

## ارزیابی میزان دز ناشی از نوترون در اطراف یک مولد نوترون DD/DT و طراحی حفاظ مناسب جهت ایستادن کاربر

حسین جراحی<sup>۱</sup> و یاسرکاسه ساز<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، تهران

<sup>۲</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

\* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: ykasesaz@aeoi.org.ir

### چکیده

مولدهای نوترون به عنوان چشمه‌های نوترونی کاربردهای مختلفی دارند. در طول سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه مولدهای نوترون با ضریب تولید بالا صورت گرفته است. به این ترتیب، لازم است که در طول عملیات مولدهای نوترون، جنبه‌های حفاظت از پرتو در نظر گرفته شوند. در این پژوهش به کمک کد MCNPX ابتدا دز مؤثر ناشی از نوترون در اطراف یک مولد نوترون محاسبه و ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که دز ناشی از نوترون در مولدهای نوترونی وابسته به زاویه قرارگیری نسبت به دستگاه و نیز نوع مولد نوترونی است. دز ناشی از مولدهای DT حدود ۵۰۰ برابر بیشتر از مولدهای DD است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله تا پنج متر میزان دز حدود بیست برابر کاهش می‌یابد. افزایش فاصله یکی از راه‌های مؤثر برای کاهش میزان دز است ولی در آزمایشگاه‌هایی که فضای کافی در آن‌ها وجود ندارد، باید یک حفاظ مناسب طراحی گردد.

برای طراحی حفاظ مناسب، حفاظ‌ها در ۶ جنس مختلف (Paraffine, concrete 806, Borated-Polyethylene, ALF3) و در ضخامت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متری طراحی گردیدند و مؤلفه‌های شار گاما، دز مؤثر گاما، شار نوترون‌های حرارتی، شار نوترون‌های فوق‌حرارتی، شار نوترون‌های سریع، شار کل نوترون و دز مؤثر نوترون در فانتوم کروی شکل فرضی محاسبه شد. نتایج نشان داد که حفاظ Borated-Polyethylene برای هر دو چشمه DD و DT در ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین دز نوترون می‌باشد و همچنین این حفاظ در ضخامت ۶۰ cm دارای دز گامای پایینی نسبت به بقیه حفاظ‌ها در هر دو حالت چشمه DD و DT است.

کلیدواژه‌گان: مولد نوترون DD/DT، دز مؤثر نوترون، دز مؤثر گاما، شار نوترون، شار گاما، کد MCNPX، طراحی حفاظ

## ۱. مقدمه

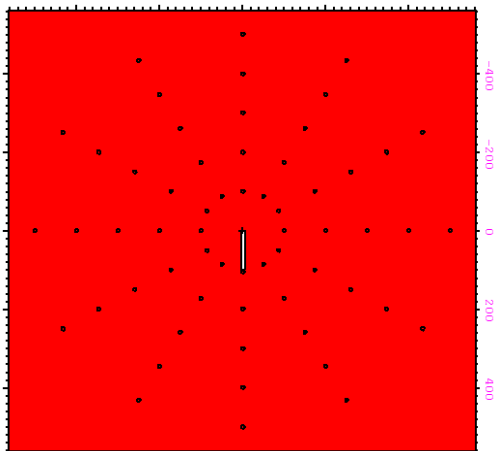
امروزه مولدهای نوترون کاربردهای زیادی دارند و تلاش‌های بسیاری جهت ساخت مولدهای نوترونی با شار بالا در حال انجام است [۱-۲]. این نوع چشمه‌های نوترونی عموماً به صورت یک ابزار با ابعاد نسبتاً کوچک در یک آزمایشگاه تحقیقاتی با ابعاد نسبتاً بزرگ راه‌اندازی می‌شوند به نوعی که کاربر می‌تواند در حین کار فاصله مناسبی از دستگاه بگیرد. یکی از دغدغه‌های مهم در استفاده از این نوع چشمه نوترونی مربوط به ملاحظات فیزیک بهداشت می‌باشد. از آنجا که این مولدها بر اساس جنس هدف، می‌توانند نوترون‌های پرنرژی ۱۴ MeV و ۲،۴۵ MeV با ضریب تأثیر بیولوژیکی حدود ۱۰ [۳] تولید کنند. لذا ارزیابی میزان دز در اطراف دستگاه و ادامه ایجاد فضای مناسب جهت ایستادن کاربر در حداکثر فاصله از مولد نوترون و نیز ساخت یک حفاظ مناسب اهمیت به سزایی دارد. هدف این پژوهش در ابتدا محاسبه و ارزیابی دز مؤثر ناشی از نوترون در اطراف یک مولد نوترون سپس انتخاب بهترین جهت و فاصله نسبت به چشمه و در ادامه طراحی حفاظ مناسب می‌باشد. به این منظور از کد MCNPX استفاده شد. پس از شبیه‌سازی تیوب مولد نوترون، با در نظر گرفتن توزیع زاویه‌ای نوترون‌های خروجی و انرژی میانگین نوترون در هر زاویه، میزان دز مؤثر در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از دستگاه با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز محاسبه گردید. سپس با انتخاب زاویه‌ای که در آن میزان دز مؤثر در بالاترین مقدار نسبت به زوایای دیگر بود به طراحی حفاظ‌های مختلف در ضخامت‌های مختلف پرداختیم. کلیه محاسبات یک بار برای مولد DD و بار دیگر برای مولد DT انجام شده است.

