

بررسی شار غیرخطی نوترون سریع در قلب راکتور هیبریدی گداخت - شکافت

ابطحی، نجمه سادات^۱؛ توکلی عنبران، حسین^۱؛ سادات کیایی، سید محمود^۳؛ حسن زاده، مصطفی^۴

^۱ دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

najmchabahi@gmail.com

tavakoli-anbaran@gmail.com

^۲ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، تهران، ایران

sadatkiar@yahoo.com

^۳ سازمان انرژی اتمی، پژوهشکده راکتور، تهران، ایران

mhasanzadeh1354@gmail.com

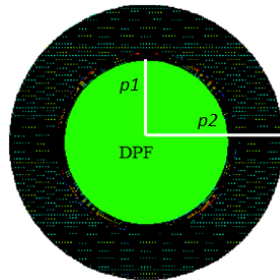
چکیده

در افزایش ضریب تکثیر راکتور، چیدمان ساختار هندسی و نوع انتخاب مواد راکتور براساس شار غیرخطی نوترونی که از قلب راکتور گسیل می‌شود، بسیار کارآمد است. برای این بررسی لازم است شار غیرخطی نوترون‌های چشمه گداخت، طی عبور از فضای قلب تحلیل شود تا بتوان مناسبترین مکان و شکل هندسه برای سلول‌های بعدی راکتور از جمله تکثیرکننده، سوخت، کنک‌کننده و ... را در نظر گرفت. دسآورد این مطالعه، بررسی شار خالص غیرخطی نوترون گداخت حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی است که از تمام سطح داخلی بلنکت در دو هندسه استوانه‌ای و کره‌ای می‌گذرد تا مناسبترین شکل هندسه، ارتفاع و شعاع برای قلب راکتور انتخاب شود در این صورت بیشترین شار غیرخطی نوترون سریع وارد بلنکت خواهد شد و بازده راکتور از لحاظ حجم مواد سوختی و آهنگ تولید افزایش می‌یابد.

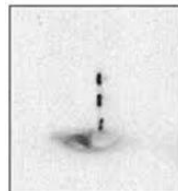
واژه‌های کلیدی: راکتور گداخت - شکافت، بلنکت، معادلات غیرخطی شار نوترون سریع، دستگاه پلاسمای کانونی

مقدمه

راکتورهای هیبریدی گداخت - شکافت یکی از انواع راکتورهایی است که سازگاری خوبی با محیط زیست دارد و تولید انرژی توسط دو فرآیند گداخت دوتریم - تریتم در قلب و فرآیند شکافت در سلول‌هایی به نام بلنکت که اطراف قلب را احاطه کرده است، انجام می‌شود.



شکل (۱) - راکتور هیبرید گداخت شکافت (چشمه نوترون حاصل از گداخت، دستگاه پلاسمای کانونی DPF - ρ_1 شعاع قلب - $(\rho_1 - \rho_2)$ ضخامت بلنکت) دستگاهی که به عنوان چشمه نوترون‌های سریع با انرژی در حدود ۱۴ MeV حاصل از فرآیند گداخت در قلب راکتور هیبرید استفاده می‌شود، دستگاه پلاسمای کانونی^۱ DPF است که می‌تواند به کمک تراکم و شتاب مغناطیسی، پلاسمای داغ و چگال تولید کند. پینچ و یا ستون پلاسمای داغ و چگال روی آند شکل می‌گیرد و نقاط hot spot درون پینچ تولید نوترون‌های گداخت می‌کنند به همین دلیل می‌توان چشمه نوترون در مرکز راکتور را نقطه‌ای در نظر گرفت.



شکل (۲) - چشمه نوترون گداخت و یا نقاط hot spot درون پینچ روی آند

نوترون‌های گداخت، منبع تأمین‌کننده نوترون‌های حرارتی عامل فرآیند شکافت در بلنکت، هستند. برای افزایش فرآیندهای شکافت و بازده انرژی در حالت زیر بحرانی می‌توان تعداد بلنکت‌ها را با رعایت فاصله مناسب افزایش داد همچنین با اضافه

کردن سلول حاوی تکثیرکننده و کندکننده قبل از بلنکت می‌توان علاوه بر اینکه شار غیرخطی نوترون سریع را به حرارتی تبدیل کرد تعداد نوترون‌ها را هم افزایش داد. البته نحوه تعیین فاصله سلول تکثیرکننده از پینچ و انتخاب هندسه سطح داخلی بلنکت مستلزم تحلیل شار غیرخطی نوترون سریع روی سطح داخلی بلنکت است. بنابراین به بررسی معادله شار غیرخطی نوترون حاصل از چشمه گداخت می‌پردازیم. برای انجام این بررسی لازم است معادلات شار غیرخطی نوترون با اعمال شرایط مرزی از چشمه تا سطح بلنکت مورد بررسی قرار گیرد.

