

محاسبه ضریب راکتیویته دمای کند کننده و سوخت با استفاده از DRAGON^۴ -

DONJON^۴

فرحناز سعادتیان درخشنده، امیر سعید شیرانی*، امید صفرزاده

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده

محاسبات ضریب راکتیویته دمای سوخت و کند کننده از اهمیت بسیاری از نظر ایمنی و کنترل برخوردار است. برای محاسبات پارامترهای نوترونی کدهای مختلفی ارائه شده است. در کشور این محاسبات عمدتاً با استفاده از کدهای WIMS و CITATION انجام شده است. اخیراً دانشگاه صنعتی مونتreal دو کد محاسباتی پیشرفته DRAGON^۴ و DONJON^۴ ارائه داده است. در این مقاله، ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده و توزیع نسبی توسط این دو کد پیشرفته برای راکتور هسته‌ای بوشهر محاسبه گردیده است. همچنین، این ضرایب و توزیع نسبی توان با استفاده از WIMS^۵ و CITATION محاسبه و با مدرک FSAR مقایسه شده است. نتایج نشانگر دقت بسیار مناسب این دو کد پیشرفته است.

کلید واژه: راکتور هسته‌ای بوشهر، ضریب راکتیویته، کدهای CITATION-WIMS، کدهای DRAGON^۴-DONJON^۴

۱- مقدمه

محاسبه توزیع توان در قلب راکتور و ضریب راکتیویته از نقطه نظر ایمنی، قابلیت اطمینان و اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد. به منظور تامین ایمنی در طراحی قلب راکتورهای قدرت با کندکننده آب، همواره ضریب راکتیویته دمای کندکننده باید مقدار منفی باشد. این ضریب به صورت تغییرات راکتیویته به ازای یک درجه تغییر دمای کندکننده، تعریف می‌شود.

با توجه به پیچیدگی شدید هندسه راکتور، محاسبات قلب راکتور در چندین مرحله انجام می‌گیرد. در اولین گام، فرایند همگن سازی و چگالش برای تولید سطح مقطع‌های چند گروهی انجام می‌شود. کد WIMS که در سال ۱۹۶۰ توسعه یافته است از جمله کدهای محاسباتی در این زمینه بشمار می‌آید [۱]. یکی از نسخه‌های موجود این کد WIMS^۵ است که دارای کتابخانه استاندارد ۶۹ گروهی و با قابلیت حل معادله ترابرد نوترون به روش‌های S_n و P_{ij} می‌باشد. این کد قابلیت مدل‌سازی دقیق هندسه را نداشته و از این رو، محاسبات ترابرد و خود حفاظی با تقریب‌ها و ساده‌سازی‌هایی انجام می‌شود که از معایب آن بشمار می‌آید. البته برای بهبود نتایج محاسبات، ضرایب تصحیح نیز معرفی شده است. کد DRAGON^۴، که اخیراً در دانشگاه صنعتی مونتreal توسعه داده شده، یکی از کدهای پیشرفته محاسبات سلولی است که در محیط لینوکس و به زبان فرترن نوشته شده است. از قابلیت‌های این کد می‌توان به حل معادله انتگرالی ترابرد با روش احتمال برخورد در سه بعد، محاسبات رزونانس، محاسبات چند گروهی - چند بعدی شار نوترونی، محاسبات همگن سازی فضایی، محاسبه

سطح مقطع‌های معادل و محاسبات مصرف سوخت، اشاره کرد. این کد می‌تواند از کتابخانه‌های کدهای WIMSD5 و WIMS-AECL نیز استفاده نماید [۲]. در گام دوم، این سطح مقاطع برای محاسبات سراسری قلب راکتور با استفاده از حل معادله پخش، بکار می‌روند. کد CITATION، از کدهای محاسبات نوترونی در سطح قلب راکتور است که قابلیت حل معادلات چند گروهی پخش تابع زمان و مکان را با روش اختلاف محدود، دارد [۴]. کد DONJON4، نیز یکی از کدهای پیشرفته در زمینه محاسبات قلب راکتور است [۳]. این کد شامل ماژول‌های متعددی است که می‌تواند محاسبات کامل قلب را به روش‌های گوناگون از جمله المان محدود انجام داده و پارامترهای نوترونی را محاسبه نماید.