## ۲. ارزیابی میزان دز ناشی از نوترون در اطراف یک

## مولد نوترون DD/DT

## ۱،۲. روش کار

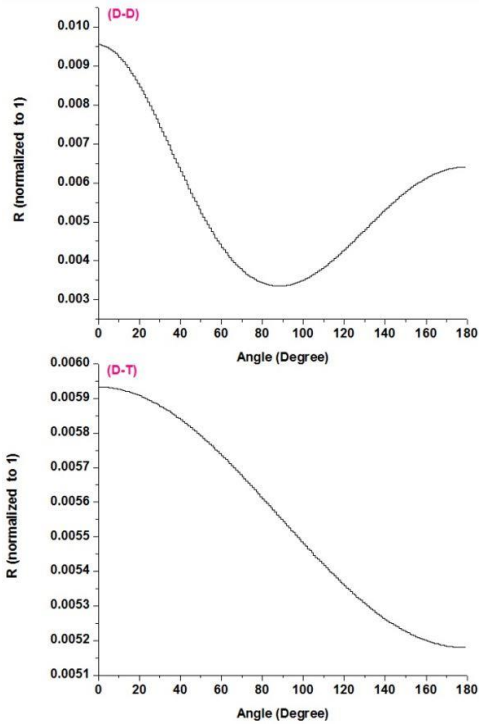
شکل (۱) هندسه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که شامل تیوب مولد نوترون، بتون کف آزمایشگاه و کره‌هایی در زاویه‌ها و فاصله‌های مختلف از دستگاه به منظور محاسبه دز مؤثر در آن‌ها می‌باشد.



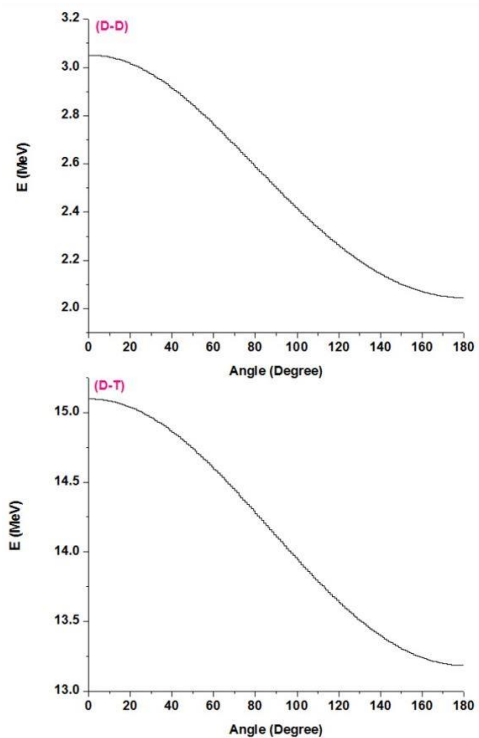
شکل (۱): هندسه شبیه‌سازی شده از سیستم شامل تیوب مولد نوترون و کره‌های مربوط به محاسبه دز

توزیع زاویه‌ای و نیز انرژی نوترون‌های خروجی از مولد به ضخامت هدف، جریان و انرژی دوترون فرودی بستگی دارد. وابستگی انرژی و توزیع زاویه‌ای نوترون به انرژی دوترون و زاویه خروج نوترون (نسبت به راستای فرودی دوترون) توسط دو رابطه زیر بیان می‌شود [۴]:

