

نشریه تابش و فناوری هسته ای، سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴

توسعه روابط نرخ انتقال حرارت خطی و نرخ شکافت به منظور محاسبات بهره وری سوخت

بهنام غفوری^۱، لیلا غلامزاده^{۲*}، فریدون پیامی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ استادیار، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده متالورژی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۵ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۲/۱۸)

چکیده

بهره وری سوخت^۱ یکی از متداول ترین کمیتها برای تعیین میزان بازدهی سوخت هسته ای و ارزیابی عملکرد بلند مدت راکتور می باشد. روشهای متفاوتی برای محاسبات بهره وری سوخت موجود بوده که شامل روش های ماتریسی، نیمه عددی و عددی می باشد. یکی از آنها استفاده از روش نرخ انتقال حرارت خطی و نرخ شکافت بوده که این روش جزو روشهای عددی محسوب می گردد که این روش پیچیدگیهای محاسباتی کمتری داشته و در عین حال روش بسیار دقیقی می باشد. در این مقاله یک مجتمع سوخت راکتور آب تحت فشار^۲ بر اساس اطلاعات تجربی موجود با استفاده از کد MCNPX طراحی و مقدار بهره وری سوخت به دقت توسط کد محاسبه شده که نتایج بدست آمده از روش نرخ های انتقال حرارت خطی و نرخ شکافت و نتایج حاصل از کد به منظور تعیین دقت روش پیشنهادی بایکدیگر مقایسه شده اند. نتایج بیانگر دقت بالای روش پیش نهادی برای محاسبات بهره وری می باشد.

واژه های کلیدی: بهره وری سوخت، نرخ انتقال حرارت خطی، نرخ شکافت، راکتور آب تخت فشار

* یزد، یزد، دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه هسته ای، کد پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

پست الکترونیکی: gholamzadeh@yazd.ac.ir

1-Fuel Burnup

2-PWR Westinghouse

۱. مقدمه

دو روش کلی جهت بیان بهره وری سوخت هسته ای موجود است :

الف- بر اساس نسبت تعداد اتم های شکافته شده به تعداد اتم های سوخت اولیه:

$$\beta(\%FIMA) = \frac{Nf \text{ (Number of fissioned)}}{Ni \text{ (Number of initial atoms)}} \quad (1)$$

ب- بر اساس مقدار انرژی حاصل از سوخت به جرم بحرانی رآکتور

$$\beta\left(\frac{GwD}{Mtu}\right) = \frac{E \text{ (Released energy GwD)}}{M \text{ (Critical mass)}} \quad (2)$$

تبدیل این یکاها به شکل زیر انجام میگیرد که ضریب عددی انرژی حاصل از شکافت ۱ هسته برحسب GwD/Mtu می باشد. [۲]:

$$\beta\left(\frac{GwD}{Mtu}\right) = \beta(\%FIMA) * 0.95 * 10^3 \quad (3)$$

برای محاسبه از نرخ شکافت استفاده می کنیم [۳]:

$$\begin{aligned} \dot{F}\left(\frac{\text{fission}}{cm^3 * s}\right) &= \Sigma f * \phi = Nf * \sigma f * \phi \\ &= e * Nu * \sigma f * \phi \end{aligned} \quad (4)$$

که در این رابطه Σf سطح مقطع ماکروسکوپیک شکافت، σf سطح مقطع میکروسکوپیک شکافت، N_f چگالی اتمی بارور، Nu چگالی اتمی اورانیم، درصد غنای سوخت و ϕ شار قلب می باشند. البته شار قلب کمی ثابت نبوده و در طول دوره^۵ متغیر می باشد اما می توان آن را برای بازه های زمانی کوتاه، که در آنها چگالی قدرت ثابت است، تقریباً ثابت فرض نمود. با استفاده از نرخهای انتقال حرارت خطی و حجمی داریم [۳]:

$$q''' \left(\frac{J}{cm^3 * s} \text{ or } \frac{W}{cm^3} \right) = \dot{F} * 3.2 * 10^{-11} \quad (5)$$

5-Cycle Length

بهره وری در واقع کمیتی به منظور ارزیابی عملکرد سوخت هسته ای بوده و معیاری برای تعیین مقدار انرژی حاصل از واحد جرم سوخت می باشد. این کمیت بر اساس یکاهای GwD/Mtu (تعداد روزی که رآکتور می تواند با ۱ تن سوخت توانی معادل ۱ گیگاوات تولید نماید) و %FIMA (درصد اتمهای شکافته شده نسبت به تعداد اتم های اولیه) بیان می گردد.

