



محاسبه نسبت یکنواختی دز جذیدر محفظه پرتو دهی گاماسل-۲۲۰ با روش تحلیلی مبتنی بر بسط گشتاور چند قطبی

پیمان رضاییان^۱، وحیده عطائی نیا^۱، سپیده شفیعی^۲

- ۱- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها
- ۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده

در این مقاله با استفاده از روشی تحلیلی مبتنی بر استفاده از بسط گشتاورهای چند قطبی، نسبت یکنواختی دز جذبی در محفظه پرتو دهی گاماسل-۲۲۰ محاسبه شده است. به منظور ارزیابی صحت محاسبات انجام شده از شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است. میان محاسبات تحلیلی و شبیه سازی های انجام شده حداکثر تفاوتی در حدود ۱۲٪ مشاهده می شود که نشان دهنده اعتبار روش تحلیلی می باشد. با توجه به اینکه استفاده از روش مذکور برای محاسبه دز جذبی یا شار در مقایسه با روش های شبیه سازی مونت کارلو دارای سرعت بیشتری است، می توان از آن برای بارگذاری چشمه ی سیستم های پرتو دهی موجود یا در حال ساخت استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نسبت یکنواختی، گشتاور چند قطبی، گاماسل-۲۲۰، بارگذاری چشمه.

مقدمه

برای استفاده از سیستم های مختلف پرتو دهی صنعتی یا تحقیقاتی در اختیار داشتن مشخصه های عملکردی سیستم پرتو دهی از اهمیت خاصی برخوردار است [۱]. یکی از مهمترین مشخصه های عملکردی سیستم های پرتو دهی نسبت یکنواختی دز است. این نسبت برای سیستم های پرتو دهی به صورت دز جذبی بیشینه تقسیم بر دز جذبی کمینه تعریف می شود. برای یک محصول مشخص در یک سیستم پرتو دهی خاص این کمیت و البته محل وقوع مقدار کمینه دز بستگی به نحوه چینش چشمه ی رادیو اکتیو دارد [۲-۳]. معمولاً برای تعیین این کمیت، از روش های تجربی یا از محاسباتی مبتنی بر شبیه سازی استفاده می شود [۴-۵]. استفاده از روش های تجربی ممکن است با محدودیت هایی همراه باشد و همچنین روش های شبیه سازی نیز زمانبر هستند. در این مقاله با استفاده از بسط گشتاور چند قطبی ها مقدار نسبت یکنواختی به صورت تحلیلی در سیستم پرتو دهی گاماسل-۲۲۰ محاسبه می شود. به منظور ارزیابی صحت محاسبات تحلیلی انجام شده، از شبیه سازی با استفاده از کد MCNP استفاده شد. تعیین نسبت یکنواختی دز جذبی با استفاده از روش تحلیلی در مقایسه با شبیه سازی، سریعتر به جواب می رسد،

از این رو می‌توان از این روش در فرآیندهای بارگذاری چشمه‌های سیستم‌های پرتودهی موجود یا در حال ساخت استفاده کرد.

روش کار

سیستم پرتودهی گاماسل - ۲۲۰

سیستم پرتودهی گاماسل - ۲۲۰، تابش دهنده‌ی گامای درون کار خشک می‌باشد. چشمه‌ی این سیستم، شامل مدادک‌های چشمه کبالت - ۶۰ است که در یک قفس به صورت آرایه‌ای استوانه چیده شده‌اند. قفس چشمه متشکل از ۴۸ جایگاه برای قرارگیری مدادک‌های چشمه است. ارتفاع هر یک از این حفره‌ها ۲۱/۱۱ سانتیمتر است. مرکز این حفره‌ها بر روی یک دایره به قطر ۲۰/۹۱ سانتیمتر قرار گرفته است. در حال حاضر و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ۲۱ مدادک کبالت - ۶۰ مدل C-198 هر یک به شعاع ۰/۳۲ سانتیمتر و ارتفاع ۱۹/۶۳ سانتیمتر در قفس قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- هندسه چشمه سیستم پرتودهی گاماسل - ۲۲۰ با دو گروه مدادک کبالت - ۶۰. مدادک‌هایی با اکتیویته -۱ در حدود ۱۰۵۰ کوری برای هر مدادک (رنگ سیاه) و مدادک‌هایی با اکتیویته در حدود ۴۰ کوری برای هر مدادک (رنگ خاکستری). تاریخ مقادیر گزارش شده اکتیویته ۹۵/۱/۳۱ است.