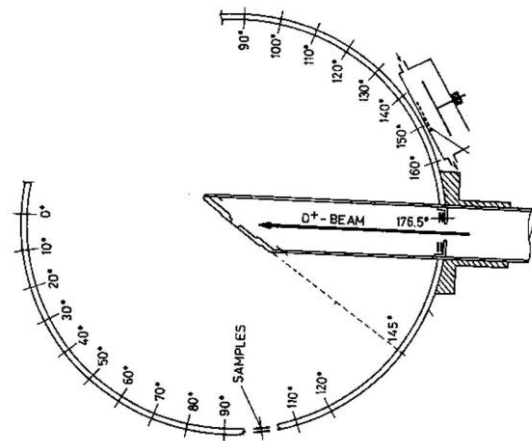
$$\begin{cases} E_n(E_d, \theta) = E_0 + \sum_{i=1}^2 E_i \cos^i \theta \\ R(E_d, \theta) = 1 + \sum_{i=1}^2 A_i \cos^i \theta \end{cases} \quad (1)$$



شکل (۳): بهره نوترون‌های گسیلی در زوایای مختلف بر اساس رابطه (۱)



شکل (۴) انرژی نوترون‌های گسیلی در زوایای مختلف بر اساس رابطه (۱)



شکل (۲): نحوه قرارگیری هدف در یک مولد و مفهوم زاویه در رابطه (۱)

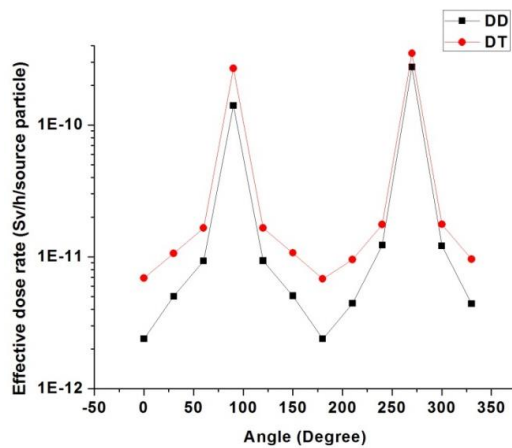
شکل (۲) نحوه قرارگیری هدف در یک مولد و مفهوم زاویه در رابطه (۱) را نشان می‌دهد [۴]. در رابطه (۱) ثابت‌های  $E_i$  و  $A_i$  به انرژی دوترون بستگی دارند. مقدار این پارامترها برای دو حالت DD و DT به ازای انرژی ۲۰۰ keV در جدول (۱) آمده است [۴]. بهره تولید نوترون برای دوترون‌های با انرژی ۲۰۰ keV برای مولد DT برابر  $1,45 \times 10^{11}$  (n/mA.s) و برای مولد DD برابر  $8,00 \times 10^8$  (n/mA.s) می‌باشد [۴].

جدول (۱): مقدار پارامترهای  $E_i$  و  $A_i$  برای دوترون‌های با انرژی

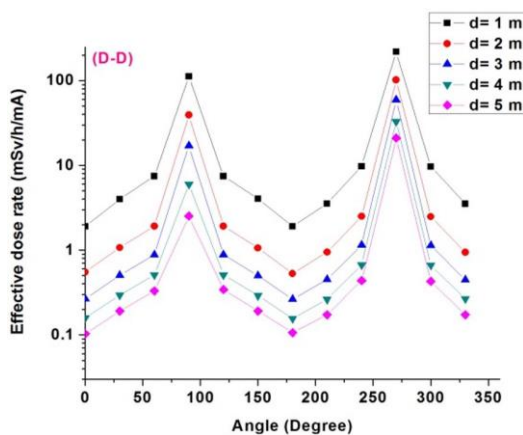
[۴] ۲۰۰ keV		
	DD	DT
A1	۰,۰۳۱۴۹	۰,۰۶۷۸
A2	۱,۱۱۲۲۵	۰,۰۰۰۵
A3	۰,۳۸۶۵۹	۰
A4	۰,۱۱۵۱۸	۰
A5	۰,۲۶۶۷۶	۰
E0	۲,۴۹۷۷۱	۱۴,۱۰۷۱۱
E1	۰,۵۰۰۷۲	۰,۹۵۵۹۶
E2	۰,۰۵۰۴۴	۰,۰۰۲۴۲
E3	۰,۰۳۳۲	۰

انتظار می‌رفت دز ناشی از نوترون‌های DT بیشتر از نوترون‌های DD است. لازم به ذکر است که میانگین شدت تولید نوترون در مولدهای DT حدود صد برابر بزرگ‌تر از مولدهای DD است.

