آنالیز حساسیت پارامترهای فیزیکی شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای نوترونی قلب یک راکتور زیربحرانی

حسن زاده، مصطفی[۱]*

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای

چکیده

یکی از مسائل مهم در طراحی راکتورهای زیربحرانی، پارامترهای فیزیکی شتابدهنده می‌باشد که می تواند روی پارامترهای نوترونی قلب تاثیر گذار باشد به همین دلیل بایستی این پارامترها را بررسی و آنالیز نمود. پارامترهای فیزیکی شتابدهنده شامل ضریب‌تکثیر چشمه، ضریب تقویت چشمه، بهره تولید نوترون، بهره کل و ثابت انرژی نوترون و جریان شتابدهنده می باشد که با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار انرژی بهینه برای شتابدهنده پروتونی تقریبا ۱۰۰۰MeV می‌باشد. همچنین با افزایش انرژی پروتون، بهره تولید نوترون و بهره کل انرژی نوترون افزایش می‌یابد ولی مقدار جریان شتابدهنده کاهش می‌یابد که این مسئله باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی در طراحی و ساخت شتابدهنده‌ها و راکتورهای زیربحرانی خواهد شد.

کلمات کلیدی: راکتورهای زیربحرانی، کد MCNPX، پارامترهای فیزیکی شتابدهنده و پارامترهای نوترونی قلب.

مقدمه:

یکی از نسل‌های جدید راکتورهای هسته‌ای موسوم به راکتورهای زیر بحرانی واداشته با شتابدهنده (ADSR) به دلایل مختلفی مانند توانایی تولید انرژی و همچنین قابلیت به اصطلاح سوزاندن زباله‌های هسته‌ای به طریقی تمیزتر و ایمن‌تر از آنچه در حال حاضر صورت می‌گیرد مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳-۱]. همچنین از مهمترین و اصلی‌ترین اجزای سیستم‌های واداشته با شتابدهنده، هدف تلاشی نوترونی است که به منظور تولید بیشینه بهره نوترون طراحی می‌شود. در اغلب این طرح‌ها پروتون‌های پر انرژی به عنوان پرتابه در نظر گرفته می‌شوند. به هر حال این فرایند از طریق اندرکنش ذرات پر انرژی بدست آمده از شتابدهنده‌ها با عناصر سنگینی نظیر سرب، بیسموت، تنگستن، اورانیوم، توریوم و غیره به منظور تولید شار بالای نوترون‌ها انجام می‌گیرد. همچنین از مهمترین هدف‌های طراحی ADSR، تلاش برای بهینه‌سازی پارامترهای مهم مانند بهره نوترون، بهره انرژی نوترون و جریان شتابدهنده است که می‌تواند در طراحی ADSR و کاهش هزینه‌های اقتصادی آن کمک نمود. بنابراین هدف اصلی از انجام این تحقیق، آنالیز حساسیت پارامترهای شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای نوترونی قلب یک راکتور زیربحرانی می‌باشد که این آنالیز می تواند در طراحی و ساخت این گونه راکتورها نقش بسزایی داشته باشد [۶-۴].

روش کار:

