

بررسی تحلیلی و عددی ایده راکتور هیبرید شکافت - همجوشی دو پوششی

زینب تلیکانی، عباس قاسمی زاد *

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان

چکیده: در این مقاله ایده یک راکتور هیبرید شکافت - همجوشی نوعی که با یک لیزر شروع به کار می کند، پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است. در راکتور مورد بررسی که از یک اتاقک همجوشی داغ، یک مولد لیزری پمپ کننده هسته ای و دو پوشش جفت شده زیر بحرانی تشکیل شده، پارامترهای نوترونیکی راکتور، مانند ضریب تکثیر نوترون و ضریب تکثیر انرژی را بررسی نموده ایم. نتایج نشان داده است که این سیستم همیشه تحت شرایط زیر بحرانی عمل کرده و انرژی در این سیستم بصورت آبخاری تکثیر می شود.

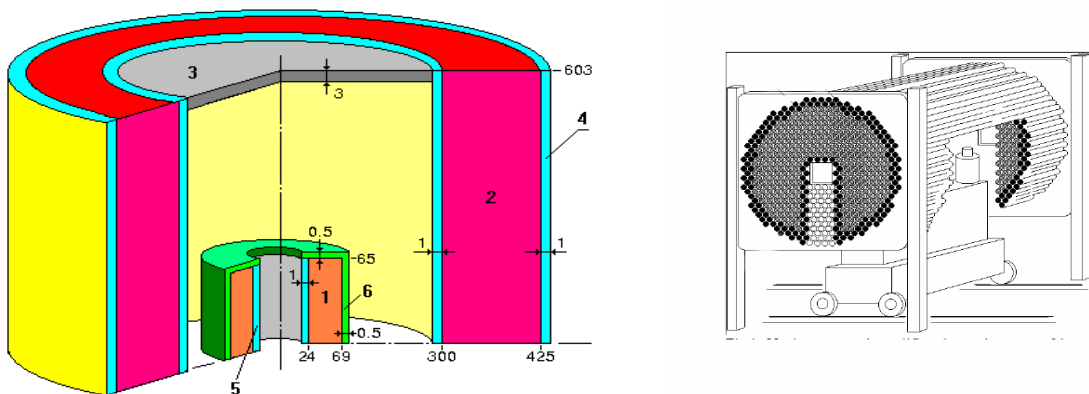
کلید واژه: راکتور هیبرید شکافت - همجوشی، مولد لیزری، پارامترهای نوترونیکی، ضریب تکثیر نوترون

مقدمه: قلب یک راکتور همجوشی نوعی را می توان توسط پوششی مهار نمود که در آن، نوترونهای ناشی از واکنش همجوشی، زایش سوخت شکافت پذیرا انجام دهد. به چنین سیستمی، سیستم هیبرید شکافت-همجوشی گفته می شود. سوخت شکافت پذیر زایش شده در این سیستم، برای تامین سوخت راکتور مورد استفاده قرار می گیرد. با این روش ذخیره انرژی، قیدهایی توازن انرژی در اجزای راکتور همجوشی کم می شود [۱]. علاوه بر این، مزایای دیگری که این سیستم ها دارند در بین آنها می توان، تولید بیشتر توان الکتریکی نسبت به راکتورهای همجوشی معادل، آهنگ زایش سریع تر سوخت شکافت پذیر نسبت به راکتورهای شکافت خالص و از همه مهم تر ایمنی بیشتر آنها نسبت به راکتورهای سریع زاینده اشاره نمود. اما باید توجه داشت که اینگونه سیستم ها، مشکلاتی نیز دارند که مهمترین آنها عبارتند از: ترکیب خطرات دو سیستم، ترکیب پیچیدگی وسایل برگرداندن تریتم در راکتور همجوشی با مسائل پس ماند رادیواکتیو شکافت و پیشرفته و پیچیده بودن کار خنک کردن و شرایط هندسی چنین سیستمی نسبت به هر سیستم خالص دیگر.