با در نظر گرفتن شدت نوترون (S) برای هر نوع مولد، نرخ دز مؤثر برای مولد DD مطابق شکل (۶) و برای مولد DT مطابق شکل (۷) به دست خواهد آمد که نشان می‌دهد نرخ دز مؤثر در مولدهای DT بسیار بزرگ‌تر از مولدهای DD است. شکل (۸) میزان نرخ مؤثر را بر حسب فاصله برای زاویه صفر درجه نشان می‌دهد.



شکل (۵) توزیع فضایی دز در فاصله یک متری از مولد نوترون



شکل (۶) توزیع فضایی دز در اطراف مولد نوترون DD

شکل (۳) و (۴) به ترتیب بهره و انرژی نوترون‌های گسیلی را بر حسب زاویه برای هر دو نوع مولد نوترون نشان می‌دهند. تعریف چشمه در ورودی کد بر اساس رابطه (۱) صورت گرفت. محاسبات دزیمتری با استفاده از روش تبدیل شار به دز انجام شد. به این منظور با استفاده از کارت DF4 و در نظر گرفتن استاندارد ANSI-1991 [۵] نرخ دز در کره‌های اطراف مولد نوترون محاسبه شد. جهت اعتبار سنجی محاسبات، نتایج برای یک حالت خاص شامل یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد بدون حفاظ با استفاده از رابطه تحلیلی زیر مقایسه گردید [۶]:

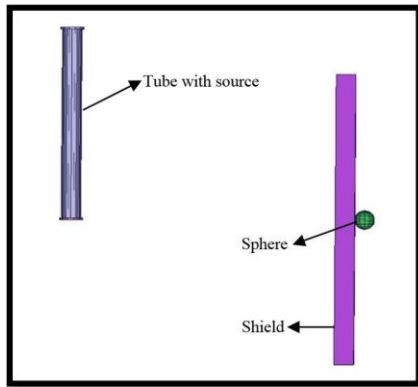
$$D(\text{mrem/h}) = \frac{f \cdot S}{4\pi r^2} \quad (2)$$

که در آن  $f$  ضریب تبدیل شار به دز بر حسب  $S, [(mrem/h)/(n/cm^2 \cdot s)]$  شدت چشمه بر حسب  $(n/s)$  و  $r$  فاصله از چشمه بر حسب  $(cm)$  می‌باشد. مقدار  $f$  برای چشمه DT برابر  $0,168$  بر اساس این رابطه میزان دز در فاصله یک متری از یک چشمه DT با شدت  $(n/s) 1,0 \times 10^8$  برابر  $(mrem/h) 130$  می‌باشد که این کمیت بر اساس محاسبات MCNPX برابر  $(mrem/h) 134$  است که نشان دهنده صحت قابل قبول محاسبات می‌باشد.

## ۲.۲. نتایج

شکل (۵) نمودار توزیع فضایی دز در فاصله یک متری مولد نوترون را برای دو حالت DD و DT و به ازای یک نوترون نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان نرخ دز وابستگی شدیدی به زاویه نسبت به باریکه دارد به گونه‌ای که در زوایای  $90^\circ$  و  $270^\circ$  درجه بیشتر مقدار و در زوایای صفر،  $180^\circ$  و  $330^\circ$  درجه کمترین مقدار را دارد. همچنین همان‌طور که

به کره (فانتوم) و در جهت تیوب طبق شکل (۹) طراحی گردیدند.



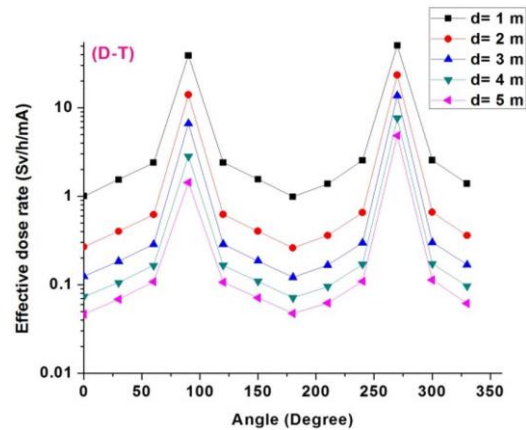
شکل (۹): نمایی از طریقه قرارگیری تیوب حاوی چشمه، حفاظ و

