

## مطالعه اثرات فیزیکی میله های کنترل در راکتورهای هسته ای

محمد رضا اسکندری\* - صحابه هاشمی  
دانشگاه شیراز - بخش فیزیک

### چکیده

هدف این تحقیق بررسی اثرات فیزیکی میله های کنترل می باشد. به این منظور با استفاده از تئوری دو گروهی به محاسبه شار و ارزش میله (های) کنترل پرداختیم. در طول این تحقیق در یافتیم که تغییر شکل شار نوترون نسبت به تغییر مکان میله کنترل نسبت به مرکز قلب راکتور، بجز در نواحی نزدیک میله کنترل بسیار جزئی بوده و شار نوترون در حضور میله کنترل نسبت به حالت بدون میله کنترل دچار یک سختی می شود که این سختی به نوع و ابعاد میله کنترل و نوع کند کننده بستگی دارد. همچنین برهمکنش دو و چهار میله کنترل موجود در قلب راکتور را بررسی کرده و دریافتیم که این برهمکنش مستقل از ماده کند کننده بوده و به تعداد میله های کنترل، ابعاد قلب راکتور و ابعاد و جنس میله های کنترل بستگی دارد.

کلمات کلیدی: شار نوترون - سختی شار - میله کنترل - ماده کند کننده - قلب راکتور

### مقدمه

میله های کنترل به عنوان اصلی ترین کنترل کننده راکتورها مطرح می باشند. بررسی اثرات این میله ها بر روی شار نوترونهاي موجود در محیط و مقدار ضریب تکثیر بینهایت راکتور یکی از مسائل مورد توجه محققان می باشد. در این تحقیق وجود بیش از یک میله کنترل در قلب راکتور و اثراتی که این میله ها بر یکدیگر دارند مورد توجه قرار گرفته است [1]. در این مقاله سعی کرده ایم عواملی را که در این تأثیرات دخالت دارند مورد بررسی قرار دهیم. نکته دیگر، بررسی اثرات تغییر مکان میله کنترل نسبت به مرکز قلب راکتور بر روی شار نوترون موجود در محیط می باشد [2].

### روش کار

در این تحقیق یک راکتور خاص بوسیله قرار دادن میله های کنترل متفاوت از لحاظ جنس، ابعاد، تعداد و مکان قرار گرفتن بوسیله محاسبات دو گروهی مورد بررسی قرار گرفته و اثرات این میله ها بر روی شار نوترون موجود در محیط و ارزش میله های کنترل مشاهده شده است. راکتور مورد بررسی یک راکتور استوانه ای، بدون انعکاس دهنده است که از آب سنگین در آن به عنوان کند کننده استفاده می شود و در یک مخزن از جنس آلومینیوم به ارتفاع  $3/2$  m و قطر داخلی  $2/25$  m قرار گرفته و سوخت آن شامل میله های

اورانیوم طبیعی با قطر  $3/05$  cm می باشد که در لوله های آلومینیومی قرار گرفته اند (تعداد میله های سوخت ۱۳۲ است).

به منظور بررسی اثرات میله های کنترل، کمیت ارزش میله کنترل را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$\rho = \frac{(k_{\infty})_1 - (k_{\infty})_2}{(k_{\infty})_1} \quad (1)$$

در این معادله ضرایب تکثیر بینهایت قبل و بعد از ورود میله کنترل به ترتیب با اندیسهای ۱ و ۲ مشخص شده اند [3].

برای یک راکتور استوانه ای به ارتفاع  $H$ ، شعاع  $R$  و شعاع میله کنترل  $a$  شرایط مرزی زیر باید صادق باشند

$$\begin{aligned} \phi_T \left( \pm \frac{H}{2} \right) &= \phi_f \left( \pm \frac{H}{2} \right) = 0, \\ \phi_T (r = R) &= \phi_f (r = R) = 0, \\ \frac{1}{\phi_2} \frac{d\phi_2}{dr} \Big|_{r=a} &= \frac{1}{d}, \\ \frac{d\phi_1}{dr} \Big|_{r=a} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

که در این رابطه  $d$ ، طول برونمایی خطی میله کنترل مورد نظر می باشد. هدف ما در این قسمت بدست آوردن باکلینگ محیط قبل و بعد از ورود میله کنترل بصورت دو گروهی می باشد. توابع زیر برای حالت بدون میله کنترل حاصل می شوند:

$$\phi_f (r, z) = A J_0 \left( \frac{2.405 r}{R} \right) \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right) \quad (3)$$

$$\phi_T (r, z) = A S_1 J_0 \left( \frac{2.405 r}{R} \right) \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right)$$

