



محاسبه و بررسی میزان تولید تریتیوم در یک راکتور همجوشی به کمک روش مونت کارلو

کاسه ساز، یاسر^(۱) - خوش احوال، فرخ^{(۱)*}

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

چکیده:

یک نیروگاه همجوشی و یا ترکیبی (شکافت-هم جوشی) باید قادر باشد تا تریتیوم مورد نیاز خود را تامین کند. تریتیوم را می‌توان به کمک اندرکنش‌های نوترون با ایزوتوپ‌های ${}^6\text{Li}$ و ${}^7\text{Li}$ در بلنکت تولید کرد. در این تحقیق تلاش شده است تا به کمک یک هندسه ساده یک بعدی، ولی در عین حال جامع از لحاظ مواد تشکیل دهنده، اثر نوع ماده زاینده تریتیوم در بلنکت‌های همجوشی بررسی شود. بدین منظور ۱۰ نوع ماده شناخته شده برای تولید تریتیوم مورد بررسی قرار گرفت و در هر مورد میزان پارامتر TBR ، که یکی از پارامترهای مهم در مولدهای تریتیومی است، محاسبه گردید. نتایج نشان داد که ماده Li_2BeF_4 دارای بالاترین میزان TBR برابر با ۱/۴۲، می‌باشد.

کلمات کلیدی: تریتیوم، راکتور همجوشی، نسبت زایش، بلنکت، کد MCNPX 2.6

Calculation and analysis of the tritium production in a fusion reactor using Monte-Carlo method

Yaser Kasesaz¹, Farrokh Khoshahval^{1,*}

¹ Reactor and Nuclear Safety School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box:

11365-8486, Tehran, Iran

Abstract:

A fusion or fission-fusion hybrid plant must produce its own tritium. Tritium can be produced by breeding reaction of ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ isotopes in the blanket. In this investigation, a simple one-dimensional geometry is considered to analyze the impact of tritium breeder material in the fusion blankets. In this paper, ten well-known materials suitable for tritium production have been studied and Tritium Breeding Ratio (TBR) parameter is calculated. The results show that LiBeF_4 gives the highest amount of TBR equal to 1.42.

Keyword: Tritium, fusion reactor, breeding ratio, blanket, MCNPX 2.6



مقدمه:

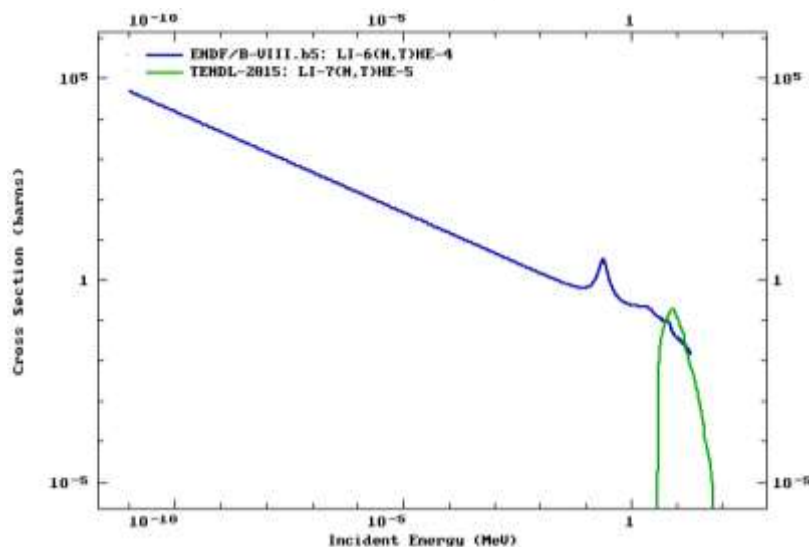
تولید تریتیوم جهت استفاده در یک نیروگاه همجوشی بر پایه واکنش (۱) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