معادلات شار غیرخطی نوترون حاصل از چشمه گداخت

همانطور که ذکر شد، چشمه گداخت تشکیل شده روی آند شامل نقاط hot spot است بنابراین چشمه به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. اکنون با بررسی هندسه سطح داخلی بلنکت به صورت کروی و یا استوانه‌ای، شار غیرخطی نوترون و چگالی جریان به ترتیب در حالت اول که تابع r و در حالت دوم که تابع ρ و h خواهد بود، بررسی می‌شود. اعمال شرایط مرزی روی معادله پخش حالت پایدار $-S = -\Sigma_a \phi - D \nabla^2 \phi$ در هر دو هندسه شارهای غیرخطی متفاوتی را نتیجه می‌دهد. ابتدا لازم است شرایط محیط اطراف چشمه نقطه‌ای در معادله پخش اعمال شود، به دلیل اینکه گاز دوتریم - تریتم تزریق شده در قلب رقیق است و با در نظر نگرفتن آند و کاتدهای دستگاه پلاسمای کانونی، چشمه گداخت در محیط غیر جذبی تعریف می‌شود سپس شار غیرخطی نوترون روی سطح داخلی بلنکت اول بررسی خواهد شد. بنابراین سه ترم چشمه S در محیط، سطح مقطع جذب Σ_a و ضریب انتشار در محیط D از این معادله حذف و تنها $\nabla^2 \phi = 0$ باقی می‌ماند. با توجه به اینکه نوترون حاصل از گداخت، ایزوتروپ در نظر گرفته شده است، معادله لاپلاس دارای تقارن سمتی است.^۷

بررسی شار غیرخطی روی سطح داخلی بلنکت استوانه‌ای

از آنجایی که شار غیرخطی روی کل سطح استوانه وجود دارد و در جهت زاویه‌ای متقارن است برای بدست آوردن ثابت‌های معادلات شار غیرخطی لازم است که در حالت اول شار در بالا و پایین استوانه صفر و روی سطح استوانه غیر صفر در نظر گرفته شود (حالت پریودیک) و در حالت دوم شار در بالا و پایین استوانه غیر صفر و روی سطح استوانه صفر بررسی شود (حالت نیم‌پریودیک) سپس با جمع هر دو حالت به معادله اصلی دسترسی پیدا کنیم.

جواب‌های عمومی معادله لاپلاس در حالت پریودیک در جهت‌های شعاعی و ارتفاعی به صورت زیر خواهد بود؛

$$\begin{aligned}\phi_1(\rho, z) &= R_1(\rho) Z_1(z) \\ R_1(\rho) &= C_1 I_0(k_1 \rho) + C_2 K_0(k_1 \rho) \\ Z_1(z) &= A_1 \sin(k_1 z) + B_1 \cos(k_1 z)\end{aligned}\quad (1)$$

I_0 و K_0 توابع اصلاح شده بسل مرتبه اول و دوم می‌باشد. z فاصله در امتداد محور Z از مرکز و ρ فاصله مختصات شعاعی از محور Z می‌باشد. ρ هنگامی که به سمت صفر میل می‌کند، مقدار شار معین و برابر با شار چشمه است. در نتیجه C_2 برابر صفر است و در امتداد محور Z در فاصله $h/2$ ، $-h/2$ شار صفر در نظر گرفته شده است بنابراین A_1 صفر و $k_1 = \frac{n\pi}{h}$ می‌باشد.

$$R_1(\rho) = C_1 I_0(k_1 \rho) ; \quad Z_1(z) = B_1 \cos(k_1 z) \quad (2)$$

جواب‌های عمومی معادله لاپلاس در حالت نیم‌پریودیک در جهت‌های شعاعی و ارتفاعی به صورت زیر خواهد بود؛

$$\begin{aligned}\phi_2(\rho, z) &= R_2(\rho) Z_2(z) \\ R_2(\rho) &= C_3 J_0(k_2 \rho) + C_4 Y_0(k_2 \rho) \\ Z_2(z) &= A_2 e^{k_2 z} + B_2 e^{-k_2 z}\end{aligned}\quad (3)$$

