



Sci. and Tech. note  
یادداشت علمی و فنی

## تعیین پارامترهای فیزیکی رآکتور زیربحرانی آب سبک برپایه‌ی نتایج تجربی و محاسباتی

نورا نصیری مفاخم\*، زهرا نصرآزادانی، ژاله صادق‌زاده

پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتورها و شتابدهنده‌ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۲۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

**چکیده:** رآکتور زیربحرانی آب سبک براساس مشخصات هندسی و هم‌چنین مواد ساختاری آن به وسیله‌ی سه کد محاسباتی MCNP4C، WIMSD5B و CITATION شبیه‌سازی شده، پارامترهای فیزیکی آن از جمله ضریب تکثیر بی‌نهایت، ضریب تکثیر مؤثر، مقدار واکنش‌پذیری چشمه‌ی نوترون خارجی، توزیع شعاعی و محوری شار و انحنای شار و وابستگی آن‌ها به موقعیت چشمه‌ی خارجی در رآکتور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی میزان صحت مدل‌ها در شبیه‌سازی رآکتور و هم‌چنین صحت سطح مقطع‌های مؤثر مورد استفاده، مقادیر محاسباتی حاصل از کدها با یک‌دیگر و هم‌چنین با نتایج تجربی مقایسه شد که برای مشاهدات تجربی این اختلاف کم‌تر از ۱۲٪ و نیز ۵٪~ برای کدهای WIMSD5B و CITATION بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** رآکتور زیربحرانی آب سبک، کد محاسباتی MCNP4C، کدهای محاسباتی WIMSD5B و CITATION، پارامترهای فیزیکی

## LWSCR Reactor Parameters Determination Based on Calculation and Experimental Results

N. Nassiri Mofakham\*, Z. Nasr Azadani, J. Sadeghzadeh

Reactor and Accelerator Research and Development School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1239, Tehran - Iran

**Abstract:** This paper is dealing with the reactor parameter determination experiments performed at the light water subcritical reactor (LWSCR) in Esfahan. The parameter determination methods are derived from a theory based on neutron source position. The LWSCR reactor system is modeled by Monte Carlo calculations (MCNP4C), WIMSD5B and CITATION, and the criticality safety and neutron flux distribution problems are presented and analyzed. The analysis of the multiplication factors obtained by MCNP4C are in fairly good agreement with the results obtained by WIMSD5B and CITATION. For the flux distribution calculations, the MCNP4C results differ from the experimental observations by less than 12% and by ~5% for the WIMSD5B and CITATION.

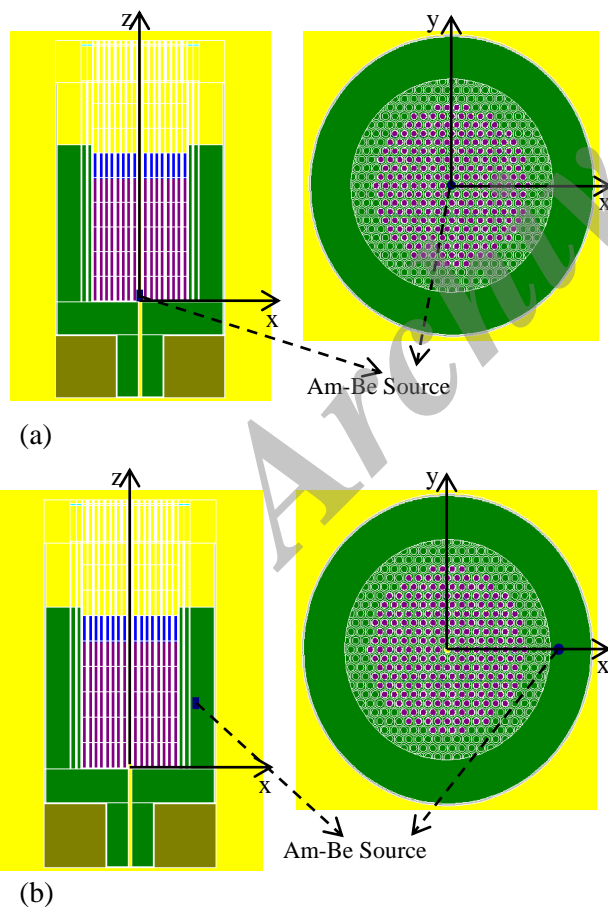
**Keywords:** Light Water Sub-Critical Reactor, MCNP4C Code, WIMSD5B and CITATION Codes, Physical Parameters



