توسعه نرم افزار جامع محاسبات نوترونیک "BNCP"

پایانی، امیر - خواجوند، نورالله*- حسن زاده، رضا -ارتجایی، محمدمحسن

شرکت توسعه و ارتقای ایمنی نیروگاه‌های اتمی(توانا)

چکیده:

مدرک" آلبوم مشخصه‌های فیزیک نوترونی" یکی از مهمترین مدارک بهره‌برداری نیروگاه اتمی است. این مدرک قبل از راه‌اندازی نیروگاه تولید شده و در طی فرایند راه‌اندازی و بهره‌برداری بعنوان راهنمای کاری پرسنل بهره‌برداراتاق کنترل نیروگاه استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های موجود در صنعت هسته‌ای لازم است کدهای محاسباتی موجود در داخل کشوراعتبارسنجی شده و امکان‌سنجی جهت استفاده از آنها در طراحی و بهره‌برداری از نیروگاه اتمی انجام پذیرد. در این مقاله نرم‌افزار توسعه داده شده مبتنی بر روش یقینی موسوم به BNCP معرفی می شود. این نرم افزار با استفاده از تلفیق سه کد DRAGON، PARCS و COBRA-ENW قادر است کلیه پارامترهای مدرک آلبوم را محاسبه کند.

کلید واژه : *آلبوم مشخصه‌های فیزیک نوترونی – نرم افزار BNCP – تلفیق کدهای نوترونیک و ترموهیدرولیک*

Development of the Comprehensive Neutronic Software "BNCP"

Payani, Amir - Khajvand, Noorollah* - Hasanzadeh, Reza – Etejaei, Mohammad Mohsen

NPPs Safety Development & Improvement Company (TAVANA)

Abstract:

The "album of neutron-physics characteristics" document is one of the most important documents for the operation of nuclear power plant. This document produced before the plant's startup and is used as a working manual for operator of nuclear power plant control room during startup and operation. Considering the current limitations in the nuclear industry, it is necessary to validate available computational codes within the country, and perform feasibility for using them in the design and operation of the nuclear power plant. In this article the developed software under title "BNCP" is introduced which is based on deterministic method. This software is able to calculate all parameters of the album document by coupling of three codes DRAGON, PARCS and COBRA-ENW.

Keywords: *Album of neutron-physics characteristics – BNCP Software – coupling of Neutronic and Thermal Hydraulic codes*

مقدمه:

به منظور انجام محاسبات نوترونیکی قلب راکتور لازم است تا فرآیند همگن‌سازی و چگالش برای تولید سطح مقاطع چندگروهی توسط یک کد محاسبات سلولی انجام شده و سطح مقاطع تولیدی در اختیار یک

کد محاسبات قلب گذاشته شود و توزیع توان محاسبه شده در اختیار کد ترموهیدرولیک قرار گیرد تا توزیع دمای خنک کننده، سوخت، گپ و غلاف نیز محاسبه گردد. این فرآیند که موسوم به تلفیق کدهای نوترونیک و ترموهیدرولیک است توسط محققان زیادی در سراسر دنیا انجام شده است. در این پژوهش‌ها از کدها و روشهای متعددی استفاده شده است [۱، ۲ و ۳] . در این پژوهش به منظور تولید ابزاری قابل اطمینان جهت انجام محاسبات قلب راکتور بوشهر و محاسبه پارامترهای مدرک " آلبوم مشخصه‌های فیزیک نوترونی راکتور بوشهر " نرم افزاری تحت عنوان BNCP (BNPP Neutronic Calculator Program) توسعه داده شده که برای محاسبه پارامترهای آلبوم فیزیک نوترونی راکتور بوشهر از تلفیق سه کد DRAGON جهت انجام محاسبات سلولی [۴]، کد PARCS جهت انجام محاسبات قلب[۵] و کد ترموهیدرولیک COBRA-ENW جهت انجام محاسبات ترموهیدرولیک[۶] بهره می‌برد.

هدف از مقاله حاضر معرفی نرم افزار مذکور و ارایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت‌های مختلف کاری قلب راکتور بوشهر موجود در آلبوم فیزیک نوترونی سیکل سوم کاری نیروگاه اتمی بوشهر[۷] با آن به منظور راستی آزمایی با داده های آلبوم می‌باشد.

