

## بررسی اثر تابش الکترون و گاما بر کیفیت سطح و بازتاب آینه نقره با پوشش $TiO_2$ و $Ta_2O_5$

الهام خالویی<sup>۱</sup>، ایرج جباری<sup>۲</sup>، بهروز میرزا<sup>۱</sup> و حسین زابلیان<sup>۱</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۵/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۲/۱۳)

### چکیده

در این تحقیق اثر تابش الکترون و گاما بر میزان بازتاب آینه‌های نقره با پوشش  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$ ، در گستره طول موج ۲۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر بررسی شده است. این پوشش‌ها برای کاربردهای فضایی در مدار LEO در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری سطح زمین، برای مأموریت سه ساله در فضا در نظر گرفته شده‌اند. میزان دز جذبی الکترون و گاما در این مدار و در طول سه سال، به ترتیب حدود ۷/۵ و ۰/۴ کیلوگری است. برای سنجش میزان مقاومت پوشش  $TiO_2$ ، پرتودهی گاما با چشمه  $Co\ 60$  بر روی این نمونه در گستره‌ای از دز ۰/۲ تا ۲۰ کیلوگری انجام شد که میزان دز ۴۰۰ گری موجود در ارتفاع مورد نظر را هم در بر می‌گرفت. در بالاترین دز، ۲۰ کیلوگری، اثرات تابش بر روی هر دو نمونه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای بررسی اثرات تابش بر کیفیت سطح نمونه‌ها بعد از تابش از میکروسکوپ نیروی اتمی و برای اندازه‌گیری بازتاب نمونه‌ها قبل و بعد از تابش، از اسپکتروفتومتر استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که علیرغم تغییرات سطحی بسیار جزئی و تغییر رنگ بستر آینه، میزان بازتاب آنها با پوشش‌های  $Ta_2O_5$  و  $TiO_2$  تغییری نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: اثر تابش، الکترون، گاما، آینه‌های نقره، پوشش  $TiO_2$ ، پوشش  $Ta_2O_5$

### ۱. مقدمه

امروزه از پوشش‌های اپتیکی به‌طور وسیعی در ادوات فضایی استفاده می‌شوند [۱]. از آنجا که این ادوات در معرض تابش‌های فضایی قرار می‌گیرند، که عمدتاً شامل ذرات پرنرژی هستند، و از این رو باید تحمل شرایط سخت فضایی را داشته باشند [۲-۴]. منابع مهم تابش در فضا عبارتند از تابش‌های

کیهانی<sup>۱</sup> (شامل ۹۸ درصد پروتون و یون‌های سنگین و ۲ الکترون و پوزیترون)، ذرات به دام افتاده در کمربندهای وان آلن<sup>۲</sup> (شامل الکترون‌ها و پروتون‌ها) و ذرات باردار ناشی از فعالیت‌های خورشید (شامل الکترون‌ها، پروتون‌ها و یون‌های

۱. Galactic Cosmic Ray (GCR)

۲. Van Allen

پوشش‌های مورد استفاده پس از تابش گاما با دز ۵۰ گری، کاهش بازتاب را در پی داشته است [۱ و ۲]. در تحقیقی دیگر که از یک لایه اکسید به عنوان پوششی برای آینه نقره استفاده شده بود نیز کاهش بازتاب آینه گزارش شده است که علت آن واکنش این اکسید با نقره بوده است [۳]. در این تحقیق اثر تابش گاما و الکترون بر کیفیت سطح و بازتاب آینه نقره با پوشش‌های  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$  مطالعه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