## ۱. مقدمه

سطح مقطع‌ها، و مدل پراکندگی حرارتی  $S(\alpha, \beta)$  در محاسبات استفاده شده است. هم‌چنین مشخصات چشمه، نوع خروجی و روش‌های مناسب برای کاهش واریانس، در فایل ورودی MCNP4C تعریف شده است. در شکل ۱ با استفاده از خروجی کد، نمای افقی و جانبی رآکتور برای دو حالت چشمه داخل و خارج ناحیه قلب نشان داده شده است.

در اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی رآکتور از دو روش استفاده شده است. در روش اول با استفاده از فعال‌سازی نوترونی، پولک‌های ایندیم و دیسپروسیم در مکان‌های مناسب در رآکتور قرار داده شده و برای مدت زمان کافی پرتودهی شده‌اند. پس از خارج کردن آن‌ها از رآکتور، با استفاده از آشکارساز یدور سدیم و سایر تجهیزات الکترونیکی وابسته، میزان پرتوزایی بتایی و سپس فعالیت اشباعی هر یک از پولک‌ها محاسبه شده است. در روش دوم از سیستم آشکارساز  $BF_3$  برای شمارش نوترون‌ها در مکان‌های مختلف رآکتور استفاده شده است [۳ و ۴].



شکل ۱. مقطع‌های افقی و عمودی رآکتور زیربحرانی آب سبک؛ (a) چشمه در داخل قلب، (b) چشمه در خارج قلب.

رآکتور زیربحرانی آب سبک (LWSCR) واقع در پژوهشکده‌ی رآکتور اصفهان، تنها رآکتور زیربحرانی آب سبک موجود در کشور می‌باشد. تانک این رآکتور به شکل استوانه به شعاع ۷۰ و ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متر و از جنس آلومینیم است. قلب این رآکتور متشکل از میله‌های سوخت اورانیم طبیعی آرایش یافته به صورت شش گوش در شعاعی در حدود ۲۵ سانتی‌متر است. صفحه‌ی نگه‌دارنده‌ی میله‌های سوخت از جنس پلکسی گلاس است و میله‌های سوخت از میان شبکه‌های این صفحه عبور کرده و به صورت آویزان قرار می‌گیرند. هر میله‌ی سوخت از یک استوانه‌ی آلومینیومی به قطر خارجی ۳/۳ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر تشکیل شده و در داخل آن پنج کیسول سوخت اورانیم طبیعی فلزی، هر یک به قطر ۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰/۳۲ سانتی‌متر با غلاف آلومینیومی به ضخامت ۰/۱۱ سانتی‌متر، جای دارد. کندساز این رآکتور، آب سبک و پارافین می‌باشد. از آنجایی که در یک رآکتور زیربحرانی واکنش زنجیره‌ای نمی‌تواند بدون حضور یک چشمه‌ی خارجی انجام شود، لذا از چشمه‌ی Am-Be موجود در بخش مهندسی هسته‌ای با فعالیت ۵ کوری معادل با  $1.1 \times 10^7 n/s$  در اندازه‌گیری‌ها و در شبیه‌سازی، استفاده شده است.