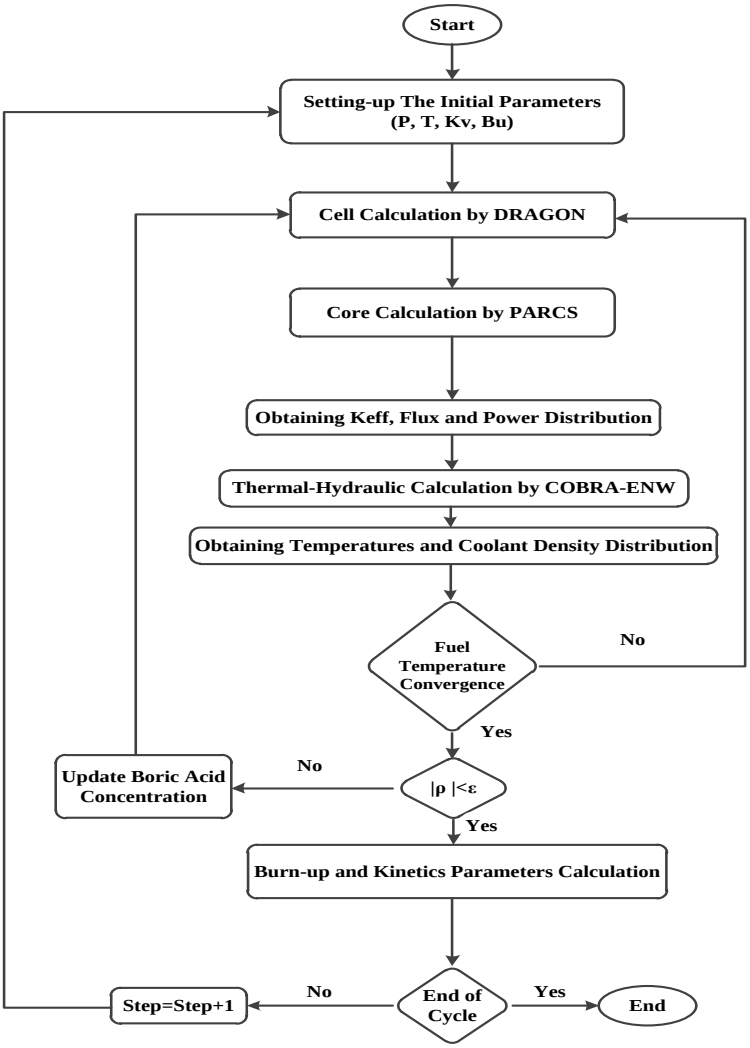
روش کار:

قلب راکتور نیروگاه بوشهر دارای ۱۶۳ مجتمع سوخت می‌باشد. جهت شبیه‌سازی قلب راکتور بوشهر توسط نرم‌افزار BNCP، قلب راکتور در جهت محوری به ۱۰ لایه تقسیم و هر لایه در هرمجتمع سوخت به صورت یک گره در نظر گرفته شده است(۱۶۳۰ گره). همچنین شرایط مرزی در نظرگرفته شده در مرز بیرونی به صورت Zero Incoming می‌باشد. با توجه به این فرضیات و سطح مقاطع سلولی محاسبه شده توسط کد DRAGON، قلب راکتور در شرایط مختلف کاری توسط کد PARCS شبیه‌سازی و پارامترهای مختلف آن محاسبه می‌شود. نحوه عملکرد این نرم‌افزار در نمودار گردشی شکل ۱ آورده شده است [۸، ۹ و ۱۰].

در این نمودار گردشی اولین مرحله، محاسبه چگالی خنک‌کننده بر اساس غلظت اسیدبوریک و توزیع دما می‌باشد. توزیع دمای اولیه از خروجی کد COBRA-ENW اخذ می‌شود. سپس بر اساس موقعیت میله‌های کنترل در هر سلول (۱۰×۱۶۳ سلول)، درصد وزنی آب و میله کنترل در کانال‌های هدایت بدست آمده و با اطلاعاتی نظیر نوع مجتمع سوخت، حالت زینان(اشباع یا غیراشباع)، فشار قلب، توزیع Burn-up، غلظت اسیدبوریک، چگالی خنک‌کننده و توزیع دمای سوخت، گپ، غلاف سوخت و خنک‌کننده، ورودی مناسب برای هر سلول در کد DRAGON ساخته می‌شود. پس از ساخت ورودی، اصلاح زینان انجام می‌شود؛ اگر

زینان در حالت اشباع باشد، با استفاده از یک تابع مخصوص، زینان اصلاح می‌شود. در نهایت کد DRAGON اجرا شده و خروجی تولید می‌شود.

