

## بر آورد خطرات تابش نوترونهاي گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی IKIU با استفاده از کد MCNPX

ابطحی، سید محمد مهدی<sup>(۱)</sup>

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

### چکیده

هدف از این پژوهش تخمین دز معادل در ارگانهای مختلف کاربر دستگاه پلاسمای کانونی IKIU و همچنین تخمین ساعت کار مجاز کاربر با استفاده از روش مونت کارلو می باشد. به این منظور سیستم پلاسمای کانونی IKIU به همراه فانتوم ریاضیاتی ORNL با مشخصات منطبق بر شرایط واقعی شبیه سازی شده و نوترونهاي گداخت که از دستگاه گسیل می شوند در فضای آزمایشگاه و ارگانهای بدن کاربر ترابرد شد. مقادیر دز معادل در ارگانهای مختلف کاربر بدست آمد. حداکثر مقدار مجاز کار با دستگاه توسط کاربر ۴۱۶ شات در سال تخمین زده شد.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی؛ نوترون؛ دز معادل؛ فانتوم ORNL، MCNPX

### مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی از یک میله مسی به عنوان آند و چند میله مسی به عنوان کاتد که همگی در یک محفظه فولادی قرار دارند تشکیل شده است. این آند و کاتدها به یک خازن ولتاژ بالا متصل بوده که در هنگام تخلیه خازن صفحه جریان متحرکی را (به دلیل نیروی لورنتس) ایجاد کرده که در چند نانوثانیه در قسمت بالای آند فشرده شده و ایجاد تنگش می کند [۱]. در نتیجه تنگش و با توجه به گازی که در سیستم تزریق شده است این دستگاه طیف وسیعی از تابش های مختلف شامل نوترون، اشعه ایکس و یونهای سنگین را از خود گسیل می کند [۲-۴]. گسیل نوترون زمانی رخ می دهد که به سیستم گاز دوترون تزریق شود. در این حالت گداخت گرما هسته ای در زمان تنگش باعث گسیل نوترون می شود. اگرچه با توجه به اینکه دستگاه پلاسمای کانونی یک منبع پالسی و تمیز پرتو بوده و کاربردهای گسترده پژوهشی و صنعتی دارد، اما مساله ای که در کار با این دستگاه باید مورد توجه قرار گیرد، برآورد خطرات تابش برای پرسنل و در محیط آزمایشگاه می باشد.

هدف از این پژوهش برآورد دز معادل در ارگانهای مختلف کاربر دستگاه و همچنین تخمین مقدار کار مجاز کاربر می باشد. در این پژوهش از روش مونت کارلو برای ترابرد پرتوهای گسیلی و تخمین های مذکور استفاده شد. تمامی محاسبات با استفاده از کد محاسباتی MCNPX [۵] انجام شده است.

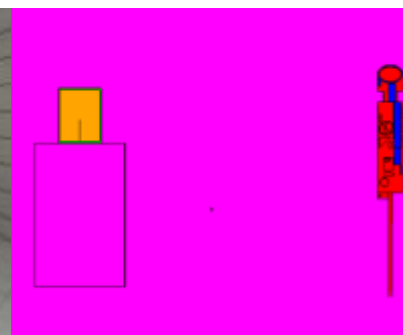
### مواد و روش ها

#### دستگاه پلاسمای کانونی IKIU

دستگاه پلاسمای کانونی IKIU که در شکل ۱ نمایش داده شده است، سیستمی با قابلیت ذخیره انرژی ۵ KJ می باشد. این سیستم دارای محفظه ای به ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و قطر ۳۱ سانتیمتر بوده و دیواره های محفظه فولادی به ضخامت ۱/۱ سانتیمتر می باشد.



شکل (۱) الف) دستگاه پلاسمای کانونی IKIU (ب) نمائی از چینش آند و کاتدها درون محفظه پلاسمای دستگاه دارای یک آند به قطر ۳۶/۶ میلی متر و ارتفاع ۱۷ میلی متر و همچنین شش میله مسی به عنوان کاتد به قطر ۰/۸ میلی متر و ارتفاع ۱۶/۶ میلی متر می باشد (شکل ۲). هندسه محفظه و میله های آند و کاتد دقیقا مطابق مشخصات دستگاه در شبیه سازی وارد شد.



