



## محاسبه اکتیویته سنگ قیمتی توپاز پس از پرتودهی در راکتور تحقیقاتی تهران

گلشنیان<sup>۱</sup>، محدثه<sup>۱\*</sup> - غلامزاده<sup>۱</sup>، زهره<sup>۱</sup> - جزء وزیر، عطیه<sup>۱</sup> - عزتی، ارسلان<sup>۱</sup>

۱ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، پژوهشکده راکتور

### چکیده

در این تحقیق به محاسبه و بررسی میزان ایمنی سنگ های پرتودهی شده توپاز خالص و ناخالص با استفاده از کد شبیه سازی مونت کارلو MCNPX پرداخته شده است. نتایج حاصل از این محاسبات نشان می دهد توپاز خالص پس از پرتودهی کاملا ایمن است که این موضوع در توافق با سایر مطالعات انجام شده توسط سایر محققان است. از طرفی سنگ توپاز حاوی ناخالصی های Sc, Ta و Fe با اکتیویته بالایی که دارند برای بهسازی و استفاده در صنعت جواهر سازی در زمان کوتاه-مدت پس از پرتودهی مناسب نمی باشد. همچنین، ناخالصی های Sc و Ta با صرف یک زمان خنک شونده در حدود ۵/۵ سال و Mn و Co با صرف یک زمان خنک شونده در حدود ۱۰۰ روز می توان سنگ را به حالت ایمن ( $74 < Bq/g$ ) و قابل عرضه در بازار رساند. **کلید واژه:** سنگ توپاز خالص، سنگ توپاز ناخالص، اکتیویته سنگ توپاز، کد MCNPX، رادیو ایزوتوپ های تولید شده در توپاز

### Activity calculation of Irradiated Topaz at Tehran Research Reactor

Golshanian, Mohadeseh<sup>1</sup>; Gholamzadeh, Zohreh<sup>1</sup>; Jozevaziri, Atiyeh<sup>1</sup>; Ezati, Arsalan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nuclear Science and Technology Research Institute of Iran, Atomic Energy Organization, Tehran

#### Abstract

The radioactivity safety levels of irradiated pure and impure Topaz gemstone have been investigated using Monte Carlo simulation with MCNPX code. The results show that the pure Topaz is safe of the radioactivity point of view, which has good agreement with other studies. The impure Topaz included Ta, Sc and Fe have high radioactivity levels after radiation exposure, which is not proper for gemstone treatment in the jewelry industry. In order to full fill activity restriction (74 Bq/g) for the gemstones involved Ta and Sc about 5.5 years and Mn and Co near 100 days cooling time has been required.

**Keywords:** Pure Topaz, Impure Topaz, Activity, MCNPX, Radioisotopes of Topaz

### مقدمه

سنگ های قیمتی سنگ هایی هستند که بدلیل زیبایی، درخشندگی و ساختار کریستالی در بازار جواهرات سراسر جهان از محبوبیت تجاری ویژه ای برخوردارند. اما بدلیل استخراج سنگ ها از معادن در طبیعت باید در جهت بهبود ظاهر، کیفیت و ارزش آن بهسازی انجام شود [۱-۳]. در فرآیند بهسازی رنگ برخی از سنگ های قیمتی با پرتودهی پرنرنگ تر یا تحت تغییر قرار می گیرد. یکی از روش های بهسازی پرتودهی با ذراتی



