

## بررسی فیزیک یک رآکتور بستر - شارشی خود - ایمن

محمد رضا اسکندری، محسن شایسته

بخش فیزیک دانشگاه شیراز، شیراز

تاریخ دریافت: ۲۳ اردیبهشت ۱۳۷۴ دریافت نسخه نهایی: ۱۲ آبان ۱۳۷۴

### چکیده

در این مقاله پیشنهاد جدیدی درباره طراحی رآکتور شکافت ارائه شده است که در مقابل اتفاقات ناشی از خراب شدن خنک کننده کاملاً مصون است. در این رآکتور پیشنهادی خود - ایمن، گلوله‌های سوخت بر اثر تعادل بین نیروی وزن و نیروی مقاومی که جریان هلیوم خنک کننده به گلوله وارد می‌کند، به صورت شناور نگه داشته می‌شوند. به علاوه طراحی سیستم به صورتی است که اندازه نیروی مقاوم در طول بستر جریان، اندکی تغییر می‌کند و این تغییر به گونه‌ای است که سبب پایداری بستر شارش می‌شود. هرگونه اتفاقی که بر اثر خراب شدن خنک کننده (LOCA) یا افت جریان (LOFA) پیش بیاید، باعث می‌شود که نیروی مقاوم کم شود یا از بین برود و در نتیجه گلوله‌های سوخت بر اثر نیروی وزن سقوط کنند و از قلب رآکتور خارج شوند. این گلوله‌ها پس از خروج، در منطقه‌ای که سیستم در حالت تحت بحرانی است قرار می‌گیرند و خنک می‌شوند و مسئله ذوب شدن قلب رآکتور منتفی می‌شود.

با تغییر سرعت خنک کننده، تخلخل بستر تغییر می‌کند و معلوم شده است که این امر سبب تغییر در ضریب تکثیر سیستم می‌شود، و از آن می‌توان برای کنترل سیستم استفاده کرد.

با تعیین تخلخلی که به ازای آن ضریب تکثیر بی نهایت سیستم دارای مقدار بیشینه است و فرض قرار گرفتن سیستم در آن تخلخل، ارتفاع مؤثر قلب و سرعت لازم گاز هلیوم برای قرار داشتن سیستم در آن تخلخل محاسبه شده است. با مشخص شدن وضعیت مکانیکی سیستم، محاسبات رآکتور فیزیکی با استفاده از روش پخش نوترون و معادله انتقال انجام شده و شعاع بحرانی سیستم برای تولید ۳۰۰ مگاوات تعیین شده است. توزیع شار برای نوترونهای گرمایی و نوترونهای سریع در درون قلب و بازتابنده با استفاده از روش محاسبات دو گروهی محاسبه و رسم شده است. لازم به تذکر است که در اکثر این محاسبات استفاده از کدهای پیشرفته میسر نبود، زیرا طراحی مورد نظر با سایر رآکتورهای معمولی که تا به حال طراحی شده‌اند و از آنها استفاده می‌شود مغایر است.

### مقدمه

مصرف این منابع به عنوان سوخت، دیگر مقرون به صرفه نیست. ثانیاً اثرات مضر نیروگاه‌های هسته‌ای در محیط زیست به مراتب کمتر از نیروگاه‌های معمولی است. با وجود این، گروهی از متخصصان، این تکنولوژی را با توجه به اتفاقاتی نظیر حوادث چرنوبیل و تری مایل آیلند یک تکنولوژی خطرناک و غیر قابل قبول می‌دانند. مهمترین دلیل مخالفت آنها در استفاده از این تکنولوژی ریشه در ایمنی کار رآکتورهای هسته‌ای دارد و معتقدند که کارهای انجام شده برای حصول ایمنی، سبب پیچیده شدن و گرانتر شدن طرح شده و در ایجاد اعتماد عمومی موفق نبوده است.

در چند سال اخیر ایده طرح یک رآکتور جدید مورد توجه قرار گرفته است که ویژگی آن مصون بودن قلب رآکتور نسبت به حادثه از دست رفتن خنک کننده است. در این ایده اگر به هر

نیاز دنیا به انرژی الکتریکی به مقدار قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش است. بر اساس آخرین آمار ارائه شده توسط آژانس انرژی اتمی تا پایان سال ۱۹۹۲ تعداد کل رآکتورهای در حال کار دنیا ۴۲۴ عدد است که مجموعاً بیش از ۳۳۰ گیگاوات الکتریسیته تولید می‌کنند و تا آخر قرن بیستم تعداد ۷۲ رآکتور دیگر بر این تعداد افزوده می‌شود که جمعاً در حدود ۳۸۹ گیگاوات الکتریسیته تولید خواهند کرد [۱].

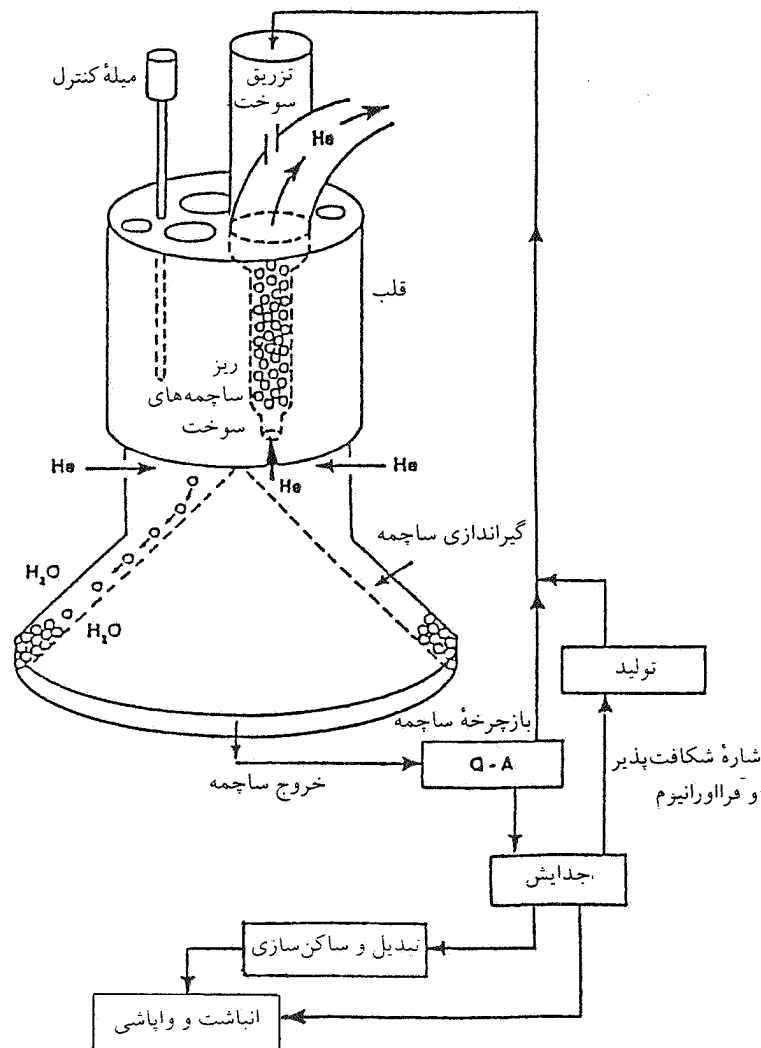
استفاده از نیروگاه‌های هسته‌ای به عنوان مولد انرژی الکتریکی به این دلیل است که اولاً در بسیاری از نقاط جهان استفاده از انرژی هسته‌ای برای تولید الکتریسته ارزانتر از منابع متداول تولید انرژی است. در واقع، منابع سوخت فسیلی دنیا، یعنی ذغال سنگ و نفت و گاز طبیعی، به شدت روبه کاهش است و پیشرفتهای تکنولوژیکی نشان می‌دهد که