شرح مدل و محاسبات: راکتور هیبرید شکافت-همجوشی مورد بررسی از یک سیستم همجوشی محصورشدگی اینرسی واداشته با لیزر تشکیل شده است. لیزر مورد استفاده، یک نوع لیزر هسته ای است که عمل پمپ کردن در آن توسط انرژی هسته ای حاصل از شکافت هسته ^{235}U صورت می گیرد و علاوه بر این دارای بازدهی بسیار بالایی نسبت به لیزرهای دیگر میباشد. لیزر پمپ کننده هسته ای (Nuclear Pumping

*ghasemi@guilan.ac.ir

Laser)، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده از یک راکتور سریع پالسی و پریودیک دارای دو قلب تشکیل شده، که توسط مدول لیزر احاطه شده است. مدول لیزر شامل عناصر فعال لیزر و کپی محیط فعال لیزر و مواد کند کننده نوترون می باشد [۲]. نحوه عمل در لیزر پمپ کننده هسته ای به این ترتیب است که نوترونهای حاصل از احتراق راکتور سریع ضمن عبور از مدول لیزر، کند شده و یک واکنش زنجیره ای شکافت هسته ^{235}U را در پوشش ماده فعال لیزر القا می کنند. پاره های شکافت که یونهای با انرژی بالا هستند، در مخلوط گاز آرگون و زنون پراکنده شده و پلاسمایی با وارونی فراوانی از ترازها ایجاد می کنند. انرژی ذخیره شده در وارونی فراوانی، بوسیله ابزار اپتیکی استخراج می شود [۲].



شکل (۱): ساختمان لیزر پمپ کننده هسته ای [۲] شکل (۲): ساختمان یک راکتور هیبرید شکافت-همجوشی نوعی [۳]

۱- ساختمان راکتور هیبرید و نحوه عملکرد آن

همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، قلب راکتور هیبرید، شامل اتافک همجوشی و اولین دیواره است. پوشش درونی راکتور، شامل یک راکتور سریع زیر بحرانی مجهز به سیستم خنک کننده حاوی فلز سدیم مایع و پوشش خارجی، یک راکتور آب سنگین زیر بحرانی می باشد. به منظور کاهش ضریب جفت شدگی بین دو پوشش حرارتی و سریع، پوششی از جنس کربیدبور قرار گرفته و هم چنین بالا و پایین سیستم هیبرید، توسط بازتابنده های نوترون از جنس بریلیوم، احاطه شده است. انرژی آزاد شده از مولد لیزر که بوسیله یک راکتور پالسی و پریودیک کنترل می شود، به یک باریکه لیزر تبدیل می شود. انرژی این باریکه لیزری E_{Laser} ، بر اساس روش همجوشی محصورشدگی لختی، واکنش همجوشی را انجام می دهد و متعاقباً مقداری انرژی و بعلاوه تعدادی نوترون آزاد می گردد. انرژی حاصل از سوختن سوخت همجوشی، E_{burn} ، در اتافک همجوشی، در پوشش ذخیره شده و از طرف دیگر نوترونهای ایجاد شده، وارد پوششهای اطراف محفظه همجوشی می گردد. بدین ترتیب واکنشهای شکافت هسته ای در این پوشش ها صورت می گیرد که در طی آن مقدار دیگری انرژی آزاد می شود. نهایتاً سیستم خنک کننده در هر دو پوشش جفت شده، یک

انرژی خالص آزاد شده E_1, E_2 در طول یک پریود جذب کرده و توسط سیستم های مولد بخار تبدیلی و توربین، انرژی گرمایی آنها به توان و انرژی الکتریکی خروجی، E_{el} ، تبدیل می شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$E_{el} = E_1 + E_2 + E_{burn} \quad (1)$$

E_{burn} ناشی از سوختن سوخت همجوشی با روشهای مستقیم به E_{el} می تواند تبدیل شود، به منظور جبران تریتم مصرف شده، میتوان پوشش خارجی را به یک اتاقک زایش تریتم حاوی لیتیم مجهز نمود [۳].