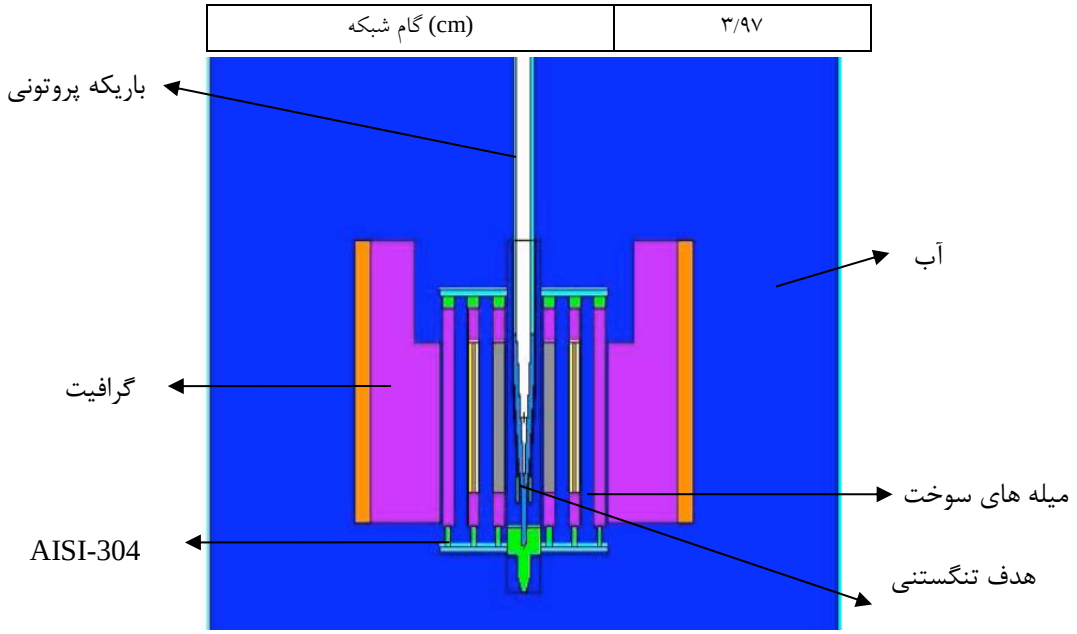
در طراحی راکتورهای زیر بحرانی واداشته با شتابدهنده، پارامترهای فیزیکی شتابدهنده می تواند روی پارامترهای نوترونی قلب تاثیر گذار باشند. به همین خاطر این پارامترها بایستی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. پارامترهای فیزیکی مربوط به شتابدهنده شامل: ضریب‌تکثیر چشمه، ضریب تقویت چشمه، بهره تولید نوترون، بهره کل انرژی نوترون، بهره ثابت انرژی نوترون و جریان شتابدهنده می باشند که توسط کد MCNPX برای قلب راکتور زیر بحرانی TRIGA محاسبه شده است [۷]. این راکتور با اتصال قلب به یک شتابدهنده پروتونی و قرار دادن یک هدف تنگستنی در مرکز آن، چشمه نوترون لازم برای حفظ واکنش های زنجیره‌ای تامین می‌گردد. همچنین قلب راکتور شامل یک ساختار حلقوی که در آب غوطه ور شده، برای شبیه‌سازی توسط این کد در نظر گرفته شده است که در شکل شماره (۱) نشان داده شده است. چیدمان شبکه قلب راکتور TRIGA شامل: ۱۰۸ عدد میله سوخت، ۱۱ عدد میله گرافیت، ٤ عدد میله کنترل و تنظیم کننده می باشد. همچنین مشخصات هندسی هدف تلاشی، قلب و سوخت راکتور در جدول شماره (۱) نشان داده شده است [۲-۱]. لازم به ذکر است برای محاسبه پارامترهای فیزیکی از روابط زیر استفاده شده است. ضریب تکثیر چشمه (k_s) طبق رابطه (۱) محاسبه می شود [٦-٤].

$$k_s = 1-(1/M) \quad (۱)$$

که در این رابطه، M، ضریب تقویت چشمه است.

جدول شماره (۱) : مشخصات هندسی هدف تلاشی، قلب و سوخت راکتور زیر بحرانی TRIGA

مشخصات	مقادیر
ترکیب اولیه سوخت	UZrH
غنای اولیه اورانیوم	٪۲۰
انرژی باریکه پروتون (MeV)	۱۱۵
بیشینه جریان شتاب دهنده (mA)	۲
تعداد میله های سوخت	۱۰۸
تعداد میله های کنترل (B_4C)	٤
قطر قلب (cm)	٥٦
ارتفاع قلب (cm)	۷۲
ضخامت AISI-304 (cm)	۰/۵۰۸
چگالی AISI-304 (g/cm^3)	۷/۵
چگالی گوشت سوخت (g/cm^3)	۵/۸
چگالی غلاف زیرکونیم (g/cm^3)	٦/٤۹
ضخامت غلاف زیرکونیم (cm)	۰/۲۵
چگالی گرافیت (g/cm^3)	۲/۲۵
قطر میله گرافیت (cm)	۸/۷
ارتفاع میله گرافیت (cm)	۳/٦۳



شکل شماره (۱): شبیه‌سازی قلب راکتور زیر بحرانی TRIGA با کد MCNPX

بهره کل انرژی نوترون (G) عبارت است از انرژی آزاد شده به انرژی باریکه ذرات اولیه تابیده شده به هدف تلاشی که می توان با استفاده از رابطه (۲) بدست آورد [٦-٤].