می‌شود. با انتخاب کانالها به صورت یک مخروط ناقص که شعاع سطح مقطع آن از پایین به بالا به میزان مناسب افزایش می‌یابد می‌توان پایداری بستر را نیز تضمین کرد. در این ایده طراحی جدید، راکتور به هر علتی که جریان خنک‌کننده را از دست بدهد، نیروی مقاوم وارد بر گلوله‌ها از طرف شاره از بین می‌رود و گلوله‌های سوخت بر اثر نیروی وزن از قلب راکتور خارج می‌شوند و روی سطح مخزن مخروطی شکلی که زیر قلب راکتور قرار دارد می‌ریزند. در این حالت گلوله‌ها توسط خنک‌کننده ثانوی خنک می‌شوند و راکتور در حالت زیر بحرانی قرار می‌گیرد (شکل ۱) [۳].

دلیلی خنک‌کننده از کار بیفتند یا در کار پمپها خلل ایجاد شود راکتور خودبه‌خود و بدون دخالت انسان یا اسباب عامل، در حالت تحت بحرانی قرار می‌گیرد، عمل شکافتهای زنجیری متوقف می‌شود و گرمای پاره‌های شکافت نیز توسط خنک‌کننده‌های ثانویه منتقل می‌شود [۵-۲].

### توصیف ایده

در این ایده سوخت به صورت گلوله‌هایی کوچک در داخل کانالهایی که گاز هلیوم به طرف بالا در آنها جریان دارد، قرار می‌گیرد. گاز هلیوم ضمن انتقال گرما از آنها، با وارد کردن نیروی مقاوم به گلوله‌ها، آنها را به صورت شناور درون کانال نگه می‌دارد. با تغییر سرعت شاره در محدوده مجاز می‌توان ارتفاع مؤثر قلب راکتور را به اندازه دلخواه تعیین کرد که این امر منجر به تعیین اندازه ضریب تکثیر سیستم به مقدار دلخواه



شکل ۱. نمودار طرح وار راکتور PSR پیشنهادی (کپی از مرجع شماره ۳). کانالهای استفاده شده به صورت مخروطهای ناقص هستند که شعاع سطح مقطع آنها پایین به بالا با میزان مناسب افزایش می‌یابد تا پایداری بستر راکتور پیشنهادی را تضمین کند.

## مزایای این ایده

جدول ۱. مشخصات راکتور پیشنهادی بستر - شارشی خود - ایمن با قدرت ۳۰۰ مگاوات و آرام‌کننده گرافیت

پارامتر	مقدار
توان گرمایی	۳۰۰ MW
شعاع قلب (شعاع معادل بدون بازتابنده)	۲۲۶٫۸ cm
شعاع راکتور	۲۸۰ cm
ارتفاع مؤثر قلب	۴۳۸٫۸ cm
ارتفاع قلب	۵۰۰ cm
درصد غنای گلوله‌های سوخت	۱
جنس سوخت	دی اکسید اورانیوم
شعاع گلوله‌های سوخت	۰٫۵ cm
ضخامت غلاف گلوله‌های سوخت	۰٫۱ cm
جنس غلاف گلوله‌های سوخت	زیرکانیوم
چگالی هلیوم در پایین کانال (بیشترین مقدار چگالی)	$۸٫۱۲۴ \times 10^{-۲}$ g/cc
چگالی هلیوم در نیم ارتفاع کانال در فشار ۱۰۰ اتمسفر و دمای ۸۴۰ درجه کلوین	$۵٫۷۸۵ \times 10^{-۲}$ g/cc
جرم کل سوخت در قلب	۹۵۴۴٫۲ Kg
جرم کل $^{۲۳۵}\text{U}$	۸۴٫۱ Kg
دمای سطح گلوله‌های سوخت	۱۱۰۰ K
میزان شارش جرمی هلیوم	۱۴۴٫۵ Kg/s
دمای گاز ورودی	۶۰۰ K
دمای گاز خروجی	۱۰۰۰ K
فشار متوسط هلیوم در قلب	۱۰۰ atm
تعداد گلوله‌های سوخت در هر کانال	$۱٫۲ \times 10^۶$

صفر قرار دادن برابند نیروهای وارد بر یک گلوله، سرعت شاره برای شناور نگه داشتن یک گلوله، که همان سرعت حدی گلوله در آن شاره است، به دست می‌آید. باتوجه به اینکه چسبندگی هلیوم در دمای ۸۴۰ درجه کلوین  $۱۲۳۰ \text{ g/cm.s}$  است عدد رینولدز حدی برابر  $۱۲۳۰$  می‌شود که ضریب نیروی مقاوم،  $C_D$  برابر با ۰٫۴۴ انتخاب و در محاسبات استفاده شد.

$$V_i = \left[ \frac{4}{3} \frac{g}{\rho C_D} (\rho_c - \rho) + \frac{D_F^2}{D_C^2} (\rho_F - \rho_C) \right]^{1/2} = ۷۲۴٫۴ \text{ cm/s} \quad (۴)$$

اگر بیش از یک گلوله داشته باشیم سرعت ظاهری شاره برای به دست آوردن یک تخلخل یا ارتفاع مؤثر خاص را با استفاده از سرعت حدی و می‌نیمیم سرعت شاره،  $v_F$ ، که با استفاده از موازنه نیروها به دست می‌آید، می‌توان به دست آورد.

۱- تلاطم بستر و حرکت دائمی گلوله‌ها سبب خوب مخلوط شدن سوخت و شاره می‌شود و میزان انتقال گرما از گلوله‌ها به شاره را افزایش می‌دهد.

۲- حرکت دائمی گلوله‌ها سبب یکنواختی میزان مصرف همه گلوله‌های سوخت، صرف نظر از شکل توزیع شار نوترون، می‌شود که این امر استفاده بیشتر از سوخت را امکان پذیر می‌سازد.

