



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شماره ۴، ویژه‌نامه پرتوهای یونساز، ۱۳۹۹، صفحه ۷۳-۷۸

پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یونساز و غیر یونساز (مهرماه ۱۳۹۷)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

## بررسی ضخامت مورد نیاز کسک سربی انتقال سوخت توریم پرتودیده بر حسب زمان‌های متفاوت مصرف سوخت و خنک‌شوندگی

زهره غلام‌زاده\*، عطیه جزء‌وزیری و سید محمد میروکیلی

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

تهران، سازمان انرژی اتمی، گروه ایمنی پرتوی، کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: cadmium\_109@yahoo.com

### چکیده

سوخت توریم به دلیل کاهش ذخایر اورانیوم جهان، فراوانی بیش‌تر آن در مقایسه با اورانیوم و نیز توانایی زاینده‌گی در راکتورهای حرارتی و سریع مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این کار، بررسی ایمنی پرتویی و میزان حفاظ‌سازی لازم برای نقل و انتقال سوخت توریمی پرتودیده در راکتور تحقیقاتی تهران هدف قرار گرفته است. برای محاسبات طیف گامای سوخت پرتودیده و دز سوخت قرار گرفته درون کسک از کدهای محاسباتی ORIGEN و MCNPX استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد در مقایسه با سوخت‌های اورانیومی مورد استفاده در راکتور تحقیقاتی تهران، سوخت توریمی مصرف شده به زمان‌های خنک‌شوندگی بیش‌تری قبل از نقل و انتقال توسط کسک سربی نیاز دارد. هم‌چنین ضخامت کسک مورد نیاز برای انتقال سوخت توریمی پرتودیده بیشتر از سوخت اورانیومی است.

کلیدواژگان: سوخت توریم مصرف شده، راکتور تحقیقاتی تهران، شبیه‌سازی توسط کد MCNPX، ضخامت کسک سربی انتقال.

### ۱. مقدمه

<sup>۱۰۱۴</sup> تابش‌دهی نمودند. هم‌چنین این گروه طی انجام آزمایش‌ها و نیز محاسباتی توسط کد ORIGEN نشان دادند که مقدار دز در میله سوخت اکسید توریم به علت سهم عناصری همچون <sup>232</sup>U، <sup>228</sup>Th، <sup>224</sup>Ra، <sup>220</sup>Rn، <sup>216</sup>Po، <sup>212</sup>Pb، <sup>212</sup>Bi و <sup>208</sup>Tl موجود در توریم تابش دیده است [۴]. هم‌چنین به دلیل تجمع <sup>208</sup>Tl در سوخت توریمی که گامای ۲/۶ MeV گسیل می‌کند، طیف سوخت توریمی تابش دیده سخت‌تر از طیف سوخت اورانیومی خواهد بود [۵].

انرژی تا چند دهه آینده باشد. از این رو توسعه چرخه سوخت‌های پیشرفته برای حل مشکل ضروری می‌باشد [۱ و ۲]. هم‌چنین جرم بحرانی مورد نیاز <sup>233</sup>U حدود ۱۵ کیلوگرم، جرم بحرانی مورد نیاز <sup>235</sup>U حدود ۵۲ کیلوگرم و جرم بحرانی <sup>239</sup>Pu ۱۰ کیلوگرم است [۳]. گزارش‌های ثبت شده در مورد سوخت توریم پرتودیده نشان می‌دهد این سوخت هنگام نقل و انتقال به حفاظ‌گذاری بیش‌تر در مقایسه با سوخت اورانیوم پرتودیده نیاز دارد. در سال ۲۰۱۵ Srinivasan et al. سوخت اکسید توریم را به مدت ۵۰۸ روز در شار نوترون <sup>2</sup>n/s.cm<sup>2</sup>