J_0 و Y_0 توابع بسل مرتبه اول و دوم می‌باشد. در حالت دوم در امتداد محور Z در فاصله $h/2$ ، $-h/2$ از مرکز شار غیر صفر است و در فاصله ρ از محور Z مقدار شار صفر می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی داریم؛

$$R_2(\rho) = C_3 J_0(k_2 \rho) ; \quad Z_2(z) = A_2 \cosh(k_2 z) \quad (4)$$

و با توجه به اولین ریشه مربع تابع بسل مرتبه اول $J_0(k_2\rho)$ ، $k_2 = \frac{2.405}{\rho_1}$ است. بنابراین شار غیرخطی در دو حالت پریودیک و نیم پریودیک به صورت زیر خواهد بود؛

$$\begin{aligned}\phi_1(\rho, z) &= E I_0\left(\frac{\pi}{h}\rho\right) \cos\left(\frac{\pi}{h}z\right) \\ \phi_2(\rho, z) &= E' J_0\left(\frac{2.405}{\rho_1}\rho\right) \cosh\left(\frac{2.405}{\rho_1}z\right)\end{aligned}\quad (5)$$

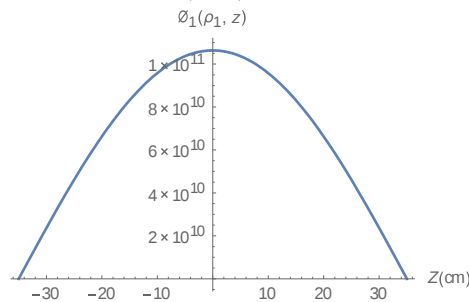
اکنون برای بدست آوردن نسبت ضرایب معادله بالا، شار در نقطه صفر را برابر با هم قرار داده و در این حالت $E' = E$ است. در محاسبات ضریب پخش واحد در نظر گرفته شده است و در نهایت شار روی کل سطح استوانه $\phi_1(\rho, z) = \phi_1(\rho, z) + \phi_2(\rho, z)$ می باشد و براساس قانون فیک $\vec{J}(\rho, z) = -D\vec{\nabla}\phi(\rho, z)$ چگالی جریان کل بدست می آید؛

$$\vec{J}(\rho, z) = -DE \left[\left(\frac{\pi}{h} \cos\left(\frac{\pi}{h}z\right) I_1\left(\frac{\pi}{h}\rho\right) - \frac{2.405}{\rho_1} \cosh\left(\frac{2.405}{\rho_1}z\right) J_1\left(\frac{2.405}{\rho_1}\rho\right) \right) e_\rho + \left(\frac{2.405}{\rho_1} \sinh\left(\frac{2.405}{\rho_1}z\right) J_0\left(\frac{2.405}{\rho_1}\rho\right) - \frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi}{h}z\right) I_0\left(\frac{\pi}{h}\rho\right) \right) e_k \right] \quad (6)$$

در این بررسی با توجه به خصوصیات دستگاه پلاسمای کانونی به کار رفته، چشمه نوترون گداخت (n_s) 10^4 ، شعاع استوانه در حدود $33/3\text{ cm}$ و ارتفاع آن از -35 cm تا $+35\text{ cm}$ در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن ضریب E کافیت از رابطه $\int \vec{J}(\rho) \cdot 2\pi \rho d\rho dz + 2 \int \vec{J}(z) \cdot 2\pi \rho d\rho \hat{z} = 10^{14}$ استفاده شود. در این حالت $E = 6.477 \times 10^{10}$ است و چگالی جریان نوترون روی سطح استوانه مورد نظر؛

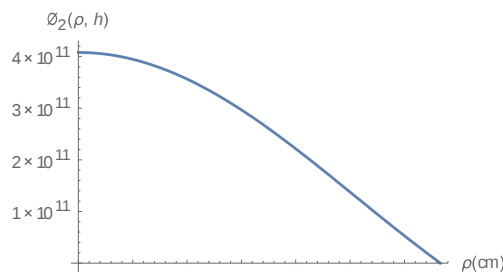
$$\vec{J}(\rho, z) = (1.528 \times 10^{10} e_\rho + 4.775 \times 10^9 e_k) \left(\frac{n}{\text{cm}^2.s} \right) \quad (7)$$

با توجه به ضرایب بدست آمده می توان شار نوترون پریودیک $\phi_1(\rho, z)$ را بررسی کرد؛



نمودار (۱) - شار نوترون در حالت پریودیک

و شار نوترون نیم پریودیک $\phi_2(\rho, z)$ ؛



نمودار (۲) - شار نوترون در حالت نیم پریودیک

بررسی شار غیرخطی روی سطح داخلی بلنکت کروی

با توجه به اینکه در حالت کروی شار تنها در قسمت شعاعی متغیر است و با اعمال شرایط قلب که چشمه نقطه‌ای در محیط غیرجذب‌ی در نظر گرفته شده بود $\nabla^2 \phi = 0$ ، داریم $\phi(r) = R(r)$ ، جواب عمومی این معادله به صورت زیر است؛

$$R(r) = \frac{C_5}{r} + C_6 \quad (8)$$

برای بدست آوردن ضریب C_5 ، $S = J(r)4\pi r^2$ تعداد خالص نوترون‌هایی که از سطح کره با شعاع ۳۵cm در ثانیه عبور می‌کنند به کمک چگالی جریان $J(r)$ در حالت حدی بررسی می‌شود؛

$$\lim_{r \rightarrow 0} r^2 J(r) = \frac{S}{4\pi} \quad (9)$$

براساس قانون فیک $\vec{J}(r) = -D \nabla \phi(r)$ داریم؛

$$J_{\text{sphere}}(r) = -D \left(\frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) = DC_5 \frac{1}{r^2} \quad (10)$$

