بازسازی فلوی نوترونها با استفاده از اندازه گیری های آشکارسازهای رودیم بدون تاخیر و اینرسی در درون قلب راکتورهای VVER1000

فاطمه فروغی*

اصفهان-۱۵کیلومتری جنوب شرقی اصفهان، پژوهشکدهٔ چرخهٔ سوخت هسته ای-صندوق پستی ۸۱٤۶۵/۱۵۸۹

پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای (تهران-انتهای خیابان کارگر شمالی ، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی۸۳۶-۱٤۳۹۵)

Email:f_foroughi@entc.org.ir

چکیده. هدف از این مقاله تعیین دقیقترین روش جهت تعیین ماکزیمم مقدار فلوی نوترونها در هر لحظه از زمان برای اندازه گیری لحظه ای راکتیویته در درون قلب راکتورهای قدرت است. همانگونه که در مقالهٔ " اثرات مکانی در اندازه گیری راکتیویته وکاربرد مدل نقطه ای درراکتورهای بزرگ" [1] ثابت شده است، در راکتورهای بزرگ چنانچه در هر لحظه از زمان فلوی نوترونی درون قلب را برابر با ماکزیمم فلوی موجود در قلب راکتور(Φ_{max}) در آن لحظه در نظر بگیریم ، میتوان راکتور را بصورت یک نقطه در نظر گرفت و مقدار راکتیویته کل راکتور را بصورت لحظه ای محاسبه نمود. مقدار ماکزیمم فلو در هر نقطه از قلب راکتور می تواند حاصل گردد که در آن محل الزاما" آشکارساز موجود نیست. بنا بر این مقدار ماکزیمم فلو یا مستقیما" توسط آشکارساز موجود در سلول مورد نظر اندازه گیری می شود و یا اینکه توسط روشهای بازسازی فلوی نوترونها بوسیلهٔ مقایر اندازه گیری شده توسط آشکارسازهای موجود در همسایگی آن سلول تعیین (بازسازی) می گردد. برای بازسازی فلوی نوترونها (flux reconstruction) در نقاطی که دارای آشکارساز نیستند روشهای مختلفی میتوان به کاربرد که در این مقاله به بررسی هر کدام از آنها می پردازیم. این روشها عبارتند از روش درون یابی (interpolation) و برون یابی (extrapolation) که در آن از مقادیری که دو آشکارساز در همسایگی سلول مربوطه نشان می دهند استفاده می شود و معادلهٔ یک خط تعیین می گردد و بوسیلهٔ آن معادله و تعیین مختصات کارتزین سلول، مقدار فلو در سلول مربوطه محاسبه می شود. روش دیگر روش مثلثی است که از سه آشکارساز در همسایگی سلول مربوطه استفاده می شود و معادلهٔ یک سطح (مثلث) به دست می آید که با قرار دادن مختصات کارتزین سلول مورد نظر در آن معادله مقدار فلو برای آن سلول محاسبه می گردد. روش سوم روش منحنی (parabolic) است که از پنج آشکارساز در همسایگی سلول برای تعیین معادلهٔ منحنی استفاده می شود و با استفاده از این معادله و مختصات کارتزین سلول، مقدار فلو در سلول مورد نظر تعیین می گردد. هر چه معادلهٔ تعیین شده دارای درجهٔ بالاتری باشد دقت بیشتر خواهد شد. اما با زیاد شدن درجهٔ معادلات، این معادلات پیچیده تر می گردند و حل آنها به زمان بیشتری نیاز خواهد داشت. در نهایت در طی این تحقیق کدی تهیه گردیده است که با ترکیب کلیهٔ این روشها مقدار فلوی ماکزیمم با حد اکثر خطای 2.9% در هر لحظه از زمان تعیین می گردد و می توان از آن برای تعیین راکتیویته بصورت لحظه ای استفاده کرد.