پوشش‌های اپتیکی که در کاربردهای فضایی استفاده می‌شوند باید در برابر تابش‌های فضایی مقاوم بوده و در فیلم‌های نازک<sup>۱</sup> با لایه‌های زیرین خود واکنش ندهند. در آینه‌ها، علاوه بر ویژگی‌های بیان شده، این پوشش‌ها نباید از بازتاب آن بکاهد. در این تحقیق به بررسی دو پوشش مناسب برای آینه نقره به منظور بکارگیری در مدار<sup>۲</sup> LEO در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری سطح زمین پرداخته شده است. در این تحقیق از بین آینه‌های فلزی طلا، نقره و آلومینیوم، آینه‌ای از جنس نقره انتخاب شد که در گستره طول موجی مورد نظر بیشترین بازتاب را از خود نشان داده است [۴]. این آینه با پوشش  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$  بر روی زیرلایه‌ای از  $MgF_2$  تهیه شد. لایه‌نشانی به روش تبخیر فیزیکی سطحی<sup>۳</sup> صورت گرفت. در این تحقیق اثر تابش بر پوشش‌های  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$  بررسی شده است. با توجه به این که دز الکترون در این مدار در مدت سه سال مأموریت حدود ۷٫۵ کیلوگری است، اثر این مقدار پرتوگیری در این تحقیق مطالعه شده است. باتوجه به این که نقره در معرض هوا به راحتی اکسید شده و بازتاب آن کاهش می‌یافت با توجه به مطالعات انجام شده از یک لایه اکسیدی دی‌اکسید سیلیسیوم که در برابر تابش گاما مقاوم بود استفاده شد. از آنجا که این ماده دارای ضریب شکست پایین است [۱۵ و ۲۰]، باید از لایه‌ای دیگر با ضریب شکست بالا و مقاوم در برابر تابش گاما استفاده می‌شد، که با مطالعات انجام شده از دو ماده  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$  استفاده شد [۱۶-۱۹].

سنگین [۷-۹]. تغییرات حاصل از تابش‌های فضایی بر روی ویژگی‌های اپتیکی مواد مورد استفاده در ادوات فضایی، می‌تواند یکی از دلایل مهم شکست مأموریت‌های فضایی گردد [۱]. بدین جهت سازمان‌های مختلف فضایی مدت زمان زیادی صرف بررسی و تحقیق بر روی مواد گوناگون، به عنوان پوششی برای قطعات اپتیکی کرده‌اند [۱۰]. در آزمون‌هایی که بر روی قطعات اپتیکی به کار رفته در این تجهیزات انجام می‌شود، میزان دز گاما به ازای هر سال مأموریت در فضا حدود ۱۰۰ گری در نظر گرفته می‌شود [۵]. یکی از پرکاربردترین مواد به عنوان پوشش‌های اپتیکی، مواد اکسیدی هستند، لذا اکثر تحقیقات در این حوزه، بر روی این پوشش‌ها صورت گرفته است [۱-۴]. از لحاظ نوآوری و ابتکار این طرح با چنین چیدمان لایه‌ای بر روی آینه برای کاربردهای فضایی در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری در مدار نزدیک به سطح زمین اولین بار انجام شده است هم در ایران و هم در سایر کشورها دیگر برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته و نمونه آزمایشگاهی آن ساخته شد.

از آنجا که هدف در این پروژه تحقیقاتی ساخت آینه با بیشترین بازتاب و استحکام ممکن در برابر شرایط فضا در مدار نزدیک به سطح زمین بود، و با توجه به مطالعات انجام شده این نتیجه حاصل شد که آینه‌های فلزی بازتاب بالاتری نسبت به آینه‌های دی‌الکتریک دارد [۱۱ و ۱۲] از بین سه فلز طلا، آلومینیوم و نقره که برای کاربردهای فضایی بیشتر استفاده می‌شد، نقره با توجه به میزان بازتاب آن در گستره مورد نظر ۲۵۰-۱۱۰۰ نانومتر و مقرون به صرفه‌تر بودن نسبت به طلا انتخاب شد [۱۳ و ۱۴].

در این تحقیقات پس از ساخت نمونه‌های مورد نظر، از هر نوع نمونه یکی به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده و روی سایر نمونه‌ها آزمون‌های مربوطه انجام می‌شود. بعد از پرتودهی نمونه‌ها، خصوصیات اپتیکی نمونه‌های پرتو دیده بررسی شده و در نهایت با نمونه شاهد مقایسه می‌شود تا میزان آسیب‌پذیری نمونه و مناسب بودن یا نبودن آن جهت کاربردهای فضایی مورد نظر مشخص شود. در یک تحقیق نشان داده شده که

۲. Thin films

۳. Low earth orbit

۴. Physical Vapor Deposition (PVD)

بازتاب نمونه‌ها قبل و پس از تابش را برای دزهای مختلف نشان می‌دهد.