۲- بررسی پارامترهای نوترونیک راکتور هیبرید

برای اینکه یک راکتور هیبرید در توان ثابت کار کند، باید بین نوترونهای تولید شده از طریق فرآیندهای شکافت و همجوشی و نوترونهای از دست رفته از طریق جذب و نشت، تعادل برقرار باشد. این تعادل به تغییر تعداد نوترونها و سطح توان راکتور بستگی دارد. بر این اساس می توانیم معادلات دینامیکی یک راکتور هیبرید نوعی را بصورت زیر بنویسیم.

$$I_1 \frac{dn_1}{dt} = [k_{11}(1-\beta_1)-1]n_1 + k_{12}(1-\beta_2)n_2 + \sum_{i=1}^D k_{1i}\lambda_{1i}C_{1i} + \sum_{i=1}^D k_{12}\lambda_{2i}C_{2i} + S_1 \quad (2)$$

$$I_2 \frac{dn_2}{dt} = [k_{22}(1-\beta_2)-1]n_2 + k_{21}(1-\beta_1)n_1 + \sum_{i=1}^D k_{22}\lambda_{2i}C_{2i} + \sum_{i=1}^D k_{21}\lambda_{1i}C_{1i} + S_2 \quad (3)$$

$$\frac{dC_{1i}}{dt} = \beta_1 n_1 - \lambda_{1i} C_{1i} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{2i}}{dt} = \beta_2 n_2 - \lambda_{2i} C_{2i} \quad (5)$$

که n_j توان درپوشش اول و دوم، l_j طول عمر متوسط نوترونهای آنی، K_{jj} ضریب تکثیر، K_{ij} ضریب جفت شدگی، β_{ji} کسر نوترون های تأخیری، λ_{ij} ثابت واپاشی، C_{ji} چگالی نیا هسته ها، D_j تعداد گروه نوترونهای تأخیری و S_j تابع توزیع چشمه می باشد.

معادلات فوق، معادلات جفت شده غیرخطی هستند و شرایط اولیه برای آنها عبارت است از:

$$n_1(0) = n_1(\tau_p) \quad , \quad n_2(0) = n_2(\tau_p) \quad (6)$$

$$C_{1i}(0) = C_{1i}(\tau_p) \quad , \quad C_{2i}(0) = C_{2i}(\tau_p) \quad (7)$$

پارامترهای مورد نیاز در محاسبات یک راکتور هیبرید شکافت-همجوشی نوعی عبارت است از [۴]:

$$K_{11} = K_{22} = 0.94 \quad ; \quad K_{21} = 0.25 \quad ; \quad K_{12} = 0.0015 \quad ; \quad \beta_1 = \beta_2 = 0.007 \quad ; \quad \tau_p = 1 \text{ Sec} \quad ; \quad \epsilon_1 = 0.5$$

$$l_1 = 4.5 * 10^{-7} \text{ Sec} \quad ; \quad l_2 = 3.5 * 10^{-4} \text{ Sec} \quad ; \quad I = 3 * 10^{15} \quad ; \quad \lambda_1 = 0.055 \text{ Sec}^{-1} \quad ; \quad \lambda_2 = 0.08 \text{ Sec}^{-1}$$

برای سادگی، تابع توزیع چشمه را می توان بر حسب تابع دلتای دیراک بصورت زیر نوشت:

$$S = \mathcal{E} \delta(\tau) \quad (8)$$

که I نوترونهای خالص خروجی از ساچمه سوخت همجوشی، \mathcal{E} ضریب بهره و τ_p دوره تناوب می باشد. حال می توانیم بررسی پارامترهای نوترونیک را برای یک راکتور هیبرید شکافت-همجوشی ارائه شده با استفاده از

