

بررسی نوترون‌های رسیده به ناحیه شکافت با تغییر دمای محیط پلاسمای همجوشی در یک راکتور ترکیبی شکافت-همجوشی

تیموری سندسی، سید مهدی - قاسمی زاد، عباس* - خوشبین فر، سهیل^(۱)

^(۱) دانشگاه گیلان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

در این پژوهش، با شبیه سازی یک راکتور ترکیبی شکافت-همجوشی که با استفاده از کد محاسباتی MCNPX 2.7.0 شبیه سازی شده است، محیط پلازما به صورت یک اتاقک چنبره ای با ابعاد پلاسمای راکتور همجوشی KSTAR کشور کره جنوبی و توزیع انرژی ناشی از یک واکنش d-t و دمای محیط پلاسمای همجوشی بر حسب MeV شبیه سازی گردید و شار نوترونی رسیده به قسمت شکافت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شار نوترون‌های رسیده به قسمت شکافت، تا حد بسیار زیادی مستقل از دمای محیط پلازماست.

کلمات کلیدی: راکتور ترکیبی شکافت-همجوشی، دمای محیط پلازما، کد محاسباتی MCNPX 2.7.0

مقدمه :

ایده اولیه دستیابی به انرژی گداخت بر روی زمین، به بیش از چندین دهه می رسد. علی رغم پیشرفت‌های عظیم حاصل شده، هنوز به نظر می رسد که فاصله زیادی تا تولید نیروگاه‌های تجاری گداخت هسته‌ای وجود دارد. در نیروگاه‌های نسل اول، سوخت ترکیبی ایزوتوپ‌های هیدروژن (دوتریوم و تریتیوم یا DT) سوخت اصلی خواهد بود. در این شرایط گداخت DT ذرات باردار آلفا و خنثی نوترون تولید می کند. طراحی سوخت به گونه ای برنامه ریزی می گردد تا کسر قابل توجهی از ذرات آلفای تولید شده با انرژی اولیه ۳٫۵ MeV در محیط پلازما محبوس و شرایط خود- گرمایشی را فراهم کنند. با این حال، نوترون‌ها به دلیل پارامتر محصورسازی بزرگ 4.7 g/cm^2 به آسانی و بدون برهمکنش، محیط پلاسمای سوخت را ترک می کنند. به عبارتی محیط پلازما نسبت به عبور آنها شفاف است [۱].

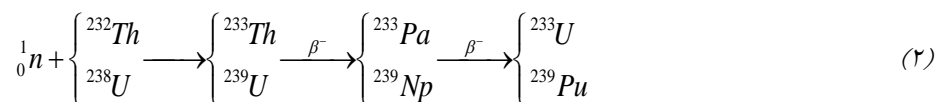
بنابراین برای اهداف با ابعاد در حد چند میلی متر، در عمل نمی توان برای بازیافت انرژی ۱۴٫۱ MeV حسابی باز نمود. عموماً در محاسبات بهره انرژی راکتور سهم نهشت موضعی انرژی نوترونی به دلایل گفته شده محاسبه نمی گردد. در این شرایط تلاش می شود در سیستم راه انداز- هدف درون قلب راکتور، بهره انرژی بالایی در حدود ۱۰۰-۴۰ بدست آید [۲]. رسیدن به این مرز هنوز با چالش‌های فنی جدی ای روبرو است. یکی از راهکارهای افزایش بهره وری سیستم، استفاده از شار نوترونی گداخت در تولید ایزوتوپ

تریتیوم در پوشش اول مایع راکتور می باشد [۳]. نگرانی بعدی ناشی از تخریب مواد دیواره اول پوشش راکتور ناشی از اندرکنش شار بالای نوترون گداخت می باشد [۴]. در مقابل این موارد در سمت گداخت، در سمت مقابل، نیروگاه های شکافت تجاری با انجام فرایند شکافت هسته ای اورانیوم-۲۳۵ با نوترون های حرارتی از نیمه دوم قرن گذشته عرضه شده اند. نسل های بعدی آنها قادرند با نوترون های پرانرژی نیز به شکافت کنترل شده دست یابند. با قرار دادن این دو صحنه، به این پرسش می رسیم که در صورت تحقق بتوان سامانه نیروگاه هسته ای ساخت که در آن توامان هر دو فرایند شکافت و گداخت در افزایش بهره وری فرایند اصلی مشارکت نمایند [۵]. ایده نیروگاه های هیبرید (دو رگه) شکافت - گداخت به اواخر قرن گذشته باز می گردد که در آن موقع بته گونه ای از آن را پیشنهاد نمود [۶]. امروزه کاربرد های گوناگونی برای نیروگاه های دو-رگه شکافت گداخت از جمله تولید انرژی، تولید سوخت و زباله سوزی پسمان شکافت اشاره نمود [۷].

