

## محاسبه‌ی و آنالیز پارامترهای نوترونی و سینتیکی راکتور مینیاتوری اصفهان (MNSR) با استفاده از روش‌های برازش شیب، اختلال، مونت کارلو و مقایسه نتایج با مقادیر مرجع

محمد قائدرحمتی<sup>۱</sup>، مصطفی حسن‌زاده<sup>۲\*</sup>، سید امیرحسین فقهی<sup>۳</sup>

۱. دانشگاه علوم و تحقیقات بوشهر، دانشکده فنی مهندسی، گروه راکتور، صندوق پستی: ۹۱۲۷۱۵۸۶۱۴، بوشهر- ایران

۲. پژوهشکده راکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹۱۴۱۵۵، تهران- ایران

۳. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران- ایران

**چکیده:** در این تحقیق سعی شده است پارامترهای نوترونی و سینتیکی راکتور MNSR مانند ضریب تکثیر موثر، راکتیویته، توزیع شار نوترون، کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری و زمان متوسط تولید نوترون با استفاده از روشهای برازش شیب، اختلال و کد MCNPX محاسبه و آنالیز گردد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف نسبی پارامترهای راکتیویته و کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری از طریق کد با مقادیر مرجع به ترتیب حدوداً  $0.7\%$  و  $1.9\%$  می‌باشند. همچنین اختلاف نسبی پارامتر زمان متوسط تولید نوترون با استفاده از روشهای برازش شیب، اختلال و کد نسبت به مقدار مرجع به ترتیب حدوداً  $17.5\%$ ،  $9.6\%$  و  $22.6\%$  می‌باشند. بنابراین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این کد برای محاسبه این پارامترهای نوترونی مناسب می‌باشد در حالیکه روش اختلال یک روش ساده و مناسب برای محاسبه پارامتر زمان متوسط تولید نوترون است.

**کلید واژه:** راکتور MNSR، پارامترهای نوترونی، پارامترهای سینتیکی، کد MCNPX

### ۱- مقدمه

هدف از این تحقیق، محاسبه‌ی پارامترهای نوترونی و سینتیکی راکتور MNSR با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و روشهای برازش شیب و اختلال می‌باشد [۱]. محاسبه‌ی دقیق این پارامترها بر عملکرد ایمنی راکتورها بسیار مهم و اهمیت بسزایی در تحلیل دینامیکی سیستم، طی گذرهای سریع دارد. به طور کلی روش منحصراً بفرودی برای محاسبه‌ی پارامترهای سینتیکی وجود ندارد [۲]. اصولاً از روشهای عددی و یا مونت‌کارلو برای محاسبه‌ی پارامترهای سینتیکی استفاده می‌شود. استفاده از این روشها دارای مزایا و معایبی است که بستگی به دقت این روشها دارد. به عنوان مثال، اشکال کد MCNPX این است که تمام محاسبات بدست آمده از آن وزن نشده است [۳] و این نقص موجب می‌شود که پارامترهای نوترونی محاسبه شده توسط این کد دقیق نباشد. اما توانایی محاسبه‌ی ویژه مقدار سیستم‌های حاوی مواد شکاف‌پذیر، داشتن اطلاعات مربوط به انرژی‌های پیوسته، هندسه سه‌بعدی و غیره از نقاط قوت کد MCNPX است [۳].