۳- تغییر سرعت شاره در محدوده مجاز، سبب تغییر ارتفاع مؤثر قلب یا تخلخل بستر می‌شود که این امر تغییر نسبت آرام‌کننده به سوخت و در نتیجه تغییر ضریب تکثیر بی نهایت سیستم را به دنبال دارد و از آن برای کنترل راکتور می‌توان استفاده کرد. در این صورت استفاده از میله‌های کنترل ضروری نیست.

## مشخصات راکتور پیشنهادی

قلب این راکتور از ۱۵۱۹ مدول استوانه‌ای با سطح مقطع شش ضلعی منتظم که طول هر یک از اضلاع آنها ۶٫۴ سانتیمتر است تشکیل شده است و کانالهای حاوی سوخت و خنک‌کننده در درون این مدولها قرار دارند. مشخصات این راکتور پیشنهادی در جدول (۱) آمده است.

## نیروهای وارد بر گلوله‌های سوخت

نیروهایی که بر گلوله‌های سوخت در شاره وارد می‌شوند عبارت‌اند از:

۱. نیروی وزن:

$$F_g = \frac{\pi}{6} g [D_F^2 \rho_F + (D_C^2 - D_F^2) \rho_C] \quad (۱)$$

۲. نیروی بالانگهدارنده:

$$F_b = \frac{\pi}{6} g D_C^2 \rho \quad (۲)$$

۳. نیروی مقاوم:

$$F_d = \frac{\pi}{4} D_C^2 C_D \left[ \rho \frac{(V - V_s')^2}{2} \right] \quad (۳)$$

در روابط بالا  $D_C$  و  $D_F$  به ترتیب قطر گلوله‌های سوخت بدون غلاف و باغلاف و  $\rho_C$ ،  $\rho_F$ ،  $\rho$  چگالی سوخت، غلاف، و هلیوم و  $V$  و  $V_s'$  سرعت شاره و سرعت گلوله‌ها هستند. با مساوی

$$(\rho_s - \rho) g = 15 \cdot \frac{v_F \mu (1 - \varepsilon)}{D_C^2 \varepsilon^2} + 1.75 \frac{\rho v_F^2}{D_C \varepsilon^2} \Rightarrow v_F = 56.9 \text{ cm/s} \quad (5)$$

$$\dot{m} = n \rho v_s \pi r_{ch}^2 \quad (7)$$

در این روابط  $P$  توان راکتور،  $r_{ch}$  شعاع کانالها و  $n$  تعداد کانالهاست.

ارتفاع مؤثر قلب را باید مقداری انتخاب کرد که ضریب تکثیر بی نهایت سیستم بیشترین مقدار را داشته باشد. چون این ارتفاع به تخلخل بستر، سرعت شاره، شعاع کانال، و میزان افزایش شعاع کانال بستگی دارد، محاسبات مربوط به این کمیتها به محاسبات راکتور فیزیکی سیستم نیز ارتباط پیدا می کند. روش کار بدین صورت است که ابتدا مقداری برای شعاع در ابتدا، و در نیم ارتفاع کانال در نظر می گیریم و به ازای آن، تخلخل یا ارتفاع مؤثری را که ضریب تکثیر بی نهایت سیستم به ازای آن بیشترین مقدار را داراست پیدا می کنیم. با این تخلخل سرعت ظاهری شاره را با استفاده از شکل ۲ و شعاع در نیم ارتفاع کانال را از رابطه (۷) به دست می آوریم. اگر این مقدار با مقداری که از اول برای شعاع در نیم ارتفاع کانال انتخاب کرده بودیم برابر باشد انتخاب اولیه انتخاب خوبی است، در غیر این صورت محاسبات تکرار می شود.

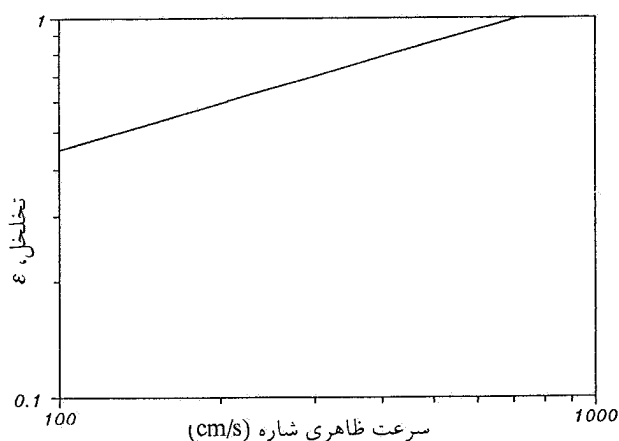
در رابطه (۷) به مقدار چگالی شاره،  $\rho$ ، در نیم ارتفاع کانال نیاز داریم که این پارامتر به فشار و دما در آن نقطه بستگی دارد. فشار را در آن نقطه ۱۰۰ اتمسفر انتخاب می کنیم. آزمایش نشان می دهد که در چنین سیستمی شاره ۶۰ درصد افزایش دمای خود را در طی نیمه اول کانال به دست می آورد [۶]، یعنی دمای شاره در وسط کانال ۸۴۰ کلوین است، و در چنین شرایطی چگالی هلیوم  $10^{-2} \times 5.785 \text{ گرم بر سانتیمتر مکعب}$  می شود.

محاسبات نشان می دهند که انتخاب شعاع در ابتدا و در نیم ارتفاع کانال به ترتیب برابر ۲۷۰ و ۳۰۳ سانتیمتر انتخاب مناسبی است. با این انتخاب، بیشترین مقدار ضریب تکثیر سیستم برابر با ۱۵۷۵ است که در تخلخل ۰.۹۱ یا ارتفاع مؤثر ۴۳۸.۸ سانتیمتر پدید می آید. از شکل ۲ سرعت شاره در این وضعیت برابر با  $v_s = 570$  سانتیمتر بر ثانیه به دست می آید و از رابطه (۷) داریم

$$r_{ch} = \left( \frac{\dot{m}}{n \rho v_s \pi} \right)^{1/2} = 3.03 \text{ cm} \quad (8)$$

که با مقدار انتخابی برابر است.

که در آن  $\mu$  چسبندگی شاره و  $\varepsilon$  تخلخل بستر است. با داشتن می نیم سرعت شاره که گلوله ها را در آستانه شناور شدن قرار می دهد، و سرعت حدی، می توان شکل ۲ را رسم کرد و سرعت ظاهری شاره برای داشتن یک تخلخل خاص را به دست آورد.



شکل ۲. تخلخل بستر بر حسب سرعت ظاهری گاز هلیوم درون کانالها با معلوم بودن چسبندگی شاره، کمینه سرعت شارش که گلوله ها را در آستانه شناور شدن قرار می دهد و سرعت حدی، برای تخلخلهای مختلف محاسبه و رسم شده است.