در این واکنش همجوشی، از $17/6 \text{ MeV}$ انرژی تولید شده در هر واکنش، $3/5 \text{ MeV}$ آن توسط آلفا حمل می‌شود که خود سبب گرم شدن محیط پلاسما و کمک به ادامه واکنش می‌شود و مابقی انرژی ($14/1 \text{ MeV}$) توسط نوترون حمل می‌شود که از پلاسما خارج شده و انرژی خود را در بلنکتی که در اطراف پلاسما قرار دارد از دست می‌دهد. با برداشت حرارت از این سیستم می‌توان بخار مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی را فراهم نمود. تولید تریتیوم بسیار گران است و تاکنون تلاش‌های مختلفی برای طراحی سیستم‌های بهینه برای آن انجام شده است [۱-۳]. یکی از روش‌های مطرح برای این منظور، استفاده از مواد حاوی لیتیوم در بلنکت است که با جذب نوترون منجر به تولید تریتیوم می‌شود که از آنها به عنوان زاینده تریتیوم یاد می‌شود. لیتیوم در طبیعت به صورت دو ایزوتوپ ${}^6\text{Li}$ (۷٪) و ${}^7\text{Li}$ (۹۳٪) وجود دارد که بر اساس روابط (۲ و ۳) می‌توان از هر دوی آنها برای تولید تریتیوم استفاده نمود:



سطح مقطع این دو واکنش در شکل (۱) نشان داده شده است [۴]. همانطور که ملاحظه می‌شود ${}^6\text{Li}$ در انرژی‌های پایین نقش اصلی را در تولید تریتیوم دارد.



شکل (۱) سطح مقطع تولید تریتیوم از لیتیوم [۴]



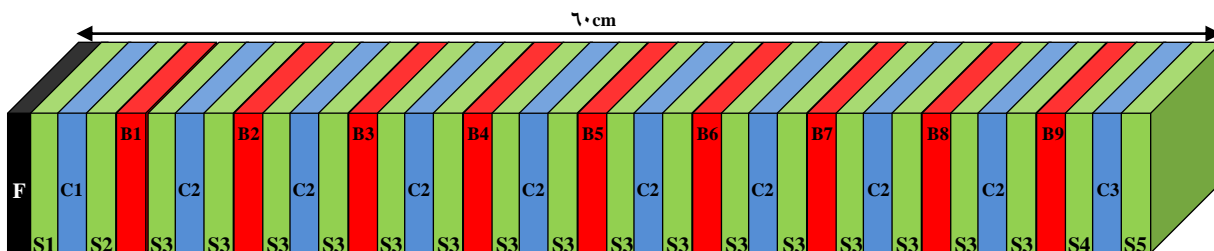
در این سیستم‌ها تریتیوم از یک طرف مصرف و از طرف دیگر تولید می‌شود. در یک سیستم زاینده بهینه نسبت میزان تولید به مصرف تریتیوم که اصطلاحاً TBR^1 نامیده می‌شود باید بزرگتر از ۱/۰۵ باشد [۵]. هدف از انجام این پژوهش محاسبه میزان TBR برای یک سیستم نوعی با استفاده از مواد زاینده مختلف است که در جدول (۱) فهرست شده است.

جدول شماره (۱) مواد زاینده مورد استفاده در این تحقیق

شماره	ماده زاینده	شماره	ماده زاینده
۱	Li	۶	LiAlO ₂
۲	LiPb	۷	Li ₄ SiO ₄
۳	Li ₂ O	۸	Li ₈ PbO ₆
۴	Li ₂ ZrO ₃	۹	Li ₂ BeF ₄
۵	Li ₂ TiO ₃	۱۰	Li ₁₇ Pb ₈₃

روش کار:

در این پژوهش از یک مدل یک بعدی شامل لایه‌های مختلف استفاده گردید که در شکل (۱) نشان داده شده است. این لایه‌ها شامل دیواره اول (مربوط به راکتور همجوشی)، استیل، خنک کننده و لایه زاینده تریتیوم می‌باشد که ضخامت آنها در جدول (۲) آمده است.