### ۲- روش کار

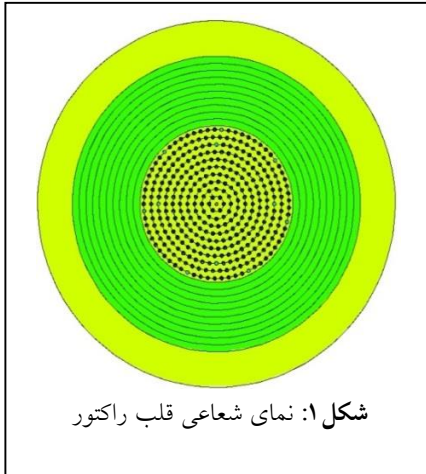
در ابتدا با استفاده از کد MCNPX قلب راکتور شبیه‌سازی شد و سپس پارامترهای نوترونی و سینتیکی این راکتور از طریق روشهای مذکور بدست آورده شد. در روش اختلال برای محاسبه پارامتر زمان متوسط تولید نوترون در فایل ورودی برنامه، مقدار بور طبیعی با عددجرمی ۱۰ با غلظت  $10^{-8} \text{ atom/barn.cm}$  در تمام قلب راکتور به صورت همگن وارد گردید [۴]. همچنین در روش برازش شیب منحنی، می‌بایست یک شمارشگر نوترون برای سیستم تعریف نماییم، که در این تحقیق با استفاده از تالی F4 و بازه زمانی از صفر تا ۵۰۰۰۰۰ (shake) با تقسیم‌بندی بازه ۱۰۰۰ تایی برای دو گام با قرار دادن میله‌ی کنترل جهت زیر بحرانی کردن راکتور در دو وضعیت کاری تعریف شده است. البته با توجه به طول ۲۳ سانتیمتری میله‌های سوخت، میله‌ی کنترل را در دو گام به طور پیوسته (هر گام  $2/3$  سانتیمتر می‌باشد)، وارد قلب نموده و برای هر گام یک برنامه ورودی را آماده و اجرا کرده و سپس ضرایب تکثیر مؤثر بدست آورده شده است. در نهایت با وارد کردن میله کنترل در این دو وضعیت، مقدار راکتیویته منفی قلب راکتور محاسبه شده است. سپس با رسم نمودارهای مربوطه، شیب منحنی فوق را با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بدست آورده و از این طریق زمان متوسط تولید نوترون

۱۶ و ۱۷ شهریور ماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

محاسبه شده است. از طرفی با استفاده از داده‌های مرجع (S.A.R) و مقایسه آن با نتایج بدست آمده، میزان اختلاف نسبی این پارامترها محاسبه شده است. مشخصات اصلی راکتور MNSR در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین نمای شبیه‌سازی شده توسط کد در شکل (۱) نشان داده شده است [۱ و ۳].

جدول ۱: مشخصات اصلی راکتور MNSR

مشخصه‌های اصلی	پارامترهای راکتور
نام راکتور	Miniature Neutron Source Reactor
توان حرارتی	۳۰ کیلو وات
سوخت	الیاز $U - Al$ با غلاف آلومینیوم ( $UAl_4$ )
غناى سوخت	۹۰/۲ درصد
میزان سوخت اورانیوم ۲۳۵ در قلب	۹۵۰/۶۹۹۲ گرم
تعداد میله‌های سوخت	۳۴۳ عدد
قطر میله سوخت	۴/۳ میلی‌متر
طول میله سوخت	۲۳۰ میلی‌متر
میله‌ی کنترل	یک عدد در مرکز قلب از جنس کادمیوم
خنک کننده و کند کننده	آب سبک



شکل ۱: نمای شعاعی قلب راکتور

۱-۲ نحو

( $k_{eff}$  ۲-۲-۱ محاسبه‌ی ضریب تکثیر مؤثر )

محاسبه‌ی ضریب تکثیر مؤثر یکی از پارامترهای اصلی نوترونی در راکتورها است که با استفاده از کارت Kcode طبق رابطه زیر بدست می‌آید. راکتیویته اضافی قلب با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید [۶ و ۵].

$$k_{eff} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{n+1}}{N_n} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (2)$$

۲-۲-۲ محاسبه‌ی کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری ( $\beta_{eff}$ )

از دیگر پارامترهای نوترونی در راکتورها، کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری می‌باشد که به طور مستقیم نمیتوان این پارامتر را با کد MCNPX محاسبه کرد ولی می‌توان از نتیجه‌ی اجرای دوباره کارت Kcode متوالی مقدار  $\beta_{eff}$  را به صورت تقریبی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه نمود [۷ تا ۵].

$$\beta_{eff} = 1 - \left( \frac{k_3}{k_1} \right) \quad (3)$$

بنابراین برای محاسبه این پارامتر می‌توان ابتدا یکبار با استفاده از کارتهای Kcode و Phys (با گذاشتن عدد ۱- به منزله در نظر گرفتن طیف نوترون‌های تأخیری و آنی) و کارت Totnu مقدار  $k_1$  را بدست آورد و سپس با استفاده از کارتهای Kcode و Phys (با گذاشتن عدد صفر به منزله در نظر نگرفتن طیف نوترون‌های تأخیری) و با خاموش کردن کارت Totnu می‌توان مقدار  $k_3$  را بدست آورد [۷ تا ۵].