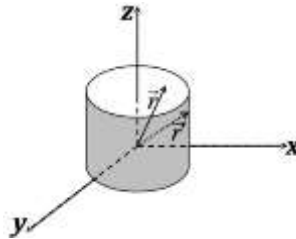
اکتیویته کل این چشمه در تاریخ ۹۵/۱/۳۱ در حدود ۸۹۰۰ کوری بوده است. از این میزان اکتیویته، در حدود ۸۴۶۰ کوری سهم مدادک‌هایی با اکتیویته در حدود ۱۰۵۰ کوری می‌باشد که با رنگ سیاه در شکل نشان

¹Self contained dry storage gamma irradiator

داده شده است. همچنین حدود ۴۴۵ کوری نیز سهم مدادک‌هایی با اکتیویته‌ی حدود ۴۰ کوری می‌باشد. این مدادک‌ها نیز با رنگ خاکستری در شکل ۱ نشان داده شده است.

تعیین تحلیلی شار در محفظه پرتودهی گاماسل-۲۲۰

به منظور تعیین نسبت یکنواختی در محفظه‌ی پرتودهی سیستم گاماسل -۲۲۰، ابتدا باید شار فوتون‌ها در این محفظه به صورت تحلیلی تعیین شود. بدین منظور و با توجه به شکل چشمه و محفظه‌ی پرتودهی سیستم گاماسل -۲۲۰ که استوانه‌ای شکل می‌باشد، پوسته‌ای استوانه‌ای شکل، مطابق شکل زیر را در نظر می‌گیریم. اگر چگالی اکتیویته‌ای این پوسته را در نقطه \vec{r}' برابر با $\rho_A(\vec{r}')$ در نظر بگیریم، آنگاه شار فوتون‌ها ناشی از پوسته در نقطه دلخواه \vec{r} درون پوسته را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:



شکل ۲- هندسه در نظر گرفته شده برای تعیین تحلیلی شار فوتون‌ها در محفظه پرتودهی.

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int d^3\vec{r}' \frac{\rho_A(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \quad (1)$$

مخرج عبارت انتگرالده را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} = \frac{1}{r'^2} + \frac{1}{r'^4} \sum x_i (2x'_i) + \frac{1}{r'^6} \sum x'_i x'_j \times (4x_i x_j - \delta_{ij} r^2) + \dots \quad (2)$$

در این رابطه x_i و x'_i به ترتیب مولفه‌های کارتیزین r و r' هستند. همچنین δ_{ij} نیز تابع دلتای کرونیکر است. با استفاده از رابطه‌ی (۲)، می‌توان رابطه‌ی (۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} [\mu + 2 \sum x_i \rho_i + \sum (4x_i x_j - \delta_{ij} r^2) \rho_{ij} + \dots] \quad (3)$$

که در این رابطه، μ ، ρ_i و ρ_{ij} به ترتیب مقادیر گشتاور تک قطبی، دو قطبی و چهار قطبی می‌باشند که با استفاده از روابط (۴) تا (۶) مشخص می‌شوند:

$$\mu = \int d^3\vec{r}' \frac{\rho_A(\vec{r}')}{r'^2} \quad (4)$$

$$\rho_i = \int d^3\vec{r}' \frac{x'_i \rho_A(\vec{r}')}{r'^4} \quad (5)$$

$$l_{ij} = \int d^3\vec{r}' \frac{x'_i x'_j \rho_A(\vec{r}')}{r'^6} \quad (6)$$

همانگونه که در روابط (۴) تا (۶) مشخص می‌باشد، مقادیر گشتاور چند قطبی، صرفاً تابعی از هندسه چشمه هستند. با توجه به تقارن چشمه حول محور z داریم $l_{xz} = l_{yz} = 0$ و $\rho_z = 0$ (اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با مختصات‌های x ، y و z جایگزین شدند). با استفاده از رابطه‌ی (۳)، می‌توان شار فوتون-ها را در هر نقطه‌ی دلخواهی از محفظه‌ی پرتودهی بازنویسی کرد. بر این اساس شار فوتون‌ها در صفحه-ی $y=0$ می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} [\mu + 2x \rho_x + x^2 Q_1 + z^2 Q_2] \quad (7)$$