با توجه به معادلات بالا و حالات حدی $C_5 = \frac{S}{4\pi D}$ و جریان نوترون در سطح کره؛

$$J_{\text{sphere}}(r) = \frac{S}{4\pi r^2} = 6.496 \times 10^9 \left(\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right) \quad (11)$$

جریان خالصی که از سطح داخلی بلنکت با هندسه کروی می‌گذرد و وارد بلنکت می‌شود؛

$$4\pi r^2 J_{\text{sphere}}(r) = S = 10^{14} \left(\frac{n}{\text{s}} \right) \quad (12)$$

نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای (۱) و (۲) شار غیرخطی نوترون با فاصله گرفتن از چشمه کاهش می‌یابد بنابراین برای افزایش بازده راکتور و کاهش جرم سوخت هرچه بلنکت نزدیکتر به چشمه قرار بگیرد، مناسبتر است. البته ابعاد محفظه استوانه‌ای و کروی بستگی به اجزا تشکیل‌دهنده DPF از جمله شعاع و ارتفاع آند، کاتدها و فاصله بین آنها از هم دارد. علاوه بر ابعاد محفظه دستگاه پلاسمای کانونی، انتخاب هندسه مناسب سطح داخلی بلنکت از لحاظ انتقال بیشترین تعداد نوترون به داخل محفظه سوخت، به کاهش و بهینه‌سازی سوخت مصرفی و افزایش بازده راکتور کمک می‌کند.

با توجه به تحلیل انجام شده چگالی جریان نوترونی که از تمام سطح داخلی بلنکت در حالت کروی می‌گذرد و وارد محفظه سوخت می‌شود $6.496 \times 10^9 \left(\frac{n}{\text{s}} \right)$ است و در مدل استوانه‌ای نظر به اینکه میله‌های سوخت به صورت موازی با سطح جانبی استوانه قرار می‌گیرند و چگالی جریان نوترون در این سطح $1.528 \times 10^{10} e_p \left(\frac{n}{\text{s}} \right)$ می‌باشد بنابراین انتخاب هندسه استوانه‌ای برای سطح داخلی بلنکت به دلیل افزایش سطح و فرار بیشتر نوترون به محفظه سوخت برای افزایش بازده فرآیند شکافت در راکتور و کاهش و بهینه‌سازی مصرف سوخت مناسبتر است. همچنین سطح خارجی بلنکت بهتر است به دلیل کاهش سطح فرار نوترون از محفظه سوخت حالت کروی در نظر گرفته شود. ولی هندسه کروی اشکالاتی از جمله هزینه دارد و ساخت آن به مراتب مشکل‌تر از هندسه استوانه‌ای است.

مراجع

- [1] MUHAMMAD SHAHID RAFIQUE. (2000). "COMPRESSION DYNAMICS AND RADIATION EMISSION FROM A DEUTERIUM PLASMA FOCUS". A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY.
- [2] J.W.Mather. "Methods in Experimental Physics" Volume 9, Part B, (1971), Pages 187-249. [https://doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60862-5](https://doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60862-5)
- [3] H. Talebi, S.M. Sadat Kiai, "Conceptual design of a hybrid fusion-fission reactor with intrinsic safety and optimized energy productivity", *Annals of Nuclear Energy*, 105, 106-115, 2017.
- [4] Koichi Maki "Increase of Tritium Breeding Ratio by Blankets Having Front Breeder Zone in Fusion Reactors", *Fusion Technology*, (1985) 8:3, 2655-2664, DOI: 10.13182/FST85-A24687
- [5] J. R. Lamarsh, an Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1966).
- [6] M. Zakauallah, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* 5 (1996) 544
- [7] Jingxue Yin, Li Huilai, and Zhuoqun Wu, *Nonlinear Diffusion Equations*, January 2001, DOI: [10.1142/9789812799791](https://doi.org/10.1142/9789812799791)
- [8] L. Soto, *Plasma Phys. Contr. Fusion* 47, A352-A381 (2005)
- [9] S. Lee, A. Serban, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 24, 1101-1105 (1996)