در این پژوهش، تغییرات دمایی محیط پلاسمای همجوشی جهت ارزیابی شار نوترون های ورودی به اتاقک شکافت در یک راکتور ترکیبی گداخت-شکافت بررسی می گردد.

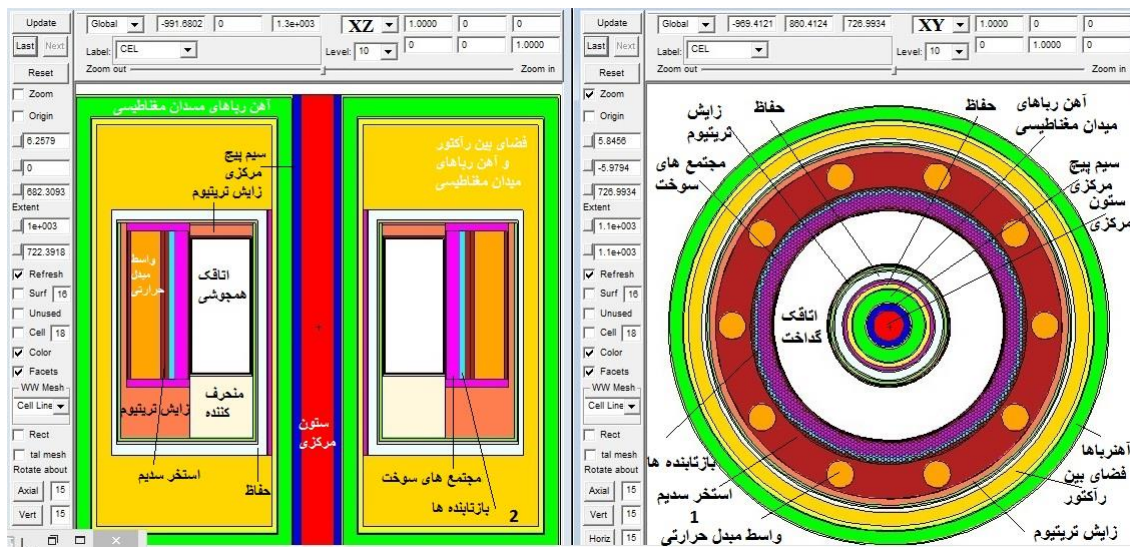
روش کار :

راکتورهای ترکیبی شکافت-همجوشی، نسل جدید راکتورهای هسته ای می باشند که در آن با ترکیب عمل شکافت و همجوشی، در وهله اول استفاده از گداخت برای تولید انرژی با بهره مثبت احتمالاً امکان پذیر می باشد و در وهله بعد، با استفاده از نوترون بسیار سریع (MeV) ۱۴/۱ حاصل از گداخت می توان، ضمن بهره گیری از اورانیوم-۲۳۸ برای شکافت و عدم نیاز به غنی سازی و صرف هزینه های بسیار زیاد برای آن، سوخت شکافتی اورانیوم-۲۳۳ و پلوتونیوم-۲۳۹ و نیز سوخت گدازای تریتیوم را طبق معادله های (۱) و (۲) تولید نمود. [۸]



اما آن چه پس از مدتی ذهن بسیاری از دانشمندان را به خود معطوف نمود، استفاده از نوترون سریع حاصل از گداخت، برای استفاده از این راکتور جهت تبدیل پسمان های هسته ای به عناصری با پرتوایی کمتر و سمیت پایین تر می باشد. راکتورهای زیربحرانی سوزاننده پسمان های هسته ای، یکی از انواع این راکتورها می باشند که بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. [۹]

در این پژوهش سعی گردیده با شبیه سازی یک رآکتور ترکیبی شکافت-همجوشی و با تغییر در شرایط فعالیت آن، تولید شار نوترونی در قسمت شکافت مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از نسخه X2.7.0 کد محاسباتی MCNP محصول آزمایشگاه ملی لوس آلاموس آمریکا [۱۰] و با استفاده از گزارش ایمنی رآکتور زیر بحرانی پیشرفته سوزان^۱ (SABR) [۱۱]، ساختمان یک رآکتور ترکیبی، آن گونه که در شکل شماره (۱) دیده می شود، شبیه سازی گردید.