باشد. به طور کلی برای جلوگیری از نقص سوخت، دمای پوشش سوخت درون کسک باید کمتر از  $400^{\circ}\text{C}$  و فشار درون کسک کمتر از  $90\text{ MPa}$  باشد. دز نواحی اشغال اطراف کسک باید کمتر از  $2\text{ mSv/h}$  باشد و دز تمام بدن نواحی مرزی ناحیه تحت کنترل برای عموم مردم کمتر از  $0.25\text{ mSv/y}$  باشد. آهنگ نشت گازهای رادیواکتیو باید کمتر از  $10^{-10}\text{ Pa/cm}^3\cdot\text{s}$  باشد. ضریب تکثیر موثر کسک باید کمتر از  $0.95$  باشد. همچنین تمام محاسبات و بررسی ها باید در شرایط معمولی، غیر معمولی و حادثه در SAR کسک ارائه گردد [۶-۸].

با توجه به مزایای استفاده از سوخت توریم و نیز چالش های دز سوخت توریمی پرتودیده، در این کار، ضخامت مورد نیاز کسک سربی انتقال سوخت توریمی پرتودیده در راکتور تحقیقاتی تهران به روش شبیه سازی بررسی خواهد شد.

### روش محاسبات

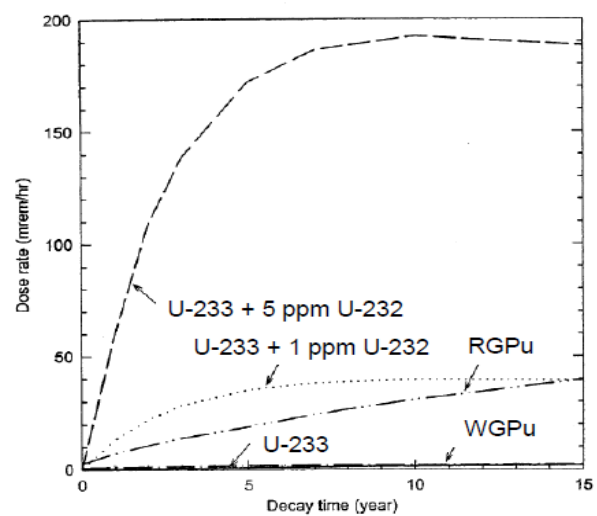
#### ۱.۱. شبیه سازی با کد ORIGEN

کد ORIGEN 2.1 یک کد کامپیوتری Point-depletion

برای محاسبات واپاشی مواد رادیواکتیو و مورد استفاده در شبیه سازی چرخه های سوخت هسته ای است که در آزمایشگاه ملی ORNL اوائل دهه ی ۱۹۷۰ توسعه داده شده است. این کد برای راکتورهای موجود، از جمله راکتورهای تحت فشار، راکتورهای آب جوشان، راکتورهای زاینده نمک مذاب و راکتورهای دوتریم-اورانیوم استفاده می شود [۹].

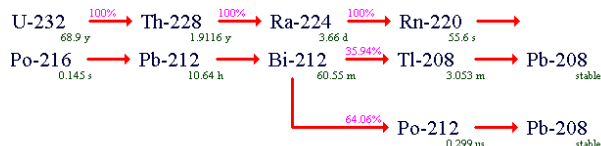
در ابتدا مصرف دسته های سوخت اکسید توریم در زمانهای مختلف و توان میانگین  $4\text{ MW}$  با استفاده از کد ORIGEN محاسبه گردید. طیف فوتون دسته های سوخت مصرف شده بر حسب زمان مصرف متفاوت (MWD متفاوت) و نیز زمانهای خنک شونده متفاوت بررسی شد.

لازم به ذکر است در سوخت توریمی مصرف شده به دلیل واپاشی رادیوایزوتوپ های مختلف به  $^{232}\text{U}$  دز دسته سوخت در زمان خنک شونده به کندی کاهش می یابد. طبق مطالعات انجام شده سایر محققان، در شکل ۱ مقایسه میزان حضور  $^{232}\text{U}$  درون سوخت و تاثیر آن بر دز دسته سوخت مقایسه شده است. همچنان که ملاحظه می گردد در صورت تغییر میزان  $^{232}\text{U}$  از  $1\text{ ppm}$  به  $5\text{ ppm}$  دز بر حسب زمان خنک شونده بسیار بیش تر خواهد بود.