با استفاده از سطح مقاطع گروهی(دوگروهی) استخراج شده از خروجی کد DRAGON، ورودی مناسب برای کد PARCS ساخته شده و پس از اجرای آن از خروجی به دست آمده، پارامترهایی نظیرضریب تکثیر موثر، توزیع توان محوری یعنی توان در هر گره یا سلول (K_v)، توزیع توان شعاعی(K_q)، شار محوری و شعاعی(حرارتی و سریع) و شار الحاقی استخراج می‌شود. لازم بذکر است شار الحاقی در محاسبه پارامترهای سینتیکی مانند کسر نوترون‌های تاخیری و طول عمر نوترون‌های آنی مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۱- نمودار گردشی نرم‌افزار BNCP

با استفاده از توان محوری به دست آمده از خروجی کد PARCS ، ورودی کد COBRA-ENW ساخته، اجرا شده و از خروجی آن توزیع دمای جدید بدست می‌آید، سپس دمای سوخت هر سلول بدست آمده و با دمای سوخت قبلی آن مقایسه می‌شود؛ در صورتی که بیشینه اختلاف دمای سوخت جدید و قبلی در تمامی سلول ها از معیار همگرایی(۱۰ درصد) کمتر باشد، همگرایی حاصل شده و کنترل نرم‌افزار از حلقه همگرایی دمای سوخت خارج می‌شود. اما اگر اختلاف توزیع دمای سوخت مذکور بیشتر از معیار همگرایی باشد، حلقه تا زمانی که شرط همگرایی برآورده شود، تکرار می‌گردد.

پس از همگرایی توزیع دمای سوخت، شرط بحرانیت بررسی می‌شود. سپس راکتیویته محاسبه شده و بر اساس آن غلظت اسیدبوریک جدید بدست آمده و حلقه خارجی انجام می‌شود. این حلقه تا زمانی که قدر مطلق راکتیویته به دست آمده کمتر از معیار همگرایی بحرانیت (۳۰pcm) باشد تکرار می‌شود. وقتی این شرط برقرار شد، همگرایی حلقه خارجی حاصل شده است. در صورت برقراری شرط بحرانیت، محاسبات توزیع Burn-up برای گام زمانی بعدی انجام می‌شود.

نرم‌افزار BNCP قادر به محاسبه تمامی پارامترهای فیزیک نوترونی از قبیل توزیع توان شعاعی و محوری، توزیع مصرف سوخت شعاعی و محوری، توزیع شار شعاعی، محوری و الحاقی در دو گروه انرژی حرارتی و سریع، توزیع دمای سوخت، گپ، غلاف، دما و چگالی خنک کننده، غلظت اسیدبوریک بحرانی، عمر نوترونهای آنی، کسر نوترونهای تاخیری بصورت گروهی و موثر، عمر هسته های مولد بصورت گروهی و موثر، ارزش دیفرانسیلی و انتگرالی میله‌های کنترل، ضرایب راکتیویته دمایی، چگالی، توان، غلظت اسید بوریک، اثر سموم و همچنین قادر به درونیابی نتایج توزیع مصرف سوخت، توان، دما و شار است.

از آنجا که محاسبات قلب با استفاده از چنین نرم افزارهایی بسیار زمانبر می باشد در نرم افزار BNCP از قابلیت پردازش موازی استفاده شده است. اجرای کامل محاسبات پارامترهای قلب در طول یک سیکل کاری با استفاده از یک کامپیوتر سرور دارای پردازنده Intel Xeon با ۳۵ هسته و با فرکانس ۲,۶ گیگا هرتز درحدود دو ساعت به طول می‌انجامد. لازم بذکر است کلیه ماژول‌ها و رابط گرافیکی نرم افزار با زبان برنامه‌نویسی دلفی (نسخه ۱۰ سال ۲۰۱۷) نوشته شده است.

نتایج:

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت‌های مختلف کاری و تغییرات پارامترهای فیزیک نوترونی محاسبه شده با نرم‌افزار BNCP در طول سیکل به همراه خطای نسبی در مقایسه با مدرک آلبوم فیزیک نوترونی سیکل سوم راکتور بوشهر که با رنگ زرد مشخص شده،در جدول ۱ ارایه شده است. لازم بذکر

است در ستون آخر جدول ۱، مقدار پارامتر مصرف سوخت با مقادیر مشابه بدست آمده از نرم افزار روسی KASKAD مقایسه شده است. همانطور که در جداول ۱ و۲ و شکل۲ مشاهده می‌شود، مقادیر پارامترهای فیزیک نوترونی محاسبه شده با نرم‌افزار BNCP در طول سیکل همانند غلظت اسید بوریک بحرانی، توزیع توان نسبی شعاعی ومحوری، ضرایب راکتیویته، کسر نوترونهای تاخیری و ... از دقت کافی برخوردار است.