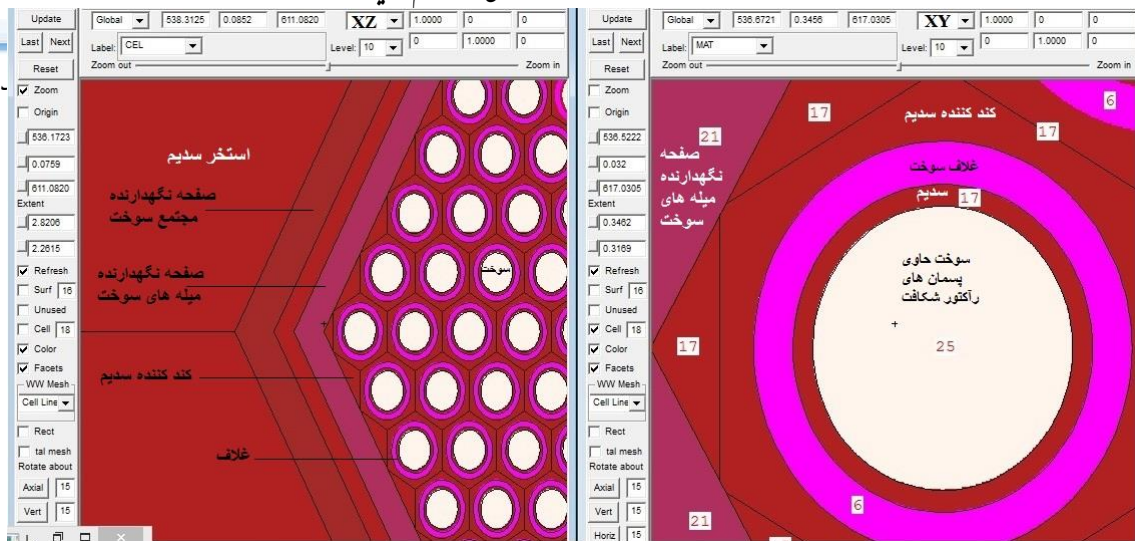


شکل شماره (۲): نمایی از اولین میله سوخت و مجتمع سوخت در برابر نوترون های ورودی از همجوشی
شکل سمت چپ: اولین مجتمع سوخت در برابر نوترون های ورودی ناشی از همجوشی

تمامی اندازه ها، ابعاد و چیدمان سلول ها، بر اساس گزارش ایمنی رآکتور زیر بحرانی پیشرفته سوزان قرار داده شده است و در هر زمانی که از منابع دیگری برای این کار استفاده شده، به آن منبع ارجاع گردیده است. پس از ستون های میانی این رآکتور که وظیفه تولید میدان مغناطیسی و نیز نگهداشت پلاسمای تولید شده را بر عهده دارند، ناحیه رآکتور قرار دارد. در این ناحیه، دو قسمت اصلی استخر سدیم، که ناحیه شکافت در آن قرار دارد، و اتاقک همجوشی، که پلازما در آن قرار می گیرد، قرار دارند که توسط جداره های مختلف رآکتور احاطه گردیده اند. قسمت پلازما و اتاقک همجوشی، که در سمت چپ شکل شماره (۱) با رنگ سفید نشان داده شده است، توسط سه جداره آغازین احاطه گردیده که به ترتیب از بریلیوم، آلیاژ CuCrZr و فولاد ضد زنگ ODS به همراه ۵۰ درصد سدیم تشکیل شده است.

پس از اتاقک همجوشی، استخر سدیم قرار دارد که ناحیه شکافت در آن قرار دارد. در این ناحیه، میله های سوخت، در استوانه های شش وجهی در آرایه ای شبکه ای قرار دارند که اطراف میله سوخت را غلاف و

¹ Subcritical Advanced Burner Reactor



شکل شماره (۲): نمایی از اولین میله سوخت و مجتمع سوخت در برابر نوترون های ورودی از همجوشی
 شکل سمت چپ: اولین مجتمع سوخت در برابر نوترون های ورودی ناشی از همجوشی
 شکل سمت راست: اولین میله سوخت در برابر نوترون های ورودی ناشی از همجوشی

در قسمت سوخت میله سوخت، ماده شکافت پذیر یا ماده ای که قرار است سوزانده شود، مانند پسمان هسته ای، قرار می گیرد. ترکیب مورد استفاده در این بخش معمولاً اکسید ماده شکافتا به صورت UO_2 و یا UO_2Pu_x یا انواع دیگری از این ترکیب ها قرار می گیرد که به صورت استوانه هایی با ارتفاع کوچک 2 می باشد. جنس غلاف از فلز زیرکونیوم و معمولاً به صورت آلیاژی از آن می باشد که نوع و جنس آن با توجه به شرایط تعیین می شود.