کلید واژه ها: فلوی ماکزیمم، آشکارساز، راکتیویته، راکتورهای قدرت، قلب راکتور

مقدمه. همانگونه که در مقالهٔ " اثرات مکانی در اندازه گیری راکتیویته وکاربرد مدل نقطه ای درراکتورهای بزرگ" [1] عنوان شده است برای محاسبه راکتیویته از نتایج اندازه گیری فلوی نوترونی دو همسایگی با توجه به الگوریتم زیر استفاده می شود :

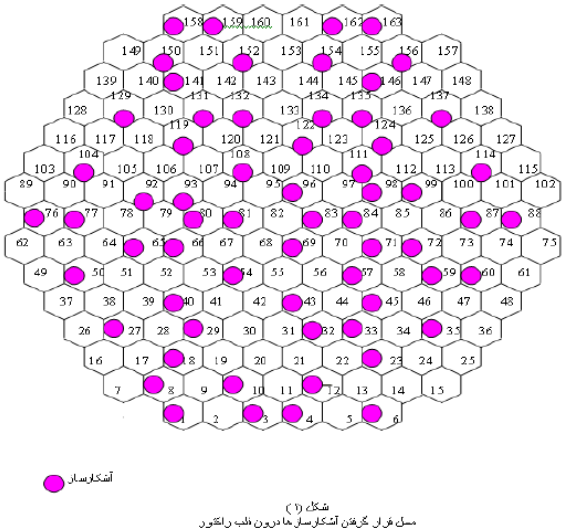
$$\rho_i = 1 + \frac{\Lambda}{\beta}\alpha_i - \sum_{K=1}^{M} \frac{\lambda_k . u_{k,i}}{T_i} \qquad (۱)$$

که در این رابطه داریم : M- تعداد گروه نوترونهای تاخیری و i – شماره اندازه گیری و $\alpha_i = \frac{1}{\Delta t} L_n \left(\frac{T_i}{T_{i-1}} \right)$,

$u_{k,i} = u_{k,i-1}.e^{-\lambda_k.\Delta t} + \frac{a_k.\left(T_i - T_{i-1}.e^{-\lambda_k.\Delta t}\right)}{(\lambda_k + a_k)}$,i نتیجه اندازه گیری فلوی نوترونی دراندازه گیری شماره – Ti, و بقیه $a_k = \frac{\beta_k}{\beta}$

علائم به کار رفته علائم معمول می باشند. در این معادله چنانچه بجای مقدار فلو، فلوی ماکزیمم را در هر لحظه از زمان قرار دهیم می توانیم مقدار راکتیویتهٔ کل راکتور را در هر لحظه از زمان با دقت بسیار خوبی تعیین نماییم. بنا بر این قبل از محاسبهٔ راکتیویته در لحظهٔ t باید مقدار ماکزیمم فلو در لحظهٔ t را داشت. برای تعیین مقدار ماکزیمم فلو در هر لحظه از زمان روشهای مختلفی از جمله روش خطی، روش سطحی (مثلثی) و منحنی را می توان به کار برد که در ادامه به شرح هریک از این روشها و میزان دقت و مزایا و معایب آنها می پردازیم. در این تحقیق کد DYNCO [2] به عنوان مبداء و مرجع محاسبهٔ خطا به کار رفته است. در این کد راکتور VVER1000 به طور کامل شبیه سازی شده است و در آن کلیهٔ مقادیر از جمله مقدار فلو با دقت بسیار بالایی در هر نقطه از قلب راکتور محاسبه می گردد. برای تعیین مقدار ماکزیمم فلو در هر لحظه از زمان باید کدی تهیه گردد که این مقدار را با خطایی کمتر از ۵٪ بازسازی کند. در این پروژه این کار انجام شده و در ادامه به شرح آن می پردازیم.

روش کار. شکل (۱) قلب راکتور VVER1000 همراه با محل قرار گرفتن آشکارسازها را نشان می دهد.