$$G = \frac{Y_{n/p} E_f K_s}{\nu (1-K_s) E_p} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، ν، تعداد نوترون‌ها به ازای هر شکافت، E_f، انرژی شکافت، E_p، انرژی پروتون فرودی و $Y_{n/p}$، بهره تولید نوترون به ازای هر پروتون فرودی می باشد. اگر بهره ثابت نوترون (G_0) را به صورت زیر تعریف کنیم در این حالت بهره کل انرژی نوترون را می‌توان به صورت زیر هم بدست آورد [٦-٤]:

$$G_o = \frac{Y_{n/p} E_f}{\nu E_p} \Rightarrow G = G_o \frac{K_s}{1-K_s} \qquad (۳)$$

علاوه بر این، می توان پارامتر شدت جریان شتابدهنده را به صورت زیر تعریف نمود [٦-٤]:

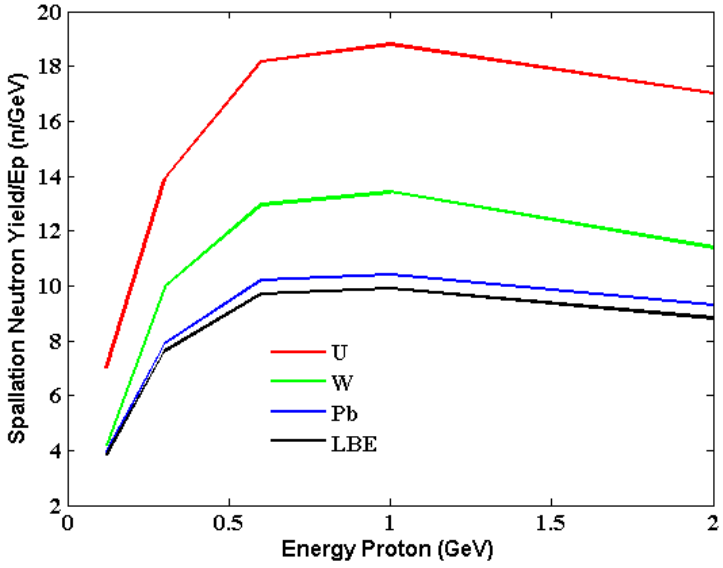
$$I_p = \frac{P_{acc}}{E_p} = \frac{1-K_{eff}}{K_{eff}} \cdot \frac{\bar{\nu}}{\bar{E}_f} \cdot \frac{P_{tot}}{Y_{n/p} \varphi^*} \qquad (٤)$$

که در این رابطه، I جریان شتابدهنده بر واحد ثانیه و P_{tot}، توان کل راکتور زیر بحرانی می باشد. در راکتورهای زیربحرانی واداشته، توان کل راکتور توسط شدت باریکه شتابدهنده کنترل می شود [٦-٤].

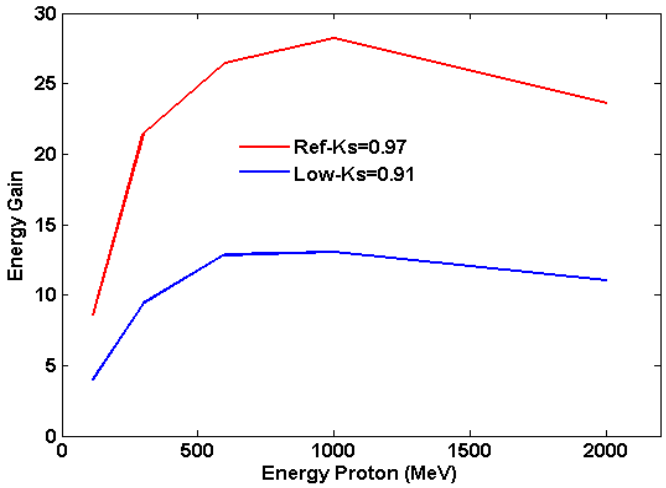
نتایج:

در این تحقیق، اثر انرژی شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای بهره تولید نوترون، بهره کل انرژی نوترون، جریان شتابدهنده و ضریب تکثیر چشمه برای دو حالت زیر بحرانی با ضرایب تکثیر ۰/۹۷ و ۰/۹۱ در قلب راکتور زیر بحرانی TRIGA محاسبه شده است که نتایج آن در شکل های شماره (۲)، (۳)، (٤) و (٥) نشان