نظیر الکترون، گاما و نوترون است. در این میان سنگ قیمتی توپاز متشکل از هیدروکسید فلوراید سیلیکات آلومینیوم با ترکیب شیمیایی  $Al_2SiO_4(F,OH)_2$  از جمله سنگ هایی است که بدلیل شفافیت عالی، درجه سختی بالا و صرفه اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است [۳، ۴]. لازم به ذکر است که الماس براگانزا متعلق به خانواده سلطنتی پرتقال همان توپاز سفید رنگ است. این سنگ به رنگ های سفید بیرنگ، زرد، زرد روشن، صورتی، مایل به آبی و سبزرشن در طبیعت وجود دارد [۴]. یکی از روش های بهسازی سنگ های توپاز پرتودهی با نوترون در راکتور می باشد [۱، ۴-۶]. توپاز بیرنگ پس از پرتودهی به رنگ های آبی آسمانی، آبی سوئیس و آبی لندن بهسازی می شود. در این بین آبی لندن که به رنگ آبی تیره تر است دارای ارزش قیمتی بالاتری است [۴]. در شکل (۱) نمونه ای از سنگ های توپاز پرتودهی شده با نوترون دیده می شود. در میان ذرات مورد استفاده در بهسازی توپاز نوترون های تند بدلیل یونسازی قویتری که دارد در ایجاد رنگ تیره تر در توپاز موفق تر است. از جمله مهمترین مسائلی که باید در پرتودهی نمونه سنگ های توپاز در نظر گرفته شود، بررسی ایمنی سنگ های پرتو دیده از دیدگاه فیزیک بهداشت است [۲]. سنگ های متشکل از رادیو نوکلید های پرتوزا زمانی قابلیت عرضه در بازار مصرف را خواهند داشت که از لحاظ پرتو دهی کاملاً ایمن شوند. راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان یکی از چشمه های نوترونی فعال در ایران با قابلیت ایجاد نوترون تند است [۷]. لذا مطالعه بر روی امکان سنجی استفاده از این چشمه در پرتو دهی سنگ های قیمتی و محاسبه میزان اکتیو بودن آن پس از پرتو دهی دارای اهمیت است. بنابر این مطالعه پیشرو به بررسی میزان اکتیویته رادیو ایزوتوپ های احتمالی فعال شده موجود در نمونه توپاز خالص و ناخالص می پردازد. کلیه محاسبات با کد MCNPX [۸] انجام شده است.



شکل (۱): نمونه ای از سنگ های توپاز پرتودهی شده با نوترون.

### روش کار

۱- شبیه سازی قلب، ظرف پرتودهی آلومینیومی محتوی توپاز با استفاده از کد MCNPX راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور استخری با توان اسمی ۵ مگاوات است. قلب راکتور در عمقی در حدود ۸ متری آب استخر قرار دارد. شکل (۲) هندسه شبیه سازی شده قلب و ظرف آلومینیومی حاوی سنگ توپاز را با استفاده از کد MCNPX نشان می دهد. به منظور بررسی شدت شار سه گروهی نوترون در کانال های

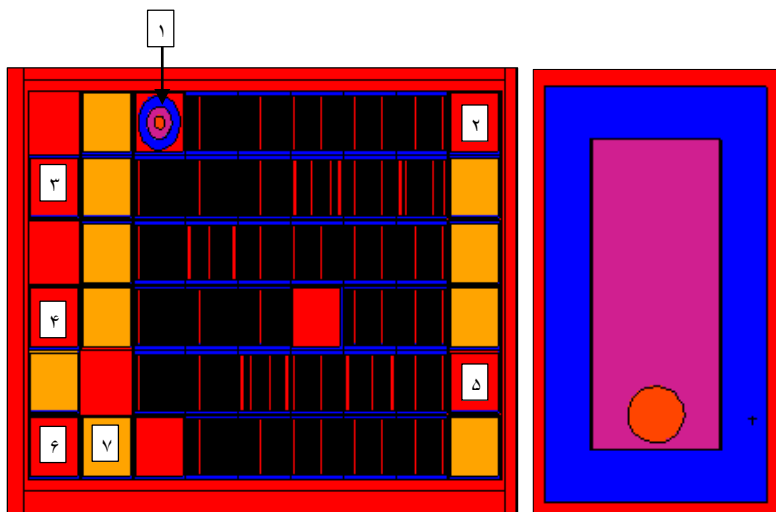
پرتو دهی قلب از تالی شماره ۴ و کارت E4 استفاده شده است. رابطه (۱) نحوه محاسبه این شار را نشان می دهد.

$$\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\varphi(E)$  شار نوترون  $E_1$  و  $E_2$  کمترین و بیشترین میزان گستره انرژی می باشد [۸]. ظرفی آلومینیومی با شکل استوانه ای به ارتفاع ۱۲ سانتی متر و شعاع ۳/۲۵ با پوشش داخلی دو میلی متر کادمیوم شبیه سازی شد. شکل (۲) نمایی از این ظرف را نشان می دهد. همچنین سنگ توپاز کروی شکل و شعاع یک سانتی متر در داخل ظرف در نظر گرفته شده است.