در کشور محاسبات نوترونی راکتورها عموماً توسط CITATION-WIMS انجام شده است [۸]. همچنین محاسبه ضرایب راکتیویته نیز با این کدها انجام شده است [۷]. این کدها با توجه به روش انجام محاسبات، با محدودیت مواجه هستند. با توجه به اهمیت محاسبه توزیع توان و ضرایب راکتیویته، بایستی از کدهای پیشرفته در محاسبات سلولی و قلب راکتور استفاده شود. هدف این مقاله معرفی و استفاده از DONJON4-DRAGON4 در این محاسبات و مقایسه نتایج با CITATION-WIMSD5 و مدرک FSAR نیروگاه هسته‌ای بوشهر است.

۲- راکتور مورد بررسی

نیروگاه هسته‌ای بوشهر با قدرت الکتریکی ۱۰۰۰ مگاوات از نوع آب تحت فشار روسی می‌باشد. قلب راکتور با ۱۶۳ مجتمع سوخت شش ضلعی می‌باشد. در سیکل اول، مجتمع‌های سوخت بر حسب غنای ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵، اکسید اورانیوم موجود در میله‌های سوخت و میله‌های جاذب سوختی در شش نوع متفاوت ۱۶ ، ۲۴ ، ۳۶ ، ۲۴B۲۰ ، ۲۴B۳۶ ، ۳۶B۳۶ وجود دارند. هر مجتمع حاوی ۱۸ میله جاذب سوختی است، که به شکل ثابت درون کانال‌های راهنما قرار می‌گیرند. جدول ۱ مشخصات مجتمع سوخت و میله‌های آن را نشان می‌دهد. شکل ۱ چیدمان قلب راکتور را در سیکل اول کاری نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مجتمع سوخت درون قلب راکتور [۵]

میله سوخت	مجتمع سوخت
جنس قرص سوخت UO ₂	شکل هندسی مجتمع سوخت شش ضلعی
قطر حفره مرکزی (میلی‌متر) ۱/۵	تعداد میله‌های سوخت ۳۱۱
قطر خارجی (میلی‌متر) ۷/۵۷	گام شبکه میله‌های سوخت (میلی‌متر) ۱۲/۷۵
چگالی (گرم/سانتی‌گراد) ۱۰/۴ - ۱۰/۷	تعداد کانال‌های راهنما ۱۸
جنس غلاف آلیاژ ۱٪ Nb Zr	تعداد کانال اندازه‌گیری شار نوترون ۱
قطر داخلی (میلی‌متر) ۷/۷۳	تعداد کانال مرکزی ۱
قطر خارجی (میلی‌متر) ۹/۱	