## ۲. روش کار

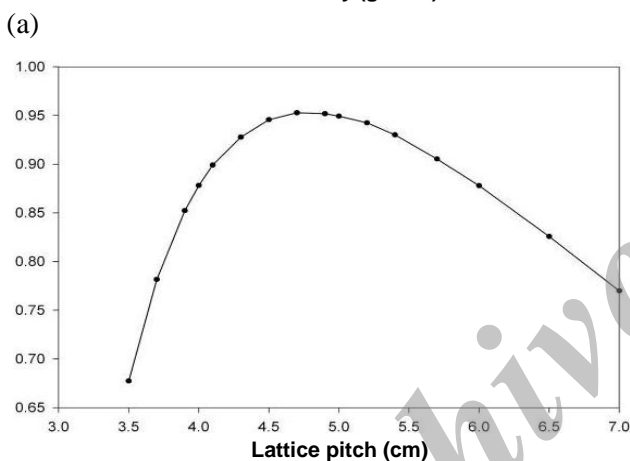
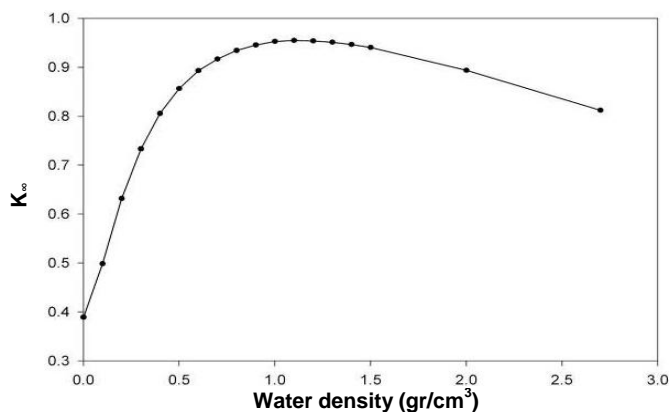
شبیه‌سازی رآکتور زیربحرانی آب سبک، توسط سه کد محاسباتی مختلف انجام شده است. کد محاسباتی MCNP4C، با استفاده از روش مونت کارلو [۱]، کد محاسبات سلولی WIMSD5B و هم‌چنین کد محاسبات قلب CITATION با استفاده از روش تفاضل جزئی معادله‌ی ترابرد نوترون را حل می‌کنند [۲]. نتایج حاصل از این سه کد با نتایج تجربی مقایسه شده است.

برای شبیه‌سازی رآکتور توسط کدهای MCNP4C، WIMSD5B و CITATION لازم است که مشخصات هندسی رآکتور و هم‌چنین مواد ساختاری مختلف آن برای کد تعریف گردد. در شبیه‌سازی با کد CITATION از سطح مقطع‌های تولید شده توسط کد WIMSD5B، و در شبیه‌سازی با کد MCNP4C از داده‌های کتابخانه‌ی ENDF/B-VI برای

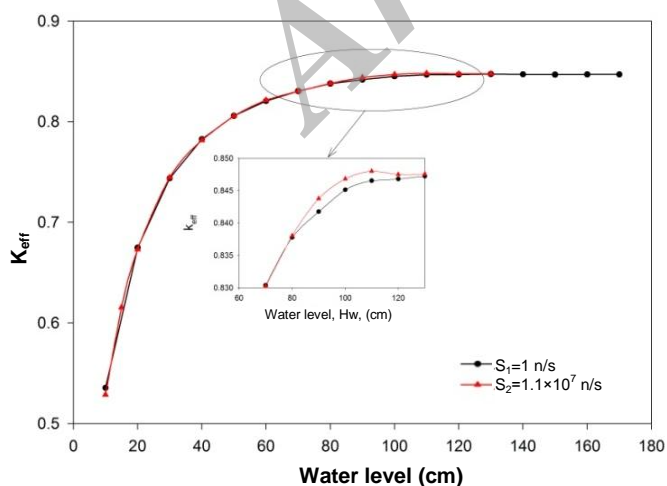
$$\rho_1 = \frac{k_1 - 1}{k_1}$$

$$\rho_2 = \frac{k_2 - 1}{k_2}$$

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \frac{k_2 - k_1}{k_2 k_1}$$



شکل ۲. تغییرات ضریب تکثیر بی‌نهایت برحسب (a) چگالی آب، (b) گام شبکه.