شکل (۱): تاثیر تجمع رادیوایزوتوپ اورانیوم-۲۳۲ بر دز دسته سوخت توریمی [۴].

در زنجیره واپاشی  $^{233}\text{U}$  به خوبی مشاهده می شود تجمع  $^{212}\text{Po}$  و  $^{208}\text{Tl}$  بر حسب زمان خنک شونده سوخت توریمی مصرف شده زیاد می گردد. این موضوع باعث می شود دز دسته های سوخت توریمی مصرف شده در مقایسه با سوخت اورانیومی مصرف شده به کندی بر حسب زمان خنک شونده کاهش یابد.

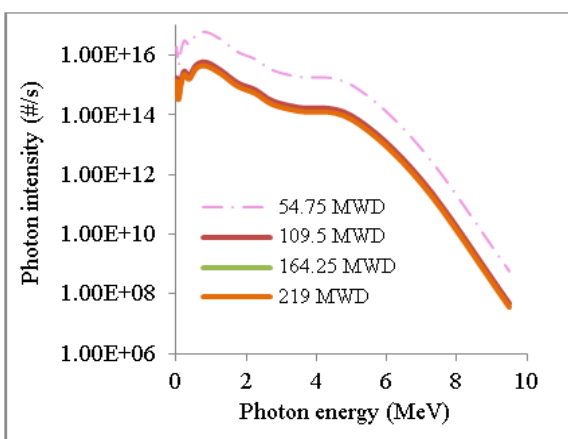


برای انتقال سوخت های مصرف شده الزاماتی وجود دارد و کسک انتقال طراحی شده باید دارای ویژگی های به شرح زیر

به منظور محاسبه دز محوری، آشکارسازهای گایگر مولر در موقعیت های مکانی مطابق شکل ۲ قرار داده شدند. ماده آشکارساز هوا و حجم آن مطابق حجم حساس آشکارسازهای موجود تعریف گردید همچنین یک آشکارساز بر روی درب کسک قرار گرفته است. ابعاد حجم حساس آشکارساز های استوانه ای  $4/5 \times 18/5$  cm است. برای انجام محاسبات از ضرایب تبدیل شار به دز ICRP 21 استفاده شد. از تالی F4 به همراه کارت های DE/DF موجود در کد MCNPX برای محاسبه دز قرائت شده آشکارسازها استفاده شد.

### ۳. نتایج محاسبات

در شکل ۴ طیف فوتون یک مجتمع سوخت اکسید توریم بر حسب مقدار مصرف متفاوت (MWD متفاوت) بلافاصله پس از پایان سیکل (پایان پرتو دهی) ارائه گردیده است.

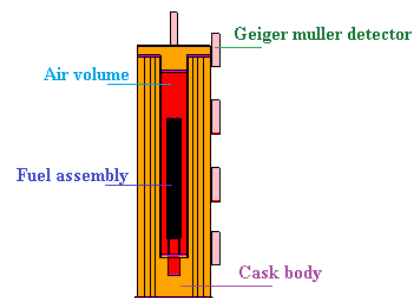


شکل (۴): مقایسه طیف فوتون دسته سوخت توریم پرتو دیده با مصرف متفاوت

همچنان که در شکل ۴ ملاحظه می گردد، برای دسته های سوخت با مصرف تقریباً بیش از  $100$  MWD طیف فوتون بلافاصله پس از پایان پرتو دهی چندان با یکدیگر متفاوت نیست. حال آنکه در زمان های متفاوت خنک شونندگی به دلیل تغییر غلظت رادیوایزوتوپ های گسیلنده گاما، تفاوت طیف دسته های سوخت با مصرف متفاوت محسوس تر خواهد شد (شکل ۵).