کاملاً مشخص است که اصلی ترین هدف از افزایش بهره وری سوخت در طراحی، افزایش مدت زمان فعالیت رآکتور با توان خروجی ثابت و کاهش هزینه های صنعت هسته ای می باشد. مقدار تئوری بهره وری (مصرف شدن تمامی مواد قابل شکافت) در حدود ۹۵۰ GwD/Mtu بوده که در رآکتورهای امروزی عملاً مقدار بسیار کمی از آن قابل دست یابی است.

روشهای متفاوتی به منظور محاسبه بهره وری سوخت وجود دارد که مهمترین آنها روش های ماتریسی همچون Euler (استفاده شده توسط کد های محاسباتی نظیر MCNP و Origen) و روش های تا حدودی عددی مثل روش ماتریس نمایی^۳ و روش Bateman می باشد. تمامی این روش ها شامل محاسبات نسبتاً طولانی بوده و تنها توسط کد قابل استفاده است.

روش استفاده شده بر اساس نرخ انتقال حرارت خطی و نرخ شکافت جزء روشهای کاملاً عددی محسوب شده و برای بازه های کوتاه دوره سوخت رآکتور^۴ دارای نتایجی دقیق می باشد [۲، ۱].

۲. روش محاسباتی

3-Matrix Exponential
4-Reactor Fuel Cycle

که همان رابطه قبل (شماره ۱۱) بوده و در آن ε چگالی انرژی شکافت و V حجم کل سوخت است.

۲.۱ روش کار

به منظور مقایسه نتایج با مقادیر واقعی از اطلاعات مربوط به مجتمع سوخت رآکتور آب تحت فشار استفاده شده است که در جدول ۱ توضیحات مربوط به آنها آورده شده است و نتایج تجربی مربوط به محاسبات بهره وری آن موجود می باشد [۴]. همچنین شکل ۱ نمای مجتمع سوخت طراحی شده را نشان می دهد. در کد MCNPX 2.6 به منظور شبیه سازی شرایط رآکتور از چشمه محاسبات بحرانی (KCODE) استفاده شده و محاسبات مصرف سوخت توسط کارت Burn انجام یافته است. این کارت برای انجام محاسبات از فایل Cinder90 کمک می گیرد که این فایل شامل اطلاعات واکنش مربوط به ۳۵۰۰ ایزوتوپ و ۱۳۲۵ محصول شکافت می باشد. نحوه انجام محاسبات به این شکل است که کد محاسبات شارها، نرخهای واکنش برای حالت انرژی کلی، ضریب تکثیر شکافت و انرژی قابل دستیابی به ازای هر شکافت را انجام داده و سپس داده ها برای انجام محاسبات مصرف سوخت به فایل Cinder 90 منتقل شده و محاسبه دامه می یابد [۷].

مقدار بهره وری سوخت برای دوره اول سوخت این نوع رآکتور (۴۹۲ روز) ما بین ۲۰ تا ۲۵ GwD/Mtu می باشد که در چرخه های بعدی سوخت این عدد، به علت کاهش سوخت تازه در قلب، کاهش یافته و بهره وری کل بعد از طی تعداد چرخه های طراحی شده برای سوخت در یک بازه بلند مدت محاسبه می گردد [۴].

$$q' \left(\frac{W}{cm} \right) = \pi * R^2 * q'''$$

$$= \pi * R^2 * \dot{F} * 3.2 * 10^{-11} \quad (6)$$

$$q' = \pi * R^2 * e * Nu * \sigma f * \phi * 3.2 * 10^{-11} \quad (7)$$

$$E \left(\frac{Gw * D}{cm} \right) = q' * td * 10^{-9} \quad (8)$$

$$Wu \left(\frac{Ton U}{cm} \right) = \pi * R^2 * \rho * 10^{-3} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{E}{Wu} = \frac{q' * td * 10^{-6}}{\pi * R^2 * \rho * 10^{-3}} \quad (10)$$

$$\beta \left(\frac{Gw * D}{Ton U} \right) = \frac{e * Nu * \sigma f * \phi * td * 3.2 * 10^{-14}}{\rho} \quad (11)$$