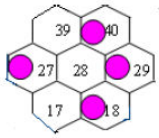


شکل (۱)
محل قرار گرفتن آشکارسازها درون قلب راکتور

قلب راکتورهای VVER1000 دارای ۱۶۳ سلول با سطح مقطعهای ۶ ضلعی منظم است. در امتداد قلب (در جهت عمودی) در هر کانال اندازه گیری ۷ آشکارساز وجود دارد که در فاصله های مساوی ۱ متر از هم در ۷ محل نصب شده اند. برای سادگی، راکتور را در امتداد ارتفاع آن به ۲۱ قسمت تقسیم می کنیم به گونه ای که در ۷ لایه از این ۲۱ لایه به شماره های ۲و ۵و ۸و ۱۱و ۱۴و ۱۷و ۲۰ آشکارساز وجود دارد و در لایه های دیگر یعنی لایه های ۱و ۳و ۴و ۶و ۷و ۹و ۱۰و ۱۲و ۱۳و ۱۵و ۱۶و ۲۱ هیچ آشکار سازی وجود ندارد. این آشکار سازها از نوع آشکارسازهای رودیم (Rh-BEDN) بدون اینرسی و تاخیر[3] می باشند. در مرحلهٔ اول از تعیین مقدار فلو در

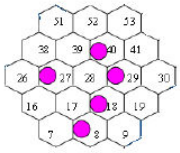
سلولها، سلولهای لایه های ۲و ۵و ۸و ۱۱و ۱۴و ۱۷و ۲۰را در نظر می گیریم که در خود آنها و یا همسایگی آنها آشکارساز وجود دارد. برای این منظور از روش مثلثی (triangular) و یا روش منحنی (parabolic) برای بازسازی فلو در سلولهایی که فاقد آشکارساز هستند، استفاده می شود. در روش مثلثی معادلهٔ [4] سطح به صورت

(۲) $flux = ax + by + c$ با استفاده از ۳ آشکارساز در همسایگی سلول مورد نظرنوشته می شود. به عنوان مثال برای سلول ۲۸ به ترتیب آشکارسازهای کانالهای ۲۷و ۲۹و ۱۸ را انتخاب می نماییم.



و با قرار دادن مختصات کارتزین این ۳ آشکارساز در دستگاه معادلات $\begin{cases} flux_{27} = ax_{27} + by_{27} + c \\ flux_{29} = ax_{29} + by_{29} + c \\ flux_{18} = ax_{18} + by_{18} + c \end{cases}$ ضرایب c ,b ,a تعیین می گردند و با قرار دادن مختصات کارتزین سلول ۲۸ (که مقدار فلوی آن را می خواهیم به دست آوریم) در معادلهٔ (۲) مقدار فلوی مربوطه به دست می آید، یعنی: $flux_{28} = ax_{28} + by_{28} + c$. چنانچه بخواهیم تعیین یا بازسازی فلوی نوترونی دقیقتر انجام شود باید از روش منحنی (parabolic) استفاده کنیم. به این ترتیب که معادلهٔ منحنی به صورت

(۳) $flux = ax^2 + by^2 + cx + dy + e$ با استفاده از ۵ آشکارساز در همسایگی سلول مورد نظر نوشته می شود. به عنوان مثال برای سلول ۲۸ به ترتیب آشکارسازهای کانالهای ۲۷و ۲۹و ۱۸و۴۰و۸ را انتخاب می نماییم.