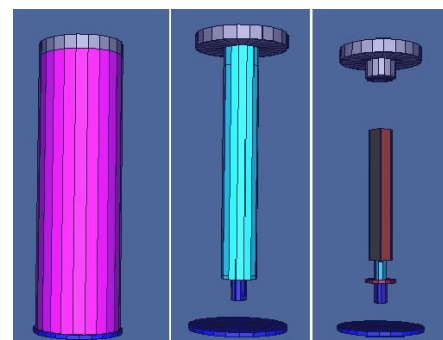
### ۲.۲. شبیه سازی با کد MCNPX

کد MCNPX قادر به ترابرد  $34$  ذره به روش مونته کارلو و نیز شبیه سازی انواع موضوعات مرتبط با راکتورهای هسته ای، شتاب دهنده ها، بررسی تولید رادیوایزوتوپها، تصویربرداری های نوترون و گاما و بسیاری از موارد دیگر است [۱۰]. در این کار، با استفاده از طیف فوتون استخراج شده از کد ORIGEN که به عنوان چشمه در ورودی کد MCNPX تعریف می گردد دز دسته های سوخت توریم بر روی سطح کسک سربی مدل شده توسط کد MCNPX در زمانهای خنک شونندگی متفاوت و نیز مصرف سوخت متفاوت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. همچنین ضخامتهای مختلف کسک سربی برای انتقال دسته های سوخت توریمی پرتو دیده بحث و بررسی گردید. در شکل ۲ یک مجتمع سوخت توریمی درون کسک حمل و نقل شبیه سازی شده است.

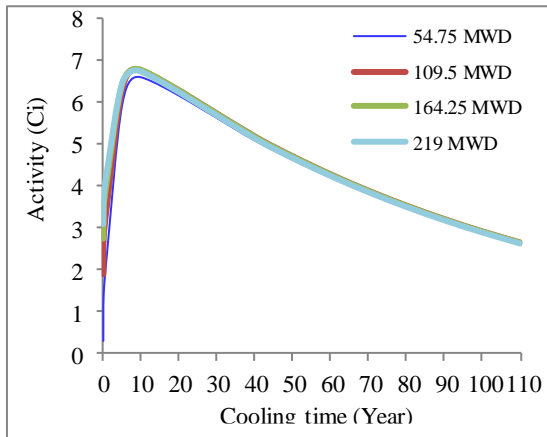


شکل (۲): شماتیک دسته سوخت مدل شده در کسک حمل و نقل سربی.

در شکل ۳ نمای سه بعدی کسک مدل شده مشاهده می گردد.

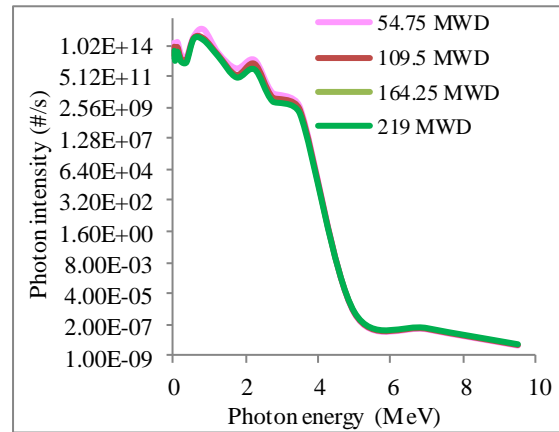
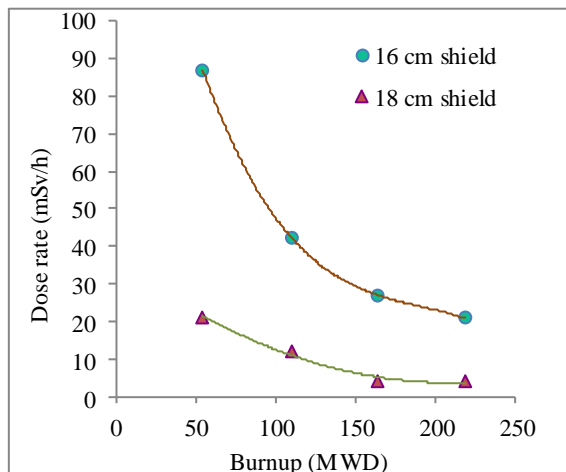


شکل (۳): شماتیک سه بعدی کسک مدل شده، از سمت چپ به ترتیب: بدنه کسک، بدنه کانال قرارگیری سوخت و مجتمع سوخت.