که در آن داریم

$$Q_1 = 3l_{xx} - l_{yy} - l_{zz} \quad (8)$$

و

$$Q_2 = 3l_{zz} - l_{yy} - l_{xx} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۷) مقادیر گشتاور چند قطبی، صرفاً تابعی از نحوه توزیع چشمه هستند. بنابراین، با در اختیار داشتن توزیع چشمه و با استفاده از رابطه‌ی (۷) می‌توان مقدار شار فوتون‌ها در هر نقطه از صفحه $y=0$ را بدست آورد.

شبیه سازی مونت کارلو

به منظور بررسی اعتبار محاسبات انجام شده از شبیه سازی مونت کارلو با کد MCNP استفاده شد [۶]. برای انجام این محاسبات، هندسه اتاقک یونش مطابق با دفترچه‌ی راهنمای گاما سل -۲۲۰ به کد داده سپس شار فوتون‌ها درون محفظه‌ی پرتودهی با استفاده از تالی f4 تعیین شد. همچنین به منظور تعیین اثر پراکندگی درون محفظه، بیناب فوتون‌ها درون محفظه‌ی پرتودهی تعیین گردید.

نتایج

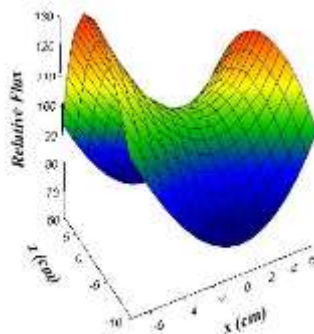
با توجه به اطلاعات مربوط به هندسه سیستم و همچنین محل قرارگیری مدادک‌ها، بیناب فوتونی در محفظه‌ی پرتودهی گاماسل-۲۲۰ با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه گردید. این بیناب نشان داد که انرژی فوتون‌ها در محفظه پرتودهی در حدود ۱/۱۷ و ۱/۳۳ مگاالکترون ولت است و تنها کسر کوچکی از فوتون‌ها در اثر پراکندگی،

مقادیری کمتر از انرژی فوق را دارند. بر این اساس برای کلیه نقاط ضریب تبدیل شار به دز جذبی مقداری ثابت در نظر گرفته شد. به بیان بهتر شار متناسب با دز جذبی فرض شد. با توجه به هندسه چشمه که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقادیر گشتاور چند قطبی با بهره‌گیری از روابط (۴) تا (۶) برای چشمه این سیستم پرتودهی محاسبه می‌شود. مقادیر محاسبه شده در جدول (۱) نشان داده شده است:

جدول ۱- مقادیر محاسبه شده گشتاور چند قطبی برای سیستم گاما سل -۲۲۰

گشتاور چند قطبی	مقدار
μ (TBq cm ⁻²)	۳/۰۵
ρ_x (TBq cm ⁻³)	$۳/۶۸ \times 10^{-4}$
ρ_y (TBq cm ⁻³)	$-۷/۰۸ \times 10^{-4}$
ℓ_{xx} (TBq cm ⁻⁴)	$۹/۶۶ \times 10^{-3}$
ℓ_{yy} (TBq cm ⁻⁴)	$۹/۸۰ \times 10^{-3}$
ℓ_{zz} (TBq cm ⁻⁴)	$۳/۲۶ \times 10^{-3}$
ℓ_{xy} (TBq cm ⁻⁴)	$۲/۱۹ \times 10^{-3}$

با جایگذاری مقادیر گشتاور چند قطبی از جدول ۱، در رابطه‌ی (۷) و با جایگذاری مقادیر X و Z می‌توان در هر نقطه مقدار شار فوتون‌ها را محاسبه کرد. با استفاده از این رابطه، تغییرات شار نسبی فوتون‌ها (شار در هر نقطه نسبت به شار در مرکز محفظه) به صورت زیر رسم می‌شود.



شکل ۳- تغییرات شار فوتون‌های در صفحه $y=0$ محفظه پرتودهی گاماسل -۲۲۰.

