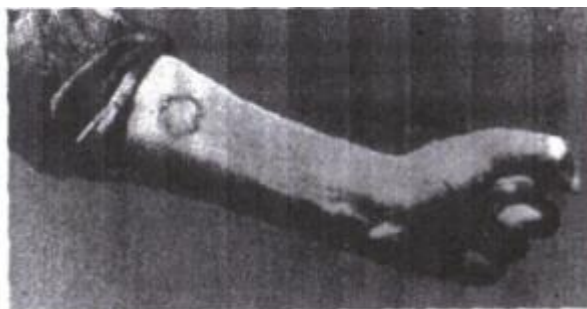
شکل ۱-۰: اولین عکس گرفته شده با X-ray که روننگن از دست همسرش گرفت. انگشتی وی در این عکس کاملاً مشخص است [۲].

در سال ۱۸۹۶ بکرل<sup>۱</sup> بر روی خاصیت فسفرسانی نمک‌های اورانیوم مطالعه می کرد. او یک اثر از ماده اورانیوم را روی فیلم عکاسی مشاهده کرد. بعدها ماری کوری<sup>۲</sup> آزمایش بکرل را با مواد مختلف انجام داد و رادیوم را در سال ۱۸۹۸ کشف کرد. سپس در سال ۱۹۰۱ آزمایشی برای بررسی اثرات تابش بر روی ساعد پیر کوری<sup>۳</sup> انجام شد (شکل ۲-۱) [۱].

<sup>۱</sup> Henri Becquerel

<sup>۲</sup> Marie Curie

<sup>۳</sup> Pierre Curie



شکل ۲۰۰: ساعد پیر کوری و آسیبی که ناشی از تابش رادیوم بر روی آن بوجود آمد [۱].

در ایالات متحده اولین آنالیز پرتو X توسط برادران ادوین<sup>۱</sup> و گیلمن فراست<sup>۲</sup> گرفته شد. دکتر گیلمن فراست استاد دانشکده پزشکی داکوتای جنوبی بود که یک بیمار با احتمال شکستگی استخوان به او مراجعه کرده بود. بیمار ۱۴ ساله یک دانش آموز بود که در حین اسکی روی یخ بر روی رودخانه کانکتیکات<sup>۳</sup> به میچ دستش آسیب رسیده بود. گیلمن فراست دست بیمار را زیر لوله قرار داد و پس از بیست دقیقه اولین عکس بالینی اشعه‌ی x در آمریکا گرفته شد. این کار با استفاده از یک لامپ پولیوی<sup>۴</sup> که یک نوع محبوب از لوله اشعه X توسعه یافته توسط ایوان پولیوی<sup>۵</sup> در تاریخ ۳ فوریه سال ۱۸۹۶ انجام گرفت [۵].

اولین مدل تجاری از لامپ اشعه x کروک (شکل ۱-۳) توسط کمپانی زیمنس<sup>۶</sup> و هالسک<sup>۷</sup> در ۲۴ مارس ۱۸۹۶ ساخته شد [۶]. سپس در سال ۱۹۱۳ ویلیام دیوید کولیدج<sup>۸</sup> توسط کمپانی جنرال الکتریک<sup>۹</sup> توسعه بیشتری به این لامپ‌ها داد [۲].

<sup>1</sup> Edwin

<sup>2</sup> Gilman Frost

<sup>3</sup> Connecticut

<sup>4</sup> Pulyui

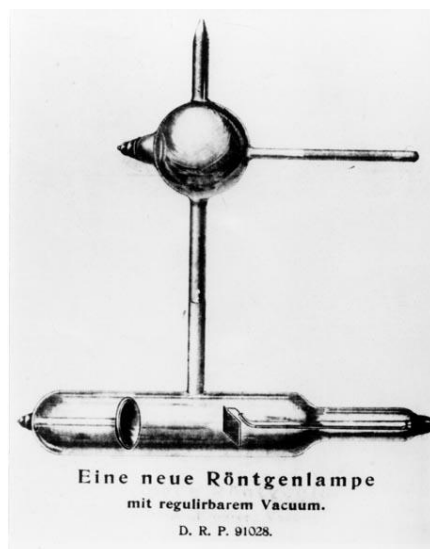
<sup>5</sup> Ivan Pulyui

<sup>6</sup> Siemens

<sup>7</sup> Halske

<sup>8</sup> William David Coolidge

<sup>9</sup> General Electric



شکل ۳-۰: لامپ اشعه X ساخته شده توسط کمپانی زیمنس و هالکس [۶]

پس از اینکه هرتز<sup>۱</sup> نشان داد که اشعه کاتدی می‌تواند از لایه‌های نازک طلا یا پلاتین عبور کند آزمایشاتی در زمینه برخورد ذرات باردار به ماده صورت گرفت که اولین آنها مربوط می‌شود به آزمایش مشهور گایگر - مارسدن<sup>۲</sup> در برخورد ذرات باردار آلفا به ورقه نازک طلا [۷] که به ساخت مدل رادرفورد<sup>۳</sup> کمک کرد [۸] و توسط نیلز بور<sup>۴</sup> در سال ۱۹۱۳ بهبود پیدا کرد [۹]. بور نقش مهمی در پیشرفت نظری چگونگی برخورد ذرات باردار با ماده و یا نظریه توقف نیز داشت [۱۰، ۱۱].

حدوداً از سه دهه‌ی پیش تاکنون، بررسی و مطالعه بر روی تأثیرات تابش‌ها به عنوان شاخه‌ی بزرگی از علم پیشرفت زیادی داشته است. تابش‌دهی جامدات بوسیله‌ی ذرات پرانرژی بطور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بطور مثال اثرات مفید تابش بر مهندسی مواد نانوساختار کربنی بررسی شده و مشاهده شد که ساختار اتمی لوله‌های کربنی و ساختارهای وابسته می‌توانند با تابش مناسب در مسیر کنترل شده به یکدیگر متصل شوند [۱۲، ۱۳]. علاوه بر این تابش می‌تواند باعث فشردگی بیشتر لایه‌های کربنی شود [۱۴]. چیلدرس<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰ میلادی به بررسی اثر تابش الکترونی

<sup>1</sup> Hertz

<sup>2</sup> Geiger-Marsden

<sup>3</sup> Rutherford

<sup>4</sup> Niels Bohr

<sup>5</sup> Childres

بر ساختارهای ساخته شده از گرافن پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها این بود که تابش الکترونی ممکن است منجر به تخریب خواص هدایت الکتریکی گرافن شود. بنابراین هنگام استفاده از SEM<sup>۱</sup> و TEM<sup>۲</sup> برای تصویربرداری و EBL<sup>۳</sup> برای ساخت ساختارهای گرافن، باید مراقب بود [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ میلادی مسلم<sup>۴</sup> در دانشگاه الاظهر نشان داد با تابش پرتوی گاما بر نانو ذرات نقره، اندازه ذرات کاهش یافته و فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنها افزایش می‌یابد [۱۶]. سیلوا<sup>۵</sup> و اورلندی<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۵ میلادی برای تولید کریستال‌های ZnO در دو روش سنتز متمایز، پاسخ حسگر نوری مواد را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در هر دو روش، هر دو نمونه پاسخ خوبی نسبت به تابش خورشیدی داشتند [۱۷]. در سال ۲۰۱۷ میلادی حسنی<sup>۷</sup> با تابش پرتوی گاما بر نانو ذرات ZnO نشان داد با تابش  $\gamma$  اندازه ذرات کاهش یافته و فعالیت ضد میکروبی آن افزایش می‌یابد [۱۸]. کوییندیل<sup>۸</sup> نیز در سال ۲۰۱۷ میلادی اثر تابش گاما بر خواص مورفولوژیکی و اپتیکی ZnO را مطالعه کرد. طبق مطالعه او با تابش دز بالای پرتوی گاما، اندازه ذرات و شکاف باند افزایش و در دز پایین آن کاهش می‌یابد [۱۹].

## ۲-۱ نانوساختارها

نانوفناوری توانایی بدست آوردن کنترل ماده در ابعاد نانومتری و استفاده از ویژگی‌های نانومواد در ابزارها و سیستم‌های نوین است. هر ماده ای از سه بعد تشکیل شده است. اگر حداقل یکی از این ابعاد در مقیاس نانو باشد (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) به این ماده، یک ماده نانوساختار گفته می‌شود. هنگامیکه ابعاد بسیار کوچک شده و به حد نانومتر برسد برخی ویژگی‌های ماده از جمله خواص اپتیکی و الکترونیکی ماده تغییر می‌کند که به این پدیده محکومیت کوانتومی<sup>۹</sup> گفته می‌شود. نانوساختارها

---

<sup>1</sup> SEM: Scanning Electron Microscopy

<sup>2</sup> TEM: Transmission Electron Microscopy

<sup>3</sup> EBL: E-Beam Lithography

<sup>4</sup> Mosalam

<sup>5</sup> Silva

<sup>6</sup> Orlandi

<sup>7</sup> Hosny

<sup>8</sup> Qindeel

<sup>9</sup> Quantum confinement

کاربردهای فراوانی در صنعت، ساختمان سازی، صنایع نظامی، پیل‌های سوختی، الکترونیک، خودروسازی، صنایع فیلترسازی و ... دارند.

مواد نانو ساختارها در تمام اشکال خود از جمله نانوسیم ها دارای کاربردهای فراوانی هستند و خواص خوب و مناسبی دارند. ارتباط نزدیک با ابر رسانایی گرم، وجود در هر سه فاز مغناطیسی مختلف، استفاده‌ی راحت، مقرون به صرفه بودن، قابلیت ساخت آسان در مقیاس‌های متفاوت و خیلی ویژگی‌های دیگر سبب شده است که از مواد نانوساختار در صنعت استفاده‌های فراوانی بشود [۲۰، ۲۱]. از مواد نانوساختار به عنوان کاتالیزور قدرتمند برای تبدیل هیدروکربن‌ها بطور کامل به دی‌اکسیدکربن و آب استفاده می‌شود. نانومواد کاربردهای دیگری هم از جمله افزایش توانایی جذب نور در سطح، بهبود انباشت رنگدانه‌های مولکول‌ها بر روی سطوح و همچنین کاربردهای فتوولتائیک و فتوالکتروشیمیایی دارند [۲۲]. نانوساختارهای اکسید فلزی برای افزایش بهره‌وری و کاهش قیمت تمام شده سلول‌های خورشیدی نیز استفاده می‌شوند [۲۳].

## ۳-۱ اکسید روی

اکسید روی (ZnO) یک ماده منحصر به فرد است که دارای خواص دوگانه نیمه‌هادی و پیزوالکتریک<sup>۱</sup> است و با توجه به ویژگی‌های برجسته آن از سال ۱۹۳۵ میلادی بسیار مورد توجه بوده است. ابتدا این ترکیب به عنوان افزودنی در مواد و محصولات متعددی از قبیل پلاستیک، سرامیک، شیشه، سیمان و ... به کار برده می‌شد [۲۴]. از دهه ۱۹۶۰ میلادی مواد نانو ساختار ZnO به دلیل کاربرد در الکترونیک، اپتیک و فوتونیک، مورد توجه قرار گرفتند. سنتز لایه‌های نازک ZnO به دلیل کاربرد آن‌ها به عنوان سنسورها، مبدل‌ها و کاتالیزورها فعالیت در این زمینه را افزایش داده است [۲۵].

---

<sup>1</sup> Piezoelectric

## ۴-۱ تابش‌های یون‌ساز

تابش‌های یون‌ساز می‌توانند تغییر شدیدی در ویژگی‌های ماده ایجاد کنند؛ به ویژه یون‌های سنگین که با تکانه‌ی مناسب باعث جابه‌جایی‌های اتمی در جامدات می‌شوند [۲۶]. ذرات باردار یکی از موفق‌ترین ابزارهای آزمایشگاهی برای کاوش در ساختار ماده هستند. از کاربردهای این ابزار می‌توان استفاده از آن در زمینه‌های پزشکی، کشاورزی، صنعت و غیره نام برد. اثرات تابش می‌تواند با اتلاف انرژی یک ذره‌ی باردار که در داخل ماده در حرکت است، ایجاد شود [۲۷]. ذرات بارداری که از ماده می‌گذرند، بر اثر برهم‌کنش‌های کولنی، گسیل تابش ترمزی و برهم‌کنش‌های هسته‌ای انرژی از دست می‌دهند. وقتی یک ذره‌ی پر انرژی همانند الکترون یا یون به اتم‌های یک هدف برخورد می‌کند، اثرات مختلفی می‌تواند رخ دهد. اثرات این برخورد عبارتند از: برانگیختگی و یونش اتم‌ها، شکستن پیوندها، تولید فونون‌های نوسانی، جابه‌جایی اتم‌ها در هدف‌های حجیم، کندوپاش<sup>۱</sup> اتم‌ها از سطح، گسیل فوتون‌ها، برای مثال پرتوهای ایکس و تابش الکترون‌های ثانویه. پرتوهای حاصل از چشمه‌های رادیواکتیو به علت دارا بودن انرژی و خاصیت یونسازی می‌توانند برای تابش‌دهی در موارد مختلف استفاده شوند [۲۸].

## ۵-۱ اثر تابش بر نانومواد

در یک برخورد، انتقال انرژی از یک یون به هسته‌ی اتم به مقدار قابل توجهی بزرگ‌تر از انرژی بستگی اتم به ساختار شبکه‌ای ماده است. این برخورد می‌تواند باعث جدا شدن اتم از ساختار ماده شود. اگر انرژی به مقدار چندین برابر انرژی بستگی اتم باشد اتم جدا شده خود می‌تواند باعث جدایی اتم‌های دیگر نیز بشود و یک آبشار زنجیره‌ای از برخوردها را ایجاد کند. این جابجایی‌ها منجر به تولید تپه‌ی جاها، اتم‌های میان بافتی، اختلال لایه‌ها، اختلال شبکه و ... می‌شوند. این اثرات می‌توانند رفتار فیزیکی و شیمیایی ماده را تغییر دهند [۲۹، ۳۰]. پژوهش‌ها و آزمایشات فراوانی در این زمینه و تولید و ترمیم

---

<sup>1</sup> Sputtering

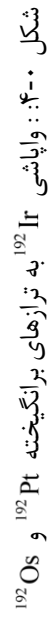


نقص در ساختارهای جامد توسط تابش‌های یون‌ساز صورت گرفته و از ایجاد نقص‌های پیچیده برای تولید آلیاژهای پیشرفته استفاده شده و نکات و نتایج مفیدی بدست آمده است [۳۱].

اثرات و نقص‌های ناشی از تابش در نانومواد با مواد حجیم متفاوت است. این تفاوت از همان ویژگی کوچک بودن اندازه و بیشتر بودن نسبت سطح به حجم دانه‌ها و ویژگی‌های کوانتومی که در این مقیاس از اندازه ماده آشکار می‌شوند ناشی می‌شود. اثر پرتوهای کم انرژی بر ساختارهای نانو در مطالعه اخیر صورت گرفته است [۳۲].

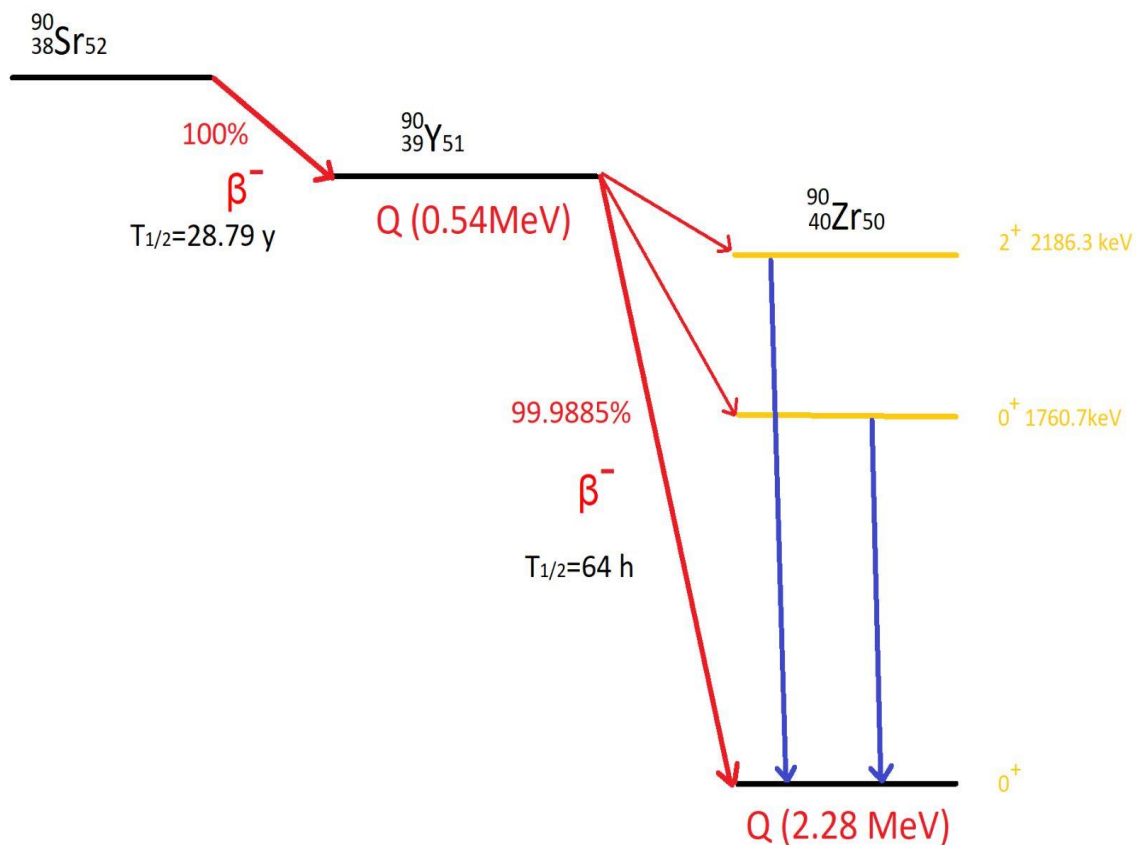
## ۱-۶ چشمه‌ی $^{192}\text{Ir}$

ایریدیوم عنصری با عدد اتمی ۷۷ و وزن اتمی ۱۹۲/۲۲ است. دمای ذوب این عنصر ۲۴۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای جوش آن ۴۱۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. ایریدیوم از گروه فلزات واسطه است. نیمه عمر این عنصر ۷۳/۸۳ روز است. ایریدیوم حدوداً ۹۵ درصد با تابش بتای منفی به ترازهای  $^{192}\text{Pt}$  تبدیل می‌گردد و سپس با تابش‌های گاما به حالت پایه این عنصر خواهد رفت (شکل ۴-۱). همچنین حدود ۵ درصد با واکنش گیراندازی الکترون به ترازهای برانگیخته‌ی  $^{192}\text{Os}$  تبدیل می‌شود. این چشمه کاربردهای فراوانی در رادیوگرافی صنعتی و عکس‌برداری صنعتی دارد.



## ۷-۱ چشمه‌ی $^{90}\text{Sr}$

این چشمه کاربردهای فراوانی دارد از جمله در علم چشم‌پزشکی، پرتونگاری برای تعیین یکنواختی ماده، صنایع کاغذسازی، صنعت پلاستیک و هرجایی که هدف کنترل ضخامت در حد میلی‌متر باشد استفاده می‌شود. نیمه‌عمر این ماده رادیواکتیو  $^{90}\text{Sr}$  ۲۸/۸ سال است و بطور ۱۰۰٪ واپاشی  $\beta^-$  انجام می‌دهد و به  $^{90}\text{Y}$  تبدیل می‌شود (شکل ۵-۱) که در این واپاشی بتاهایی با انرژی ماکزیمم  $0.54\text{ MeV}$   $^{90}\text{Y}$  سپس واپاشی می‌شود. که نیمه‌عمر تقریباً ۶۴ ساعت دارد واپاشی کرده و بتاهایی با انرژی ماکزیمم  $2.28\text{ MeV}$   $^{90}\text{Zr}$  تبدیل می‌شود [۳۳].



شکل ۵-۱: نمودار واپاشی  $^{90}\text{Sr}$  به  $^{90}\text{Y}$  و سپس واپاشی به  $^{90}\text{Zr}$  [۳۴].

## ۸-۱ اهداف

بررسی‌های صورت گرفته در رابطه با تابش‌دهی به سطح و تأثیر آن بر رشد نانوساختارها، عمدتاً بدین صورت بوده است که ابتدا نانوساختار را رشد داده و سپس نانوساختار را تابش‌دهی کرده و تأثیرات تابش‌دهی را بررسی کرده اند. کاری که در این پایان‌نامه انجام شده است بدین صورت است که ابتدا سطح بستر را تابش‌دهی کرده و سپس شرایط رشد را فراهم کرده تا نانوساختارهای ZnO رشد کنند. اثرات تابش بتا را بر روی رشد و مورفولوژی نانوساختارهای ZnO بررسی شد. برای این کار از چشمه‌های نقطه‌ای و مسطح  $^{241}\text{Am}$ ،  $^{192}\text{Ir}$  و  $^{137}\text{Cs}$  برای تابش‌دهی سطح روی استفاده شد. ابتدا با استفاده از کد شبیه‌ساز Geant4 میزان دز تابش بتا که در سطح نمونه توسط چشمه‌های مفروض جذب می‌شود برآورد شد، سپس با انجام آزمایش تجربی نانوساختارهای ZnO را بر روی بستر نمونه تولید کردیم. هدف ما بدست آوردن تأثیرات تابش بر رشد نانوساختارهای ZnO بود. نمونه‌ها با چشمه‌های مذکور تابش‌دهی شده و سپس شرایط رشد فراهم شد تا نانوساختارهای ZnO بر روی سطح روی رشد یابند. این کار در دماهای متفاوت و با چشمه‌های متفاوت انجام شد، سپس داده‌های مورد نیاز برای بررسی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های پراش پرتو X (XRD)، EDAX، طیف رامان و تصاویر FESEM بدست آمد و تأثیر میزان دز تابش بتا روی ساختار، مورفولوژی و همچنین کیفیت رشد نانوساختارها بررسی و تحلیل شد.

## فصل دوم: روش‌های رشد و آ‌انالیز نانو ساختارها

## ۱-۲ مقدمه

ریچارد فاینمن<sup>۱</sup>، فیزیکدانی است که نقش به سزایی در شکل گیری علوم نانو داشته است. در زمانی که کسی اطلاعات چندانی در زمینه ی علوم نانو نداشت، او در یک سخنرانی در انجمن فیزیک آمریکا با عنوان «در پایین دست، فضای زیادی وجود دارد»، سوالاتی در زمینه کار با مواد و اجسام در ابعاد خیلی ریز طرح کرد که ذهن هر شنونده‌ای را به خود مشغول ساخت. او همچنین با ذکر تفاوت‌های علوم نانو و فیزیک بنیادی، پیشنهادهایی مطرح کرد که هرچند برای افراد در آن دهه تعجب برانگیز و غیرممکن تصور می‌شد، اما امروز شاهد اجرائی شدن بسیاری از این پیشنهادهای هستیم و با پیشرفت روزافزون بشر در زمینه علوم مختلف و تکنولوژی و همچنین دستیابی انسان به ابعاد بسیار ریز ماده، پیش‌بینی می‌گردد که تمامی پیشنهادهای او روزی به حوزه‌ی واقعیت‌های علم بشر وارد شوند [۳۵].

در سال‌های اخیر، نانوساختارهای اکسیدروی به عنوان یک نیم‌رسانا کاربردهای فراوانی داشته‌اند. اکسیدروی یک نیمه رسانای گاف مستقیم<sup>۲</sup> و گاف نواری پهن ( $3.37 \text{ eV}$ ) در دمای اتاق است که از این نانوساختار جهت کاربردهای فراوانی از جمله در دیودهای گسیل کننده نور (LED)، نانولیزرهای فرابنفش، آشکارسازهای نوری، سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، حسگرهای گازی و موارد متعدد دیگر استفاده می‌شود [۳۶-۳۹].

## ۲-۲ روش‌های سنتز نانومواد

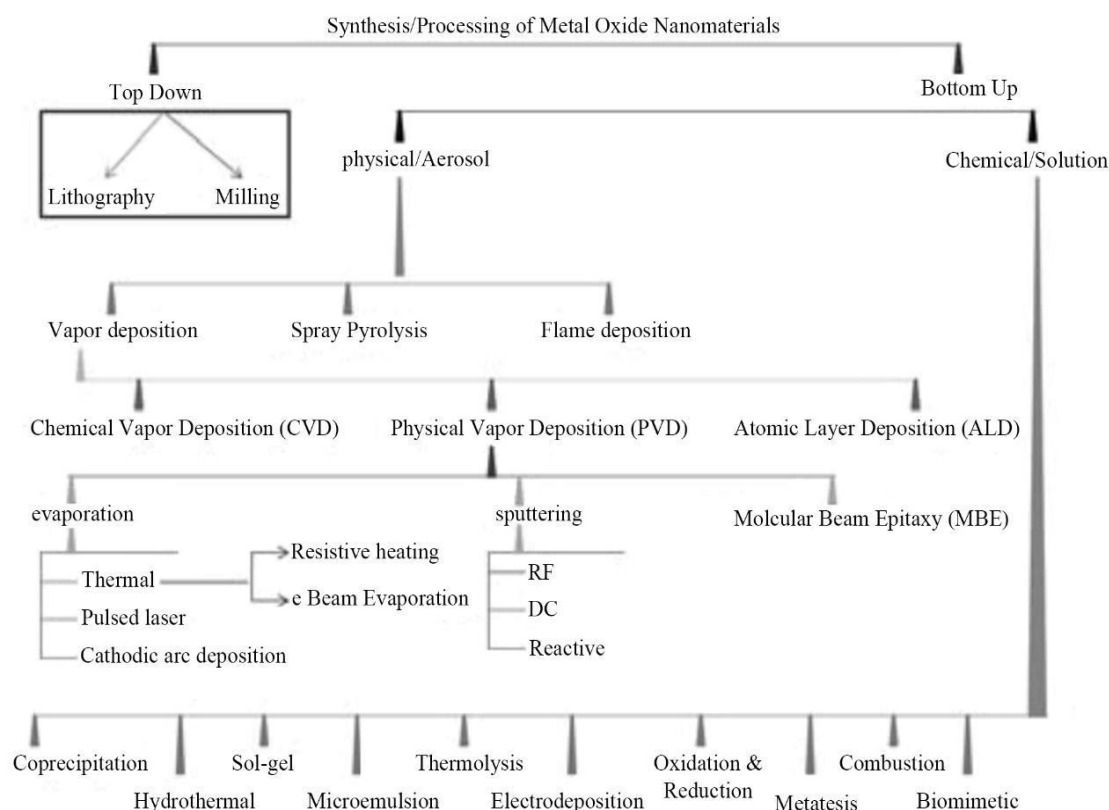
با توجه به رشد چشمگیر نانو تکنولوژی در این چند دهه اخیر روش‌های مختلف و زیادی برای رشد و تهیه نانوساختارها پیشنهاد و انجام شده است. با توجه به اینکه هدف توضیح این روش‌ها نیست، به صورت کلی بعضی از روش‌های معمول و کاربردی را توضیح داده و سپس به روش‌های آنالیز سطح در نانوفناوری می‌پردازیم.

---

<sup>1</sup> Richard Feynman

<sup>2</sup> Direct Band Gap

در یک تقسیم‌بندی بسیار کلی (شکل ۱-۲) روش‌های تهیه نانوساختارها به دو روش بالا به پایین و پایین به بالا گروه‌بندی می‌شوند. در روش پایین به بالا از اتم‌ها و مولکول‌ها نانوذرات ساخته می‌شوند در صورتیکه در روش بالا به پایین، از مواد حجیم برای ساخت نانوذرات استفاده می‌شود [۴۰]. در یک تقسیم‌بندی دیگر نیز روش‌های رشد نانوساختارها به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل ۱-۲: روش‌های مختلف بکار گرفته شده برای تهیه نانومواد اکسید فلزی [۴۱].

دسته فیزیکی یا آئروسول<sup>۱</sup> شامل روش اسپری پیرولیز<sup>۲</sup>، روش انباشت بخار<sup>۳</sup> و روش رسوب شعله<sup>۴</sup> است. انباشت بخار به دو روش انباشت بخار فیزیکی (PVD) و انباشت بخار شیمیایی (CVD) انجام می‌شود [۴۱].

## ۱-۲-۲ انباشت بخار فیزیکی (PVD)

انباشت بخار فیزیکی یک فرآیند انتقال گونه‌های رشد از منبع و یا هدف و انباشت آنها بر روی زیرلایه برای تشکیل لایه است و اغلب شامل هیچ واکنش شیمیایی نیست. روش‌های متفاوتی برای جدا کردن گونه‌های رشد از منبع و نشان دادن بر روی زیرلایه وجود دارد و در حالت عادی، به دو گروه تبخیر<sup>۵</sup> و کندوپاش<sup>۶</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. در تبخیر گونه‌ی رشد از روی منبع با حرارت جدا می‌شود. در کندوپاش، اتم‌ها یا مولکول‌های هدف جامد، از طریق برخورد با یون‌های گازی (پلاسما) از سطح جدا می‌شوند. هر دو گروه همچنین می‌توانند به تعدادی از روش‌ها، بسته به تکنیک‌های خاص مورد استفاده برای فعال کردن اتم‌ها یا مولکول‌های منبع و شرایط انباشت استفاده شده، تقسیم بندی بشوند [۴۲]. این فرآیند شامل مراحل زیر است [۴۳]:

الف) تبدیل ماده تبخیری به حالت گازی از طریق تبخیر یا تصعید، یا کندوپاش کاتدی؛

ب) انتقال اتم‌ها (مولکول‌ها) از چشمه تبخیر به زیرلایه، در فشار کاهش یافته؛

پ) انباشت این ذره‌ها روی زیرلایه؛

ت) بازآرایی یا تعدیل پیوند اتم‌ها روی سطح زیرلایه.

الگویی از یک سیستم PVD در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Aerosol

<sup>2</sup> Spray pyrolysis

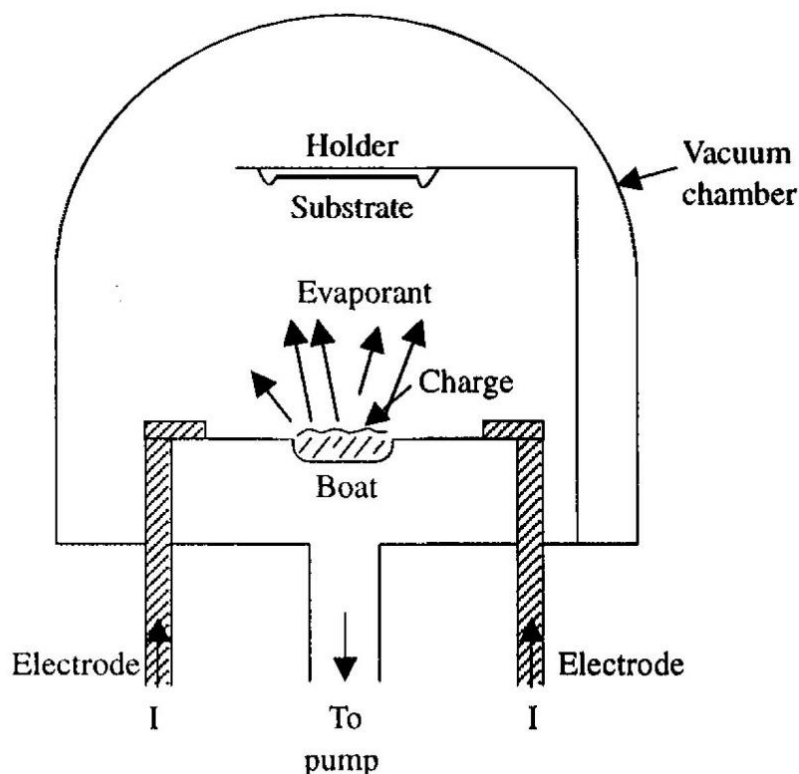
<sup>3</sup> Vapor deposition

<sup>4</sup> Flame deposition

<sup>5</sup> Evaporation

<sup>6</sup> Sputtering





شکل ۲-۲: الگویی از یک سیستم PVD تبخیری. چشمه و زیرلایه در محفظه خلاء قرار گرفته‌اند [۴۲].

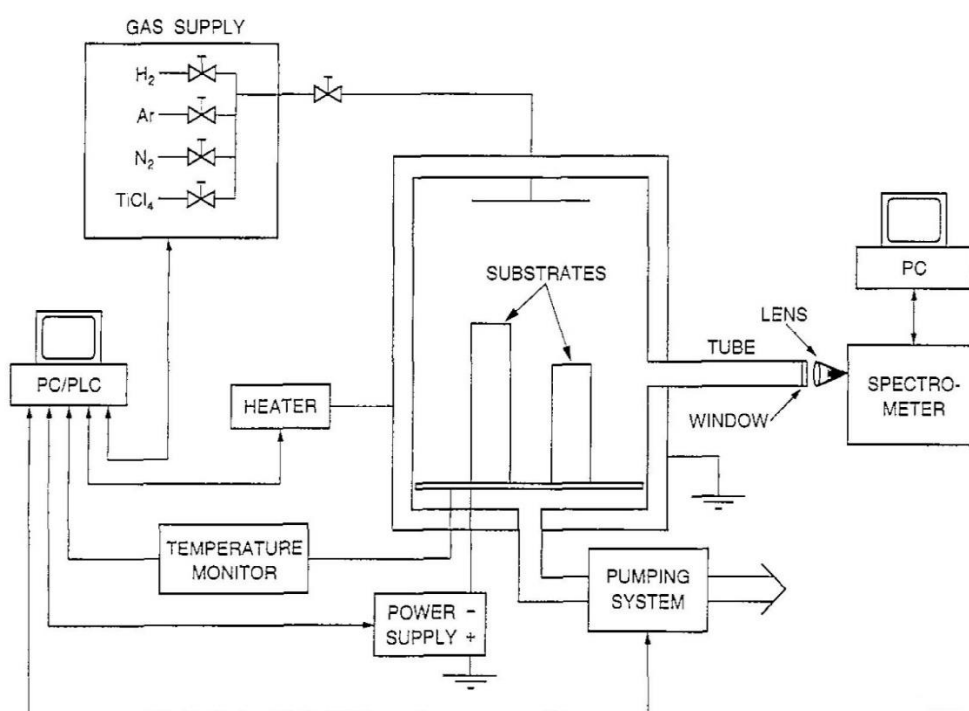
## ۲-۲-۲ انباشت بخار شیمیایی (CVD)

در روش انباشت شیمیایی بخار واکنش‌های گازی صورت گرفته و رسوبات ایجاد شده از آن اتم‌ها یا مولکول‌ها و یا ترکیبی از آن‌ها بر روی زیرلایه، لایه‌نشانی می‌شود. لایه‌نشانی شامل واکنش‌های همگن گازی و یا واکنش‌های شیمیایی غیرهمگن در مجاورت یک سطح حرارت دیده می‌باشد و در اثر این واکنش‌ها پودرها و لایه‌هایی با خلوص بسیار بالا به دست می‌آید که ساختار آن تا مقیاس اتمی یا نانومتری قابل کنترل می‌باشد. لایه‌نشانی شیمیایی از بخار (CVD) یک فرآیند مناسب برای ساخت و تولید پوشش‌ها، پودرها، فیبرها، دی‌الکتریک‌ها، مواد تک‌بلورین سیلیکون و مواد پلیمری می‌باشد. با این روش تولید اغلب نانومواد فلزی، تعدادی از نانومواد غیر فلزی مثل کربن و سیلیسیم و همچنین تعداد زیادی از ترکیبات نانو شامل کاربیدها، نیتريد‌ها، اکسیدها و غیره ممکن است. این تکنولوژی اکنون یکی از فاکتورهای ضروری در ساخت نیمه رساناها و دیگر اجزاء الکترونیکی، پوشش ابزارها، قطعات مقاوم به

سایش و خوردگی و وسایل نوری می‌باشد. این فرآیند بطور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته که عمدتاً به دلیل ارتباط نزدیکی است که با میکروالکترونیک دارد [۴۲, ۴۴-۴۸].

## ۲-۲-۱ اصول کلی فرآیند CVD و مکانیزم لایه‌نشانی

فرآیند CVD از چندین مرحله تشکیل می‌شود و بطور بسیار ساده شکل ۲-۳ نمایشی از دستگاه CVD و واکنش‌هایی که در حین فرآیند اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: لایه‌نشانی در فرآیند CVD [۴۴].

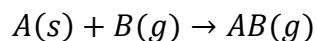
مهم‌ترین بخش این فرآیند واکنش‌های شیمیایی هستند که بین گازهای ورودی رخ می‌دهند و در نتیجه‌ی این واکنش‌ها ماده‌ی جامد مورد نظر بر روی سطح زیرلایه ایجاد می‌شود. معمولاً یک یا چند گاز در فشار پایین وارد راکتور می‌شوند و در نتیجه تحت شرایط کنترل شده در روی سطح و یا نزدیک سطح زیرلایه واکنش‌ها صورت می‌گیرند.

عمده‌ی واکنش‌های شیمیایی که در روش تبخیر شیمیایی انجام می‌شوند عبارت‌اند از:

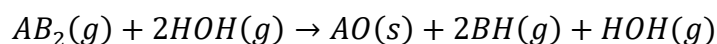
۱- تجزیه



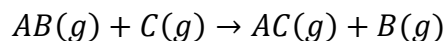
۲- ترکیب



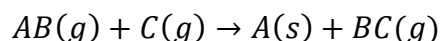
۳- هیدرولیز



۴- اکسیداسیون



۵- احیا



یک سیستم CVD معمولاً شامل یک بخش اندازه‌گیری و کنترلی برای مخلوط گازهای واکنش - دهنده، یک محفظه‌ی واکنش و یک سیستم برای دفع گازهای خروجی است.

فرآیند لایه‌نشانی بخار شیمیایی بطور ساده شامل مراحل زیر است [۴۴، ۴۸]:

- در ابتدا مخلوط گازها به داخل محفظه‌ی واکنش منتقل می‌شود و سپس تا دمای مناسب گرم می‌شود،
- سپس واکنش‌های شیمیایی انجام گرفته و فازهای میانی تشکیل می‌شود،
- واکنش‌گرهای گازی بر روی زیرلایه حرارت داده شده جذب می‌شوند و واکنش ناهمگن در فصل مشترک گاز و جامد اتفاق می‌افتد که رسوب و انواع محصولات فرعی را تولید می‌کند،

- رسوب‌ها در سطح زیر لایه حرارت داده شده رسوب کرده و مراکز کریستالی تشکیل شده و لایه شروع به رشد می‌کند،
- واکنش‌گرهای گازی واکنش نداده و محصولات فرعی به خارج از محفظه رسوب گذاری انتقال داده می‌شوند.

## ۲-۲-۲-۲ مزایای CVD

با وجود این که CVD یک سیستم شیمیایی پیچیده به شمار می‌رود، ولی مزایای ممتاز فراوانی دارد که عبارتند از:

- ✓ این روش قابلیت تولید مواد خالص و دارای فشردگی بالا را دارد [۴۹].
- ✓ فرآیند CVD می‌تواند لایه‌های یکنواخت (مستقل از شکل بستر) با قابلیت ساخت مجدد عالی و چسبندگی مناسب در سرعت‌های لایه‌نشانی بالا ایجاد نماید.
- ✓ CVD فرآیندی است که لایه‌نشانی در آن بر خلاف روش‌های پراکنشی، تبخیری و دیگر فرآیندهای PVD که لایه‌نشانی در آن‌ها به صورت جهت‌دار صورت می‌پذیرد، جهت‌دار نمی‌باشد. بنابراین می‌تواند برای پوشش دادن شکل‌های پیچیده و رسوب لایه‌های با تطبیق‌پذیری عالی به کار برده شود. گودی‌های عمیق، سوراخ‌ها، و دیگر شکل‌های سه بعدی پیچیده معمولاً با استفاده از روش CVD به راحتی می‌تواند پوشش داده شود و این ویژگی فرآیند CVD باعث برتری آن نسبت به PVD می‌باشد [۵۰].
- ✓ در این روش با کنترل پارامترهای فرآیند CVD می‌توان ساختار کریستالی، مورفولوژی سطح و جهت‌گیری محصولات CVD را کنترل نمود.

✓ در فرآیند CVD سرعت لایه نشانی به راحتی می‌تواند تنظیم شود و می‌توان سرعت را

تا ده‌ها میکرومتر بر ساعت افزایش داد [۴۵].

## ۲-۲-۲-۲ معایب CVD

با وجود فواید و مزایای بسیار روش CVD برخی معایب نیز در این روش لایه‌نشانی وجود دارد

که بطور خلاصه مطرح می‌کنیم:

➤ در این روش به خاطر استفاده از گازهای واکنش دهنده سمی، قابل اشتعال و یا منفجره

( خطر انفجار هیدروژنی رآکتور) امنیت و سلامت به مخاطره می‌افتد و باید در هنگام

خروج از سیستم جمع‌آوری شده و با روش‌های خاصی از بین برده شوند که خود این

فرآیندها هزینه‌های فراوانی را تحمیل می‌نماید [۵۰].

➤ در برخی واکنش‌ها بدلیل استفاده از گازهای خردنده امکان تخریب زیرلایه وجود دارد

[۴۸].

➤ اکثر مواد واکنش‌دهنده گران قیمت هستند [۴۸].

➤ در این روش به طور معمول از چند منبع که دارای مواد اولیه مختلف می‌باشند برای

ایجاد پوشش استفاده می‌شود. از آن جایی که سرعت بخار شدن هر یک از مواد اولیه

مورد استفاده در فرآیند با یکدیگر متفاوت است استوکیومتری محصولات به راحتی

قابل کنترل نمی‌باشد. با این وجود، این محدودیت می‌تواند با استفاده از واکنش‌گرهای

شیمیایی تک منبعی برطرف گردد. در این روش اگر تغییرات در حین فرآیند صورت

پذیرد سیستم خود را با آن تطبیق داده و سازگار می‌کند. به دلیل انعطاف پذیری این

فرآیند با تغییرات درحین کار، پوشش‌های ایجاد شده به این روش نیز در حین لایه-

نشانی تغییر کرده و ترکیبات متنوعی حاصل می‌گردد [۵۰].

➤ استفاده از رآكتورهای پیچیده و یا سیستم خلاء در انواع مختلف

فرآیندهای CVD باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌گردد [۴۵].

➤ این فرآیند در درجه حرارت‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین دلیل موادی

که پایداری حرارتی بالایی ندارند به این روش نمی‌توان پوشش‌دهی شوند [۴۵].

➤ امکان بروز واکنش‌های ناخواسته در این روش لایه‌نشانی وجود دارد [۴۸].

## ۳-۲-۲ روش الکتروشیمیایی انباشت لایه‌ی نازک

در انباشت الکتروشیمیایی از محلول‌های یونی استفاده می‌گردد. در این روش که الکتروانباشت

<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، از طریق یک جریان الکتریکی، لایه‌ای اصولاً فلزی بر روی سطح نشانداده می‌شود.

انباشت یک لایه‌ی فلزی روی یک جسم، با برقراری بار منفی روی جسمی که لایه نشانی می‌شود (کاتد)

و فرو بردن در محلولی که شامل یک نمک از فلز مورد نظر جهت انباشت است، انجام می‌گیرد. وقتی

یون‌های فلزی با بار مثبت درون محلول به جسم با بار منفی می‌رسند، جسم الکترون‌هایی را جهت

کاهش بار مثبت یون‌ها، جهت تشکیل حالت فلزی فراهم می‌کند.

## ۴-۲-۲ انباشت الکترولیتی کاتدی

فلزی که باید انباشته شود، در محلول وجود دارد و یا به شکل یونی ذوب می‌شود. دو الکترو

داخل محلولی که فلز انباشته می‌شود، قرار می‌گیرند. جرم نمونه‌ی انباشته شده با مقدار بار الکتریکی

متناسب خواهد بود. ویژگی‌های لایه انباشته‌شده به چسبندگی لایه به زیرلایه، ساختار بلوری لایه و

غیره بستگی دارد. با این روش فقط می‌توان لایه‌ها را روی زیرلایه‌های رسانا انباشت، و امکان آلوده شدن

لایه با مواد موجود در الکترولیت وجود دارد [۴۳].

---

<sup>1</sup> Electroplating

## ۵-۲-۲ انباشت بدون الکتروود

اساس کار این روش مشابه روش انباشت الکتروولیت کاتدی است. اما در این روش فلز با فرآیندهای الکتروشیمیایی بدون حضور میدان خارجی انباشته می‌شود. آهنگ انباشت به دمای ظرف بستگی دارد و در بعضی موارد برای انباشت به تحریک به وسیله یک کاتالیزور نیاز است [۴۳].

با توجه به اینکه روش‌های CVD، PVD و روش الکتروشیمیایی اغلب جزء پرکاربردترین روش‌های سنتز نانومواد هستند ولی توضیح روش‌های لیتوگرافی و آسیاب کردن نیز که زیرمجموعه روش بالا به پایین هستند ارزشمند است.

## ۶-۲-۲ لیتوگرافی<sup>۱</sup>

فرآیند لیتوگرافی شبیه به فرآیند عکاسی است و می‌تواند برای ایجاد نانو ساختارها، با تشکیل یک الگو بر روی بستر از طریق ایجاد مقاومت در برابر سطح بستر استفاده شود. یک روش لیتوگرافی از نور مرئی، اشعه ماوراء بنفش (UV)، اشعه ایکس، الکترون‌ها یا یون‌ها استفاده می‌کند تا تصویری را که حاوی الگوی موردنظر است بر روی سطح پوشش داده شده با مواد مقاوم در برابر نور<sup>۲</sup> طراحی کند؛ این روش نیازمند این است که در ابتدا یک ماسک جاذب ساخته شود که از طریق آن پرتو موازی به سمت ماده مقاوم در برابر نور حرکت کند [۴۱].

## ۷-۲-۲ آسیاب کردن<sup>۳</sup>

یک فرآیند مهم صنعتی برای تولید نانو ساختارها، آسیاب توپ با انرژی بالا است که همچنین به عنوان آلیاژسازی مکانیکی و یا آسیب مکانیکی شناخته شده است. مواد درشت دانه در شکل پودر به صورت مکانیکی در چرخنده‌هایی توسط فولاد سخت یا توپ‌های کاربید تنگستن خرد می‌شوند، این

---

<sup>1</sup> Lithography

<sup>2</sup> Photoresist material

<sup>3</sup> Milling

فرآیند معمولاً تحت شرایط جو کنترل شده برای جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته مانند اکسیداسیون انجام می‌شود. این تغییر شکل مکرر می‌تواند باعث کاهش زیادی در اندازه دانه‌ها از طریق تشکیل و سازماندهی مرزهای دانه در ذرات گرد و غبار شود و تراشیدن براساس اصل سرعت بحرانی کار می‌کند. سرعت بحرانی سرعتی است که پس از آن توپ‌های فولادی (که مسئول آسیب ذرات هستند) شروع به چرخش در امتداد جهت دستگاه استوانه‌ای می‌کنند، در نتیجه باعث تراش بیشتر نمی‌شوند [۵۱].

## ۸-۲-۲ گرم کردن با امواج ماکروویو

امواج ماکروویو به امواج الکترومغناطیسی گفته می‌شود که فرکانس آنها در محدوده ۰/۳ GHz - ۳۰۰ است. فقط یک محدوده‌ی با فرکانس باریک در محدوده ۹۰۰ مگاهرتز و ۲/۴۵ گیگاهرتز برای اهداف گرمایشی مجاز است. مایکروویو به عنوان میدان الکتریکی فرکانس بالا عمل می‌کند و هر ماده‌ای را که شامل بار الکتریکی همراه است، مانند مولکول‌های قطبی در یک حلال یا یون‌های جامد را با استفاده از کوره یا حمام روغن و دیواره‌های رآکتور حرارت می‌دهد. در روش‌های معمولی حرارت از طریق روش هدایت یا تماسی انتقال می‌یابند و برای دستیابی به دمای مورد نظر این فرآیند مدت زمان طولانی طول می‌کشد. امواج ماکروویو می‌توانند بدون گرم کردن کل حمام یا کوره ماده را گرم کنند، بنابراین زمان و انرژی ذخیره می‌شود. امروزه مایکروویوها برای تسریع واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شوند. سنتز نانوذرات فاز محلول با استفاده از تابش مایکروویو کاملاً پدیده‌ای جدید است. این سازوکار بسیار متقاعد کننده بوده، اعتقاد بر این است که انتقال انرژی از مایکروویو به ماده، از طریق رزونانس انجام شده، که باعث گرم شدن سریع می‌شود.