ب

الف

شکل ۲- الف) کاربر دستگاه پلاسمای کانونی در مجاورت آن. ب) نمائی از فانتوم ریاضیاتی شبیه سازی شده در کنار دستگاه پلاسمای کانونی

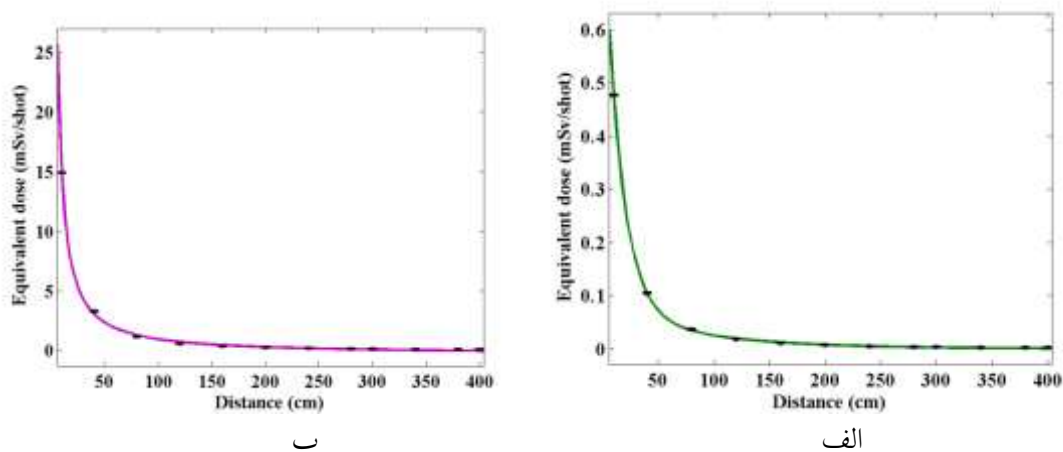
پیش از این نشان داده است که بهره نوترون (Y) دستگاه پلاسمای کانونی به صورت  $Y \sim E_0^b$  داده می شود، که در آن  $E_0$  انرژی ذخیره شده در دستگاه بوده و  $b$  عددی در بازه ۲ تا ۲/۴ می باشد [۶]. محدوده انرژی کاری دستگاه پلاسمای کانونی IKIU بین ۲/۲ تا ۲/۶ کیلوژول می باشد. بنابراین دستگاه پلاسمای کانونی IKIU می تواند بهره ای معادل  $4/8 \times 10^6$  تا  $1/5 \times 10^8$  نوترون به ازای هر شات داشته باشد. انرژی نوترونها گسیل شده  $2/45$  MeV که انرژی نوترون گداخت دوترون-دوترون است در نظر گرفته شد. پیش از نشان داده شده است گسیل نوترون از دستگاه پلاسمای کانونی دارای توزیع هگن فضائی نیست و بیشترین شار نوترون در بالای آند مشاهده شده است [۶]، اما در این پژوهش به عنوان یک تقریب دست بالا گسیل نوترون بصورت همگن و بدون جهت مرجح در نظر گرفته شد.

### فانتوم ریاضیاتی بدن انسان

به منظور شبیه سازی ترابرد ذرات و تخمین دز جذبی در ارگانهای مختلف با استفاده از روش مونت کارلو لازم است علاوه بر منابع پرتو بدن کاربر نیز به صورت عددی شبیه سازی شود. به این منظور از فانتوم ریاضیاتی تمام بدن ORNL [۷] استفاده شد. شکل ۲ نمائی از کاربر در مجاورت دستگاه و همچنین شبیه سازی هندسی فانتوم و سیستم پلاسمای کانونی را در فاصله ۲.۳ متری نمایش می دهد.

### نتایج

تغییرات دز جذبی بر حسب فاصله از جداره بیرونی محفظه دستتگاه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