شکل (۶): مقایسه تجمع  $^{208}\text{Tl}$  در دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت

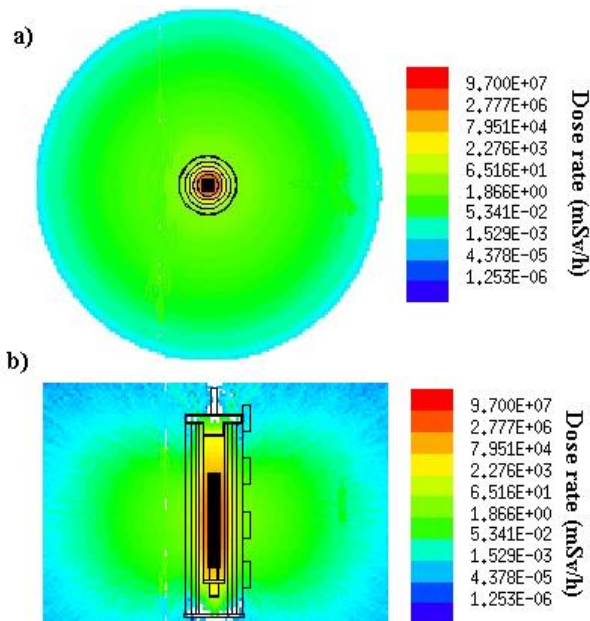
لازم به ذکر است سوخت های اورانیومی راکتور تهران با مصرف ۱۰۰ MWD (مصرف ۰.۵۴٪) بعد از حدود ۳ ماه با استفاده از کسک سربی با ضخامت ۱۶ cm قادر به جابجایی هستند و دز بیشینه سطح کسک کمتر از ۲ mSv/h است [۱۱]. در شکل ۷ مقایسه دز بیشینه بدنه کسک که دقیقاً مقابل وسط دسته سوخت مصرف شده است پس از ۶ ماه خنک شونده بر حسب ضخامت دیواره کسک سربی نشان داده شده است. طبق این شکل، ضخامت ۱۶ cm برای انتقال هیچ یک از دسته های سوخت با مصرف متفاوت مناسب نمی باشد ولی ضخامت ۱۸ cm می تواند برای انتقال دسته های سوخت مصرف شده ۱۶۴/۲۵ MWD و ۲۱۹ MWD مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۵): مقایسه طیف فوتون دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت پس از حدود ۶ ماه خنک شونده

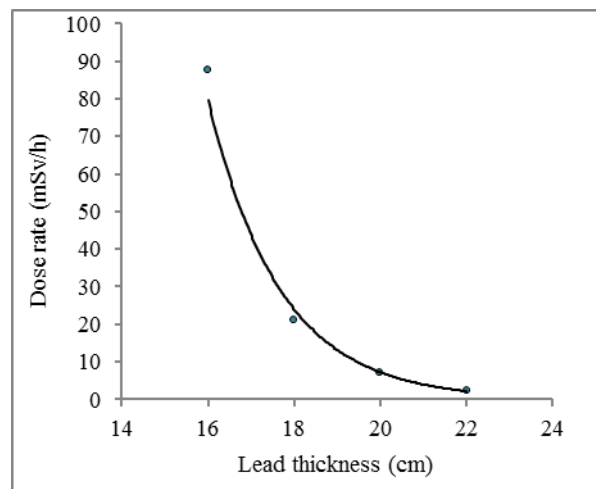
در واقع به تعادل رسیدن هریک از رادیوایزوتوپهای مهم گسیلنده گاما ذکر شده در بخش مقدمه در سوخت توریم در زمانهای مصرف متفاوت بر طیف و دز دسته سوخت توریم در زمانهای خنک شونده متفاوت تاثیرگذار خواهد بود.