حال چنانچه یک میله کنترل را در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار دهیم شار نوترونیهای حرارتی و سریع بصورت زیر حاصل می شوند:

$$\phi_f = A \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right) \left[ Y_0(\alpha \xi) - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\delta_m Y_m(\alpha R) J_m(\alpha r_0)}{J_m(\alpha R)} J_m(\alpha r) \cos(mv) \right] + \quad (4)$$

$$C \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right) \left[ K_0(\beta \xi) - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\delta_m K_m(\beta R) I_m(\beta r_0)}{I_m(\beta R)} I_m(\beta r) \cos(mv) \right]$$

و

$$\phi_T = A S_1 \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right) \left[ Y_0(\alpha \xi) - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\delta_m Y_m(\alpha R) J_m(\alpha r_0)}{J_m(\alpha R)} J_m(\alpha r) \cos(mv) \right] + \quad (5)$$

$$C S_2 \cos \left( \frac{\pi z}{H} \right) \left[ K_0(\beta \xi) - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\delta_m K_m(\beta R) I_m(\beta r_0)}{I_m(\beta R)} I_m(\beta r) \cos(mv) \right]$$

که با استفاده از شرایط مرزی لازم در سطح میله کنترل و با حل عددی معادله بدست آمده مقدار  $\alpha$  برای  $r_0$ ،  $a$  و  $d$  مورد نظر حاصل شده و بنابراین مقدار ارزش میله کنترل و شار نوترونهاى سریع و حرارتی بدست می آید.

حال  $N$  میله کنترل را در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور بطور متقارن قرار داده و به بررسی مسأله می پردازیم. پاسخهای زیر حاصل می شوند:

$$\phi_f = A \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \left[ \sum_{n=1}^N Y_0(\alpha \xi_n) - N \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq N \text{ integer}}}^{\infty} \frac{\delta_m Y_m(\alpha R) J_m(\alpha r_0)}{J_m(\alpha R)} J_m(\alpha r) \cos(mv) \right] + \quad (6)$$

$$C \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \left[ \sum_{n=1}^N K_0(\beta \xi_n) - N \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq N \text{ integer}}}^{\infty} \frac{\delta_m K_m(\beta R) I_m(\beta r_0)}{I_m(\beta R)} I_m(\beta r) \cos(mv) \right]$$

و

$$\phi_T = AS_1 \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \left[ \sum_{n=1}^N Y_n(\alpha \xi_n) - N \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq N \text{ integer}}}^{\infty} \frac{\delta_m Y_m(\alpha R) J_m(\alpha r_0)}{J_m(\alpha R)} J_m(\alpha r) \cos(mv) \right] + \quad (7)$$

$$CS_2 \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \left[ \sum_{n=1}^N K_n(\beta \xi_n) - N \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq N \text{ integer}}}^{\infty} \frac{\delta_m K_m(\beta R) I_m(\beta r_0)}{I_m(\beta R)} I_m(\beta r) \cos(mv) \right]$$

که در این معادله داریم:

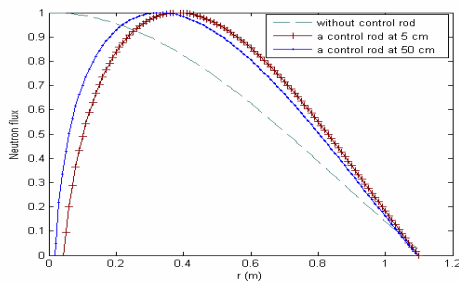
$$\delta_m = \begin{cases} 1, & m = 0, \\ 2, & m > 0 \end{cases} \quad (13)$$

که در این رابطه  $\xi_n$  متغیر شعاعی از مرکز میله کنترل  $n$  ام می باشد. برای برقرار کردن شرط مرزی در سطح میله کنترل با توجه به تقارن مسأله اعمال این شرط در سطح یکی از این میله ها کفایت می کند، همچنین با توجه به کوچکی شعاع میله های کنترل در مقایسه با شعاع قلب راکتور می توانیم در هنگام اعمال شرط مرزی در سطح میله اول  $\xi_2, \xi_3, \xi_4, \dots$  و  $r$  را ثابت بگیریم. با اعمال شرط مرزی نوترونهاى سریع و حرارتی در سطح میله کنترل اول و با حل عددی معادله بدست آمده مقدار  $\alpha$  برای  $r_0, a$  و  $d$  مورد نظر حاصل شده و بنابراین مقدار ارزش میله کنترل و شار نوترونهاى سریع و حرارتی را بدست می آوریم.

