



## بررسی تاثیر پرتودهی گاما بر تغییر رنگ سنگ بریل و تست ثبات رنگ سنگ پس از پرتودهی

غلامزاده، زهره\* - کاردان، محمد رضا - حسینی رخ، اشکان

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

### چکیده:

راکتور تحقیقاتی تهران یک چشمه نوترون و گامای بسیار قوی و منحصر به فرد در کشور است که می‌تواند برای انجام کارهای تحقیقاتی و نیز فعالیت‌های تجاری وابسته به پرتودهی نمونه‌ها توسط شار نوترون و یا شار گاما مورد استفاده قرار گیرد. بسیاری از کشورهای از راکتور تحقیقاتی خود به منظور بهبود سنگهای زینتی مورد استفاده جواهرات و تغییر رنگ این سنگها استفاده می‌کنند. در این کار امکان سنجی استفاده از گامای راکتور تحقیقاتی تهران در زمان خاموشی برای پرتودهی سنگ‌های زینتی انجام شده است. نتایج پرتودهی چندین نمونه سنگ بریل نشان داد رنگ آبی اقیانوسی و نیز سبز-آبی می‌تواند در سنگها ایجاد شود و به دور از اشعه UV رنگ ثبات خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** راکتور تحقیقاتی تهران، پرتودهی گاما، سنگ بریل

### مقدمه:

امروزه از تمام پتانسیل‌های یک راکتور تحقیقاتی برای دستیابی به اهداف مختلف استفاده می‌شود. یکی از این پتانسیل‌ها استفاده از پرتوهای گامای ساطع شده از سوخت‌های مصرفی است. رنگ‌آمیزی سنگ‌های زینتی به روش ایجاد الکترون/حفره می‌تواند از طریق تابش‌دهی آنها توسط نوترون سریع، الکترون و یا گاما انجام گردد. راکتورهای تحقیقاتی مختلف از این پتانسیل به روش‌های مختلف بهره می‌برند به عنوان مثال در Oak Ridge از پرتوهای گامای گسیل شده از دسته‌های سوخت مصرف شده استفاده می‌کند. در واقع تسهیلات تابش‌دهی گاما HFIR در اوک ریج شامل تجهیزات انجام تست‌های تجربی پرتودهی مواد با تابش گاما حاصل از دسته‌های سوخت مصرف شده است. محفظه پرتودهی نمونه از فولاد ضد زنگ و از لوله با ضخامت ۱/۶ میلی متر ساخته شده است تا ابعاد داخلی اتاق پرتودهی را به حداکثر برساند. این موضوع اجازه می‌دهد تا بارگذاری بزرگترین نمونه‌های ممکن در داخل جایگاه‌های کادمیومی امکان پذیر باشد. قطر محفظه داخلی این تجهیزات تقریباً ۳/۷۵ اینچ است و نمونه‌های تا طول ۲۵ اینچ را می‌تواند در خود جای دهد. در راکتور HFIR با توان ۸۵ MW، مجتمع‌های سوخت مصرف شده برای تابش‌دهی گاما در تسهیلات تابش گاما طراحی شده در استخر راکتور استفاده می‌شوند. این تجهیزات دز ۱ MGy/h را ارائه می‌دهد و می‌تواند در کمتر از ۱ ماه دز ۴۰ MGy را فراهم آورد. از پرتوهای گاما می‌توان برای مطالعه مواد برای مثال مطالعه اثر پرتوهای گاما بر بتن نانو و یا