جهت رشد و سنتز نانوساختارهای اکسیدروی از روش‌های فراوانی استفاده شده است، از جمله تکنیک سل-ژل [۵۲]، اسپری پیرولیز [۵۳]، کندوپاش [۵۴]، لایه نشانی لیزر پالسی [۵۵]، هیدروترمال [۵۶] و انباشت بخار شیمیایی [۵۷]. در میان روش‌های ذکر شده انباشت بخار شیمیایی دارای مزیت‌های بسیاری از جمله دستیابی به انواع ریخت‌شناسی، خلوص بالای نمونه و هزینه تولید پایین‌تر می‌باشد.



تاکنون نانوساختارهای متنوعی از جمله نانوذره، نانومیل، نانوسیم، نانولوله، نانوگل و نانوفنر از روش نشست بخار شیمیایی بدست آمده است [۵۸-۶۰].

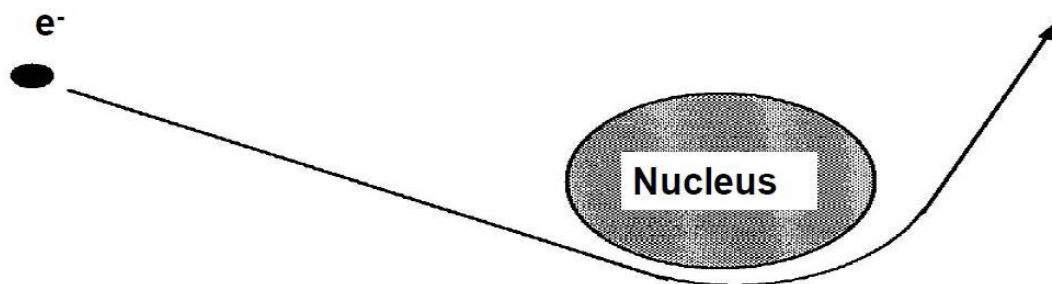
از آنجا که روش موردنظر ما برای رشد نانوساختار برپایه‌ی تابش الکترون با سطح نمونه است که در فصل پنجم بطور کامل توضیح خواهیم داد، ضروری است که برهمکنش‌های الکترون با سطح ماده را مختصر بررسی کرده و تاثیرات آن را مدنظر قرار دهیم.

## ۳-۲ برهم‌کنش‌های الکترون با سطح

در برخورد یک باریکه‌ی الکترونی با سطح هدف پنج پدیده‌ی مهم اتفاق می‌افتد که بررسی این پدیده‌ها در بخش بعدی در توضیح سازوکار میکروسکوپ روبشی نیز مفید است. این پدیده‌ها شامل موارد ذیل است:

الکترون‌های ثانویه: این الکترون‌ها حاصل از برخورد غیرکشسان الکترون‌های فرودی با الکترون‌های نوار رسانش‌اند که باعث جدا شدن الکترون‌های سطح می‌شوند. این الکترون‌ها دارای انرژی در حدود  $10-50\text{ eV}$  می‌باشد، اما گاهی الکترون‌هایی با حداکثر انرژی  $50\text{ eV}$  نیز الکترون ثانوی محسوب می‌شوند. ممکن است که انرژی، سرعت و جهت الکترون اولیه به حدی باشد که بعد از برخورد اول از ماده خارج نشده و برخوردهای پیاپی دیگری نیز انجام دهد که اگر الکترون ثانویه دیگری نیز تولید کند به آن الکترون ثانویه، الکترون ثانویه دوم (SE2) گفته می‌شود.

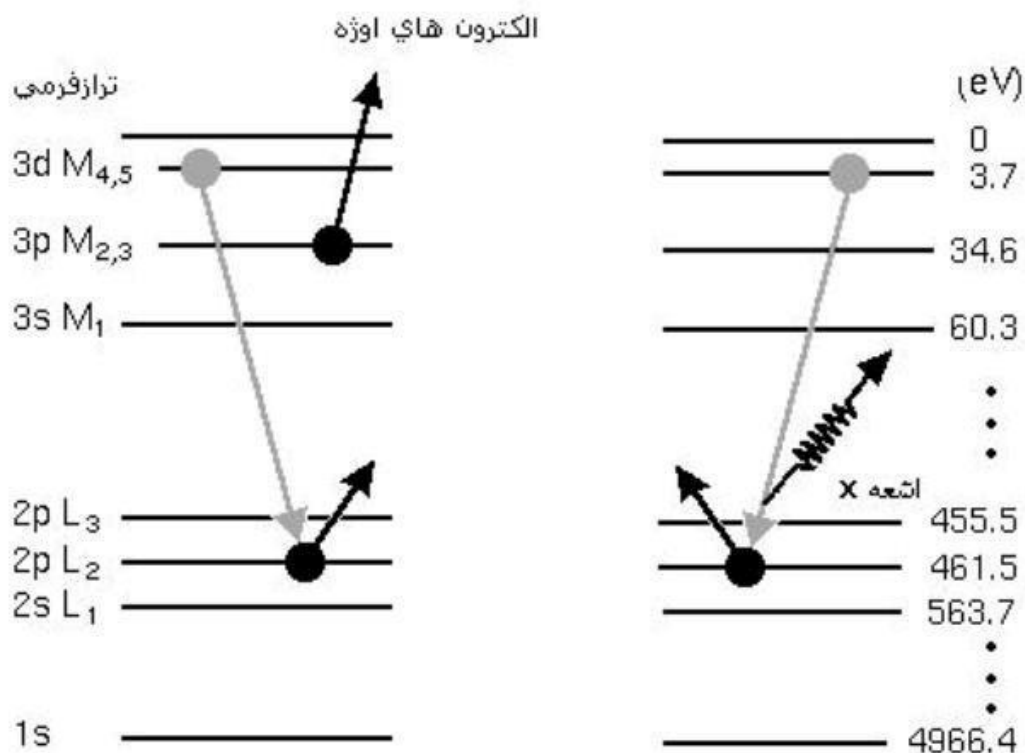
الکترون‌های پراکنده شده برگشتی: این الکترون‌ها (مطابق شکل ۲-۴) نتیجه برخورد کشسان الکترون فرودی با هسته‌ی اتم‌های هدف (پراکندگی رادرفورد) می‌باشند. در نتیجه سیگنال مربوط به این الکترون‌ها با عدد اتمی ماده هدف رابطه مستقیم دارد.



شکل ۲-۴: شکل الکترون پراکنده شده‌ی برگشتی.

این الکترون نیز اگر در حرکت خود داخل ماده از چندین اتم پراکنده شود و سپس خارج شود الکترون پراکنده شده‌ی برگشتی نوع دو (BSE2) نامیده می‌شود که با الکترون پراکنده شده‌ی برگشتی نوع اول متفاوت است.

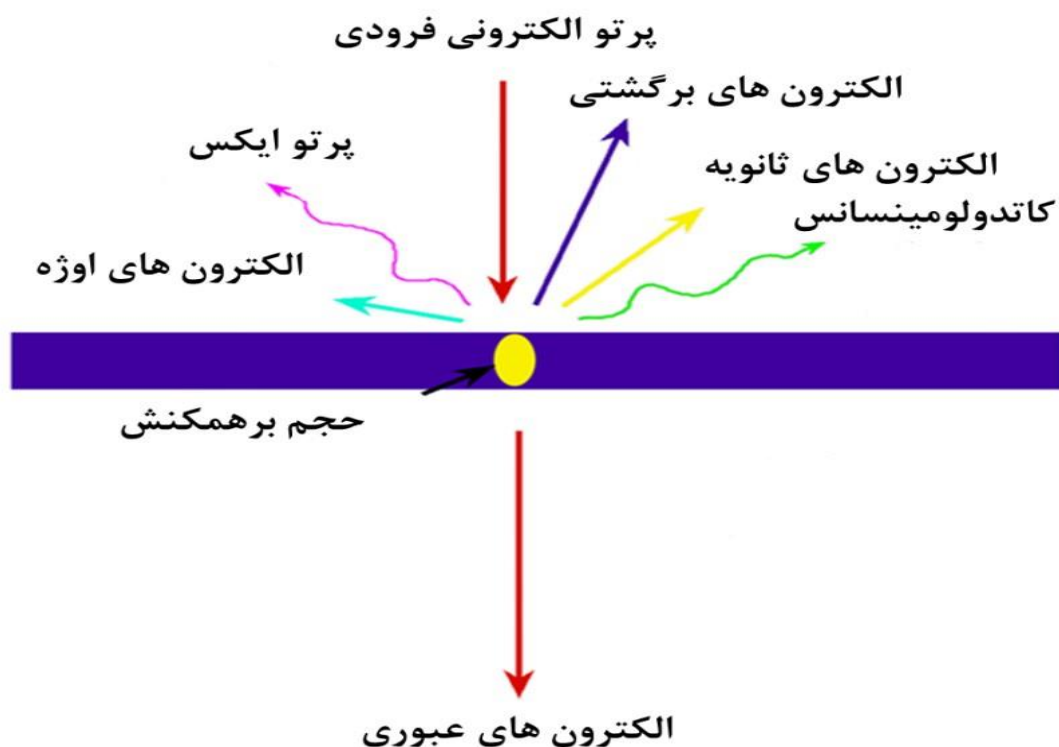
اشعه X و الکترون اوژه: در برخورد ناکشسان پرتوی الکترونی با اتم، الکترون فرودی انرژی خود را به الکترون لایه‌ی درونی اتم داده و الکترونی از لایه‌های درونی اتم جدا می‌شود جای خالی این الکترون توسط یکی از الکترون‌های لایه‌های بالاتر که پرنرژی‌تر هستند پر می‌شود و انرژی آزاد می‌گردد (مطابق شکل ۲-۵)، این انرژی یا می‌تواند بصورت فوتون باشد که همان اشعه X است و یا می‌تواند به الکترون دیگری منتقل گردد و آن الکترون را به بیرون از اتم گسیل کند که به این الکترون گسیلی، الکترون اوژه گویند.



شکل ۲-۵: سمت راست توصیفی از تولید اشعه‌ی X از ماده و سمت چپ گسیل الکترون اوزه را نشان می‌دهد.

کاتدولومینسانس: به طور کلی پدیده‌ی لومینسانس تابش نور از ماده است با شرط اینکه منشأ آن انعکاس نور و تابش جسم سیاه نباشد. از کاربردهای آن در نیمه رساناها می‌باشد. این تابش نور ممکن است ناشی از تحریک شدن جسم به روش‌های متفاوت از جمله تحریک گرمایی، تابش فوتون، تابش الکترون، میدان الکتریکی، امواج صوتی و غیره باشد. هنگامیکه با تابش الکترون جسم تحریک شود و الکترون‌های فرودی باعث برانگیختگی الکترون‌های رسانش شود، اتم‌های هدف نور تولید می‌کنند که به این پدیده کاتدولومینسانس گفته می‌شود.

در شکل ۲-۶ پدیده‌هایی که در اثر تابش پرتوی الکترونی به ماده صورت می‌پذیرد بطور خلاصه آورده شده است.



شکل ۶-۲: پدیده‌هایی که در اثر تابش پرتوی الکترونی به ماده صورت می‌پذیرد.

## ۴-۲ روش‌های آنالیز سطح

برای درک خواص و واکنش‌پذیری سطح، به اطلاعاتی از قبیل: توپوگرافی فیزیکی، ترکیب شیمیایی، ساختار شیمیایی، ساختار کریستالی، ساختار اتمی، حالت الکترونیکی و توصیفی تفصیلی از پیوند مولکول‌ها در سطح نیاز است. هیچ روشی به تنهایی قادر به فراهم آوردن همه‌ی این اطلاعات مختلف نیست. همیشه برای بررسی کامل یک پدیده سطحی به استفاده از چندین روش نیاز است. در جدول ۱-۲ تعدادی از این روش‌ها با نام مخفف و برحسب سیستم ذره یا فوتونی که برای بررسی سطح استفاده می‌شود و ذره یا فوتونی که در آشکارساز به کار می‌رود، آورده شده‌اند. مشخصه بیشتر روش‌هایی که در تحلیل سطح استفاده می‌شوند، این است که در خلاء انجام می‌شوند، زیرا الکترون‌ها و یون‌ها در فاز گازی به وسیله مولکول‌ها پراکنده می‌شوند. ضمن اینکه روش‌های فوتونی را در اصل می‌توان در

محیط اتمسفر انجام داد؛ گاهی جذب فاز گازی فوتون‌ها اتفاق می‌افتد و در نتیجه این روش نیز ممکن است در خلاء انجام شود [۶۱].

جدول ۱-۲: روش‌های تحلیل سطح و اطلاعاتی که می‌توانند به دست بدهند [۶۱].

پرتوی فرودی پرتو آشکار شده	فوتون الکترون	فوتون فوتون	الکترون الکترون	یون یون	نوترون نوترون
توپوگرافی			SEM STM FESEM		
ترکیب شیمیایی	ESCA/XPS		AES	SIMS ISS	
ساختار شیمیایی	ESCA/XPS	EXAFS IR&SFG	EELS	SIMS	INS
ساختار اتمی		EXAFS	LEED RHEED	ISS	
پیوند جذب شونده سطحی		EXAFS IR	EELS	SIMS	INS

روش‌های مختلف بسیاری برای آنالیز سطح استفاده می‌شوند که توضیح آنها در این مختصر نمی‌گنجد. ما به مختصر توضیحی از چند روش پرکاربرد که در تحلیل و آنالیز سطح استفاده می‌شود بسنده می‌کنیم. ما برای بررسی نمونه‌ها از روش‌های XRD، FESEM و آنالیز AFM استفاده کردیم که ابتدا به مختصر توضیحی درباره روش طیف سنج پراش پرتو ایکس (XRD) می‌پردازیم.

## ۲-۴-۱ طیف سنج پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD)

ناحیه پرتوی X در طیف الکترومغناطیس در محدوده بین پرتوی گاما و پرتوی فرابنفش قرار دارد. با استفاده از این ناحیه طیفی می‌توان اطلاعات خوبی در خصوص ساختار، جنس ماده و نیز تعیین مقادیر عناصر بدست آورد [۶۲].

<sup>1</sup> X-Ray Diffraction

اگر مطابق شکل ۲-۷ یک دسته الکترون سریع و پرانرژی به یک هدف فلزی در یک لوله تخلیه برخورد کنند، در این برخورد قسمتی از انرژی جنبشی خود را به پرتو X تبدیل می‌کنند. این پرتو بصورت یک طیف پیوسته ظاهر می‌شود که دارای یک حداقل طول موج است که به حداکثر انرژی الکترون‌ها وابسته است و از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند:

$$V_e = hV_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (۱-۲)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{V_e} = \frac{12400}{V} \text{ Å} \quad (۲-۲)$$

که در آن V ولتاژ سرعت دهنده در طول لوله، e بار الکترون، h ثابت پلانک و c سرعت نور است. طول موج ماکزیمم در طیف پیوسته ۱/۵ برابر طول موج مینیمم است و طول موج‌ها برحسب آنگستروم هستند [۶۳].

با افزایش پتانسیل می‌توان انرژی الکترون‌ها را به حدی رساند که قادر باشد یک الکترون از تراز انرژی k اتم هدف جدا کند و در نتیجه الکترون تراز L جای خالی این الکترون را اشغال می‌کند و یک فوتون خارج می‌شود. بدین ترتیب طیف پیوسته پرتو X شامل یک خط طیفی یا خط ویژه عنصر مربوطه خواهد بود که آن را  $k_{\alpha}$  می‌نامند. انرژی این خط ویژه توسط معادله زیر مشخص می‌گردد:

$$E_{k\alpha} = E_L - E_k \quad (۳-۲)$$

سایر جهش‌های الکترونی از ترازهای بالاتر، مانند جهش  $M \rightarrow K$ ، موجب پیدایش خط طیفی دیگری مانند  $K_{\beta}$  می‌شود [۶۴].

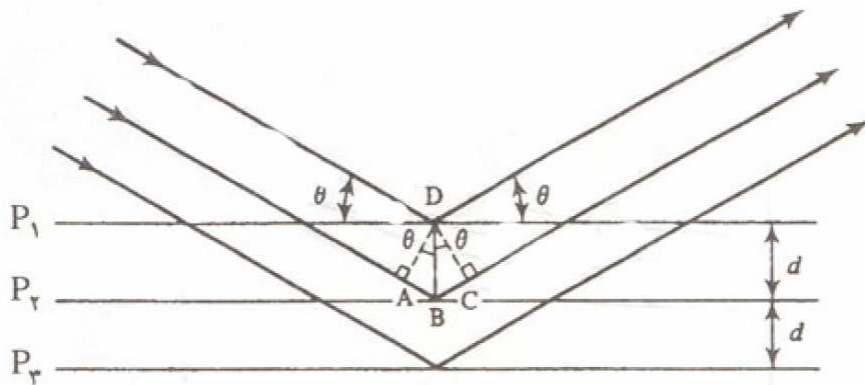
با روش پراش پرتوی ایکس طول موج‌های مختلف را می‌توان جداسازی کرد و اندازه‌گیری نمود. چون طول موج‌های پرتوی ایکس با فواصل بین اتم‌ها در مواد بلوری برابر است، بنابراین مواد بلوری برای پرتوی ایکس می‌توانند نقش یک توری پراش را ایفا کنند. طبق رابطه براگ پدیده بازتابش و پخش تداخل سازنده طول موج‌ها به شرح ذیل معرفی می‌شود:

$$AB + BC = n\lambda \quad (۴-۲)$$

$$AB = BC = d \sin \theta \quad (5-2)$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (6-2)$$

رابطه‌ی اصلی براگ نمایانگر این نکته است که تقویت پرتوی بازتابش شده از دو سطح مختلف بلورها زمانی حاصل می‌شود که اختلاف دومسیر برای دو تابش نورانی برابر مضرب کاملی از طول موج باشد [۶۵].



شکل ۲-۷: پراش پرتوی ایکس توسط یک بلور.

## ۲-۴-۲ طیف سنجی رامان (Raman Spectroscopy)

هنگامی که یک تابش الکترومغناطیس از یک محیط شفاف عبور می‌کند، مولکول و اتم‌های موجود قسمتی از باریکه را در تمامی جهات پراکنده می‌کنند. در سال ۱۹۲۸ رامان کشف کرد که طول موج مربوط به قسمت کوچکی از تابش پراکنده شده توسط مولکول‌های خاص، متفاوت از طول موج تابش اولیه است (یعنی پراکندگی غیرکشسان<sup>۱</sup> رخ می‌دهد) که میزان تفاوت در طول موج‌ها بسته به ساختار مولکولی ترکیبات تغییر می‌کند. طیف‌سنجی رامان بر اساس تجزیه و تحلیل این تفاوت‌ها جهت تعیین ساختار مولکولی ترکیبات مختلف شکل گرفته است [۳۵].

<sup>1</sup> Inelastic scattering

در اثر برخورد نور با ماده، با توجه به طول موج تابش پراکنده شده دو نوع پراکندگی خواهیم

داشت:

۱- پراکندگی ریلی<sup>۱</sup>: در اثر این نوع پراکندگی طول موج تابش تغییر نمی‌کند و تحت عنوان پراکندگی کشسان هم دسته‌بندی می‌شود.

۲- پراکندگی رامان<sup>۲</sup>: که طی آن بر اثر انتقال انرژی میان فوتون تابیده شده و مولکول‌های ماده، طول موج اولیه تغییر کرده و در اثر از دست دادن انرژی، طول موج افزایش می‌یابد و یا در اثر گرفتن انرژی، طول موج کاهش می‌یابد. میزان این تغییرات انرژی (چه کاهش و چه افزایش) به تناسب با بسامد ارتعاشات مولکولی ماده‌ی پراکنده کننده نور می‌باشد. پس پراکندگی رامان به دو دسته کلی تقسیم بندی خواهد شد. دسته اول که دارای طول موج بلندتر (انرژی کمتر) از تابش اولیه است تحت عنوان استوکس<sup>۳</sup> و دسته دوم که طول موج کوتاه‌تر (انرژی بیشتر) از تابش اولیه دارند، با نام آنتی‌استوکس<sup>۴</sup> شناخته می‌شوند.

## ۳-۴-۲ میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)<sup>۵</sup>

میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) از گروه میکروسکوپ‌های الکترونی است و یکی از معروف‌ترین روش‌های میکروسکوپی به شمار می‌آید. این میکروسکوپ علاوه بر تهیه تصاویر بزرگنمایی شده، در صورتیکه به تجهیزات اضافی نظیر EDX مجهز شود برای تحلیل عنصری و آنالیز شیمیایی و دیگر بررسی‌ها نیز بکارگرفته می‌شود. این میکروسکوپ می‌تواند تصاویری از سطح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیک در حد ۳ تا ۱۰۰ نانومتر (وابسته به شرایط نمونه) بدست دهد [۶۶].

---

<sup>1</sup> Rayleigh scattering

<sup>2</sup> Raman scattering

<sup>3</sup> Stokes

<sup>4</sup> anti-Stokes

<sup>5</sup> Scanning Electron Microscope



اصول کارکرد این میکروسکوپ براساس برهم‌کنش پرتوی الکترونی با ماده است. این میکروسکوپ شامل تفنگ الکترونی، عدسی‌های متمرکز کننده، سیم‌پیچ‌های پیمایشگر، آشکارسازها و سیستم خلاء است.

منبع تولید الکترون (تفنگ الکترونی) می‌تواند از دو روش الکترون‌ها را تولید کند؛ روش اول گسیل گرمایی و روش دوم گسیل میدانی (FEG) است. میکروسکوپ‌هایی که با روش گسیل میدانی کار می‌کنند را FESEM می‌نامند و معمولاً نتایج بهتری می‌دهند. بعد از اینکه الکترون تولید شد بین دو یا سه عدسی متمرکز کننده پرتو الکترونی را کوچک می‌کنند، تا حدی که در موقع برخورد با نمونه قطر آن حدوداً بین ۲ تا ۱۰ نانومتر باشد. بعد از اینکه پرتوی الکترونی به سطح برخورد کرد برهم‌کنش - هایی بین سطح و الکترون‌ها صورت می‌گیرد که بر مبنای اینکه کدام برهم‌کنش اتفاق بیافتد و میکروسکوپ مجهز به کدام آشکارسازها باشد تصاویر بدست می‌آیند [۶۶].

پدیده‌های مهم که در این برخورد صورت می‌پذیرد عبارت‌اند از:

- الکترون‌های ثانویه

- الکترون‌های پراکنده‌شده برگشتی

- تولید اشعه X

- تولید الکترون‌های اوژه

- کاتدلومینسانس

برای آنالیز هر کدام از پدیده‌های بالا باید از آشکارساز مربوط به آن استفاده کرد. به طور کلی همگی SEM ها دارای مد کاری تصویربرداری الکترون‌های ثانویه هستند و بقیه آشکارسازها بصورت سفارشی بر روی میکروسکوپ نصب می‌شوند. در بخش قبل به تفصیل این پنج پدیده بررسی شدند.

به دلیل تنوع در سیگنالهای حاصل از برهمکنش الکترون‌ها با ماده SEM طیف وسیعی از اطلاعات بدست می‌دهد که شامل موارد زیر است:

- توپوگرافی<sup>۱</sup>: خصوصیات سطح،
- ریخت شناسی<sup>۲</sup>: شکل، اندازه و نحوه‌ی قرارگیری اتم‌ها در سطح جسم،
- ترکیب<sup>۳</sup>: نوع اتم‌های سازنده نمونه،
- کریستالوگرافی<sup>۴</sup>: حالت بلورین نمونه، شبکه کریستالی، جهات، صفحات کریستالی و نحوه‌ی تشکیل و رشد بلور

میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی هم ساخته شده که به خلاء بالا نیاز ندارد و بیشتر برای نمونه‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود که به اختصار ESEM<sup>۵</sup> گویند.

## ۴-۴-۲ میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۶</sup> (AFM)

حدوداً ۲۰ سال، از سال ۱۹۶۵ تا اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰، ایجاد تصاویری از سطوح با قدرت تفکیک بهتر از میکروسکوپ نوری در انحصار میکروسکوپ‌های SEM بود. روش‌های دیگری از قبیل میکروسکوپ الکترون انعکاسی در تمام این مدت در دسترس بودند، ولی بصورت تکنیک‌های مفید و با قدرت تفکیک بالا مورد استفاده قرار نگرفته و توسعه نیافته بودند. پس از اختراع میکروسکوپ‌های پروبی روبشی<sup>۷</sup> (SPM) این روش‌ها نیز متداول‌تر شدند. میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) که زیرمجموعه

---

<sup>1</sup> Topography

<sup>2</sup> Morphology

<sup>3</sup> Composition

<sup>4</sup> Crystallographic

<sup>5</sup> Environmental SEM

<sup>6</sup> Atomic Force Microscope

<sup>7</sup> Scanning Probe Microscopy

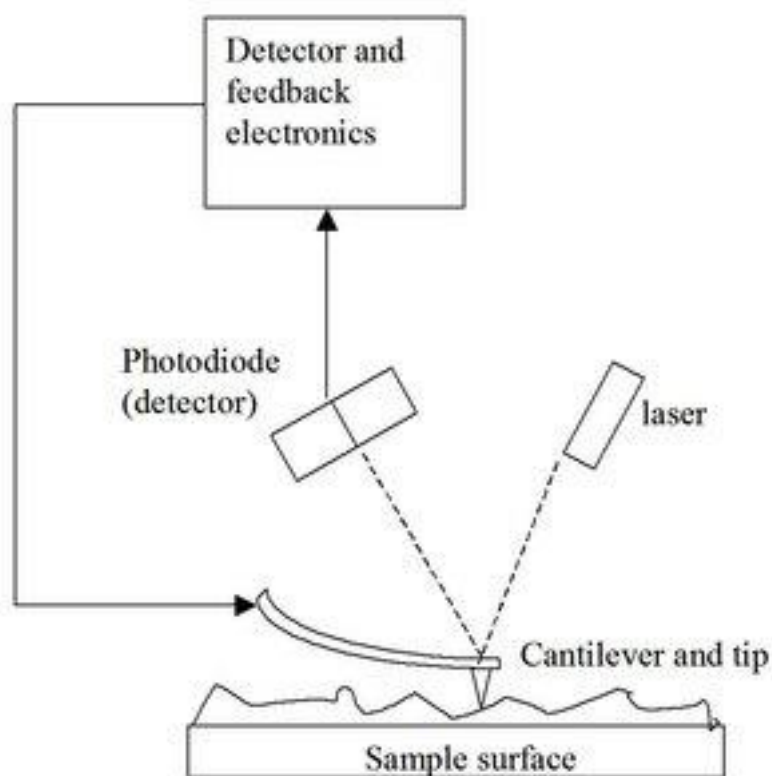
میکروسکوپ‌های پروب روبشی در نظر گرفته می‌شود تقریباً به اندازه SEM متداول شده است. در این قسمت اصول اساسی این تکنیک و خلاصه‌ای از روش‌های قابل دسترسی، تشریح می‌شود [۶۶].

در میکروسکوپ AFM (شکل ۲-۸) نوکی<sup>۱</sup> روی یک اهرم بازویی تعبیه شده است. با پائین آوردن آن روی سطح نمونه، نیروهای بین اتمی بین اتم‌های نمونه و اتم‌های سطح نمونه، نوک AFM را در فاصله ثابتی از سطح نگه می‌دارد. در طی روبش کردن سطح نمونه با استفاده از بلورهای پیزوالکتریک، میله کانتی‌لیور<sup>۲</sup> هماهنگ با توپوگرافی سطح نمونه بالا و پائین می‌رود. این حرکت عمودی نوک می‌تواند توسط انعکاس یک نور لیزر کوچک از پشت کانتی‌لیور با حساسیت زیاد اندازه‌گیری شود. حساسیت این روش در حدی است که انحرافات عمودی بسیار کمتر از  $0.1$  نانومتر را هم می‌تواند آشکار کند، بنابراین پله‌هایی با ارتفاع فقط یک اتم هم به آسانی تشخیص داده می‌شوند. قدرت تفکیک جانبی نیز در این مقیاس امکان‌پذیر است بنابراین AFM واقعاً در سه بعد قدرت تفکیک اتمی دارد [۶۶].

---

<sup>1</sup> Tip

<sup>2</sup> cantilever



شکل ۲-۸: اجزای یک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM). انحرافات عمودی اهرم بازویی با انحراف انعکاسی نور لیزر از پشت کانتی لیور، آشکار می شود.

یک مشخصه بارز AFM عدم نیاز به تجهیزات ویژه برای قراردادن نمونه در خلاء است. اغلب کار AFM در هوا انجام می گیرد و تصاویر بسیار خوبی حتی در آب یا مایعات دیگر به دست می آید. بنابراین AFM از نظر هزینه و سهولت استفاده با SEM رقابت می کند و از نظر قدرت تفکیک بر آن برتری دارد. اما تمامی تصاویر AFM نیاز به پردازش توسط کامپیوتر دارند و تفسیر این تصاویر به روشنی تصاویر SEM نیست. عملکرد AFM در بزرگنمایی پائین نیز به خوبی SEM نیست [۶۶].

فصل سوم: شیشه سازی، کد شیشه ساز **Geant4**، محاسبات ذرات

جذب و شیشه سازی ماسک جاذب در پرتو دهی رادیواکتیو

### ۱-۳ مقدمه

هنر شبیه‌سازی امروزه در تار و پود علوم و فنون جهان جای گرفته و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بسیاری با کاربردهای گوناگون در علوم متفاوت طراحی و استفاده شده است. شبیه‌سازی یکی از ابزارهای قدرتمند تحلیل سیستم‌ها است و کمتر مسئله یا فرآیندی وجود دارد که نتوان آن را با شبیه‌سازی بررسی و تحلیل کرد. مفهوم شبیه‌سازی ساده و جاذبه‌شهودی نیز دارد. شبیه‌سازی با تکیه بر تکنیک‌های مدل‌سازی و با استفاده از اعداد تصادفی به خوبی یک مسئله بزرگ و پیچیده یا یک آزمایش و فرآیند بسیار پیچیده را با کمترین هزینه و صرف وقت اندک تحلیل می‌نماید و برخلاف بسیاری از علوم و فنون که برحسب رشته‌ای خاص دسته‌بندی می‌شوند هنر و فن شبیه‌سازی در تمام رشته‌ها و علوم قابل استفاده است.

برای شبیه‌سازی تعاریف مختلفی گفته شده است. در حقیقت هر مدل یا نمایش از یک شیء نوعی شبیه‌سازی است. اگر آن را بخواهیم در قالب فرآیند تعریف کنیم؛ به فرآیندی از مدل‌سازی و اجرای مدل شبیه‌سازی گویند. بنابراین شبیه‌سازی عبارت است از طراحی مدل منطقی از یک سیستم واقعی و انجام آزمایش‌هایی با این مدل. فرآیند شبیه‌سازی هم شامل ساختن مدل و هم شامل استفاده‌ی تحلیلی از آن برای مطالعه، بررسی و تحلیل یک مسئله یا فرآیند است. مدل‌سازی از طریق شبیه‌سازی یک روش تجربی و کاربردی است که در جستجوی اهداف زیر است [۶۷-۶۹]:

✓ توصیف رفتار سیستم‌ها؛

✓ ارائه‌ی نظریه‌ها و یا فرضیه‌هایی که علت رفتار مشاهده شده را بیان کنند؛

✓ استفاده از این نظریه‌ها برای پیشگویی رفتار آینده.

شبیه‌سازی اجرای یک مدل و مدل‌سازی تعریف شد، پس مفید خواهد بود کمی درباره انواع مدل‌ها توضیح دهیم.

## ۲-۳ انواع مدل‌ها

مدل‌هایی که برای سیستم‌ها ساخته و بکار برده می‌شوند را با توجه به خصوصیات عمومی‌شان می‌توان به طرق مختلف دسته‌بندی نمود. این دسته‌بندی نه تنها انواع مدل‌ها را از یکدیگر متمایز می‌سازد بلکه روش‌های بررسی را نیز برای آن‌ها تعیین می‌کند.

در مرحله‌ی اول مدل را می‌توان به دو دسته‌ی فیزیکی و ریاضی تقسیم نمود. مدل‌های فیزیکی، همانطور که از نام‌شان پیداست شامل خصوصیات عمده و فیزیکی سیستم واقعی بوده و تنها از مقیاس کوچکتري برخوردارند. مدل‌های ریاضی نیز خود به دو دسته به نام‌های سمبولیک<sup>۱</sup> و گرافیک<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند.

در یک تقسیم‌بندی دیگر مدل‌ها اعم از فیزیکی یا ریاضی به دو دسته‌ی ایستا<sup>۳</sup> و پویا<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌گردند. در دسته‌ی ایستا بعد زمان بطور کامل نادیده گرفته می‌شود یا وضعیت سیستم در یک لحظه‌ی زمانی تحلیل و بررسی می‌گردد. مدل پویا شامل گذر زمان بوده و با گذشت زمان سیستم تحلیل می‌گردد.

از یک دیدگاه دیگر مدل‌های ریاضی شامل مدل‌های تحلیلی و عددی می‌باشند. این دسته‌بندی با توجه به روش بررسی مدل و کسب نتایج، انجام شده است. در مدل تحلیلی بدست آوردن جواب با استدلال‌های ریاضی امکان‌پذیر است و نتیجه برای هر مقدار از پارامترها معتبر و دقیق است. در حالیکه برای حل مدل‌های عددی روش‌های منطقی ریاضی بکار برده نمی‌شوند و فقط از طریق روش‌های عددی و به ازاء مقادیر معین از پارامترها نتیجه معین بدست می‌آید. نوع دیگری از تقسیم‌بندی بصورت قطعی

---

<sup>1</sup> Symbolic

<sup>2</sup> Graphic

<sup>3</sup> Static

<sup>4</sup> Dynamic

و احتمالی می‌باشد. در مدل قطعی تغییرات معین است و بر اساس روابط غیر احتمالی مسئله حل می‌گردد. ولی در مدل احتمالی حداقل قسمتی از تغییرات و روابط تصادفی یا احتمالی است [۷۰].

یک بررسی ساده از مقالات، کتب، پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری و نوشته‌های مربوط به شبیه‌سازی می‌تواند گویای وسعت کاربردهای این فن در زمینه‌های مختلف از جمله اقتصاد، سیاست، سیستم‌های جهانی، ریاضیات، فیزیک، شیمی و بسیاری از علوم و زیرشاخه‌های آن‌ها باشد.

### ۳-۳ ضرورت و مزایای استفاده از شبیه‌سازی

شبیه‌سازی دارای مزایای بسیاری است که باعث توسعه‌ی کاربردهای آن شده است. از جمله مزایای شبیه‌سازی بطور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: [۶۹]

- امکان مطالعه‌ی سیستم قبل از ایجاد یا خلق و یا پس از انهدام آن را فراهم می‌کند،
- پارامترهای زمانی سیستم مورد مطالعه قابل تغییر است و همچنین امکان فشرده سازی زمان وجود دارد،
- از نظر اقتصادی و زمانی بسیار مقرون به صرفه است،
- محدودیت و خطرات ناشی از مطالعه‌ی مستقیم سیستم قابل رفع می‌باشد،
- مطالعه‌ی جزءبه‌جزء سیستم و کنار هم نهادن اجزاء را امکان‌پذیر می‌کند،
- حداکثر کارایی با این روش قابل دستیابی است.
- کنترل دقیق پارامترهای موثر بطور مثال پارامترهای محیطی دقت و صحت آزمایش را بسیار بالاتر می‌برد،
- امکان تکرارپذیری وجود دارد،



➤ امکان شبیه‌سازی با هزینه‌ای بسیار اندک در اختیار هر محقق که با سیستم آشنا باشد

هست که برای مطالعه‌ی مستقیم این امکان به راحتی برای هر فرد نیست.

مطمئناً شبیه‌سازی همیشه راه حل ساده‌ای نیست؛ بلکه شبیه‌سازی واقعی ممکن است نیاز به برنامه‌های کامپیوتری طولانی با پیچیدگی‌های بالایی داشته باشد. امروزه زبان‌های شبیه‌سازی مختلف و نرم‌افزارهای بسیاری برای آسان کردن شبیه‌سازی ارائه شده است، با این وجود گاهی شبیه‌سازی برخی سیستم‌ها بسیار سخت خواهد بود. زمانیکه با در نظر گرفتن تمامی شرایط و مشکلات نتوان راه حل ساده‌تری جز شبیه‌سازی یافت باید به سراغ این هنر برای مطالعه و بررسی سیستم‌ها و فرآیندها رفت [۷۱].

### ۳-۴ انواع شبیه‌سازی

روش‌های تحلیلی ریاضی هر جا که ممکن باشد مطلوب‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای مطالعه‌ی سیستم و فرآیند می‌باشند. زیرا اغلب، جواب‌ها و نتایجی را بدست می‌دهند که برای مقادیر مختلف پارامترها قابل محاسبه بوده و میزان دقت آن‌ها صددرصد می‌باشد. جاییکه نتوان به دلایلی که قبلاً گفته شد از روش‌های ریاضی استفاده کرد بررسی سیستم از طریق شبیه‌سازی مطرح می‌گردد. مدل‌های متفاوتی از شبیه‌سازی وجود دارد که بصورت کلی ذکر می‌کنیم [۷۰]:

○ **شبیه‌سازی همانی:** اگر در شبیه‌سازی خود سیستم را به عنوان مدل آن در نظر

بگیریم و رفتار آن را بررسی کنیم به این روش شبیه‌سازی همانی گویند. اگرچه این

روش ساده به نظر می‌رسد و در صورت یافتن نتیجه، این نتیجه صددرصد قابل استفاده

و مفید است، ولی دارای معایب قابل توجهی نیز می‌باشد. از جمله‌ی این معایب، غیر

عملی بودن در بعضی موارد، مخارج زیاد بکارگیری آن و کاهش امکان کنترل

متغیرهای سیستم است. به خصوص این روش هنگامیکه احتیاج به بررسی سریع

سیستم و کسب نتایج در یک مدت کوتاه یا طراحی یک سیستم جدید است بی‌فایده خواهد بود.

○ **شبیه‌سازی نیمه همانی:** در مطالعه‌ی سیستم سعی می‌گردد تا آنجا که امکان دارد از اشیاء و قوانین واقعی سیستم استفاده گردد. فقط اشیاء یا مراحل از فرآیند سیستم شبیه‌سازی می‌گردند که باعث غیر ممکن ساختن شبیه‌سازی همانی می‌گردند. به عبارتی دیگر بخشی از مدل سیستم واقعی و بخشی غیر واقعی یا شبیه‌سازی شده است.

○ **شبیه‌سازی آزمایشگاهی:** در این روش برخی از اجزاء سیستم واقعی بوسیله‌ی امکانات آزمایشگاهی ساخته شده و برخی دیگر بوسیله‌ی سمبول‌ها جایگزین می‌شوند. آنگاه مدل ساخته شده بوسیله‌ی عملگرهای واقعی سیستم شروع به کار می‌کند. در حین انجام کار، مدل مذکور به جمع‌آوری، پردازش و تولید اطلاعاتی که عملگر یا بررسی‌کننده‌های سیستم احتیاج دارد ادامه می‌دهد. عملگرها با توجه به اطلاعات دریافتی تصمیم‌های لازم را گرفته و کار مدل آزمایشگاهی را هدایت می‌کنند. واضح است که تصمیمات عملگر یا بررسی‌کننده‌ها روی اطلاعات تولیدی مدل مؤثر بوده و همچنین اطلاعات مذکور روی تصمیمات آن‌ها. بطور کلی مؤلفه‌های آزمایشگاهی این روش گاه بسیار متنوع می‌باشد، از قبیل انسان، ماشین، سخت‌افزار، برنامه، توابع ریاضی و توزیع‌های احتمالی.

○ **شبیه‌سازی کامپیوتری:** در شبیه‌سازی کامپیوتری مدلی از سیستم بصورت برنامه کامپیوتری طراحی می‌گردد. کلیه‌ی اشیاء و اجزاء بصورت ساختارهای برنامه و کلیه‌ی رفتار و مشخصات آن‌ها به متغیرها و توابع ریاضی تبدیل می‌گردد. سپس قوانین و

روابط حاکم بر سیستم، بر ساختارها و ارتباطشان با یکدیگر در اجرای برنامه جاری می‌شود.

شبیه‌سازی کامپیوتری به علت عملی بودن در اغلب موارد و دارا بودن امتیازهای خاص برای بررسی و مطالعه‌ی اغلب سیستم‌ها بکار برده می‌شود. برخی از مزایای این روش را که باعث توجه بیشتر به آن و افزایش موارد کاربرد آن گشته به شرح ذیل بیان می‌کنیم:

❖ الف) قدرت فشردن زمان: بدین صورت که بوسیله‌ی شبیه‌سازی کامپیوتری ممکن است چندین سال از فعالیت یک سیستم را در چند ثانیه ملاحظه و بررسی کنیم. در نتیجه محقق قادر است چندین طرح از سیستم را در یک فرصت کوتاه مطالعه و نتایج و عملکردها را مقایسه کند.

❖ ب) قدرت گسترش زمان: محقق قادر است جزئیات تغییراتی که در زمان واقعی قابل مشاهده نیستند مطالعه نماید. به عبارت دیگر تغییراتی که به علت بالا بودن سرعت ایجاد آنها در سیستم واقعی قابل قابل مشاهده یا مطالعه نمی‌باشند، در این روش قابل کنترل و بررسی هستند. به عبارت دیگر تغییراتی که به علت بالا بودن سرعت ایجاد آنها در سیستم واقعی قابل مشاهده یا مطالعه نمی‌باشد، در این روش قابل کنترل و بررسی هستند که این کار با کم کردن سرعت در مدل شبیه‌سازی شده صورت می‌پذیرد.

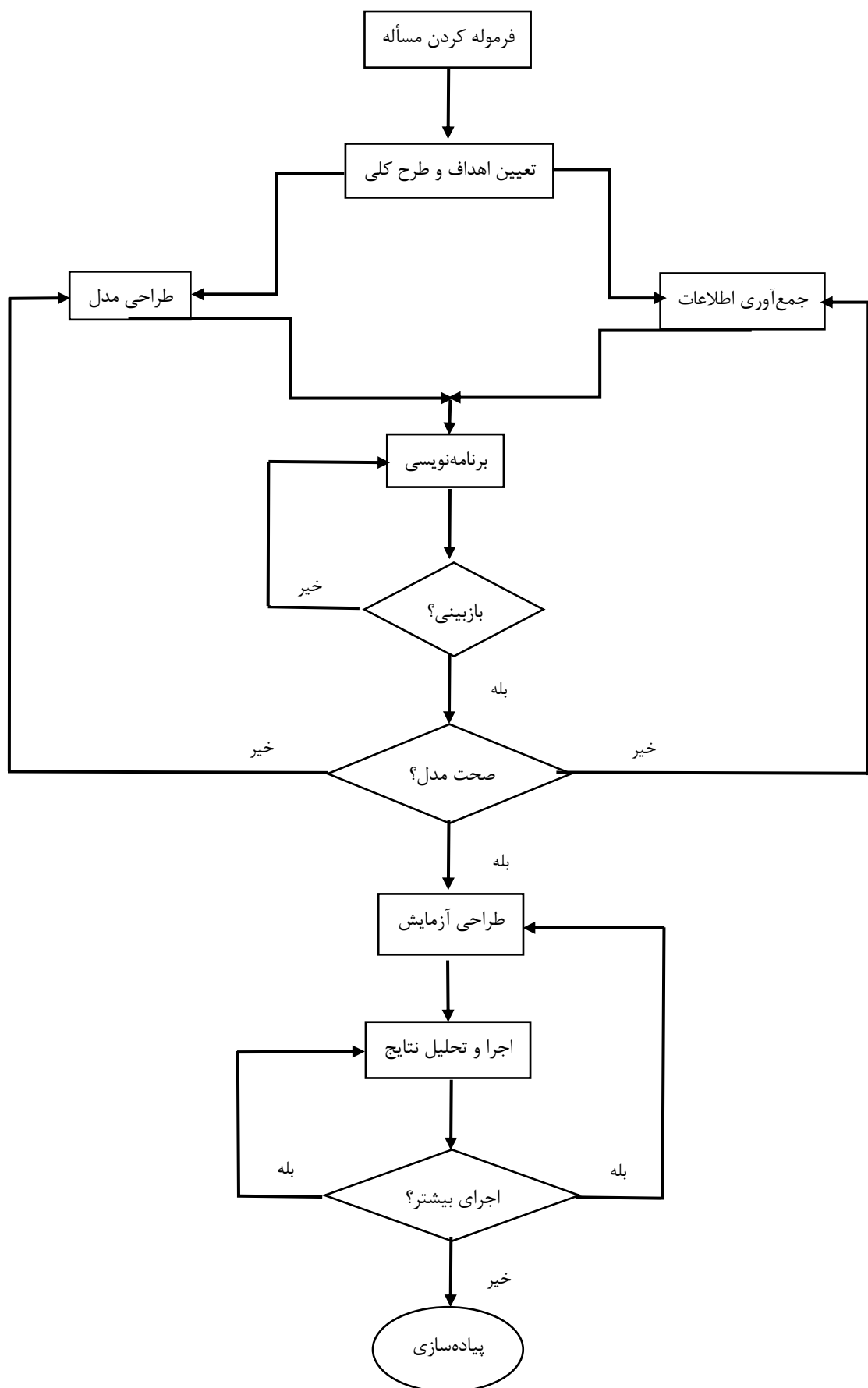
❖ ج) در یک بررسی گاه لازم است که حرکت زمان را متوقف کرده و نتایج را بررسی و پس از تصمیمات لازم بررسی را از همان نقطه توقف از سر گرفت که این مستلزم آن است که تمام پدیده‌های وابسته به سیستم وضعیت خود را تا شروع مجدد بررسی و آزمایش دقیقاً حفظ کنند. این امکان در همه‌ی روش‌های مطالعه‌ی سیستم‌ها وجود ندارد ولی در شبیه‌سازی کامپیوتری این عمل به سادگی قابل انجام است.

❖ د) شبیه‌سازی کامپیوتری این امکان را به محقق می‌دهد که آزمایش را با حفظ کلیه شرایط اولیه و رفتار و پارامترهای سیستم بوسیله‌ی یک برنامه تکرار کند و در هر یک از دفعات تکرار فقط مقادیر بعضی از پارامترها را به منظور بررسی اثر آنها بر رفتار سیستم و نتایج حاصل تغییر دهد.

❖ ه) شبیه‌سازی کامپیوتری قادر به ایجاد تغییرات جدید در سیستم و بررسی نتایج حاصل از آنها است. همچنین می‌تواند سیستم‌هایی را که در مرحله‌ی طرح می‌باشند قبل از صرف هرگونه نیرو، سرمایه و زمان بررسی و تحلیل کند. یک محقق با شبیه‌سازی کامپیوتری قادر است آزمایش‌ها و یا سیستم‌های فرضی را که احیاناً ایجاد و مطالعه‌ی آنها بوسیله‌ی روش‌های دیگر غیرممکن یا مخاطره آمیز است را بررسی و تحلیل کند [۷۰].

### ۵-۳ مراحل اساسی یک مطالعه‌ی شبیه‌سازی

شکل ۳-۱ مراحل را نشان می‌دهد که اجرای آنها راهنمای مناسبی برای طراحی مدل در مطالعه‌ی صحیح شبیه‌سازی است.