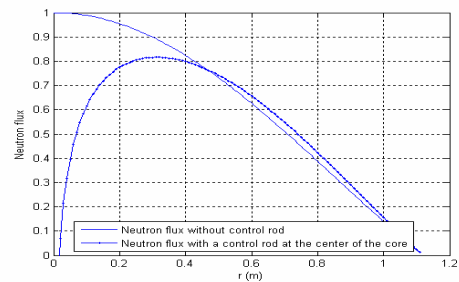
### نتایج:

شکل (۱)، مقایسه ای بین شار نوترون بر حسب فاصله در حضور و عدم حضور میله کنترل از جنس کادمیوم و به شعاع  $34/2$  میلیمتر می باشد. همانگونه که مشاهده می شود در نزدیکی میله کنترل شار نوترون به شدت کاهش یافته است، اما از نقطه  $42$  سانتیمتری اثرات سختی شار غالب شده و شار نوترون از این نقطه به بعد افزایش اندکی یافته است. این اثر را می توان به این صورت توضیح داد که وجود میله کنترل در مرکز قلب

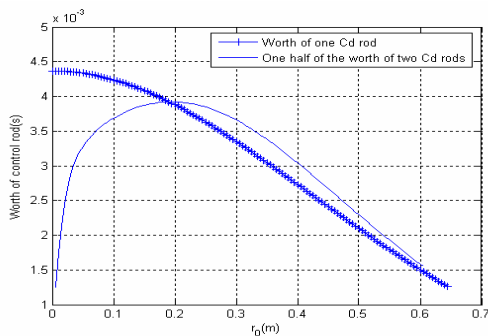
راکتور باعث می شود که نوترونها تمایلی برای حضور در نواحی دور از میله کنترل داشته باشند و این امر موجب تغییر شکل شار در این نواحی می شود. برای بررسی بیشتر، شار نوترون بر حسب فاصله از مرکز قلب راکتور در شکل (۲) برای میله های کنترل متفاوت از لحاظ مکان قرار گرفتن در قلب راکتور، رسم شده است. با دور کردن میله کنترل از قلب راکتور اثرات جذبی آن بر نوترونهای موجود در محیط کاهش می یابد. مشاهده می شود که فرم شار نوترون با دور شدن از قلب راکتور به سمت شارنوترون بدون میله کنترل میل می کند. همانگونه که مشاهده می شود شار نوترون در نواحی نزدیک میله کنترل هنگامی که میله در ۵ سانتیمتری قلب راکتور قرار دارد نسبت به شار نوترون در حالیکه میله کنترل در فاصله ۵۰ سانتیمتری مرکز قرار گرفته است کمتر است. نکته قابل توجه دیگر می تواند مقایسه شار در سایر نواحی، (نواحی غیر از نزدیک مرکز قلب که میله کنترل در آن قرار دارد) در حضور و عدم حضور میله کنترل باشد، که همانگونه که مشاهده می شود در حضور میله کنترل این شار نسبت به حالت بدون میله کنترل افزایش دارد. این اثر را می توان به صورت اثرات سختی شار در نظر گرفت که باعث این افزایش شار شده است.



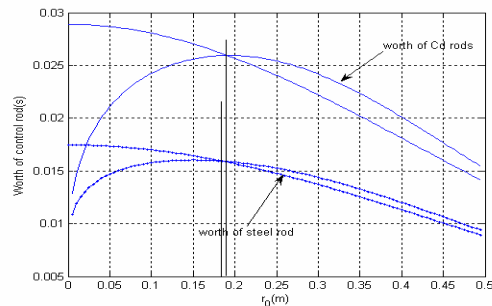
شکل ۲: شار نوترون بر حسب فاصله از قلب راکتور برای کاندکننده آب سنگین



شکل ۱: شار نوترون در حضور و عدم حضور میله کنترل از جنس کادمیم بر حسب فاصله از مرکز قلب راکتور برای کاندکننده آب سنگین



شکل ۴:  $\frac{1}{2}$  ارزش دو میله کنترل که بصورت قطری در فاصله  $2r_0$  از یکدیگر قرار گرفته اند در مقایسه با ارزش میله کنترلی که در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته بصورت تابعی از  $r_0$  برای کاندکننده آب سبک.