## ۲- روش محاسبه اکتیویته و دز

برای محاسبه میزان اکتیویته و ویژه رادیو ایزوتوپ های سنگ توپاز از کارت BURN در کد MCNPX نسخه ۲/۶ استفاده شد. این کارت شامل TIME بازه زمانی بر حسب روز، MAT نوع ماده مورد نظر برای پرتو دهی، POWER میزان قدرت راکتور به مگاوات، MATVOL حجم کل مواد پرتو دهی بر حسب متر مکعب و... می باشد.



شکل (۲): نمایی از شبیه سازی قلب، کانال های پرتو دهی، و ظرف پرتو دهی آلومینیومی حاوی توپاز.

برای محاسبه اکتیویته شرایط زیر در نظر گرفته شد:

۱- سنگ توپاز خالص

۲- سنگ توپاز ناخالص

در حالت خالص، سنگی توپاز با چگالی ۳/۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شد. براساس مطالعات صورت گرفته سنگ توپازی برای بهسازی مناسب است که ناخالصی های Fe, Mn, Ta, Sc و



Co در آن نباشد [۴]. لذا در حالت دوم به محاسبه میزان اکتیویته و دز ناخالصی های مذکور پرداخته شد. جدول (2) میزان ناخالصی های اندازه گیری در توپاز سفید رنگ نشان می دهد [۴]. برای محاسبه دز از کارت F<sub>4</sub> و DE<sub>4</sub> برای محاسبه دز رادیو ایزوتوپ های تولید شده در توپاز پرداخته شد. و در نهایت با استفاده از رابطه زیر به بررسی زمان ایمن شدن رادیو ایزوتوپ های فعال شده در سنگ مورد پرتو دهی در محاسبات پرداخته شد:

$$A = A_0 \text{EXP}(-\lambda / t_{1/2}) \quad (2)$$

جدول (1) ناخالصی های اندازه گیری شده در توپاز بیرنگ

ایزوتوپ					
Ta	Fe	Co	Mn	Sc	
۷/۰	۵۰/۱۲	۰/۰۷	۶۳/۶	۲۸۷۲۰	درصد ناخالصی

## نتایج

جدول (۱) نتایج حاصل از محاسبه شار نوترون را نشان می دهد. کانال پرتو دهی ۱ بدلیل بالاتر بودن انرژی نوترون، برای قرارگیری ظرف پرتو دهی آلومینیومی حاوی توپاز انتخاب گردید.

جدول (۲) شار سه گروهی نوترون در کانال های پرتو دهی در راکتور

E <sub>n</sub> < ۰/۶۲۵	E <sub>n</sub> > ۰/۶۲۵	E <sub>n کل</sub>	کانال
× ۱۰ <sup>۱۳</sup>	× ۱۰ <sup>۱۳</sup>	× ۱۰ <sup>۱۳</sup>	پرتو دهی
۳/۰	۲/۱۰	۵/۱۴	۱
۲/۲۵	۱/۲۲	۳/۴۷	۲
۱/۴۳	۰/۴۸	۱/۹۱	۳
۱/۷۵	۰/۶۷	۲/۴۳	۴
۲/۸۷	۱/۷۸	۴/۶۶	۵
۱/۱۳	۰/۳۴	۱/۴۷	۶
۲/۹۵	۲/۰۵	۵/۰	۷