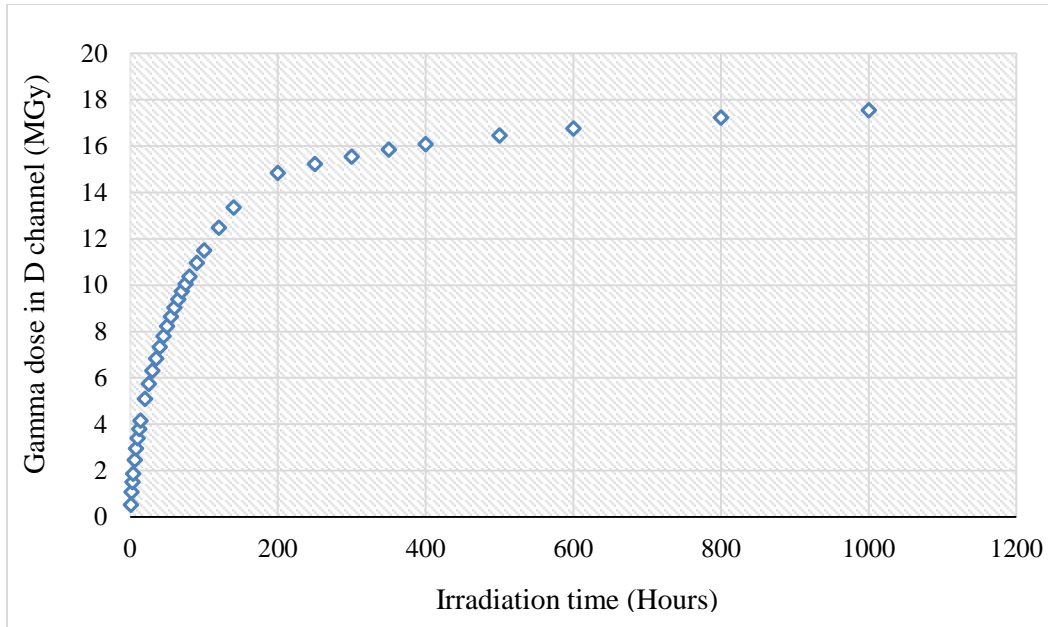
سایر مواد و نیز رنگ‌دهی سنگ‌های قیمتی استفاده کرد. بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی از این پتانسیل بالا استفاده می‌کنند که از جمله آنها می‌توان راکتور Penn State، راکتور تحقیقاتی JEEP II و راکتور ATR در آمریکا را نام برد [۴-۱]. تابش دادن یک سنگ جواهر می‌تواند مراکز رنگی را در شبکه کریستال با حرکت الکترون‌ها از پیش سازهایشان ایجاد کند، که این موضوع امکان تشکیل پیوندهای شیمیایی جدید را فراهم می‌کند و مراکزهای رنگی جدید تولید می‌کند و یا مراکز رنگی قبلی را تغییر می‌دهد. به این ترتیب امکان تغییر رنگ جواهرات در چند روز وجود دارد در صورتیکه هزاران سال طول می‌کشید تا در طبیعت از طریق قرار گرفتن در معرض اشعه طبیعی چنین تغییر رنگی به دست آید. فلزات گذار در مقادیر بسیار کم می‌توانند بعنوان ناخالصی‌ها در نظر گرفته شوند، به طوری که ترکیب کلی مواد معدنی در اصل ثابت می‌باشد. این ناخالصی‌های بسیار اندک سبب ظهور رنگ‌های معمولی مواد معدنی alocromatticos می‌شوند. نمونه این موارد بریل است که فرمول شیمیایی آن  $[(\text{Be}_3\text{Al}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$  است. محتوای اندک  $\text{Cr}^{+3}$  سبب رنگ سبز بریل، معروف به زمرد می‌شود. کاتیونهای  $\text{Fe}^{+3}$  در مقادیر کوچک مسئول رنگ زرد هلیودور هستند. و هنگامی که ناخالص  $\text{Fe} + 2$  وجود داشته باشد بریل آبی، به نام aquamarine شناخته می‌شود [۵-۶]. لازم به ذکر است در زمان خاموشی راکتور نیز می‌توان از پرتوهای گامای سوخت‌های داخل قلب راکتور بهره جست و سنگ‌های جواهراتی را پرتودهی کرد.

### روش کار :

در ابتدا دز تجمعی گاما در کانال D6 راکتور توسط کد محاسباتی MCNPX محاسبه گردید و دز محاسبه شده با اندازه‌گیری توسط کارت دزیمتری راستی‌آزمایی شد. نمودار دز تجمعی جهت محاسبه زمان مورد نیاز پرتودهی به منظور حصول رنگ مطلوب مورد استفاده قرار گرفت. طبق مکتوبات دز گامای حدود ۴ MGy برای پرتودهی سنگ بریل به منظور بهبود رنگ آن پیشنهاد شده است [۷]. نمونه‌های به مدت زمان متفاوت در کانال D6 راکتور تحقیقاتی تهران در زمان خاموشی راکتور پرتودهی شدند. رنگ سنگ‌ها قبل و پس از پرتودهی توسط دوربین ثبت گردید. به منظور تست ثبات رنگ، یک نمونه سنگ به مدت ۱۵ روز در نور آفتاب (مقابل اشعه UV) قرار داده شد. همین تست برای سنگ در یک اتاق معمولی به مدت ۴۰ روز انجام شد و ثبات رنگ در اتاق معمولی بررسی شد.