و با قرار دادن مختصات کارتزین این ۵ آشکارساز در دستگاه معادلات $\begin{cases} flux_{27} = ax_{27}^2 + by_{27}^2 + cx_{27} + dy_{27} + e \\ flux_{29} = ax_{29}^2 + by_{29}^2 + cx_{29} + dy_{29} + e \\ flux_{18} = ax_{18}^2 + by_{18}^2 + cx_{18} + dy_{18} + e \\ flux_{40} = ax_{40}^2 + by_{40}^2 + cx_{40} + dy_{40} + e \\ flux_{8} = ax_{8}^2 + by_{8}^2 + cx_{8} + dy_{8} + e \end{cases}$ ضرایب a, b, c, d, e تعیین می گردند و با قرار دادن مختصات کارتزین سلول ۲۸ (که مقدار فلوی آن را می خواهیم به دست آوریم) در معادلهٔ (۳) مقدار فلوی مربوطه به دست می آید، یعنی: $flux_{28} = ax_{28}^2 + by_{28}^2 + cx_{28} + dy_{28} + e$. در این معادلات هر چه درجه و تعداد ضرایب بیشتر باشد روش مربوطه دقیقتر خواهد بود. اما برای بعضی از سلولها (مثلا" سلولهای شمارهٔ ۷ و ۹) ممکن است روش با معادلهٔ با درجهٔ پاییبتردقت بیشتری داشته باشد. از اینرو چون در این تحقیق در اکثر موارد روش منحنی دقیقتر است مقدار فلو در سلول مورد نظر توسط این روش تعیین می گردد. سپس اگر مقدار فلوی بازسازی شده دارای دقت کافی نبود، آنگاه کد باید روش مثلثی را امتحان کند و اگر باز هم دقت کافی حاصل نگردید آنگاه باید جوابی را که

دارای خطای کمتری است انتخاب نماید. دربازسازی فلوی نوترونها خطا باید از ۵٪ کمتر باشد. برای حل دستگاه معادلات از نرم افزارها و کتابخانه ها(library) ی مختلفی میتوان استفاده کرد. در این پروژه از نرم افزار C05NBF جهت حل دستگاه معادلات استفاده نمودیم. در این نرم افزار بر اساس نوع معادلات در آغاز باید متغیرهایی تعیین گردند که عبارتند از:

دقت = XTOL ،خروجی (بصورت برداری با طولN) = FVEC ، برداری با حداقل طول N = X، تعداد معادلات = N

WA = (برای تعیین فضا) LWA، برداری با طول $LWA = N * \frac{(3*n+13)}{2}$ ،

Ifail= (باید صفر باشد) Ifail اطلاعاتی در مورد خطای پاسخ سیستم معادلات (قبل از شروع حل سیستم معادلات

در این طرح همانگونه که گفتیم راکتور در امتداد ارتفاع خود به ۲۱ لایه تقسیم می گردد که در این میان لایه های ۱و ۳و ۴و ۶و ۷و ۹و ۱۰و ۱۲و ۱۳و ۱۵و ۱۶و ۲۱ دارای آشکارساز نیستند. برای تعیین مقدار فلو در سلولهای این لایه ها باید از مقدار فلوی سلولهای هم نام (یا هم شمارهٔ) سلول مورد نظردر لایه های بالاتر و پایینتر که دارای آشکارساز هستند استفاده نمود. روشی که در این حالت می تواند به کار برده شود روش درون یابی (interpolation)برای همهٔ لایه ها بجز لایه های۱ و ۲۱ و روش برون یابی (extrapolation) برای لایه های ۱و ۲۱ است. برای لایه های میانی با روش درون یابی داریم:

$$flux = \frac{2\,flux_a + flux_b}{3} \quad (۴)$$

$flux_a$ = فلوی نوترونی در سلولی که در سطح نزدیکتر وجود دارد : بطوریکه

$flux_b$ = فلوی نوترونی در سلولی که در سطح دورتر وجود دارد

برای لایه های ۱و ۲۱ مقدار فلو با روش برون یابی به صورت زیر بازسازی می شود:

$$flux_1 = \frac{4\,flux_2 - flux_5}{3} \quad (۵) \qquad , flux_{21} = \frac{4\,flux_{20} - flux_{17}}{3} \quad (۶)$$