همچنانکه اشاره شد یکی از رادیوایزوتوپهای مهمی که زمان خنک شونده و دز سوخت توریم را با سوخت اورانیوم پرتودیده متفاوت می کند  $^{208}\text{Tl}$  است که تجمع آن در سوخت توریم پرتودیده و میزان تولید آن بر طیف فوتون مجتمع سوخت مصرف شده و نیز بر دز دسته سوخت مصرف شده بسیار موثر است. چنانچه شکل ۶ نشان می دهد، غلظت رادیوایزوتوپ  $^{208}\text{Tl}$  تولید شده در سوخت های با مصرف بیشتر اندکی بیشتر است ولی در مورد همه آنها پس از زمان خنک شونده، تجمع  $^{208}\text{Tl}$  درون سوخت به دلیل واپاشی رادیوایزوتوپهای دیگر به آن در حال افزایش است و پس از ۱۰ سال خنک شونده سوخت مصرف شده غلظت این رادیوایزوتوپ روند کاهشی از خود نشان می دهد. این موضوع برآورد می کند که دز سوخت توریمی مصرف شده بر حسب زمان خنک شونده با آهنگ کندتری نسبت به سوخت اورانیومی مصرف شده کاهش یابد.



شکل (۷): ضخامت سرب مورد نیاز بدنه کسک برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف متفاوت.

همچنین شکل ۸ نشان می دهد برای دسته های سوخت دارای مصرف کمتر که رادیوایزوتوپهای گسیلنده گاما در اثر واکنش های تعادلی دیگر نظیر جذب از بین نرفته اند، در زمان خنک شونددگی ۶ ماه لازم است ضخامت بدنه کسک انتقال تا حدود ۱۸ cm افزایش یابد. این موضوع وزن کسک را از ۲/۴۷ تن به ۳/۲۲ تن افزایش می دهد.

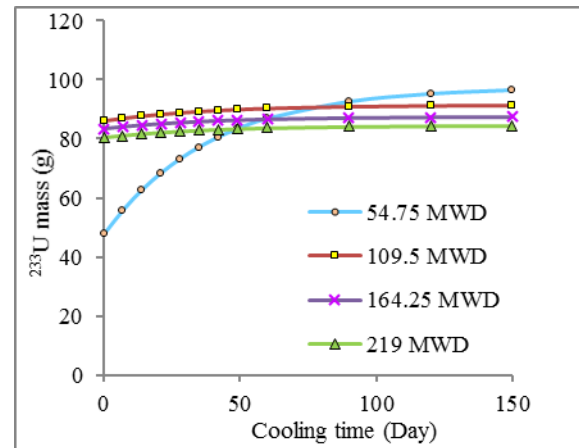


شکل (۸): ضخامت سرب مورد نیاز بدنه کسک برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف ۵۴/۷۵ MWD.

شکل (۹): توزیع دز اطراف کسک سربی با ضخامت ۱۶ cm برای انتقال دسته سوخت توریم پرتودیده با مصرف ۵۴/۷۵ MWD و پس از ۶ ماه خنک شونددگی. محاسبات نشان می دهد با افزایش ضخامت کسک به ۲۲ cm دز بیشینه بدنه کسک دربردارنده سوخت توریم پرتودیده با مصرف ۵۴/۷۵ MWD و خنک شونددگی ۶ ماه به ۲/۷ mSv/h می رسد که این مسئله وزن کسک را به ۴/۰۵ تن افزایش می دهد. شکل ۱۰ میزان تجمع اورانیوم-۲۳۳ را پس از زمان خنک شونددگی، درون مجتمع سوخت اکسید توریم با مصرف متفاوت نشان می دهد. محاسبات انجام شده نشان می دهد به دلیل واپاشی پروتاکتانیوم-۲۳۳ به اورانیوم-۲۳۳ میزان این رادیوایزوتوپ شکافا درون سوخت پرتودیده به مدت ۱ سال در راکتور تحقیقاتی تهران (۵۴/۷۵ MWD) به شدت در حال افزایش است به گونه ای که پس از ۱۵۰ روز از خنک شونددگی دسته سوخت، مقدار آن به حدود ۹۶ گرم می رسد.