شکل ۳-۱: مراحل یک مطالعه‌ی شبیه‌سازی

مراحل شبیه‌سازی به شرح ذیل است [۶۹، ۷۰]:

- **تعریف مسأله:** هر مطالعه‌ی شبیه‌سازی با تعریف مسأله شروع می‌شود.
- **تعیین هدف:** اهداف تعیین کننده‌ی پرسش‌هایی هستند که باید با استفاده از شبیه‌سازی برای آن‌ها پاسخ ارائه داد. در این مرحله باید تعیین کرد که آیا با توجه به تعریف مسأله و اهداف در نظر گرفته‌شده، شبیه‌سازی روش مناسبی برای تحلیل مسأله شمرده می‌شود یا خیر. هدف است که نحوه‌ی آزمایش، جزئیات لازم و نتایج نهایی را تعیین می‌کند. وقتی که هدف شبیه‌سازی مشخص گردد، آنگاه باید به شناخت سیستم و تعریف قسمت‌هایی از آن که بطور مستقیم و یا غیرمستقیم به هدف بستگی دارد پرداخت.
- **تعریف سیستم شامل تعیین محیط سیستم، اجزاء آن و بالاخره پارامترها و متغیرهای سیستم می‌باشد.** بعد از تعیین دقیق بخش‌ها و اطلاعات مذکور، چگونگی رفتار سیستم مورد بررسی قرار گرفته و جزئیات تغییر وضعیت‌ها و اثر پارامترها در سیستم معلوم می‌گردند؛ سرانجام یک الگوریتم رفتاری از سیستم جهت مدلسازی ساخته می‌شود.
- **طراحی مدل:** ساخت مدل برای یک سیستم فرآیندی عملی و همچنین هنری است. طراح مدل باید بتواند خصوصیات اصلی سیستم و فرض‌های لازم برای طراحی مدل را به نحوی انتخاب کند که نتایج مورد نیاز خود را از آن بدست آورد. بدین ترتیب شیوه‌ی آغاز کار با مدلی ساده و کامل کردن تدریجی آن است.
- **جمع‌آوری اطلاعات، مشاهدات و تعیین مقادیر پارامترها:** بین دو مرحله‌ی طراحی مدل و جمع‌آوری اطلاعات ارتباط نزدیکی وجود دارد. برحسب اینکه درجه‌ی پیچیدگی مدل چه مقدار باشد، عناصر اطلاعاتی مورد نیاز تغییر می‌کند. مرحله‌ی جمع‌آوری اطلاعات معمولاً همزمان با اجرای قسمت‌های نخست مرحله‌ی طراحی مدل

آغاز می‌گردد. اینکه چه نوع اطلاعاتی باید گردآوری شوند تا حد زیادی توسط اهداف مطالعه‌ی شبیه‌سازی تعیین می‌شود. واضح است که مقدار و توزیع کلیه‌ی پارامترهای سیستم باید قبل از ساختن مدل تعیین و یا تخمین زده شوند.

- **صحت و اعتبار مدل:** این مرحله ناظر به غلط‌گیری برنامه کامپیوتری است. در واقع

سوال اساسی در این مرحله آن است که آیا برنامه کامپیوتری به نحو مناسبی کار می‌کند؟ در صورتیکه پارامترهای ورودی و ساختار منطقی مدل به طرز صحیحی داخل برنامه در نظر گرفته شوند و نتیجه‌ی درستی از آن گرفته شود می‌توان گفت که مرحله-ی تعیین صحت مدل کامل شده است. اعتبار یک مدل یعنی پاسخ دادن به این سوال که: آیا مدل ساخته شده رفتار سیستم واقعی را بدرستی شبیه‌سازی می‌کند یا خیر؟ اعتبارسنجی مدل و شبیه‌سازی از روش‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. یکی از این روش‌ها در مواقعی است که ارقام و نتایجی از سیستم واقعی در دست می‌باشد، سپس مقادیر بدست آمده از مدل را با آن مقایسه می‌کنند. یک روش دیگر هم در قالب یک فرآیند تکرارپذیر مطرح می‌شود. روش دیگر مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با شبیه‌سازی‌ها و مدل‌های قبلی و مشابه است که در اعتبارسنجی بسیار مفید است.

- **طراحی آزمایش:** انجام یک شبیه‌سازی کاملاً مشابه انجام یک آزمایش در آزمایشگاه

می‌باشد. یعنی همانطور که مقدار اولیه‌ی پارامترهای مؤثر بر آزمایش از قبیل درجه‌ی حرارت، شدت جریان، فشار و غیره دارای اهمیت بوده و باید با یک طرح تعیین شده‌ی قبلی معلوم و اجرا شوند، در آزمایش شبیه‌سازی نیز عوامل متعددی وجود دارد که باید دارای طرح معینی باشند. بعضی از این عوامل عبارت‌اند از: شرایط اولیه، شرایط پایانی و پارامترهای مختلفی که در هر برنامه‌ای وجود دارند.

یکی دیگر از مواردی که احتیاج به تصمیم‌گیری دارد چگونگی مقادیر پارامترها و قوانین مورد بررسی و در نتیجه تعداد اجراهای مدل است. معمولاً در یک فرآیند شبیه‌سازی تمام عوامل، قوانین و پارامترها به جز یکی از آن‌ها ثابت در نظر گرفته شده و فقط مقدار پارامتر مورد نظر را تغییر می‌دهند تا نتیجه‌ی تغییر را بر آن نتایج بدست آورند.

- **تجزیه و تحلیل نتایج:** آخرین مرحله‌ی شبیه‌سازی آنالیز و تجزیه و تحلیل نتایجی است که از مدل بدست آمده است. همانطور که قبلاً گفته شد هدف از آزمایش شبیه‌سازی شناخت بهتر سیستم و بکار بردن نتایج در بهبود سیستم می‌باشد. لذا یک آزمایش شبیه‌سازی باید به یک سری سوالات که ابتدا تعیین شده‌اند پاسخ دهد. اما نتایج یک مدل شبیه‌سازی اغلب بصورت عدد می‌باشند که لازم است به دقت تجزیه و تحلیل گردند تا پاسخ سوالات تعیین شده مشخص گردد. گاهی تحلیل این مقادیر خروجی سخت‌تر و حتی مهم‌تر از خود شبیه‌سازی خواهد بود.

### ۳-۶ روش مونت کارلو

روش مونت کارلو نمونه‌گیری از متغیرهای تصادفی با توزیع‌های احتمالی است که مرگنسالر<sup>۱</sup> آن را مدل نمونه‌ای نامید [۷۲]. در روش مونت کارلو از اعداد تصادفی و شبه تصادفی برای تعیین جواب مدل، استفاده می‌شود. اعداد تصادفی اساساً متغیرهای تصادفی مستقل هستند و از توزیع یکنواخت بر بازه‌ی [0,1] بدست می‌آیند. در واقع در رایانه کدهای محاسباتی برای تولید رقم‌های شبه تصادفی وجود دارند که تولید هر رقم با احتمال تقریباً برابر رخ می‌دهد. چنین برنامه‌هایی مولد اعداد تصادفی نامیده می‌شوند [۷۳].

---

<sup>1</sup> Mergenthaler



در ابتدا روش مونت کارلو برای حل مسائل مربوط به بمب اتم بکار برده شد. این کار شامل شبیه سازی مستقیم رفتار مربوط به انتشار نوترون های تصادفی مواد شکافت بود. بعد از مدت کوتاهی، روش های دیگری از مونت کارلو برای تعیین جواب انتگرال های چندگانه ی پیچیده و حل معادلات انتگرال های خاص که معمولاً در فیزیک با آنها مواجه می شویم و به روش تحلیلی قابل حل نیستند، مطرح شد [۷۳].

روش مونت کارلو می تواند نه تنها برای حل مسائل تصادفی بلکه برای حل مسائل قطعی (کلاسیک) نیز بکار رود. یک مسئله ی قطعی، زمانی با روش مونت کارلو قابل حل است که بتوانیم آن را بصورت یک فرآیند تصادفی بیان کنیم [۷۳].

ابزارهای شبیه سازی متفاوتی بر مبنای روش مونت کارلو طراحی شده اند که در فیزیک هسته ای اغلب از ابزار شبیه ساز MCNP استفاده شده و ابزار شبیه ساز Geant4 نیز در حال گسترش فراوانی است. ابزار MCNP بسیار به پیشرفت علم فیزیک کمک کرده است. ابزار Geant4 هنوز به حد ابزار شبیه ساز MCNP گسترش پیدا نکرده است ولی امید است که بیشتر به پیشرفت صنایع و کشور کمک کند و تولید علم بیشتری بکند.

### ۷-۳ ابزار مونت کارلوی Geant4

ابزار شبیه ساز Geant4 در سال ۱۹۷۰ و به منظور شبیه سازی ایجاد شد. کلمه ی Geant از عبارت *Geometry and tracking* به معنی هندسه و ردیابی گرفته شده است. این شبیه ساز به صورت مجموعه ی نرم افزاری رایگان، شامل ترکیبی از ابزارهای کلیدی می باشد که بطور دقیق قابلیت ترابرد ذرات در ماده را فراهم می کند. تمام جنبه های مختلف شبیه سازی، در این ابزار پیاده سازی می شود. مواردی که قابل شبیه سازی هستند عبارتند از:

• هندسه

- مواد تشکیل دهنده
  - ذرات با قابلیت ردگیری در شبیه سازی
  - تولید رویدادهای اولیه
  - ترابرد ذرات در ماده و در حضور میدان های الکترومغناطیسی
  - فرآیند فیزیکی به منظور تعریف برهمکنش های ذرات
  - پاسخ اجزاء آشکارساز
  - تولید اطلاعات رویدادها
  - ذخیره ی رویدادها
  - مصورسازی آشکارساز، مسیر ذرات و...
  - تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از شبیه سازی
- ابزار Geant4 مبتنی بر برنامه نویسی ++C از روش های بسیار پیشرفته ی مهندسی نرم افزار استفاده می کند. به منظور ساخت پروژه ای خاص کاربر از ویژگی های فوق استفاده کرده و با استفاده از کلاس عملیاتی که تعریف نموده است، به اجرای Geant4 می پردازد. مشکلات سایر کدهای قبلی نظیر ناتوانی و پیچیدگی در توسعه ی کد یا افزودن فرآیندهای فیزیکی جدید و گوناگون، مطابق خواسته ی کاربر با استفاده از مفهوم شیء گرایی مرتفع گردیده است. استفاده از روش شیء گرایی باعث مدیریت پیچیدگی و محدود کردن وابستگی بخش های مختلف برنامه به یکدیگر شده است. این امتیازات با استفاده از تعریف رابط های کاربری در بخش های مختلف فراهم گردیده است. با استفاده از مفهوم شیء گرایی، عملکرد مدل های مختلف به راحتی قابل تشخیص و تغییر بوده و افزودن مدل جدید به راحتی

امکان پذیر می‌باشد. هسته‌ی Geant4 شامل مجموعه‌ای از چندین مدل فیزیکی با گستره‌ی انرژی وسیع به منظور کنترل برهمکنش‌های ذرات با ماده می‌باشد [۷۴-۷۶].

آزمایشات فیزیک هسته‌ای دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشند. مسأله‌ی مهم‌تر افزایش تقاضا برای شبیه‌سازی‌های بزرگ مقیاس، دقیق و جامع آشکارسازها و ذرات مورد استفاده در این آزمایش‌ها می‌باشد. این پیچیدگی در بخش‌های دیگری از علوم نیز مانند فیزیک پرتوها، علوم فضایی، پزشکی هسته‌ای و به‌طور کلی در هر موضوع مرتبط با برهمکنش ذرات با ماده، ظاهر می‌شود. ابزار Geant4 مجموعه‌ای گوناگون از اجزاء نرم‌افزاری را مورد استفاده قرار می‌دهد که بسته به نیاز و پیچیدگی آزمایش، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷۶].

### ۳-۷-۱ تاریخچه‌ی Geant4

شکل‌گیری Geant4 به‌طور جداگانه توسط دو گروه مستقل در CERN و KEK از سال ۱۹۹۳ شروع شد. هر دو گروه به دنبال این هدف بودند که برنامه‌ی Geant3 مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی FORTRAN را بهبود بخشند. این دو گروه سپس تحت عنوان کمیته‌ی تحقیقات و پیشرفت‌های آشکارسازی سرن (CERN) به همدیگر پیوستند تا برنامه شبیه‌سازی براساس فناوری شیء‌گرا بسازند. این پروژه RD44 نامیده شد که حاصل تلاش بیش از صد دانشمند و مهندس در بیش از ده مرکز تحقیقاتی در اروپا، روسیه، ژاپن، کانادا و آمریکا بود. طراحی مورد نظر گروه RD44 براساس برنامه‌نویسی شیء‌گرا و زبان برنامه‌نویسی C++ بود. نسخه‌ی بعدی نیز در ژانویه‌ی سال ۱۹۹۹ منتشر شد که شامل پیشرفت‌ها و بهبودهایی در ابزار Geant4 بود [۷۶].

### ۳-۷-۲ خلاصه‌ای از طرح Geant4

Geant4 بر اساس نیاز نرم‌افزاری در آزمایش‌های پیشرفته طراحی شده است. یک سیستم نرم‌افزاری نوعی شامل اجزائی از قبیل مولد رویداد، شبیه‌سازی آشکارساز، بازسازی و آنالیز می‌باشد که می‌تواند به‌صورت مجزا یا ترکیب باهم مورد استفاده قرار گیرد. بسته‌ی نرم‌افزاری به عنوان پایه‌ای برای

اجزاء شبیه‌سازی ساخته‌شده است. لذا این بسته، به عنوان رابط تعریف شده برای سایر اجزاء و مهیا کردن قسمتی از نیاز بخش‌های دیگر طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های این کد در طراحی، قابلیت پیمانه‌ای و انعطاف آن می‌باشد، همچنین پیاده‌سازی فرآیندهای فیزیکی در این کد کاملاً شفاف بوده و به منظور اعتبارسنجی آن، دسترسی به کد برای کلیه کاربران رایگان می‌باشد. لذا به کاربر اجازه داده می‌شود که قابلیت فهم، تخصصی‌سازی و گسترش آن را در تمام زمینه‌ها داشته باشد. قابلیت پیمانه‌ای بودن آن، کاربر را قادر می‌سازد که فقط اجزاء مورد نیازش را تغییر داده و یا استفاده کند. طراحی سطح بالا براساس تجزیه تحلیل نیازمندی‌های اولیه کاربر می‌باشد که در نهایت منجر به ایجاد ساختار پیمانه‌ای و سلسله مراتبی برای ابزار شبیه‌سازی مورد نظر می‌باشد [۷۶].

اگر ذرات با انرژی مناسب به ماده برخورد کنند می‌توانند انرژی خود را به اتم‌های ماده هدف انتقال دهند. اگر این انرژی منتقل شده به اندازه‌ای باشد که بتواند اتم را از جایگاهش در ساختار شبکه‌ی ماده جابجا کند خود این اتم می‌تواند زنجیره‌ای از برخوردها را در ماده ایجاد نماید. از طرفی اگر اتم از ساختار ماده خارج شده و به سمت سطح ماده حرکت کند و انرژی قابل توجهی را با خود حمل کند، می‌تواند در یک محیط شیمیایی مناسب با ذرات دیگر واکنش شیمیایی انجام داده و ساختار جدیدی روی سطح ماده‌ی هدف ایجاد کند و به این طریق می‌توان ساختارهای جدیدی را بر روی سطح ماده‌ی هدف رشد داد. از آن‌جا که این ساختار جدید با ساختار ماده‌ی هدف تفاوت دارد، بنابراین از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی از هم متفاوت‌اند [۳۲].

ما می‌خواهیم از این خاصیت استفاده کنیم و تأثیر تابش رادیواکتیو را بر رشد مواد نانوساختار بررسی کنیم، ابتدا نیاز داریم دُز و انرژی جذب شده در سطح ماده هدف را بدست آوریم. ما ابتدا شبیه‌سازی هندسه و چشمه‌ی رادیواکتیو را انجام داده و سپس دُز جذب شده در سطح هدفی از جنس روی (Zn) را بدست می‌آوریم.

### ۸-۳ شبیه‌سازی و محاسبات دُز جذبی

برای بدست آوردن دُز جذب شده از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$D \left( \frac{J}{kg} \right) = \frac{E}{m} \quad ۱-۳$$

که در آن D مقدار دُز جذب شده برحسب گری (Gy)، E انرژی جذب شده در ماده برحسب ژول (J) و m جرم ماده هدف برحسب کیلوگرم است.

توان توقف ناشی از یونش- برانگیزش برای الکترون‌ها از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۷۸، ۷۷]:

$$\frac{dE}{dx} \left( \frac{MeV}{m} \right) = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left\{ \ln \left( \frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma-1}}{l} mc^2 \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[ \frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad ۲-۳$$

که در آن

$$r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2.818 \times 10^{-15} m = \text{الکترون کلاسیک شعاع}$$

$$mc^2 = 0.511 \text{ MeV} = \text{انرژی جرم سکون الکترون}$$

$$\gamma = \frac{(T + Mc^2)}{Mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$T = (\gamma - 1)Mc^2 = \text{انرژی جنبشی}$$

$$M = \text{جرم سکون الکترون}$$

$$N = \text{تعداد اتم‌ها در واحد حجم مکعب برای ماده‌ای که ذره در آن حرکت می‌کند}$$

$$Z = \text{عدد اتمی ماده}$$

$$\beta = \frac{v}{c}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$I = \text{پتانسیل برانگیزش متوسط ماده}$$

برای شبیه‌سازی از ابزار شبیه‌ساز Geant4 استفاده شد. شبیه‌ساز Geant4 بطور پیش‌فرض

تعدادی مثال نوشته شده در موضوعات و زمینه‌های متفاوت دارد که به کاربر کمک می‌کند از ابتدا کل

برنامه را ننویسد. ما پس از بررسی مثال‌ها از مثال rdecay02 استفاده کردیم و بعد از یکسری تغییرات

در این برنامه به برنامه مورد نیاز برای بدست آوردن دُز جذب شده در سطح هدف رسیدیم.

مثال rdecay02 با استفاده از کلاس G4RadioactiveDecay شبیه‌سازی واپاشی‌های

رادیواکتیو ایزوتوپ‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. در این مثال هندسه شامل یک هدف استوانه‌ای است که در

وسط یک آشکارساز استوانه‌ای قرار گرفته است. در برنامه مورد نظر ما هندسه تغییر کرده و فقط یک

صفحه مربع شکل به ابعاد 1cm\*1cm از فلز روی با ضخامت نیم میلی‌متر در مبدأ قرار گرفته است.

فرآیندهای فیزیکی که بطور پیش‌فرض استفاده شده شامل الکترومغناطیس استاندارد، واپاشی و واپاشی

رادیواکتیو است. این تغییرات در فایل exrdmDetectorConstruction.cc اعمال می‌شود که به جهت

طولانی بودن مطالب فایل قسمت مهم‌تر این فایل در ذیل آورده شده است. البته تغییرات دیگری نیز

نظیر فراخوانی کلاس ها در فایل exrdmDetectorConstruction.hh اعمال می شود که از ذکر بقیه جزئیات صرف نظر می کنیم.

```
// World

-----//

fSolidWorld = new G4Box("world",18.*cm, 18.*cm, 12.*cm);

fLogicWorld = new G4LogicalVolume( fSolidWorld, fDefaultMater, "World");

fPhysiWorld = new G4PVPlacement(0,          // no rotation

                                G4ThreeVector(), // at (0,0,0)

                                fLogicWorld,  // its logical volume

                                "World",      // its name

                                // its mother volume

                                false,        // no boolean operations

                                // no field specific to volume

                                -----//

                                // Target

                                -----//

                                fSolidTarget = new G4Box("Target", .5*cm, .5*cm, .25*mm);

                                fLogicTarget = new G4LogicalVolume( fSolidTarget, fTargetMater, "Target");

                                fPhysiTarget = new G4PVPlacement(0,          // no rotation

                                                                G4ThreeVector(), // at (x,y,z)
```

```

fLogicTarget, // its logical volume
"
Target", // its name

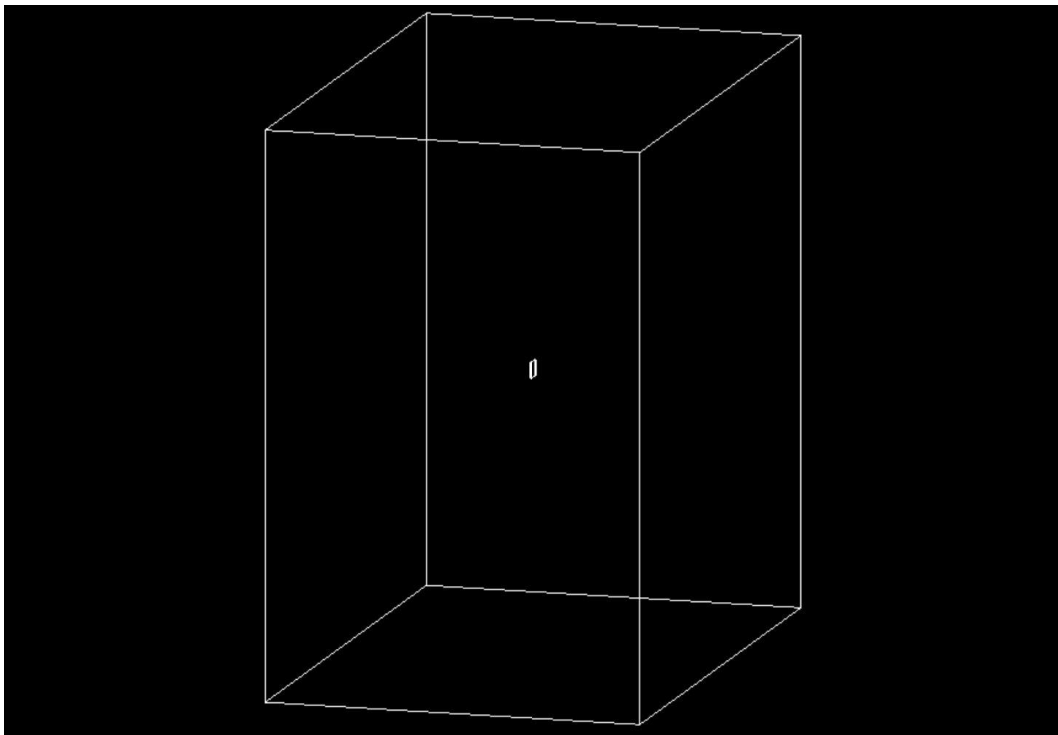
fLogicWorld, // its mother volume

false, // no boolean operations

//      ;(•          no particular field

```

در پاراگراف اول که درباره‌ی World نوشته شده است مشخصات حجم جهانی (مادر) شامل کلاس‌ها و ابعاد ذکر شده است. توجه کنید که در برنامه‌نویسی با کد شبیه‌ساز Geant4 تمام اعداد بکار رفته برای ابعاد را باید نصف ابعاد مورد نظر ذکر کنیم، یعنی اعدادی که در صفحه قبل دیده می‌شود در دنیای واقعی باید دو برابر در نظر گرفته شود. ماده در نظر گرفته شده برای حجم جهانی، خلاء بوده است. پاراگراف دوم نیز تعیین کننده‌ی مشخصات هدف (Zn) است. هندسه‌ی شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۲-۳ آورده شده است.



شکل ۲-۳: هندسه‌ی مسأله. مکعب بزرگ جهان و صفحه‌ی کوچک قرار گرفته در وسط هدف Zn است؛ چشمه نیز در ۱ cm از هدف بر روی محور Z تعیین شده است.



جهت مشخص کردن چشمه از نوع چشمه‌ی G4GeneralParticleSource (GPS) استفاده کردیم. این کار با تعریف خطوط فرمان در فایل ورودی ماکرو امکان‌پذیر است. مشخصات چشمه و آشکارساز در فایل ماکرو ورودی برنامه قرار گرفته و نمونه آن در زیر آورده شده است:

```
/score/create/boxMesh box_1
```

```
/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm
```

```
/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm
```

```
/score/mesh/nBin 50 50 1
```

```
/score/quantity/doseDeposit dose_1
```

```
/score/close box_1
```

```
/score/create/boxMesh box_2
```

```
/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm
```

```
/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm
```

```
/score/mesh/nBin 50 50 1
```

```
/score/quantity/doseDeposit dose_2
```

```
/score/filter/particle gammaFilter gamma
```

```
/score/close box_2
```

/score/create/boxMesh box\_3

/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm

/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm

/score/mesh/nBin 50 50 1

/score/quantity/doseDeposit dose\_3

/score/filter/particle eMinusFilter e-

/score/close box\_3

/score/list

/run/initialize

/grdm/analogueMC 1

/gps/particle ion

/gps/ion 77 192 0 0

/gps/energy 0 keV

/gps/position 0. 0. 1. cm

/run/beamOn 33300000

/score/dumpQuantityToFile box\_1 dose\_1 doseSr\_1.txt

/score/dumpQuantityToFile box\_2 dose\_2 doseSr\_2.txt

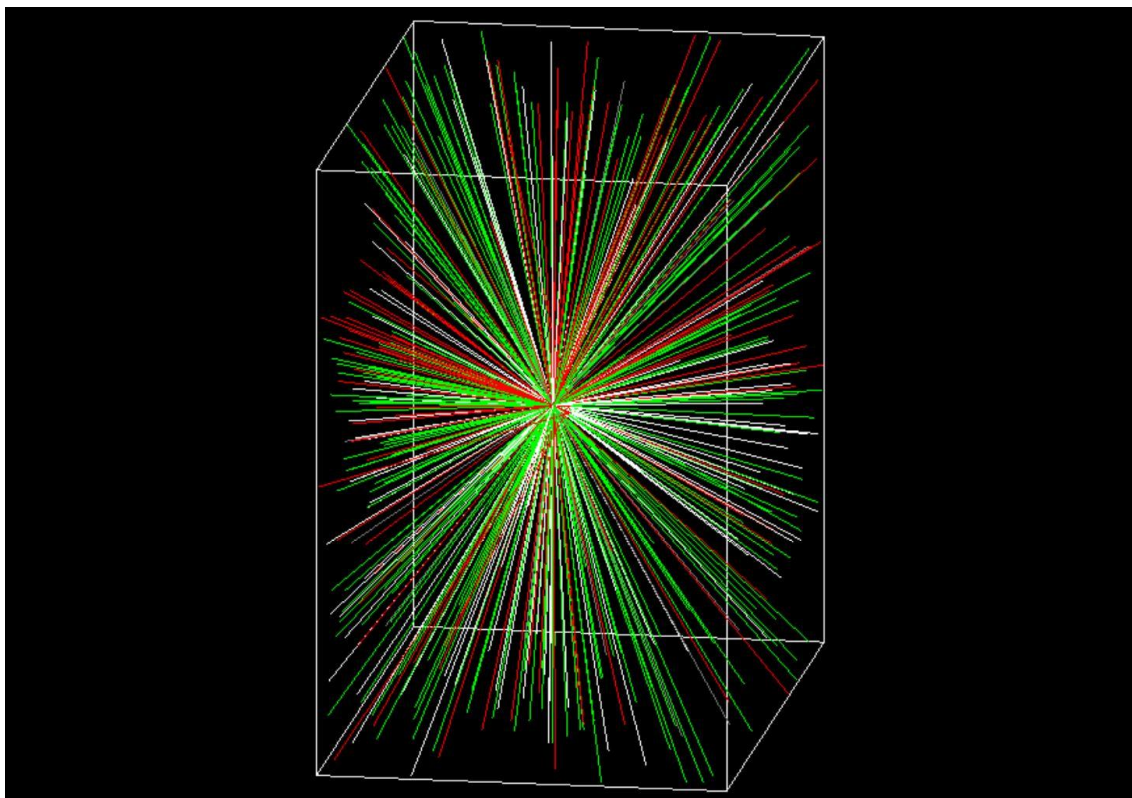
/score/dumpQuantityToFile box\_3 dose\_3 doseSr\_3.txt

همانطور که مشاهده می‌شود پاراگراف اول مربوط است به ذخیره‌سازی گُل دُز جذب شده در سطح، که در Close box\_1 ذخیره می‌شود، پاراگراف دوم میزان دُز جذب شده ناشی از پرتوهای گاما را در Close box\_2 ذخیره می‌کند و پاراگراف سوم دُز جذب شده ناشی از پرتوهای الکترونی را در Close box\_3 ذخیره می‌کند. خط دوم در سه پاراگراف اول میزان سطح حساس برای آشکارسازی را مشخص می‌کند و خط سوم برای جابجایی محل آشکارساز نوشته شده است. خط چهارم در پاراگرافها نیز مقدار مش‌بندی (Mesh) را مشخص می‌کند؛ یعنی بطور خیلی ساده بیان می‌کند که ابعادی که در خط دوم پاراگراف نوشته شده است باید به چند قسمت تقسیم‌بندی شود، و سپس روی هر قسمت میزان دُز محاسبه می‌شود.

پاراگراف چهارم مربوط به مشخصات چشمه است. در این فایل چشمه ایریدیوم ۱۹۲ در نظر گرفته شده است. خط پایانی این پاراگراف تعداد ذرات گسیل شده را مشخص می‌کند که این مقدار با توجه به میزان اکتیویته‌ی چشمه‌ی رادیواکتیو مورد نظر و مدت زمان پرتودهی مشخص می‌شود؛ بدین صورت که هر 1Ci برابر با  $3.7 \times 10^{10}$  واپاشی در ثانیه است. چشمه مد نظر ما اکتیویته‌ی  $10 \mu\text{Ci}$  داشته و مدت زمان پرتودهی ۱۵ دقیقه برآورد شده است که این میزان عدد  $333 \times 10^5$  را برای beam On مشخص می‌کند.

پاراگراف آخر نیز تعیین می‌کند که اطلاعات را در چه فایل‌هایی و با فرمت دلخواه ذخیره کنیم.

هندسه‌ی شبیه‌سازی با چشمه بعد از پرتودهی در شکل ۳-۳ آورده شده است.



شکل ۳-۳: هندسه‌ی مسأله بعد از اجرا شدن برنامه با چشمه‌ی Ir. پرتوهای سبز رنگ گاما و قرمزها الکترون هستند. با توجه به اینکه چشمه مورد نظر ممکن است بصورت قرص دایره‌ای باشد ما نمونه ای از فایل ماکرو شبیه‌سازی شده برای این نوع چشمه با قطر ۲/۲ سانتی‌متر را در زیر آورده‌ایم.

```
/run/initialize
/grdm/analogueMC 1
/gps/particle ion
/gps/ion 55 137 0 0
/gps/energy 0 keV
/gps/pos/type Plane
/gps/pos/shape Circle
/gps/pos/centre 0. 0. 1. cm
/gps/pos/radius 1.1 cm
```

```

/score/create/boxMesh box_1

/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm

/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm

/score/mesh/nBin 50 50 1

/score/quantity/doseDeposit dose_1

/score/close box_1

/score/create/boxMesh box_2

/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm

/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm

/score/mesh/nBin 50 50 1

/score/quantity/doseDeposit dose_2

/score/filter/particle gammaFilter gamma

/score/close box_2

/score/create/boxMesh box_3

/score/mesh/boxSize .5 .5 0.0001 cm

/score/mesh/translate/xyz 0. 0. 0.999 mm

/score/mesh/nBin 50 50 1

/score/quantity/doseDeposit dose_3

/score/filter/particle eMinusFilter e-

/score/close box_3


/score/list

```

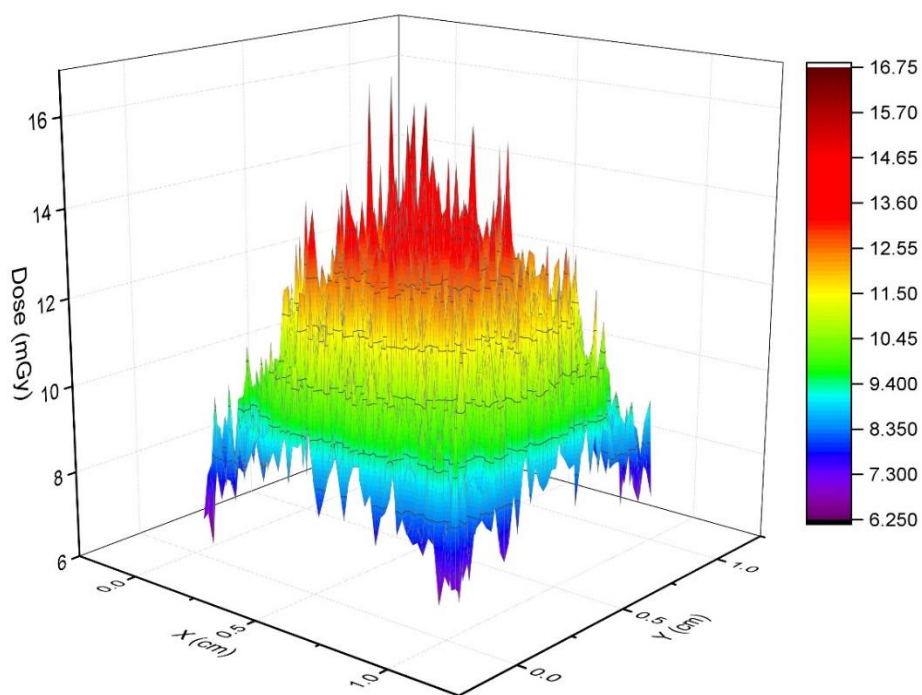
```
/run/beamOn 33300000
```

```
/score/dumpQuantityToFile box_1 dose_1 doseCs_1.txt
```

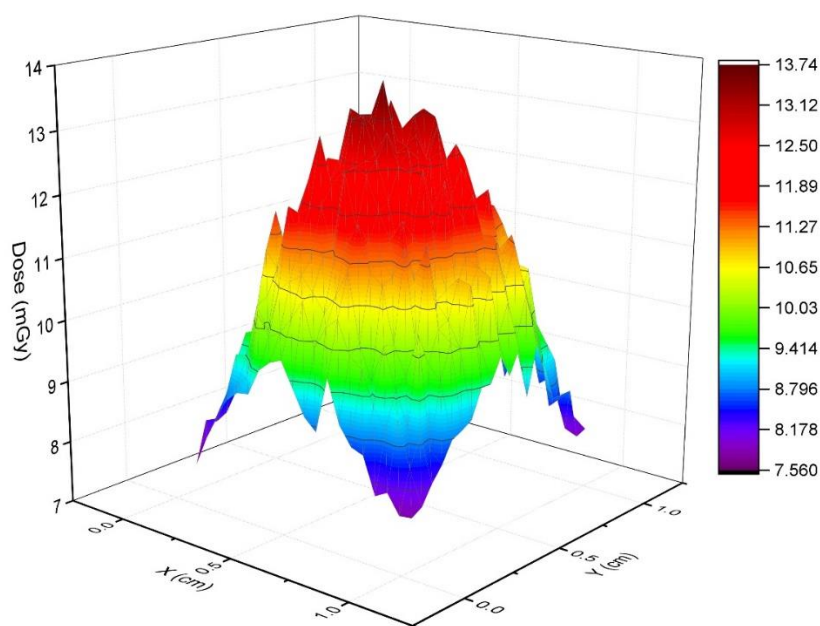
```
/score/dumpQuantityToFile box_2 dose_2 doseCs_2.txt
```

```
/score/dumpQuantityToFile box_3 dose_3 doseCs_3.txt
```

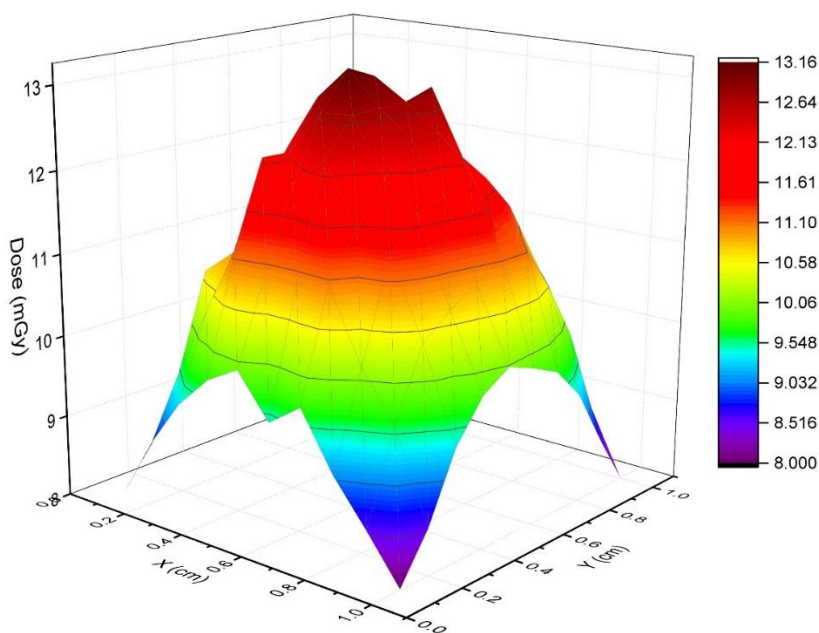
برای چشمه‌های Ir و Cs شبیه‌سازی‌ها انجام شد و داده‌ها بعد از رسم با نرم‌افزار Origin Pro بصورت شکل‌های سه بعدی ۳-۴ الی ۳-۸ بدست آمد.



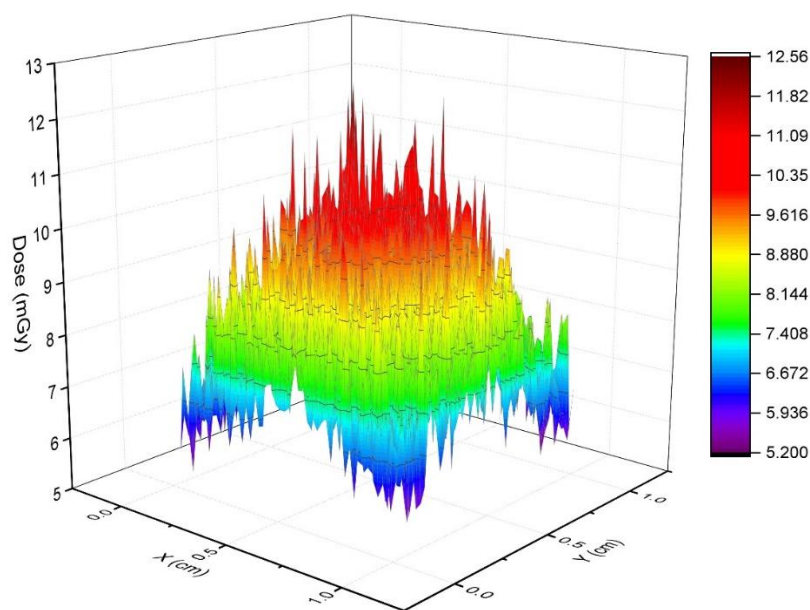
شکل ۳-۴: خروجی رسم شده داده‌های شبیه‌سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه‌ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی‌متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش‌بندی  $50 \times 50$  برای سطح هدف تولید شده‌اند. در این شبیه‌سازی مقدار دُز جذب شده گاما صفر بدست آمده است.



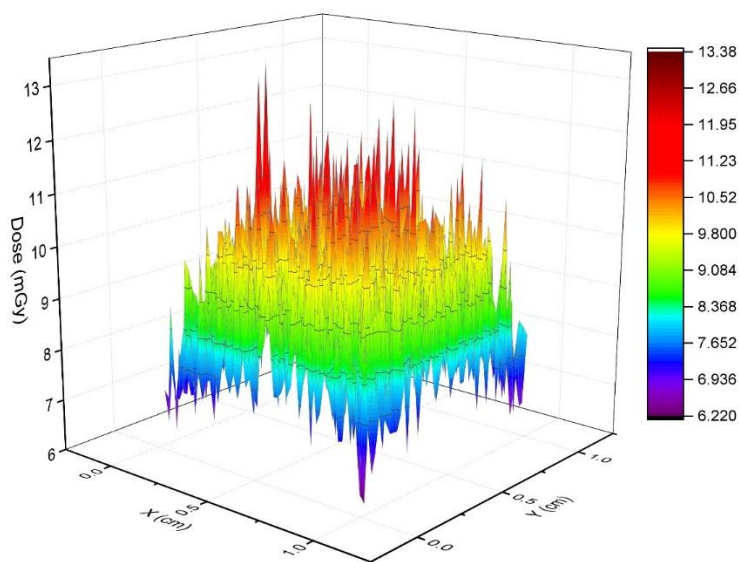
شکل ۳-۵: خروجی رسم شده داده‌های شبیه‌سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه‌ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی‌متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش‌بندی  $20 \times 20$  برای سطح هدف تولید شده‌اند. در این شبیه‌سازی مقدار دُز جذب شده گاما در هدف صفر بدست آمده است.



شکل ۳-۶: خروجی رسم شده داده‌های شبیه‌سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه‌ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی‌متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش‌بندی  $10 \times 10$  برای سطح هدف تولید شده‌اند. در این شبیه‌سازی مقدار دُز جذب شده گاما در هدف صفر بدست آمده است.



شکل ۳-۷: خروجی رسم شده داده‌های شبیه‌سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه‌ی  $^{192}\text{Ir}$  در حالتی که چشمه در یک سانتی‌متری از هدف Zn قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی ماده‌ی جهان هوا در نظر گرفته شده است. این مقادیر با مش‌بندی  $50 \times 50$  برای سطح هدف تولید شده‌اند. مقدار دُز جذب شده گاما روی هدف صفر بدست آمده است.



شکل ۳-۸: خروجی رسم شده داده‌های شبیه‌سازی برای دُز جذب شده بتای چشمه‌ی مسطح  $^{137}\text{Cs}$  با قطر ۲/۲cm در حالتی که چشمه در یک سانتی‌متری از هدف Zn قرار گرفته است. این مقادیر با مش‌بندی  $50 \times 50$  برای سطح هدف تولید شده‌اند. در این شبیه‌سازی مقدار دُز جذب شده گاما صفر بدست آمده است.



با توجه به اشکال ۳-۴ الی ۳-۶؛ هرچه تعداد مش‌ها بیشتر و اندازه‌ی آن‌ها کوچک‌تر می‌گردد اُفت‌وخیزهای آماری بیش‌تر می‌شوند. در شکل ۳-۴ که شبیه‌سازی با مش‌بندی  $50 \times 50$  انجام شده است ماگزیمم دُز در یک مش نسبت به مش‌بندی  $20 \times 20$  و مش‌بندی  $10 \times 10$  بیش‌تر است که ناشی از همان اُفت‌وخیزهای آماری است.

شکل ۳-۷ شبیه‌سازی مطابق شکل ۳-۴ بوده و تنها تفاوت در ماده‌ی حجم مادر است که هوا درنظر گرفته شده، با هدف مقایسه و بدست آوردن شرایط واقعی‌تر برای آزمایشات انجام گرفته است. توزیع دُز الگویی مطابق شکل ۳-۴ که ماده‌ی حجم مادر خلاء بوده است را دارد و فقط کمی میزان دُز جذب شده کم‌تر شده است و تغییر عمده‌ای نشان داده نمی‌شود که این اُفت میزان دُز جذب شده ناشی از برخورد الکترون‌ها با مولکول‌های هوا بوده و مقدار چشمگیری نیست.

شکل ۳-۸ نمودار توزیع دُز روی سطح هدف Zn با پرتودهی بوسیله‌ی چشمه‌ی مسطح سزیم  $137$  به قطر  $2/2$  cm و اکتیویته‌ی  $10 \mu\text{Ci}$  را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-۸ قله‌ی نمودار نسبت به شکل ۳-۴ پهن‌تر شده که ناشی از مسطح بودن چشمه و بزرگ‌تر بودن آن از هدف است. علی‌رغم اینکه اندازه‌ی چشمه از اندازه‌ی هدف بزرگ‌تر است، باز هم وسط هدف دُز بیش‌تری نسبت به نواحی اطراف هدف جذب می‌کند.

برای نمونه قسمتی از خروجی یکی از شبیه‌سازی‌ها را در حالت چشمه‌ی  $^{192}\text{Ir}$  و با هدف  $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.5\text{mm}$  در زیر می‌آوریم:

```
# mesh name: box_1

# primitive scorer name: dose_1

# iX, iY, iZ, value [Gy]

0,0,0,4.575179969982169e-06

0,1,0,4.634558520753056e-06
```

0,2,0,5.076734410460833e-06  
0,3,0,5.413115932995223e-06  
0,4,0,5.449312937617422e-06  
0,5,0,6.05756320768862e-06  
0,6,0,5.985697072025421e-06  
0,7,0,6.676027202580689e-06  
0,8,0,6.82178991663965e-06  
0,9,0,7.295592716965906e-06  
0,10,0,7.152949410622044e-06  
0,11,0,7.684181780693543e-06  
0,12,0,7.638692982012481e-06  
0,13,0,8.125028390911913e-06  
0,14,0,8.451855020415576e-06  
0,15,0,8.563423098212736e-06

در این بخش مقدار دُز جذب شده روی سطح فلز هدف بدست آمد. اگر بخواهیم از یک ماسک<sup>۱</sup> یا شابلون<sup>۲</sup> در پرتودهی سطح هدف استفاده کنیم، این مهم است که پنهایی لبه‌ی دُز (شیب لبه‌ی دُز<sup>۳</sup>) چقدر در پرتودهی نقش دارد و چه مقدار می‌توان آن را بهینه‌سازی کرد که در ادامه فصل به این مبحث می‌پردازیم.

### ۹-۳ شبیه‌سازی ماسک جاذب در پرتودهی رادیواکتیو

تابش‌های یونساز می‌توانند تغییرات شدیدی در ویژگی‌های ماده ایجاد کنند؛ به ویژه یون‌های سنگین که با تکانه‌ی مناسب باعث جابه‌جایی‌های اتمی در جامدات می‌شوند [۲۶]. ذرات بارداری که از ماده می‌گذرند، بر اثر برهم‌کنش‌های کولنی، گسیل تابش ترمزی، برهم‌کنش‌های هسته‌ای و در انرژی‌های خیلی زیاد با گسیل تابش چرنکوف انرژی از دست می‌دهند.

پرتوهای حاصل از چشمه‌های رادیواکتیو به علت دارا بودن انرژی و خاصیت یونسازی می‌توانند برای تابش‌دهی در موارد مختلف استفاده شوند [۲۸]. هنگام پرتودهی می‌توان از ماسک برای بهینه کردن و عدم آسیب به بقیه نقاط استفاده کرد. بطور مثال در لیتوگرافی یا هنگام درمان تومور (مثلاً استفاده از چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}$  برای درمان در چشم‌پزشکی [۷۹]) این مسئله حائز اهمیت است که میزان دُز جذب شده در ناحیه‌ی مشخصی اعمال شود. در این بخش پهنایی لبه‌ی دُز در یک تابش‌دهی با چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}$  با استفاده از ماسک را بررسی کرده و مقادیر بهینه براساس پارامترهای فاصله‌ی ماسک، ضخامت ماسک و هندسه‌ی چشمه حاصل شد.

---

<sup>1</sup> Mask

<sup>2</sup> Shablon

<sup>3</sup> Dose Edge Slope

### ۳-۹-۱ تعاریف و محاسبات

ذرات بتا دارای طیف پیوسته‌ای از انرژی هستند که از صفر تا انرژی جنبشی بیشینه  $E_{\max}$  گسترش دارد. تعداد ذرات بتا  $N(t)$ ، که از ضخامت جرمی  $t$  از ماده عبور می‌کنند با تقریب خوبی عبارت است از [۷۸]:

$$N(t) = N(o)e^{-\mu t} \quad (3-3)$$

که در آن  $\mu$  ضریب تضعیف جرمی است. مقدار  $\mu$  به طور تجربی به صورت تابعی از انرژی بیشینه طیف بتا تعیین شده و عبارت است از [۷۸]:

$$\mu(m^2/kg) = 1.7E_{\max}^{-1.14} \quad (4-3)$$

که در آن  $E_{\max}$  برحسب MeV است.

با توجه به طیف بتای  $^{90}\text{Sr}$  انرژی بیشینه الکترون‌ها ۲/۲۸۲ MeV است، که بعد از جایگزینی در رابطه بالا و ضرب کردن  $\mu$  در چگالی پلاستیک مورد استفاده در جنس ماسک ضریب تضعیف طولی بدست می‌آید. از برآورد مقدار برد با معکوس کردن ضریب تضعیف طولی، مقدار ۱/۳۲۲(mm) برای میزان برد بتا در ماسک بدست می‌آید. همچنین برد ذرات بتا به عنوان ذرات باردار، که دارای برد محدودی در ماده‌ی ماسک و بستر هستند، از رابطه‌ی نیمه تجربی  $^{1}\text{TIO}$  قابل محاسبه است که به مقدار  $R=9/765(mm)$  می‌رسد. در ادامه نشان داده‌ایم که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با برد حاصل از رابطه‌ی  $^{1}\text{TIO}$  همخوانی بهتری دارد [۷۸، ۸۰].