### فانتوم کروی شکل

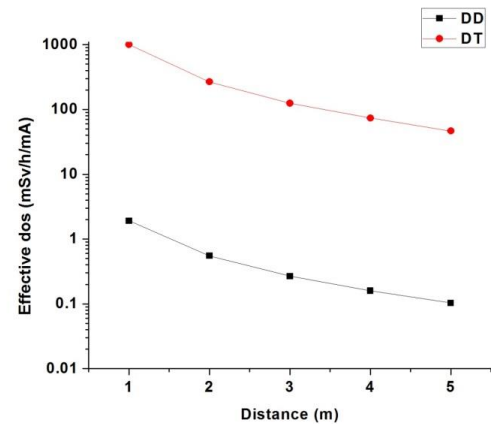
حفاظها در ۶ جنس مختلف (ALF<sub>3</sub>, Paraffine, concrete806, Borated-Polyethylene و Solid-boric-acid, Polyethylene, Non-borated) [۷] در ضخامت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی متری طراحی گردیدند و با استفاده از تالی F4 و کارت E4 شار نوترون در انرژی‌های مختلف و با استفاده از تالی F4 و کارت DF4 و با در نظر گرفتن استاندارد ICRP-21 دز مؤثر گاما و نوترون در فانتوم کروی شکل محاسبه شد.

### ۲.۳. نتایج

نمودارهای مؤلفه‌های شار گاما، دز مؤثر گاما، شار نوترون‌های حرارتی، شار نوترون‌های فوق حرارتی، شار نوترون‌های سریع، شار کل نوترون و دز مؤثر نوترون بر حسب ضخامت‌های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی متری برای چشمه DD در شکل (۱۰) و برای چشمه DT در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.



شکل (۷) توزیع فضایی دز در اطراف مولد نوترون DT

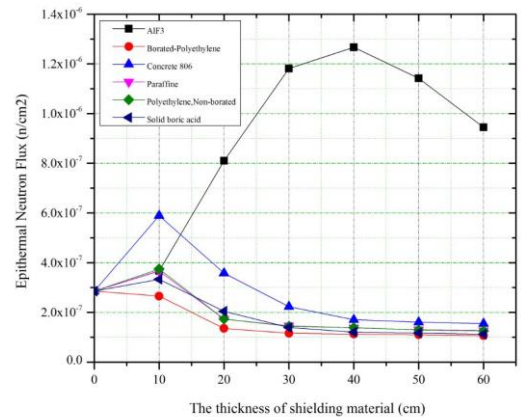
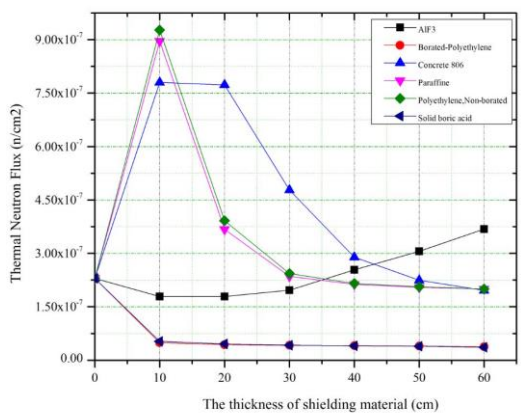
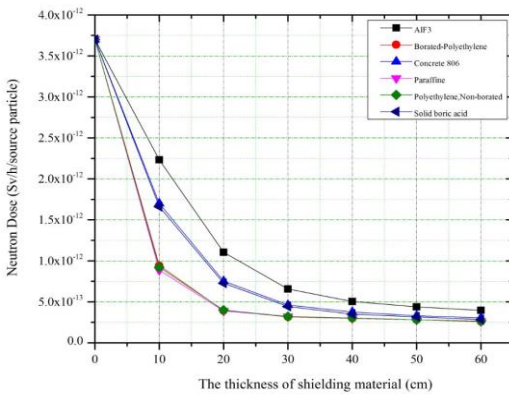
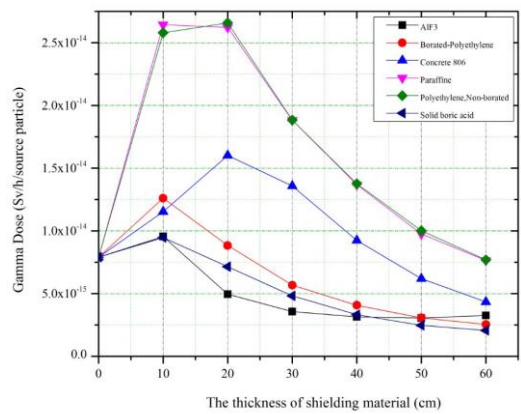
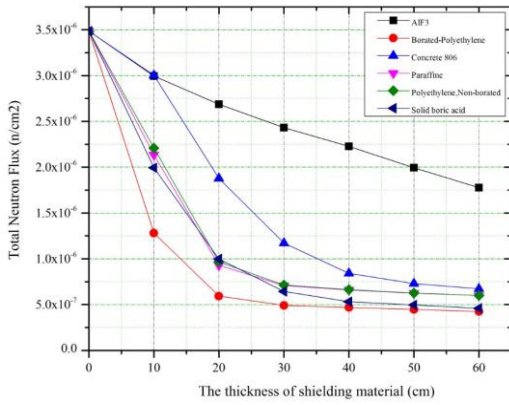
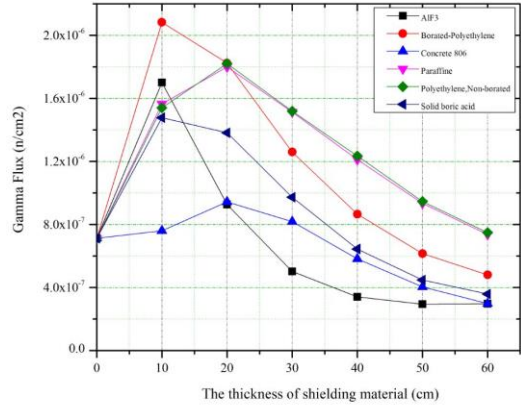
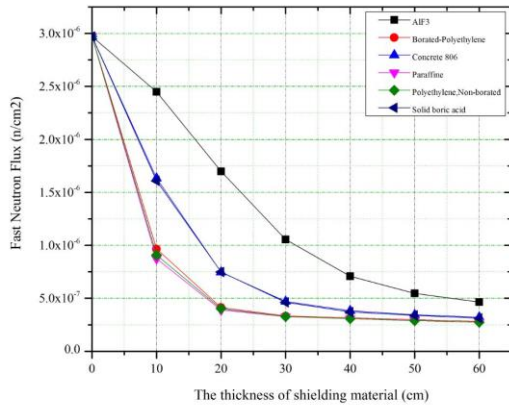