۲-۲-۳ محاسبه‌ی زمان متوسط تولید نوترون ( $\Lambda$ )

زمان متوسط تولید نوترون به عنوان یک پارامتر سینتیکی مهم در کد MCNPX وزن نشده است. برای محاسبه این پارامتر بایستی از رابطه (۴) استفاده کرد [۸ تا ۶]. در این رابطه،  $\tau$  عمر نوترون و  $k$  ضریب تکثیر می‌باشد.

$$\Lambda = \frac{\tau}{k} \quad (4)$$

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

## ۴-۲-۲ روش اختلال ( $1/v$ Poison Method)

در روش اختلال، میتوان با افزودن مقدار اندکی ماده جاذب به مواد تشکیل دهنده قلب مقدار ضریب تکثیر جدید را محاسبه نمود. بدین منظور ماده جاذب بور ( $^{10}B$ ) بینهایت رقیق (در محدوده از  $10^{-9}$  تا  $10^{-8}$  atom/barn.cm) در هر منطقه راکتور جهت تولید سطح مقطع چندگروهی اضافه شده است سپس مقدار ضریب تکثیر مؤثر در این شرایط بدست آمده و در نهایت با استفاده از رابطه (۵) طول عمر نوترون آنی را بدست آورد [۷ و ۴].

$$l_p = \lim_{N_B \rightarrow 0} \frac{k_{eff} - k_{eff}^B}{k_{eff}^B} \times \frac{1}{N_B \sigma_{aB} \bar{v}} \quad (5)$$

$l_p$  طول عمر نوترون آنی برحسب ثانیه،  $k_{eff}$  ضریب تکثیر بدون ناخالصی،  $k_{eff}^B$  ضریب تکثیر با افزودن ناخالصی،  $N_B$  چگالی

بور (atom/barn.cm)  $10^{-8}$ ،  $\sigma_{aB}$  سطح مقطع میکروسکوپی متوسطگیری شده بور در محدوده انرژی نوترون‌های حرارتی (۳۸۳۷ بارن) و  $\bar{v}$  سرعت متوسط نوترون‌های حرارتی (۲۲۰۰ متر بر ثانیه).

## ۵-۲-۲ روش برازش شیب با چشمه نوترونی (Slope Fit Method)

زمانیکه یک پالس نوترونی به درون قلب زیر بحرانی تزریق می‌شود نوترون‌ها در سوخت در یک واکنش زنجیری شکافت به صورت واپاشی نمایی چند برابر می‌شوند. با حل معادلات دینامیک نقطه‌ای شار نوترونی بعد از یک پالس نوترونی به صورت زیر بدست می‌آید [۷ و ۶].

$$n(t) = n_0(\beta_{eff} \lambda' + \rho a e^{\alpha t}) \quad (6)$$

$\lambda$  ثابت واپاشی هسته‌های نیا تأخیری و  $\alpha$  ثابت واپاشی آنی.