۳- روش محاسبات

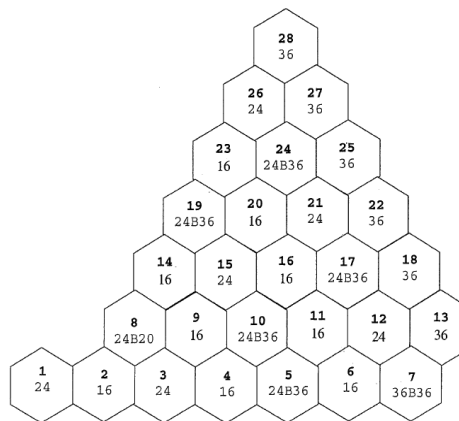
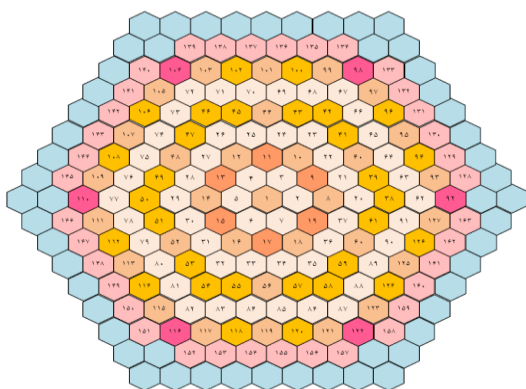
برای تولید ثوابت گروهی در WIMSD^۵، هر یک از مجتمع‌های سوخت با مدل سوخت خوشه‌ای (جایگزینی شش ضلعی‌های میله‌های سوخت با دایره‌های هم مرکز) مدل‌سازی و معادله ترابرد در دو گروه انرژی با روش PIJ+PERSEUS حل شده است. اما در محاسبات سلولی DRAGON^۴، با توجه به قابلیت‌های هندسی موجود در ماژول GEO، مجتمع‌های سوخت با هندسه واقعی، یعنی یک شبکه متشکل از ۳۳۱ شش ضلعی شامل ۳۱۱ عدد میله سوخت، ۱۸ عدد کانال راهنما، ۱ عدد کانال مرکزی و ۱ عدد کانال اندازه‌گیری شار نوترون، شبیه‌سازی شده‌اند. جهت حل معادله ترابرد انتگرالی در دو گروه انرژی و هندسه شش ضلعی دو بعدی، از ماژول SYBILT همراه با مدل B^۱ برای اثر نشت و کتابخانه WIMSD^۵ استفاده شده است. برای محاسبات قلب CITATION، سطوح مقاطع دو گروهی محاسبه شده توسط کد WIMSD^۵ برای مجتمع‌های سوخت و بازتابنده‌های محوری و شعاعی (سه بعد)، به عنوان داده‌های ورودی استفاده می‌شوند. اما به دلیل تقارن هندسی موجود در قلب راکتور بوشهر، جهت کاهش حافظه مورد نیاز کد، بجای شبیه‌سازی کل قلب (۱۶۳ مجتمع سوخت) از تقارن یک ششم آن (۲۸ مجتمع سوخت) استفاده نموده‌ایم. در محاسبات قلب DONJON^۴، کل قلب مدل شده و جهت حل معادله پنخس از ماژول TRIVAT، همراه روش DUAL با در نظر گرفتن ۱۰۸ مش شبه لوزی برای هر شش ضلعی و المان محدود، استفاده شده است. شکل ۲ قلب مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. سطح مقاطع تولیدی DARGON^۴ به عنوان ورودی DONJON^۴ بکار رفته است.

برای محاسبه ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده در حالت گرم صفر قدرت نیز از ضریب تکثیر موثر تولید شده در بازه دمایی ۵ °C بالاتر و پایینتر از دمایی معمول (۲۸۰ °C) با غلظت اسید بوریک بحرانی ۷/۳۳ گرم به ازای یک کیلوگرم سیال، استفاده نموده‌ایم. همچنین ضریب راکتیویته دما کندکننده، برای غلظت‌های مختلف اسید بوریک در توان صفر و بازه دمایی ۲۸۰-۲۰ °C محاسبه شده است.

$$\rho \equiv \frac{K-1}{K} \quad (1)$$

$$\alpha_T = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{\left(\frac{K_2-1}{K_2}\right) - \left(\frac{K_1-1}{K_1}\right)}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، K ضریب تکثیر موثر، T دمایی سوخت یا کندکننده، ρ راکتیویته و α_T ضریب راکتیویته دمایی می‌باشد.