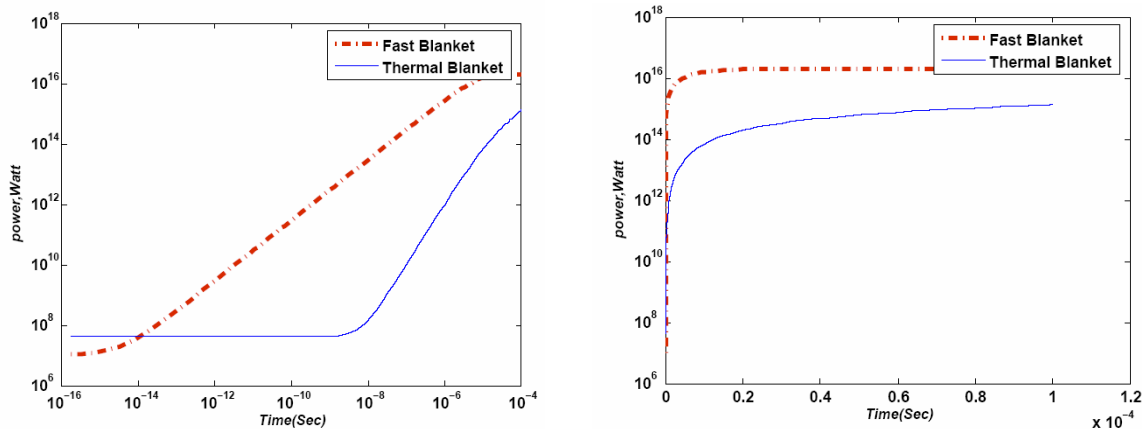
ثابت های راکتوری مشخص ارائه شده در بالا انجام دهیم. بر اساس معادلات دینامیکی غیر خطی جفت شده (۲-۵) و شرایط اولیه (۶) و (۷) و حل عددی این معادلات با استفاده از روش عددی رانگ-کوتای مرتبه ۴ موجود در نرم افزار ریاضی مطلب (MATLAB) به نتایج جالبی دست یافته ایم. این نتایج عبارتند از:
الف- اگر تولید نوترونها تأخیری را در نظر نگیریم در این صورت معادلات (۲-۵) به صورت زیر نوشته میشود:

$$l_1 \frac{dn_1}{dt} = [K_{11}(1-\beta_1) - 1]n_1 + K_{12}(1-\beta_2)n_2 \quad (9)$$

$$l_2 \frac{dn_2}{dt} = [K_{22}(1-\beta_2) - 1]n_2 + K_{21}(1-\beta_1)n_1 \quad (10)$$

$$n_1(0) = n_1^b + \frac{I\varepsilon}{l_1} \quad ; \quad n_2(0) = n_2^b \quad (11)$$

باتوجه به مقادیر اولیه، نمودار تغییرات توان بر حسب زمان رسم نموده و در شکل های (۳) و (۴) ارائه نموده ایم.



شکل (۳): نمودار تغییرات توان بر حسب زمان در راکتور هیبرید بدون در نظر گرفتن نوترونها تأخیری همانطور که از شکل (۳) ملاحظه می شود، در هر دو پوشش توان سیستم بعد از مقداری افزایش به یک پایداری نسبی می رسد، در صورتیکه سطح توان تولیدی در پوشش خارجی پایین تر از سطح توان در پوشش درونی است. شکل (۴) جزئیات دقیق تری از تغییرات توان در طی یک بازه زمانی را در یک نمودار لگاریتمی نشان می دهد. با توجه به این شکل مشخص است که پوشش حرارتی در مدت زمان کوتاهی با یک توان ثابت کار می کند، اما ناگهان افزایش می یابد و به سطح پایداری می رسد.

ب- برای پیش بینی صحیح پاسخ یک راکتور به تغییر راکتیویته در قلب لازم است که نوترونها آنی و تولید و واپاشی هر یک از شش گروه مولد نوترونها تأخیری را در نظر گرفت. بنابراین با توجه به شرایط اولیه خواهیم داشت:

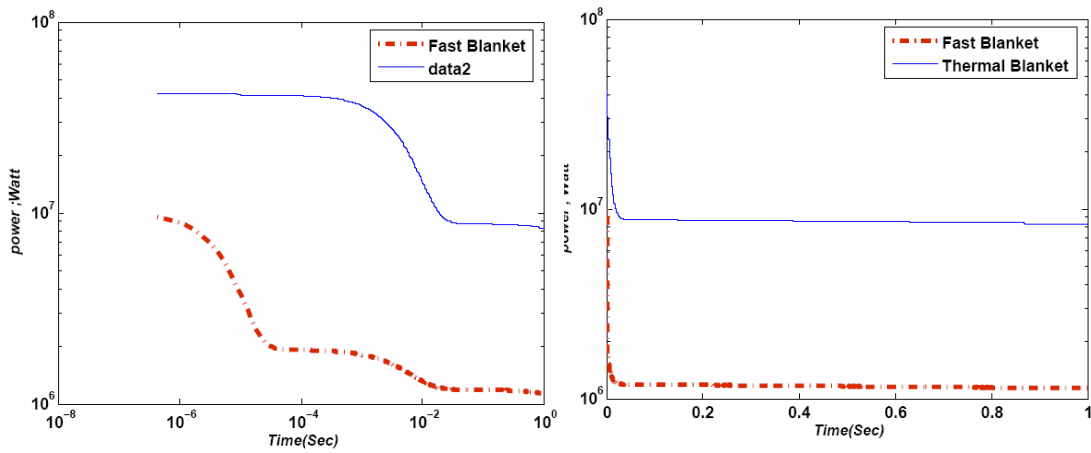
$$n_j(\tau) = Q_j \delta(\tau) + n_j^b \quad (12)$$

$$C_{ji}(\tau) = Q_j \beta_{ji} \frac{\exp(-\lambda_{ij} / \tau)}{(1 - \exp(-\lambda_{ij} \tau_p))} + \beta_{ij} \frac{n_j^b}{\lambda_{ij}} \quad (13)$$

که n_j^b توان در حالت زمینه و Q_j انرژی آزاد شده در مدت یک پالس می باشد [۵].

$$n_1^b = 1.2 \text{ MeV} ; n_2^b = 8.9 \text{ MeV} ; Q_1 = 8.8 \text{ MeV} ; Q_2 = 32.8 \text{ MeV}$$

شکل های (۵) و (۶) نمودار تغییرات توان بر حسب زمان در دو پوشش حرارتی و سریع را نشان می دهد.



شکل (۵): تغییرات توان بر حسب زمان با در نظر

گرفتن نوترونهای تأخیری

با توجه به شرایط پررودیک و انتگرال گیری از معادلات دینامیکی، ضرایب تکثیر نوترون و انرژی در دو پوشش را می توان محاسبه نمود، بنابراین بعد از انجام کمی محاسبات جبری خواهیم داشت:

$$E_1 = \frac{K_{12} \varepsilon_2 - \Delta K_{22} \varepsilon_1}{\Delta K_{11} \Delta K_{22} - K_{12} K_{21}} I ; E_2 = \frac{K_{21} \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \Delta K_{11}}{\Delta K_{11} \Delta K_{22} - K_{12} K_{21}} I \quad (14)$$

اگر سیستم مورد نظر را، یک سیستم بسته یعنی $\varepsilon_2 = 0$ در نظر بگیریم، در این صورت ضرایب تکثیر انرژی در دو پوشش را می توان بصورت زیر نوشت:

$$M_1 = \frac{-\Delta K_{22}}{\Delta K_{11} \Delta K_{22} - K_{12} K_{21}} \quad (15)$$