شکل (۸) نرخ دز در زاویه صفر درجه بر حسب فاصله از مولد نوترون

### ۳. طراحی حفاظ

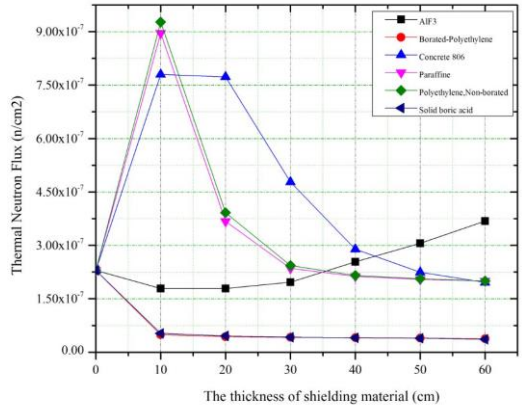
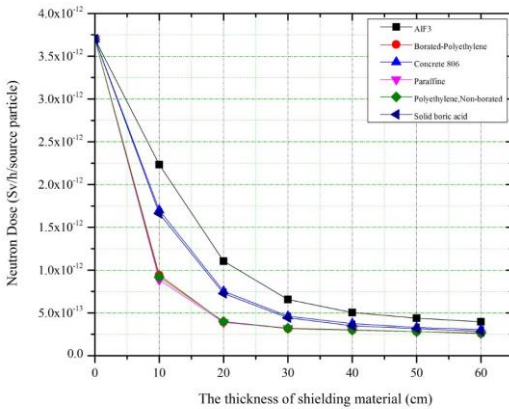
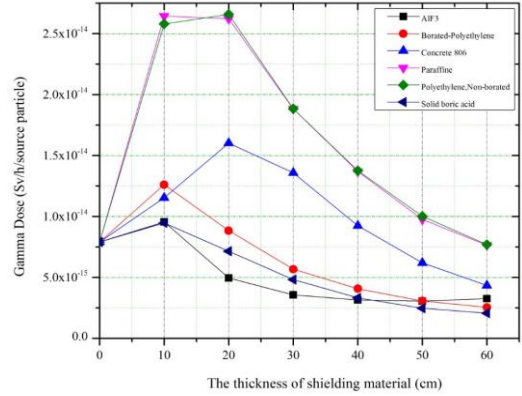
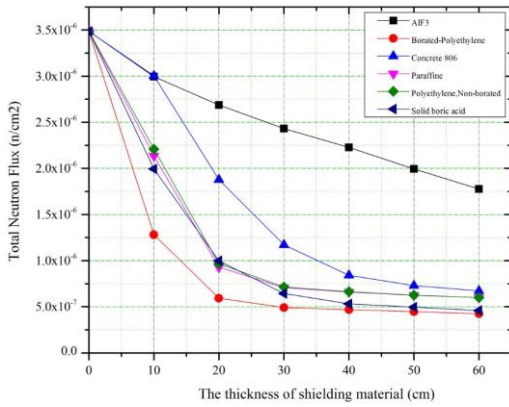
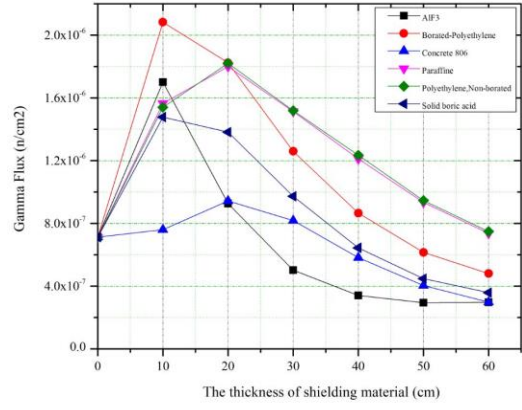
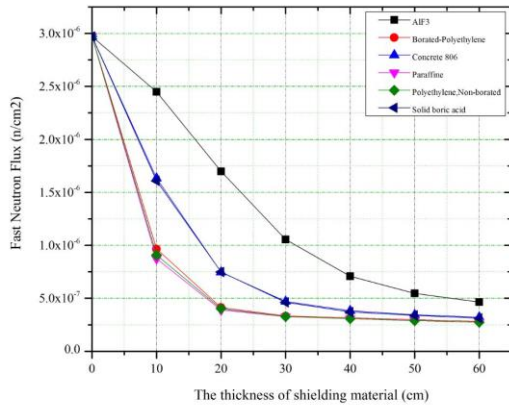
#### ۱.۳. روش کار