با توجه به رابطه (۳) نیروی مقاوم تابعی از چگالی شاره است و چگالی شاره به علت تغییر در دمای شاره و افت فشار در طول کانال، تغییر می کند. بنابراین، نیروی مقاوم نیز مقدار ثابتی ندارد و مقدار آن در پایین کانال بیشتر از قسمتهای بالای کانال است که سبب عدم پایداری بستر می شود. با توجه به معادله پیوستگی، حاصل ضرب چگالی شاره و سطح مقطع کانال و سرعت شاره در هر نقطه از کانال ثابت است. همچنین با در نظر گرفتن این مسئله که چگالی شاره در رابطه (۳) با توان اول و سرعت آن با توان دوم ظاهر شده است، می توان با تغییر در مساحت سطح مقطع در طول کانال، نیروی مقاوم را طوری تنظیم کرد که سبب پایداری بستر شود.

از طرفی باید توجه داشت که میزان شارش جرمی هلیوم،  $m$ ، درون کانالها باید مقداری باشد که بتواند گرمای تولید شده در گلوله ها را منتقل کند. بنابراین باید داشته باشیم

$$P = \dot{m} C_p \Delta T \Rightarrow \dot{m} = 144.481 \text{ kg/s} \quad (9)$$

به چگالی و سرعت شاره و سطح مقطع کانال نیز بستگی دارد.

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{\Sigma_{am} V_m + \Sigma_{ac} V_c}{\Sigma_{aF} V_F} \right) A + B \quad (9)$$

که در آن ضرایب  $A$  و  $B$  عبارت اند از

$$A = \frac{K_F r_F I_0 (K_F r_F)}{I_1 (K_F r_F)}$$

$$B = \frac{V_m K_m r_F M_0 (K_m r_F)}{V_F I_1 (K_m r_F)}$$

در  $V_m$ ،  $V_c$  و  $V_F$  به ترتیب حجم آرام‌کننده، غلاف و سوخت در سلول واحد و  $\Sigma_{am}$  و  $\Sigma_{ac}$  و  $\Sigma_{aF}$  به ترتیب سطح مقطع ماکروسکوپی جذب برای آرام‌کننده، غلاف و سوخت هستند.  $K_m$  و  $K_F$  نیز از روابط زیر به دست می‌آیند که در آنها  $D_m$  و  $D_F$  به ترتیب ضریب پخش در سوخت و آرام‌کننده است:

$$K_F^\gamma = \frac{\Sigma_{aF}}{D_F}, \quad K_m^\gamma = \frac{\Sigma_{am}}{D_m}$$

$M_0$  و  $M_1$  نیز ترکیبی از توابع بسل تعمیم یافته به صورت زیر هستند

$$M_0 (K_m r_F) = K_0 (K_m r_F) + \frac{K_1 (K_m r_m)}{I_1 (K_m r_m)} I_0 (K_m r_F)$$

$$M_1 (K_m r_F) = K_1 (K_m r_F) - \frac{K_1 (K_m r_m)}{I_1 (K_m r_m)} I_1 (K_m r_F)$$

مقدار  $K_F$  و  $K_m$  محاسبه شده به ترتیب برابر با  $0.5455 \text{ cm}^{-1}$  و  $0.1932 \text{ cm}^{-1}$  است؛ در نتیجه برای  $K_m r_F$  مقدار  $0.1304$  استفاده شده است.  $r_m$  در روابط بالا شعاع آرام‌کننده یا سلول واحد است که نسبت به فضای خالی اصلاح نشده است. شعاع اصلاح شده را برابر  $r$  گرفتیم و مقدار آن با استفاده از رابطه  $H = V_F + V_m \pi (r_e)^2$  قابل محاسبه است که در آن ارتفاع قلب و  $V_F$  و  $V_m$  به ترتیب حجمهای سوخت و آرام‌کننده هستند. شعاع اصلاح شده برای سلول واحد برابر  $0.116 \text{ cm}$  می‌شود و مقدار  $K_m r_e$  جایگذاری شده برابر  $0.9682$  است. با محاسبه توابع فوق به دست می‌آید:

$$f = 0.8801686 \quad (10)$$

$P$ ، احتمال فرار از تشدید، از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]

$$p = \exp \left[ - \frac{N_F V_F I}{\xi_m \Sigma_{sm} V_m} \right] \quad (11)$$

محاسبات نشان می‌دهند که افت فشار در طول کانالها در حدود ۲ اتمسفر است، یعنی فشار در بالای کانالها ۱۰۱ اتمسفر و در پایین کانال ۹۹ اتمسفر است. با داشتن فشار، دما و سرعت هلیوم در ابتدا و در نیم ارتفاع و انتهای کانال، چگالی هلیوم در این نقاط تعیین می‌شود، و با استفاده از نسبت شعاع در ابتدا و انتها می‌توان نیروی خالص وارد بر گلوله‌ها را حساب کرد. طراحی کانالها به گونه‌ای انجام شده است که در وسط یا نیم ارتفاع کانالها نیروی وزن با نیروی مقاوم برابر و بنابراین نیروی خالص وارد بر گلوله‌ها صفر باشد. نتایج نشان می‌دهند که هرچه از وسط به ابتدای کانال نزدیکتر می‌شویم نیروی مقاوم افزایش می‌یابد و در ابتدای کانال افزایش نیروی مقاوم برابر ۱۳ درصد نیروی وزن آنها و به طرف بالاست. از طرفی هرچه از وسط کانالها به انتهای کانالها نزدیک می‌شویم سرعت شاره و در نتیجه نیروی مقاوم وارد بر گلوله‌ها کاهش پیدا می‌کند، به گونه‌ای که در انتهای کانالها کاهش نیروی مقاوم برابر ۱۳ درصد نیروی وزن آنهاست، و این بدان معناست که هرچه از وسط به طرف انتهای کانال پیش می‌رویم یک نیروی خالص به طرف پایین به گلوله‌ها وارد می‌شود و بیشترین مقدار آن در انتهای کانال و برابر ۱۳ درصد نیروی وزن آنهاست.

### محاسبه ضریب تکثیر بی نهایت سیستم

پویش آزاد متوسط نوترون گرمایی در هلیوم با چگالی  $10^3 \times 124.8$  گرم بر سانتیمتر مکعب برابر با  $1020$  سانتیمتر است [۷] و این بدان معناست که هلیوم از لحاظ نوترونی مانند فضای تهی عمل می‌کند و گلوله‌های سوخت در محاسبات رآکتور فیزیکی باید به صورت یک میله در امتداد کانال در نظر گرفته شوند. محاسبات نشان می‌دهد که ضخامت این میله سوخت معادل  $1.35$  سانتیمتر و ضخامت غلاف معادل  $0.21$  سانتیمتر است. پویش آزاد متوسط نوترون در سوخت نیز برابر با  $1.74$  سانتیمتر به دست می‌آید که در حدود ضخامت سوخت است و در نتیجه رآکتور باید ناهمگون در نظر گرفته شود.