که در این روابط R شعاع قرص، td مدت زمان فعالیت رآکتور، E انتقال انرژی خطی، Wu جرم خطی و ρ چگالی سوخت می باشد. همچنین این رابطه به شکل زیر نیز قابل دستیابی است: با استفاده از رابطه ۴ و با فرض ثابت ماندن نرخ شکافت در بازه زمانی کوتاه داریم [۳]:

$$F \left(\frac{fission * D}{cm^3 * s} \right) = \int \dot{F} * dt \approx \dot{F} * td$$

$$= e * Nu * \sigma f * \phi * td \quad (12)$$

$$\varepsilon \left(\frac{j * D}{cm^3 * s} \text{ or } \frac{W * D}{cm^3} \right) = F * 3.2 * 10^{-11} \quad (13)$$

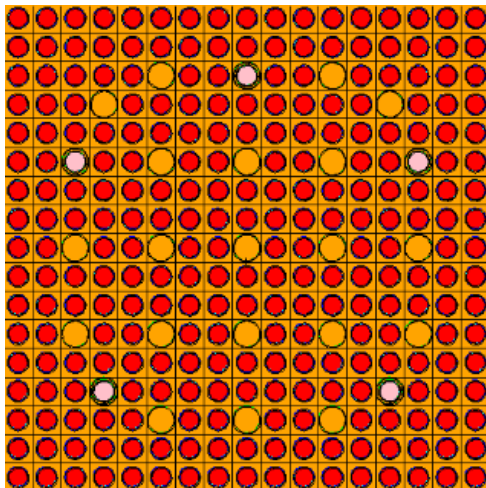
$$E(w * D) = \varepsilon * V \quad (14)$$

$$\beta \left(\frac{Gw * D}{Ton U} \right) = \frac{E}{M}$$

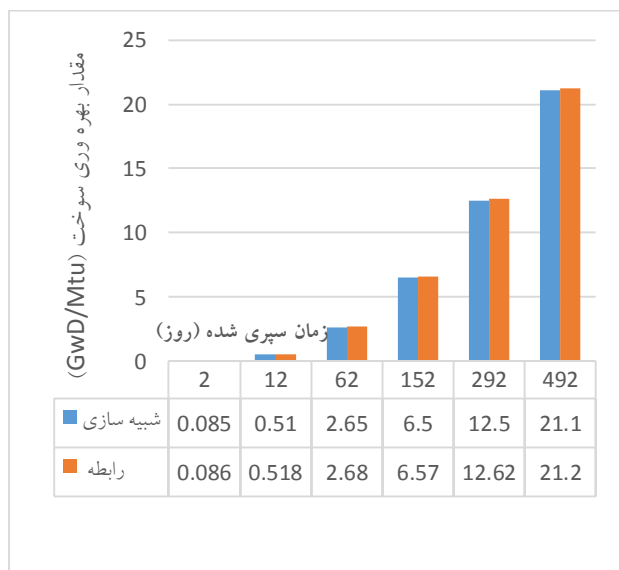
$$= \frac{e * Nu * \sigma f * \phi * td * 3.2 * 10^{-11} * V * 10^{-9}}{M * 10^{-3} * 10^{-3}}$$

$$\beta \left(\frac{Gw * D}{Ton U} \right) =$$

$$\frac{e * Nu * \sigma f * \phi * td * 3.2 * 10^{-14}}{\rho} \quad (15)$$



شکل ۱. مجتمع سوخت طراحی شده حاوی میله های سوخت (قرمز-۲۶۴ عدد)، میله های کنترل (صورتی ۲۰ عدد) و لوله های هدایت (زرد ۲۰ عدد) - تصویر برداری شده توسط **visedx**