شکل ۲- مدل شش ضلعی قلب راکتور بوشهر در کد

شکل ۱- یک ششم قلب راکتور بوشهر در سیکل اول [۵]

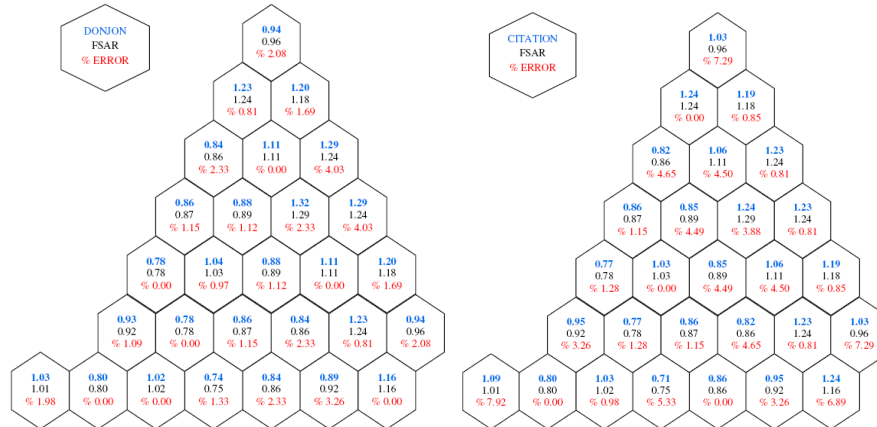
DONJON ϵ

۴- نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه نتایج توزیع توان نسبی شعاعی و ضرایب راکتیویته، حاصل از این کدها، در شرایط حالت پایدار ابتدای سیکل اول کاری راکتور بوشهر می‌پردازد. نتایج حاصله با مدارک نیروگاه [۵-۶] مقایسه می‌شود. شکل ۳ توزیع توان نسبی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از CITATION-WIMSD ϵ نیز در مجتمع سوخت مرکزی شاهد خطای قابل توجهی هستیم که دلیل اصلی آن، محدودیت این کد در مش‌بندی صحیح هندسه شش ضلعی است. جدول ۲ نتایج هر یک از کدها با مدارک FSAR مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج DONJON ϵ -DRAGON ϵ تطابق بسیار خوبی با مدارک نیروگاه و به مراتب بهتر دارد.

جدول ۲- مقایسه نتایج توزیع توان شعاعی در شرایط پایدار ابتدای سیکل اول راکتور بوشهر

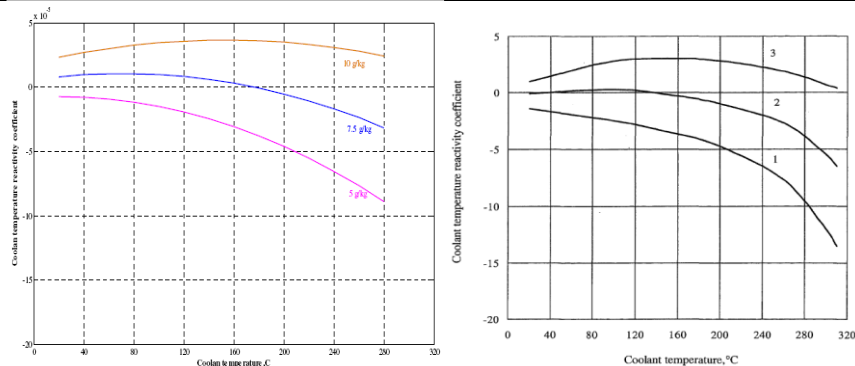
همبسته کدهای نوترونی	ضریب تکثیر موثر بحرانی	پیشینه توان نسبی شعاعی	پیشینه خطای محاسبات
CITATION-WIMSD ϵ	۱/۰۰۶۹۹۵	۱/۲۴	٪ ۷/۹۲
DONJON ϵ -DRAGON ϵ	۱/۰۰۳۸۱۹	۱/۳۲	٪ ۴/۰۳
مرجع FSAR ^(۵)	-	۱/۲۹	-



شکل ۳- توزیع توان نسبی یک ششم قلب راکتور بوشهر حاصل از کدهای CITATION و DONJON ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده در حالت گرم صفر قدرت محاسبه و در جدول ۳ درج شده است. همچنین ضریب راکتیویته دما کندکننده، برای غلظت‌های مختلف اسید بوریک در توان صفر و بازه دمایی محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از DONJON-DRAGON بسیار مناسب و اختلاف کمتری با مدرک نیروگاه دارند.