برای محاسبات رآکتور فیزیکی سیستم از روش ویگنر - ساتیز استفاده می‌کنیم؛ بدین ترتیب که شبکه سوخت - آرام‌کننده را به سلولهای واحد که سوخت در مرکز هر کدام از آنها قرار دارد تقسیم می‌کنیم و در انجام محاسبات، این سلول واقعی را با سلول استوانه‌ای معادل که دارای وضعیت هندسی ساده‌تری است جایگزین می‌کنیم. ضریب تکثیر بی نهایت سیستم، حاصلضرب چهار ضریب  $\eta, \epsilon, p, f$  است که هر کدام جداگانه محاسبه می‌شوند.  $f$  یا بهره گرمایی از رابطه زیر به دست می‌آید [۸].

$$p = 0.8836926 \quad (12)$$

$\varepsilon$  یا ضریب شکافت سریع طبق روش اسپینراد محاسبه شده است. در این روش همه نوترونهاى داخل و سوخت به سه گروه تقسیم می‌شوند: ۱. نوترونهاى شکافت با انرژی بالاتر از  $E_F$  (انرژی آستانه شکافت سریع) ۲. نوترونهاى شکافت با انرژی زیر  $E_F$ ، ۳. نوترونهاى با انرژی زیر  $E_F$  که از گروه یک، بر اثر پراکندگی خارج شده‌اند [۱۰].

که در آن  $N_F$  چگالی اتمی سوخت،  $\Sigma_m$  افزایش متوسط لتارجی در هر برخورد در آرام‌کننده،  $\Sigma_{sm}$  سطح مقطع پراکندگی در انرژی تشدید و  $I$  انتگرال تشدید است که از رابطه نیمه تجربی  $I = A + C/(r_F p)^{1/2}$  به دست می‌آید.  $p$  چگالی و  $r_F$  شعاع معادل سوخت و  $A$  و  $C$  مقادیر ثابتی هستند که به جنس سوخت بستگی دارند. با استفاده از روابط فوق خواهیم داشت.

$$\varepsilon = \frac{\chi_1 p_1}{1 - (1 - p_1)\beta_1} + \left[ \chi_2 v_1 \chi_1 (1 - p_1) \sigma_{1F} / \sigma_{1L} \right] \left[ \frac{p_2}{1 - (1 - p_2)\beta_2} \right] + \left[ \frac{\chi_1 (1 - p_1) \sigma_{13} / \sigma_{1L}}{1 - (1 - p_1)\beta_1} \right] \left[ \frac{p_3}{1 - (1 - p_3)\beta_3} \right] \quad (13)$$

که در آن  $\chi_1$  کسری از نوترونهاى شکافت است که در بالای آستانه شکافت و  $\chi_2$  کسری از نوترونهاى شکافت است که در زیر آستانه شکافت تولید می‌شوند.  $v_1$  تعداد نوترونهاى شکافت حاصل از نوترونهاى گروه ۱،  $p_1$  احتمال فرار بدون برخورد نوترون از گروه ۱،  $p_2$  احتمال فرار بدون برخورد نوترون از گروه ۲، و  $p_3$  احتمال فرار بدون برخورد نوترون از

گروه ۳ است.

با استفاده از رابطه (۱۳) این ضریب برابر خواهد بود با

$$\varepsilon = 1.013347$$

$\eta(E)$  نیز با توجه به غنای ۱٪ سوخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_T = v^{25} \frac{\sigma_F^{25}(E_0) g_F^{25}(T)}{\sigma_a^{25}(E_0) g_a^{25}(T) + 100 \sigma_a^{18}(E_0) g_a^{18}(T) + 200 \sigma_a^6(E_0)} \quad (14)$$

این مطلب را مشاهده کرد. از چهار ضریب مذکور  $\eta_T$  مقداری ثابت است و سه ضریب دیگر به  $r_F$  شعاع سوخت معادل،  $r_c$  شعاع غلاف معادل، و  $r_e$  شعاع اصلاح شده سلول واحد بستگی دارند. چون این پارامترها به تخلخل یا ارتفاع مؤثر قلب وابسته هستند آنها نیز به تخلخل یا ارتفاع بستگی خواهند داشت. رابطه تخلخل و ارتفاع مؤثر به صورت زیر است [۷]

$$H = -1800 + \left( 5832 \times 10^9 + 4608 \times 10^8 / (1 - \varepsilon) \right)^{1/3} \quad (17)$$

در شکل (۳) نمودار تغییرات  $K_\infty$  بر حسب تخلخل،  $\varepsilon$ ، و در شکل (۴) نمودار تغییرات ضریب تکثیر بی‌نهایت، بر حسب ارتفاع مؤثر،  $H$ ، رسم شده است.

### محاسبات شار نوترون

برای محاسبات مربوط به شار نوترون در قلب، به علت وجود

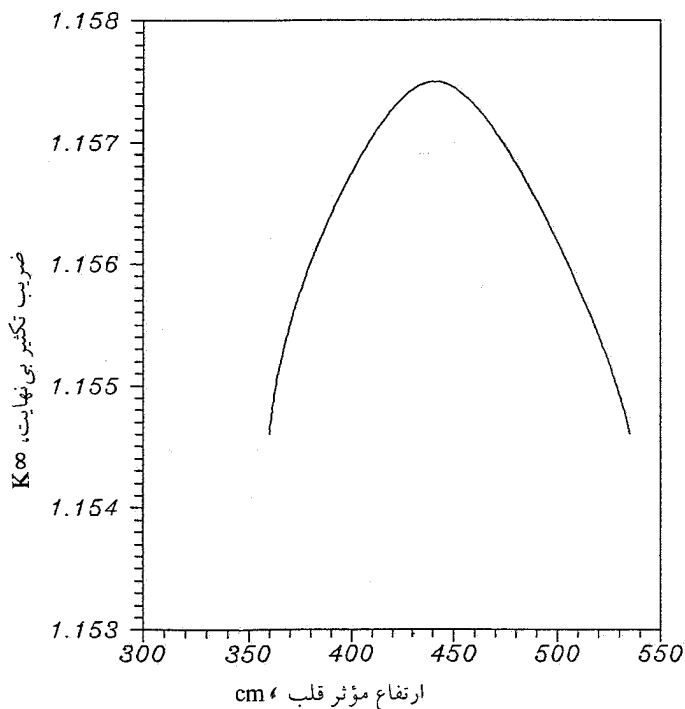
که در آن  $\sigma_F$  و  $\sigma_a$  به ترتیب سطح مقطع شکافت و جذب،  $v$  تعداد متوسط نوترونهاى حاصل از شکافت، و  $g_F$  و  $g_a$  ضرایب غیر  $1/v$  برای جذب و شکافت در دمای مربوط به انرژی  $E_0 = 0.0253$  eV الکترون ولت است. مقادیر جایگزین شده برای پارامترهای  $g_F^{25}(T)$  و  $g_a^{25}(T)$  و  $g_a^{18}(T)$  به ترتیب ۰.۹۷۶ و ۰.۹۷۸ و ۰.۱۷ است و در نتیجه خواهیم داشت.

$$\eta_T = 1.4686 \quad (15)$$

بنابراین ضریب تکثیر بی‌نهایت سیستم عبارت است از

$$K_\infty = f p \varepsilon \eta_T = 1.157521 \quad (16)$$

قبلاً نشان داده شد که برای طراحی مورد نظر، ضریب تکثیر بی‌نهایت سیستم، در تخلخل ۰.۹۱ یا ارتفاع مؤثر ۴۳۸.۸ سانتیمتر پدید می‌آید. با محاسبه و رسم نمودار حاصلضرب چهار ضریب فوق بر حسب تخلخل یا ارتفاع مؤثر قلب می‌توان



شکل ۴. ضریب تکثیر بی نهایت سیستم بر حسب مقادیر مختلف ارتفاع مؤثر قلب، ضریب تکثیر محاسبه شده برای سلول واحد است که چون قطر کانالها ثابت است فقط نقش تخلخل در ارتفاع مؤثر قلب منظور شده است.