بر روی سطح هدف نقاطی وجود دارد که پرتو بدون برخورد به ماسک عبور کرده و به سطح هدف می‌رسد، بنابراین این نقاط بیشترین دُز را جذب می‌کنند و نقاطی هم وجود دارد که حداقل میزان دُز را جذب می‌کنند، این نقاط در سایه ماسک قرار گرفته‌اند. محدوده‌ای که در آن دُز از ۱۰٪ تا ۹۰٪

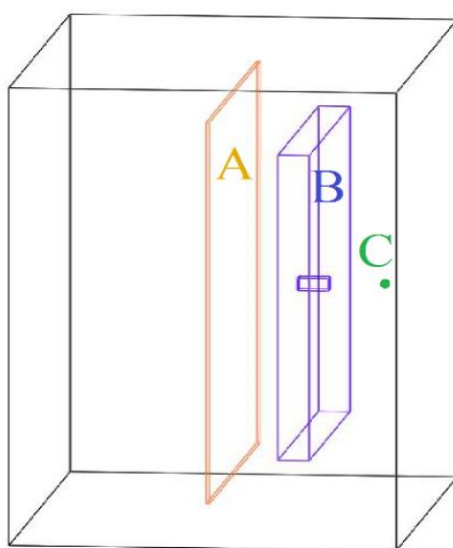
---

<sup>۱</sup>Tabata-Ito-Okabe

مقدار حداکثرش تغییر می‌کند، به عنوان پهنای لبه‌ی دُز معرفی می‌شود. در این محدوده پرتوهای فرودی مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهند و پس از پراکندگی از لبه‌های ماسک به هدف برخورد می‌کنند.

### ۳-۹-۲ شبیه‌سازی هندسه و چشمه رادیواکتیو

با استفاده از ابزار مونت کارلوی Geant4 سیستمی را طراحی کردیم تا بتوانیم میزان دُز جذب شده بر روی سطح را بدست آورده و سپس بتوانیم پهنای لبه‌ی دُز را محاسبه کنیم. این سیستم متشکل از یک چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}$  با فعالیت  $10\mu\text{Ci}$ ، یک صفحه از فلز روی و یک ماسک از جنس پلاستیک است. ابعاد جهان  $24\text{cm} \times 36\text{cm} \times 36\text{cm}$  صفحه‌ی فلز روی با ابعاد  $30\text{cm} \times 30\text{cm}$  با قطر  $2\text{mm}$  در نظر گرفته شده است که سطح حساس برای اندازه‌گیری میزان دُز  $2\mu\text{m} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  از وسط هدف است هندسه شبیه‌سازی در شکل ۳-۹ آورده شده است.



شکل ۳-۹: نمایی از هندسه‌ی شبیه‌سازی. مکعب بزرگ جهان، چشمه (C)، صفحه‌ی قرار گرفته در وسط (A) هدف و مکعب قرار گرفته بین چشمه و هدف (B) ماسک است.

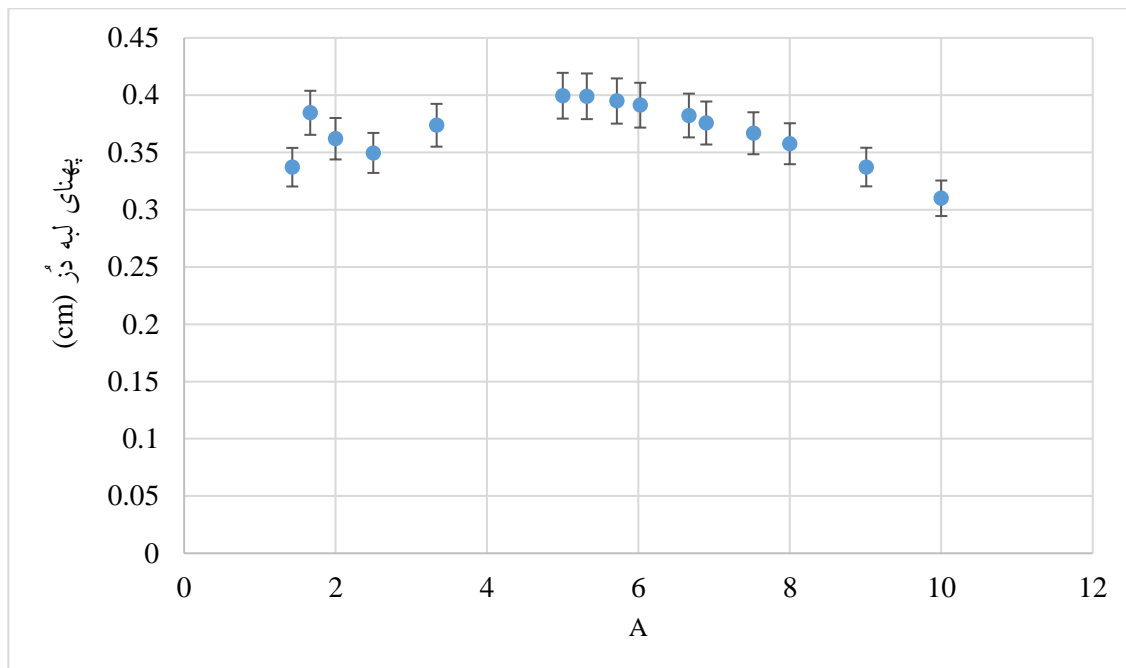
فیزیک استفاده شده فیزیک پیش فرض کد شامل الکترومغناطیس و واپاشی‌ها است. ابعاد ماسک  $24\text{cm} \times 24\text{cm}$  به ضخامت  $4\text{mm}$  است که در یکی از حالت‌های شبیه‌سازی این ضخامت متغیر بوده و جنس ماسک را با توجه به کتابخانه‌ی ابزار مونت کارلوی Geant4 پلاستیک ۶-۶ Nylon با

چگالی ( $1140 \text{ kg/m}^3$ ) در نظر گرفتیم. حفره مربع شکل در وسط ماسک به ضلع  $1 \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. همچنین مکان چشمه در فاصله  $10 \text{ cm}$  از صفحه‌ی روی است. شبیه‌سازی‌ها را با سه دیدگاه متفاوت انجام دادیم. در حالت اول با تغییر فاصله‌ی ماسک از چشمه پهنای لبه‌ی دُز را مورد بررسی قرار دادیم، در حالت دوم با تغییر ضخامت ماسک رفتار پهنای لبه‌ی دُز را بررسی کردیم و در حالت سوم نیز مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از چشمه‌ی نقطه‌ای با چشمه‌های مسطح انجام شد. در تمامی مراحل زمان پرتودهی به هدف معادل پرتودهی به مدت  $15$  دقیقه بوده است. برای بررسی ساده‌تر، باتوجه به شکل شماره‌ی ۳-۹ میزان فاصله‌ی چشمه تا هدف به فاصله‌ی ماسک تا هدف پارامتر A نام‌گذاری شد.

برای محاسبه‌ی پهنای لبه‌ی دُز ما نیاز داریم ماکزیمم مقدار دُز جذب شده را پیدا کرده و سپس نقطه‌ای را که  $90\%$  و همچنین نقطه‌ی  $10\%$  دُز جذب شده را پیدا کنیم و فاصله‌ی آن‌ها را محاسبه کنیم. این فاصله به ما پهنای لبه‌ی دُز را می‌دهد. ابتدا داده‌ها را از خروجی برنامه که یک فایل بطور مثال TXT است (ما می‌توانیم در نرم‌افزار مشخص کنیم خروجی با چه فرمتی ساخته شود) گرفته و در نرم‌افزار Microsoft Excel وارد می‌کنیم. داده‌ها را آنالیز و مرتب کرده و مقدار ماکزیمم را مشخص کردیم. سپس میزان تابش زمینه را از مقدار کل داده‌ها کم کرده و مقادیر  $90\%$  و  $10\%$  را مشخص کردیم. با توجه به اینکه خروجی برنامه برحسب Bin است باید فاصله‌ی  $90\%$  تا  $10\%$  را که براساس Bin مشخص می‌گردد را به سانتی‌متر تبدیل کنیم.

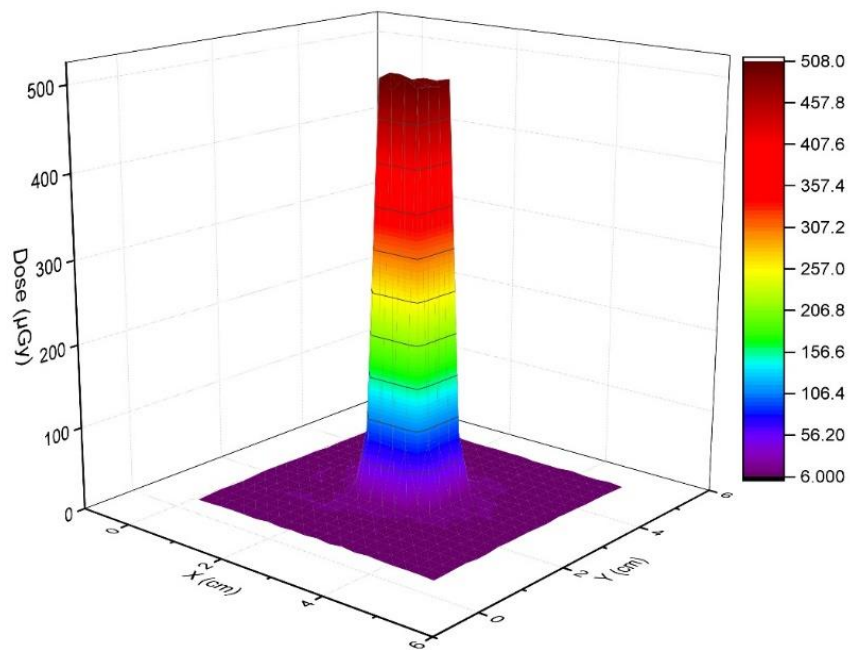
در یک حالت  $25$  بار با اعداد تصادفی مختلف برنامه شبیه‌ساز اجرا شده، که بتوانیم میانگین گرفته و سپس انحراف معیار را برای نقطه‌ی مورد نظر بدست آوریم. در نرم‌افزار Excel این  $25$  داده را وارد کرده و با استفاده از تابع STDEV.P میزان انحراف معیار را بدست آوردیم و در عدد  $100$  ضرب شد تا برحسب درصد بیان شود. این میزان انحراف معیار که معرف میزان خطا نیز هست و حدوداً  $5$  درصد است را با توجه به اینکه رفتار نرم‌افزار شبیه‌ساز برای نقاط یکسان است برای بقیه نقاط هم تعمیم دادیم و در نمودارها کاملاً مشخص شده است.

در حالت اول برای ۱۵ فاصله‌ی متفاوت شبیه‌سازی انجام شده است و نمودارهای سه بعدی با نرم‌افزار Origin Pro رسم شد که سه نمونه از آن‌ها انتخاب شده و در شکل‌های ۳-۱۱ الی ۳-۱۳ آورده شده است. سپس از آنالیز داده‌های بدست آمده از ابزار مونت کارلوی Geant4، لبه‌ی دُز حاصله روی هدف محاسبه شده و شکل ۳-۱۰ بدست آمد.

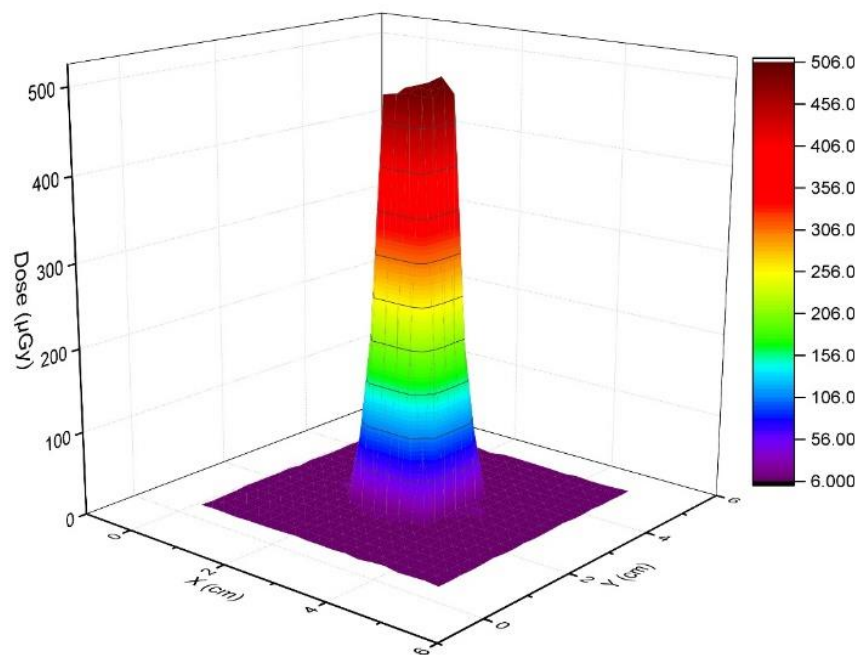


شکل ۳-۱۰: میزان پهنای لبه‌ی دُز به پارامتر A. پارامتر A نسبت میزان فاصله‌ی چشمه تا هدف به فاصله‌ی ماسک تا هدف است. چشمه‌ی نقطه‌ای در فاصله‌ی ۱۰ cm از هدف و ضخامت ماسک ۴ mm در نظر گرفته شده است.

با توجه به نمودار شکل ۳-۱۰ هنگامی که مقدار پارامتر A بین ۴ الی ۶ باشد، پهنای لبه‌ی دُز بیش‌ترین عدد را خواهد داشت. همچنین کم‌ترین مقدار پهنای لبه‌ی دُز زمانی اتفاق می‌افتد که پارامتر A بیش‌ترین مقدار ممکنه باشد.

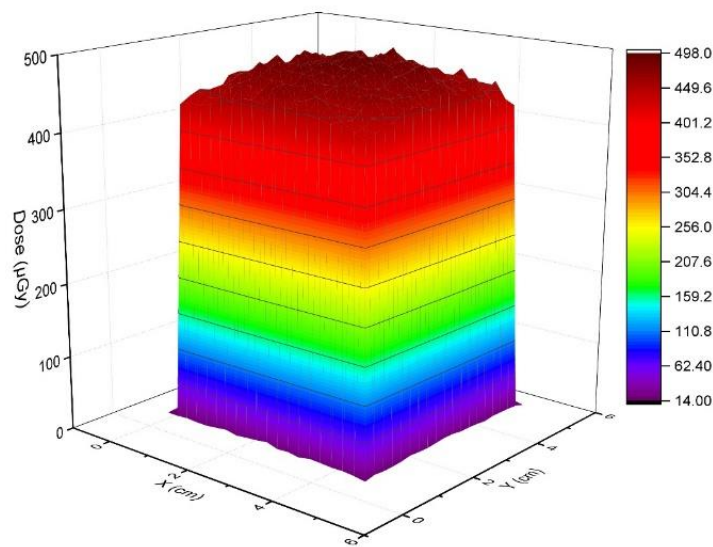


شکل ۳-۱۱: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=10$ .



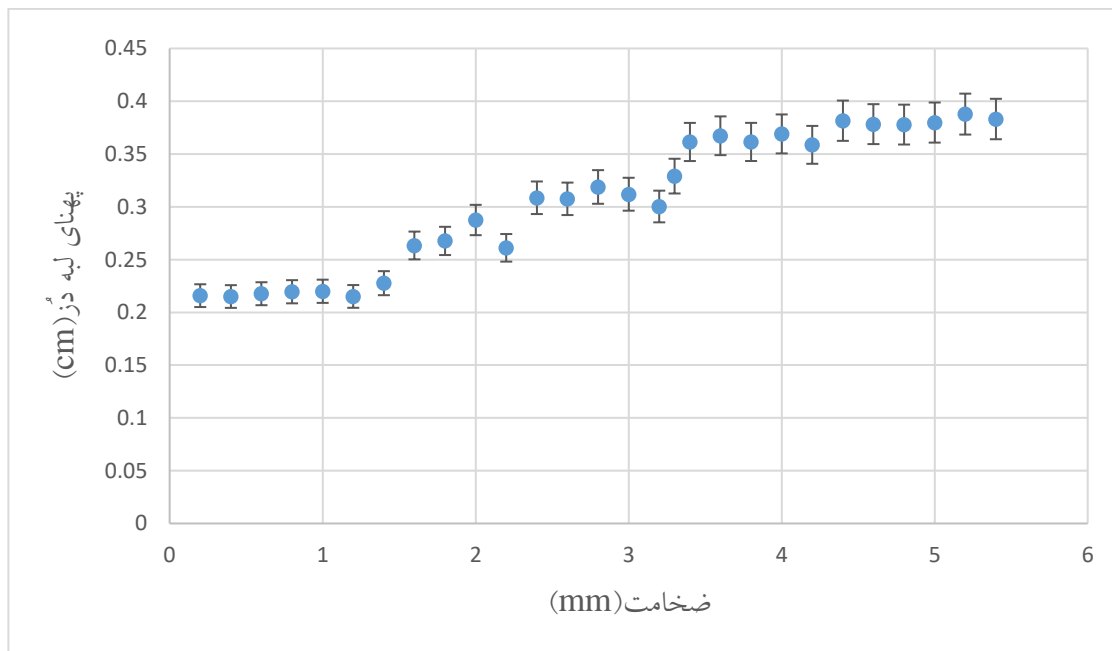
شکل ۳-۱۲: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=5$ .





شکل ۳-۱۳: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی برای  $A=1.25$ .

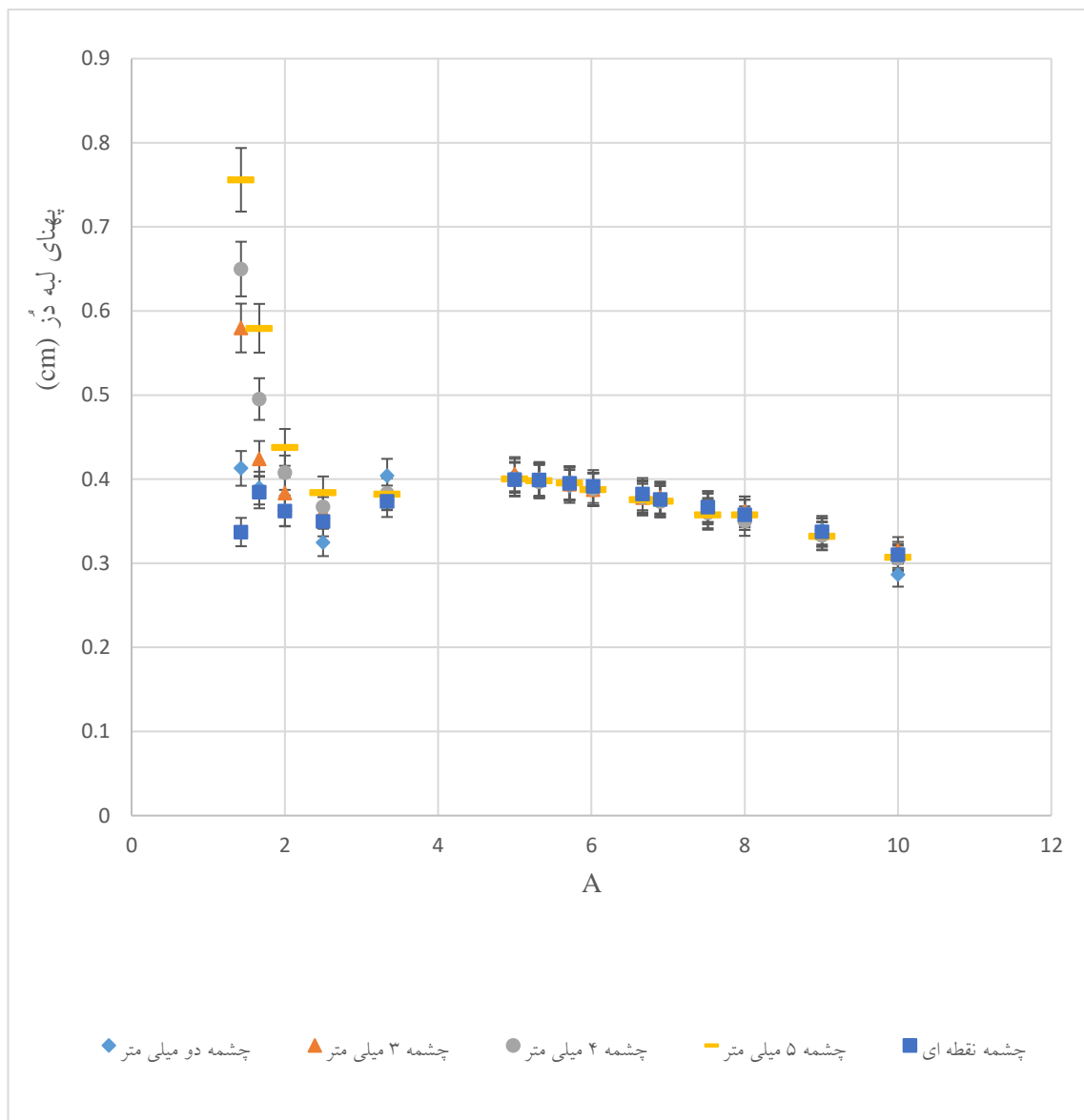
در مرحله ی بعد، با تغییر ضخامت ماسک از  $0.2\text{ mm}$  تا  $5.4\text{ mm}$  میزان پهنای لبه ی دُز محاسبه شد. برای ۲۲ حالت متفاوت برنامه اجرا شد و بعد از آنالیز داده ها و محاسبه پهنای لبه ی دُز نمودار شکل ۳-۱۴ بدست آمد.



شکل ۳-۱۴: بستگی پهنای لبه ی دُز به ضخامت ماسک برای  $A=2$ .

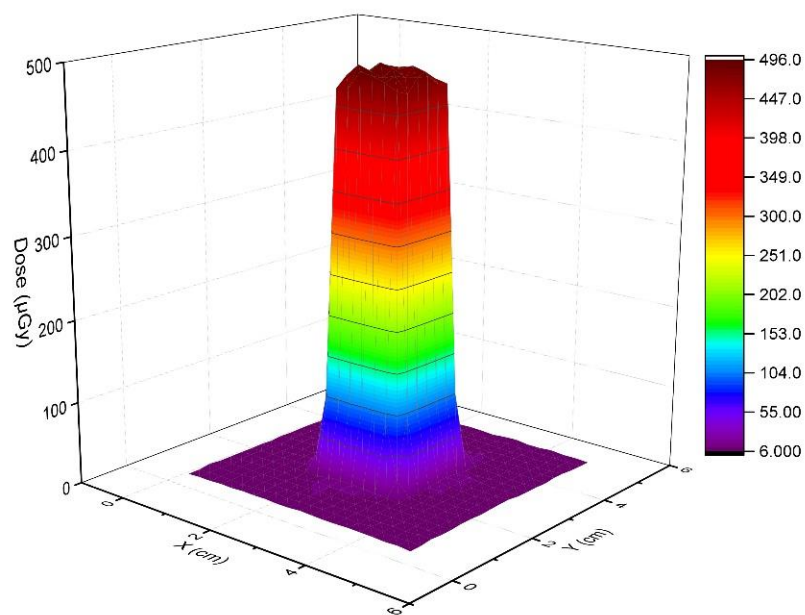
با توجه به نمودار بدست آمده در شکل ۳-۱۴ حدوداً از ضخامت ۱,۲mm هر اندازه که ضخامت ماسک کمتر شود در مقدار پهنای لبه‌ی دُز تغییر محسوسی حاصل نمی‌شود و تقریباً اغلب پرتوها از ماسک عبور می‌کنند و به هدف می‌رسند. همچنین برای مقادیر بالاتر از ۴,۴mm تقریباً پهنای لبه‌ی دُز به حالت اشباع می‌رسد و دیگر افزایش نمی‌یابد و احتمالاً این مقدار از ضخامت از ماسک مقدار زیادی از پرتوها را متوقف می‌کند.

سپس رفتار پهنای لبه‌ی دُز با تغییر اندازه و شکل چشمه بررسی شد. برای این منظور از چشمه‌ی مسطح دایره‌ای شکل با قطرهای ۲mm الی ۵mm در شبیه‌سازی استفاده شد. برای هر حالت ۱۵ بار برنامه اجرا شد و داده‌ها دوباره با نرم‌افزار Origin Pro رسم (۶ نمودار برای نمونه در شکل‌های ۳-۱۶ الی ۳-۲۱ آورده شده است) و پس از محاسبه و آنالیز در نمودار شکل ۳-۱۵ رسم شد.

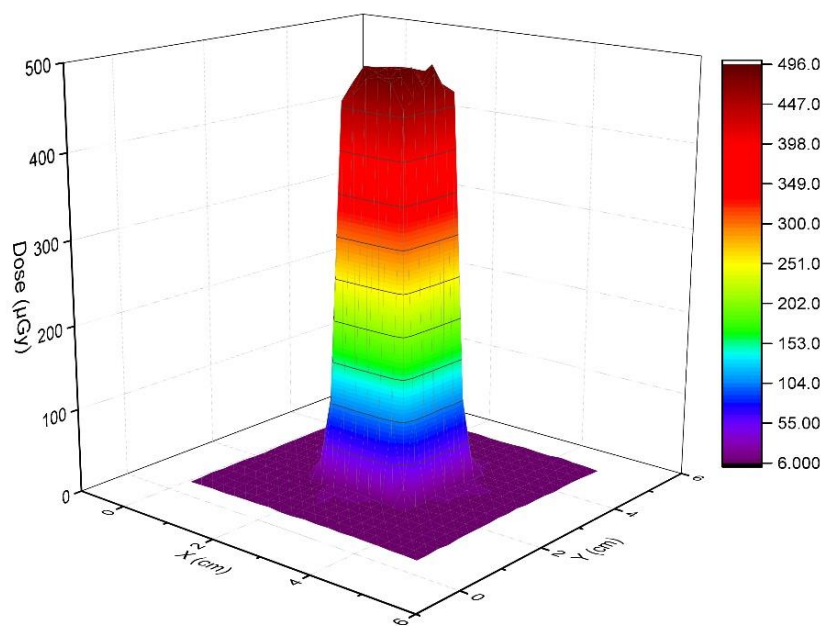


شکل ۳-۱۵: مقایسه بین چشمه‌ی نقطه‌ای با چشمه‌های مسطح با قطر ۲ الی ۵ میلی‌متر. پارامتر  $A$  نسبت فاصله‌ی چشمه تا هدف به فاصله‌ی ماسک تا هدف است. چشمه در فاصله‌ی ۱۰ cm از هدف قرار گرفته و ضخامت ماسک ۴ mm در نظر گرفته شده است.

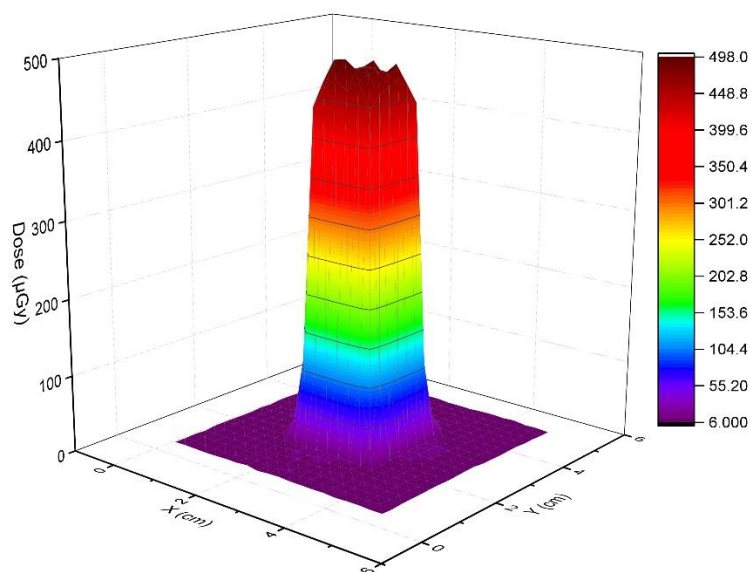
با توجه به نمودار بدست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در شکل ۳-۱۵، هنگامی که مقدار پارامتر  $A$  حدوداً بیش‌تر از ۴ بشود (هنگامی که ماسک از چشمه دور می‌شود) نوع چشمه و اندازه‌ی آن در مقدار پهنای لبه‌ی دُز تأثیر محسوسی ندارد. هنگامی که ماسک به چشمه نزدیک می‌شود (برای  $A < 4$ ) تأثیر تغییرات اندازه ماسک در مقدار پهنای لبه‌ی دُز مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه اندازه چشمه بزرگ‌تر باشد لبه‌ی دُز بزرگ‌تری خواهیم داشت.



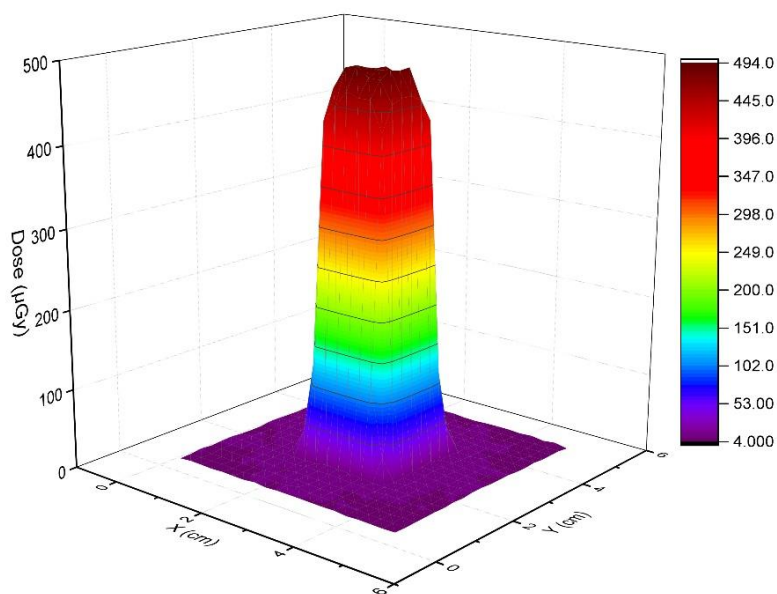
شکل ۳-۱۶: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۲ میلی‌متر، ماسک با ضخامت ۴ میلی‌متر و  $A=5$ .



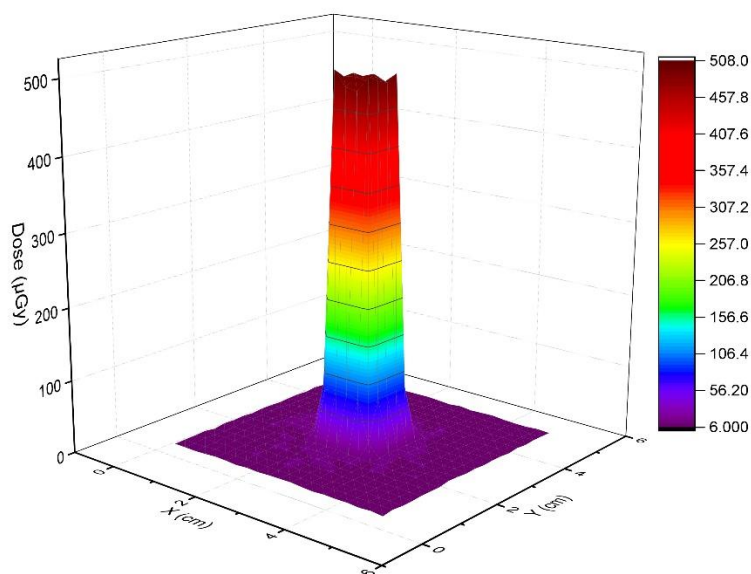
شکل ۳-۱۷: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۳ میلی‌متر، ماسک با ضخامت ۴ میلی‌متر و  $A=5$ .



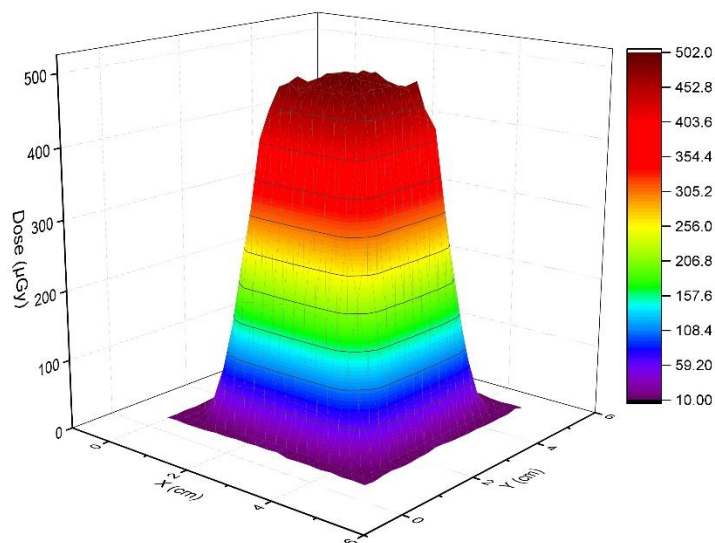
شکل ۳-۱۸: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۴ میلی‌متر، ضخامت ماسک ۴ میلی‌متر و  $A=5$ .



شکل ۳-۱۹: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلی‌متر، ضخامت ماسک ۴ میلی‌متر و  $A=5$ .



شکل ۳-۲۰: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلی‌متر، ضخامت ماسک ۴ میلی‌متر و  $A=10$ .



شکل ۳-۲۱: مقدار دُز جذب شده در سطح هدف روی چشمه دیسک مسطح با قطر ۵ میلی‌متر، ضخامت ماسک ۴ میلی‌متر و  $A=1.43$ .

هدف این پایان‌نامه بررسی تأثیر تابش چشمه‌ی ایریدیم ۱۹۲ بر رشد نانوساختارهای ZnO است، و بررسی ماسک در انجام آزمایشات انجام نگرفته است و فقط در فاز شبیه‌سازی استفاده شده

است و در فصل بعد فقط از میزان دُز جذب شده در سطح بدون وجود ماسک برای بررسی تأثیر تابش رادیواکتیو بر رشد نانوساختارهای ZnO استفاده شده است.

### ۳-۱۰ جمع‌بندی

۱- با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته؛ دز جذب شده ناشی از گاما

در پرتودهی هدف Zn با ضخامت ۰,۵mm و ابعاد ۱cm\*۱cm، توسط چشمه‌های  $^{137}\text{Cs}$

مسطح با قطر ۲/۲cm و اکتیویته‌ی ۱۰μCi و چشمه‌ی نقطه‌ای  $^{192}\text{Ir}$  با اکتیویته‌ی ۱۰μCi

با فاصله‌ی ۱cm از مرکز هدف، برای ۱۵ دقیقه پرتودهی ناچیز است و انرژی منتقل شده

به هدف عمدتاً ناشی از برخورد پرتوهای بتا است. همچنین میزان انرژی منتقل شده در

مرکز هدف بیش‌ترین مقدار را داشته است.

۲- برای پرتودهی هدف روی با استفاده از ماسک بوسیله چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}$ ، جهت اینکه میزان

پهنای لبه‌ی دُز کمترین مقدار باشد و همچنین ماسک بهینه‌ای از لحاظ ضخامت داشته

باشیم باید چشمه از لحاظ شکل بصورت نقطه‌ای و ضخامت ماسک باید قابل مقایسه با برد

بتا در ماسک باشد. همچنین هرچه پارامتر A مقدار بیش‌تری داشته باشد پهنای لبه‌ی دُز

کمتری خواهیم داشت.





## فصل چهارم: آزمایشات و آنالیز نمونه ها

در این فصل تأثیر تابش‌دهی رادیواکتیو در فرآیند رشد نانوساختارهای اکسید روی را بررسی کردیم. با توجه به مشکلات اداری پیش آمده در روند تهیه‌ی چشمه‌های  $^{192}\text{Ir}$  و  $^{90}\text{Sr}$  مجبور به استفاده از دو چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{241}\text{Am}$  موجود در دانشگاه برای انجام آزمایشات شدیم. ما با دو چشمه موجود سطح را تابش‌دهی کردیم و با توجه به میزان دُز جذب شده که در فصل قبل در شبیه‌سازی با کد شبیه‌ساز Geant4 انجام دادیم سعی در رشد دادن نانوساختارهای اکسیدروی کردیم. چشمه‌ی  $^{241}\text{Am}$  یک منبع تولید پرتوی آلفا است. چشمه‌ی  $\text{Am}$  مورد استفاده‌ی ما در این آزمایشات یک قرص مسطح با قطر حدود ۳ mm دارای اکتیویته‌ی  $0.9 \mu\text{Ci}$  است. چشمه‌ی  $\text{Cs}$  که علاوه بر تولید پرتوی گاما، پرتوی بتا نیز تولید می‌کند بصورت قرص مسطح با قطر حدود ۲/۲ cm با اکتیویته‌ی اولیه‌ی  $100 \mu\text{Ci}$  و سریال HN951 است. البته چشمه‌ی  $\text{Cs}$  دارای یک لایه‌ی آلومینیوم برای محافظت از ماده‌ی رادیواکتیو می‌باشد که به مقدار قابل توجهی پرتوهای بتای تولید شده را جذب می‌کند و با توجه به اینکه حدود ۱۰ سال از عمر این چشمه می‌گذرد اکتیویته‌ی چشمه‌ی سزیم در زمان آزمایش تقریباً  $78 \mu\text{Ci}$  (محاسبه شده با نرم‌افزار RadProCalculator) تخمین زده می‌شود.

## ۱-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا ورق  $\text{Zn}$  با ضخامت 1mm و خلوص بالا تهیه شد. سپس نمونه‌های مورد نظر را با ابعاد  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  از این ورق تهیه کردیم. باتوجه به این که سطح ورق  $\text{Zn}$  در مجاورت هوا اکسید شده بود سطح نمونه‌ها را با کاغذ سمباده‌های با مش متفاوت لایه‌برداری کردیم و در آخر هم با پارچه تمیز پولیش زده شده و با الکل تمیز شدند. با این کار هم لایه‌ی اکسیدشده برداشته می‌شود و هم سطح نمونه‌ها مسطح خواهد شد. برای جلوگیری از اکسیدشدن در مجاورت هوا، نمونه‌ها را در الکل صنعتی نگهداری کردیم. متأسفانه سطح نمونه‌ها بعد از چند روز کثیف شد. این موضوع احتمالاً بدلیل وجود ناخالصی‌های فراوان موجود در الکل‌های صنعتی بود. سپس نمونه‌های جدیدی تهیه شد و در الکل طبی قراردادیم، که متأسفانه باز هم با مشکل مواجه شدیم و سطح نمونه‌ها کثیف می‌شدند. برای بار سوم

نمونه‌هایی تهیه کردیم و در استون بسیار خالص قرار دادیم و این بار با مشکلات قبلی مواجه نشدیم و سطح نمونه‌ها واکنش نداده و براق و تمیز ماندند.

## ۲-۴ شرح آزمایش

### ۱-۲-۴ آزمایش اول

ما قصد داریم تأثیر دما و تابش را بر رشد نانوساختارهای ZnO در سطح نمونه‌ی Zn بررسی کنیم. این آزمایش در چهار مرحله انجام شد. با استفاده از دو چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{241}\text{Am}$  مدت زمانی مشخص نمونه‌های پولیش خورده تحت تابش‌دهی با چشمه‌های مذکور قرار گرفته و سپس در دمای معینی زمینه‌ی رشد نانوساختارها را فراهم کردیم. ما از یک دستگاه (ساخت شرکت نانوشتات) که برای تست سنسورهای گازی کاربرد دارد و در شکل ۴-۱ آمده است در انجام آزمایش کمک گرفتیم. این دستگاه شامل یک فلومتر، یک مخزن، گرم‌کن برقی و ترموستات الکترونیکی است. مخزن دستگاه سه عدد شیر برای کنترل جریان گاز مورد استفاده دارد. شلنگ ورودی بعد از گذشتن از فلومتر به یکی از شیرها متصل می‌شود. یک شیر دیگر بطور مستقیم به شلنگ ورودی دیگر متصل است و شیر بعدی برای تخلیه‌ی گاز استفاده می‌گردد. ما در هر مرحله از این آزمایش دو نمونه را بر روی گرم‌کن برقی داخل مخزن قرار می‌دهیم (مطابق شکل ۴-۲) که یک نمونه تحت تابش قرار می‌گیرد و نمونه دوم تابش ندیده است. ابتدا با گاز نیتروژن مخزن را شستشو می‌دهیم و در زمان پرتودهی نیز از این گاز استفاده می‌کنیم. در پایان زمان پرتودهی چشمه‌ی مورد استفاده را خارج کرده و اکسیژن را با یک جریان بسیار کم به داخل مخزن وارد می‌کنیم که زمینه برای رشد نانوساختارها بوجود آید. چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ مطابق شکل ۴-۲ در هر مرحله بر روی یک حلقه‌ی پلاستیکی قرار می‌گیرد که تقریباً ۱ cm ایجاد فاصله بین چشمه و نمونه می‌کند و همچنین از برخورد پرتوهای بتای احتمالی به نمونه‌ی تابش‌ندیده جلوگیری می‌کند. تابش‌دهی با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ مطابق شکل ۴-۳ است و چشمه بدون فاصله بر روی ورقه‌ی Zn قرار گرفته و با توجه به اینکه قسمت رادیواکتیو چشمه در وسط آن و به قطر حدود

۳mm است، فقط یک قرص حدود ۳mm از وسط هدف Zn پرتودهی خواهد شد. مشخصات نمونه‌ها، شرایط رشد و تابش‌دهی آن‌ها در جدول ۴-۱ آمده است. در تمامی جداول N.I. مخفف تابش‌ندیده است.



شکل ۴-۱: دستگاه استفاده شده در آزمایش اول و دوم به همراه کیپسول اکسیژن و نیتروژن.



شکل ۴-۲: مخزن و نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها داخل آن قبل از تابش‌دهی با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷.



شکل ۳-۴: چشمه‌ی Am در حال تابش‌دهی به سطح نمونه. چشمه دقیقاً در بالای نمونه‌ی مورد نظر قرار گرفته است و نمونه سمت چپ تابش نمی‌بیند.

جدول ۴-۱: مشخصات نمونه‌های استفاده شده در آزمایش اول و شرایط مراحل انجام آزمایش.

مرحله	کد نمونه	نوع تابش (چشمه‌ی مسطح)	زمان تابش‌دهی (ساعت)	دما (°C)	زمان رشد (ساعت)
اول	S105	$^{137}\text{Cs}$	۴	۳۰	۳
	S115	N.I.	۰	۳۰	۳
دوم	S120	$^{137}\text{Cs}$	۱۱	۳۰	۴
	S140	N.I.	۰	۳۰	۴
سوم	S125	$^{241}\text{Am}$	۴	۳۰	۳
	S135	N.I.	۰	۳۰	۳
چهارم	S130	$^{137}\text{Cs}$	۱۱	۱۰۰	۴
	S145	N.I.	۰	۱۰۰	۴
نمونه پولیش خورده	S110	N.I.	۰	محیط	ندارد

#### ۴-۲-۲ آزمایش دوم

در این آزمایش ما سه نمونه را داخل دستگاه آزمایش اول در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در معرض جو اکسیژن با مقدار کمی جریان اکسیژن قرار دادیم. هدف این بود که بررسی کنیم آیا در این دما و بدون تابش‌دهی امکان رشد نانوساختارهای ZnO وجود دارد یا خیر. برای اعتبار سنجی سه نمونه با یک شرایط تهیه شد و در شرایط یکسان با دمای یکسان به مدت ۱۵ ساعت داخل دستگاه قرار گرفت. مشخصات نمونه‌ها و زمان رشد در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲: مشخصات نمونه‌های استفاده شده در آزمایش دوم و شرایط انجام آزمایش.

کد نمونه	نوع تابش (چشمه‌ی مسطح)	زمان تابش‌دهی (ساعت)	دما (°C)	زمان رشد (ساعت)
S150	N.I.	۰	۷۰	۱۵
S155	N.I.	۰	۷۰	۱۵
S160	N.I.	۰	۷۰	۱۵

#### ۴-۲-۳ آزمایش سوم

در این قسمت ما می‌خواهیم با استفاده از کوره تیوبی و دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد اکسیدروی را بر سطح نمونه‌ها رشد دهیم. هدف ما این است که تأثیر تابش‌دهی قبل از رشد را بر سطح نمونه‌ها بررسی کنیم. رشد دادن اکسید روی در دماهای بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قبلاً با روش‌های لایه‌نشانی Zn بر سطح شیشه، سیلیکون، سرامیک و برخی مواد دیگر بوسیله‌ی قرار دادن در کوره دارای هوا بررسی شده و موفقیت آمیز بوده است [۸۱، ۸۲].

آزمایش در سه مرحله انجام شد که در هر مرحله دما و زمان تابش‌دهی متفاوت بوده است. در تمامی مراحل تابش‌دهی با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱، سطح نمونه‌ها از فاصله‌ی حدود ۲mm تابش‌دهی شده است. در تابش‌دهی با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ نیز فاصله‌ی چشمه تا نمونه حدود ۱cm بوده است.

#### ۴-۲-۳-۱ مرحله‌ی اول

در این مرحله ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت تابش‌دهی شدند. نمونه‌ی اول با چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  و نمونه‌ی دوم با چشمه‌ی  $^{241}\text{Am}$  تابش‌دهی شدند و پس از انتقال به آزمایشگاه کوره‌ی تیوبی، نمونه‌ها به همراه یک نمونه‌ی تابش‌ندیده که به عنوان شاهد استفاده می‌شود بر روی یک قطعه سرامیک در

کوره‌ی تیوبی (شکل ۴-۴) قرار گرفتند. ابتدا در تیوب کوره خلاء ایجاد کرده و سپس کمی گاز آرگون برای شستشوی فضای تیوب استفاده شد. بعد از شستشوی فضای تیوب یک فلوی بسیار کم ( $20^1$  sccm) اکسیژن وارد تیوب شد و این جریان کم گاز اکسیژن تا پایان انجام آزمایش ادامه داشت. دمای کوره  $300$  درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و روند افزایش دما تا رسیدن به این دما  $30$  دقیقه تنظیم شد. پس از اینکه نمونه‌ها یک ساعت در دمای  $300$  درجه‌ی سانتی‌گراد بودند کوره خاموش شده، تا رسیدن به دمای اتاق صبر کرده سپس نمونه‌ها را از کوره خارج کردیم.



شکل ۴-۴: کوره‌ی تیوبی استفاده شده در آزمایش.

#### ۴-۲-۳-۲ مرحله‌ی دوم

این مرحله نیز مشابه مرحله قبل انجام شد ولی تابش‌دهی به مدت  $22$  ساعت صورت گرفته و سپس در تیوب کوره با دمای  $700$  درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت یک ساعت با همان مقدار فلوی گاز اکسیژن قرار گرفته است. تنظیمات ترموستات مرحله‌ای کوره طوری تنظیم شده است که حدود یک ساعت زمان خواهد برد تا دمای کوره به  $700$  درجه‌ی سانتی‌گراد برسد.

<sup>1</sup> Standard Cubic Centimeters per Minute



#### ۳-۳-۲-۴ مرحله ی سوم

این مرحله نیز مشابه مراحل قبل انجام شد و نمونه ها ابتدا ۸۹ ساعت تحت تابش دهی قرار گرفته و سپس در تیوب کوره در دمای ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد به مدت یک ساعت با مقدار جریان ثابت و کم گاز اکسیژن قرار گرفت. جدول ۳-۴ نشان دهنده ی مراحل آزمایش سوم است.

جدول ۳-۴: مشخصات نمونه های استفاده شده در آزمایش سوم و شرایط آزمایش. زمان رشد یک ساعت بوده است.

ردیف	کد نمونه	نوع تابش (چشمه ی مسطح)	زمان تابش دهی (ساعت)	دما (°C)	توضیحات
اول	S211	$^{241}\text{Am}$	۱۶	۳۰۰	حدود نیم الی یک ساعت
	S210	$^{137}\text{Cs}$	۱۶	۳۰۰	طول می کشد کوره از دمای
	S209	N.I.	۱۶	۳۰۰	اتاق به دمای مورد نظر برسد
دوم	S221	$^{241}\text{Am}$	۲۲	۷۰۰	و سپس برای سرد شدن،
	S222	$^{137}\text{Cs}$	۲۲	۷۰۰	کوره چند ساعت در همان
	S223	N.I.	۲۲	۷۰۰	حالت خاموش بوده تا به
سوم	S235	$^{241}\text{Am}$	۸۹	۵۰۰	دمای اتاق برسد. نمونه ها
	S236	$^{137}\text{Cs}$	۸۹	۵۰۰	بسیار آرام سرد شده و
	S237	N.I.	۸۹	۵۰۰	سپس از کوره خارج شدند.