فضای ناحیه شکافت را استخری از فلز سدیم مذاب احاطه نموده است که هم وظیفه کند کنندگی نوترون و هم انتقال گرمای حاصل از شکافت به واسطه های مبدل حرارتی^۳ (IHXS) را بر عهده دارد. در اطراف سدیم، لایه های مختلفی قرار دارد که لایه مربوط به زایش تریتیوم^۴، حفاظ های بیرونی و داخلی و ناحیه کرید بورونی و نیز بازتابنده ای از جنس گرافیت را شامل می شود. ناحیه پلاسما و اتاقک همجوشی، محفظه ای چنبره ای شکل است که ابعاد آن برگرفته از ابعاد راکتور KSTAR می باشد. [۱۲] پهنای بیشینه این پلاسما، ۱/۸ پهنای کمینه آن ۰/۵ متر می باشد. حالت پلاسمایی محیط این اتاقک نیز با استفاده از توابع توزیع انرژی قرار داده شده که در راهنمای کد محاسباتی MCNP^۵ تعریف گردیده است.

اندازه گیری ها و نتایج :

^۲ pellet

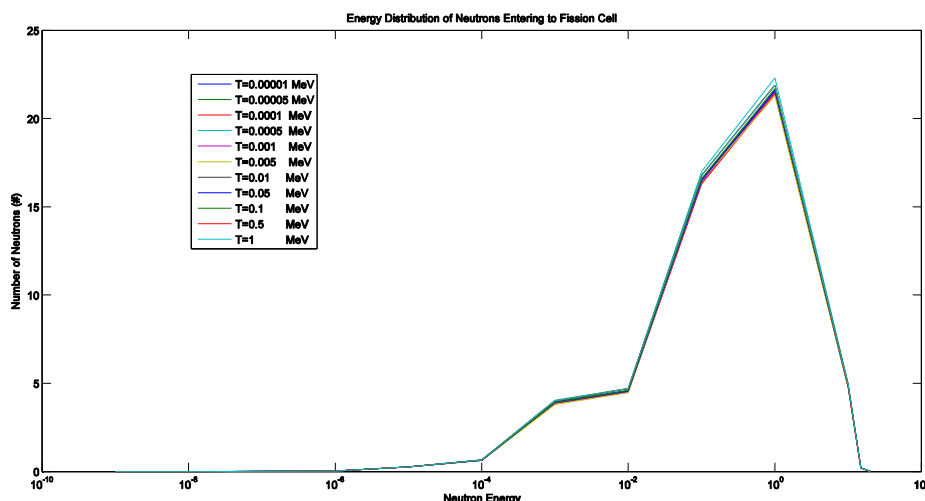
^۳ Intermediate Heat Exchanger

^۴ Tritium breeding

آن چه برای شکافت در رآکتور ترکیبی شکافت-همجوشی با طراحی شکل شماره (۱) بسیار حائز اهمیت است، توزیع انرژی نوترون های رسیده به قسمت شکافت و نیز تعداد نوترون های ورودی به قسمت شکافت می باشد که با استفاده از تالی f1 و با استفاده از کارت En محاسبه گردید. سوخت قسمت شکافت، پسمان های ناشی از مصرف سوخت یک رآکتور شکافت به همراه سوخت بارور اورانیوم-۲۳۸ می باشد که با استفاده از محاسبات مصرف سوخت رآکتور شکافت به دست می آید. برای بررسی این موضوع، دمای محیط پلاسمای همجوشی کننده، مهم به نظر می رسد. برای بررسی این مسأله، با استفاده از تابع های تولید انرژی قرار داده شده در کد MCNP، و با استفاده از کارت ERG و قرار دادن عدد ۴-، می توان دمای محیط پلاسمای همجوشی و نوع آن را مشخص نمود. اگر توزیع دمایی محیط پلاسمای را به صورت یک تابع ماکسولی به صورت فرمول شماره (۱)، در نظر گرفت:

$$P(E) = C \cdot \exp\left[-\frac{(E-b)^2}{a}\right] \quad (3)$$

b، نشان دهنده میانگین انرژی است که با توجه به نوع واکنش همجوشی، در راهنمای کد قرار گرفته است. نظر به استفاده از واکنش همجوشی دوتریوم-تریتیوم، مقدار b، ۱- در نظر گرفته شده است [۱۳]. در مخرج کسر نیز، مقدار a، دمای محیط پلاسماست که با MeV نمایش داده می شود. برای این منظور مقدار عدد a بر حسب (eV) به ترتیب ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰۰ و یک میلیون در نظر گرفته شد. شار نوترونی نیز بر حسب انرژی از مقدار یک الکترون ولت تا ۱۰۰ مگا الکترون ولت به صورت لگاریتمی مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج این اندازه گیری در شکل شماره (۳) نشان داده شده است.