جدول ۳- ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده در ابتدای سیکل حالت گرم صفر قدرت

مرجع FSAR ^(۱)	DRAGON & DONJON	WIMSD ^۵ & CITATION	همبسته کدهای نوترونی
-۲/۷۰	-۲/۹۵	-۳/۲۵	ضریب راکتیویته دمای سوخت ۱۰۰°C
-۴/۱۰	-۴/۷۳	-۴/۶۹	ضریب راکتیویته دمای کندکننده ۱۰۰°C



شکل ۴- ضریب راکتیویته دمای خنک‌کننده در ابتدای سیکل، بدون سموم در غلظت‌های مختلف اسید بوریک
($\partial\rho/\partial t_m$, ۱۰۰°C) - (سمت چپ: DONJON & DRAGON، سمت راست: مرجع FSAR [۵])



۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، محاسبات توزیع توان ابتدای سیکل اول و ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده حالت گرم صفر قدرت (بدون سموم)، راکتور هسته‌ای بوشهر از کدهای DONJON^{c} - DRAGON^{c} و $\text{CITATION-WIMSD}^{\text{c}}$ انجام شده است. نتایج حاصله با مقادیر موجود در مدارک نیروگاه اتمی بوشهر مقایسه شد. نتایج نشانگر، توانایی و دقت بالای محاسبات نوترونی با استفاده از کدهای جدید DONJON^{c} - DRAGON^{c} است.

۶- مراجع

- [۱] M. J. Halsall, "A Summary of WIMSD^c Input Options," AEEW-M-۱۳۲۷, Atomic Energy Establishment, Winfrith, Dorchester, June ۱۹۸۰
- [۲] G. Marleau, A. Hébert and R. Roy, A USER GUIDE FOR DRAGON VERSION^c, Institut de génie nucléaire Département de génie mécanique École Polytechnique de Montréal, ۲۰۱۱
- [۳] D. Sekki, A. Hébert, R. Chambon, A USER GUIDE FOR DONJON VERSION^c, Institut de génie nucléaire Département de génie mécanique École Polytechnique de Montréal, ۲۰۱۱
- [۴] Flower, T.B., Vondy, D.R., Cunningham, G.W., ۱۹۷۱. Nuclear reactor core analysis code: CITATION. ORNL-TM-۲۴۹۶.
- [۵] ATOMIC ENERGY ORGANIZATION OF IRAN, NPP DEPARTMENT, FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT, CHAPTER ۴, January ۲۰۰۷
- [۶] Atomic Energy Organization of Iran, ALBUM OF NEUTRON AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE ۱-ST LOADING, RELATED TO ORGANIZATION OF ACTIVITIES ON BNPP-۱ COMMISSIONING, ۲۰۰۴
- [۷] F. Faghihi, A.H. Fadaie, R. Sayareh, Reactivity coefficients simulation of the Iranian VVER-۱۰۰۰ nuclear reactor using WIMS and CITATION codes, Progress in Nuclear Energy ۴۹, ۶۸-۷۸, ۲۰۰۷
- [۸] صفاری نوش آبادی، امیرحسین، محاسبات ترموهیدرولیکی قلب راکتور هسته‌ای بوشهر (۱۰۰۰-WWER) با استفاده از کوپل کدهای WIMS.COBRA-EN و CITATION. دانشگاه صنعتی شریف، رساله کارشناسی ارشد، ۱۳۸۷.