شکل ۳:  $\frac{1}{2}$  ارزش دو میله کنترل که بصورت قطری در فاصله  $2r_0$  از یکدیگر قرار گرفته اند در مقایسه با ارزش میله کنترلی که در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته بصورت تابعی از  $r_0$  برای دو ماده کادمیم و استیل برای کاندکننده آب سنگین.

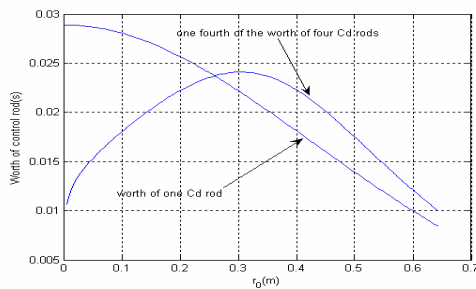
با توجه به شکل (۳) مشاهده می کنیم که در حضور دو میله کنترل نصف ارزش میله کنترل با ارزش یک تک

میله که در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته برابر نمی باشد و می توان محدوده مورد بررسی را به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول از  $r_0 = 0$  تا  $r_0 = 18 \text{ cm}$  می باشد که در این محدوده نصف ارزش دو میله کنترل کمتر از ارزش یک میله کنترل است، علت این امر را می توان به تأثیر متقابلی که این دو میله بر یکدیگر دارند نسبت داد. همانگونه که در توصیف شکل (۲) بیان شد در نواحی نزدیک میله کنترل شار نسبت به حالت بدون میله کنترل به شدت کاهش دارد بنابراین میله دوم با شار کمتری روبرو خواهد بود که نتیجه آن کاهش ارزش میله کنترل می باشد. نکته قابل تأمل دیگر مقدار  $r_0 = 18 \text{ cm}$  می باشد که ظاهراً این مقدار بسیار نزدیک به طول مهاجرت یک نوترون است. بخش دوم نواحی بزرگتر از  $18 \text{ cm}$  می باشد. در این ناحیه نصف ارزش دو میله کنترل بزرگتر از ارزش یک میله کنترل است، علت این امر را نیز می توان به تأثیر متقابلی که این دو میله بر یکدیگر دارند نسبت داد. همانگونه که در توصیف شکل (۲) بیان شد در نواحی دورتر از محل میله کنترل شار نسبت به حالت بدون میله کنترل افزایش دارد بنابراین میله دوم با شار بزرگتری روبرو خواهد شد که نتیجه آن افزایش ارزش میله کنترل می باشد. به منظور بررسی بیشتر میله های کنترل، جنس میله کنترل مورد بررسی را تغییر خواهیم داد و به جای کادمیوم با طول برونیابی خطی  $2/19$  سانتیمتر، استیل با طول برونیابی خطی  $9/69$  سانتیمتر را جایگزین کردیم. همانگونه که انتظار می رفت ارزش میله کنترل برای میله از جنس استیل نسبت به میله کادمیوم، با توجه به قدرت کمتر جذب این میله برای نوترونهای حرارتی، کمتر بود. همچنین مشاهده می شود که نقطه تقسیم کننده دو ناحیه که در قسمت قبل توصیف شد نزدیکی  $r_0 = 17 \text{ cm}$  قرار دارد بنابراین بنظر می رسد که مختصات این نقطه به جنس میله کنترل وابسته است. از آنجا که در بررسی ابتدایی نتیجه گیری ما این بود که این نقطه رابطه ای با طول مهاجرت دارد، ماده کند کننده موجود در محیط را تغییر می دهیم تا اثرات احتمالی این تغییر را در مختصات این نقطه مشاهده کنیم. در شکل (۴) ماده کند کننده را که در نمودارهای قبل آب سنگین بوده با آب سبک جایگزین کردیم. مشاهده می شود که نقطه مورد نظر در  $18$  سانتیمتری قرار گرفته است که در این محیطها دیگر برابر با طول مهاجرت نمیباشد زیرا طول مهاجرت برای آب برابر  $5/93$  سانتیمتر می باشد. بنابراین این نقطه رابطه ای با طول مهاجرت ندارد و به عوامل دیگری بستگی دارد. که در ادامه سعی می کنیم این عوامل را بیابیم. نکته دیگر این نمودارها کاهش ارزش میله کنترل برای کند کننده آب می باشد. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می شود با افزایش قطر قلب راکتور ارزش میله کنترل کاهش می یابد. همچنین مختصات نقطه مورد نظر افزایش یافته است. با افزایش قطر قلب راکتور و دور شدن دیواره قلب از میله کنترل، اثرات سختی کاهش می یابند. این تغییر جزئی در ابعاد قلب راکتور نسبت به عوامل دیگری که در نمودارهای قبل مشاهده کردیم تأثیر بیشتری در جابجایی نقطه مورد بررسی دارد. شکل (۶)، نمایشگر تغییرات یک چهارم ارزش چهار میله کنترل در قلب راکتور و ارزش یک میله کنترل بر حسب مکان میله (ها) می باشد. همانگونه که مشاهده می شود مختصات نقطه مورد بررسی به  $26$  سانتیمتری مرکز قلب انتقال یافته است. این انتقال را می توان به این