## ۳-۴ تحلیل و آنالیز نمونه‌ها

با توجه به نتیجه فصل قبل مبنی بر اینکه میزان دُز جذب شده در مرکز هدف بیش‌ترین مقدار را دارد تمامی آنالیزها از قسمت مرکزی هدف صورت گرفته است. همچنین عمدتاً دُز جذب شده بر روی هدف ناشی از تابش بتا است که در نتیجه‌ی این پرتودهی‌ها تابش گاما دُز ناچیزی به سطح منتقل می‌کند.

### ۱-۳-۴ آنالیز XRF

ابتدا باید میزان خلوص نمونه‌های اولیه بررسی و تعیین می‌شد. یک نمونه‌ی پولیش خورده برای آنالیز XRF انتخاب و به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان فرستاده شد. این نمونه با استفاده از دستگاه XRF مدل BRUKER axs-S4 EXPLORER تحلیل و عناصر موجود در آن در جدول ۴-۴ آورده شده است. تحلیل عنصری کامل این آنالیز برای دقت بیشتر خواننده در پیوست ۱ قرار گرفته است.

جدول ۴-۴: تحلیل عنصری بدست آمده از آنالیز XRF نمونه خام پولیش خورده با کد S110.

اکسید عناصر	درصد وزنی
S	۰,۱۱۳
Zn	۹۹,۸۸۷

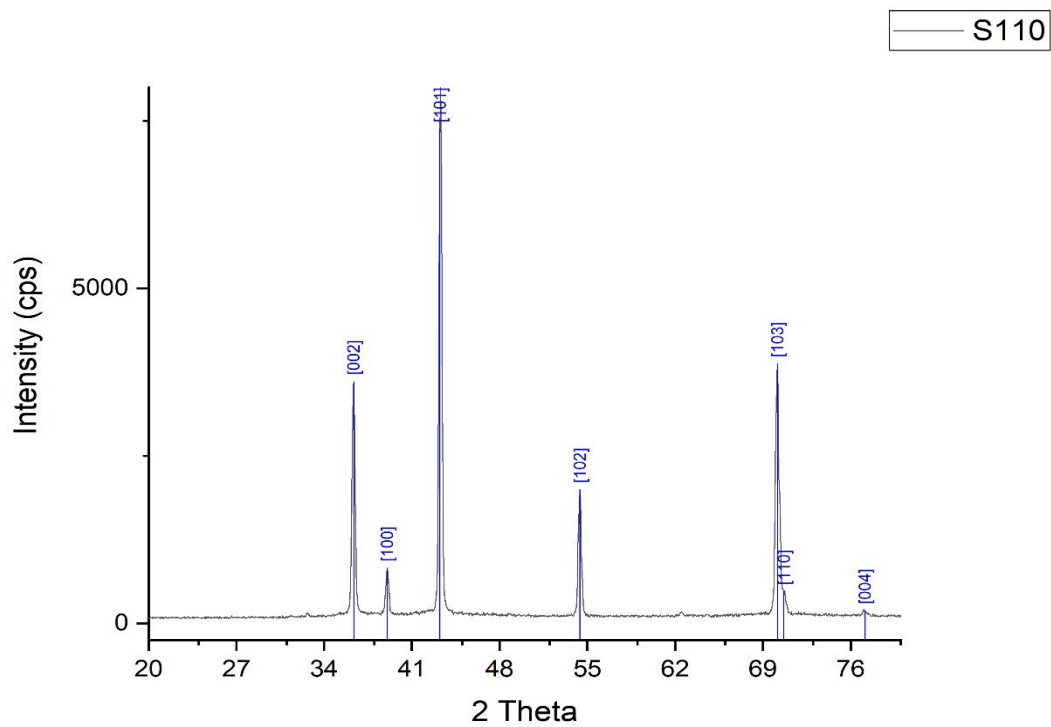
با توجه به آنالیز XRF گرفته شده، خلوص ورقه‌ی Zn تهیه شده بالا است و در آنالیز XRF اثری از فلزات دیگر مشاهده نمی‌گردد. مقدار بسیار اندکی از ناخالصی گوگرد مشاهده شده است که رفتار بسیار متفاوتی دارد و خدشه‌ای به آزمایشات و آنالیزها وارد نمی‌کند.

## ۴-۳-۲ آنالیز XRD

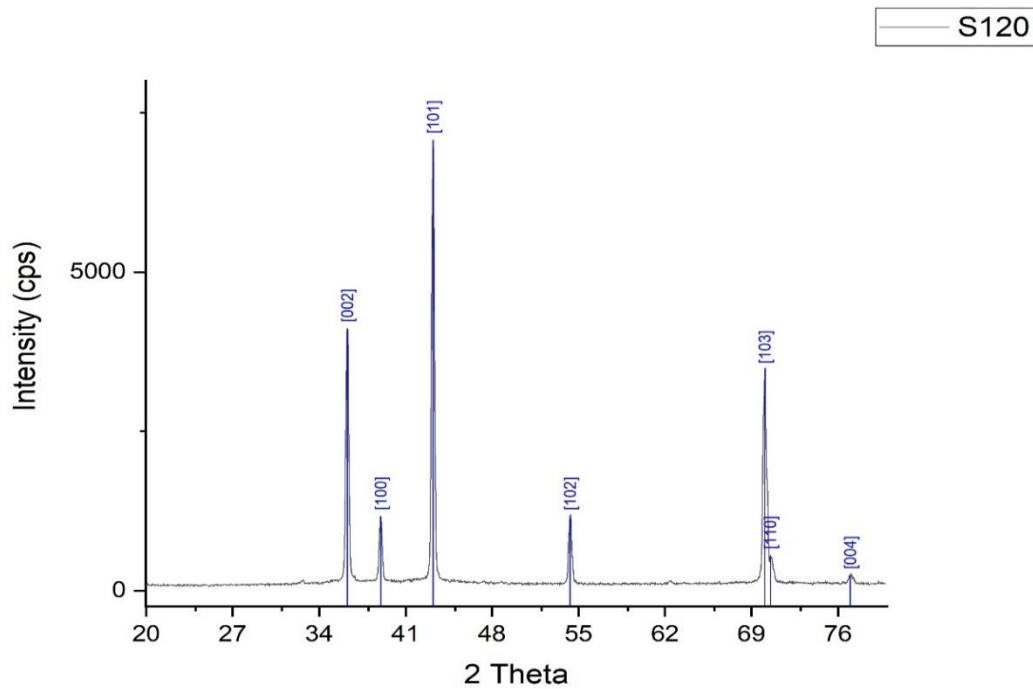
با هدف بررسی تشکیل نانوساختارهای ZnO بر روی سطح، از آنالیز XRD استفاده شد. برای این منظور از دستگاه XRD آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان (شکل ۴-۵) استفاده کردیم. سه نمونه از جدول ۴-۱ با کدهای S110، S120 و S135 انتخاب شدند. از جدول شماره‌ی ۴-۲ نیز یک نمونه با کد S150 و از جدول ۴-۳ تمام نمونه‌ها انتخاب و با دستگاه XRD بررسی شدند. نمودار پیک‌های XRD نمونه‌ها با استفاده از نرم افزار Origin رسم و در شکل‌های ۴-۶ الی ۴-۱۲ آمده است.



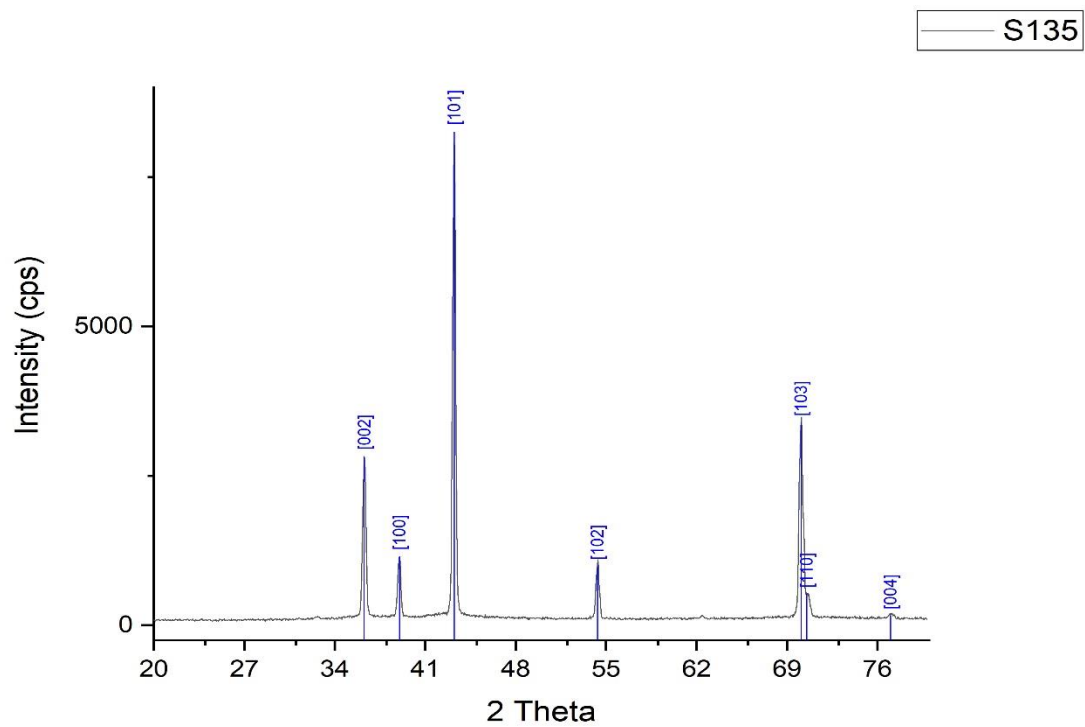
شکل ۴-۵: دستگاه XRD مدل D8 ADVANCE مستقر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان در حال آنالیز نمونه‌ها.



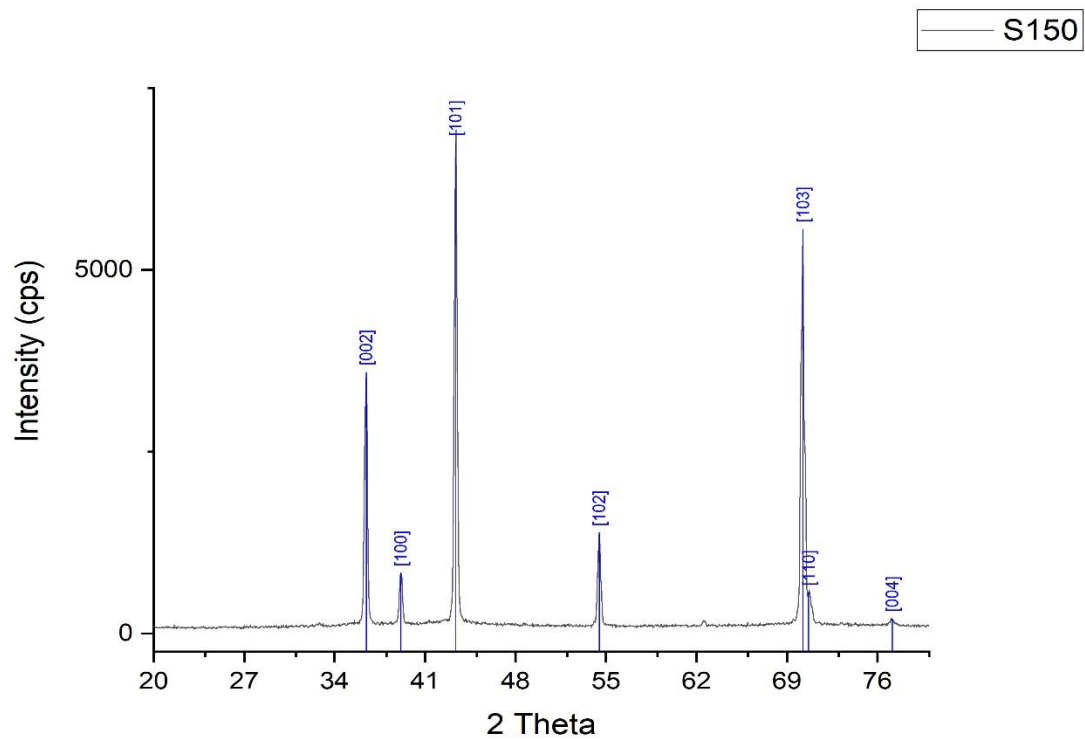
شکل ۴-۶: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌ی S110. در شکل پیک‌های صفحات Zn مشخص شده است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی‌شود.



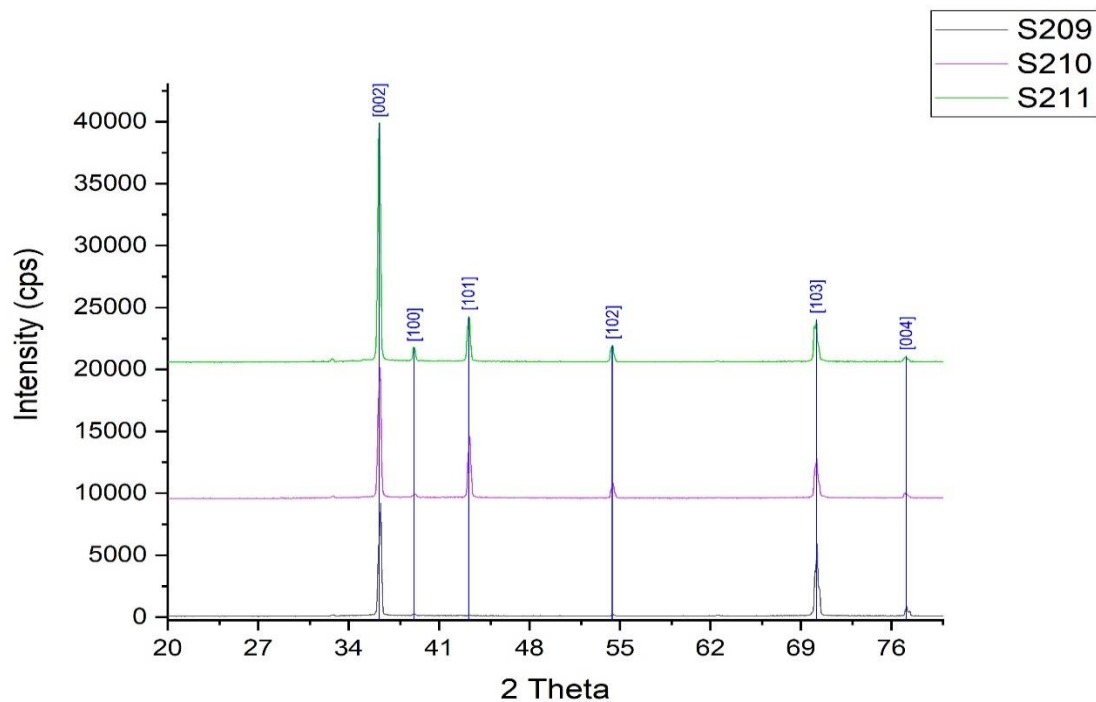
شکل ۴-۷: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌ی S120. در شکل پیک‌های صفحات Zn مشخص شده است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی‌شود.



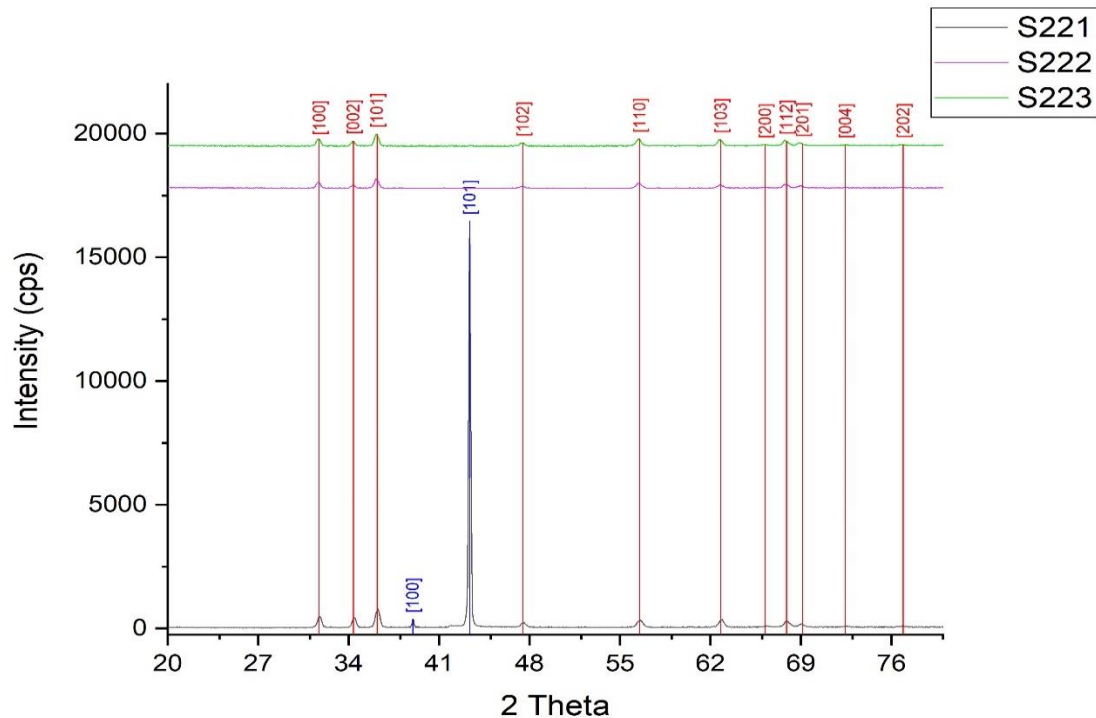
شکل ۴-۸: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌ی S135. در شکل پیک‌های صفحات Zn مشخص شده است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی‌شود.



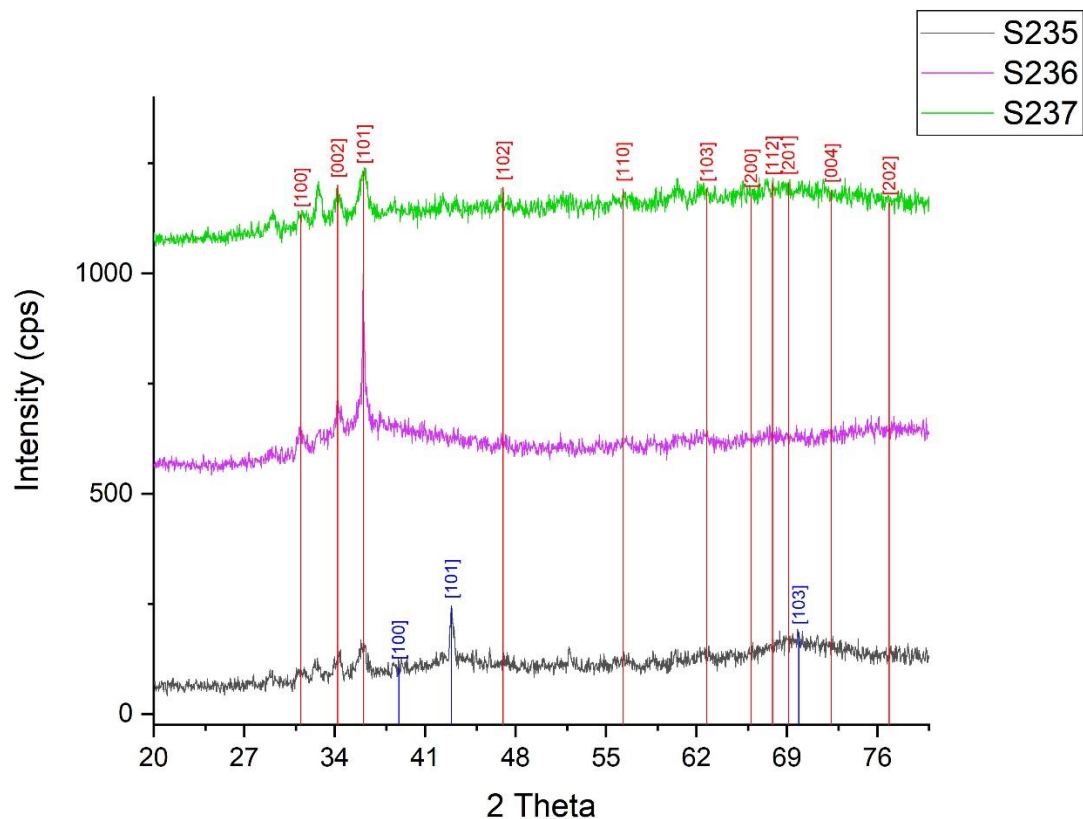
شکل ۴-۹: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌ی S150. در شکل پیک‌های صفحات Zn مشخص شده است. در این نمونه پیک ZnO مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴-۱۰: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌های S209، S210 و S211. در شکل پیک‌های صفحات Zn با رنگ آبی مشخص شده است. در این نمونه‌ها پیک ZnO مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴-۱۱: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌های S221، S222 و S223. در شکل پیک‌های صفحات ZnO با رنگ قرمز و پیک‌های مربوط به Zn با رنگ آبی مشخص شده است.



شکل ۴-۱۲: نمودار پیک‌های XRD نمونه‌های S235، S236 و S237. در شکل پیک‌های صفحات ZnO با رنگ قرمز و پیک‌های Zn با رنگ آبی مشخص شده است.

همانطور که از قله‌های نمودارها و شماره صفحات بلورها مشخص است، هرسه نمونه جدول ۴-۱ تقریباً حاوی (فاز غالب) Zn هستند و فاز ZnO به صورت عمده بر سطح آن‌ها رشد نکرده است. همچنین در نمونه‌های S150، S209، S210 و S211 اثری از رشد نانوساختار ZnO وجود ندارد.

در دیگر نمونه‌ها که در کوره با دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رشد کرده‌اند قله‌هایی از رشد ZnO مشاهده می‌شود. در نمونه‌های رشد یافته در دمای ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، نمونه‌ی S235 که تحت تابش‌دهی ۸۹ ساعته با چشمه‌ی ام‌رسیوم ۲۴۱ بوده است هر دو فاز Zn و ZnO وجود دارند؛ ولی در دو نمونه‌ی S236 و S237 که در همین دما رشد کرده‌اند فقط فاز ZnO قابل رؤیت است. همینطور در نمونه‌های رشد یافته در ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نیز نمونه‌ی S221 که تحت تابش چشمه‌ی ام‌رسیوم ۲۴۱ بوده است شامل هر دو فاز Zn و ZnO است اما دونمونه‌ی S222 و S223 فقط فاز ZnO

را شامل می‌شوند. در جدول ۴-۵ نتایج آنالیزهای XRD نمونه‌ها بطور خلاصه ذکر شده است. در نتایج XRD پارامترهای شبکه شناسایی می‌شوند و این پارامترها مشخص‌کننده‌ی شبکه رشد یافته هستند.

جدول ۴-۵: نتایج آنالیز XRD نمونه‌ها.

کد نمونه	چشمه	دمای رشد (°C)	شماره کارت استاندارد	پارامتر شبکه a	پارامتر شبکه b	پارامتر شبکه c	ساختار
S110	N.I.	۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S120	Cs	۳۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S135	N.I.	۳۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S150	N.I.	۷۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S211	Am	۳۰۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S210	Cs	۳۰۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S209	N.I.	۳۰۰	۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S235	Am	۵۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO
			۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S236	Cs	۵۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO
S237	N.I.	۵۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO
S221	Am	۷۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO
			۰۴-۰۸۳۱	۲,۶۶۵۰۰	۲,۶۶۵۰۰	۴,۹۴۷۰۰	Zn
S222	Cs	۷۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO
S223	N.I.	۷۰۰	۳۶-۱۴۵۱	۳,۲۴۹۸۲	۳,۲۴۹۸۲	۵,۲۰۶۶۱	ZnO



جهت بررسی میانگین اندازه بلورکها (D) از فرمول شرر<sup>۱</sup> (رابطه‌ی ۴-۱) استفاده کردیم و میانگین اندازه دانه‌ها در جدول ۵-۵ مشخص شده‌اند [۸۳].

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (۴-۱)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج پرتوی ایکس،  $\beta$  بزرگی تمام پهنا در نیم بیشینه<sup>۲</sup> و  $\theta$  زاویه براگ است.

جدول ۴-۶: جدول اندازه بلورک های ZnO رشد یافته در نمونه‌هایی که در طیف XRD آن‌ها صفحات ZnO مشاهده شده است. در تمام نمونه‌های داخل جدول دوقله اول (زاویه‌های ۳۱ و ۳۴ درجه) در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند.

کد نمونه	چشمه	دمای رشد (°C)	میانگین اندازه بلورک‌ها (nm)
S235	Am	۵۰۰	۱۵/۳
S236	Cs	۵۰۰	۱۷/۵
S237	N.I.	۵۰۰	۱۷/۱
S221	Am	۷۰۰	۲۶/۳
S222	Cs	۷۰۰	۳۶/۹
S223	N.I.	۷۰۰	۳۱/۶

همانطور که در جدول ۴-۶ مشاهده می‌شود؛ اولاً با افزایش دما اندازه بلورک‌ها به مقدار قابل

توجهی افزایش یافته است که نشان از رشد بهتر نانوساختارهای ZnO می‌دهد و همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌ای که با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده است اندازه بلورک بزرگ‌تری دارد و رشد نانوساختار را بهبود بخشیده است ولی نمونه‌هایی که با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده‌اند اندازه

<sup>1</sup> Scherrer

<sup>2</sup> Full width at half maximum

بلورک کوچک‌تری دارند یعنی تابش‌دهی با چشمه‌ی ام‌رسیوم ۲۴۱ باعث کاهش رشد نانوساختار شده است.

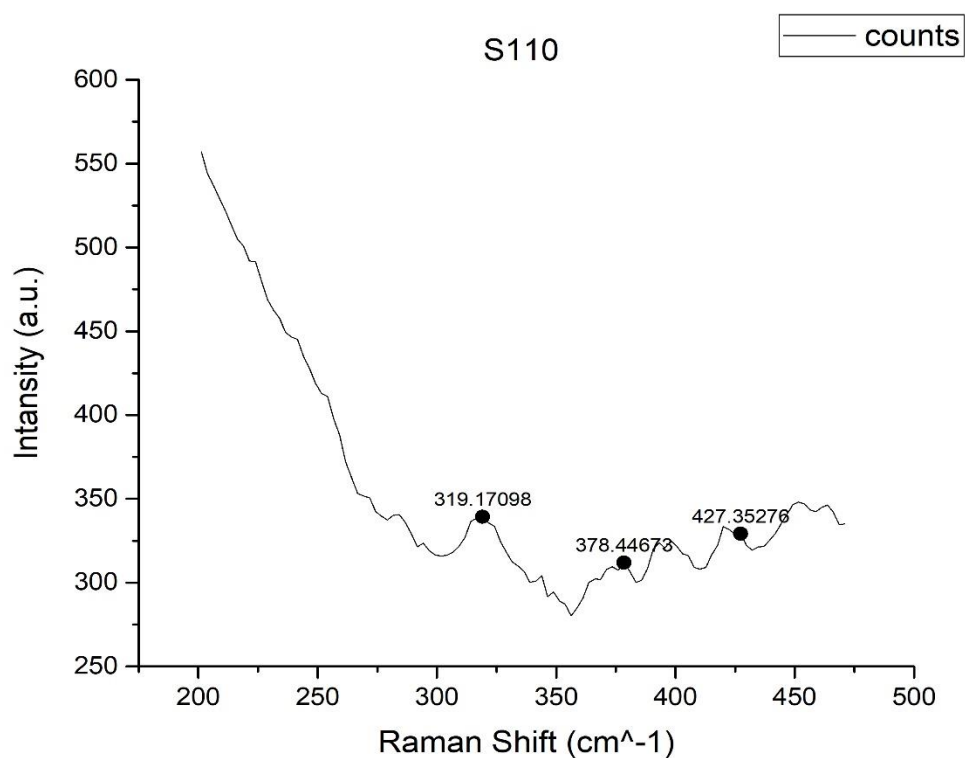
### ۳-۳-۴ طیف رامان

برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌های آزمایش دوم و سوم از طیف رامان نمونه‌ها استفاده کردیم. نحوه‌ی بکارگیری طیف رامان نیز در فصل دوم مختصر توضیحی داده شد و ما اینجا فقط نتایج را عنوان می‌کنیم. قبل از اینکه نمونه‌ها برای تست FESEM فرستاده شوند، چند نمونه انتخاب شده و از آن‌ها طیف رامان گرفتیم. این کار به ما کمک می‌کند که از رشد یافتن نانوساختارهای ZnO مطمئن شویم و سپس به سراغ تصاویر میکروسکوپ FESEM برویم.

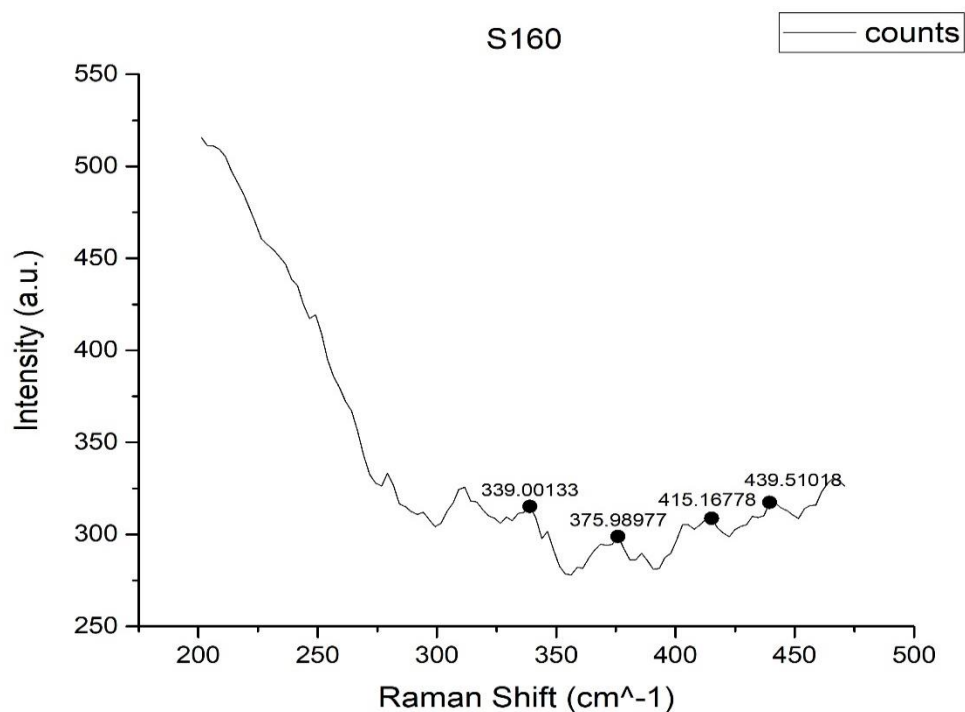
طیف رامان نمونه‌ها با دستگاه طیف‌سنج رامان مستقر در آزمایشگاه اندازه‌گیری دانشگاه صنعتی شاهرود (شکل ۴-۱۳) اندازه‌گیری شد. خروجی دستگاه طیف‌سنج رامان بصورت داده‌های عددی است که بعد از رسم قسمت‌های مدنظر با نرم‌افزار Origin نمودارهای ۴-۱۴ الی ۴-۱۹ رسم شده‌اند.



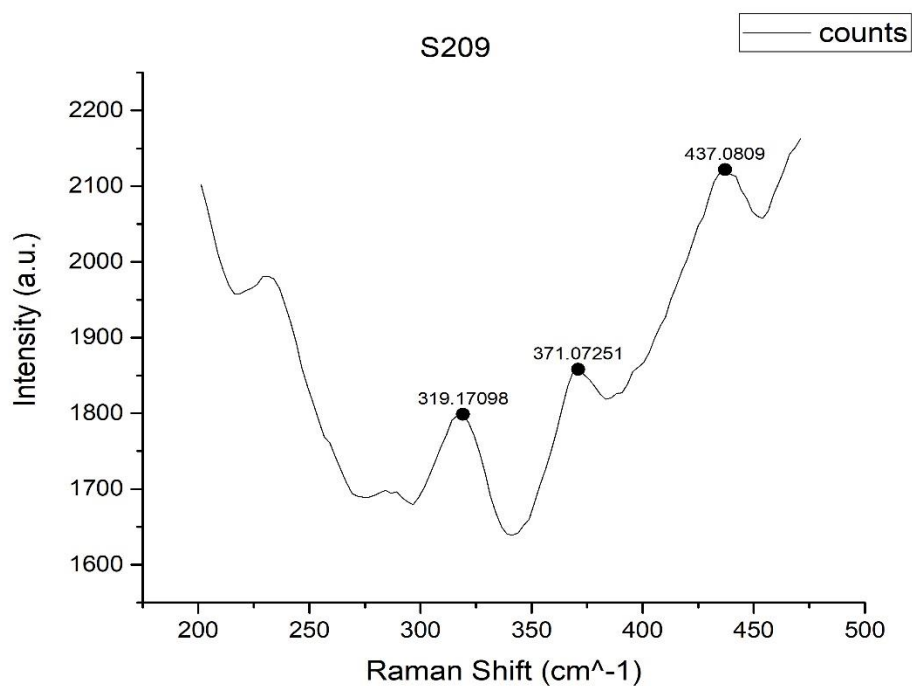
شکل ۴-۱۳: دستگاه طیف سنج رامان دانشگاه صنعتی شاهرود. برای طیف گیری رامان نمونه‌ها از این دستگاه استفاده شده است.



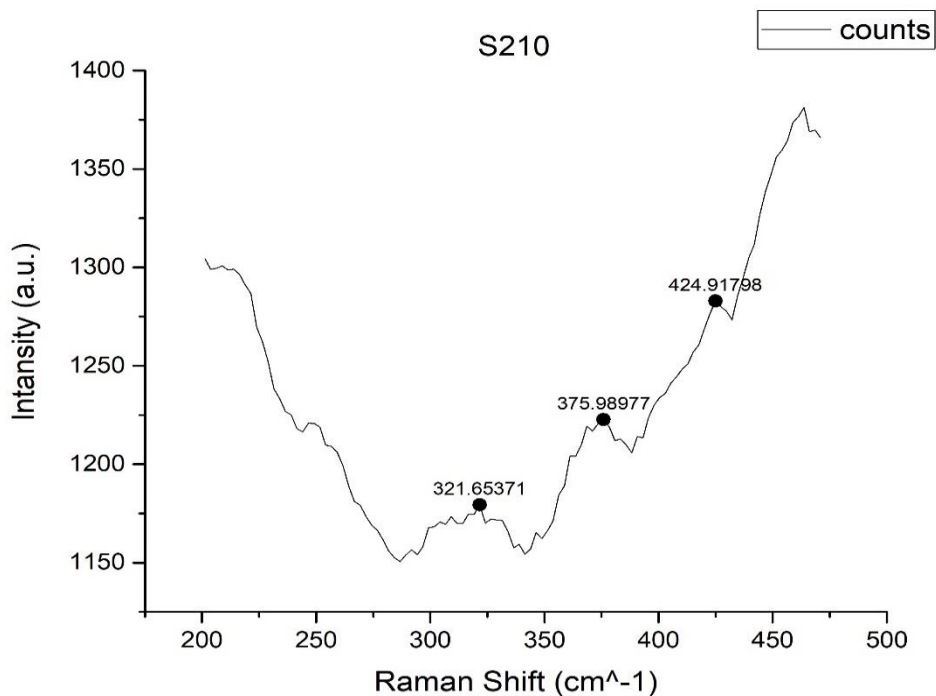
شکل ۴-۱۴: طیف رامان نمونه‌ای که فقط پولیش داده شده است.



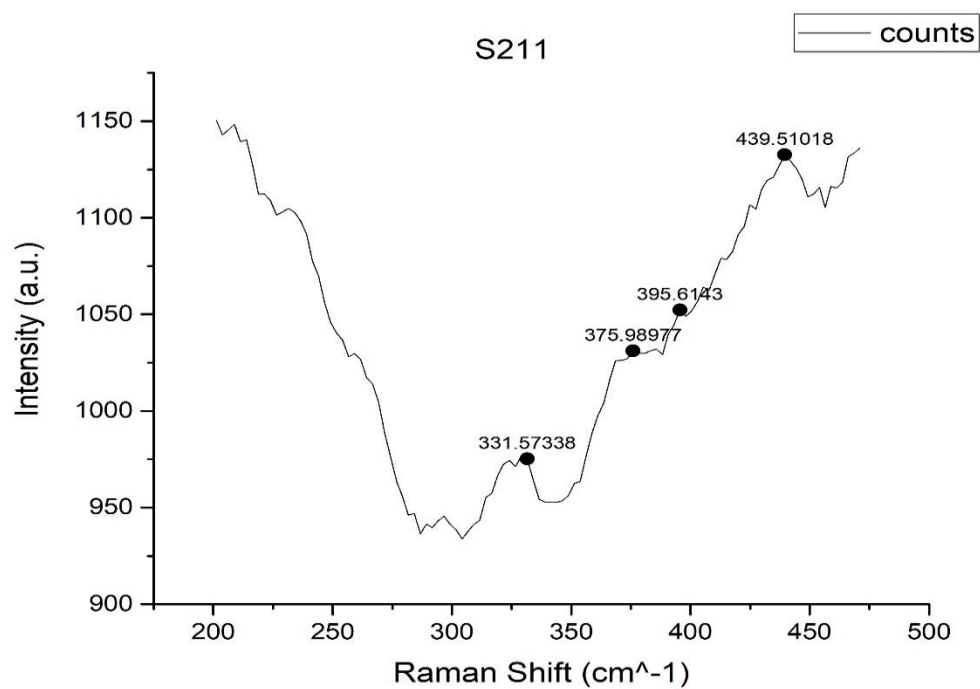
شکل ۴-۱۵: طیف رامان نمونه S160 که تابش‌دهی نشده و فقط ۱۵ ساعت در دمای ۷۰ °C در جو اکسیژن قرار گرفته است.



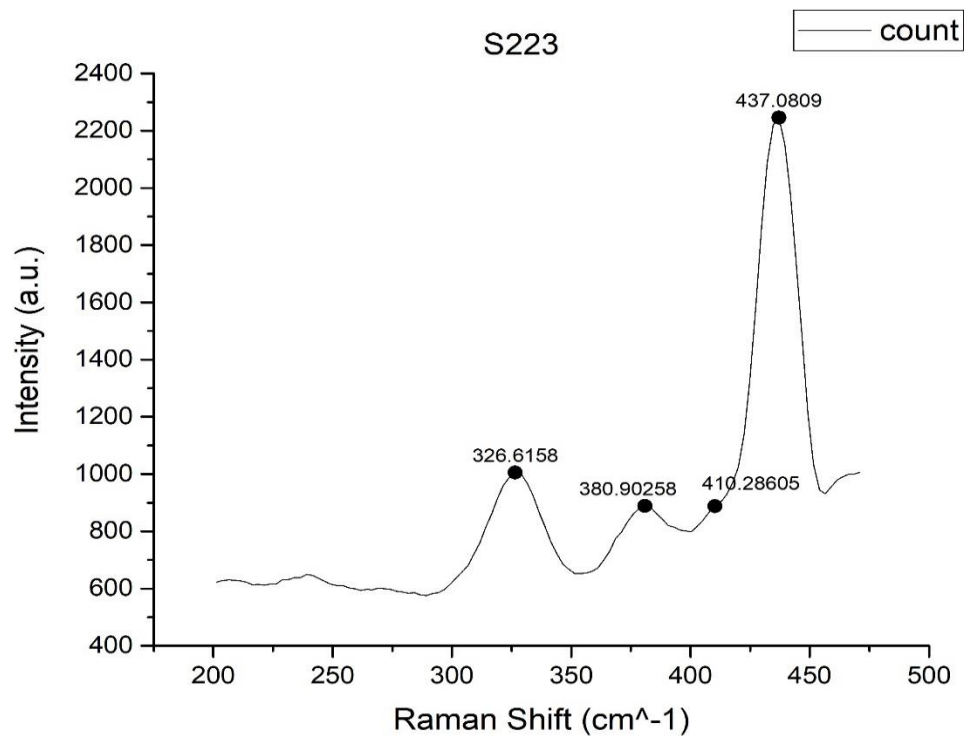
شکل ۴-۱۶: طیف رامان نمونه‌ی S209 که تابش‌دهی نشده و فقط ۱ ساعت در کوره با دمای ۳۰۰°C در جو اکسیژن بوده است.



شکل ۴-۱۷: طیف رامان نمونه‌ی S210 که ۱۶ ساعت با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده، سپس ۱ ساعت در کوره با دمای ۳۰۰°C در جو اکسیژن بوده است.



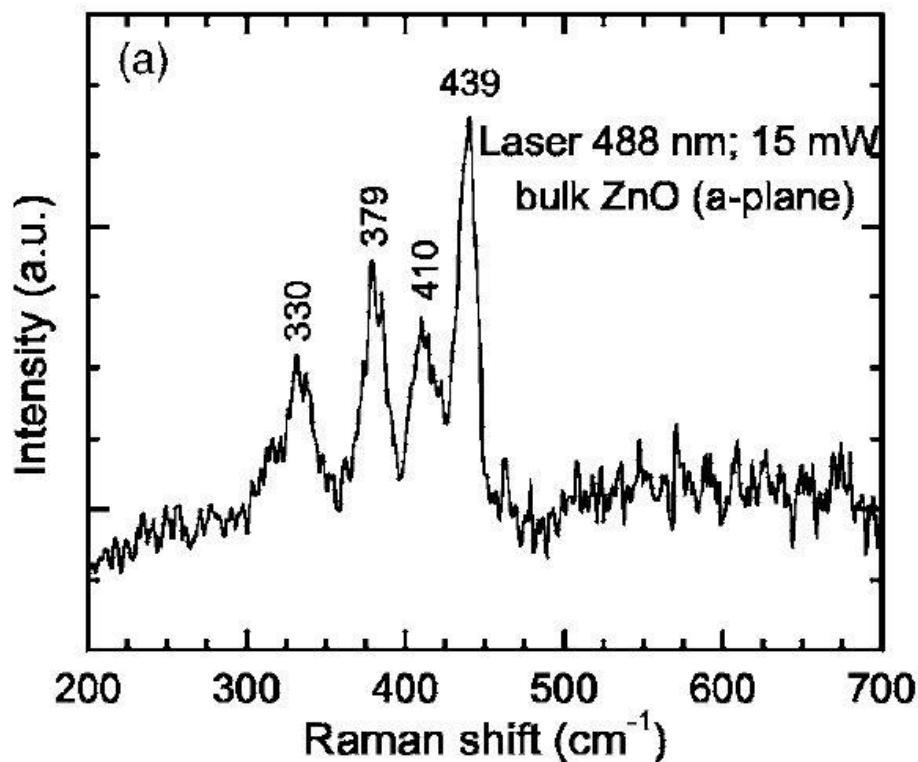
شکل ۴-۱۸: طیف رامان نمونه‌ی S211 که ۱۶ ساعت با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده، سپس ۱ ساعت در کوره با دمای ۳۰۰°C در جو اکسیژن بوده است.



شکل ۴-۱۹: طیف رامان نمونه‌ی S223 که تابش‌دهی نشده و فقط ۱ ساعت در کوره با دمای ۷۰۰°C در جو اکسیژن بوده است.

طیف رامان ZnO که در شکل ۴-۲۰ آمده است را با هر یک از نمودارهای بدست آمده مقایسه

کرده و میزان رشد نانوساختار ZnO را بررسی کردیم.



شکل ۴-۲۰: طیف رامان ZnO [۸۴].

در طیف رامان نمونه‌ی S110 که در شرایط رشد نبوده است و نمونه‌ی S160 که در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ساعت با جو اکسیژن قرار گرفته است، پیک‌های ZnO بسیار کوچک بوده و اثری از رشد نانوساختار ZnO دیده نمی‌شود. نمونه‌ی S209، S210 و S211 که در دمای ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با جو اکسیژن قرار داشتند، پیک‌های بلندتری مطابق با پیک‌های طیف رامان نانوساختار ZnO دارند که نشان از رشد اندکی از ZnO در سطح بستر دارد که گویای این مطلب است که در این دما نانوساختارهای ZnO شروع به رشد کرده‌اند. طیف رامان نمونه‌ی S223 که در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رشد کرده است کاملاً گویای این مطلب است که نانوساختار ZnO به خوبی در این نمونه رشد کرده است.

#### ۴-۳-۴ آنالیز پنجم: تصاویر FESEM

در فصل دوم مختصر توضیحی درباره میکروسکوپ FESEM داده شد. برای تحلیل نمونه‌ها از تصاویر FESEM استفاده کردیم. برای این کار از دستگاه میکروسکوپ FESEM موجود در پژوهشگاه بوعلی مشهد (شکل ۴-۲۱) استفاده کردیم. میکروسکوپ مورد استفاده ساخت شرکت Tescan بوده و مجهز به دکتور آنالیز EDAX نیز بود. بدلیل اینکه نانوساختارهای ZnO نیم‌رسانا هستند باید ابتدا با دستگاه Sputter Coater به روش انباشت فیزیکی بخار بر روی نمونه‌ها یک لایه‌ی بسیار نازک طلا (حدوداً ۱۰۰ آنگستروم) نشانده شود تا تصاویر با وضوح بهتری دریافت گردد. برای لایه‌نشانی از دستگاه Sputter Coater مدل Q150R ES ساخت شرکت Quorum موجود در پژوهشگاه بوعلی (شکل ۴-۲۲) استفاده شد. این لایه‌ی نازک تأثیر قابل توجهی در نتایج نخواهد داشت و تنها در آنالیز EDAX یک پیک مربوط به طلا در نمونه مشاهده خواهد شد. تصاویر FESEM گرفته شده از نمونه‌ها در شکل‌های ۴-۲۳ الی ۴-۴۱ آورده شده است.

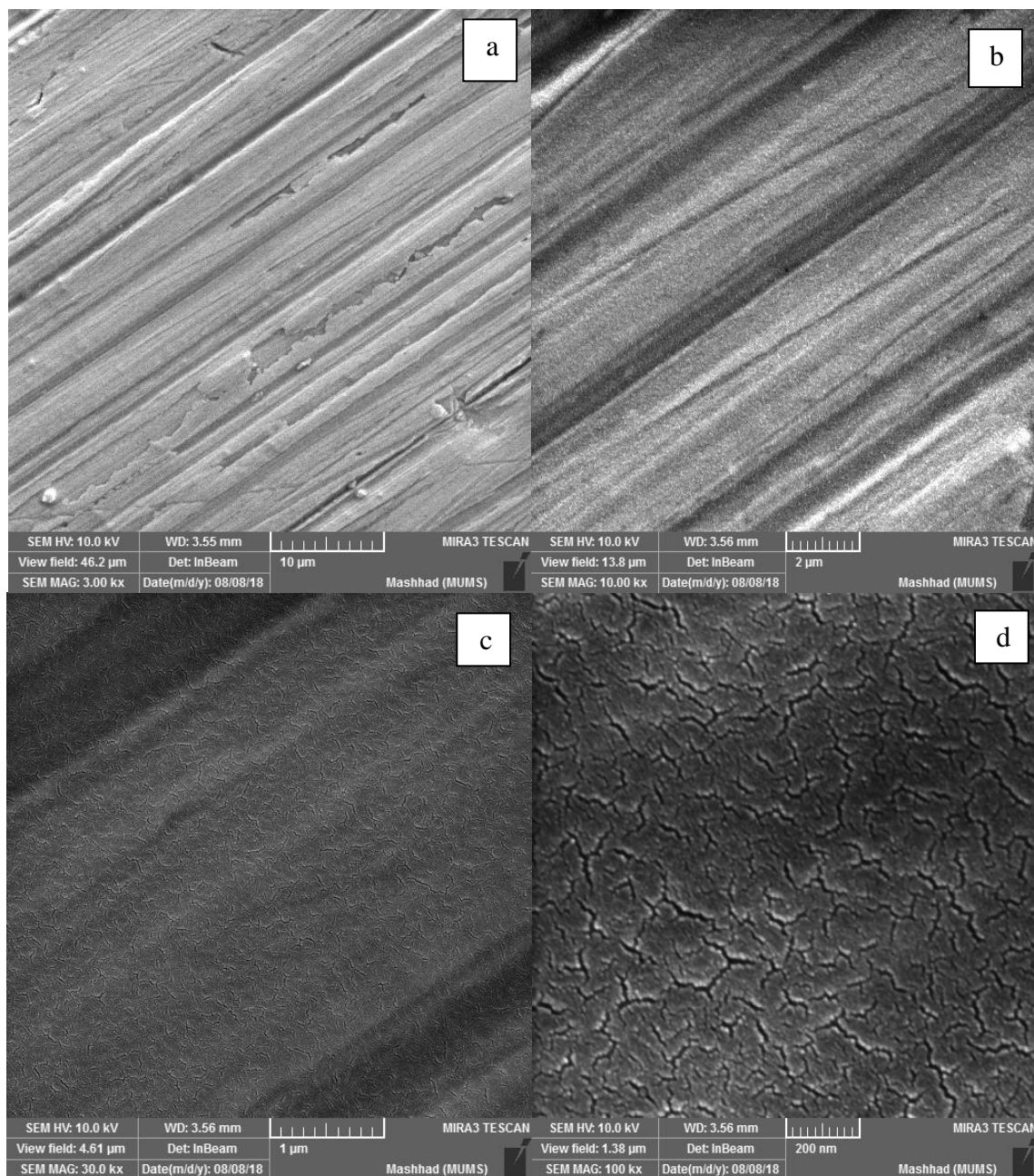


شکل ۴-۲۱: میکروسکوپ FESEM استفاده شده جهت تهیه تصاویر FESEM از نمونه‌ها.