### نتایج :

در شکل زیر دز تجمعی کانال D تا ۱۰۰۰ ساعت پس از خاموشی راکتور ارائه شده است. همچنانکه ملاحظه می‌گردد دز پس از ۱۰۰۰ ساعت به حدود ۱۸ MGy می‌رسد (شکل ۱).



شکل ۱- محاسبه دز تجمعی گاما در کانال D6 بر حسب زمان خاموشی راکتور

از کارت دزیمتری برای محاسبه دز در کانال D6 استفاده شد. اندازه‌گیری دز این کانال پس از ۲۰۵ ساعت از خاموشی راکتور نشان داد دز کانال ۱۸ kGy/h است و محاسبات شبیه‌سازی در همان شرایط نشان داد دز تئوری محاسبه شده ۲۸ kGy/h است که بین داده‌های تجربی و تئوری ۵۵٪ اختلاف نسبی وجود دارد. در اندازه‌گیری‌های مجدد میانگین کارتهای دزیمتری در کانال D ۲۰٪/۹۵ بود که اختلاف نسبی بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کمتر هم بود (جدول ۱).

جدول ۱- بررسی دز گاما در کانالهای مختلف پس از زمان خاموشی راکتور به مدت ۲۰۵ ساعت

شماره کانال	D6 ۷۹۳	۷۳۶	۷۴۶	F3 ۷۵۶	A3 ۷۶۶	۷۷۶	۷۸۶
دز محاسبه شده با تعریف چشمه حجمی Kgy	۲۸	۱/۶	۱/۵	۶/۵	۱۲	۳/۸	۴/۰
دز اندازه‌گیری شده کارت ۱	۲۰			۱۰/۷	۱۶/۸		
دز اندازه‌گیری شده کارت ۲	۲۱/۹			۱۴/۱	۱۶/۵		
میانگین کارتها	۲۰/۹۵			۱۲/۴	۱۶/۶۵		

		۳۸/۷۵	۴۷/۵۸			۳۳/۶۵	اختلاف نسبی با تجربی %
۳/۶۶	۳/۳۸	۱۰/۱	۱۱/۷	۲/۷۳	۱/۷	۲۶/۷	محاسبه دز با اعمال توزیع مکانی گاماها KGy
		۳۹/۳	۵/۶۰			۲۷/۴۰	اختلاف نسبی با تجربی %

بسته به اینکه سنگها از چه زمانی بعد از خاموشی راکتور در کانال قرار گرفته اند به زمان متفاوتی برای حصول دز مورد نظر نیاز دارند. هرچند دز پیشنهادی بریل حدود ۴ MGy است ولی در ادامه افزایش تدریجی دز و تاثیر آن بر رنگ سنگ ها نیز بررسی خواهد شد. جدول ۲ ویژگی سه عدد سنگ پرتودهی شده با دز متفاوت را نشان می دهد.

جدول ۲- پرتودهی نمونه سنگ های بریل پس از خاموشی راکتور

شکاره سنگ	کانال	رنگ اولیه	رنگ محصول	دز پیشنهادی (KGy)	دز محاسباتی (KGy)	زمان پرتودهی (h)
۱	D6	بی رنگ	سبز کم رنگ	۴۰۰۰ به بالا	۱۵۰۰۰	۲۰۷
۲	D6	بی رنگ	سبز کم رنگ	۴۰۰۰ به بالا	۳۲۰۰	۸۰
۳	D6	بی رنگ	سبز کم رنگ	۴۰۰۰ به بالا	۱۵۰۰۰	۲۰۷

شکل ۲ نشان می دهد رنگ نمونه سنگ بریل در اثر دز ۱/۵ MGy به رنگ سبز کم رنگ (مغز پسته ای) در آمده است. رنگ سنگ پرتودهی شده با دز ۳/۲ MGy نیز به رنگ سبز کم رنگ (مغز پسته ای) در آمد اما این سنگ پررنگ تر از سنگ نمونه ۱ است (شکل ۳-۲).