نمودارهای بازتاب نشان می‌دهند که هیچ گونه کاهش بازتابی در نمونه‌های با پوشش  $TiO_2$  در این محدوده پرتوگیری گاما رخ نمی‌دهد. تنها تغییر ظاهری در رنگ شیشه بستر بود که در دزهای ۳ کیلوگری و بالاتر دیده شد. شکل ۲، AFM نمونه شاهد و شکل‌های ۳ (الف) تا (ه) نیز تصاویر حاصل از AFM نمونه‌ها بعد از تابش را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در تصاویر AFM دیده می‌شود، تغییرات سطحی در AFM نمونه‌ها روی داده است در حالی که اثری بر میزان بازتاب نمونه‌ها نداشته و پروفایل نمونه‌ها تغییر نکرده است.

### ۲.۳. مقایسه اثر تابش گاما با دز ۲۰ کیلوگری بر نمونه‌های

#### با پوشش $TiO_2$ و $Ta_2O_5$

در این تحقیق نیز از تابش چشمه  $Co^{60}$  با آهنگ دز ۳/۲۶ کیلوگری بر ساعت استفاده شده است. بازتاب هر دو نمونه قبل و بعد از تابش گاما با دز ۲۰ kGy، اندازه‌گیری شده که نتایج آنها در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است. شکل‌های ۶ و ۷ نیز به ترتیب AFM مربوط به نمونه‌های  $Ta_2O_5$  و  $TiO_2$  را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود هر دو نمونه در برابر تابش گاما تا ۲۰ kGy مقاوم هستند.

### ۳.۲. اثر تابش الکترون با دز ۷/۵ kGy بر نمونه‌های با پوشش

#### $Ta_2O_5$ و $TiO_2$

نمونه‌ها به طور هم‌زمان توسط شتاب‌دهنده رودترون یزد مورد تابش الکترون‌هاش ۱۰ MeV با دزی برابر ۷/۵ کیلوگری قرار گرفتند. برای هر دو نمونه بازتاب قبل و بعد از تابش اندازه‌گیری شد. همچنین برای بررسی کیفیت سطح، از هر نمونه، بعد از تابش توسط AFM عکس‌برداری شد. شکل‌های ۸ و ۹ مربوط به بازتاب نمونه‌ها و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز AFM نمونه‌ها را بعد از تابش نشان می‌دهد.

در آزمون‌هایی که بر روی قطعات اپتیکی به کار گرفته شده در فضا انجام می‌گیرد، میزان دز گاما به ازای هر سال مأموریت در فضا حدود ۱۰۰ گری در نظر گرفته می‌شود [۵]. بنابراین میزان دز گاما برای مأموریت مورد نظر، ۳۰۰ گری می‌باشد که برای اطمینان از نتایجی که بدست خواهد آمد این میزان دز ۴۰۰ گری در نظر گرفته شده است. با توجه به امکانات موجود در سازمان انرژی اتمی ایران، امکان پرتودهی گاما در دزهای بالا وجود داشت، بنابراین برای سنجش میزان مقاومت پوشش، پرتودهی گاما بر روی نمونه  $TiO_2$  در گستره‌ای دز ۰/۲ تا ۲۰ کیلوگری انجام شد، که میزان دز ۴۰۰ گری موجود در ارتفاع مورد نظر را هم در بر می‌گرفت. در بالاترین دز تابش گاما که برابر با ۲۰ کیلوگری بود، اثر این تابش و همچنین اثر تابش الکترون با دز ۷/۵ کیلوگری بر روی هر دو نمونه انجام شده و با یکدیگر مقایسه شدند. میزان بازتاب نمونه‌ها قبل و بعد از تابش، به وسیله اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد تا اثر تابش‌ها بر میزان بازتاب نمونه‌ها در گستره طول موج ۱۱۰۰-۲۵۰ نانومتر، مشخص شود. برای بررسی اثرات سطحی این تابش‌ها بر روی نمونه‌ها، از میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱</sup>، استفاده شد. تابش گاما در تهران با استفاده از چشمه  $Co^{60}$  با نرخ دز ۳/۲۶ گری بر ثانیه انجام شد. برای پرتودهی نمونه‌ها با الکترون از شتاب‌دهنده رودترون مرکز پرتوفرایند یزد استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