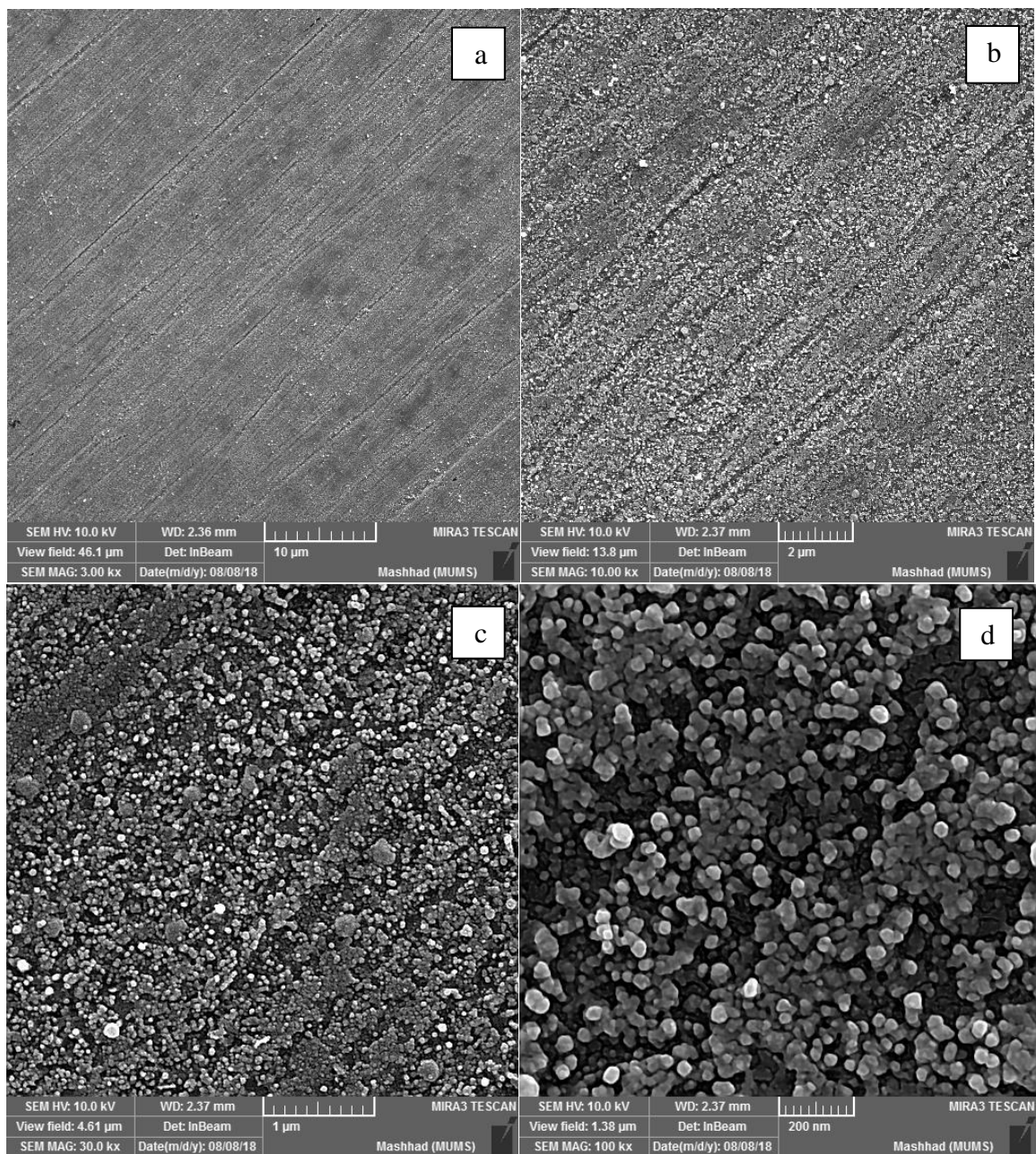


شکل ۴-۲۲: دستگاه مورد استفاده برای لایه‌نشانی طلا بر روی نمونه‌ها جهت آماده‌سازی برای گرفتن تصاویر FESEM.

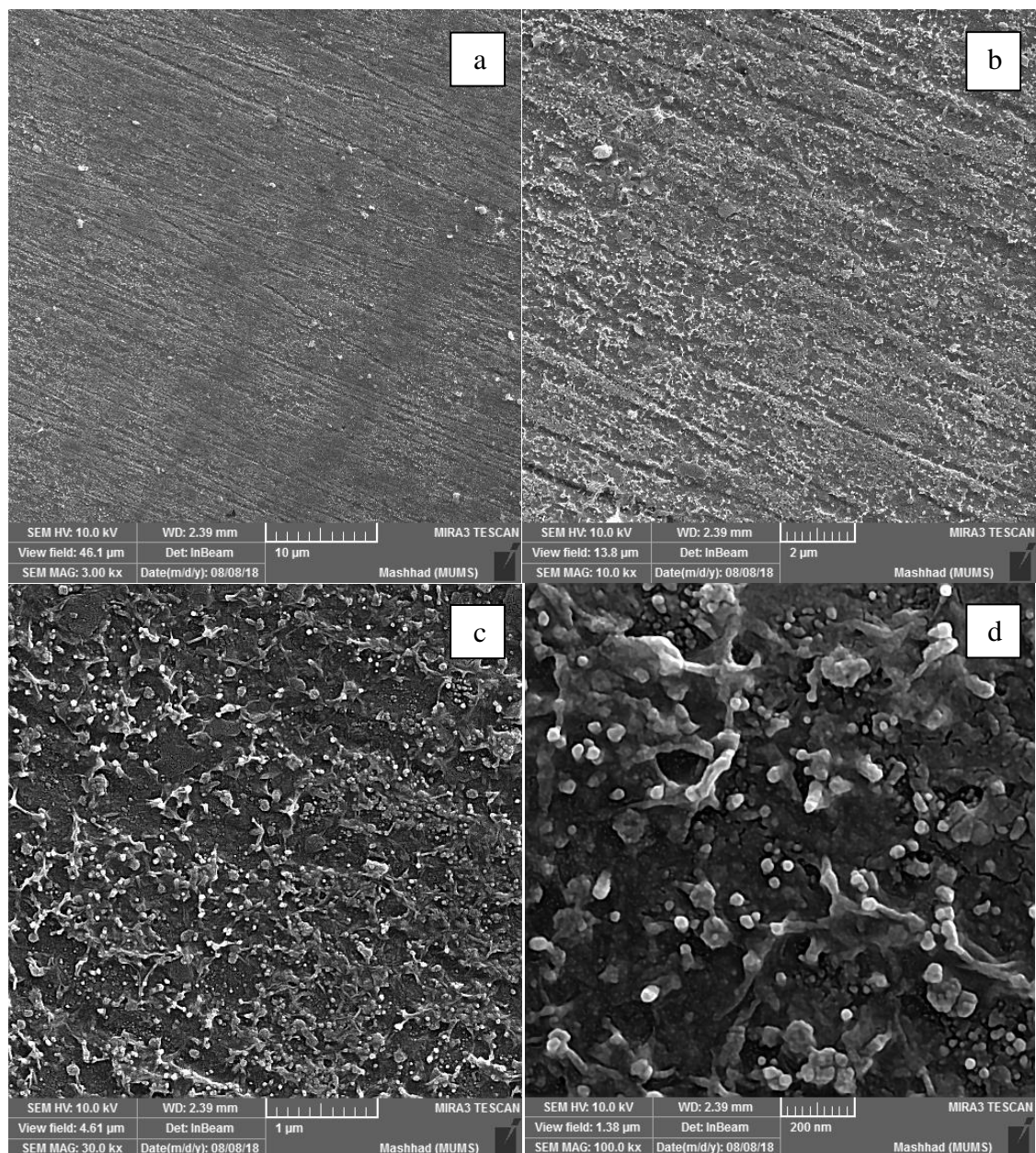




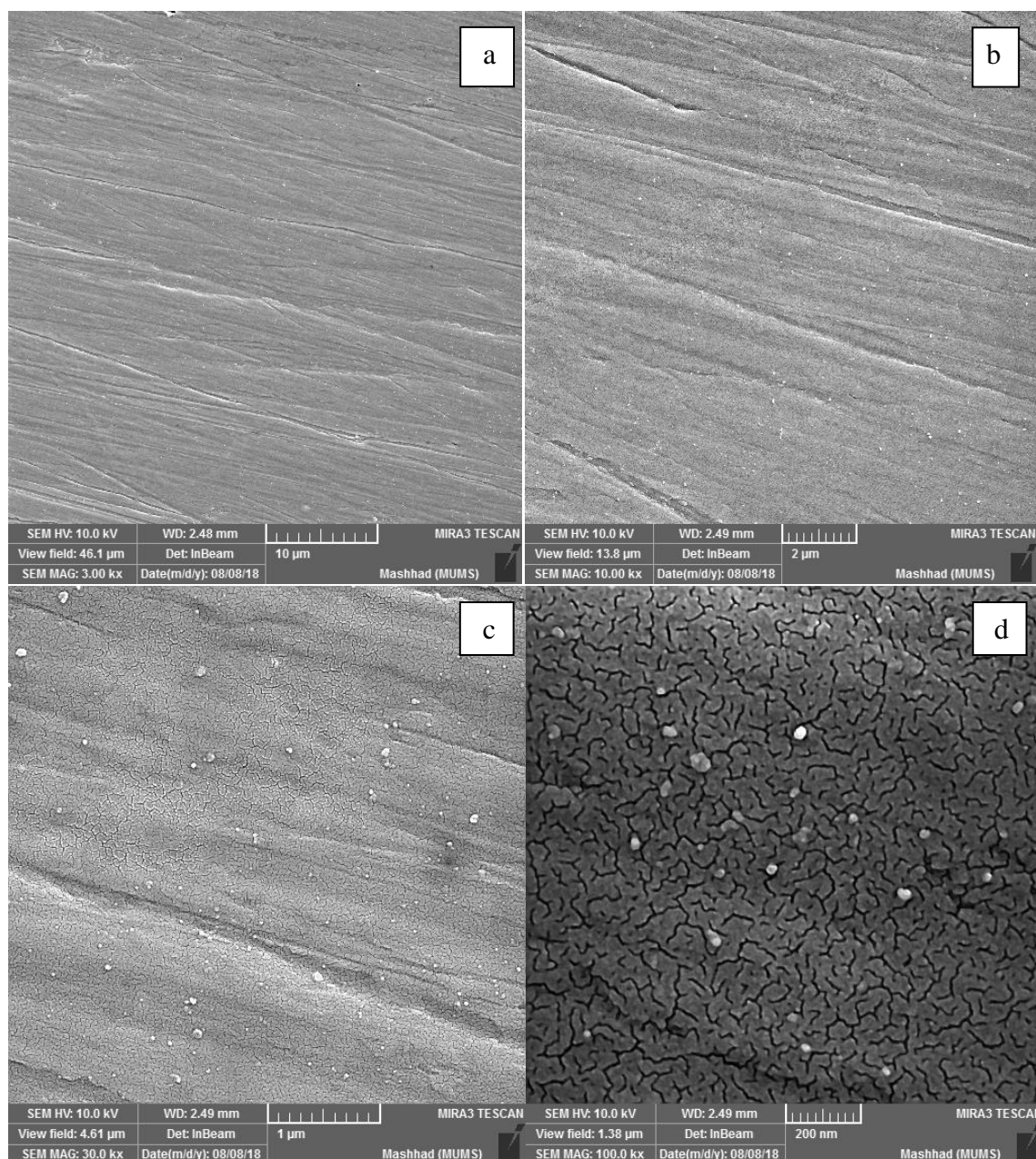
شکل ۴-۲۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ((a(10µm), b(2µm), c(1µm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S110. این نمونه فقط پولیش خورده، تحت تابش نبوده و شرایط رشد را نداشته است.



شکل ۴-۲۴: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S105. این نمونه ۴ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده و سپس ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30°C قرار گرفته است.

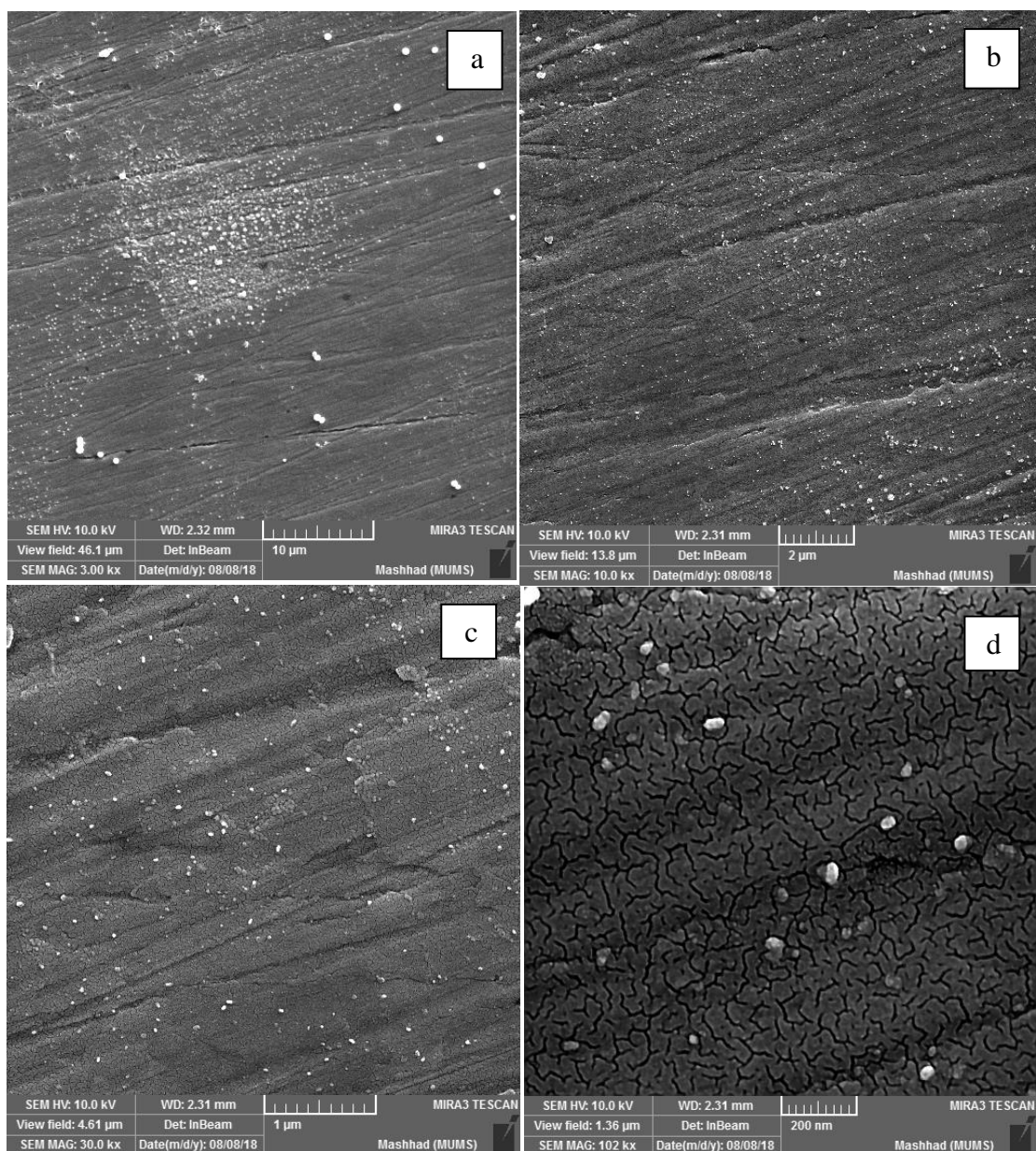


شکل ۴-۲۵: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ((a(10 $\mu\text{m}$ ), b(2 $\mu\text{m}$ ), c(1 $\mu\text{m}$ ), d(200nm)) برای نمونهی S115. این نمونه تابش دهی نشده است و فقط ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30°C قرار گرفته است.

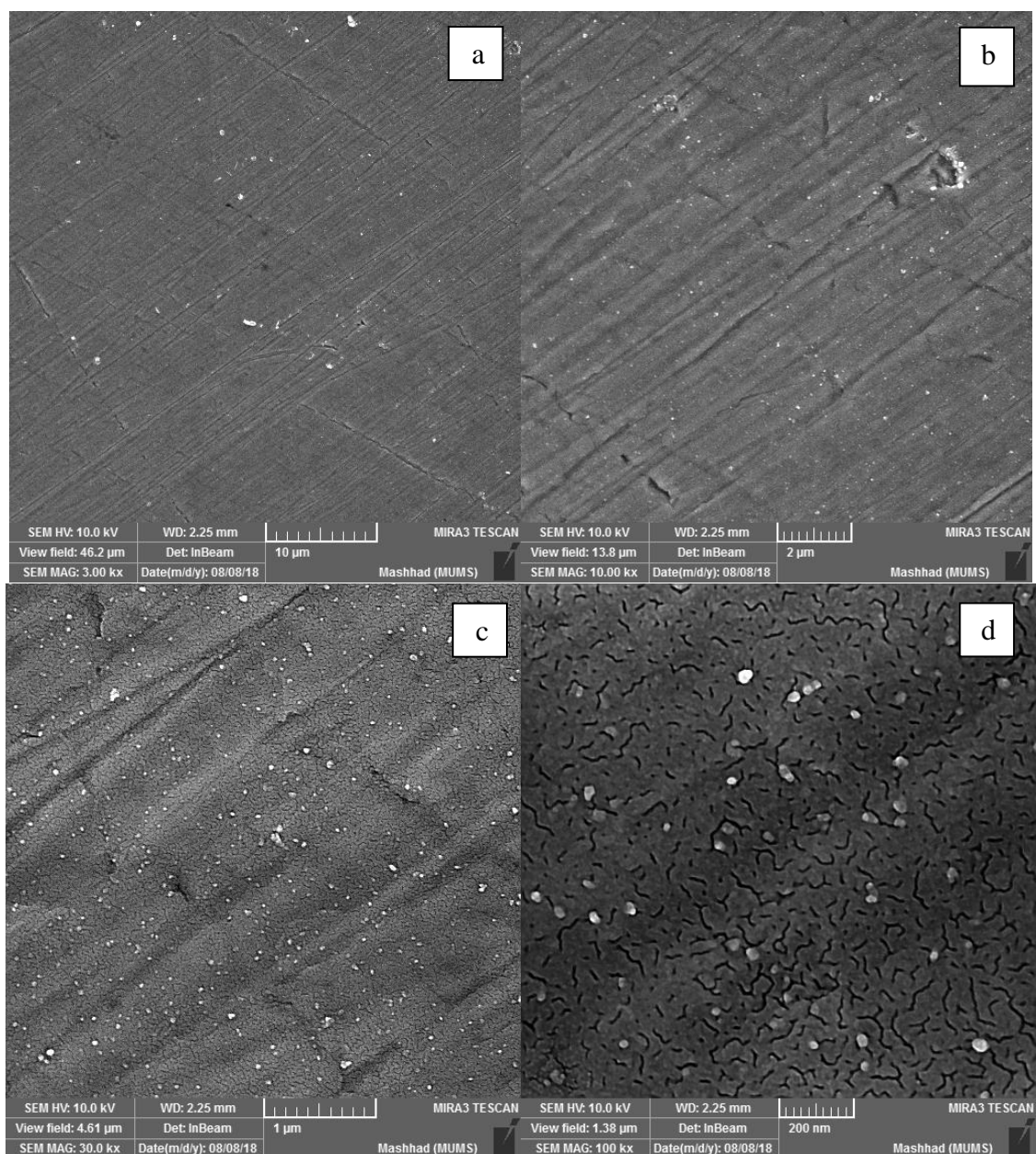


شکل ۴-۲۶: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S120. این نمونه ۱۱ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده و سپس ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30°C قرار گرفته است.

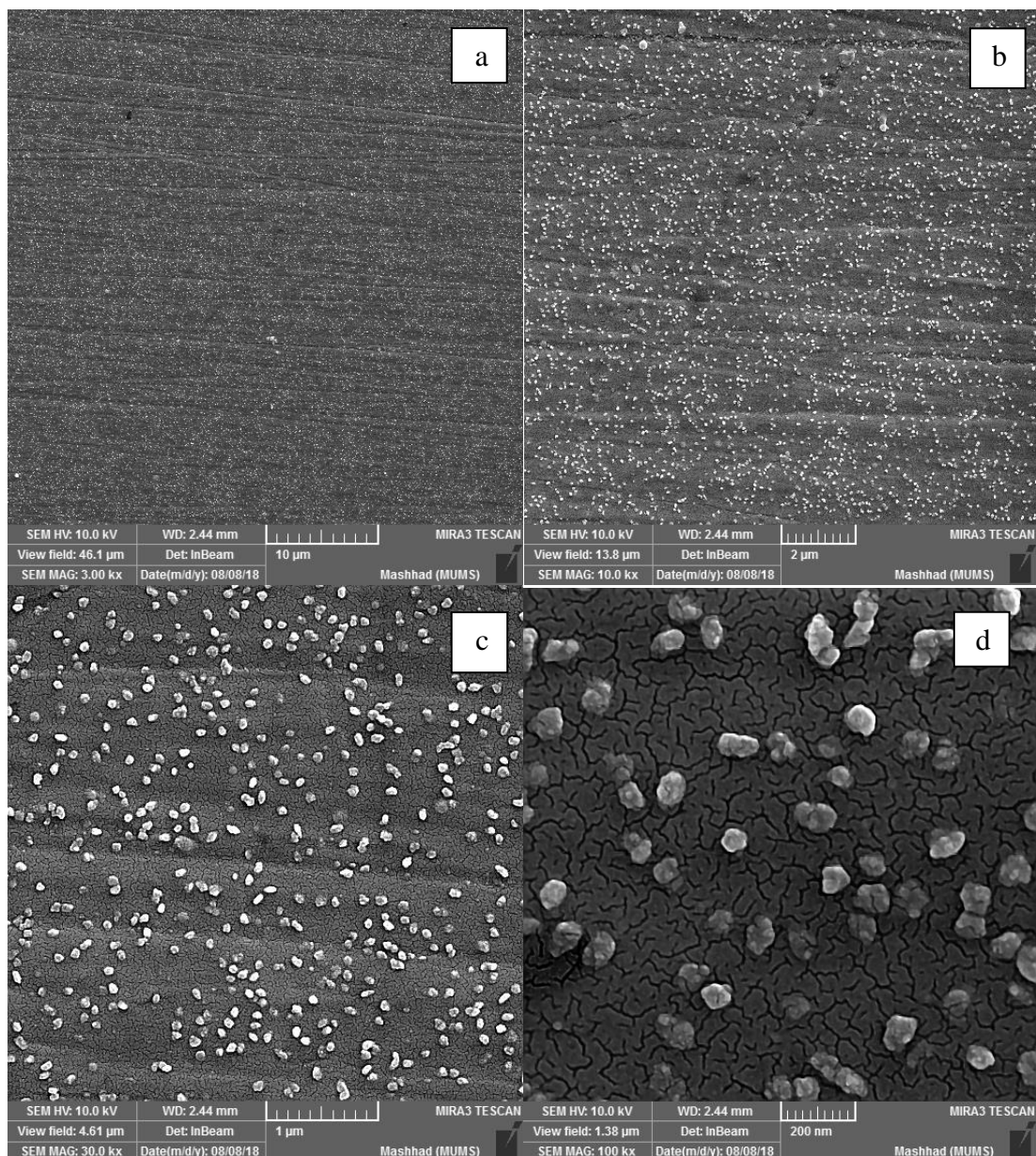




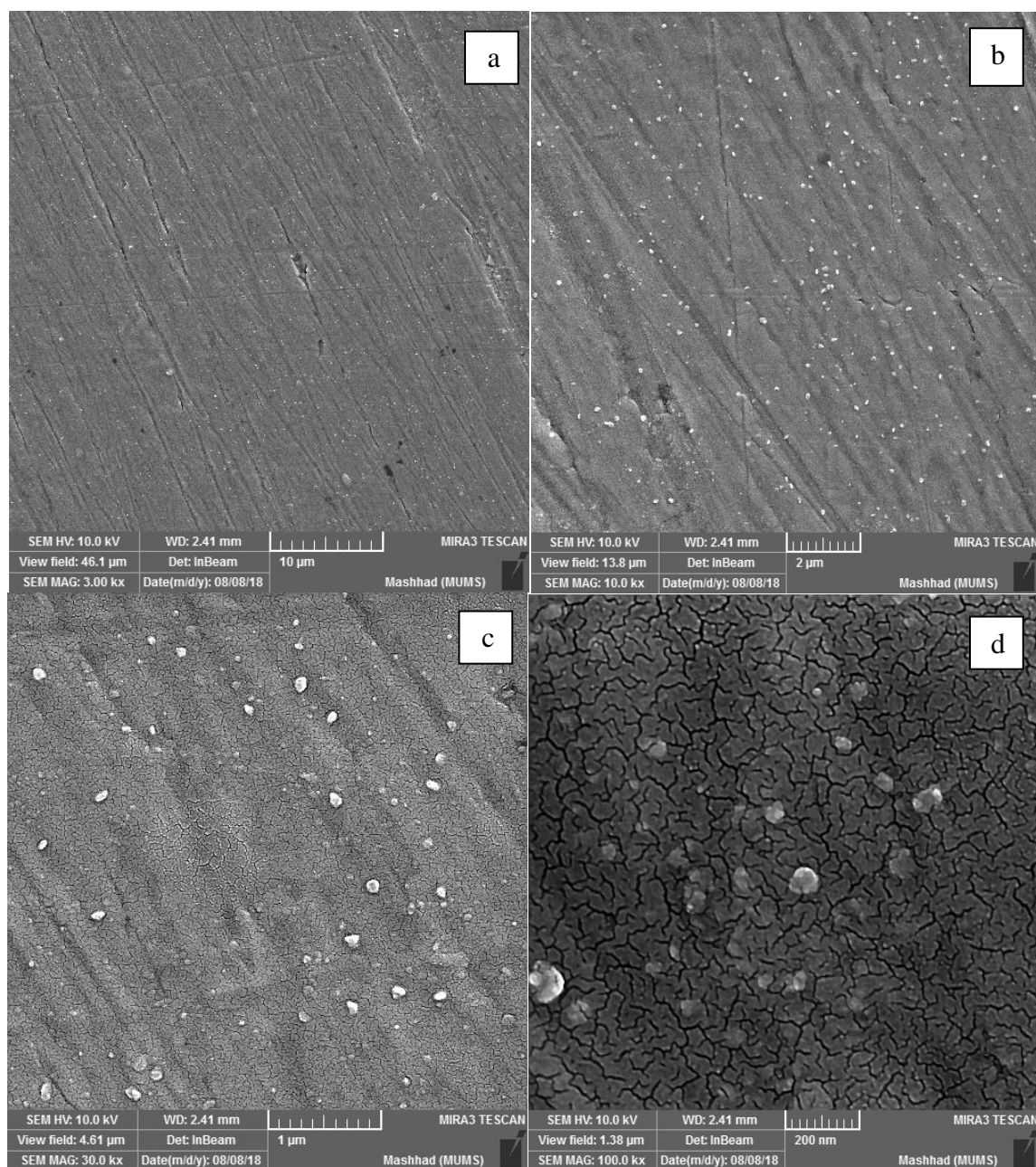
شکل ۴-۲۷: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10µm), b(2µm), c(1µm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S140. این نمونه تابش ندیده و فقط ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30°C قرار گرفته است.



شکل ۴-۲۸: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S130. این نمونه ۱۱ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده و سپس ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای 100°C قرار گرفته است.

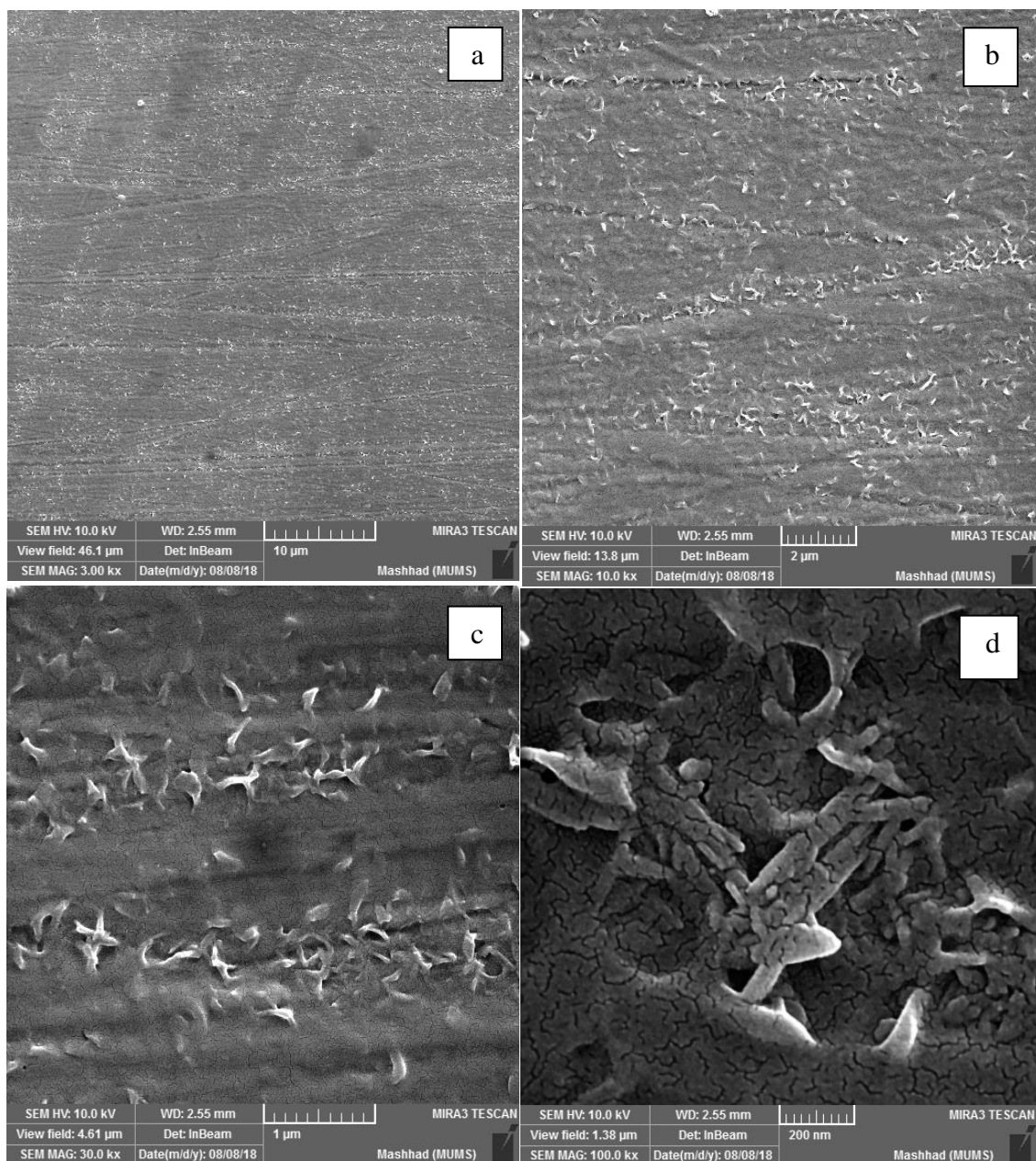


شکل ۴-۲۹: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S145. این نمونه تابش ندهده و فقط ۴ ساعت در جو اکسیژن با دمای 100°C قرار گرفته است.

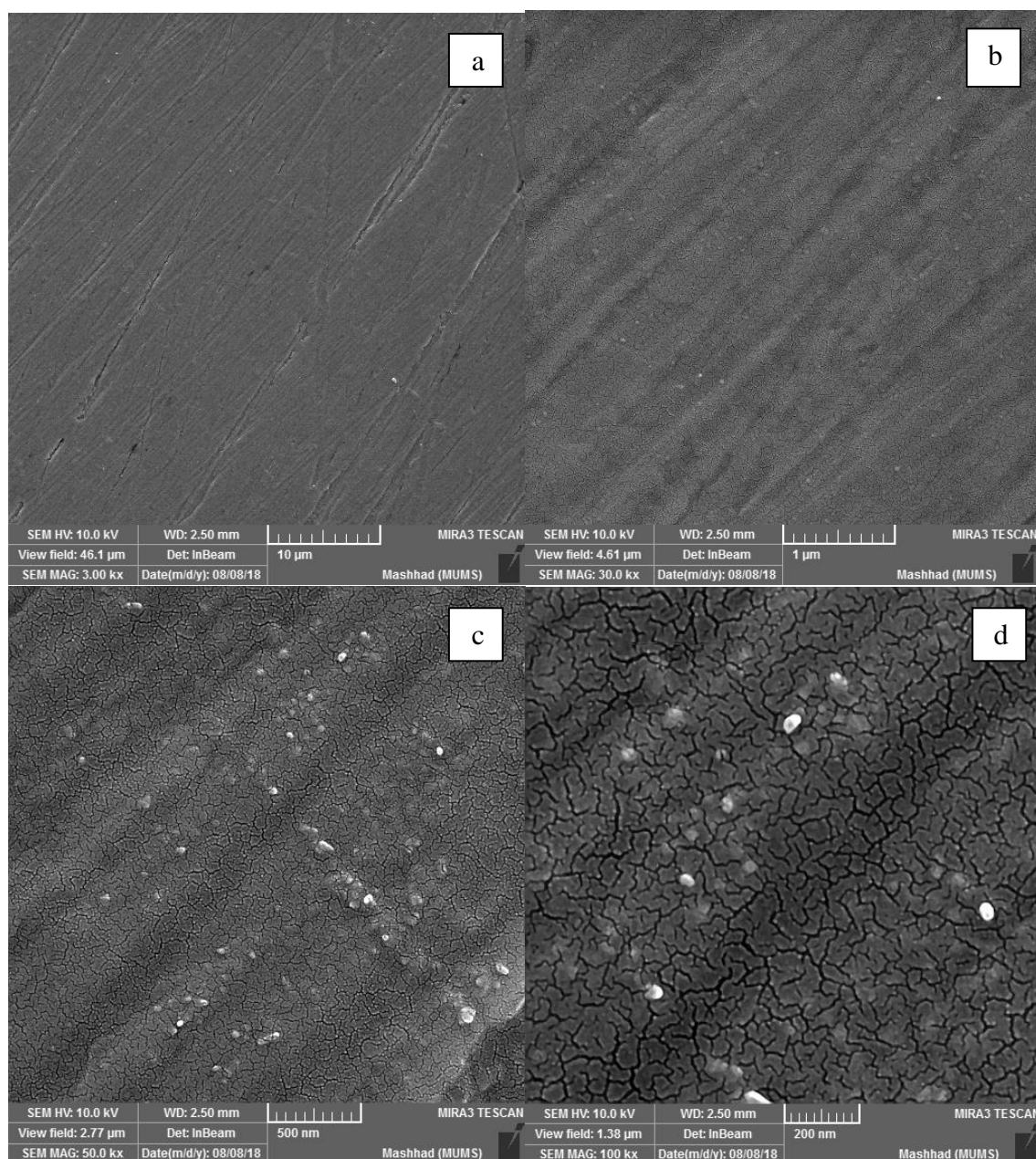


شکل ۴-۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S125. این نمونه ۴ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده و سپس ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30°C قرار گرفته است.

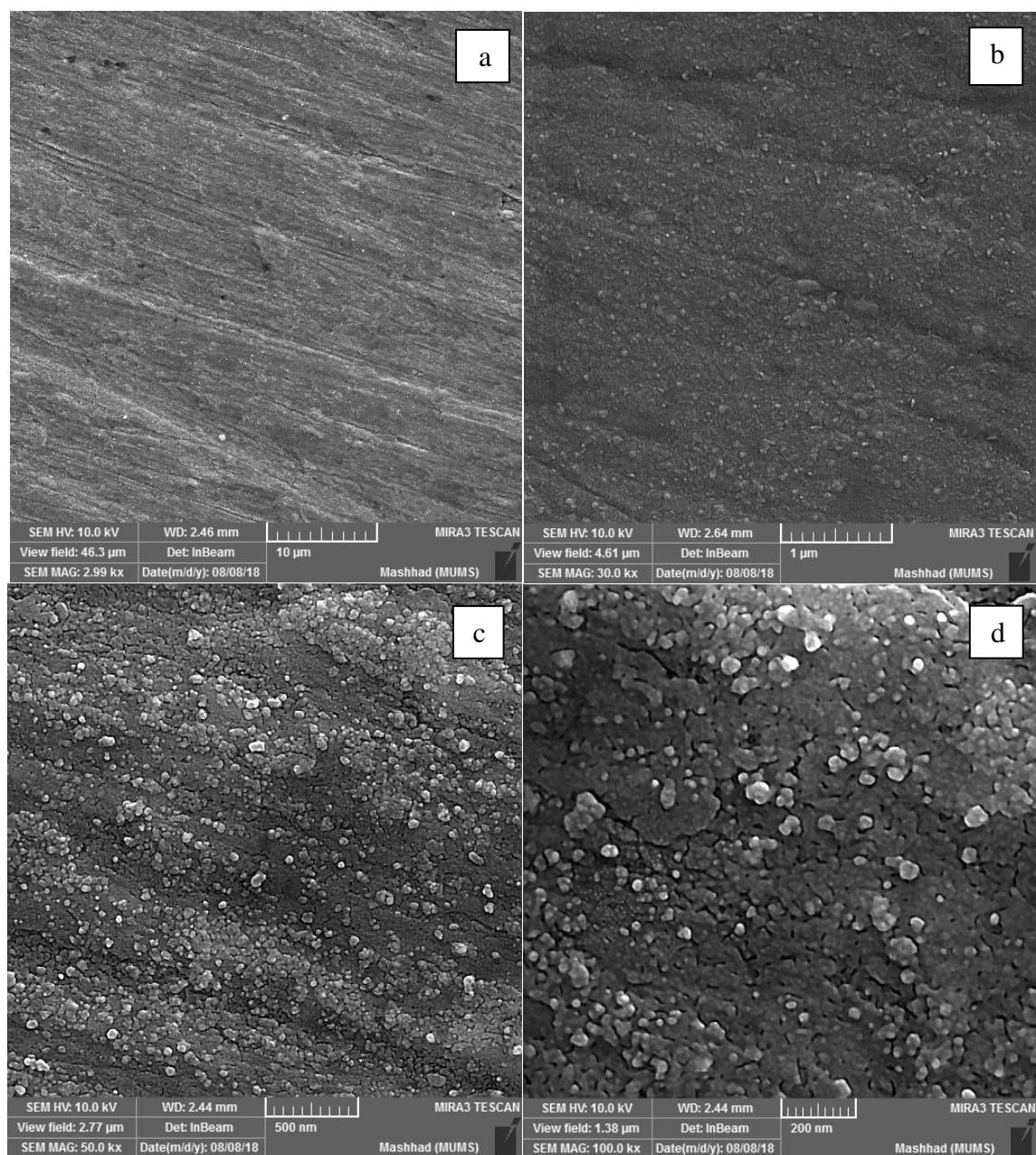




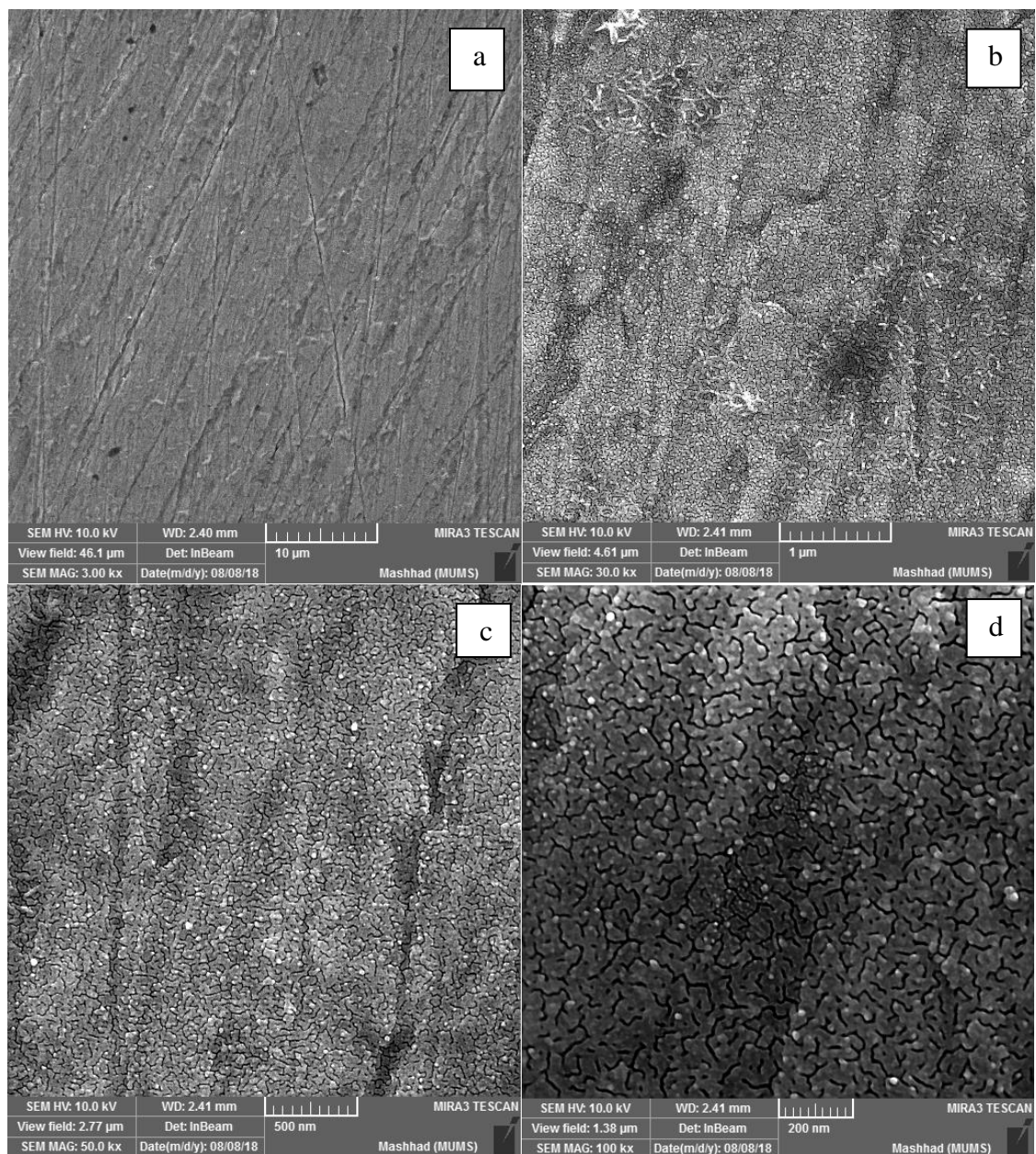
شکل ۴-۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ((a(10 $\mu\text{m}$ ), b(2 $\mu\text{m}$ ), c(1 $\mu\text{m}$ ), d(200nm)) برای نمونه‌ی S135. این نمونه تابش ندیده و فقط ۳ ساعت در جو اکسیژن با دمای 30 $^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته است.



شکل ۴-۳۲: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S155. این نمونه هیچگونه تابش رادیواکتیوی ندیده و فقط ۱۵ ساعت در جو اکسیژن با دمای 70°C قرار گرفته است.

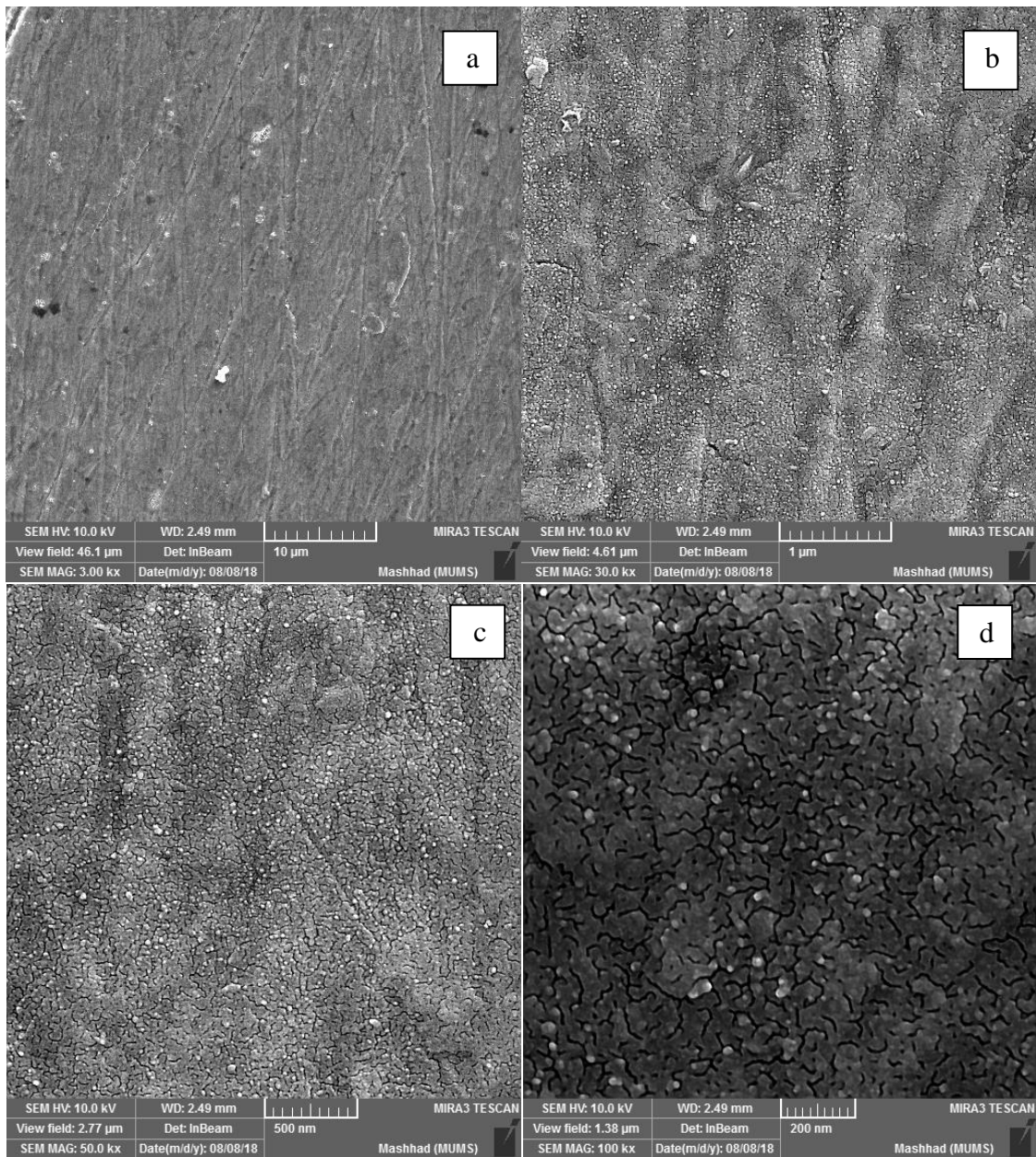


شکل ۴-۳: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S209. این نمونه تابش‌دهی نشده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 300°C قرار گرفته است.