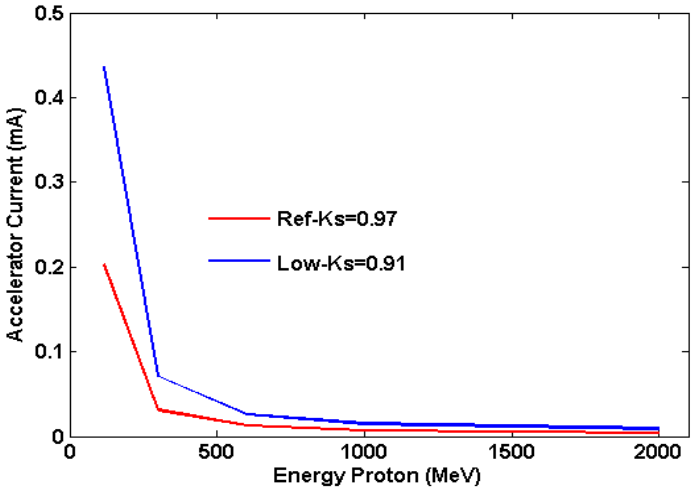
داده شده است. شکل شماره (۲) منحنی بهره تولید نوترون بر واحد انرژی چشمه پروتونی برای اهداف تلاشی مختلف با انرژی های متفاوت شتابدهنده پروتونی را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود با افزایش عدد جرمی ماده هدف و انرژی چشمه پروتون تا انرژی های کمتر از ۱ GeV، مقدار بهره تولید نوترون به طور خطی افزایش می یابد. البته مقدار افزایش این پارامتر در انرژی های کمتر از ۰/۵ GeV، به شدت زیاد می باشد ولی برای انرژی های بیش از ۱ GeV مقدار افزایش این پارامتر تقریباً ثابت است. لذا مقدار انرژی بهینه برای این پارامتر در اهداف تلاشی برای مواد مختلف با باریکه پروتونی، کمتر از مقدار ۱ GeV است. علاوه بر این، در این شکل مشاهده می شود که به دلیل شکافت های صورت گرفته در نواحی انرژی مورد نظر، در هدف تلاشی اورانیوم، بهره نوترونی این ماده از سایر هدف های مورد بررسی بیشتر می باشد. از طرفی تنگستن به خاطر چگالی بیشتر نسبت به Pb و LBE دارای بهره نوترونی بالاتری است و همچنین نقطه ذوب بالای آن در مقایسه با سایر هدف ها می تواند به عنوان هدف نوترونی برای ضخامت های کم در راکتورهای زیر بحرانی مانند TRIGA و غیره گزینه مناسب تری باشد. همچنین شکل های شماره های (۳) و (٤) نشان می دهد که با افزایش انرژی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰MeV، بهره کل انرژی نوترون به مقدار ٪۲۰۵/۲ افزایش می‌یابد ولی جریان شتابدهنده به مقدار ٪۹٦/۸ کاهش می‌یابد که این مسئله باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی در طراحی و ساخت شتابدهنده‌ها و راکتورهای زیر بحرانی خواهد شد. شکل شماره (۵) اثر انرژی شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای ضریب تکثیر چشمه و شکافت در قلب راکتور زیر بحرانی TRIGA را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار پارامتر ضریب تکثیر چشمه در مقایسه پارامتر ضریب تکثیر شکافت بیشتر می باشد به دلیل اینکه این پارامتر تحت تاثیر انرژی شتابدهنده است ولی برای پارامتر ضریب تکثیر شکافت مستقل از انرژی شتابدهنده است.