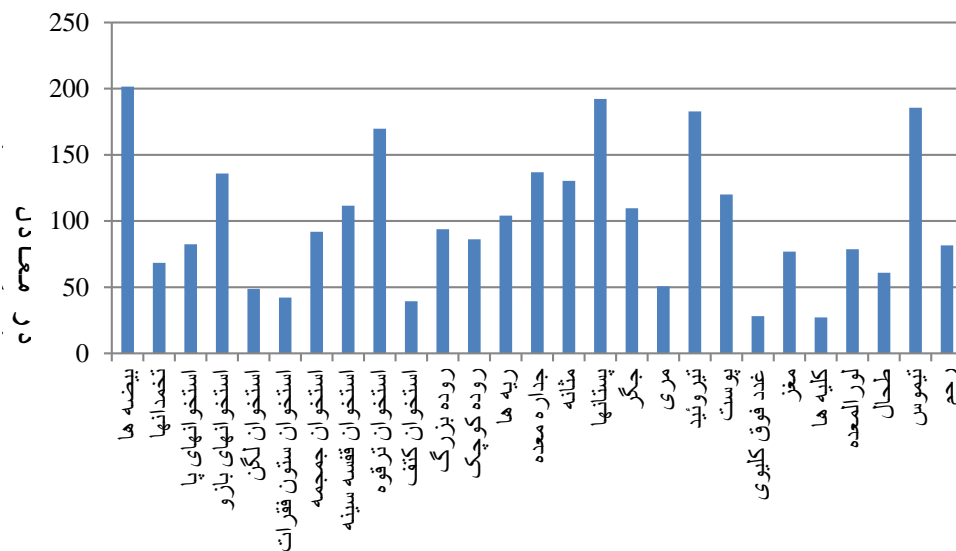


شکل ۳- تغییرات دز جذبی بر حسب فاصله از جداره بیرونی محفظه الف) برای بهره کمینه نوترون ب) برای بهره بیشینه (بهینه) نوترون. خطاها به دلیل بسیار کوچک بودن در شکل قابل مشاهده نیستند. معادله تغییرات دز معادل بر حسب فاصله برای بهره کمینه و بیشینه به ترتیب با روابط ۱ و ۲ نمایش داده می شود.

$$ED = 0.7895 \times e^{(-0.06593 \times d)} + 0.07667 \times e^{(-0.01162 \times d)} \quad (1)$$

$$ED = 24.67 \times e^{(-0.06598 \times d)} + 2.402 \times e^{(-0.01164 \times d)} \quad (2)$$

که در آن ED دز معادل بر حسب میلی سیورت و d فاصله از جداره محفظه بر حسب سانتیمتر می باشد. نتایج محاسبات مونت کارلو که نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است نشان می دهد که در مجاورت دستگاه برای هر شات دز نقطه ای بسیار بالاست، که حتی ممکن است در صورت عملکرد دستگاه در حالت بهینه در یک شات بیش از کل دز مجاز سالیانه (۲۰ mSv) توسط کاربر جذب شود. اگرچه با فاصله این دز به سرعت افت کرده و در مکان قرار گیری کاربر برای بهره کمینه و بیشینه نوترون به ترتیب به مقدار  $0.1 \pm 0.05$   $\mu$ Sv و  $0.15 \pm 0.01$  mSv افت می کند. مقادیر دز معادل در ارگانهای مختلف کاربری که در فاصله ۲۳۰ سانتیمتری دستگاه (مکان قرار گیری پشت کنسول) قرار دارد به ازای هر شات دستگاه، در شکل ۴ آورده شده است. محاسبات هم برای کاربر زن و هم برای کاربر مرد در نظر گرفته شده است. بنابراین ارگانهای هر دو جنس در جدول قابل مشاهده هستند. از نتایج شکل ۴ کاملاً آشکار است که ارگانهای مختلف کاربر سیستم پلاسمای کانونی در معرض تابش خطرناک نوترون قرار داشته و لازم است حد مجاز کار سالیانه با دستگاه تعیین شود و یا تدابیری مانند افزایش فاصله، حفاظ و یا سیستم ریموت برای دستگاه در نظر گرفته شود.



شکل ۴) دز معادل جذب شده در ارگانهای مختلف کاربر در پشت کنسول به ازای هر شات دستگاه پلاسمای کانونی برای بهره بیشینه نوترون

دز معادل مجاز سالیانه برای ارگانهای مختلف در جدول ۱ نمایش داده شده است [۸]. اگر شرایط از دید حفاظت در برابر اشعه با یک تقریب دست بالا بدترین حالت ممکن یعنی حالتی که عملکرد برای تمامی شات ها در حالت بیشینه گسیل نوترون تصور شود، با مقایسه شکل ۴ و جدول ۱ چنین نتیجه می شود که کاربر می تواند حداکثر ۲۵۰ شات در سال با دستگاه بزند. محاسبات نشان می دهد در صورت افزایش فاصله اپراتور به ۴ متر، دز بیضه ها به عنوان ارگانی که بیشترین دز را دریافت می کند به  $120 \pm 9 \mu\text{Sv}$  میکروسیورت در هر شات کاهش می یابد. یعنی کاربر می تواند ۴۱۶ شات در سال بزند. البته این موضوع با این فرض است که در تمام شاتها دستگاه با بیشینه بهره نوترون دهی کند که تقریب دست بالایی است. این در حالی است که اگر مقدار بهره نوترون بر حسب توان دوم انرژی تعیین شود مقدار دز معادل به شدت افت کرده به طوریکه هیچ محدودیتی برای کار با دستگاه برای کاربر وجود نخواهد داشت. اگرچه این واقعیت وجود دارد که دستگاه در شات های محدودی با حداکثر بهره، نوترون گسیل می کند، اما لازم است از دید حفاظت در برابر اشعه بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شود.