شکل (۲) نمایی از لایه‌های مختلف بلنکت مدل شده در کد MCNPX۲,۶

¹ Tritium Breeding Ratio



جدول شماره (۲) انواع لایه‌ها و ضخامت آنها در بلنکت

نوع لایه	ضخامت (mm)	نوع لایه	ضخامت (mm)
F	۰/۲	B1	۴۱/۳
S1	۴/۰۹	B2	۵۴/۰
S2	۸/۰۹	B3	۶۹/۸
S3	۱/۶۵	B4	۹۷/۶
S4	۹/۷۲	B5	۱/۶۱
S5	۱۰/۷	B6	۴۲/۸
C1	۵/۸۲	B7	۱۰/۰
C2	۴/۲۴	B8	۱۰/۰
C3	۲/۵۶	B9	۱۰/۰

F : First Wall (Tungsten); Si : Steel; Ci : Coolant (Water); Bi : Breeder (Table 1)

اولین لایه‌ای از بلنکت که در معرض تشعشع قرار می‌گیرد "دیواره اول" نام دارد. ماده‌ای که معمولاً برای این منظور استفاده می‌شود دارای عدد اتمی بالا (بالا بردن احتمال تابش برمشترالانگ) و دمای ذوب بالا است تا مقاومت مناسبی در برابر تشعشعات ناشی از ناحیه پلازما داشته باشد. در اینجا از تنگستن بدین منظور استفاده شده است. در این پروژه از کد مونت کارلوی MCNPX2.6 به منظور شبیه‌سازی مسئله استفاده شده است. برای لایه زاینده ۱۰ نوع ماده مختلف ذکر شده در جدول (۱)، مورد آزمایش قرار گرفت. از آنجا که زایش تریتیوم توسط هر دو ایزوتوپ لیتیم صورت می‌گیرد لذا مقدار کل TBR با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$TBR = T_6 + T_7 \quad (۴)$$

که در آن $T_6 = \iint \varphi \Sigma_{(n,\alpha)T} dEdV$ و $T_7 = \iint \varphi \Sigma_{(n,n'\alpha)T} dEdV$ است [۶]. جهت محاسبه T_6 و T_7 از کارت FM4 با در نظر گرفتن واکنش شماره ۲۰۵ استفاده گردید.

نتایج:

نرخ زایش تریتیوم برای همه لایه‌ها و نیز هر ۱۰ نوع زاینده مورد محاسبه قرار گرفت. میزان TBR در هر لایه و ناشی از هر واکنش برای چهار ماده با بیشترین نرخ زایش در جدول (۳) خلاصه شده است. همچنین در شکل (۳) نرخ زایش تجمعی ناشی از هر واکنش برای ۱۰ نوع ماده زاینده نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بین مواد بررسی شده، ماده Li_2BeF_4 بیشترین نرخ زایش و در نتیجه تولید تریتیوم را