همان‌طور که اشاره شد برای استفاده بهینه و کاربردی از مولدهای نوترون، ایجاد فضای مناسب جهت ایستادن کاربر و نیز ساخت یک حفاظ مناسب ضروری است. برای طراحی حفاظ مناسب، مهم‌ترین نکته انتخاب مواد مناسب جهت به کارگیری در حفاظ می‌باشد. از همین رو با فرض دو چشمه DD و DT و تیوب حاوی چشمه، فانتوم کروی شکل از جنس هوا به ضخامت ۵ سانتی متر به فاصله ۱/۵ متری از چشمه در زاویه ۹۰ درجه نسبت به چشمه و همچنین حفاظ‌های مختلف در ضخامت‌های مختلف و تقریباً چسبیده

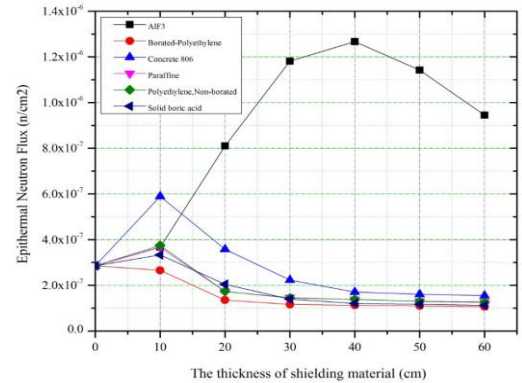


شکل (۱۰): نمودارهای مؤلفه‌های مختلف شار گاما (n/cm<sup>2</sup>), دز مؤثر گاما (Sv/h/source particle), شار نوترون حرارتی (n/cm<sup>2</sup>), شار نوترون فوق حرارتی (n/cm<sup>2</sup>), شار نوترون سریع (n/cm<sup>2</sup>), شار کل نوترون (n/cm<sup>2</sup>) و دز مؤثر نوترون (Sv/h/source particle) بر حسب ضخامت‌های مختلف حفاظ برای چشمه DD و ۶ جنس مختلف حفاظ





شکل (۱۱): نمودارهای مؤلفه‌های مختلف شار گاما (n/cm<sup>2</sup>), دز مؤثر گاما (Sv/h/source particle), شار نوترون حرارتی (n/cm<sup>2</sup>), شار نوترون فوق حرارتی (n/cm<sup>2</sup>), شار نوترون سریع (n/cm<sup>2</sup>), شار کل نوترون (n/cm<sup>2</sup>) و دز مؤثر نوترون (Sv/h/source particle) بر حسب ضخامت‌های مختلف حفاظ برای چشمه DT و ۶ جنس مختلف حفاظ



#### ۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که دز ناشی از نوترون در مولدهای نوترونی وابسته به زاویه قرارگیری نسبت به دستگاه و نیز نوع مولد نوترونی است. دز ناشی از مولدهای DT حدود ۵۰۰ برابر بیشتر از مولدهای DD است. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش فاصله تا پنج متر میزان دز حدود بیست برابر کاهش می یابد. با این وجود لازم است تا کاربر فاصله بیشتری از دستگاه داشته باشد. لازم به ذکر است که دز واقعی باید بیشتر از مقدار محاسبه شده در این تحقیق باشد زیرا در اینجا دز ناشی از پرتوهای ایکس در نظر گرفته نشده است. پس برای استفاده بهینه و کاربردی از مولدهای نوترون نیازمند توجه ویژه به پرتوگیری کارکنان است و ایجاد فضای مناسب جهت ایستادن کاربر در حداکثر فاصله از مولد نوترون و نیز ساخت یک حفاظ مناسب ضروری می باشد.

در هر دو چشمه DD و DT دز نوترون حدوداً ۱۰۰ برابر دز گاما است. پس در انتخاب بهترین حفاظ، اولویت با حفاظی است که بهترین کاهنده دز نوترون باشد. حفاظ Borated-Polyethylene برای هر دو چشمه DD و DT در ضخامت ۶۰ cm (به ترتیب با مقادیر Sv/h/source particle  $1.3 \times 10^{-13}$  و  $2.24314 \times 10^{-13}$ ) دارای کمترین دز نوترون می باشد و همچنین این حفاظ در ضخامت ۶۰ cm دارای دز گامای پایینی نسبت به بقیه حفاظها در هر دو حالت چشمه DD و DT (به ترتیب با مقادیر Sv/h/source particle  $1.5 \times 10^{-15}$  و  $2.53899 \times 10^{-15}$ ) است. در نتیجه در هر دو حالت چشمه DD و DT حفاظ Borated-Polyethylene را به عنوان بهترین حفاظ در نظر می گیریم.

با توجه به شکل (۱۰) و (۱۱) می توان به نکات زیر دست

یافت:

- شار و دز گاما در هر دو حالت چشمه DD و DT با افزایش ضخامت حفاظ ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.
- در چشمه DD، حفاظ AIF<sub>3</sub> به ضخامت ۵۰ cm و در چشمه DT، حفاظ AIF<sub>3</sub> به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین شار گاما می باشد.
- در چشمه DD، حفاظ Solid-boric-acid به ضخامت ۶۰ cm و در چشمه DT، حفاظ AIF<sub>3</sub> به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین دز گاما می باشد.
- در هر دو چشمه DD و DT، حفاظ Solid-boric-acid به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین شار نوترون حرارتی می باشد.
- در هر دو چشمه DD و DT، حفاظ Borated-Polyethylene به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین شار نوترون فوق حرارتی می باشد.
- در چشمه DD، حفاظ Paraffine به ضخامت ۶۰ cm و در چشمه DT، حفاظ Borated-Polyethylene به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین دز گاما می باشد.
- در هر دو چشمه DD و DT، حفاظ Borated-Polyethylene به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین شار نوترون کل می باشد.
- در هر دو چشمه DD و DT، حفاظ Borated-Polyethylene به ضخامت ۶۰ cm دارای کمترین دز نوترون می باشد.



۵. مراجع

- [1] Lu, Xiaolong, et al. "Design of a high-current low-energy beam transport line for an intense DT/DD neutron generator." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 811 (2016): 76-81.
- [2] Vainionpaa, Jaakko H., et al. "Development of high flux thermal neutron generator for neutron activation analysis." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 350 (2015): 88-93.
- [3] ICRP, 2007 .The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 37. ICRP Publication 103 Ann. ICRP, pp.2-4.
- [4] Csikai, G.J., 1987. CRC Handbook of Fast Neutron Generators. CRC Press.
- [5] ANS, ANSI/ANS-6.1.1-1977: Neutron and Gamma-Ray Fluence-To-Dose Factors American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 1977
- [6] Chichester, D. L., et al. "Dose profile modeling of Idaho National Laboratory's active neutron interrogation laboratory." *Applied Radiation and Isotopes* 67.6 (2009): 1013-1022.
- [7] Babaei, M., Sadighzadeh, A., Kiashemshaki, M., Vosoghi, S., Zaeem, A.A., Kasesaz, Y., Rezaeifard, B. and Damideh, V., 2016. Simulation and design of biological shield for the 115 kJ IR-MPF-100 plasma focus device using MCNP code. *Journal of Fusion Energy*, 35(3), pp.579-584.