نتایج. دقت برنامهٔ کامپیوتری (کد) حاصل که مقدار فلوی نوترونی را در سلولهای مختلف قلب راکتور بازسازی می کند توسط مثالهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته تا مناسب بودن آن برای تعیین مقدار فلوی ماکزیمم تایید گردد. از جملهٔ این مثالها می توان حالت نوان اسمی، نوان اسمی در حالیکه میله های کنترلی تا نیمه و یا بطور کامل در درون قلب راکتور قرار گرفته اند و نوان اسمی همراه با میله های کنترلی و آشکارسازهای خراب را نام برد. نتایج این مثالها در جدول (۱) آورده شده است. میزان خطای فلوی بازسازی شده در هر سلول از رابطهٔ زیر به دست می آید:

$$\Delta\% = \frac{reconstructedflux - calculatedfluxfromDYNCO}{calculatedfluxfromDYNCO} * 100$$

در این پروژه می توان برای بررسی دقت هریک از روشها ، متوسط مقدار خطا برای سلولهای موجود در لایه هایی که دارای آشکارساز هستند $(\overline{\Delta}_{i,7})$ و متوسط مقدار خطا برای کلیهٔ سلولها در کلیهٔ لایه ها اعم از اینکه دارای آشکارساز هستند یا نه $(\overline{\Delta}_{i,21})$ را بصورت زیر تعریف نمود:

$$\overline{\Delta}_{i,7} = \frac{|\Delta_{i,2}| + |\Delta_{i,5}| + |\Delta_{i,8}| + |\Delta_{i,11}| + |\Delta_{i,14}| + |\Delta_{i,17}| + |\Delta_{i,20}|}{7} \quad \text{و} \quad \overline{\Delta}_7 = \frac{\overline{\Delta}_{1,7} + \overline{\Delta}_{2,7} + ... + \overline{\Delta}_{163,7}}{163}$$

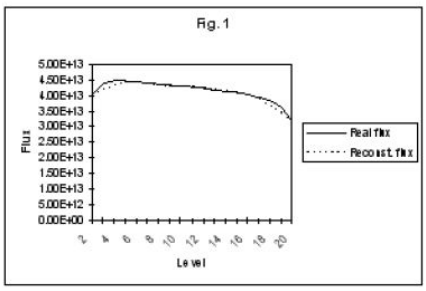
$$\overline{\Delta}_{i,21} = \frac{|\Delta_{i,1}| + |\Delta_{i,2}| + |\Delta_{i,3}| + ... + |\Delta_{i,20}| + |\Delta_{i,21}|}{21} \quad \text{و} \quad \overline{\Delta}_{21} = \frac{\overline{\Delta}_{1,21} + \overline{\Delta}_{2,21} + ... + \overline{\Delta}_{162,21} + \overline{\Delta}_{163,21}}{163}$$

بطوریکه: خطای فلوی بازسازی شده در سلول $= \Delta$ و شمارهٔ سلول $= i$ و متوسط خطا در لایه هایی از راکتور که دارای آشکارساز هستند (۷لایه) $= \overline{\Delta}_7$ ومتوسط خطا در سر تا سر لایه های راکتور (۲۱لایه) $= \overline{\Delta}_{21}$.خطا وقتی که دو روش مثلثی و منحنی جداگانه به کار برده می شوند تقریبا" ۳ برابر وقتی است که هر دو روش با هم به کار برده می شوند. همانگونه که در جدول (۱) می بینیم دقت بازسازی فلوی نوترونها در روشی که از هر دو روش مثلثی و منحنی توامـا" برای بازسازی فلو استفاده می کند بسیار بالا است. در این کد که فلو به صورت ترکیبی از روشهای مثلثی و منحنی تعیین می گردد در همهٔ حالتها مثل حالت نوان اسمی، نوان اسمی در حالیکه میله های کنترلی تا نیمه و یا بطور کامل در درون قلب راکتور قرار گرفته اند و یا وجود آشکارسازهای خراب (حتی خراب بودن ۳۰٪ از آشکارسازها) خطا تغییرات قابل ملاحظه ای ندارد.