شکل ۳. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب ارتفاع آب؛  $S_1$ : بدون چشمه‌ی خارجی،  $S_2$ : با چشمه‌ی خارجی.

### ۳. محاسبه‌ی ضریب تکثیر بی‌نهایت با کد MCNP4C

پس از مدل‌سازی مجموعه‌ی رآکتور زیربحرانی آب سبک با کد MCNP4C، با تغییر چگالی کندساز و با استفاده از دستور KCODE، ضریب تکثیر بی‌نهایت در چگالی‌های مختلف محاسبه شده است. تعداد ذرات و تعداد دورها در دستور KCODE، به گونه‌ای تعریف شده است که نتایج از دقت کافی برخوردار باشند. به منظور کاهش خطاهای آماری، هر اجرا چندین مرتبه تکرار شده است. نتایج حاصل در شکل (۲- a) داده شده است. با افزایش چگالی کندساز از مقدار بسیار ناچیز (هوا) تا  $1\text{g/cm}^3$  (چگالی آب)، ضریب تکثیر بی‌نهایت افزایش یافته، به بیشینه مقدار خود رسیده و مجدداً کاهش می‌یابد. به بیان دیگر برای چگالی کندساز بیش از  $1\text{g/cm}^3$ ، ماده‌ی کندساز در سیستم آن قدر زیاد است که میله‌های سوخت به صورت مجزا عمل می‌کنند و در نتیجه  $K_{\infty}$  کاهش می‌یابد. در ادامه تغییرات  $K_{\infty}$  برحسب تغییر گام شبکه محاسبه و نتایج در شکل (۲- b) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود  $K_{\infty}$  در گام  $4.7\text{cm}$  بیشینه مقدار  $0.9528$  را دارد.

### ۴. محاسبه‌ی تغییرات ضریب تکثیر مؤثر

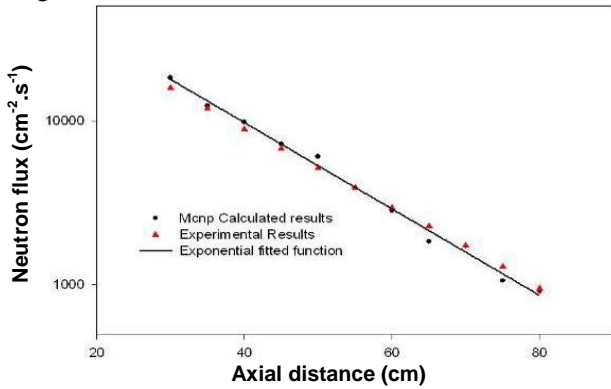
با استفاده از کد MCNP4C و دستور KCODE، برای دو حالت مختلف با و بدون چشمه‌ی خارجی در قلب رآکتور، تغییرات ضریب تکثیر مؤثر برحسب ارتفاع آب محاسبه شده است. این تغییرات در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش ارتفاع آب رآکتور، ضریب تکثیر مؤثر تا ارتفاع خاصی زیاد شده و پس از آن تغییر قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. بیشینه مقدار  $K_{\text{eff}}$ ، با حضور چشمه‌ی خارجی، در ارتفاع  $110$  سانتی‌متر و برابر با  $0.873$  و بدون چشمه‌ی خارجی، در ارتفاع  $140$  سانتی‌متر و برابر با  $0.847$  به دست آمد.

ضریب تکثیر مؤثر هم‌چنین با کد CITATION و بدون چشمه‌ی خارجی، برابر با  $0.857$  محاسبه شد. نتایج محاسبات حالت بحرانی رآکتور زیربحرانی آب سبک به وسیله‌ی کدهای محاسباتی، در جدول ۱ با مقادیر تجربی مقایسه شده است که اختلافی در حدود  $2.5\%$  را نشان می‌دهد. با محاسبه‌ی واکنش‌پذیری‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$  به ترتیب برای دو حالت با و بدون چشمه از رابطه‌ی زیر می‌توان مقدار واکنش‌پذیری چشمه را به دست آورد