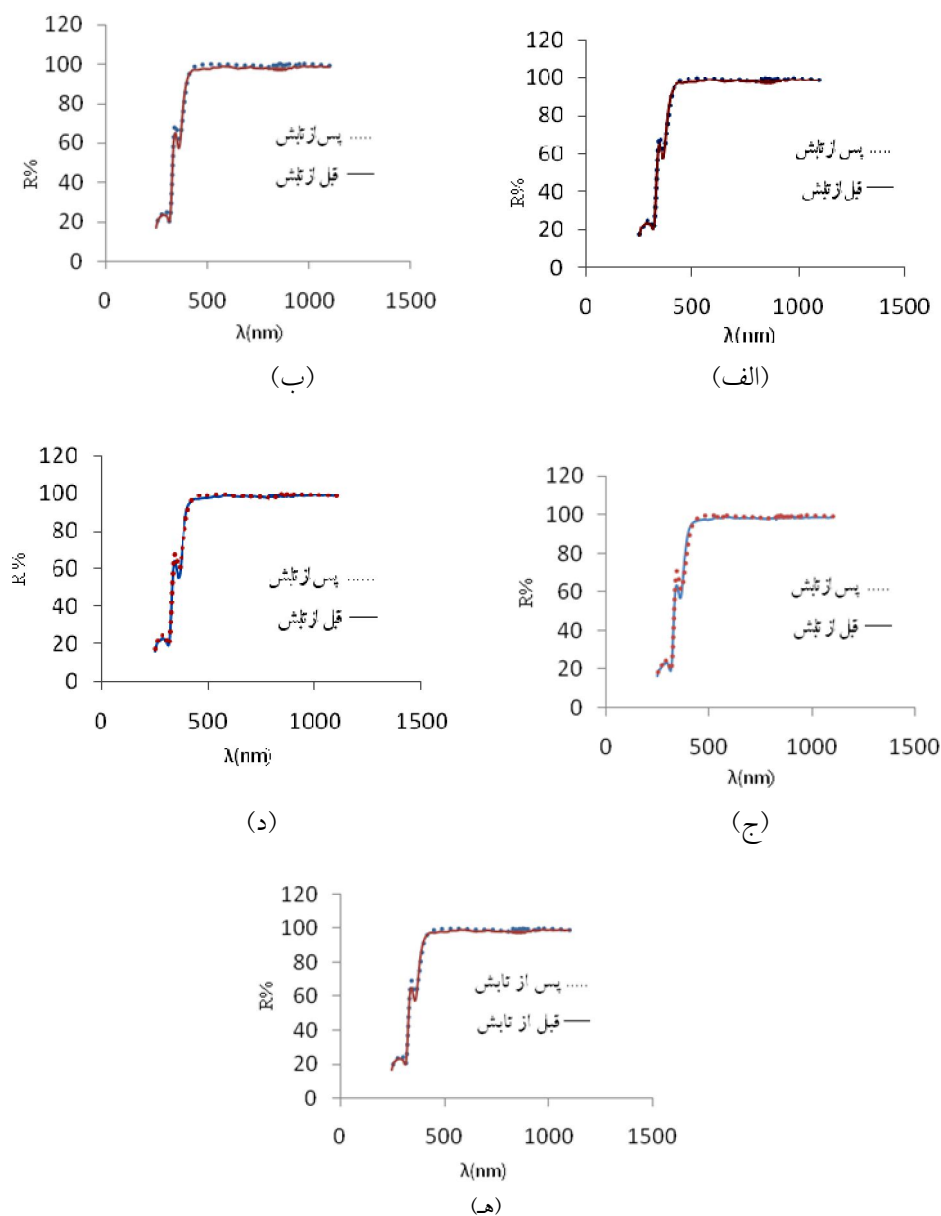
در این بخش ابتدا اثر تابش گاما با دزهای مختلف بر روی نمونه با پوشش  $TiO_2$  بررسی شده و سپس به مقایسه اثر تابش الکترون و گاما با دزهایی که در ادامه ذکر شده بر روی پوشش‌های  $Ta_2O_5$  و  $TiO_2$  پرداخته شده است.