داریم

$$\tau_{\parallel} = 9418 \text{ cm}^2 \quad \tau_{\perp} = 7982 \text{ cm}^2$$

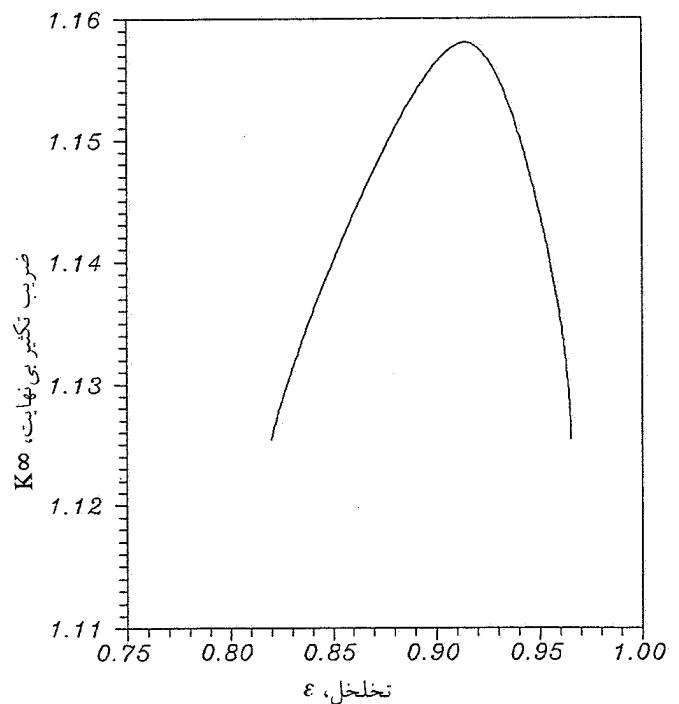
با کلینگ سیستم را در امتداد موازی و عمود بر محور کانال، با داشتن این مقادیر و مساوی قرار دادن ضریب تکثیر مؤثر سیستم با مقدار یک، می توان به دست آورد.

$$K_{eff} = K_{\infty} \frac{e^{-B^2 \tau}}{1 + L^2 B^2} = 1, \quad \Rightarrow$$

$$B_{\parallel}^2 = 9.7152 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}, \quad B_{\perp}^2 = 1.1333 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$$

اگر رآکتور مورد نظر لخت بود، برای استوانه ای لخت به ارتفاع  $H$  و با کلینگ شعاعی  $(B_{\perp})^2$ ، شعاع بحرانی را می توانستیم از رابطه  $\gamma_{\perp}^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \gamma_0^2$  به دست آوریم که در آن  $\gamma_0^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$  است. اما رآکتور مورد بحث دارای حفره هایی به موازات محور کانالهاست که سبب افزایش جریان نوترون در این جهت می شود. این اثر معادل این است که ارتفاع قلب رآکتور از  $H_0$  به یک مقدار مؤثر  $H_{eff}$  تغییر کند. در نتیجه

$$\gamma_{eff}^2 = \left(\frac{\pi}{H_{eff}}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{H_0}\right)^2 B_{\perp}^2 / B_{\parallel}^2 = \gamma_{\perp}^2 B_{\perp}^2 / B_{\parallel}^2$$



شکل ۳. ضریب تکثیر بی نهایت سیستم بر حسب تخلخلهای مختلف.

گاز هلیوم، با پدیده استریمینگ نوترون مواجه خواهیم شد و این پدیده سبب می شود تا بعضی از ثابتهای قلب مثل سطح پخش گرمایی و سن نوترونها، در جهت موازی و عمود بر محور کانال، دارای مقادیری متفاوت باشند. محاسبات نشان می دهد که سطح پخش گرمایی در جهت موازی و عمود بر محور کانال را می توان از روابط زیر به دست آورد [۱۳-۱۱]

$$L_{\parallel}^2 = L_{th}^2 \left[ 1 + 2V_h + V_h^2 \left( \frac{2\omega}{e^{2\omega} - 1} \right) + \frac{3}{2} GWV_h^2 \right]$$

$$L_{\perp}^2 = L_{th}^2 \left[ 1 + 2V_h + V_h^2 \left( \frac{2\omega}{e^{2\omega} - 1} \right) + \frac{3}{4} GWV_h^2 \right]$$

که در آنها  $V_h$  نسبت حجم گاز به حجم مواد جامد مدول،  $G$  ضریب شکل و  $\omega$  از رابطه  $\omega = r_h \lambda_m V_h$  به دست می آید که در آن شعاع هیدرولیکی کانال و  $\lambda_m$  پویش آزاد متوسط انتقال در آرام کننده است. با استفاده از دو رابطه بالا سطح پخش گرمایی در دو جهت به دست می آید:

$$L_{\parallel}^2 = 5796 \text{ cm}^2, \quad L_{\perp}^2 = 5068 \text{ cm}^2$$

تصحیحات مربوط به سن نوترون،  $\tau$ ، نیز مانند  $L$  است با ضریب اضافی  $(1 + V_F/V_m)^2$  در سمت راست معادله، در نتیجه

پس از محاسبه ثابتها و ضرایب لازم، شار نوترونهاى سریع و گرمایی در قلب را می توان به صورت زیر به دست آورد

$$\phi_1(r,z) = [2,6827 \times 10^{14} J_0(\bar{\mu}r) - 4,7968 \times 10^8 I_0(\bar{\nu}r)] \cos(\gamma.z)$$

$$\phi_2(r,z) = [1,7749 \times 10^{14} J_0(\bar{\mu}r) + 5,1172 \times 10^8 I_0(\bar{\nu}r)] \cos(\gamma.z)$$

که در آنها  $\bar{\mu} = 0.07317$ ،  $\bar{\nu} = 0.05768$  و  $\gamma = \pi/H_0$  است و  $H_0$  هم ارتفاع قلب است.