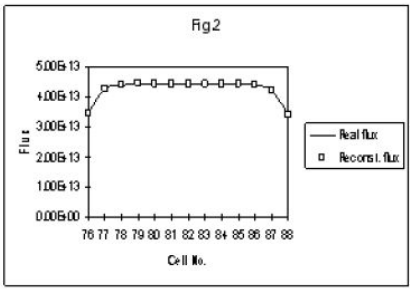
جدول(۱). دقت بازسازی فلوی نوترونها در شرایط مختلف در روشی که از هر دو روش مثلثی ومنحنی توامـا" برای بازسازی فلو استفاده میکند

شمارهٔ لایه	شمارهٔ سلول آشکارساز خراب	خطای متوسط در سر تا سر لایه های راکتور (۲۱لایه) $\overline{\Delta}_{21}$ %	خطای متوسط در لایه هایی از راکتور که دارای آشکارساز هستند (۷لایه) $\overline{\Delta}_7$ %	
–	–	1.278844	0.3114091	توان اسمی
–	–	1.2438	0.3015959	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ بطور کامل داخل هسته ـ
–	–	1.508445	0.3051453	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ تا نیمه داخل هسته ـ
7 5 1	132 122 108	1.511778	0.3135	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ تا نیمه داخل هسته بهمراه با آشکارسازهای خراب
1 4 7	132 122 108	1.910091	0.3078533	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ تا نیمه داخل هسته بهمراه با آشکارسازهای خراب
1 5 1 4 7 4 7	132 132 122 122 122 108 108	1.535847	0.3474219	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ تا نیمه داخل هسته بهمراه با آشکارسازهای خراب
5 1 7 4	132 122 122 108	1.519308	0.3234947	توان اسمی در حالتیکه میله های کنترلی گروه ۱۰ تا نیمه داخل هسته بهمراه با آشکارسازهای خراب

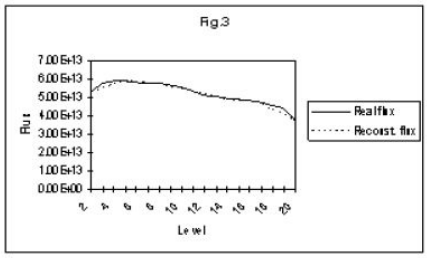
همچنین هنگامیکه میله های کنترلی وارد قلب راکتور می گردند خطای فلوی بازسازی شده در سلولهای نزدیک به میله های کنترلی نسبت به سایر سلولها بیشتر است. در همهٔ مثالها خطای متوسط در لایه هایی که حاوی آشکارساز هستند کمتر از ۱٪ است و خطای متوسط در همهٔ لایه های قلب راکتور بدون و یا با آشکارساز کمتر از ۲,۹٪ است. منحنی فلو در امتداد محور عمودی راکتور در توان اسمی برای سلول ۸۲ در شکل (۲) ترسیم شده است. در شکل (۳) منحنی فلوی نوترونها در سطح افقی، در لایهٔ پنجم در ردیفی که سلول ۸۲ قرار دارد و در شرایط توان اسمی (ردیف وسط در شکل (۱)) ترسیم شده است. در شکل (۴) هم منحنی فلودر جهت محور عمودی کانال ۱۲۱ در توان اسمی وقتی که گروه میله های کنترلی ۱۰ تا نیمه وارد قلب راکتور شده اند و ۷ آشکارساز خراب داریم (دو آشکارساز کانال ۱۳۲ در لایه های ۱و۵، سه آشکارساز کانال ۱۲۲ در لایه های ۱و۴و۷، دو آشکارساز کانال ۱۰۸ در لایه های ۴و۷) ترسیم شده است.