### ۱.۳. اثر تابش گاما با دزهای مختلف بر آینه‌ها با پوشش

#### $TiO_2$

برای این کار از چشمه  $Co^{60}$  با آهنگ دز ۳/۲۶ کیلوگری بر ساعت استفاده شده است. شکل‌های ۱ (الف) تا (ه) میزان

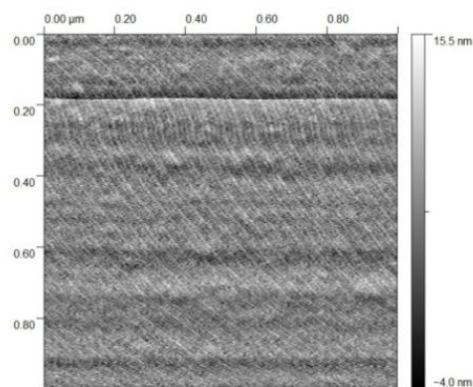
۱. Atomic Force Microscope (AFM)



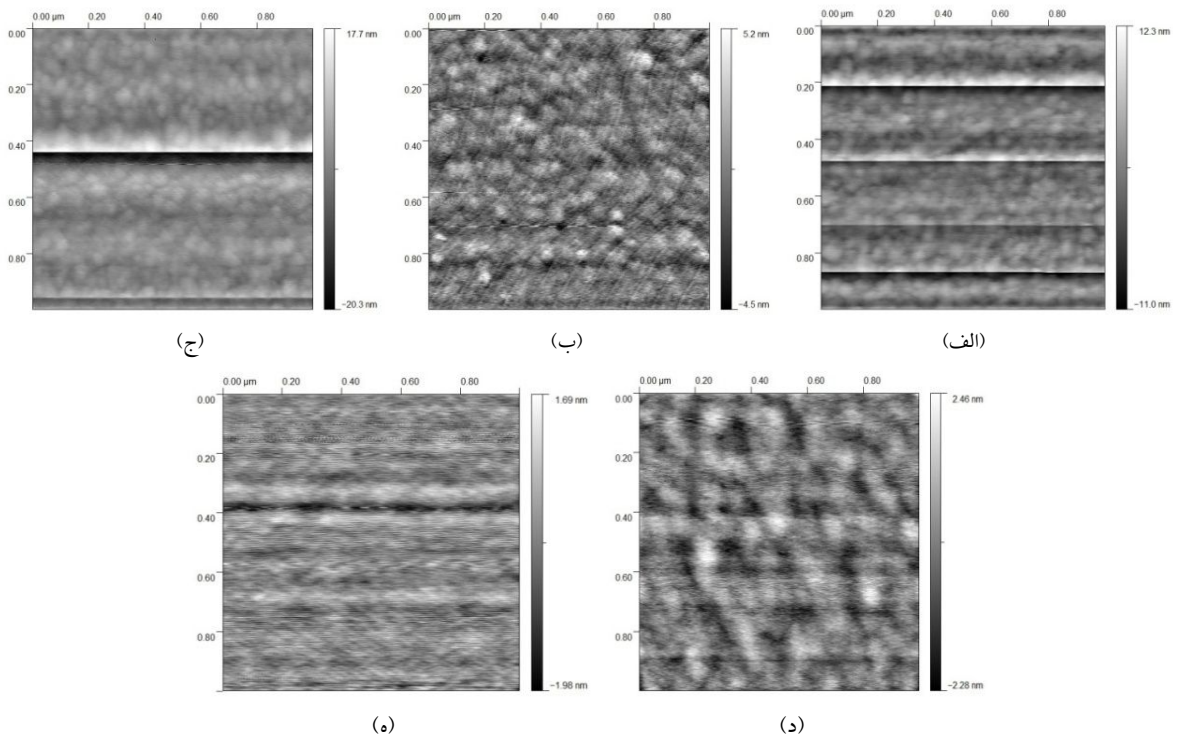
شکل ۱. اثر تابش گاما بر بازتاب نمونه با پوشش  $\text{TiO}_2$ . (الف) ۳ kGy، (ب) ۵ kGy، (ج) ۱۰ kGy، (د) ۱۵ kGy و (ه) ۲۰ kGy.