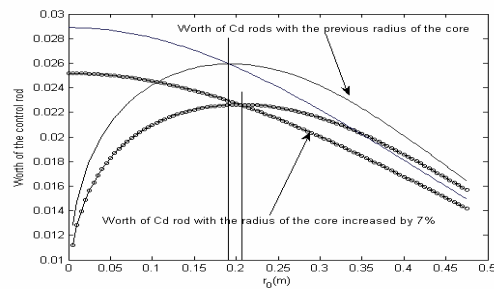
صورت توضیح داد که با افزایش تعداد میله‌ها مکانهایی که در آنها شار کاهش می‌یابد نسبت به مکانهایی که اثرات سختی را دریافت می‌کنند افزایش می‌یابد.

### بحث و نتیجه‌گیری:

وجود میله کنترل در قلب راکتور باعث جذب نوترونها می‌شود. اثر افزایش شار در نواحی دور از میله کنترل را نوترونها به حضور در نواحی دور از میله کنترل می‌شود. اثر افزایش شار در نواحی دور از میله کنترل را



شکل ۶: ارزش چهار میله کنترل که بصورت متقارن در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته‌اند در مقایسه با ارزش میله کنترلی که در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته بصورت تابعی از  $r_0$ .



شکل ۵: ارزش دو میله کنترل که بصورت قطری در فاصله  $2r_0$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند در مقایسه با ارزش میله کنترلی که در فاصله  $r_0$  از مرکز قلب راکتور قرار گرفته بصورت تابعی از  $r_0$  برای دو قطر متفاوت قلب راکتور.

تحت عنوان سختی در شار نوترون معرفی کردیم. مکان شروع مشاهده این اثر به قدرت میله کنترل بستگی دارد. که این قدرت جذب به نوع کند کننده، ابعاد قلب راکتور و جنس و ابعاد میله کنترل بستگی دارد. تغییرات شعاعی شار نوترون تقریباً مستقل از مکان قرار گرفتن میله کنترل در قلب راکتور می‌باشد و تنها در نواحی نزدیک میله‌های کنترل تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مختصات نقطه اثر برهمکنش میله‌های کنترل به ترتیب اثرگذاری به تعداد میله‌های کنترل، ابعاد قلب راکتور و جنس این میله‌ها بستگی دارد و مستقل از ماده کند کننده است. مقدار ارزش میله کنترل به ماده کند کننده بیش از سایر عوامل بستگی دارد برای دو ماده کند کننده با طول مهاجرت متفاوت، فاصله‌ای که یک نوترون بطور متوسط طی می‌کند تا جذب شود در محیط با طول مهاجرت کوچکتر، کمتر است. بنابراین نوترونها می‌توانند در فواصل دورتر نسبت به میله کنترل متولد می‌شوند در این کند کننده شانس کمتری برای جذب توسط میله کنترل نسبت به کند کننده دیگر با طول مهاجرت بزرگتر دارند.

### مراجع:

- 1-Hong, L., Taryo, T., Sembiring, T., Hiroshi, S. and Yoshitaka, N. " Study on the Control Rod Interaction Effect in RSG Gas Multipurpose Reactor.", " Annals of Nuclear Energy", Vol. 29, pp.701-716,(2002)
- 2-Khattab, K, Omar, H. and Ghazi, N. " The Effect of Temperature and Control Rod Position on the Neutron Source Reactor.", " Nuclear Engineering and Design", (Article in Press), (2006)
- 3-Lamarsh, J.R. "Introduction to Nuclear Reactor Theory". New York: Addison Welsey Publishing Company,(1972)