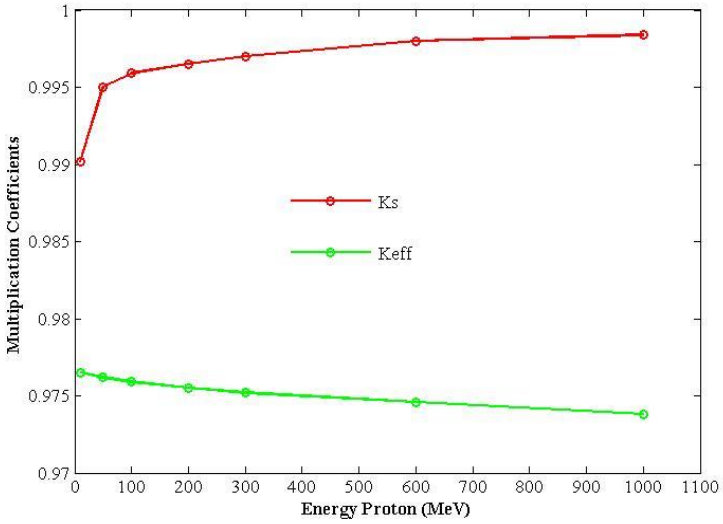
شکل شماره (۲): منحنی بهره تولید نوترون بر واحد انرژی چشمه پروتونی برای اهداف تلاشی نوتورنی متفاوت با انرژی‌های مختلف شتابدهنده پروتونی



شکل شماره (۳): اثر انرژی شتابدهنده پروتونی روی پارامتر بهره کل انرژی نوترون



شکل شماره (٤): اثر انرژی پروتون روی پارامتر جریان شتابدهنده



شکل شماره (۵): اثر انرژی شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای ضرایب تکثیر چشمه و شکافت

بحث و نتیجه گیری:

در طراحی و ساخت راکتورهای زیر بحرانی واداشته با شتابدهنده، پارامترهای فیزیکی شتابدهنده اثر بسیار مهمی روی پارامترهای نوترونی قلب راکتور زیر بحرانی دارند لذا بایستی این پارامترهای فیزیکی را مورد مطالعه قرار داد. بنابراین در این تحقیق، اثر انرژی شتابدهنده پروتونی روی پارامترهای بهره تولید نوترون، بهره کل انرژی نوترون، جریان شتابدهنده و ضریب تکثیر چشمه برای دو حالت زیر بحرانی با ضرایب تکثیر ۰/۹۷ و ۰/۹۱ در قلب راکتور زیر بحرانی TRIGA محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد جرمی ماده هدف و انرژی چشمه پروتون، مقدار بهره تولید نوترون به طور خطی افزایش می یابد اما مقدار بهینه انرژی برای این پارامتر در اهداف تلاشی مختلف با باریکه پروتونی، حدود GeV ۱ است. همچنین ماده تنگستن به خاطر چگالی بیشتر نسبت به Pb و LBE و بهره نوترونی بالاتری و همچنین نقطه ذوب بالای آن در مقایسه با سایر هدف ها می تواند به عنوان هدف نوترونی در راکتورهای زیر بحرانی مانند TRIGA و غیره مناسب باشد. علاوه بر این نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش انرژی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰MeV، بهره کل انرژی نوترون به مقدار ٪۲۰۵/۲ افزایش می‌یابد ولی جریان شتابدهنده به مقدار ٪۹۶/۸ کاهش می‌یابد که این مسئله باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی در طراحی و ساخت شتابدهنده‌ها و راکتورهای زیر بحرانی خواهد شد. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق می توان گفت که مقدار بهینه ضریب تکثیر موثر در یک راکتور زیربحرانی در حدود ۰/۹۷ می باشد.

مراجع:

[1] -Rubbia, C., et al. 2002. The Working Group on Trade: TRIGA Accelerator Driven Experiment, Nuclear Energy Agency, TRDAE Final Report.

[2] - Rubbia, C., et al. (2004). Neutronic Analysis of the TRADE Demonstration Facility, Nucl. Sci. Eng., 148, pp.103-123.

[3] - Kadi, Y. and Revol, J. P. 2002.Design of an Accelerator Driven System for the Destruction of Nuclear Waste, CERN, LNS021.

[4] - Hassanzadeh, M., Feghhi, S. A. H. (2015).Calculation of the spallation target neutronic parameters in Accelerator Driven Subcritical TRIGA Reactor, Ann. Nucl. Energy, 85, 326–330.

[5] - Ebrahimkhani, M., Hassanzadeh, M., Feghhi, S.A.H., Masti, D., (2016). Sensitivity analysis of core neutronic parameters in Electron Accelerator Driven Subcritical ALMR Reactor, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, pp.55-63.

[6] - Hassanzadeh, M., Feghhi, S. A. H., (2014).Sensitivity analysis of reactor core neutronic parameters in Accelerator Driven Subcritical Reactors, Ann. Nucl. Energy, Vol. 63, pp. 228–232.

[7]- Denise, P. B. 2008.MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473.