همان طور که شکل های ۸ و ۹ نشان می دهند، این مقدار دز الکترون تأثیری بر بازتاب آینه ها نداشته و در این آینه ها می توان در این مدت مأموریت فضایی استفاده نمود. شایان ذکر است که این مقدار اشعه الکترونی باعث تیرگی بستر نمونه ها شد. قله هایی مشاهده شده مربوط به طیف بازتاب دو ماده مربوط به خصوصیات خاص این دو ماده است.

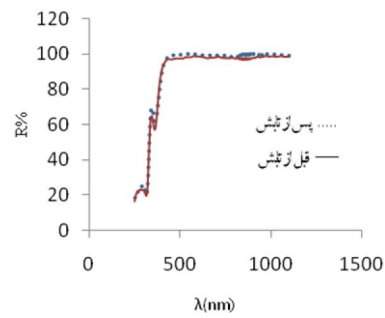
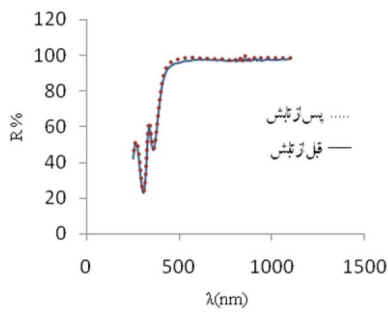
تفاوت ظاهری در شکل ۳ به علت تفاوت در مقیاس اندازه گیری بوسیله AFM است. برای مشخص تر شدن تغییرات، تغییرات نمایه ها در زیر آورده شده است.



شکل ۲. AFM نمونه شاهد با پوشش  $\text{TiO}_2$ .

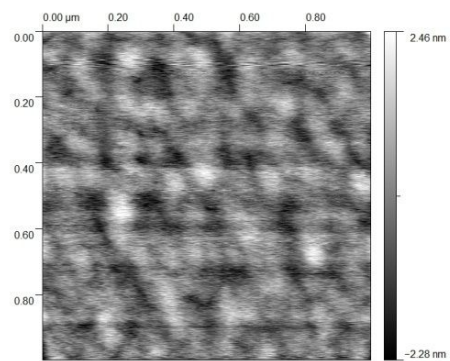
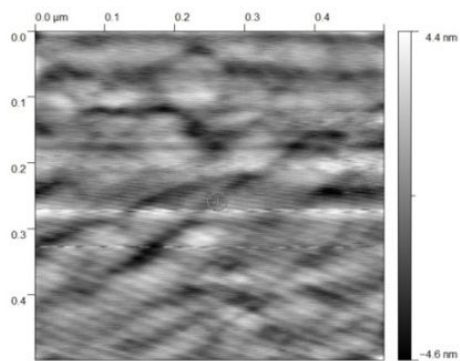


شکل ۳. AFM نمونه با پوشش  $TiO_2$  پس از تابش گاما با دزهای (الف) ۳ kGy، (ب) ۵ kGy، (ج) ۱۰ kGy، (د) ۱۵ kGy و (ه) ۲۰ kGy.



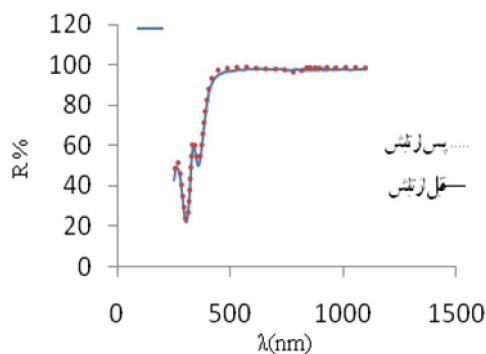
شکل ۴. اثر تابش گاما با دز ۲۰ kGy بر بازتاب نمونه با پوشش  $Ta_2O_5$ .