شکل ۹ توزیع دز تا فاصله ۱ m از سطح کسک سربی با ضخامت ۱۶ cm برای حالت دسته سوخت توریم مصرف شده ۵۴/۷۵ MWD با خنک شونددگی ۶ ماه را نشان می دهد. طبق این شکل دز در فاصله ۱ m از سطح کسک به طور میانگین به کمتر از ۲  $\mu\text{Sv/h}$  کاهش می یابد درحالیکه در بدنه کسک به صورت میانگین حدود ۶۵ mSv/h است.

در جهان و نیز به دلیل زاینده‌گی در شار نوترون حرارتی، فوق حرارتی و سریع مورد توجه خاص چرخه سوخت هسته ای قرار دارد. محاسبات انجام شده در این کار نشان داد سوخت توریم مصرف شده در مقایسه با سوخت اورانیومی مصرف شده به حفاظ بسیار قوی تری برای نقل و انتقال توسط کسک های سربی مخصوص انتقال سوخت نیاز دارد. همچنین زمان تاخیر انتقال سوخت به منظور خنک شونده‌گی کافی حداقل ۲ برابر سوخت اورانیوم مصرف شده با حداکثر مصرف در راکتور تحقیقاتی تهران است (سوخت اورانیومی با مصرف ۰.۵۴٪). همچنین برای انتقال دسته های سوخت توریمی با مصرف کمتر از ۱۰۰ MWD نیاز است ضخامت کسک سربی مورد استفاده برای انتقال سوخت خنک شده به مدل ۶ ماه cm ۶ اضافه گردد که این موضوع وزن کسک را به ۲ برابر در مقایسه با کسک انتقال دسته سوخت اورانیومی پرتودیده با همین میزان مصرف افزایش می دهد.



شکل (۱۰): مقایسه تغییر غلظت  $^{233}\text{U}$  درون سوخت

توریم پرتودیده با مصرف متفاوت بر حسب زمان خنک شونده‌گی

لذا چنین دسته های سوختی با مصرف ۵۴/۷۵ MWD لازم است تا قبل از ۳ ماه به کسک های نگهداری خشک با تعداد زیاد دسته سوخت منقل نشوند زیرا می تواند خطر افزایش ضریب تکثیر موثر کسک به بیش از ۰/۹۵ را ایجاد کند.

#### ۴. نتیجه گیری

سوخت توریم به دلیل فراوانی بیشتر نسبت به ذخایر اورانیوم

#### ۵. مراجع

- [1] X.X. Li, X.Z. Cai, D.Z. Jiang, Y.W. Ma, J.F. Huang, C.Y. Zou, C.G. Yu, J.L. Han, J.G. Chen Analysis of thorium and uranium based nuclear fuel options in Fluoride salt-cooled High temperature Reactor, Prog. in Nucl. Energ. 78 (2015) 285-290.
- [2] J. Breza, P. Daržilek, V. Necas. Study of thorium advanced fuel cycle utilization in light water reactor VVER-440, Annal. of Nucl. Energ. 37 (2010) 685-690.
- [3] P. Srinivasan, S. Ganesan, D. N. Sharma, H. S. Kushwaha. Estimation of dose rates on the PHWR irradiated thorium oxide bundles based on BARC updated nuclear data, BARC Golden Jubilee DAE-BRNS National Workshop on Nuclear Data for Advanced Nuclear Systems, Nuclear Databases and Applications, NWND-2006, 8-11 November (2006).
- [4] W. Rosenstock, O. Schumann. Thorium for Nuclear Energy – a Proliferation Risk? Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT), (2013)
- [5] Perspectives on the Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle, NUCLEAR ENERGY AGENCY, (2015).
- [6] M. Bace, D. Grgic., Calculation of spent fuel storage cask parameters, Nuclear society of Slovenia, 2nd regional meeting, 11.Spe (1995).
- [7] K.A. Gruss, G. Hornseth, M.W. Hodges. U.S. Nuclear Regulatory Commission acceptance