شکل ۲. نتایج بدست آمده از مقایسه رابطه بدست آمده و شبیه

سازی انجام گرفته توسط **MCNPX**

۳. نتیجه گیری

باتوجه به مقادیر بدست آمده، معادله بکار گرفته شده عملکرد بسیار خوبی داشته و نتایج حاصل از هر دو روش تطابق زیادی

جدول ۱. اطلاعات تجربی استفاده شده برای شبیه سازی [۶،۵]

ارتفاع کل مجتمع	۳۸۵ cm
ارتفاع سوخت	۳۶۵٫۸ cm
آرایه میله ها	۱۷ * ۱۷
تعداد میله سوخت	۲۶۴
تعداد میله کنترل	۵
تعداد قرص داخل هر میله	۲۷۱
گام میله های سوخت	۱٫۲۶ cm
ارتفاع قرص	۱٫۳۴۶۲ cm
شعاع خارجی	۰٫۸۱۹۱ cm
شعاع داخلی	۰٫۲ cm
چگالی	۱۰٫۳ gr/cm ³
درصد غنا	۲۱٪
مقدار گاف بین قرص و غلاف	۰٫۱۶۵ cm
جنس غلاف	Zircaloy 4
تعداد کل مجتمع داخل قلب	۱۹۳
توان کل رآکتور	۳۵۶۵Mw

بر اساس اطلاعات موجود در رابطه با شار نوترونی متوسط این رآکتور بهره وری سوخت با استفاده از رابطه پیش نهادی محاسبه شده و نتیجه با نتیجه حاصل از شبیه سازی کد مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل ۲ ترسیم شده است.

با یکدیگر دارند. بنابر این می توان از این مدل محاسباتی به عنوان روشی کارآمد و ساده برای محاسبه بهره وری سوخت در بازه های زمانی کوتاه استفاده نمود.

مراجع

- [3] D. Olander, A. Motta, Light Water Reactor Materials, State University, Chapter 9, 2009
- [4] M. D. DeHart, M. C. Brady, C. V. Parks, Computational Physics and Engineering Division, Burnup Credit Calculational Criticality Benchmark, 1996.
- [5] J. A. Dahlheimer, E. E. Elhauge, The Westinghouse pressurized water reactor, water reactor divisions, Pennsylvania, 1984.
- [6] USNRC HRTD, Westinghouse Technology Systems Manual, Section 3, 2009.
- [7] D. B. Pelowitz, ed., MCNPX User's Manual, Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory report, LA-CP-07-1473, 2008.
- [1] IAEA-TECDOC-1654, Advance fuel pellet material and fuel rod design, section 3, New York, 2009.
- [2] D. Gabriel, Handbook of Nuclear Engineering, Springer, Germany, Sections 1&5, 2010.

Developing heat transfer and fission rate equations for Fuel Burn-up calculations

B.Ghafoori¹, L. Gholamzadeh^{*2}, F.Payami³

1. M.Sc. student, Department of Physics, University of Yazd, Yazd, Iran

2. Assistant Professor, Department of Physics, University of Yazd, Yazd, Iran

3. Assistant Professor, Department of Material, Iran atomic energy agency, Isfahan, Iran

** Corresponding author's E-mail: gholamzadeh@yazd.ac.ir*

(Received: 9/5/2015 - Accepted: 25/2/2015)

ABSTRACT

Fuel burn-up is one of the usual and also important methods for examine fuel performance and long term behaviors of light water reactors. There are lots of method for calculating the Fuel Burn-up which are matrix methods, semi numerical methods and numerical methods. One of the simplest and also accurate methods for calculation of this quantity is based on the heat transfer rate and fission rate which is assumed as a numerical burn-up calculation method. In this article a Westinghouse pressurized water reactor was simulated by MCNPX code based on experimental benchmark data and fuel burn-up was calculated carefully by the MCNPX code. The results of MCNPX code calculation were compared with the results of the method based on fission rate and heat transfer rate for validating the method accuracy. The results of combination of the method based on fission and heat transfer rates and the MCNPX result shows high accuracy of the proposed method for fuel burnup calculations.

Keywords: *Fuel Burnup, Heat Transfer Rate, Fission Rate, PWR Westinghous*