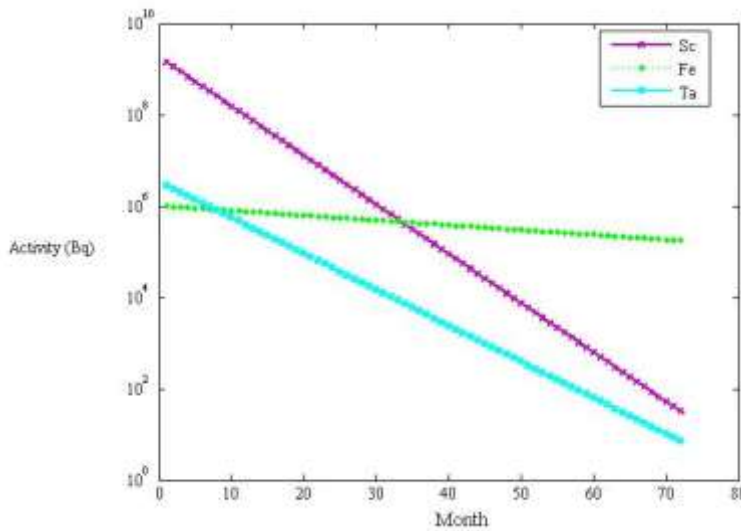
بر اساس محاسبات کارت BURN در حالت (۱)، هنگامی که توپاز به صورت خالص در نظر گرفته می شود هیچ ایزوتوپ فعالی در آن پدید نمی آید. از طرفی هنگامیکه هریک از ناخالصی های Ta, Mn, Sc و Fe, Co به سنگ خالص اضافه می شود اکتیویته سنگ از صفر خارج می شود. میزان نیمه عمر و اکتیویته سنگ های حاوی ناخالصی های مذکور در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین مدت زمانی که ممکن است سنگ حاوی



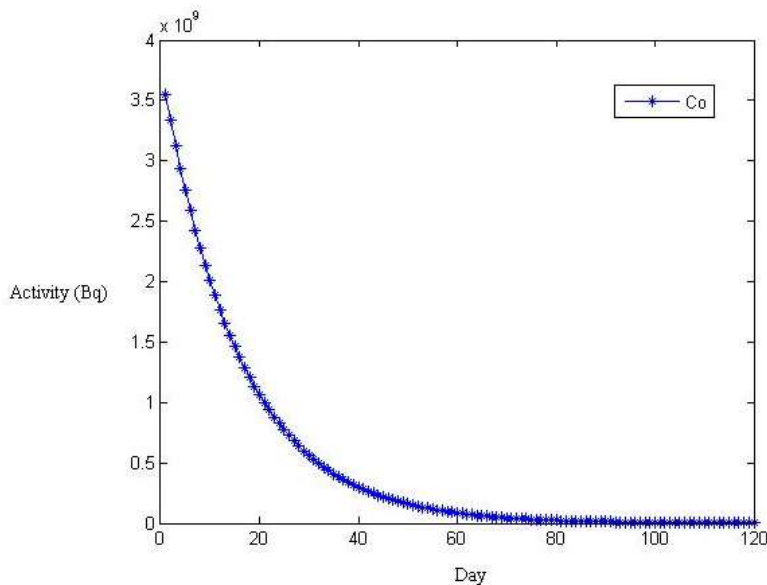
ناخالصی ایمن شود در شکل های (۳) و (۴) مربوط به رادیو ایزوتوپ Sc, Ta, Fe و Co به ترتیب نشان داده شده است.

جدول (۳) رادیو نوکلید های ناخالص توپاز و اکتیویته ویژه پس از دو روز پرتو دهی در توان ۴ MW

ایزوتوپ	نیمه عمر	دز (mSv/h)	اکتیویته ویژه $\times 10^{14}$ (Bq/g)
Ta-۱۸۲	روز ۱۱۴/۴۳	۰/۰۲۷	۲/۳۱
Fe-۵۵	سال ۲/۷۳	۰/۰۰۱۱	۰/۸۸
Co-۳۱	دقیقه ۱۵۷/۳	۰/۰۲۹	۱۴۳۰۰
Mn-۵۵	پایدار	۰	۰
Sc-۴۶	روز ۸۳/۷۹	۱۲۸	۱۲/۵



شکل (۳): اکتیویته ایزوتوپ های اسکاندیوم، آهن، تالیوم پس از دو روز پرتو دهی.