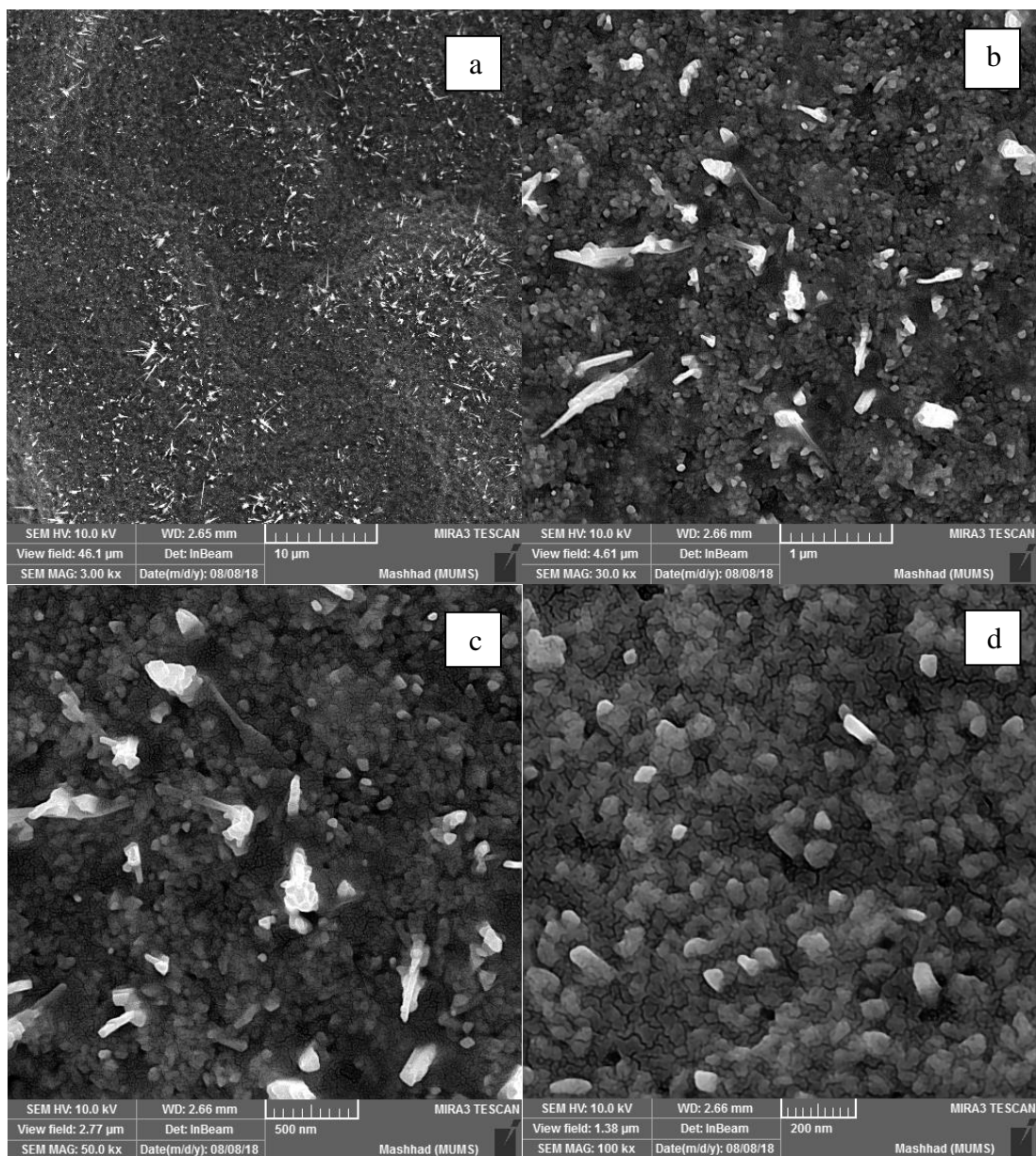


شکل ۴-۳۴: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ( $a(10\mu m)$ ,  $b(1\mu m)$ ,  $c(500nm)$ ,  $d(200nm)$ ) برای نمونه‌ی S210. این نمونه ۱۶ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم  $^{137}$  تابش دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای  $300^{\circ}C$  قرار گرفته است.

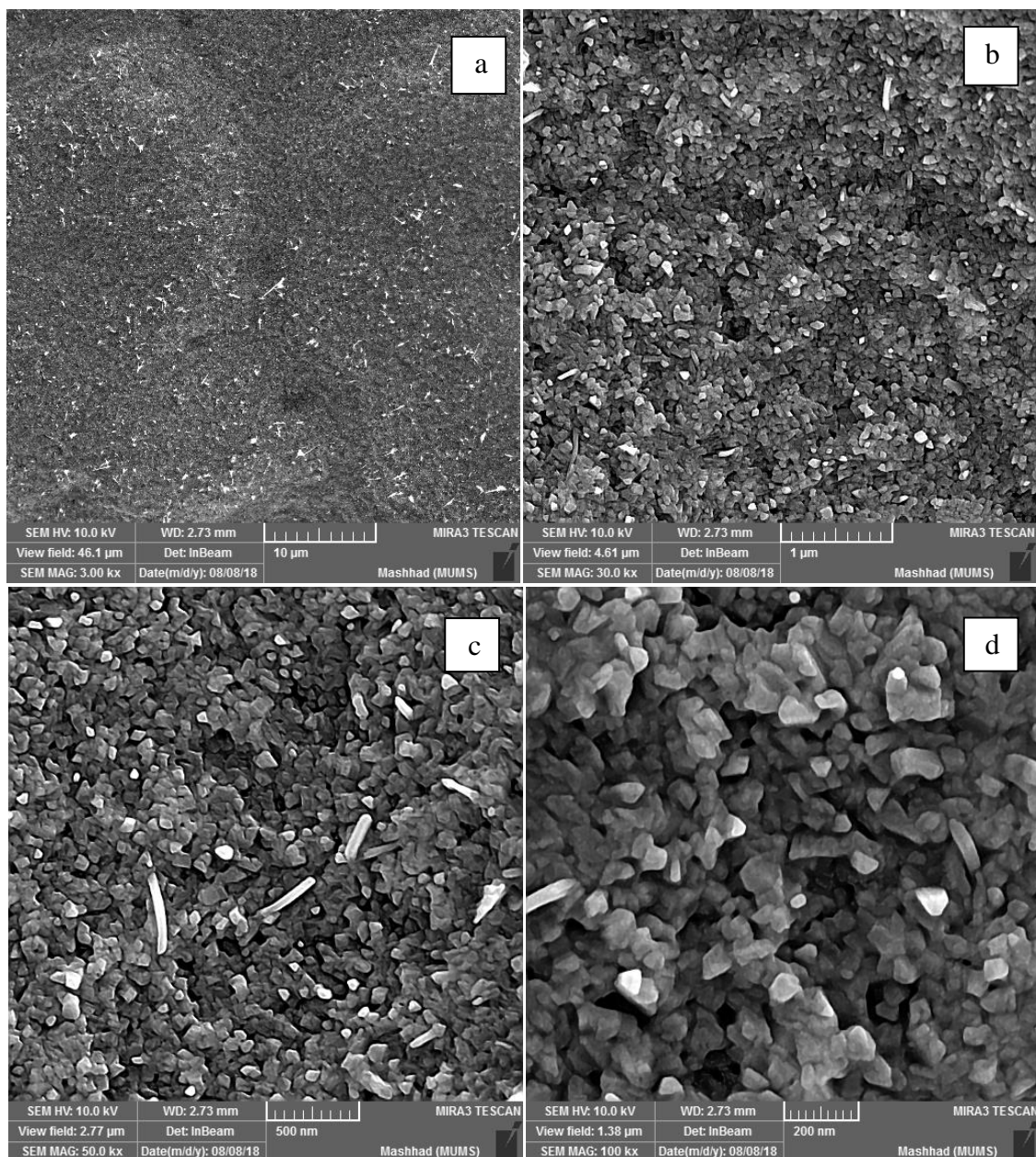




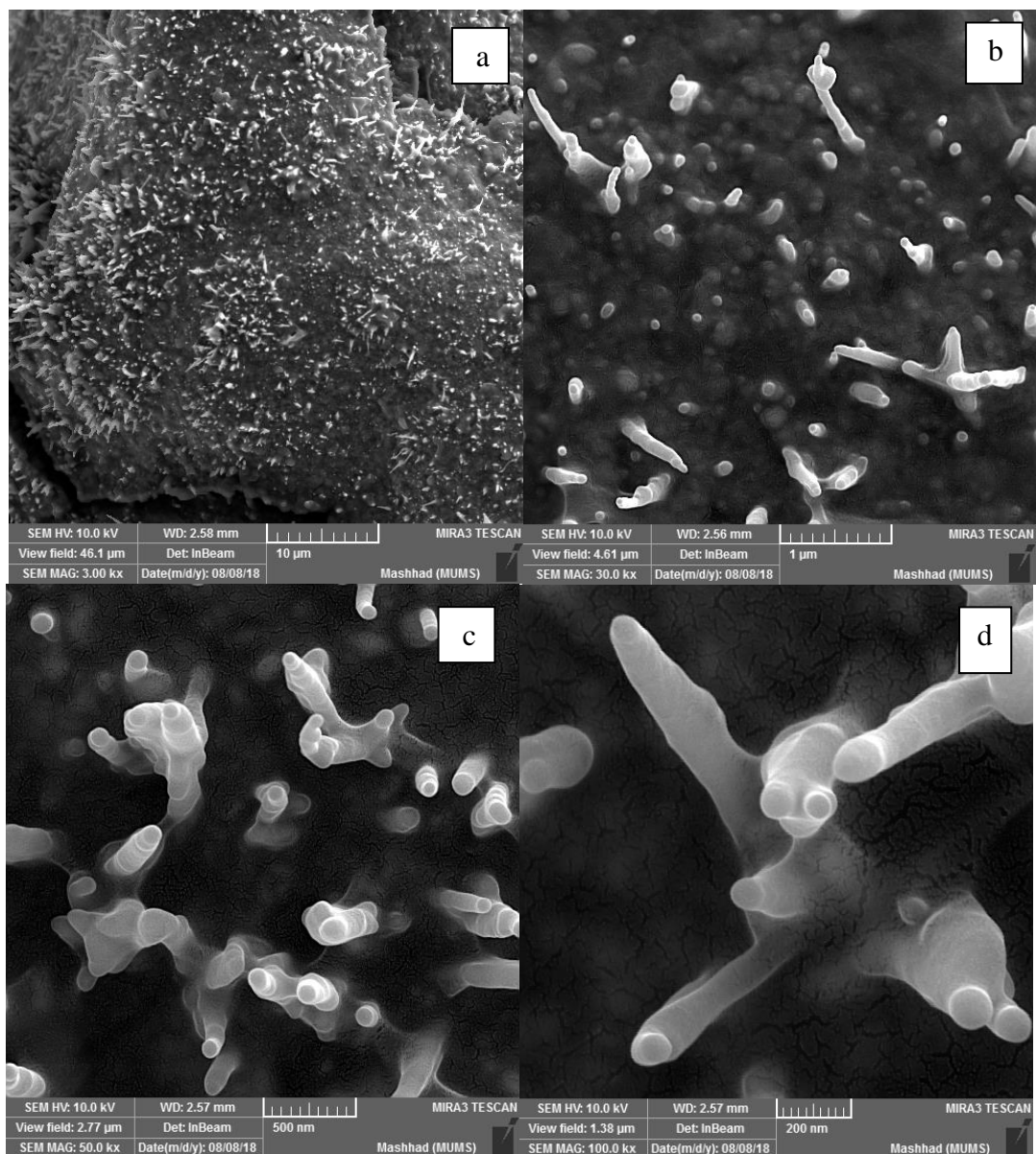
شکل ۴-۳۵: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm) برای نمونه‌ی S211. این نمونه ۱۶ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 300°C قرار گرفته است.



شکل ۴-۳۶: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm) برای نمونه‌ی S221. این نمونه ۲۲ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 700°C قرار گرفته است.

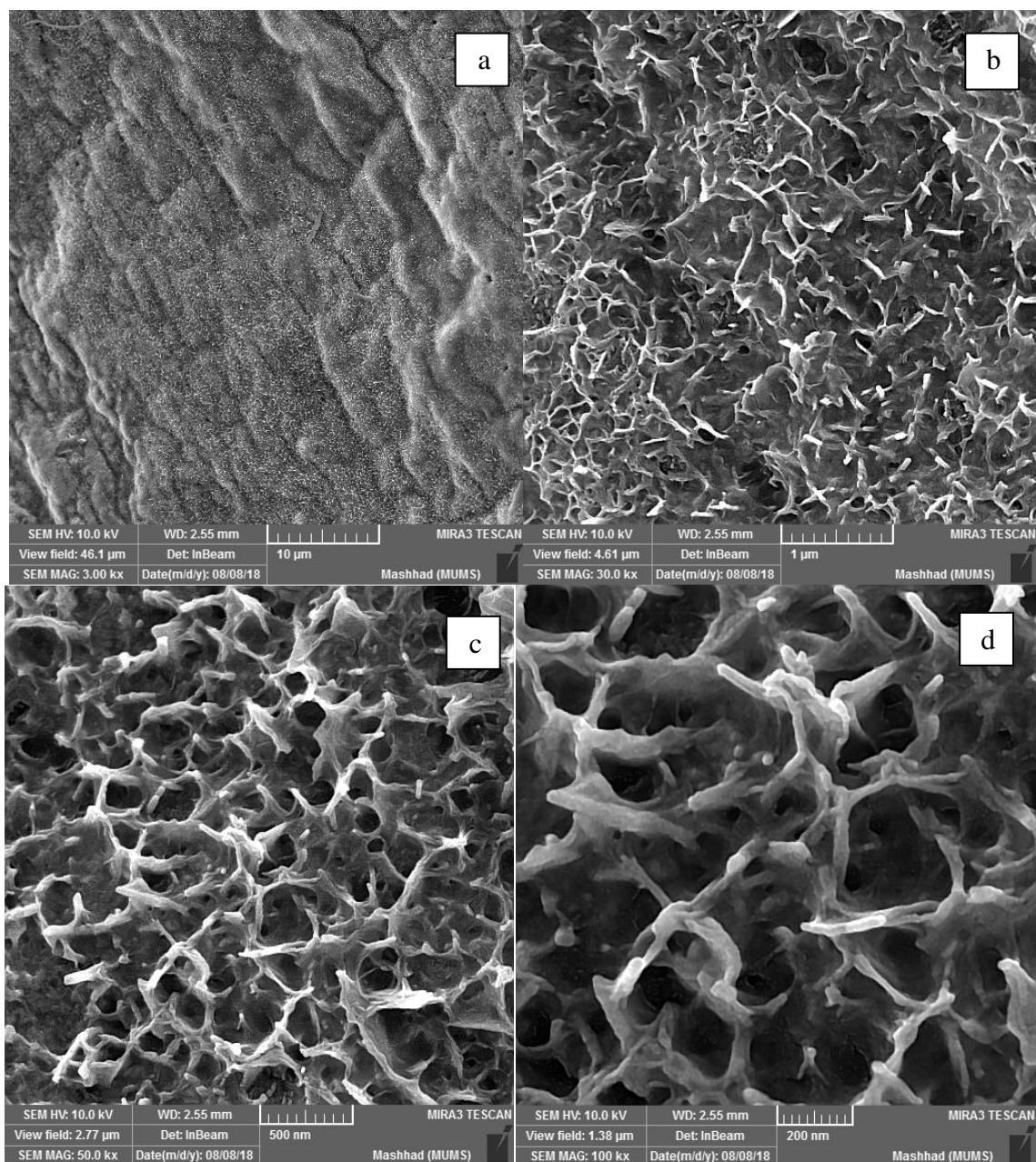


شکل ۴-۳۷: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S222. این نمونه ۲۲ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 700°C قرار گرفته است.

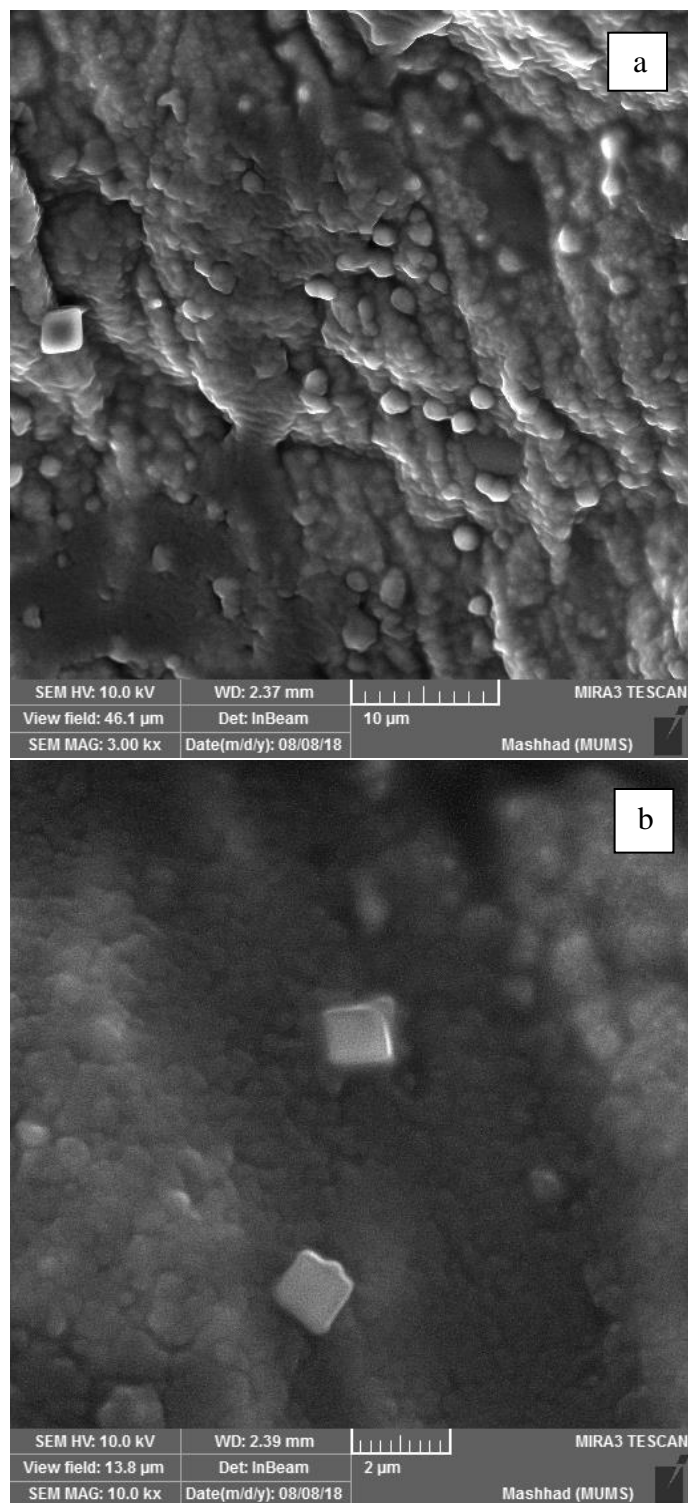


شکل ۴-۳۸: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S223. این نمونه تابش‌دهی نشده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 700°C قرار گرفته است.

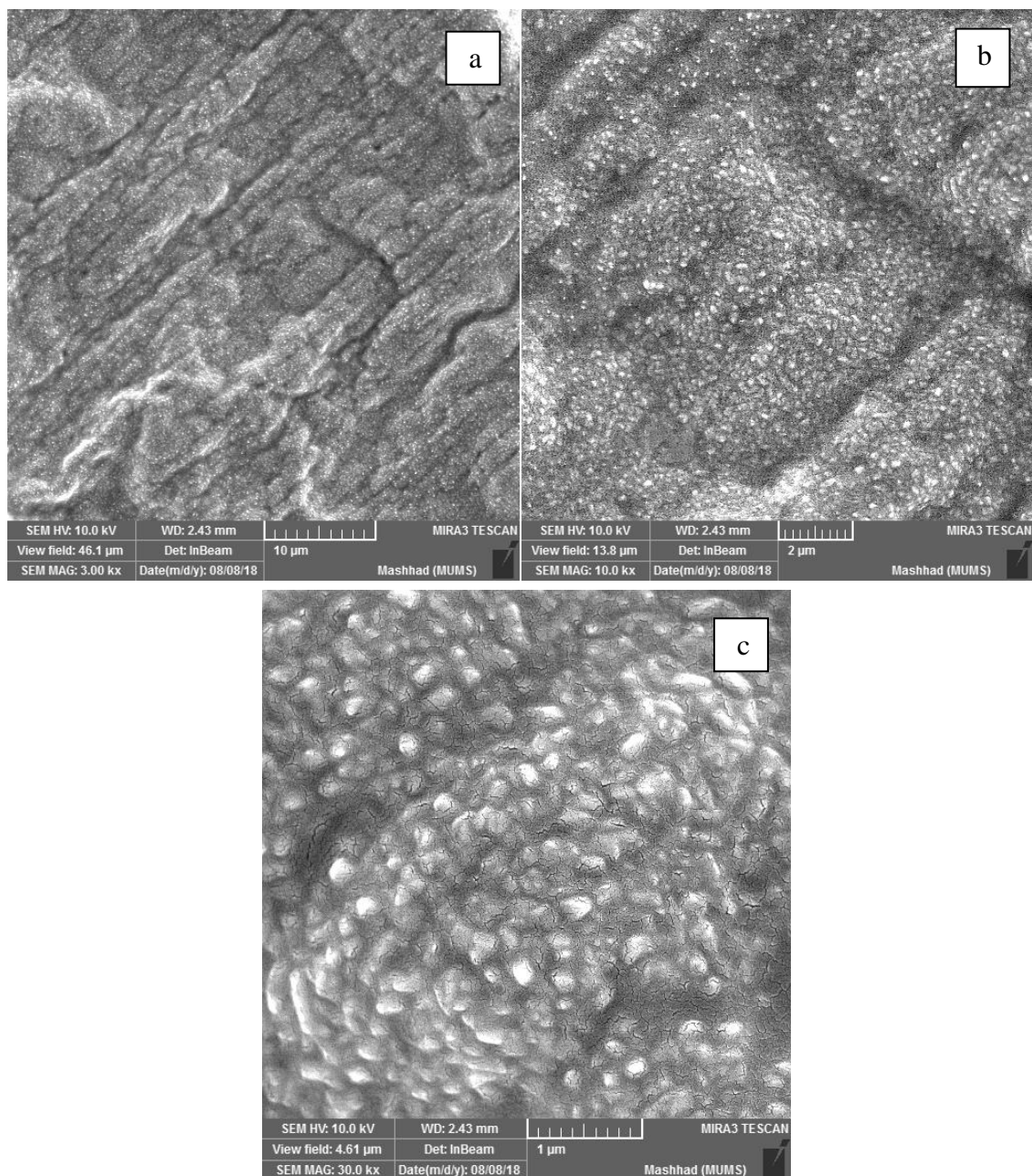




شکل ۴-۳۹: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(1μm), c(500nm), d(200nm)) برای نمونه‌ی S235. این نمونه ۸۹ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ تابش‌دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 500°C قرار گرفته است.



شکل ۴-۴: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت ((a(10μm), b(1μm)) برای نمونه‌ی S236. این نمونه ۸۹ ساعت در دمای محیط با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش‌دهی شده و سپس ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 500°C قرار گرفته است. به دلیل چروک شدگی و تغییر شدید مورفولوژی سطح، میکروسکوپ قابلیت تهیه‌ی تصاویر با مقیاس کوچک‌تر را نداشت.



شکل ۴-۱: تصاویر FESEM در نماهای متفاوت (a(10μm), b(2μm), c(1μm)) برای نمونه‌ی S237. این نمونه تحت تابش نبوده و فقط ۱ ساعت داخل تیوب کوره‌ی تیوبی با جو اکسیژن و دمای 500°C قرار گرفته است. به دلیل چروک شدگی و تغییر شدید مورفولوژی سطح، میکروسکوپ قابلیت تهیه‌ی تصاویر با مقیاس کوچک‌تر را نداشت.

با توجه به تصاویر FESEM نمونه‌ها، تابش دهی به این نحو و با این چشمه‌ها مورفولوژی سطح را تغییر داده است. نمونه‌هایی که با چشمه‌ی سزیم ۱۳۷ تابش دهی شده‌اند رشد یکنواخت‌تری داشته‌اند و تابش دهی با چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ باعث کاهش رشد نانوساختارهای ZnO شده است که بدلیل

انرژی بیش‌تری است که چشمه‌ی امرسیوم ۲۴۱ بر روی سطح نمونه بر جای می‌گذارد. همچنین از تصاویر FESEM استنباط می‌گردد که رشد نانوساختارهای ZnO از دمای ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به بالا چشمگیر است.

#### ۴-۳-۵ آنالیز EDAX

همانطور که در فصل ۲ بیان شد آنالیز EDAX یک تحلیل عنصری از نمونه را تهیه می‌کند و از آن می‌توانیم برای آنالیز سطح استفاده کنیم. با مقایسه‌ی این نتایج می‌توانیم بررسی کنیم که در کدام حالت نانوساختارهای بهتر و بیش‌تری رشد کرده‌اند. در جدول ۴-۷ نتایج این آنالیز آورده شده است و تحلیل‌های عنصری کامل گرفته شده از نمونه‌ها در پیوست ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۴-۷: تحلیل عنصری EDAX نمونه‌ها.

کد نمونه	چشمه	درصد اتمی Zn	درصد اتمی O	دمای رشد (°c)	زمان رشد (h)	زمان تابش (h)
S110	N.I.	99.998	0	0	0	0
S105	Cs	78.658	21.34	30	3	4
S115	N.I.	82.968	17.03	30	3	0
S120	Cs	98.098	1.9	30	4	11
S140	N.I.	95.198	4.8	30	4	0
S125	Am	91.718	8.28	30	3	4
S135	N.I.	95.588	4.41	30	3	0
S155	N.I.	93.948	6.05	70	15	0
S130	Cs	91.238	8.76	100	4	11
S145	N.I.	96.458	3.54	100	4	0
S211	Am	72.028	27.97	300	1	16
S210	Cs	73.278	26.72	300	1	16

0	1	300	27.82	72.178	N.I.	S209
89	1	500	56.92	43.078	Am	S235
89	1	500	63.96	36.038	Cs	S236
0	1	500	64.05	35.948	N.I.	S237
22	1	700	47.05	52.948	Am	S221
22	1	700	42.16	57.838	Cs	S222
0	1	700	42.19	57.808	N.I.	S223

نشانه‌ی رشد نانوساختارهای ZnO، نسبت درصد اتمی Zn و O یک به یک (۱:۱) است. با توجه

به جدول ۴-۷ هر مقدار که دما بالاتر می‌رود میزان رشد بهتری داریم و همچنین تا دمای زیر  $300^{\circ}\text{C}$  رشد چشمگیری نداشتیم.

#### ۴-۴ جمع‌بندی

۱- با توجه به شرایط انجام آزمایش؛ رشد نانوساختارهای اکسید روی در دمای ۳۰ الی ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد طی مدت زمان ۳ الی ۱۵ ساعت چشمگیر نیست و به زمان‌های طولانی‌تری نیاز داریم.

۲- با توجه به آنالیز XRD، طیف رامان، تصاویر FESEM و آنالیز EDAX نمونه‌ها؛ رشد نانوساختارهای ZnO با شرایط استفاده شده در آزمایشات انجام گرفته از حدود دمای ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به بالا عمده بوده است. تابش‌دهی با چشمه‌ی رادیواکتیو  $^{137}\text{Cs}$ ، باعث بهبود رشد و افزایش میانگین اندازه‌ی بلورک‌های نانوساختارهای اکسید روی شده است. همچنین تابش‌دهی با چشمه‌ی  $^{241}\text{Am}$  تأثیر مخرب در رشد نانوساختارهای ZnO گذاشته است. این امر به این دلیل است که تابش‌دهی با این چشمه (چشمه‌ی آلفا) دُز بیش‌تری به سطح منتقل می‌کند.



سوستا

## ۱-۵ پیوست ۱: نتیجه‌ی آنالیز XRF

بسمه تعالی

تاریخ: ۹۷/۰۴/۲۷  
شماره: م ت/۹۲۹/XRF

وزارت علوم و تحقیقات و فناوری  
آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان  
آزمایشگاه تحقیقاتی حالت جامد  
تلفن: ۰۲۳۳۵۲۲۰۳۸۴  
پست الکترونیک: [xrd@du.ac.ir](mailto:xrd@du.ac.ir)  
دانشگاه دامغان

متقاضی، شرکت/معدن: محمد کاظم صادقی

آنالیز درخواستی: تعیین درصد وزنی اکسید عناصر در ترکیب نمونه توسط دستگاه XRF

مدل دستگاه: BRUKER axs-S4 EXPLORER

اکسید عناصر	درصد وزنی نمونه: S110
S	0.113
Zn	99.887
L.O.I (950C°, 1 hrs)+ رطوبت	----

مدیر مسئول آزمایشگاه  
مهر و امضاء

شکل ۱-۵: تحلیل XRF نمونه خام پولیش خورده. گرفته شده توسط دستگاه آزمایشگاه مرکزی دانشگاه دامغان



## ۲-۵ پیوست ۲: نتایج آنالیز EDAX

پارامترهایی که در تمام نمونه‌ها ثابت هستند را ابتدا آورده‌ایم، سپس برای هر نمونه پارامترهای مختص خود در ذیل خود بیان شده است.

### IDFix report

Company:	BuAli Institute
User Name:	BuAli Institute
USER_TITLE_TITLE	USER_TITLE
FILE_NAME_TITLE	FILE_NAME
Last Saved:	8/9/2018 11:58 AM
COMMENTS_TITLE	COMMENTS

### Analysis Conditions

Accelerating Voltage (kV):	20.0
Beam Current (nA):	1.000
Magnification:	50000
Live Time (s):	60
Preset Time (s)	60
Nb Channels	2048
Ev / Channel	20
Offset (keV)	0
Width (keV)	41

### Sample

Coating Thickness (nm):	0.00
Density:	0.00

### Geometry

<b>Tilt Angle (deg):</b>	<i>0.0</i>
<b>Azimuth Angle (deg):</b>	<i>0.0</i>
<b>Take Off Angle (deg):</b>	<i>35.0</i>

## Window

<b>Window Type:</b>	<i>Moxtek API.3</i>
<b>Window Thickness (um):</b>	<i>0.30</i>
<b>Contamination Layer (nm):</b>	<i>0.00</i>

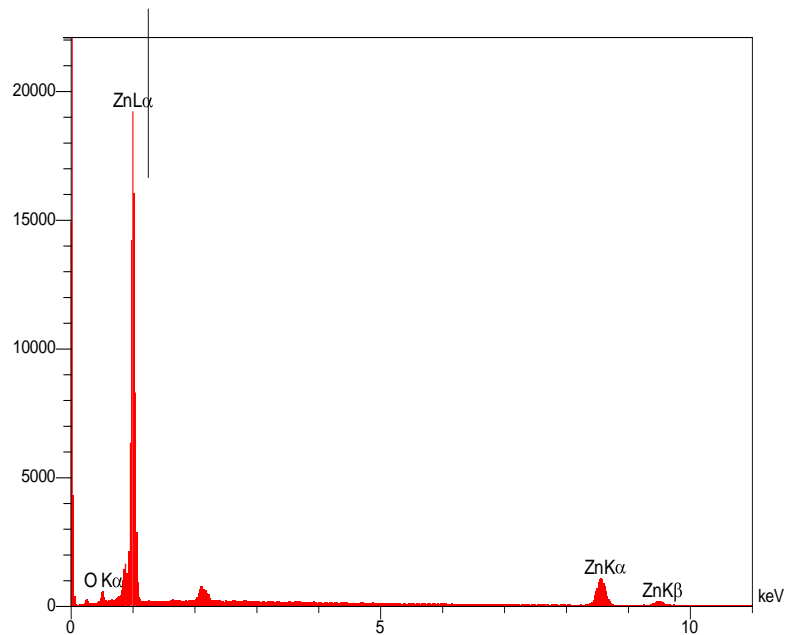
## Detector

<b>Dead Layer (um)</b>	<i>0.10</i>
<b>Gold Layer (um)</b>	<i>20.00</i>
<b>Active Area (mm2)</b>	<i>10.00</i>
<b>Crystal:</b>	<i>Si</i>
<b>Crystal Thickness</b>	<i>3.00</i>
<b>Coating Type</b>	<i>Al</i>
<b>Coating Thickness (nm)</b>	<i>15.00</i>

## XmEdsPrnFoilTitle

<b>TEM_THICK_SAMPLE_TITLE</b>	<i>TEM_THICK_SAMPLE</i>
<b>TEM_REFERENCE_ELEMENT_TITLE</b>	<i>TEM_REFERENCE_ELEMENT</i>
<b>TEM_THICKNESS_TITLE</b>	<i>TEM_THICKNESS</i>
<b>TEM_DENSITY_TITLE</b>	<i>TEM_DENSITY</i>

## S105 ۱-۲-۵ نمونه ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	11.84

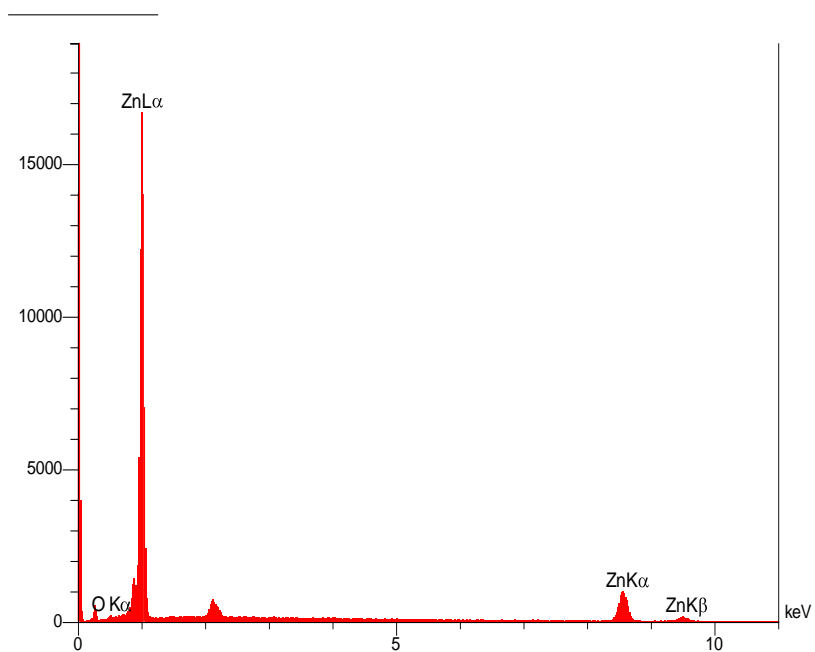
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
O	Ka	29.1	59.0630	0.0924	0.0764	20.34	51.06	0.3755	52.50	A	19.37	21.32
Zn	Ka	162.1	1.3221	0.9076	0.7499	79.66	48.94	0.9414	29.11	A	78.04	81.27
				1.0000	0.8263	100.00	100.00					

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	20.0	0.290	100
Ca	Ka1	3.5	3.670	100
O	Ka1	18.3	0.520	100
Ne	Ka1	13.2	0.840	100
Zn	Ka1	146.6	8.580	100
Si	Ka1	3.6	1.730	100
Nb	La1	40.0	2.150	100

۵-۲-۲ نمونه‌ی S110



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	8.78

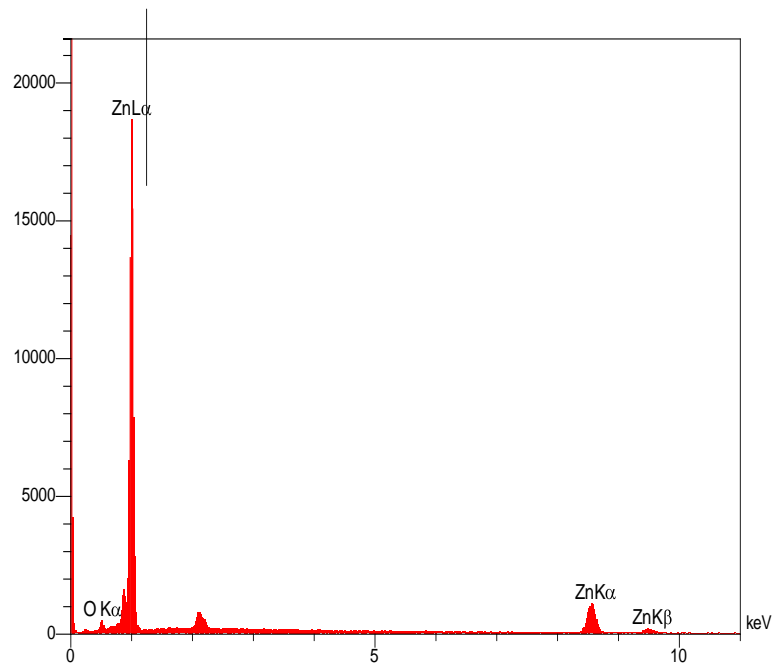
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	9.6	47.6138	0.0360	0.0329	9.38	29.72	0.3512	11.02	A	8.60	10.16
<b>Zn</b>	Ka	145.8	1.3640	0.9640	0.8810	90.62	70.28	0.9722	31.23	A	88.69	92.56
				1.0000	0.9140	100.0	100.0					

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	30.8	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	4.4	0.530	100
<b>Ga</b>	La1	6.9	1.100	100
<b>Na</b>	Ka1	198.0	1.050	100
<b>Al</b>	Ka1	3.8	1.490	100
<b>Si</b>	Ka1	3.6	1.740	100
<b>Nb</b>	La1	35.1	2.160	100
<b>Tc</b>	La1	2.5	2.410	100
<b>Zn</b>	Ka1	124.8	8.580	9
<b>Re</b>	La1	1.9	8.580	9
<b>Ir</b>	La1	1.3	9.090	9

## ۵-۲-۳ نمونه‌ی S115



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	10.90

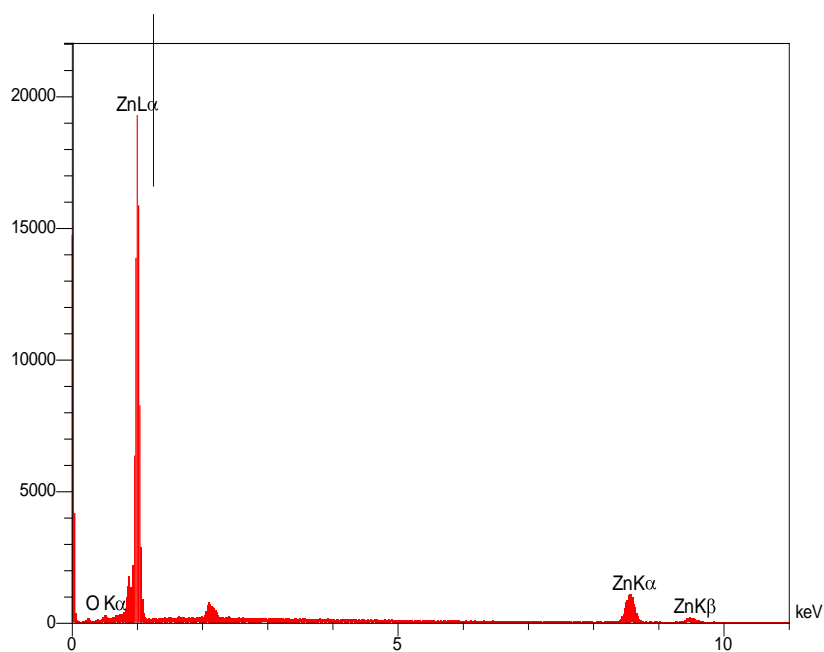
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
O	Ka	23.8	56.5658	0.0772	0.0653	17.69	46.75	0.3692	43.92	A	16.75	18.62
Zn	Ka	161.1	1.2148	0.9228	0.7809	82.31	53.25	0.9487	30.74	A	80.64	83.99
				1.0000	0.8462	100.0	100.0					

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	16.9	0.290	100
O	Ka1	3.7	0.530	100
Na	Ka1	317.4	1.050	100
Zn	Ka1	142.5	8.580	100
Nb	La1	38.9	2.160	100
Re	La1	2.8	8.570	100
Tc	La1	2.4	2.410	100

۵-۲-۴ نمونه‌ی S120



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	10.93

## Quantitative Results

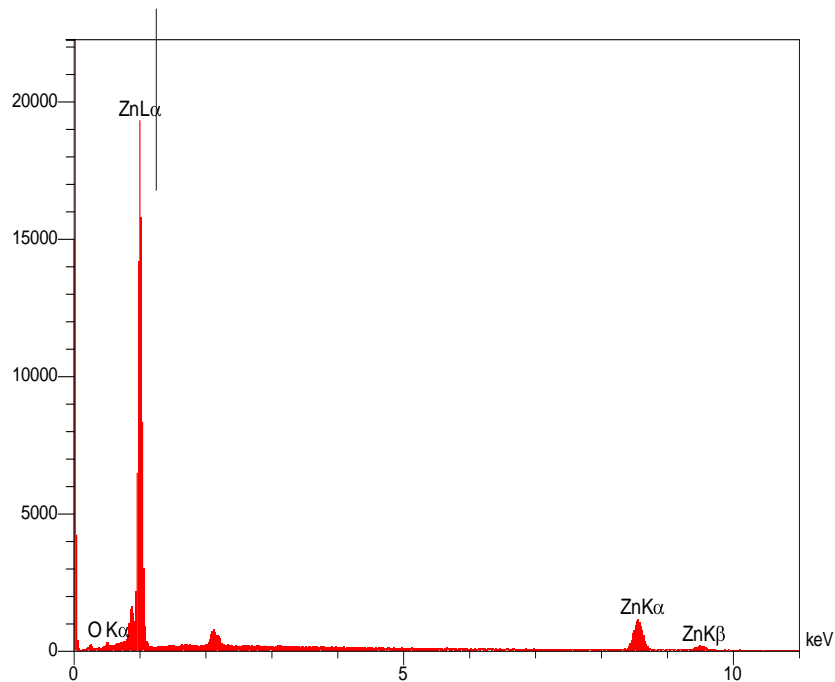
Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	11.8	68.9136	0.0395	0.0359	10.17	31.62	0.3528	12.68	A	9.40	10.93
<b>Zn</b>	Ka	162.6	1.0278	0.9605	0.8713	89.83	68.38	0.9699	29.30	A	88.01	91.65
				1.0000	0.9072	100.0	100.0					

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	16.9	0.280	100
<b>O</b>	Ka1	11.3	0.520	100
<b>V</b>	Ka1	1.8	4.920	100
<b>Ne</b>	Ka1	5.5	0.850	100
<b>Zn</b>	Ka1	145.9	8.580	100
<b>Na</b>	Ka1	322.5	1.040	100
<b>Hf</b>	La1	1.3	7.820	100
<b>Nb</b>	La1	36.5	2.150	100
<b>Tc</b>	La1	3.9	2.420	100
<b>Sb</b>	La1	2.4	3.580	100
<b>Mn</b>	Ka1	2.0	5.860	100
<b>Re</b>	La1	2.6	8.570	100



## ۵-۲-۵ نمونه ی S125



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	13.07

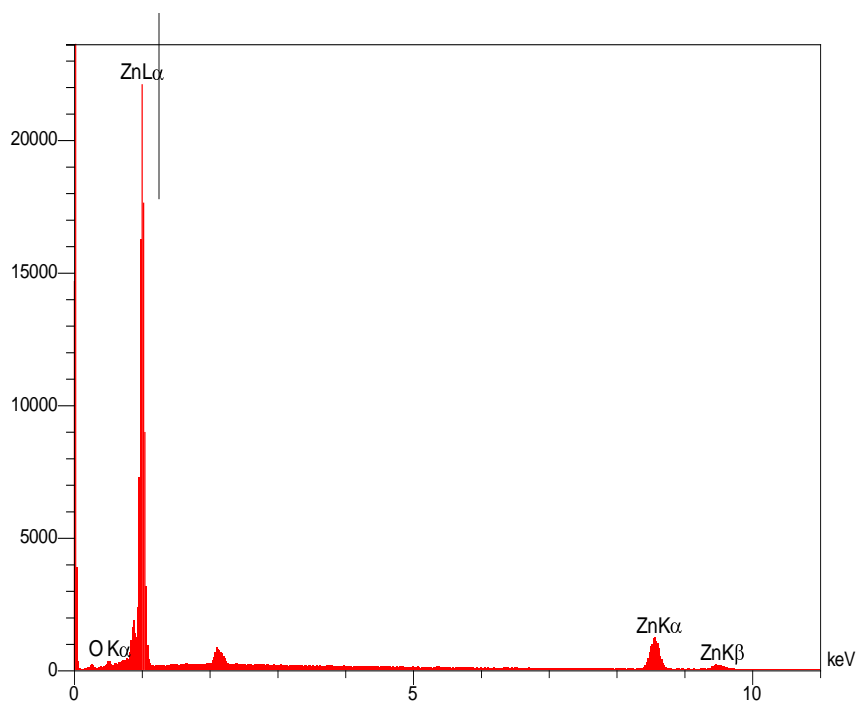
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
O	Ka	16.7	69.0517	0.0530	0.0468	13.04	38.00	0.3588	15.02	A	12.22	13.87
Zn	Ka	168.7	1.7714	0.9470	0.8363	86.96	62.00	0.9617	32.17	A	85.23	88.69
				1.0000	0.8831	100.0	100.0					

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	19.8	0.290	100
O	Ka1	6.4	0.530	100
Zn	Ka1	148.5	8.580	100
Na	Ka1	330.1	1.040	100
Al	Ka1	2.5	1.480	100
Nb	La1	41.1	2.160	100
Cl	Ka1	2.0	2.610	100
Cd	La1	2.8	3.120	100
Cs	La1	2.2	4.260	100

## ۵-۲-۶ نمونه ی S130



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	12.22

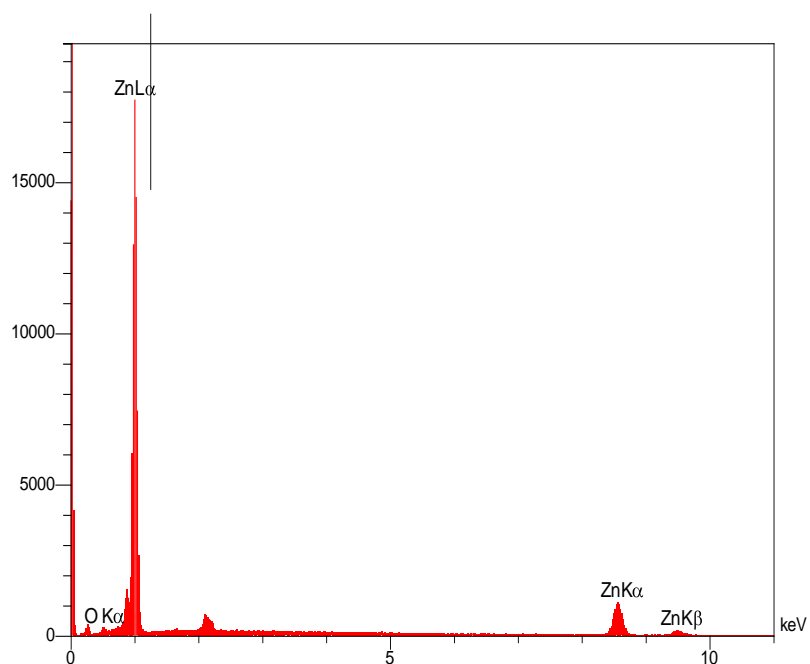
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	18.4	67.2024	0.0541	0.0477	13.27	38.48	0.3593	30.04	A	12.48	14.07
<b>Zn</b>	Ka	182.5	1.3570	0.9459	0.8335	86.73	61.52	0.9610	31.22	A	85.07	88.38
				1.0000	0.8812	100.0	100.0					

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	20.8	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	9.3	0.520	100
<b>F</b>	Ka1	5.1	0.680	100
<b>Zn</b>	Ka1	164.5	8.570	100
<b>Na</b>	Ka1	308.1	1.040	100
<b>Nb</b>	La1	45.8	2.150	100
<b>Tc</b>	La1	3.2	2.420	100
<b>Pd</b>	La1	2.4	2.820	100
<b>Eu</b>	La1	2.5	5.800	100