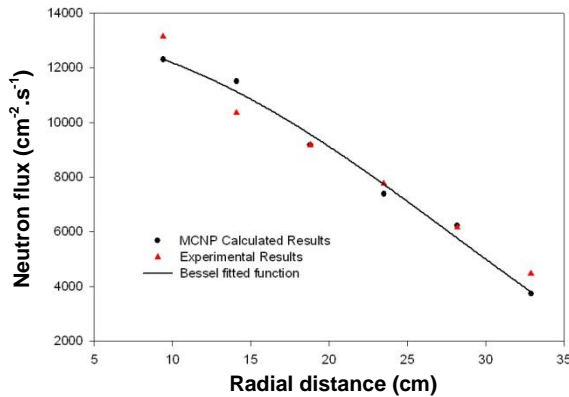


جدول ۱. ضریب تکثیر مؤثر  $k_{eff}$  رآکتور زیربحرانی آب سبک

کد / تجربی	MCNP4C (با چشمه‌ی خارجی)	MCNP4C (با چشمه‌ی خارجی) $S_{ext}=1.1 \times 10^7 n/s$	WIMSD5B & CITATION (بدون چشمه‌ی خارجی)	مقدار تجربی (با چشمه‌ی خارجی) $S_{ext}=1.1 \times 10^7 n/s$
$k_{eff}$	$0.847 \pm 0.0004$	$0.873 \pm 0.0004$	$0.857 \pm 0.0002$	$0.895 \pm 0.001$



(a)



(b)

شکل ۴. نتایج محاسباتی و تجربی (چشمه داخل قلب، (a) نمودار نیمه لگاریتمی توزیع محوری شار (b) توزیع شعاعی شار.

در حالت دوم، محاسبات برای چشمه‌ی ۵ کوری Am-Be در وضعیت بیرون از قلب رآکتور و در ارتفاع حدود ۸۰ سانتی متر از کف تانک رآکتور تکرار گردید. در این شرایط توزیع شعاعی شار از تابع بسل و توزیع محوری آن از تابع کسینوسی تبعیت می‌کند و در نتیجه تقریب روابط تئوری پخش به خوبی برقرار است. توزیع شعاعی و محوری شار در شکل ۵ نشان داده شده است که در آن قله‌ی آلبدو در آب اطراف قلب به خوبی دیده می‌شود.

برای محاسبه‌ی توزیع شعاعی و محوری شار با کد CITATION، ابتدا نواحی سوخت، قسمت آب بالای سوخت، قسمت پایینی رآکتور و بازتاباننده‌ی آب اطراف رآکتور برای کد WIMSD5B تعریف و در ورودی این کد داده شد. سپس رآکتور با کد CITATION شبیه‌سازی و برای سطح مقطع‌های نواحی مختلف، مطابق جدول ۲، از خروجی کد WIMSD5B استفاده شد. تغییرات شار نوترون تند و گرمایی در راستای محوری و شعاعی رآکتور، در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده برای انحنای شعاعی و محوری شار از برازش

که در آن  $k_1$  ضریب تکثیر مؤثر بدون چشمه، و  $k_2$  ضریب تکثیر مؤثر با چشمه است. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که واکنش‌پذیری چشمه‌ی خارجی برابر با  $0.035(\Delta k/k)$  است.

### ۵. محاسبه‌ی توزیع شار شعاعی و محوری با کد MCNP4C

با توجه به این که در رآکتورهای زیربحرانی، توزیع شار و انحنای شار به موقعیت چشمه در رآکتور بستگی دارد، برای دو موقعیت مختلف چشمه در درون قلب و چشمه در بیرون قلب، با حل معادله‌ی پخش نوترون به روش تفکیک متغیرها و اعمال شرایط مرزی، شار نوترون در هر نقطه با استفاده از روابط زیر محاسبه شد [۴ و ۵]:

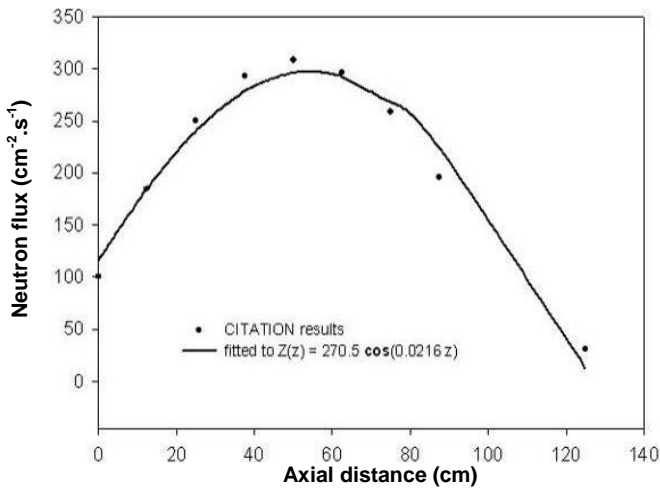
$$\Phi(\vec{r}) = A J_0(\alpha r) \begin{cases} \exp(-\gamma z) & \text{چشمه در درون قلب رآکتور;} \\ \cos(\gamma z) & \text{چشمه در بیرون قلب رآکتور;} \end{cases}$$

که در آن،  $\alpha$  و  $\gamma$ ، به ترتیب، انحنای شار شعاعی و محوری است. با داشتن  $\alpha$  و  $\gamma$ ، انحنای شار هندسی رآکتور،  $B^2$ ، به ترتیب برای دو حالت موقعیت چشمه، از  $B^2 = \alpha^2 \pm \gamma^2$  به دست می‌آید.

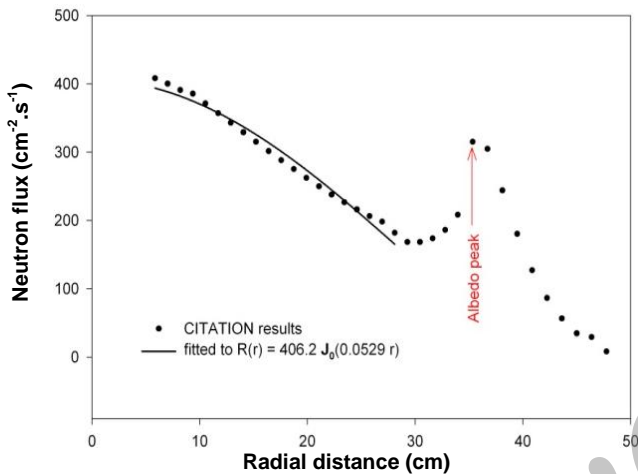
در ادامه‌ی محاسبات، با مدل‌سازی رآکتور توسط کد ترابرد سه‌بعدی MCNP4C توزیع شعاعی و محوری شار در هر دو حالت چشمه در داخل و خارج قلب (شکل ۱)، محاسبه شد. ابتدا چشمه‌ی نوترون در ارتفاع صفر (ابتدای سوخت‌ها) واقع در مرکز تانک در فایل ورودی تعریف شد. برای توزیع شعاعی شار، خروجی در ارتفاع یکسان و در شعاع‌های مختلف و برای توزیع محوری شار، خروجی در شعاع یکسان و در ارتفاع‌های مختلف به دست آمد. با برازش توزیع شعاعی شار با تابع بسل مرتبه‌ی صفر، پارامتر  $\alpha$  و انحنای شعاعی شار،  $\alpha$ ، و با برازش توزیع محوری شار با تابع‌نمایی، پارامتر  $\gamma$  و در نتیجه انحنای محوری شار،  $\gamma$ ، به دست آمد. نتایج حاصل به همراه مقادیر تجربی در شکل ۴ آورده شده‌اند.



داده‌ها با تابع بسل برای توزیع شعاعی، نمایی و کسینوسی برای توزیع محوری و هم‌چنین مقادیر تجربی آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.