با استفاده از شکل (۳) محل وقوع و مقدار کمینه و بیشینه شار فوتون‌ها که متناسب با دز جذبی است، مشخص می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی (۷) می‌توان مقادیر دقیق کمینه و بیشینه را محاسبه و نسبت یکنواختی دز جذبی را بدست آورد. مقادیر محاسبه شده در جدول ۲ نمایش داده شده است. مقادیر عدم قطعیت ناشی از خطای آماری با ضریب پوششی ۲ است.

جدول ۲ - مقادیر محاسبه شده شار در مرکز، بیشینه و کمینه شار (دز جذبی) و نسبت یکنواختی (دز جذبی) به روش تحلیلی و شبیه

سازی MCNP برای گاما سل - ۲۲۰

شبه سازی	روش تحلیلی	کمیت
$(4/81 \pm 0/2) \times 10^{11}$	$4/86 \times 10^{11}$	شار در مرکز محفظه تابش ($\#/cm^2s$)
$136/61 \pm 0/79$	۱۳۱/۸	بیشینه شار (دز جذبی) نسبی
$75/66 \pm 0/44$	۶۶/۴	کمینه شار (دز جذبی) نسبی
$1/81 \pm 0/90$	۱/۹۸	نسبت یکنواختی شار (دز جذبی)

جدول ۲ نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده برای شار در مرکز محفظه‌ی پرتو دهیبا استفاده از شبیه سازی و روش تحلیلی با یکدیگر همخوانی دارند. همچنین در مقادیر محاسبه شده برای بیشینه، کمینه و نسبت یکنواختی نیز اختلافی نسبی کمتر از ۱۲٪ مشاهده می‌شود. این تطابق میان نتایج تحلیلی و شبیه سازی اعتبار روش تحلیلی استفاده شده برای تعیین نسبت یکنواختی را تأیید می‌کند.

بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد، مقادیر محاسبه شده به روش تحلیلی تا حدود ۱۲٪ با مقادیر بدست آمده از شبیه سازی اختلاف دارد. باید در نظر داشت که بطور کلی دقت روش تحلیلی استفاده شده برای نقاط دور از چشمه بیشتر می‌باشد. بطور کلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از روش تحلیلی می‌توان مقدار نسبت یکنواختی را با دقت قابل قبولی محاسبه کرد. با توجه به اینکه روش تحلیلی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو سریع‌تر به جواب می‌رسد و تعیین چیدمان میله‌های چشمه در سیستم‌های پرتو دهی با توجه به توزیع دز جذبی در محفظه‌ی پرتو دهی صورت می‌گیرد، با داشتن نحوه چیدمان مطلوب می‌توان از این شیوه به طور خاص در بارگذاری‌های چشمه‌های سیستم‌های پرتو دهی موجود یا در حال طراحی استفاده کرد.

مراجع

1. Farah, K., et al., Dose measurements for characterization of a semi-industrial cobalt-60 gamma-irradiation facility. Radiation Measurements, 41(2): p. 201-208. 2006
2. Kadri, O., F. Gharbi, and K. Farah, Monte Carlo improvement of dose uniformity in gamma irradiation processing using the GEANT4 code. Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms, 239(4): p. 391-398. 2005
3. Oliveira, C. and J. Salgado, Isodose distributions and dose uniformity in the Portuguese gamma irradiation facility calculated using the MCNP code. Radiation Physics and Chemistry, 61(3): p. 791-793. 2001



4. Raisali, G. and M. Sohrabpour, Application of EGS4 computer code for determination of gamma ray spectrum and dose rate distribution in Gammacell 220. Radiation Physics and Chemistry, . 42(4): p. 799-805. 1993
5. Raisali, G.R., M. Sohrabpour, and A. Hadjinia, A computer code for dose rate mapping of gamma irradiators. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry, . 35(4): p. 831-835.1990.
6. Briesmeister, J.F., MCNP4C Monte Carlo N-Particle Transport Code System. MCNP-4C. Monte Carlo N-Particle Transport Code System, 2000.
7. Atomic Energy of Canada, Instruction Manual Gammacell 220 Cobalt 60 Irradiation Unit, Edition 6, 1968.