جدول ۱: مقادیر دز معادل مجاز سالیانه به تفکیک ارگانهای مختلف

ارگان مورد بررسی	دز معادل مجاز سالیانه (mSv)
استخوان، غدد، رحم	۵۰
غدد فوق کلیه، مثانه، مغز پستانها، روده کوچک، کلیه ها، جگر، مری، لوزالمعده، طحال، معهده، تیموس	۱۵۰
پاها، دستها، پوست	۵۰۰

## بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه توزیع دز نوترون حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی IKIU مورد بررسی قرار گرفت و همچنین مقدار دز معادل در ارگانهای مختلف کاربر دستگاه محاسبه شد. اگرچه در مجاورت دستگاه مقدار دز معادل به طور قابل توجهی زیاد بود اما با افزایش فاصله خیلی سریع مقدار دز معادل افت می کرد. در مکان قرارگیری کاربر تعداد مجاز ۲۵۰ شات در سال برای شرایط گسیل بهینه بدست آمد که با افزایش فاصله کنسول از دستگاه و یا استفاده از حفاظ مناسب می توان آنرا افزایش داد. این محتاطانه تر از نتیجه ای است که پیش از این توسط رحمانی بدست آمده بود [۹]. او برای سیستم پلاسمای کانونی ۲/۵ کیلوژول تعداد ۱۰

شات در روز را توصیه کرده بود. این اختلاف به این دلیل است که رحمانی دز مجاز کل بدن را بررسی کرده بود و مقدار مجاز آنرا ۲۰ میلی سیورت در سال در نظر گرفته بود. اما در پژوهش حاضر دز مجاز سالیانه برای تک تک ارگانها را مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه بر اساس بدترین حالت ممکن گزارش شد. همچنین در پژوهش رحمانی عملکرد بهینه سیستم در نظر گرفته نشده بود. در پژوهش دیگری که توسط نعمتی و همکاران به انجام رسید برای نوترونهای حاصل از اندرکنش D-T در دستگاه پلاسمای کانونی با  $10^{13}$  نوترون در هر شات، طراحی حفاظ ضروری گزارش شد و تاثیر حفاظ های مختلف بررسی شد [۱۰]. پژوهش حاضر نشان می دهد اگر تعداد شات ها برای یک کاربر از ۲۵۰ شات در سال تجاوز کند نیاز به طراحی حفاظ و یا افزایش فاصله ضروری به نظر می رسد اما برای شات های زیر این مقدار نیاز به حفاظ گذاری وجود ندارد. این اختلاف به دلیل اندرکنش مورد بررسی است که استفاده از اندرکنش D-T از اهداف دستگاه IKIU نیست. همچنین تعداد نوترونهای گسیلی در پژوهش نعمتی و همکاران  $10^9$  برابر مقدار مورد بررسی در این پژوهش بوده است.

## تقدیر و تشکر

این اثر با حمایت مالی دانشگاه بین المللی امام خمینی انجام گرفته است.

## مرجع ها

1. Mather, J.W., Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus. *Physics of Fluids*. **8**(2): 366-377, 1965.
2. Habibi, M., Angular distribution of ion beam emitted from a 3.5 kJ plasma focus device using different shapes of anodes. *Physics Letters A*. **380**(3): 439-443, 2016.
3. Talukdar, N., T.K. Borthakur, and N.K. Neog, Study of X-ray emission from plasma focus device using vacuum photodiode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. **726**: 139-144, 2013.
4. Szydowski, A., A. Banaszak, B. Bienkowska, I.M. Ivanova-Stanik, M. Scholz, and M.J. Sadowski, Measurements of fast ions and neutrons emitted from PF-1000 plasma focus device. *Vacuum*. **76**(2-3): 357-360, 2004.
5. Pelowitz, D., ed. MCNPX users manual. LA-CP-07-1473. Vol. Version 2.6.0. 2008, Los Alamos National Laboratory.
6. José, M., V. Felipe, P. Cristian, T.-S. Ariel, K. Daniel, and S. Leopoldo, Neutron energy distribution and temporal correlations with hard x-ray emission from a hundreds of joules plasma focus device. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. **57**(3): 035008, 2015.
7. Krstić, D. and D. Nikezić, Input files with ORNL—mathematical phantoms of the human body for MCNP-4B. *Computer Physics Communications*. **176**(1): 33-37, 2007.



8. Kesavachandran, C.N., F. Haamann, and A. Nienhaus, Radiation exposure of eyes, thyroid gland and hands in orthopaedic staff: a systematic review. *European Journal of Medical Research*. **17**(1): 1-10, 2012.
9. Rahmani, F., Dose Calculation for Radiation Safety Assessment of Plasma Focus 2.5 kJ. *Journal of Fusion Energy*. **35**(2): 378-384, 2016.
10. Nemati, M.J., R. Amrollahi, and M. Habibi, Analysis for Radiation and Shielding Dose in Plasma Focus Neutron Source Using FLUKA. *Journal of Fusion Energy*. **31**(3): 284-297, 2012.