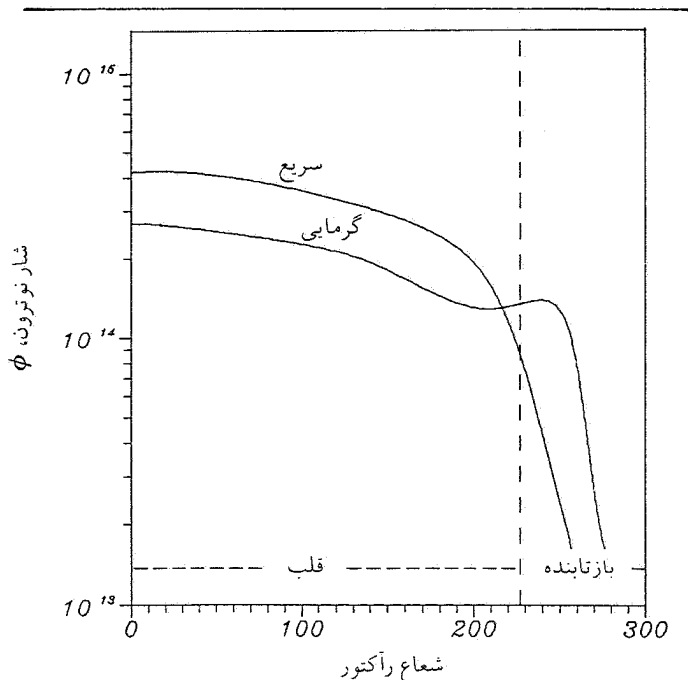
محاسبات نشان می دهد که برای بحرانی شدن رآکتور با شعاع معادل قلب برابر با ۲۲۶٫۸ سانتیمتر، ضخامت بازتابنده باید برابر با ۵۳٫۲ سانتیمتر باشد که در این صورت شعاع رآکتور ۲۸۰ سانتیمتر خواهد بود. شار نوترونهاى سریع و گرمایی در بازتابنده را نیز می توان به دست آورد.

$$\phi_{1r}(r,z) = [3,7927 \times 10^{19} K_0(\bar{k}_1r) - 1,7838 \times 10^7 I_0(\bar{k}_1r)] \cos(\gamma.z)$$

$$\phi_{2r}(r,z) = [-6,3376 \times 10^{19} K_0(\bar{k}_1r) + 2,9807 \times 10^7 I_0(\bar{k}_1r) + 5,5600 \times 10^{16} K_0(\bar{k}_1r) - 1,4521 \times 10^{12}$$

$$I_0(\bar{k}_1r)] \cos(\gamma.z)$$

(۱۹)



شکل ۵. توزیع شار نوترونهاى سریع و گرمایی در قلب و بازتابنده.

و

$$B_{\perp}^2 = \left( \frac{2,405}{R} \right)^2 + \gamma_{eff}^2$$

می شود که اگر ارتفاع مؤثر ۴۳۸٫۸ cm و  $\gamma_{eff}$  محاسبه و جایگزین شود شعاع رآکتور لخت به دست می آید:

$$R_0 = 328,7 \text{ cm}$$

برای محاسبه شار نوترون از نظریه پخش دو گروهی استفاده کردیم. در نتیجه شار نوترونهاى سریع و گرمایی را در قلب با  $\phi_1$  و  $\phi_2$  در بازتابنده با  $\phi_{1r}$  و  $\phi_{2r}$  نشان می دهیم، معادلات پخش حالت پایا برای هر گروه عبارت اند از

$$D_1 \nabla^2 \phi_1 - \sum_{s \neq 1} \phi_1 - \sum_{1a} \phi_1 + \nu \sum_{1F} \phi_1 + \nu \sum_{2F} \phi_2 = 0$$

$$D_2 \nabla^2 \phi_2 - \sum_{2a} \phi_2 + P \sum_{s \neq 2} \phi_1 = 0$$

$$D_{1r} \nabla^2 \phi_{1r} - \sum_{1sr} \phi_{1r} - \sum_{1ar} \phi_{1r} = 0$$

$$D_{2r} \nabla^2 \phi_{2r} - \sum_{2ar} \phi_{2r} + \sum_{1sr} \phi_{1r} = 0$$

شار متوسط نوترونهاى سریع و گرمایی در قلب عبارت اند از

$$\bar{\phi}_1 = 1,159 \times 10^{14} \text{ نوترون/cm}^2\text{s}$$

$$\bar{\phi}_2 = 8,084 \times 10^{13} \text{ نوترون/cm}^2\text{s}$$

شار سریع و گرمایی در قلب و بازتابنده در صفحه  $Z = 0$  در شکل (۵) برحسب شعاع قلب رسم شده است.

### نتایج

نتایج حاصل از این تحقیقات را به صورت زیر خلاصه می کنیم. در پایان توصیه های لازم برای ادامه تحقیقات ارائه شده است.

### الف) مزیت های رآکتور پیشنهادی

از مزیت های این سیستم پیشنهادی، پایدار بودن بستر آن است. در این ایده، طراحی مکانیکی کانالها به صورتی است که سرعت جریان خنک کننده در مسیر کانالها تغییر می کند. این



نداشته باشد. منحنی ضریب تکثیر بی نهایت برحسب تخلخل در شکل ۳ و برحسب ارتفاع مؤثر قلب در شکل ۴ ارائه شده است.

### ج) توزیع شار و شار متوسط

از دیگر نتایج به دست آمده در این تحقیقات تعیین ضخامت بازتابنده برای بحرانی شدن سیستم است. این ضخامت در حدود ۵۳٫۲ سانتیمتر به دست آمد که در این صورت شعاع راکتور به ۲۸۰ سانتیمتر می‌رسد. توزیع شار نوترونها سریع و گرمایی در قلب و بازتابنده محاسبه شده و با روابط (۱۸) و (۱۹) داده شده‌اند. شار متوسط نوترونها گرمایی در قلب برابر با  $10^{13} \times 84 \times 8$  به دست آمده است. این کمیت متوسط شار گرمایی در سوخت از رابطه  $O = P / V \Sigma_{\nu} E_{\nu} E_{\nu}$  نیز قابل محاسبه است که در آن  $V$  حجم سوخت و  $\Sigma_{\nu} E_{\nu}$  سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت سوخت است. با توجه به اینکه نسبت شار متوسط گرمایی در راکتور به شار متوسط گرمایی در سوخت برابر ۱٫۰۶۴ است [۷] شار متوسط گرمایی در راکتور از این روش برابر با  $10^{13} \times 95 \times 7$  به دست می‌آید و ملاحظه می‌شود که با توجه به همه تقریبهایی که در محاسبات قبلی به کار برده‌ایم این دو مقدار بسیار نزدیک هستند و در حدود ۱٫۶ درصد با یکدیگر اختلاف دارند. نمودار توزیع شار نوترونها سریع و گرمایی در قلب و بازتابنده در شکل ۵ رسم شده است.