(a)

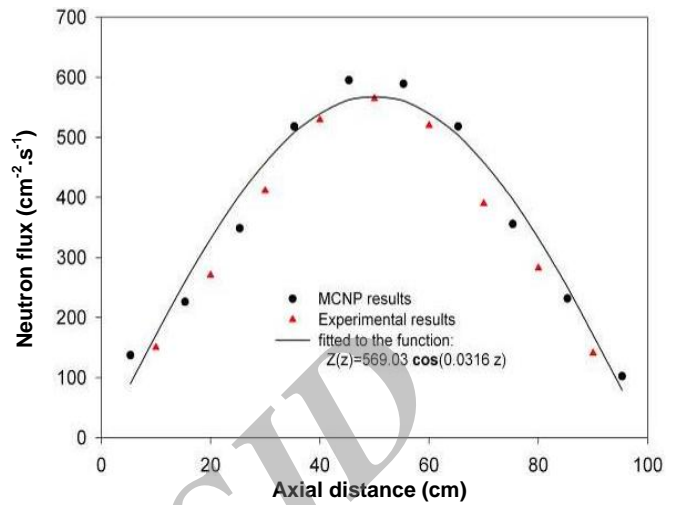


(b)

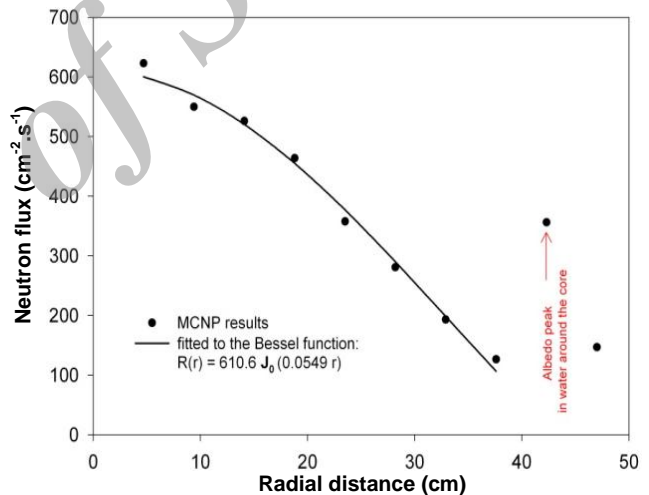
شکل ۶. نتایج حاصل از کدهای WIMSD5B و CITATION؛ (a) توزیع محوری شار، (b) توزیع شعاعی شار.

جدول ۳. نتایج محاسبات توزیع شار نوترون در رآکتور زیربحرانی آب سبک

کد / تجربی	انحنای محوری شار (cm <sup>-1</sup> )	انحنای شعاعی شار (cm <sup>-1</sup> )
MCNP4C، چشمه‌ی داخل قلب رآکتور	$3.465 \times 10^{-3}$ ±۵٪	$3.169 \times 10^{-3}$ ±۷.۵٪
MCNP4C، چشمه‌ی خارج قلب رآکتور	$9.734 \times 10^{-4}$ ±۴.۸٪	$3.014 \times 10^{-3}$ ±۲.۴٪
WIMSD5B و CITATION	$9.986 \times 10^{-4}$ ±۳.۲٪	$2.798 \times 10^{-3}$ ±۴.۷٪
اندازه‌گیری، چشمه‌ی داخل قلب رآکتور	$3.914 \times 10^{-3}$ ±۹٪	$2.796 \times 10^{-3}$ ±۱٪



(a)



(b)

شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج محاسباتی و تجربی (چشمه خارج از قلب)، توزیع محوری شار (b) توزیع شعاعی شار.