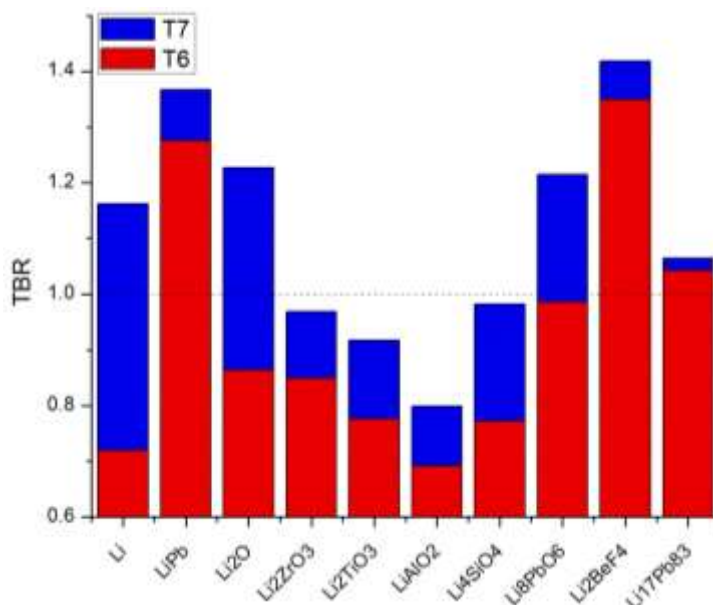
¹ First Wall



منجر می‌شود. در واقع دلیل آن وجود Be در ترکیب این ماده و تولید بیشتر نوترون و در نتیجه مشارکت بیشتر در زایش تریتیوم است.

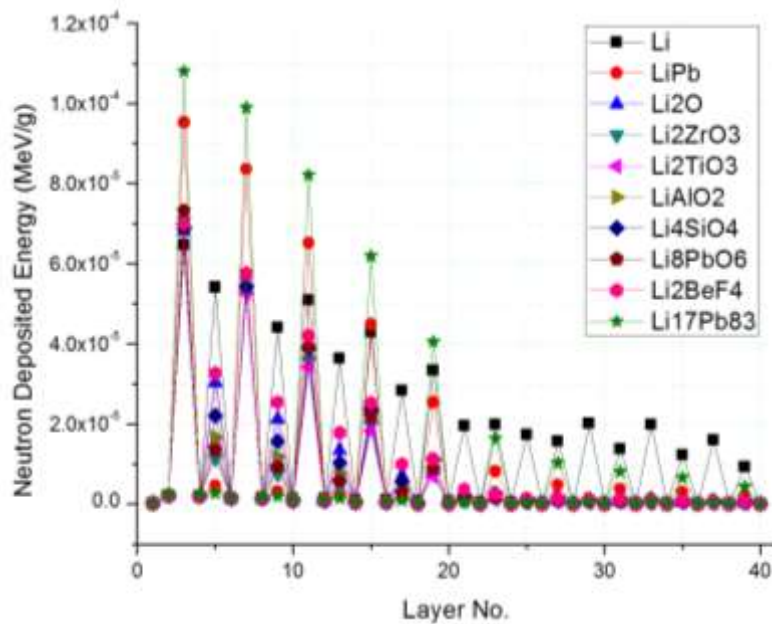
جدول (۳) میزان TBR در هر لایه و ناشی از هر واکنش

لایه	ماده زاینده							
	Li		LiPb		Li ₈ PbO ₆		Li ₂ BeF ₄	
	T6	T7	T6	T7	T6	T7	T6	T7
B1	1.24E-01	6.31E-02	2.97E-01	2.89E-02	2.51E-01	7.38E-02	2.84E-01	1.86E-02
B2	1.14E-01	7.50E-02	2.55E-01	2.59E-02	2.18E-01	6.64E-02	2.97E-01	1.87E-02
B3	1.13E-01	8.20E-02	2.36E-01	1.89E-02	1.99E-01	4.71E-02	2.94E-01	1.52E-02
B4	1.23E-01	9.21E-02	2.20E-01	1.21E-02	1.72E-01	2.80E-02	2.63E-01	1.07E-02
B5	1.46E-01	1.03E-01	1.79E-01	5.84E-03	1.15E-01	1.15E-02	1.77E-01	5.59E-03
B6	4.97E-02	1.77E-02	4.61E-02	4.57E-04	1.83E-02	7.40E-04	2.22E-02	4.60E-04
B7	1.76E-02	3.50E-03	1.55E-02	7.64E-05	5.13E-03	1.15E-04	5.17E-03	7.57E-05
B8	1.82E-02	3.10E-03	1.49E-02	6.52E-05	4.68E-03	9.28E-05	4.31E-03	6.23E-05
B9	1.40E-02	2.70E-03	1.06E-02	5.31E-05	3.24E-03	7.49E-05	2.77E-03	5.05E-05
Total TBR	1.16		1.37		1.21		1.42	