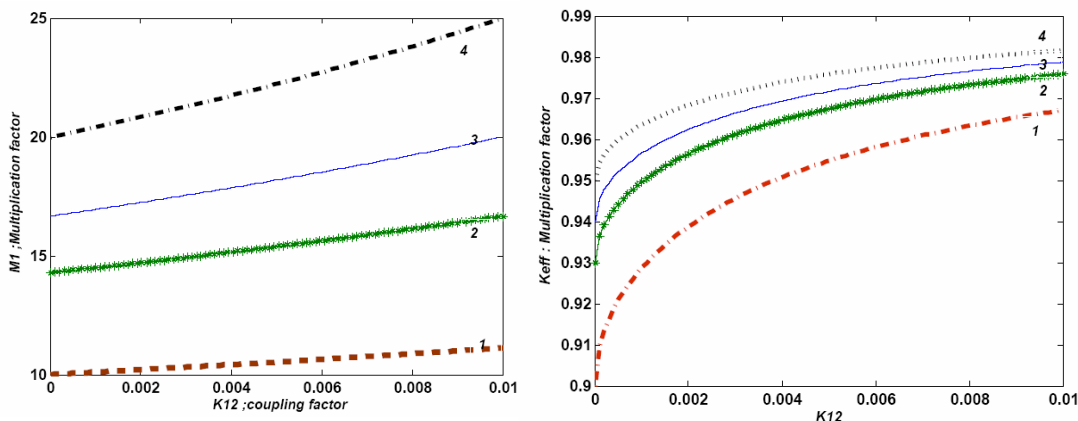
بنابراین برای ضریب تکثیر انرژی خالص کل سیستم خواهیم داشت:

$$M = \frac{K_{21} - \Delta K_{22}}{\Delta K_{11} \Delta K_{22} - K_{12} K_{21}} = \left(1 - \frac{K_{21}}{\Delta K_{22}}\right) M_1 \quad (16)$$

حال می توان ضریب تکثیر نوترون در سیستم مورد نظر را بصورت زیر نوشت:

$$K_{eff} - 1 = 1/2 \left\{ (\Delta K_{11} + \Delta K_{22}) + \sqrt{(\Delta K_{11} - \Delta K_{22})^2 + 4K_{12}\Delta K_{22} \frac{(1+M\Delta K_{11})}{(1+MK_{12})}} \right\} \quad (17)$$

اگر مقدار پارامتر M را ۱۰۰ در نظر بگیریم، بر حسب مقادیر مختلف برای $\{K_{11}, K_{22}\}$ به صورت: $\{0.95, 0.95\}$, $\{0.94, 0.94\}$, $\{0.93, 0.93\}$, $\{0.9, 0.9\}$ ، در این صورت بر اساس روابط (۱۶) و (۱۷) نمودار تغییرات ضریب تکثیر نوترون بر حسب ضریب جفت شدگی را در شکل (۷)، نمودار تغییرات ضریب تکثیر انرژی در پوشش درونی بر حسب ضریب جفت شدگی را در شکل (۸) رسم و ارائه نموده ایم



شکل (۷): تغییرات ضریب تکثیر نوترون بر حسب ضریب جفت شدگی
شکل (۸): تغییرات ضریب تکثیر انرژی در پوشش درونی بر حسب ضریب جفت شدگی

همانطوری که از شکل های (۷) و (۸) ملاحظه می شود، با افزایش ضریب تکثیر نوترون در هر پوشش، ضریب تکثیر انرژی و نوترون نسبت به ضریب جفت شدگی افزایش می یابد.

نتیجه گیری: زمانیکه نوترونهای تأخیری در نظر گرفته می شوند، سطح توان در پوشش دوم بالاتر از سطح توان در پوشش اول خواهد شد که این امر، نشان دهنده فرآیند تکثیر آبشاری نوترونها و انرژی در اینگونه سیستم ها می باشد. از طرفی این سیستم همیشه تحت شرایط زیر بحرانی عمل می کند، بنابراین از نظر ایمنی در سطح بالایی قرار دارد.

مراجع:

[۱] محمدرضا اسکندری، اصول همجوشی هسته ای، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۷۴

- [2] A.P.Barzilov, et al, Some Aspects of Nuclear Safety of a Laser System Pumped with a Twin-Core Fast Burst Reactor, proceeding of International Conference, ARS'97,(1997)
 [3] A.P.Barzilov, et al. Hybrid Fission-Fusion Reactor Initiated by a Laser // Proc. Intern. Conf. ICENES'96, Obninsk, 1996
 [4] A.P.Barzilov, et al. Concept of Coupled Blanket System for the Hybrid Fission-Fusion Reactor // Proc. Intern. Conf. SOFE'95, 1995
 [5] A.P.Barzilov, et al. Neutronic Analysis for a Coupled Blanket System of the Hybrid Fission-Fusion Reactor // IPPE #2522, 1996