شکل ۲- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۱ به واسطه پرتودهی، سمت راست: قبل پرتودهی - سمت چپ: بعد از پرتودهی



شکل ۳- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۲ به واسطه پرتودهی، سمت راست: قبل پرتودهی - سمت چپ: بعد از پرتودهی

در ادامه پرتودهی سنگ تا دزهای بالاتر بررسی شد. همچنانکه شکل ۴ نشان میدهد، پرتودهی سنگ شماره ۱ تا دز ۱ MGy باعث شد رنگ سنگ به آبی اقیانوسی تغییر کند. نمونه سنگ شماره ۳ نیز تا دز ۱/۵ MGy پرتودهی شد که نتایج نشان می داد رنگ سبز مغز پسته ای پر رنگ برای سنگ ایجاد شده است.



شکل ۴- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۱ به واسطه پرتودهی بیشتر، سمت راست: پرتودهی با دز حدود  $1/5 \text{ MGy}$  - سمت

چپ: پرتودهی با دز حدود  $19 \text{ MGy}$



شکل ۵- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۳ به واسطه پرتودهی، سمت راست: قبل پرتودهی - سمت چپ: بعد از پرتودهی  
 همچنین نمونه دیگری از سنگ بریل تا دز حدود  $3/5 \text{ MGy}$  پرتودهی شد که نتایج پرتودهی نشان داد سنگ به رنگ آبی-  
 اقیانوسی (آکوامارین) در می‌آید (شکل ۶).



شکل ۶- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۴ به واسطه پرتودهی مرحله به مرحله، سمت راست: قبل پرتودهی، سمت چپ:

پرتودهی با دز حدود  $1/5 \text{ MGy}$

لازم به ذکر است طبق پرتودهی‌های انجام شده حصول رنگ سبز و یا آبی به ناخالصی سنگ وابسته است و افزایش دز  
 گاما شدت رنگ را بیشتر می‌کند.

بررسی‌ها نشان داد در صورتیکه سنگ‌های پرتو دیده مقابل نور آفتاب قرار گیرند رنگ همه به زرد تغییر می‌کند (شکل  
 ۷). اما در صورتیکه سنگ به دور از نور مستقیم آفتاب درون اتاق معمولی استفاده شود رنگ سنگ ثبات خواهد داشت  
 (شکل ۸).



شکل ۷- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۳ به واسطه نور آفتاب، سمت راست: پرتو دهی شده، سمت چپ: ۱۵ روز مقابل آفتاب



شکل ۸- بررسی تغییر رنگ سنگ بریل شماره ۵ پرتو دهی شده تا دز حدود  $10/3 \text{ MGy}$  درون قفسه تاریک به مدت ۴۰ روز

### بحث و نتیجه گیری :

نتایج این پژوهش نشان داد راکتور تحقیقاتی تهران به خوبی می تواند برای بهبود رنگ سنگ های جواهراتی مورد استفاده قرار گیرد به ویژه در زمان خاموشی راکتور، می توان از پتانسیل پرتو دهی گامای راکتور بهره جست. مطالعات انجام شده بر نمونه های بریل نشان داد که با پرتو دهی گاما می توان بسته به ناخالصی موجود در نمونه سنگ ها رنگ های متنوعی از سبز و نیز آکوامارین را در آنها ایجاد کرد. در مورد سنگ بریل، در صورتیکه سنگ در مقابل نور مستقیم آفتاب قرار نگیرد، ثبات رنگ خود را حفظ می کند و در صورتیکه مقابل اشعه UV قرار گیرد، رنگ آن به زرد تغییر می یابد.

### مراجع :

- 1- Kory Linton, Aaron Selby, Yonathan Reches, Geoffrey Deichert, Kurt Terrani ,Vanderbilt University Gamma Irradiation of Nano-modified Concrete B, 2017
- 2- Gamma Irradiation Facility at HFIR | Neutron Science at ORNL
- 3- <https://www.rsec.psu.edu/About.aspx>
- 4- K. Ambroztc, V. Radulovic and L. Snoj, Gamma irradiation in JSI TRIGA reactor
- 5- Tatsuo Shikama, Kentaro Toh, Shinji Nagata, Bun Tsuchia, Mchinori Yamauchi', Takeo NIS1-11TANI', Tetsuya Suzuki, Keiji Okamoto, Naoki Kubo, Masahiro Isfhhara 2, Tsunerni Kakuta', Optical Fast Neutron and Gamma-ray Detection by Radioluminescence, JAERI, 2004
- 6- Giovanna L. C. de Lima and Fernando S. Lameira, Color change of gemstones by exposure to gamma ray, 2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015, São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015
- 7- Danielle Gomides Alkmim et al. FTIR study of aquamarines after gamma irradiation, heat treatment and electrodiffusion. RME, Int Eng J. 70, 289 (2017)