شکل (۴): اکتیویته ایزوتوپ کبالت در طی دو روز پرتودهی

### بحث و نتیجه گیری

مطالعات بهسازی رنگ توپاز استخراج شده از معادن برای افزایش بها و میزان درخواست در بازار تجاری جواهر سازی رو به رشد است. راکتور تحقیقاتی تهران با قدرت ۵ مگاوات دارای قابلیت ایجاد نوترون های تند است. بنابر این در این مطالعه به بررسی و امکانسنجی تئوری استفاده از این چشمه تحقیقاتی برای بهسازی توپاز سفید رنگ پرداخته شده است. به این منظور اکتیویته سنگ توپاز خالص و ناخالص را محاسبه نمودیم. نتایج حاصل از پرتودهی سنگ توپاز خالص نشان می دهد که کاملاً در توافق با نتایج سایر مطالعات است و پرتودهی این سنگ منجر به ایجاد ناخالصی های رادیواکتیو بلند-عمر نخواهد گردید [۴]. لازم به ذکر است، سنگ خالص از نظر ایمنی فیزیک بهداشت کاملاً قابل مصرف در صنعت جواهر سازی است. در حالت بعدی ناخالصی های  $Co$  و  $Fe, Mn, Ta, Sc$  اضافه شد. نتایج محاسبات انجام شده در این کار نشان داد سنگ توپاز حاوی ناخالصی منگنز، بعد از پرتو دهی دارای اکتیویته صفر بوده و ایمن می باشد. از طرفی سنگ توپاز حاوی ناخالصی های  $Fe$  و  $Ta, Sc$  با اکتیویته بالایی که دارند برای بهسازی و استفاده در صنعت جواهر سازی در زمان کوتاه-مدت پس از پرتو دهی مناسب نمی باشد؛ لازم به ذکر است در مورد ناخالصی های  $Ta$  و  $Sc$  صرف یک زمان خنک شونده حدود ۵/۵ سال می تواند سنگ را به حالت ایمن  $(A < 70 \text{ Bq/g})$  و قابل عرضه در بازار برساند. همچنین سنگ توپاز حاوی ناخالصی  $Co$  پس حدود صد روز خنک شونده برای ارائه به مصرف کننده ایمن است. بنابراین سنگ های توپاز ضمن حفظ ایمنی فیزیک بهداشت مصرف کننده، می توانند در بازار جواهرات عرضه گردند. لازم به ذکر است، با استفاده از این چشمه





نوترون موجود در کشور علاوه بر آنکه می‌توان بر کیفیت و بهای سنگهای توپاز افزود، همچنین کاربردهای صنعتی راکتور تحقیقاتی تهران را فعال نمود.

### مراجع

- [۱] N. M. Mohamed and M. Gaheen, "Design of fast neutron channels for topaz irradiation," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 310, pp. 429-437, 2016.
- [۲] R. Crowningshield, "Irradiated topaz and radioactivity," *Gems & gemology*, pp. 215-217, 1981.
- [۳] R. D. Pollak, "Method of processing gemstones to enhance their color," ed: Google Patents, 1992.
- [۴] S. S. M. S. Salama, "" Study on Properties of Some Treated Gemstones," Benha University, 2011.
- [۵] K. Krambrock, L. Ribeiro, M. Pinheiro, A. Leal, M. de BC Menezes, and J.-M. Spaeth, "Color centers in topaz: comparison between neutron and gamma irradiation," *Physics and Chemistry of Minerals*, vol. 34, pp. 437-444, 2007.
- [۶] W. Ying, "Research on radiation-induced color change of white topaz," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 63, pp. 223-225, 2002.
- [۷] TRR-Rep, "Safty analysis of Tehran research reactor," 2009.
- [۸] J. F. Briesmeister, "MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code," *Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory*, 2000.