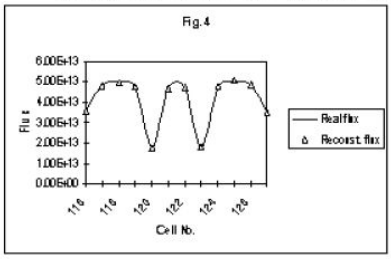
شکل (۲). منحنی فلوی نوترونها در جهت محور (عمودی) سلول ۸۲ در توان اسمی



شکل (۳). منحنی فلوی نوترونها در سطح افقی، در لایهٔ پنجم در ردیفی که سلول ۸۲ قرار دارد در شرایط توان اسمی



شکل (۴) منحنی فلو در جهت محور کانال ۱۲۱ در توان اسمی وقتی که گروه میله های کنترلی ۱۰ تا نیمه وارد قلب راکتور شده اند همراه با ۷ آشکارساز خراب



شکل (۵) منحنی در سطح افقی، در لایهٔ ۱۷ در ردیفی که سلول ۱۲۱ قرار دارد در شرایط توان اسمی وقتی که گروه میله های کنترلی ۱۰ تا نیمه وارد قلب راکتور شده اند همراه ۷ آشکارساز خراب

در شکل (۵) هم منحنی فلوی نوترونها در سطح افقی، در لایهٔ ۱۷ در ردیفی که سلول ۱۲۱ قرار دارد در شرایط توان اسمی وقتی که گروه میله های کنترلی ۱۰ تا نیمه وارد قلب راکتور شده اند و ۷ آشکارساز خراب داریم (دو آشکارساز کانال ۱۳۲ در لایه های ۱و۵، سه آشکارساز کانال ۱۲۲ در لایه های ۱و۴و۷، دو آشکارساز کانال ۱۰۸ در لایه های ۴و۷)ترسیم شده است. مشاهده می کنیم در این چهار شکل فلوی بازسازی شده با فلویی که کدDYNCO محاسبه می کند (بجز در لایه های ۱و ۲۱ در شکلهای (۲)و (۴) به دلیل خیلی دقیق نبودن روش برون یابی (extrapolation) برای بازسازی فلو در این نواحی در اثر وجود منعکس کننده (reflector) و خیلی دقیق نبودن محاسبات کدDYNCO در این نواحی) کاملا" همپوشانی دارند و خطا بسیار کم است.

بحث و نتیجه گیری. همانگونه که در قبلا" گفته شد هدف از انجام این پروژه تعیین ماکزیمم مقدار فلوی نوترونها در هر لحظه از زمان برای تعیین لحظه ای راکتیویته می باشد. بوسیلهٔ کدی که در این تحقیق تهیه گردیده است میتوان در هر لحظه از زمان فلوی ماکزیمم و در نهایت راکتیویته را تعیین نمود و به این ترتیب کنترل مناسبی بر روی راکتور داشت. باید توجه داشت که به علت بزرگی ابعاد راکتور و حجم زیاد محاسبات، برای تعیین ماکزیمم فلوی نوترونها در هرلحظه از زمان مدت زمانی نسبتا" طولانی لازم است، بنا براین در این کد برای انجام این حجم از محاسبات در مدت زمان کوتاه استفاده از کامپیترهای بسیار پر سرعت ضروری است.

مراجع :
[1] اثرات مکانی در اندازه گیری راکتیویته وکاربرد مدل نقطه ای درراکتورهای بزرگ، کنفرانس هسته ای مشهد ۱۳۸۴
[2] Балакин И.П., Украинцев В.Ф., Методика и программа компьютерного моделирования переходных процесов в активных зонах реакторов ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика, 1997, No.3. С.56-60.
[3] Model of inertia free direct charge detector for neutron flux measurement in power reactor core transients \ F.Foroughi, I.P.Balakine, Yu.V.Volkov, Ядерная энергетика, Obninsk, 1997 No.4.
[4] Лийн В.А, Позняк, Э.Г Аналичэская гэомэтраЯ \ М.: Наука, 1981, С.232