شکل (۳) نرخ زایش تجمعی ناشی از هر واکنش

شکل (۴) تخلیه انرژی نوترون در لایه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل براحتی می‌توان نحوه تخلیه انرژی نوترون‌ها را در لایه‌های مختلف دید. با دقت در این شکل دریافت میشود که بیشترین میزان تخلیه انرژی در لایه خنک کننده است که به کمک پراکندگی الاستیک توانسته است بخش زیادی از انرژی نوترون را تخلیه نماید. در بخش زاینده نیز تا حدودی این افزایش تخلیه دیده می‌شود (البته نه به اندازه لایه خنک کننده).



شکل (۴) تخلیه انرژی نوترون در لایه‌ها

به منظور درک بهتر، درصد تخلیه انرژی در هر نوع لایه به تفکیک در جدول (۴) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار انرژی تخلیه شده به ترتیب در لایه‌های خنک کننده و زاینده می‌باشد. در استیل کمینه تخلیه انرژی ملاحظه می‌شود و دلیل آن عدم توانایی استیل برای پراکندگی الاستیک نوترون است.

جدول (۴) درصد تخلیه انرژی در هر نوع لایه

	Li	LiPb	Li2O	Li2ZrO3	Li2TiO3	LiAlO2	Li4SiO4	Li8PbO6	Li2BeF4	Li17Pb83
F	0.03	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.05
S	2.96	3.28	3.65	4.24	4.20	4.14	3.93	4.04	3.58	2.99
C	53.92	92.67	68.40	83.24	80.51	78.17	73.96	82.10	66.76	94.81
B	43.09	3.99	27.88	12.45	15.21	17.62	22.04	13.78	29.59	2.14

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله با شبیه‌سازی یک هندسه ساده تک بعدی در کد مونت کارلوی MCNPX به تحقیق در مورد تولید تریتیوم که در صنعت و اساساً نیروگاه‌های همجوشی و یا ترکیبی (همجوشی-شکافت) از اهمیت بالایی برخوردار است، پرداخته شد. همچنین در این مقاله نرخ زایش تریتیوم برای ۱۰ نوع ماده مختلف و در تمام لایه‌های در نظر گرفته محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. در بین مواد تست شده ۶ ماده عملکردشان به نحوی بود که نرخ زایش آنها بزرگتر از ۱/۰ بود. بالاترین میزان TBR مربوط به Li_2BeF_4 است. وجود Be در این ماده سبب شده است تا بازده و نرخ تولید تریتیوم بالاتر از سایر مواد مشابه خود باشد. در مقاله‌های بعدی



تلاش خواهد شد تا سیستم مورد مطالعه از جنبه هندسه به مسئله واقعی نزدیکتر شده و همچنین اثر انتخاب خنک کننده بر نتایج بررسی گردد.

مراجع:

۱. Şahin, H.M., G. Tunç, and N. Şahin, *Investigation of tritium breeding ratio using different coolant material in a fusion-fission hybrid reactor*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(17): p. 7069-7075.
۲. Şahin, H.M., et al., *Monte Carlo calculation for various enrichment lithium coolant using different data libraries in a hybrid reactor*. Energy Conversion and Management, 2008. **49**(7): p. 1960-1965.
۳. Sato, S. and T. Nishitani, *Impact of armor materials on tritium breeding ratio in the fusion reactor blanket*. Journal of nuclear materials, 2003. **313**: p. 690-695.
۴. McLane, V., *ENDF-102 data formats and procedures for the evaluated nuclear data file ENDF-6*. 2001, Brookhaven National Lab.
۵. Übeyli, M. and E. Tel, *Effect of different structural materials on neutronic performance of a hybrid reactor*. Journal of fusion energy, 2003. **22**(2): p. 173-179.
۶. Zhao, J., Y. Yang, and Z. Zhou, *Study of thorium-uranium based molten salt blanket in a fusion-fission hybrid reactor*. Fusion Engineering and Design, 2012. **87**(7): p. 1385-1389.