## S135 ۷-۲-۵ نمونه‌ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	8.03

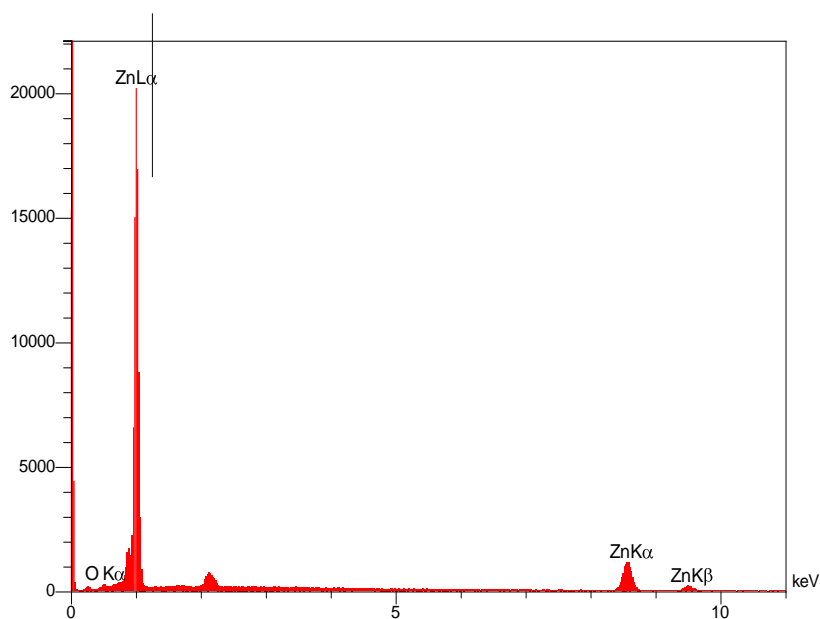
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
O	Ka	13.2	49.7398	0.0445	0.0400	11.25	34.13	0.3550	14.30	A	10.45	12.05
Zn	Ka	161.1	1.4317	0.9555	0.8580	88.75	65.87	0.9668	32.38	A	86.94	90.55
				1.0000	0.8980	100.0	100.0					

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	25.1	0.290	100
O	Ka1	7.7	0.520	100
Zn	Ka1	144.5	8.580	100
Na	Ka1	242.7	1.040	100
Al	Ka1	1.8	1.490	100
Si	Ka1	2.2	1.740	100
Hf	La1	1.7	7.820	100
Nb	La1	33.0	2.160	100
Tc	La1	2.9	2.410	100
Dy	La1	1.6	6.440	100

## ۵-۲-۸ نمونه‌ی S140



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	11.77

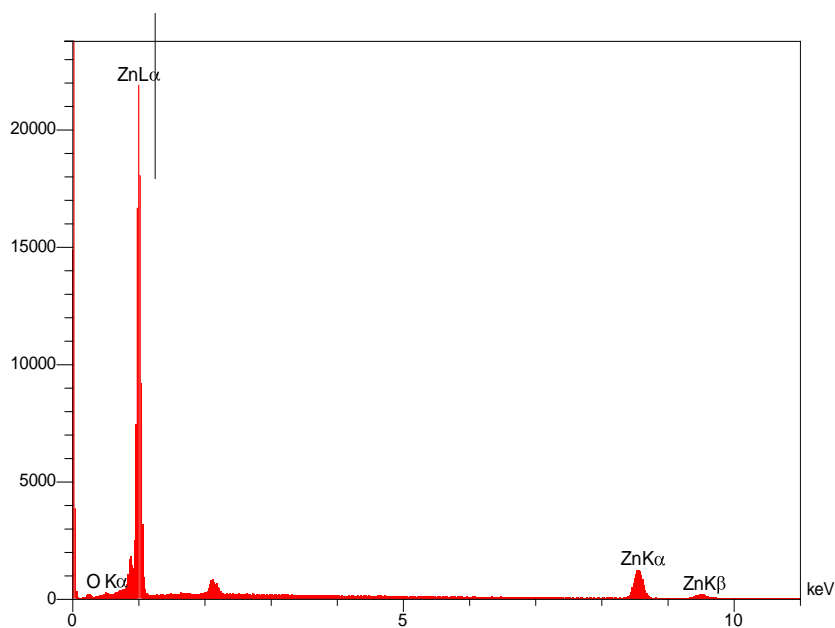
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	Class	LConf	HConf
O	Ka	14.3	66.8762	0.0453	0.0406	11.43	34.52	0.3554	13.60	A	10.65	12.21
Zn	Ka	170.3	1.1729	0.9547	0.8559	88.57	65.48	0.9663	31.05	A	86.82	90.33
				1.0000	0.8965	100.0	100.0					

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	19.5	0.290	100
O	Ka1	7.8	0.520	100
Ne	Ka1	16.9	0.850	100
Zn	Ka1	152.9	8.580	100
Na	Ka1	240.8	1.040	100
Al	Ka1	2.2	1.480	100
Nb	La1	46.9	2.160	100
Pd	La1	2.1	2.830	100
Cm	Ma1	2.6	3.490	100
Cr	Ka1	1.7	1.022	0

۹-۲-۵ نمونه ی S145



## Analysis

<b>Correction Method:</b>	PAP
<b>Analysis Type:</b>	StdLess
<b>Number of oxygens:</b>	0
<b><math>\chi^2</math></b>	12.44

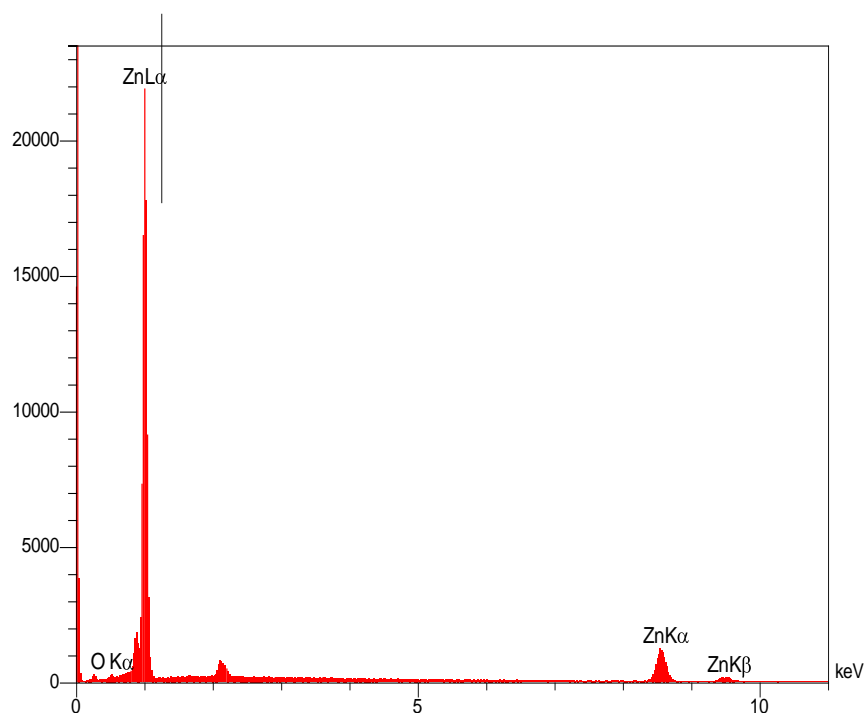
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	14.6	68.8880	0.0427	0.0385	10.87	33.26	0.3542	24.26	10.13	11.61
<b>Zn</b>	Ka	184.7	0.9869	0.9573	0.8627	89.13	66.74	0.9679	31.00	87.44	90.82
				1.0000	0.9012	100.00	100.00				

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	19.1	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	2.3	0.530	100
<b>F</b>	Ka1	11.4	0.680	100
<b>Ne</b>	Ka1	17.3	0.850	100
<b>Na</b>	Ka1	143.0	1.040	100
<b>Al</b>	Ka1	2.4	1.480	100
<b>Si</b>	Ka1	5.2	1.740	100
<b>Nb</b>	La1	43.8	2.170	100
<b>Tc</b>	La1	3.0	2.420	100
<b>Zn</b>	Ka1	158.8	8.570	4
<b>Re</b>	La1	3.0	8.560	4

## S155 ۱۰-۲-۵ نمونه ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	11.87

### Quantitative Results

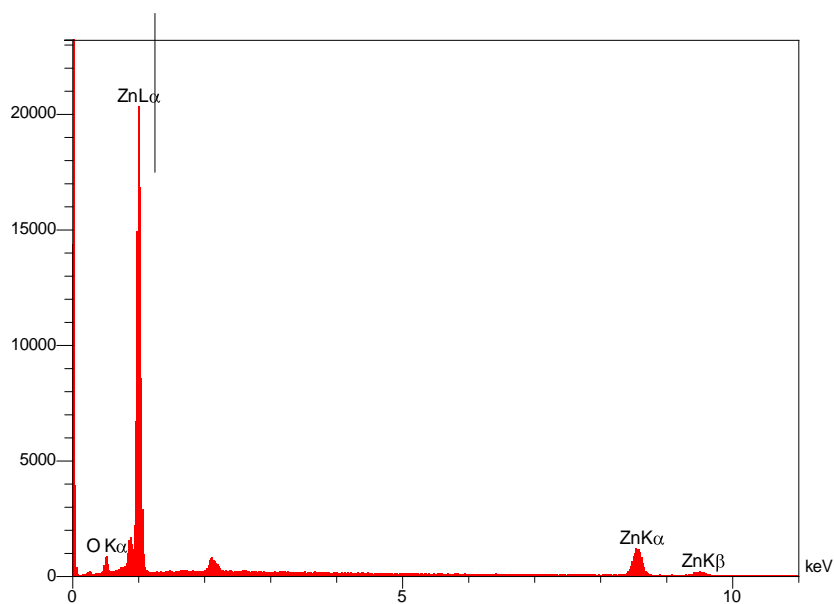
Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
O	Ka	16.3	65.3816	0.0480	0.0428	12.00	35.77	0.3566	27.96	11.23	12.76
Zn	Ka	183.4	1.2993	0.9520	0.8490	88.00	64.23	0.9647	31.83	86.33	89.68
				1.0000	0.8917	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results



Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	21.3	0.290	100
O	Ka1	6.1	0.520	100
Ne	Ka1	15.3	0.850	100
Al	Ka1	2.2	1.490	100
Si	Ka1	4.4	1.740	100
Nb	La1	44.1	2.160	100
Tc	La1	4.5	2.410	100
Pd	La1	3.5	2.830	100
Zn	Ka1	162.1	8.570	18
Cu	Ka1	1.6	7.970	18
Pt	La1	1.4	9.360	18
Cr	Ka1	2.1	1.021	0

## ۵-۲-۱۱ نمونه‌ی S209



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	7.76

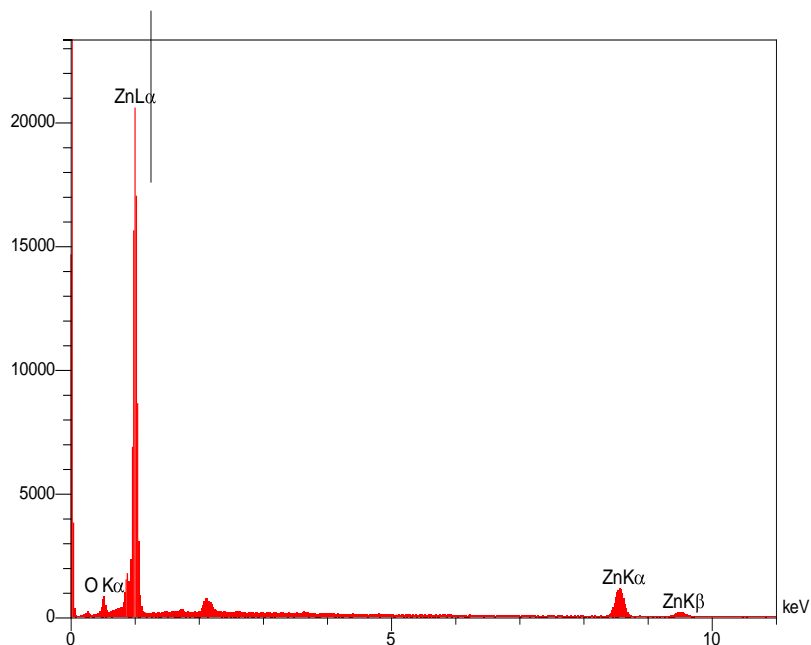
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	43.0	48.2640	0.1214	0.0964	24.91	57.54	0.3871	85.96	23.93	25.89
<b>Zn</b>	Ka	176.4	1.3407	0.8786	0.6977	75.09	42.46	0.9291	31.20	73.63	76.55
				1.0000	0.7941	100.00	100.00				

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	17.0	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	42.6	0.530	100
<b>Ne</b>	Ka1	2.1	0.850	100
<b>Zn</b>	Ka1	155.5	8.570	100
<b>Na</b>	Ka1	176.5	1.040	100
<b>Al</b>	Ka1	2.7	1.480	100
<b>Nb</b>	La1	41.8	2.160	100
<b>Pt</b>	La1	1.1	9.340	100
<b>Cl</b>	Ka1	5.1	2.620	100
<b>Mn</b>	Ka1	2.6	5.860	100
<b>Re</b>	La1	2.5	8.570	100
<b>Bi</b>	Ma1	3.6	2.410	100

## S210 ۱۲-۲-۵ نمونه‌ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	9.21

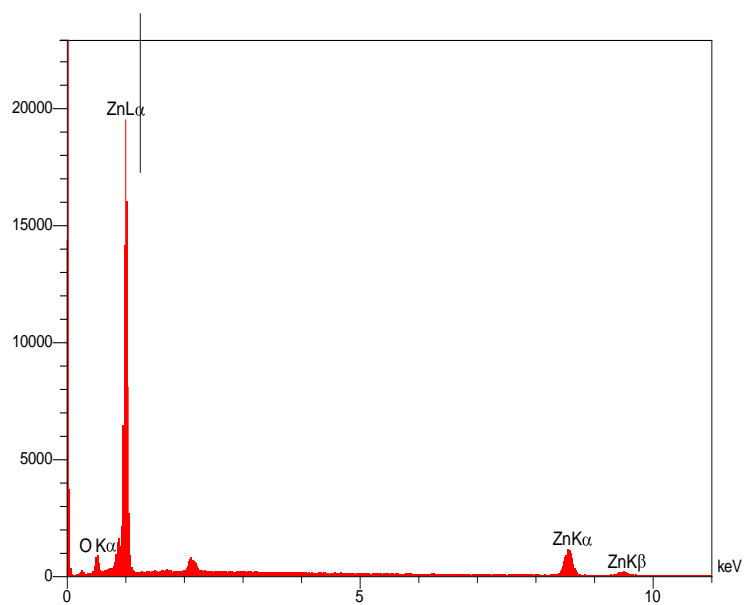
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
O	Ka	39.3	59.7893	0.1159	0.0927	24.08	56.44	0.3849	79.83	23.09	25.07
Zn	Ka	170.1	1.1463	0.8841	0.7071	75.92	43.56	0.9313	30.26	74.42	77.43
				1.0000	0.7998	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	18.5	0.290	100
Ca	Ka1	5.6	3.680	100
O	Ka1	31.0	0.530	100
Ne	Ka1	17.1	0.850	100
Zn	Ka1	152.4	8.570	100
Na	Ka1	179.4	1.040	100
Si	Ka1	9.4	1.730	100
Nb	La1	42.8	2.160	100
Pd	La1	2.2	2.830	100
Dy	La1	2.0	6.440	100

۵-۲-۱۳ نمونه‌ی S211



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	9.47

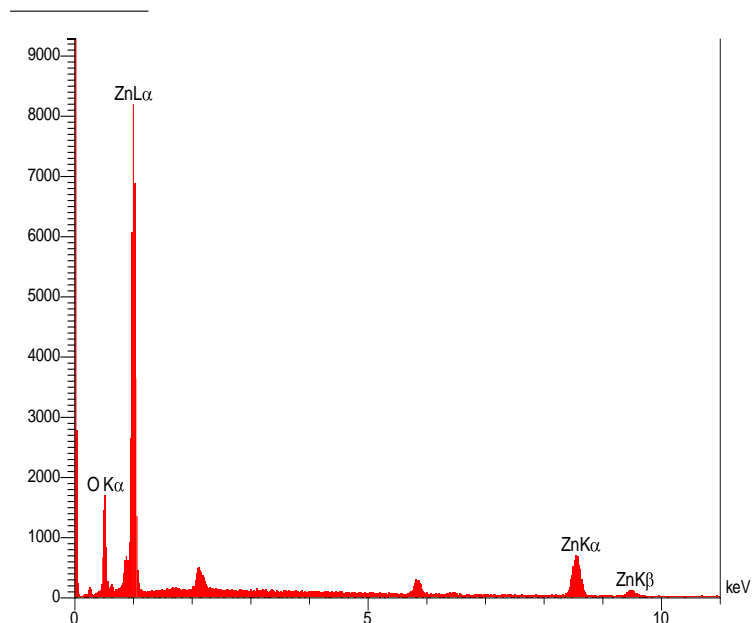
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	41.8	55.3429	0.1222	0.0969	25.02	57.69	0.3874	89.93	24.02	26.02
<b>Zn</b>	Ka	169.9	1.6138	0.8778	0.6964	74.98	42.31	0.9288	30.68	73.49	76.46
				1.0000	0.7933	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	18.6	0.280	100
<b>O</b>	Ka1	29.5	0.520	100
<b>Zn</b>	Ka1	152.5	8.570	100
<b>La</b>	La1	2.0	4.610	100
<b>Na</b>	Ka1	294.4	1.050	100
<b>Al</b>	Ka1	2.5	1.490	100
<b>Rb</b>	La1	2.7	1.690	100
<b>Si</b>	Ka1	3.1	1.730	100
<b>Nb</b>	La1	37.7	2.160	100
<b>Ba</b>	La1	2.1	4.430	100
<b>Mn</b>	Ka1	1.9	5.860	100

## S221 ۱۴-۲-۵ نمونه‌ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	7.02

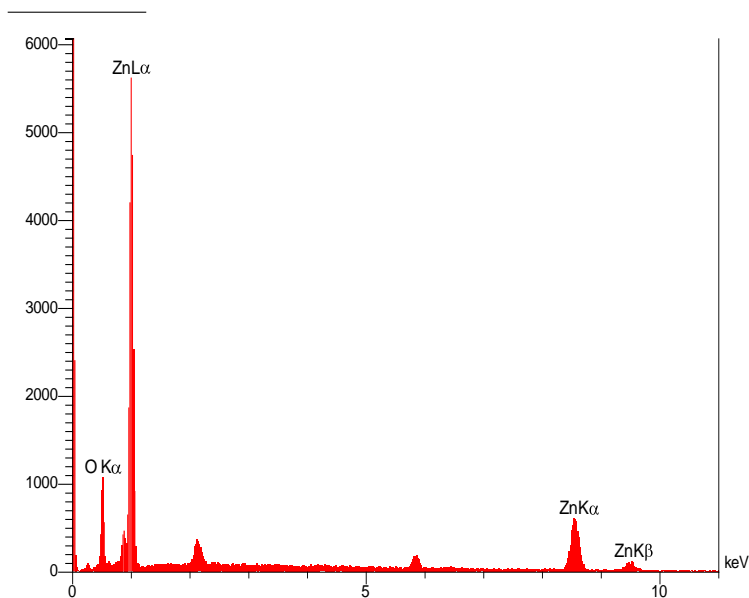
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
O	Ka	69.8	39.7831	0.2939	0.2022	44.72	76.77	0.4522	167.42	43.33	46.10
Zn	Ka	94.9	0.5407	0.7061	0.4858	55.28	23.23	0.8786	14.41	53.82	56.75
				1.0000	0.6880	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	13.4	0.290	100
O	Ka1	72.4	0.530	100
Na	Ka1	77.6	1.040	100
Nb	La1	28.4	2.160	100
Cd	La1	1.6	3.110	100
Er	La1	1.2	6.880	13
Mn	Ka1	25.0	5.870	13
Zn	Ka1	91.6	8.570	13
Eu	La1	2.1	5.800	13
Pt	La1	0.9	9.340	13
Re	La1	1.5	8.560	13

۵-۲-۱۵ نمونه‌ی S222



## Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	4.90

## Quantitative Results

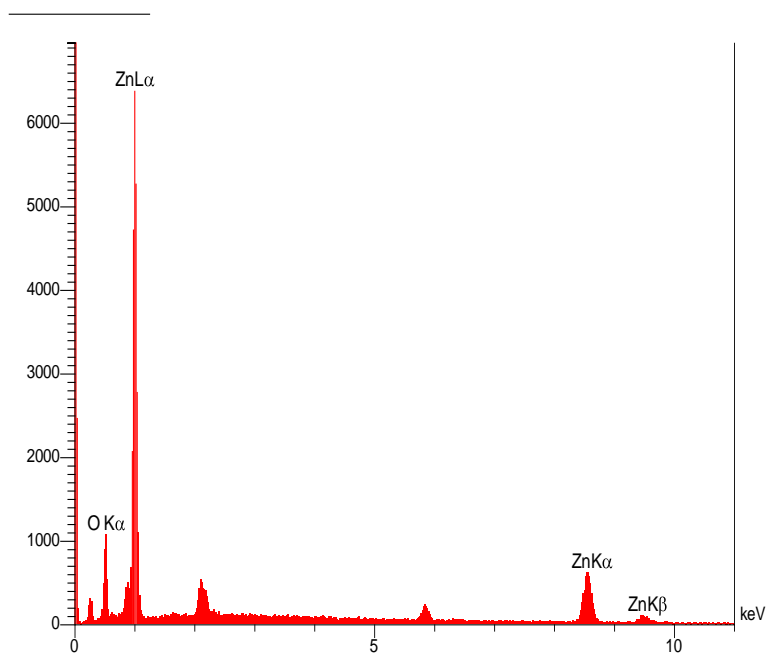
Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	46.0	23.6854	0.2307	0.1650	38.48	71.88	0.4286	132.22	37.02	39.95
<b>Zn</b>	Ka	86.8	0.7321	0.7693	0.5500	61.52	28.12	0.8940	17.57	59.81	63.22
				1.0000	0.7149	100.00	100.00				

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	10.3	0.280	100
<b>O</b>	Ka1	39.1	0.520	100
<b>Ne</b>	Ka1	1.2	0.850	100
<b>Zn</b>	Ka1	81.0	8.570	100
<b>Na</b>	Ka1	75.5	1.040	100
<b>Nb</b>	La1	22.2	2.150	100
<b>Tc</b>	La1	2.0	2.420	100
<b>Mn</b>	Ka1	16.4	5.860	100
<b>Lu</b>	La1	1.2	7.580	100
<b>Re</b>	La1	1.2	8.570	100
<b>Pt</b>	La1	1.1	9.340	100



## S223 ۱۶-۲-۵ نمونه ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	5.45

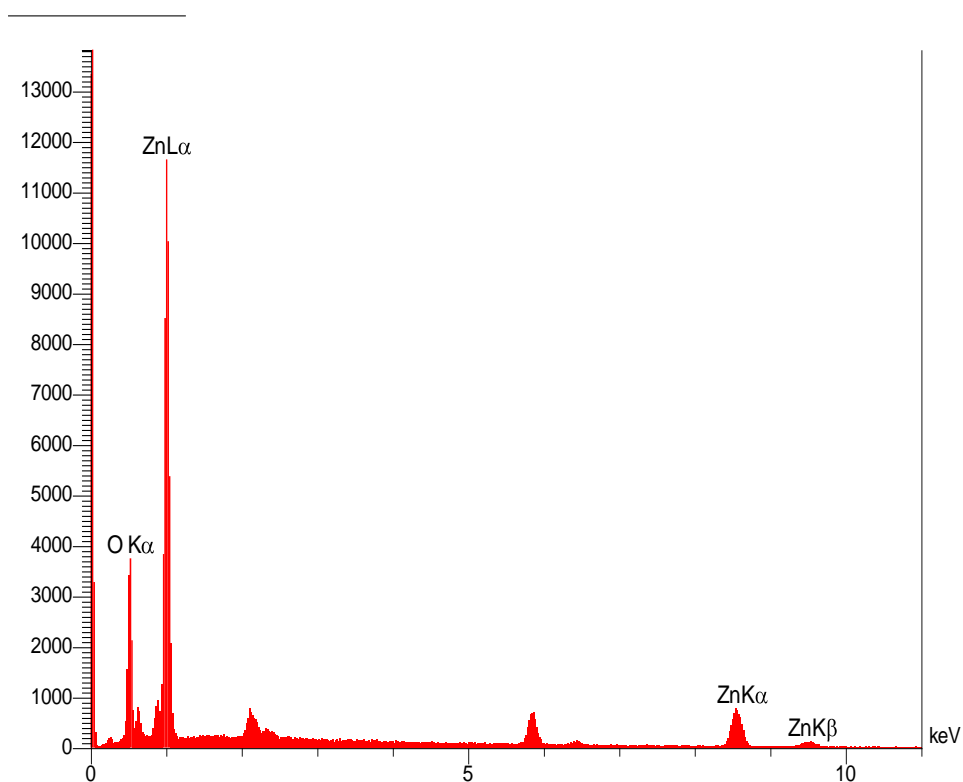
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
O	Ka	45.7	25.4224	0.2311	0.1651	38.52	71.91	0.4287	110.07	37.05	39.99
Zn	Ka	86.2	1.0382	0.7689	0.5496	61.48	28.09	0.8939	15.00	59.77	63.19
				1.0000	0.7148	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	20.4	0.290	100
O	Ka1	43.0	0.530	100
Zn	Ka1	81.7	8.560	100
Na	Ka1	93.7	1.040	100
Rb	La1	2.8	1.690	100
Nb	La1	30.2	2.160	100
Mn	Ka1	18.6	5.860	100
Re	La1	1.1	8.560	100

S235 ۱۷-۲-۵ نمونه‌ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	20.18

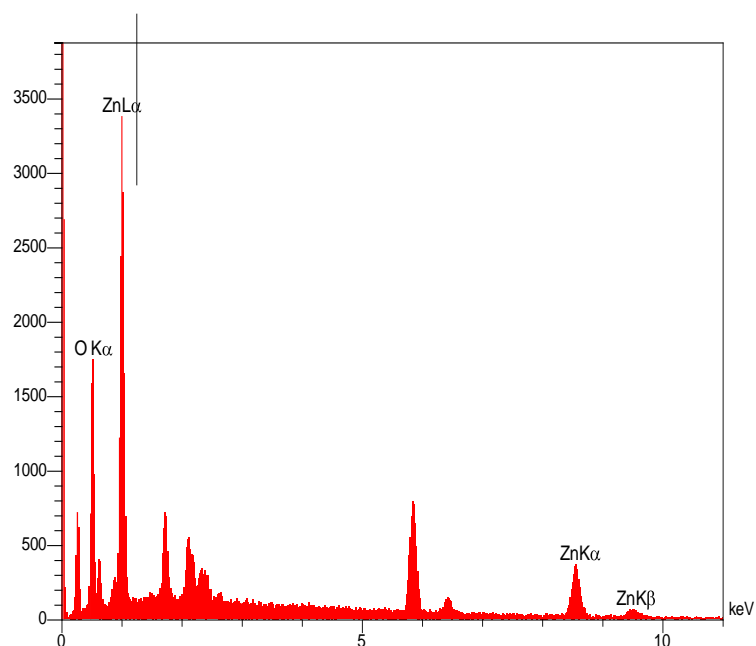
## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	163.6	137.7439	0.5034	0.3290	61.34	86.64	0.5363	268.16	60.10	62.58
<b>Zn</b>	Ka	91.4	1.0669	0.4966	0.3245	38.66	13.36	0.8395	7.99	37.62	39.70
				1.0000	0.6536	100.00	100.00				

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	17.5	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	176.8	0.530	100
<b>F</b>	Ka1	5.6	0.680	100
<b>Ne</b>	Ka1	6.6	0.850	100
<b>Na</b>	Ka1	172.2	1.050	100
<b>Mn</b>	Ka1	72.0	5.860	3
<b>Si</b>	Ka1	3.9	1.700	3
<b>Nb</b>	La1	44.5	2.130	3
<b>Tc</b>	La1	14.4	2.380	3
<b>Rh</b>	La1	2.4	2.660	3
<b>Zn</b>	Ka1	99.9	8.570	2

## S236 ۱۸-۲-۵ نمونه‌ی



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	17.76

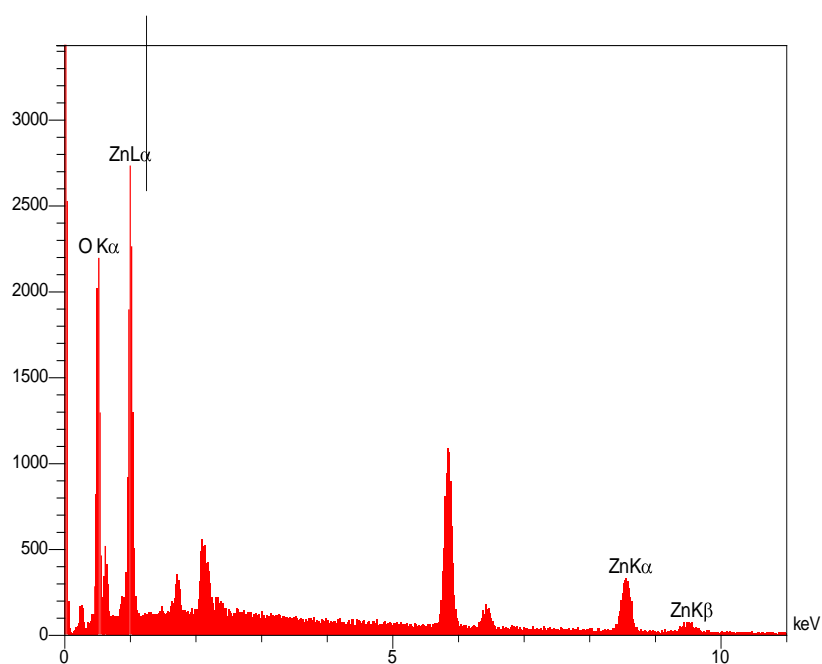
### Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
O	Ka	74.4	64.8986	0.7532	0.5287	78.40	93.68	0.6739	107.66	76.05	80.75
Zn	Ka	13.8	8.9776	0.2468	0.1732	21.60	6.32	0.8016	2.89	20.10	23.10
				1.0000	0.7019	100.00	100.00				

### Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
C	Ka1	45.5	0.290	100
O	Ka1	87.6	0.530	100
F	Ka1	2.9	0.690	100
Mn	Ka1	81.8	5.860	2
Si	Ka1	45.1	1.740	2
Nb	La1	31.8	2.160	2
Tc	La1	8.7	2.420	2
Cl	Ka1	3.1	2.610	2
Pb	Ma1	11.6	2.340	2
Pt	La1	0.9	9.370	1
Zn	Ka1	47.4	8.570	1

۵-۲-۱ نمونه ی S237



### Analysis

Correction Method:	PAP
Analysis Type:	StdLess
Number of oxygens:	0
$\chi^2$	17.43

## Quantitative Results

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg	LConf	HConf
<b>O</b>	Ka	93.0	74.9063	0.7567	0.5323	78.64	93.77	0.6764	138.72	76.53	80.74
<b>Zn</b>	Ka	17.0	4.3977	0.2433	0.1712	21.36	6.23	0.8011	2.60	20.02	22.70
				1.0000	0.7035	100.00	100.00				

## Automatic Identification Results

Elt	Line	Int	keV	Prob%
<b>C</b>	Ka1	15.1	0.290	100
<b>O</b>	Ka1	97.4	0.530	100
<b>Mn</b>	Ka1	115.3	5.860	100
<b>F</b>	Ka1	3.3	0.680	100
<b>Na</b>	Ka1	22.9	1.040	100
<b>Zn</b>	Ka1	44.4	8.570	100
<b>Si</b>	Ka1	15.0	1.740	100
<b>Nb</b>	La1	32.8	2.160	100
<b>Tc</b>	La1	5.1	2.410	100

منابع

- [١] C. Baskerville, *Radium and Radio-active Substances: Their Application Especially to Medicine*. Williams, Brown & Earle, 1905.
- [٢] M. L. F. Nascimento, "Brief history of X-ray tube patents," *World Patent Information*, vol. 37, pp. 48-53, 2014.
- [٣] A. Assmus, "Early history of X rays," *Beam Line*, vol. 25, no. 2, pp. 10-24, 1995.
- [٤] W. Roentgen, "Ueber Eine Neue Art von Strahlen: Erste Mitt," *Sitzungsberichte der Wuerzburger Physik. Medic. Gesellschaft*, vol. 137, 1895.
- [٥] E. B. Frost, "Experiments on the X-rays," *Science*, vol. 3, no. 59, pp. 235-236, 1896.
- [٦] F. Prellwitz, "Zur Geschichte der medizinischen Röntgenröhren," *Archiv der Siemens AG, Bereich Medizinische Technik, Ser*, vol. 27, 1979.
- [٧] H. Geiger and E. Marsden, "On a diffuse reflection of the  $\alpha$ -particles," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 82, no. 557, pp. 495-500, 1909.
- [٨] E. Rutherford, "LXXIX. The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 21, no. 125, pp. 669-688, 1911.
- [٩] N. Bohr, "XXXVII. On the constitution of atoms and molecules," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 26, no. 153, pp. 476-502, 1913.
- [١٠] N. Bohr, "II. On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 25, no. 145, pp. 10-31, 1913.
- [١١] N. Bohr, *The penetration of atomic particles through matter*. I kommission hos E. Munksgaard, 1948.
- [١٢] F. Banhart and P. Ajayan, "Carbon onions as nanoscopic pressure cells for diamond formation," *Nature*, vol. 382, no. 6590, p. 433, 1996.
- [١٣] W. Mickelson, S. Aloni, W.-Q. Han, J. Cumings, and A. Zettl, "Packing C60 in boron nitride nanotubes," *Science*, vol. 300, no. 5618, pp. 467-469, 2003.
- [١٤] L. Sun, F. Banhart, A. Krashennnikov, J. Rodriguez-Manzo, M. Terrones, and P. Ajayan, "Carbon nanotubes as high-pressure cylinders and nanoextruders," *Science*, vol. 312, no. 5777, pp. 1199-1202, 2006.
- [١٥] I. Childres *et al.*, "Effect of electron-beam irradiation on graphene field effect devices," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 17, p. 173109, 2010.
- [١٦] M. M. M. Farag, "Effect of Gamma Radiation on the Microbial Synthesis of Metal Nanoparticles," 2013.
- [١٧] R. Silva and M. Orlandi, "Influence of synthesis route on the radiation sensing properties of ZnO nanostructures," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2016, p. 18, 2016.
- [١٨] A. E.-D. M. Hosny, M. T. Kashef, H. A. Taher, and Z. E. El-Bazza, "The use of unirradiated and  $\gamma$ -irradiated zinc oxide nanoparticles as a preservative in cosmetic preparations," *International journal of nanomedicine*, vol. 12, p. 6799, 2017.



- [۱۹] R. Qindeel, "Effect of gamma radiation on morphological & optical properties of ZnO nanopowder," *Results in physics*, vol. 7, pp. 807-809, 2017.
- [۲۰] X. Jiang, T. Herricks, and Y. Xia, "CuO nanowires can be synthesized by heating copper substrates in air," *Nano Letters*, vol. 2, no. 12, pp. 1333-1338, 2002.
- [۲۱] A. Kargar, Y. Jing, S. J. Kim, C. T. Riley, X. Pan, and D. Wang, "ZnO/CuO heterojunction branched nanowires for photoelectrochemical hydrogen generation," *ACS nano*, vol. 7, no. 12, pp. 11112-11120, 2013.
- [۲۲] W. Zhou *et al.*, "Epitaxial Growth of Branched  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> Nano-Heterostructures with Improved Lithium-Ion Battery Performance," *Advanced Functional Materials*, vol. 21, no. 13, pp. ۲۰۱۱, ۲۴۳۹-۲۴۴۵ .
- [۲۳] B. Sun, E. Marx, and N. C. Greenham, "Photovoltaic devices using blends of branched CdSe nanoparticles and conjugated polymers," *Nano Letters*, vol. 3, no. 7, pp. 961-963, 2003.
- [۲۴] F. V. Molefe, "Novel ZnO nanostructures: synthesis ,growth mechanism and application," 2014.
- [۲۵] Z. L. Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 16, no. 25, p. R829, 2004.
- [۲۶] M. Burton, "Radiation chemistry," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 51, no. 2, pp. 611-625, 1947.
- [۲۷] F. Seitz, "On the disordering of solids by action of fast massive particles," *Discussions of the Faraday Society*, vol. 5, pp. 271-282, 1949.
- [۲۸] ف. غلامیان, "اثر تابس-های بتا و گاما بر تشکیل نانو ساختارهای اکسید فلزی مس و روی," دانشکده فیزیک, دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲۹] R. Hellborg, H. J. Whitlow, and Y. Zhang, *Ion beams in Nanoscience and Technology*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [۳۰] T. Kunert and R. Schmidt, "Excitation and fragmentation mechanisms in ion-fullerene collisions," *Physical review letters*, vol. 86, no. 23, p. 5258, 2001.
- [۳۱] J. Stiegler and L. Mansur, "Radiation effects in structural materials," *Annual review of materials science*, vol. 9, no. 1, pp. 405-454, 1979.
- [۳۲] م. جوانی, "اثر پرتوهای کم انرژی بر ساختار نانو," دانشکده فیزیک, دانشگاه صنعتی شاهرود, پایان نامه کارشناسی ارشد, ۱۳۹۴.
- [۳۳] IAEA, *A Procedure for the Sequential Determination of Radionuclides in Environmental Samples*. Vienna: International Atomic Energy Agency. ۲۰۱۴ ,
- [۳۴] G. S. M. A. a. A. T. M. Farag, "Development of a compact radiation detection system based on the use of silicon photomultipliers," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp. 159-166, February 2017 2017.
- [۳۵] <http://edu.nano.ir> ./
- [۳۶] L. Chow, O. Lupan, H. Heinrich, and G. Chai, "Self-assembly of densely packed and aligned bilayer ZnO nanorod arrays," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 16, p. 163105, 2009.

- [۳۷] S. Yun, J. Lee, J. Yang, and S. Lim, "Hydrothermal synthesis of Al-doped ZnO nanorod arrays on Si substrate," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 405, no. 1, pp. 413-419, 2010.
- [۳۸] M. Zhao, Z.-Z. Ye, and S. Mao, "Photoinduced stiffening in ZnO nanobelts," *Physical review letters*, vol. 102, no. 4, p. 045502, 2009.
- [۳۹] M. A. Zimmler, T. Voss, C. Ronning, and F. Capasso, "Exciton-related electroluminescence from ZnO nanowire light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 24, p. 241120, 2009.
- [۴۰] R. Lane, B. Craig, and W. Babcock, "Materials engineering with nature's building blocks," *AMPTIAC Newslett. Spring*, vol. 6, pp. 31-37, 2002.
- [۴۱] A. K. Srivastava, *Oxide Nanostructures: Growth, Microstructures, and Properties*. CRC Press, 2014.
- [۴۲] G. Cao and Y. Wang, *Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties, and applications*. World Scientific, 2004.
- [۴۳] ه. لوانسانی، فیزیک سطح-فصل مشترک. لایه-های نازک. تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۳، ج ۱.
- [۴۴] K. Choy, "Chemical vapour deposition of coatings," *Progress in materials science*, vol. 48, no. 2, pp. ۲۰۰۳، ۵۷-۱۷۰.
- [۴۵] R. Ham, "Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD). Principles, Technology and Applications.(Handbuch der chemischen Dampfabscheidung: Prinzipien, Techniken und Anwendungen). Von H. Pierson, Park Ridge/NJ: Noyes Publications 1992. 4 ۳۶S., 1993, US-\$68,-," *Vakuum in Forschung und Praxis*, vol. 6, no. 1, pp. 59-59, 1994.
- [۴۶] W. Kern, *Thin film processes II*. Academic press, 2012.
- [۴۷] P. Serp, P. Kalck, and R. Feurer, "Chemical vapor deposition methods for the controlled preparation of supported catalytic materials," *Chemical reviews*, vol. 102, no. 9, pp. 3085-3128, 2002.
- [۴۸] ج. مشایخی، مبانی لایه نشانی و آنالیز نانو ساختار. تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۹۳، ص ۳۰۱.
- [۴۹] E. Badisch, M. Stoiber, G. Fontalvo, and C. Mitterer, "Low-friction PACVD TiN coatings: influence of Cl-content and testing conditions on the tribological properties," *Surface and Coatings Technology*, vol. 174, pp. 450-454, 2003.
- [۵۰] K. Mogensen, N. Thomsen, S. Eskildsen, C. Mathiasen, and J. Bøttiger, "A parametric study of the microstructural, mechanical and tribological properties of PACVD TiN coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 99, no. 1-2, pp. 140-146, 1998.
- [۵۱] R. Arbain, M. Othman, and S. Palaniandy, "Preparation of iron oxide nanoparticles by mechanical milling," *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 1-9, 2011.
- [۵۲] A. Chiappini *et al.*, "Preparation and characterization of ZnO particles embedded in organic-inorganic planar waveguide by sol-gel route," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 35، no. 18-21, pp. 1132-1135, 2009.

- [۵۳] M. T. Htay, Y. Tani, Y. Hashimoto, and K. Ito, "Synthesis of optical quality ZnO nanowires utilizing ultrasonic spray pyrolysis," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 20, no. 1, pp. 341-345, ۲۰۰۹ ,
- [۵۴] M. Arroyo-Hernández, R. Álvaro, S. Serrano, and J. L. Costa-Krämer, "Catalytic growth of ZnO nanostructures by rf magnetron sputtering," *Nanoscale research letters*, vol. 6, no. 1, p. 437, 2011.
- [۵۵] B. Cao *et al.*, "Phosphorus acceptor doped ZnO nanowires prepared by pulsed-laser deposition," *Nanotechnology*, vol. 18, no. 45, p. 455707, 2007.
- [۵۶] H. Jiang, J. Hu, F. Gu, and C. Li, "Self-assembly of solid or tubular ZnO rods into twinning microprisms via a hydrothermal route," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 478, no. 1-2, pp. 550-553, 2009.
- [۵۷] N. Zhang, R. Yi, R. Shi, G. Gao, G. Chen, and X. Liu, "Novel rose-like ZnO nanoflowers synthesized by chemical vapor deposition," *Materials Letters*, vol. 63, no. 3-4, pp. 496-499, 2009.
- [۵۸] P. Gao ,Y. Ding, and Z. Wang, "Crystallographic orientation-aligned ZnO nanorods grown by a tin catalyst," *Nano Letters*, vol. 3, no. 9, pp. 1315-1320, 2003.
- [۵۹] J.-J. Wu, S.-C. Liu, C.-T. Wu, K.-H. Chen, and L.-C. Chen, "Heterostructures of ZnO-Zn coaxial nanocables and ZnO nanotubes," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 7, pp. 1312-1314, 2002.
- [۶۰] Y. Zhang *et al.*, "A simple method to synthesize nanowires," *Chemistry of Materials*, vol. 14, no. 8, pp. 3564-3568, 2002.
- [۶۱] ه. لواسانی, مبانی علم سطح در نانوفناوری. تهران: موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران, ۱۳۸۳, ج ۲.
- [۶۲] R. D. Braun, *Introduction to instrumental analysis*. Mcgraw-Hill College, 1987.
- [۶۳] G. D. Ewing and J. E. O'Reilly(eds.), *Instrumental Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [۶۴] G. W. Ewing, *Instrumental Methods of Chemical Analysis*. Singapore: McGraw-Hill, 1985.
- [۶۵] H. Freiser and M. Freiser, *Concepts & Calculations in Analytical Chemistry, Featuring the Use of Excel*. CRC Press, 1992.
- [۶۶] پ. م. و. همکاران, اصول و کاربرد میکروسکوپ های الکترونی و روش های نوین آنالیز. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران, ۱۳۹۳.
- [۶۷] T. H. Naylor, J. L. Balintfy, D. S. Burdick, and K. Chu, "Computer simulation techniques," Wiley New York 1966.
- [۶۸] R. E. Shannon, "Systems simulation; the art and science," 1975.
- [۶۹] ۱. ا. م. آبادی, شبیه سازی. تهران: آذرخش, ۱۳۷۷.
- [۷۰] ح. ص. ف. آبادی, شبیه سازی سیستم ها بوسیله کامپیوترهای رقمی. تهران: واحد فوق برنامه بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی, ۱۳۶۵.
- [۷۱] M. Pidd, "Computer simulation in management science," 199. ۸

- [۷۲] G. W. Morgenthaler, "The theory and application of simulation in operations research," 1961.
- [۷۳] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo method*. John Wiley & Sons, 2016.
- [۷۴] J. Allison *et al.*, "Geant4 developments and applications," *IEEE Transactions on nuclear science*, vol. 53, no. 1, pp. 270-278, 2006.
- [۷۵] <http://Geant4.cern.ch> .
- [۷۶] آموزش ابزار مونت کارلوی جینت ۴، ف. رحمانی و م. بطیار، تهران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۴
- [۷۷] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [۷۸] N. Tsoulfanidis, *Measurement and detection of radiation*. CRC press, 2010.
- [۷۹] B. Pajic and R. H. Greiner, "Long term results of non-surgical, exclusive strontium-/yttrium-90 beta-irradiation of pterygia," *Radiotherapy and oncology*, vol. 74, no. 1, pp. 25-29, 2005.
- [۸۰] M. Lee, K. Chung, G. Choi, and C. Lee, "Measurement of  $^{90}\text{Sr}$  in aqueous samples using liquid scintillation counting with full spectrum DPM method," *Applied radiation and isotopes*, vol. 57, no. ۷, pp. 257-263, 2002.
- [۸۱] R. Kumar, G. Kumar, O. Al-Dossary, and A. Umar, "ZnO nanostructured thin films: Depositions, properties and applications—A review," *Materials Express*, vol. 5, no. 1, pp. 3-23, 2015.
- [۸۲] J. Zhao, L. Hu, Z. Wang, Y. Zhao, X. Liang, and M. Wang, "High-quality ZnO thin films prepared by low temperature oxidation of metallic Zn," *Applied surface science*, vol. 229, no. 1-4, pp. 311-315, 2004.
- [۸۳] C. Ashok and K. V. Rao, "ZnO/TiO<sub>2</sub> nanocomposite rods synthesized by microwave-assisted method for humidity sensor application," *Superlattices and Microstructures*, vol. 76, pp. 46-54, 2014.
- [۸۴] K. A. Alim, V. A. Fonoberov, M. Shamsa, and A. A. Balandin, "Micro-Raman investigation of optical phonons in ZnO nanocrystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 12, p. 124313, 2005.

# Abstract

ionizing radiation, especially heavy ions can cause large changes in the properties of matter. Charged particles that pass through the material, due to Coulomb interactions, bremsstrahlung radiation and nuclear interactions at very high energies lose energy by emitting Cherenkov radiation. . When a high-energy particle such as electrons or ions hit the target atoms, different effects can happen. The effects are as follows: excitation and ionization of atoms, breaking the links, generating phonons swinging, moving atoms in Bulk targets, sputtering atoms from the surface and photon emission, for example, X-rays. As a result of this method can be used to produce materials with new properties and the development of new structures, for example, nanostructures. Beams of radioactive sources, due to the energy and vitality of Ionizing irradiation can be used in different cases. We used of two flat source  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  surface Zn in various experiments with different irradiation times. Tests were conducted in three parts. The first part was carried out at a temperature of 30 to 100 ° C. The second test just to see the growth of ZnO nanostructures were performed at 70 ° C. The third experiment in a tube furnace at temperatures of 300, 500, and 700 ° C was carried out, at any stage three on the grill with a sample source  $^{137}\text{Cs}$ , the second one with fountains  $^{241}\text{Am}$  irradiation and third sample without radiation was used only as a witness. The sample analysis of Raman spectroscopy , XRD, EDAX and FESEM images were used.

**Keywords:** absorbed dose, ZnO nanostructured growth, Geant4 simulator,  $^{90}\text{Sr}$  Source, Dose edge Slope, Absorbent mask





Shahrood University of  
Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering  
M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

# **Study of the effect of $^{192}\text{Ir}$ source radiations on formation of ZnO nanostructures**

By: Mohammadkazem Sadeghi

Supervisor:

Dr. Moslem Sohani

Advisor:

Dr. Morteza Izadifard

August, 2018