### توصیه‌های لازم برای ادامه تحقیقات

۱. در این کار تحقیقاتی براساس مراجع ارائه شده، بیشترین نیروی خالص وارد بر گلوله‌ها که برای پایداری بستر لازم است حدود ۱۳ درصد نیروی وزن آنها در نظر گرفته شده و طراحی مکانیکی کانالها بر همین اساس صورت گرفته است. این فرض عملاً باید مجدداً بررسی شود و در صورت نیاز طراحی مکانیکی کانالها عوض شود. ضمناً لزومی ندارد که حتماً میزان افزایش شعاع کانالها یکنواخت باشد.
۲. توزیع گلوله‌ها در طول کانال یکنواخت فرض شده است؛ لازم است این فرض بررسی و در صورت لزوم اثرهای غیریکنواختی توزیع گلوله‌ها در طول کانال در محاسبات وارد شود، هرچند که به نظر می‌رسد این غیریکنواختی، در صورت وجود، کوچک باشد.
۳. باتوجه به نوع آرام‌کننده انتخاب شده می‌توان با تغییر در اندازه و ترکیب راکتور، از دی‌اکسید اورانیوم طبیعی نیز استفاده کرد که در این صورت نیازی به غنی‌سازی اورانیوم وجود ندارد، ولی استفاده از دی‌اکسید اورانیوم طبیعی حجم راکتور پیشنهادی را بزرگتر خواهد ساخت.

تغییر به گونه‌ای است که سیستم خود به خود دارای بستری پایدار می‌شود. در یک سیستم پیشنهادی، برای پایداری بستر از میدانهای مغناطیسی بسیار قوی به شدت ۵ تسلا و قراردادن ماده فرومغناطیس در داخل گلوله‌های سوخت استفاده شده است [۱۴]. این روش، علاوه بر پیچیدگیهای تکنولوژیکی، ساخت میدانهای مغناطیسی قوی، دارای مشکلات دیگری مانند طراحی سوخت و اثرات مخرب تابش هسته‌ای موجود در قلب راکتور بر ماده فرومغناطیس است، در حالی که در سیستم پیشنهادی هیچ کدام از این مشکلات وجود ندارد. در این ایده از گلوله‌های سوخت با قطر بسیار کوچک (۱۲ سانتیمتر) و از جنس دی‌اکسید اورانیوم، که چگالی آن حدود نصف چگالی اورانیوم است، استفاده شده است که ضمن امکان طراحی، به پایداری بستر نیز کمک می‌کند [۱۵]. به علاوه، کوچک بودن گلوله‌های سوخت سبب افزایش نسبت سطح به حجم آنها می‌شود که این امر انتقال گرما از گلوله‌ها به خنک‌کننده را آسانتر می‌سازد.

از دیگر مزایای این سیستم، استفاده از اورانیوم یک درصد غنی شده است که با توجه به اینکه در مقایسه با دیگر راکتورها از درصد غنای کمی استفاده می‌کند، چگالی توان در این راکتور پیشنهادی  $135 \text{ W/cm}^3$  است که در حدود ۳٫۵ برابر بیشتر از راکتورهای بستر شارشی مشابه است [۱۶]. بهترین مقدار نسبت شعاع به ارتفاع در راکتورهای استوانه‌ای ۰٫۵۵ است. این نسبت در راکتور پیشنهادی ما تقریباً برابر ۰٫۵۲ است که در مقایسه با دیگر سیستمهای پیشنهادی که این نسبت مقداری مانند ۰٫۹۲ [۱۶] یا ۱٫۱ [۱۴] را دارد، مقدار بسیار خوبی است.

### ب) ارتباط تخلخل با ضریب تکثیر بی نهایت

نتایج حاصل از محاسبات گویای رابطه تنگاتنگ بین تخلخل و ضریب تکثیر بی نهایت سیستم است. این محاسبات نشان می‌دهند که در ابتدا با افزایش تخلخل، ضریب تکثیر بی نهایت افزایش می‌یابد و این روند تا رسیدن تخلخل به ۰٫۹۱ ادامه پیدا می‌کند و از آن به بعد با افزایش تخلخل، ضریب تکثیر بی نهایت کاهش می‌یابد (شکل ۳). چون سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که در حالت عادی در تخلخل ۰٫۹۱ قرار دارد، هر گونه تغییری در تخلخل بستر، که ناشی از تغییر ناخواسته در سرعت گاز هلیوم باشد، سبب کاهش ضریب تکثیر بی نهایت می‌شود که می‌تواند سیستم را به حالت زیر بحرانی منتقل و از وقوع وقایع ناگوار جلوگیری کند. از این امر برای کنترل راکتور نیز می‌توان استفاده کرد و به نظر می‌رسد که در این سیستم جدید احتیاج چندان به میله‌های کنترل وجود

1. IAEA Bulletin, vol. 35, No. 4 (1993) 60-9.
2. M.R. Eskandari, "The Conceptual Design of Intrinsic safe Reactor", Bereckly and McMaster Cooperative Work, July (1993).
3. M.R. Eskandari, M. Shayesteh. M. Soltani, "The New conceptual Design of Nuclear Reactor Safe Against Loss of Coolant Accident", Inter. Nathiaghali Summer Coll. on Physics and Contemporary Needs (1994).
4. M.R. Eskandari. A.A. Harms. "Intrninsic Reactor Safety with Temperature Sensitive Isotope Triggers, Nucl. Sci. J. Vol. 29, No. 2 (1992)81-87.
5. A.A. Harms, M.R. Eskandari. Z. Bilanovic, "Intrinsic Fission Excursion Inhibition with Tandem-Isotope Temp. triggers", Fusion Tech. Vol. 20 (1991).
6. F. Refiduash, "A Fluidized Bed Nuclear Reactor Concept", Nucl. Technology, Vol. 21 (1985).
7. M. Shayesteh, "Intrinsically Safe Nuclear Reactor" M.Sc. Thesis, Shiraz University, Phy. Dept. (1994).
8. J. L. Meem, "Two Group Reactor Theory", science publishers, (1963).
9. J. Lamarsh, Intro. to Nuclear Eng., Addison -Wesley (1983).
10. J. Lamarsh, Nucl. Reactor Theory, Addison-Wesley (1972).
11. D. J. Behrens, "The Effect of Holes on the passage of Neutrons", proc. Phys. Soc. (1949).
12. R. V. meghreblian and D. K. Holmes, "Reactor Analysis", McGraw Hill (1960).
13. A.M. Weinberg and E.P. Wigner, "The Physical Theory of Neutron Chain Reactors", University of Chicago press, (1958).
14. Y. Watanabe and J. Appelbaum, "Magnetically stabilized Fluidized Bed Nuclear Fission Reactor", Fusion Technology, Vol. 20, Dec. (1991).
15. R.H. Perry, Chemical Enginneers Handbook, McGraw Hill (1973).
16. M. Taube and M. Lanfranchi and Th. Von. Weissnfluh, "The Inherently Safe Power Reactor Dyonisos", Am. Nucl. Energy, Vol. 13. No. 12 (1986).