شکل شماره (۳): شار نوترون های رسیده به قسمت شکافت بر حسب انرژی نوترون ورودی برای دماهای مختلف محیط پلاسمای

بحث و نتیجه گیری :

آن چه به وضوح می توان از شکل شماره (۳) مشاهده نمود این است که توزیع انرژی شار نوترون های رسیده به قسمت شکافت، حتی برای مقادیر بسیار متفاوت دمای محیط پلازما یکسان می باشد و تغییر مقدار دمای محیط از ۱۰ الکترون ولت تا یک میلیون الکترون ولت، تفاوت محسوسی در مقدار نوترون های ورودی به این ناحیه نخواهد داشت. نتایج به خوبی نشان می دهد که شار نوترون های ورودی به قسمت شکافت، عملاً مستقل از دمای محیط پلاسمای گداخت است و غالباً نوترون های ورودی به قسمت شکافت، دارای انرژی (MeV) ۱ می باشد. این استقلال از دمای محیط می تواند، به دلیل سلول های مختلف پیش روی ذرات تولیدی از اتاقک پلازما و گذرا از این سلول ها باشد که در گذر از این سلول ها، دارای میزان خاصی انرژی خواهند بود. لذا می توان به این نتیجه دست یافت که برای تغییر در انرژی نوترون های رسیده به قسمت شکافت، تغییر در مواد، سلول ها و شرایط حاکم بر این موارد که نوترون تولیدی از اتاقک همجوشی، با آن مواجه خواهد بود، احتمالاً تأثیر بیشتری خواهد داشت.

مراجع :

- [1] J. W. Simpson, et al., "Outlook for the Fusion Hybrid and Tritium-breeding Fusion Reactors", National Academy press, Washington, (1987).
- [2] A. Caruso and V.A. Pais, "The ignition of dense DT fuel by injected triggers", Nuclear Fusion, 36(6), 745-757, (1996).
- [3] M. A. Abdou, "Tritium Breeding in Fusion Reactors", Argonne National Laboratory, (1982).
- [4] H. Hoven, K. Julich, "Materials for high heat flux components of the first wall in fusion reactors", Institut für Reaktorwerkstoffe, (2011).
- [5] A. A. Harms, M. Heindler, "Nuclear Energy Synergetics: An Introduction to Conceptual Models of Integrated Nuclear Energy Systems", Springer Science & Business Media, (2012).
- [6] H. A. Bethe, "The Fusion Hybrid", Physics Today, 44-51, (1979).
- [7] S. Sahin, "Power Flattening in a Catalyzed Deuterium-Deuterium Fusion-Driven Hybrid Blanket Using Nuclear Waste Actinides", Nuclear Technology, 92(1), 93-105, (1990).
- [8] Research Needs for Fusion-Fission Hybrids, Report of the Research Needs Workshop (Renew), Department of Energy, Maryland, (2009).
- [9] D. Ridikas, et al., "Fusion-fission hybrid system for nuclear waste transmutation (I): Characterization of the system and burn-up calculations", Progress in Nuclear Energy, 48(3), 235-246, (2006).
- [10] D. B. Pelowitz, et al., "MCNPX 2.7.0 extensions", Los Alamos National Laboratory, LA-UR-11-02295, (2011).
- [11] W. M. Stacey, et al., "Resolution of Fission and Fusion Technology Integration, Issues: An Upgraded Design Concept for The Subcritical Advanced Burner Reactor", NUCLEAR TECHNOLOGY, 187, 15-43, (2014).
- [12] G. S. Lee, "Status of the KSTAR Project and Fusion Research in Korea", National Fusion R & D Center: Korea Basic Science Institute, (2011)
- [13] "MCNPX User's Manual Version 2.5.0", Los Alamos National Laboratory Report, LA-CP-05-0369, (2005).



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱۳۹۵ اسفندماه ۱۵ و ۱۴ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