در صورتیکه پریود واپاشی خیلی کوتاه در نظر گرفته شود می‌توان از واپاشی نوترون‌های تأخیری صرف نظر نمود. در این صورت فقط نوترون‌های آنی در نظر گرفته می‌شوند. با اندازه‌گیری شار نوترون پس از تزریق یک پالس کوتاه می‌توانیم مقدار راکتیویته و زمان متوسط تولید نوترون را با برازش منحنی تابع نمایی و با بدست آوردن مقدار ثابت واپاشی  $\alpha$  محاسبه نماییم. در نتیجه روش برازش منحنی وقتی مفید است که نوترون‌های تأخیری مؤثر  $\beta_{eff}$  و یا میانگین زمان تولید نوترون  $\Lambda$  معلوم باشند. بنابراین با بدست آوردن شیب منحنی یعنی  $\alpha$  می‌توان با استفاده از رابطه (۷) مقدار زمان متوسط تولید نوترون را بدست آورد.

$$\alpha = \frac{\rho - \beta_{eff}}{\Lambda} \quad (7)$$

## ۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱ محاسبه پارامترهای نوترونی و سینتیکی با استفاده از کد MCNPX مقادیر ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته‌ی اضافی قلب راکتور با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است. مقادیر بدست آمده از محاسبات با مقادیر مرجع مقایسه شده است که میزان اختلاف نسبی آنها کمتر یک درصد می‌باشد. همچنین جدول فوق محاسبات مربوط به پارامترهای زمان متوسط تولید نوترون و کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری با استفاده از روابط (۳) و (۴) را نشان می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده، مقادیر اختلاف نسبی پارامترهای کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری و زمان متوسط تولید نوترون به ترتیب ۱/۹٪ و ۲۲/۶٪ نسبت به مقادیر مرجع می‌باشد. دلیل اختلاف پارامتر زمان متوسط تولید نوترون محاسبه شده توسط کد با مقدار مرجع این است که این پارامتر در کد وزن نشده است.

**جدول (۳):** محاسبه‌ی ضریب تکثیر مؤثر ( $K_{eff}$ )، راکتیویته ( $\rho$ )، زمان متوسط تولید نوترون ( $L$ ) و کسر نوترون‌های تأخیری مؤثر

( $\beta_{eff}$ ) و مقایسه نتایج با مقادیر مرجع در راکتور MNSR

پارامتر	MCNPX	SAR	درصد اختلاف نسبی
$K_{eff}$	$1/0.0390 \pm 0/0.0018$	$1/0.0386 \pm 0/0.0018$	-
$\rho$ (mk)	۳/۸۸	۳/۸۶	۰/۶۴

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

$l$ ( $\mu\text{s}$ )	۱۰۴/۹	۸۱/۲	۲۲/۶
$\beta_{\text{eff}}$ (mk)	۷/۹۱	۸/۰۸	۱/۹۹

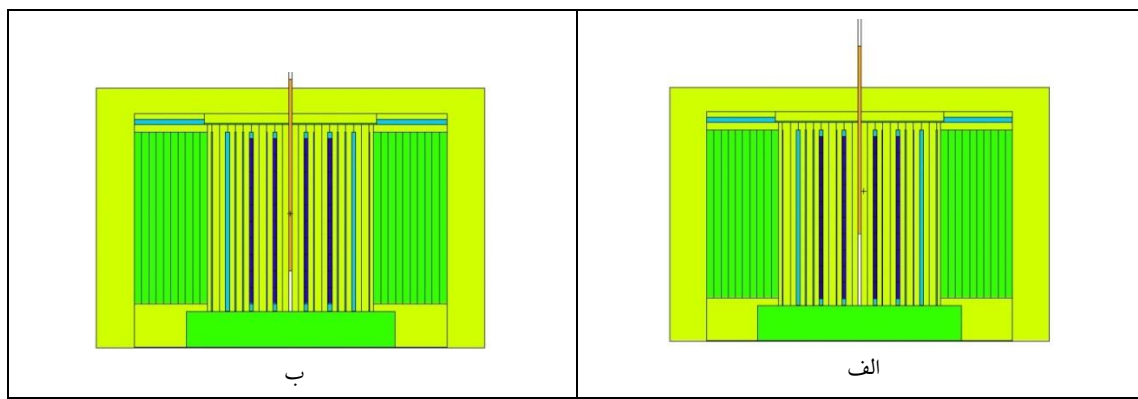
۲-۳ محاسبه پارامترهای سینتیکی به روش اختلال در این روش ابتدا یکبار برنامه را در حالت بدون اختلال اجرا نموده و مقدار ضریب تکثیر مؤثر محاسبه شده است. سپس مقداری بور طبیعی به غلظت  $10^{-8} \text{ atom/barn.cm}$  بطور یکنواخت در تمام قلب بصورت همگن پخش نموده سپس بار دیگر برنامه را اجرا کرده و مجدداً ضریب تکثیر مؤثر بدست آورده شد. در نهایت با استفاده از رابطه (۵) مقدار  $l_p$  مطابق جدول ۴ محاسبه شده است.