شکل ۵. اثر تابش گاما با دز ۲۰ kGy بر بازتاب نمونه با پوشش  $TiO_2$ .

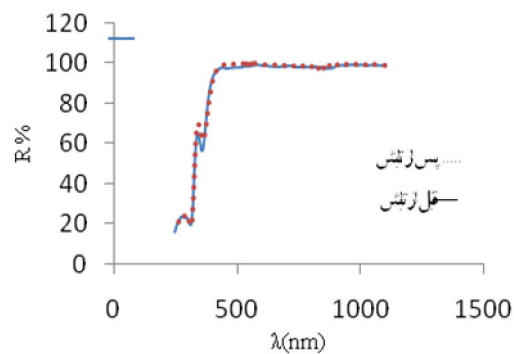


شکل ۶. AFM نمونه با پوشش  $Ta_2O_5$  بعد از تابش گاما با دز ۲۰ kGy.

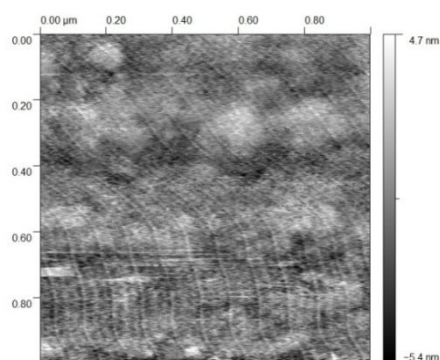
شکل ۷. AFM نمونه با پوشش  $TiO_2$  بعد از تابش گاما با دز ۲۰ kGy.



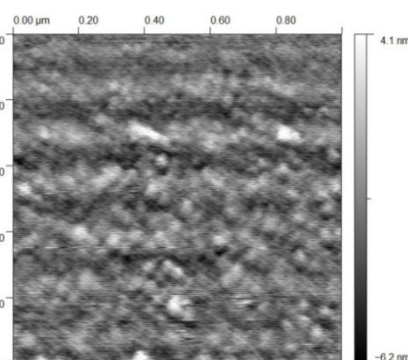
شکل ۹. اثر تابش الکترون با دز ۷٫۵ kGy بر بازتاب نمونه با پوشش  $Ta_2O_5$ .



شکل ۸. اثر تابش الکترون با دز ۷٫۵ kGy بر بازتاب نمونه با پوشش  $TiO_2$ .



شکل ۱۱. AFM نمونه  $Ta_2O_5$  بعد از تابش الکترون با دز ۷٫۵ kGy.



شکل ۱۰. AFM نمونه  $TiO_2$  بعد از تابش الکترون با دز ۷٫۵ kGy.

جدول ۱. بررسی اثر تابش الکترون و اشعه گاما با دزهای مورد بحث بر پوشش  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$ .

تابش (nm)	الکترون گری ۷٫۵	گامای ۲۰ کیلوگری	گامای ۱۵ کیلوگری	گامای ۱۰ کیلوگری	گامای ۵ کیلوگری	گامای ۳ کیلوگری
$TiO_2$ میانگین ناهمواری	۳۰۰۷٫۵	۱۴۷۳٫۵	۱۵۱۷٫۶	۱۵۰۵۲	۱۴۹۴۳	۲۱۱۱٫۲
$TiO_2$ کمینه ناهمواری	۲۸۶۹	۱۳۹۶٫۲	۱۴۶۲٫۵	۱۴۶۴٫۴	۱۳۷۷٫۴	۱۹۶۵٫۸
$TiO_2$ بیشینه ناهمواری	۳۲۳۷٫۱	۱۶۴۶٫۱	۱۵۶۸٫۶	۱۶۲۸٫۸	۱۵۷۸٫۶	۲۲۷۳٫۲
$Ta_2O_5$ میانگین ناهمواری	۱۹۲۷٫۷	۴۷۷٫۷	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده
$Ta_2O_5$ کمینه ناهمواری	۱۸۶۳٫۶	۴۳۵٫۱	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده
$Ta_2O_5$ بیشینه ناهمواری	۱۹۸۴٫۰	۵۴۳٫۵	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده

اثری نداشته و تنها دزهای ۳ کیلوگری و بالاتر باعث تغییر رنگ بستر می‌شوند. تابش گاما با دز ۲۰ kGy و الکترون با دز ۷٫۵ kGy و انرژی ۱ MeV، اثری بر میزان بازتاب دو آینه با پوشش‌های  $TiO_2$  و  $Ta_2O_5$  نداشته است. تنها تغییر ظاهری

### ۳. نتیجه گیری

این تحقیق نشان داد که تابش گاما با دزهای مختلف تا حد بیشینه ۲۰ kGy بر روی بازتاب آینه نقره‌ای با پوشش  $TiO_2$

نشده و در نتیجه کیفیت بازتاب نمونه‌ها تغییری نکرد. لذا این دو پوشش برای آینه‌های مورد استفاده در مدار LEO و مدت زمان سه سال در برابر تابش‌های الکترون و گاما کاملاً مقاوم هستند.

ایجاد شده، تیرگی بستر نمونه‌هایی بود که در معرض تابش گاما با دزهای ۳ kGy و بالاتر و همچنین تابش الکترون با دز ۷/۵ kGy کیلوگری قرار گرفته بودند. علیرغم تغییراتی که در AFM گرفته شده از نمونه‌های تحت تابش نسبت به نمونه شاهد دیده شد، تغییر در منحنی‌های بازتاب نمونه‌ها، ایجاد

## مراجع

1. S Baccaro, A Cecilia, I D Sarcina and A PieGari, "Optical Coatin G Behavior under Gamma Irradiation for Space Applications", *Proc. of SPIE*, **5494** (2004) 529.
2. E Hacker, P Weibrod, L Raupach, and H Lauth, "Space Stability Investigation of Optical Coating by Earth- and Space-Based Experiments", *SPIE* **2210**, Space Optics (1994).
3. S Baccaro, A Cecilia, I Di Sarcina, A PieGari, *Nuclear Science, IEEE* **52**, 5 (2005) 1179.
4. M Fernandez-Rodriguez *et al.*, *Thin Solid Films* **455-456** (2004) 545.
5. E G Thayer, E L Blansett, and B E N Keeler, "Space Radiation Testing of Thin Film and Multilayer Optical Coatings", *Proc. of SPIE* (2009) 7425.
6. T Thomas, and J Wolfe, "UV-Shifted Durable Silver Coating for Astronomical Mirrors", *Proc. SPIE*. **4003** (2000) 312.
7. E R Benton and E V Benton, *Nucl. Meth. Phys. Res. B* **184** (2001) 255.
8. F Spurny, *Radiation Physics and Chemistry* **61** (2001) 301.
9. B K Ridley, "The Physical Environment," Ellis Horwood Ltd. (1979).
10. P Beynel, P Maier, and H Schumacher, "Compilation of Radiation Damage Test Data", part III: Materials used around high-energy accelerators, CERN 82-10 Health and Safety Department, Geneva (1982).
11. D Y Song, W R Sprague, H A Macleod, and M R Jacobson, *Applied Optics* **24**, 28 (1985) 1164.
12. J M Bennett, E J Ashly, *Applied Optics* **4**, 2 (1965) 221.
13. R F Bunshah *et. al.*, "Deposition Technology for Films and Coatings", Cnoyes Publications, New Jersey (1982).
14. P Jin, L Miao and S Tanemura, *Applied Surface Science* **212-213** (2003) 775.
15. S Baccaro, A Cecilia, I Di Sarcina, and A Piegari, *IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society* **52**, 5 (2005) 1779.
16. T Thomas and J Wolfe, "Uv-shifted Durable Silver Coating for Astronomical Mirrors", *SPIE* 4003, Optical Dasign, Matericals, Fabrication and Maintenance, Volume: 4003UCRL-JC, NO. 136508, (2000).
17. H A Macleod, "Thin Film Optical Filter", Macmillan, London, U.K (1986).
18. J Ihlemann, J Bekesi, J H Wiele, and P Simon, "Processing of Dielectric Optical Coatings by Nanosecond and Femtosecond UV Laser Ablation", Hendawi Publishing Corporation Laser Chemistry (2008) 1.