جدول ۲. سطح مقطع‌های تولید شده توسط کد WIMSD5B

ناحیه	گروه انرژی	$\Sigma_a$	$\nu\Sigma_f$	$\Sigma_s$
سوخت	تند	$1.1935E-2$	$7.8119E-3$	$2.3758E-2$
	گرمایی	$7.6499E-2$	$8.6854E-2$	۰٫۰
مجرای مرکزی	تند	$1.0482E-5$	۰٫۰	$1.1643E-7$
	گرمایی	$4.5079E-4$	۰٫۰	۰٫۰
بازتابنده‌ی بالایی (آب)	تند	$6.5170E-4$	۰٫۰	$4.3913E-2$
	گرمایی	$1.8655E-2$	۰٫۰	۰٫۰
بازتابنده‌ی اطراف (آب)	تند	$8.2061E-4$	۰٫۰	$5.5976E-2$
	گرمایی	$1.9021E-2$	۰٫۰	۰٫۰
بازتابنده‌ی پایین (آب)	تند	$1.0313E-3$	۰٫۰	$7.2504E-2$
	گرمایی	$1.9068E-2$	۰٫۰	۰٫۰

**References:**

1. J.F. Briesmeister, editor, "MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, version 4c, LA-13709-M," Los Alamos National Laboratory, USA (2000).
2. M.J. Roth, "The preparation of input data for WIMS, 1967; M.J. Halsall, A summary of WIMSD4 input options, JEF-PC version 2, O.E.C.D., NEA Data Bank, France, (1997).
3. Experimental determination of material and geometrical buckling of ENTC sub-critical reactor, Experimental reactor physics group, Nuclear Engineering Department, Esfahan Nuclear Technology Center, Autumn (1369).
4. F.A. Valente, "A manual of Experiments in Reactor Physics," McMillan-New York (1963).
5. J.R. Lamarsh, "Introduction to nuclear reactor Theory," Addison-Wesley (1972).

**۶. بحث و نتیجه گیری**

پس از مدل سازی رآکتور با کدهای محاسباتی، محاسبه ی ضریب تکثیر بی نهایت  $K_{\infty}$ ، با تغییر چگالی کندساز نشان داد که بیشترین مقدار برای  $K_{\infty}$  در چگالی  $1 \text{ g/cm}^3$  و در حدود  $0.95$  است. در ادامه تغییرات  $K_{\infty}$  بر حسب تغییر گام شبکه محاسبه شد و همان گونه که انتظار می رفت  $K_{\infty}$  در گام  $4.7 \text{ cm}$  (گام فعلی رآکتور) بیشینه مقدار  $0.9528$  را داشت. سپس با انجام محاسبات حالت بحرانی، تغییرات ضریب تکثیر مؤثر  $K_{\text{eff}}$  بر حسب ارتفاع آب به دست آمد که نشان داد که  $K_{\text{eff}}$  در حضور چشمه ی خارجی، دارای بیشینه مقدار  $0.873$  است. این پارامتر با مقدار تجربی نیز مقایسه شد و اختلاف قابل قبولی برابر  $2.5\%$  را نشان داد. هم چنین مقدار واکنش پذیری چشمه برابر  $0.035 (\Delta k/k)$  تعیین گردید. در ادامه، مدل سازی با کد MCNP4C برای دو موقعیت مختلف چشمه ی خارجی انجام شد. در هر حالت رفتار توزیع شار از معادلات پخش تبعیت می نمود. همان گونه که نتایج نشان داد، با جابه جا کردن مکان چشمه ی خارجی از کانال مرکزی به کناره ی قلب، رفتار کلی شار شعاعی تغییر نکرده و از تابع بسط پیروی می کند. اما رفتار توزیع شار محوری از تابع نمایی به تابع کسینوسی تغییر می کند. لازم به ذکر است که به علت تأثیر نقاط نزدیک به چشمه و مرز در رفتار شار نوترون، در برازش داده ها این نقاط در نظر گرفته نشد. مقایسه ی مقادیر تجربی و محاسباتی نشان داد که اختلاف مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده برای ضریب تکثیر، انحنای شار محوری و شعاعی به ترتیب برابر  $2.5$ ،  $3$  و  $12\%$  است. با توجه به میزان خطای محاسبات و اندازه گیری که در جدول ۲ آورده شده است، این مقدار اختلاف در محدوده ی خطا و قابل قبول می باشد.