**جدول (۴):** محاسبه ضریب تکثیر مؤثر و زمان متوسط تولید نوترون به روش اختلال و مقایسه نتایج با مقادیر مرجع

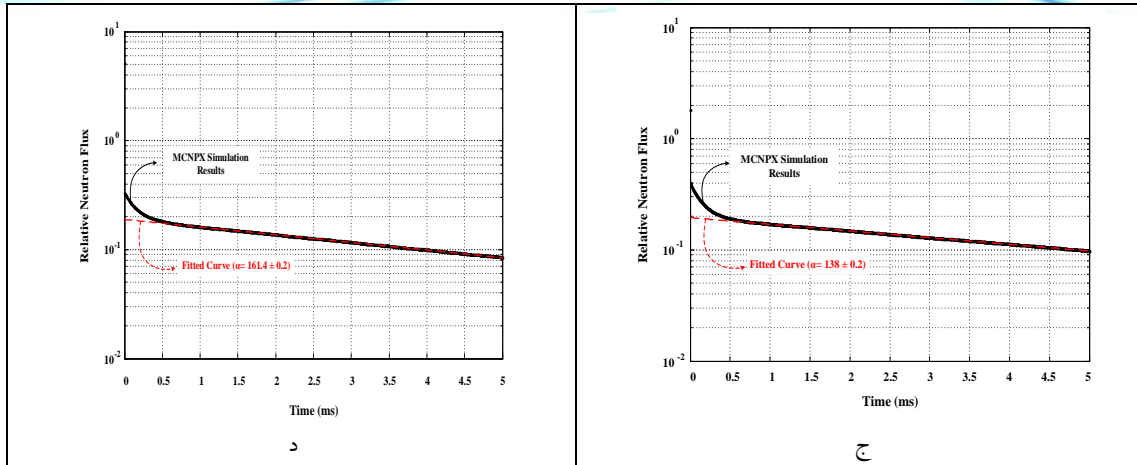
پارامتر	داده ها
ضریب تکثیر مؤثر بدون تزریق بور ( $k$ )	$1/0.0191 \pm 0/0.0018$
ضریب تکثیر مؤثر با تزریق بور ( $k_B$ )	$1/0.0129 \pm 0/0.0018$
زمان متوسط تولید نوترون ( $l_p$ ) برحسب ( $\mu\text{s}$ )	۷۳/۳
زمان متوسط تولید نوترون مطابق با S.A.R برحسب ( $\mu\text{s}$ )	۸۱/۲
درصد اختلاف نسبی	۹/۶

۳-۳ محاسبه‌ی برازش شیب منحنی یا روش برازش شیب

در این روش، فایل ورودی برنامه را جهت محاسبه پارامتر زمان متوسط تولید نوترون آماده نموده سپس با رسم نمودار از طریق برازش شیب مقدار شیب منحنی یعنی  $\alpha$  را محاسبه می‌کنیم. در این تحقیق زمان شمارش نوترون از صفر تا (shake)  $500000$  با تقسیم‌بندی بازه های ۱۰۰۰ تایی در آب واقع در نواحی دهگانه قلب راکتور در نظر گرفته شده است. همچنین نمای شبیه‌سازی شده در دو وضعیت در دو گام مختلف میله‌ی کنترل مرکزی در شکل (۴) آورده شده است. همچنین در این شکل تعیین برازش شیب منحنی و محاسبه ضریب برازش شیب در گامهای اول و دوم میله‌ی کنترل مرکزی پرداخته شده است. در جدول (۵) محاسبات مربوط به روش برازش شیب در محاسبه پارامترهای نوترونی و سینتیکی آورده شده است.



۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل (۴): نمایی از موقعیت میله کنترل در گامهای اول (الف) و دوم (ب) و همچنین برازشهای شیب منحنی شمارش نوترون در گامهای اول (ج) و دوم (د)

جدول (۵): محاسبه‌ی پارامترهای نوترونی از طریق روش برازش شیب و مقایسه آن با مقادیر مرجع در راکتور MNSR

درصد اختلاف نسبی	S.A.R $l$ ( $\mu$ s)	روش برازش شیب $l$ ( $\mu$ s)	مقدار شیب منحنی	راکتیویته منفی	ضریب تکثیر مؤثر $\pm 0.00018$	وضعیت میله کنترل
۱۷/۵	۸۱/۲	۶۶/۹	-۱۳۸	-۱۱۶/۱	۰/۹۹۸۸۴	گام اول
۲۰/۹		۶۴/۱	-۱۶۱	-۲۲۷/۵	۰/۹۹۷۷۳	گام دوم

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، محاسبه پارامترهای نوترونی و سینتیکی راکتور MNSR اصفهان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو از طریق روشهای برازش شیب، اختلال و کد MCNPX می‌باشد. این پارامترها به عنوان پارامترهای اصلی در تمام راکتورهای هسته‌ای نقش بسیار مهمی در تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی راکتورها دارند. همان‌طوری که نتایج نشان می‌دهد مقادیر اختلاف نسبی پارامتر راکتیویته در مقایسه با داده مرجع در حدود (S.A.R) % ۰/۶ می‌باشد. از سوی دیگر میزان اختلاف نسبی پارامترهای سینتیکی مانند کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری و زمان متوسط تولید نوترون با استفاده از کد MCNPX به ترتیب % ۱/۹ و % ۲۲/۶ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت، کد MCNPX کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری را به خوبی می‌تواند محاسبه کند زیرا این پارامتر مستقیماً به سوخت بستگی دارد، ولی در محاسبه‌ی زمان متوسط تولید نوترون ناتوان است و می‌بایست از روش‌های دیگری استفاده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان اختلاف نسبی پارامتر زمان متوسط تولید نوترون در روش اختلال در مقایسه با داده مرجع در حدود % ۹/۶ می‌باشد. علاوه بر این، نتایج این پارامتر در روش برازش شیب منحنی (روش برازش شیب) برای دو گام اول و دوم وضعیت میله‌ی کنترل در مقایسه با داده مرجع به ترتیب در حدود % ۱۷/۵ و % ۲۰/۹ می‌باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که کد MCNPX به خوبی کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری را بدست می‌آورد در حالی که روش اختلال روشی مناسب و ساده جهت محاسبه زمان متوسط تولید نوترون می‌باشد.

#### References:

1. China Institute of Atomic Energy, "Safety Analysis Report of the MNSR Reactor China", 1993.
2. Snoj, L., Kaveie, A and Ravanik M. "Monte Carlo Calculation of Kinetic Parameters".
3. Denis, P. B., "MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory",



۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ اسفندماه دانشگاه یزد

- LA-CP-07-1473, 2008.
4. Bretscher, MM., Evaluation of reactor kinetic parameters without the need for Taieb, J., thesis, Etude de la production de noyaux residuals d'evaporation issus de la reaction de spallation de l'uranium-238 par des protons a 1Gev, 2000.
  5. Eriksson, M, "Accelerator-Driven Systems: Safety and Kinetics", KTH Engineering Sciences, Sweden, 2005.
  6. Nifenecker, H., O. and David , S., "Accelerator Driven Subcritical Reactors", Institute of Physics and Applied Nuclear Physics, France, 2003.
  7. Hassanzadeh, M., Fegghi, S. A. H., Khalafi, H., " Calculation of kinetic parameters in an Accelerator Driven Subcritical TRIGA reactor using MCNIC method", Ann. Nucl. Energy, Vol. 59,pp. 188-193, 2003.