بحث و نتیجه‌گیری:

پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار BNCP از نظر دقت به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱) پارامترهایی که دقت آنها نزدیک به آلبوم است. بیشتر پارامترهای محاسبه شده در این دسته قرار می‌گیرند.

۲) پارامترهایی که مقدار آنها نسبت به آلبوم فاصله دارد.

دلیل اختلاف داده های بدست آمده با داده های آلبوم را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

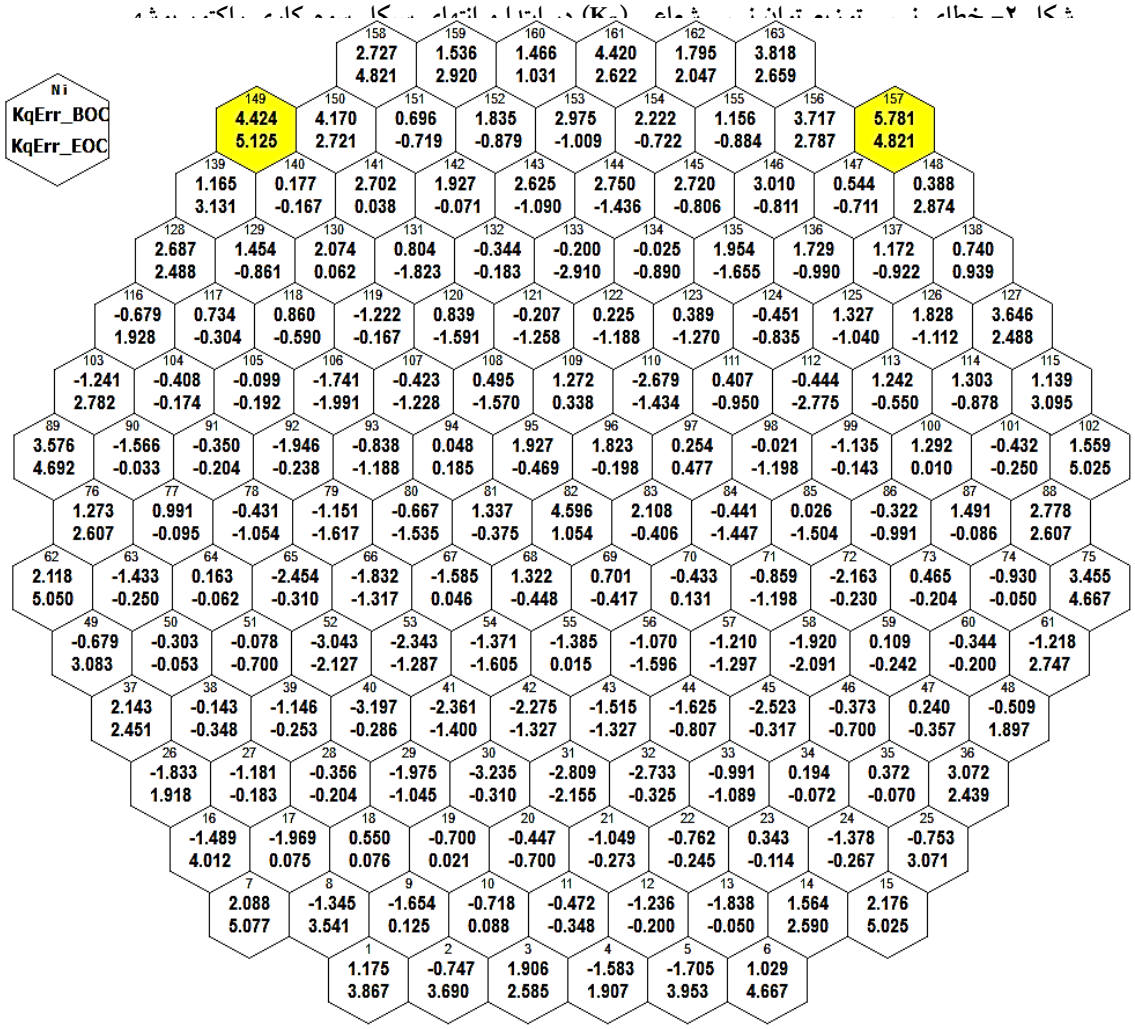
- تفاوت در کتابخانه سطوح مقاطع نوترونی استفاده شده در محاسبات سلولی
- تفاوت در کدهای محاسبات سلولی و قلب و ترموهیدرولیک استفاده شده با کدهای روسی
- تفاوت الگوریتم استفاده شده در حل مساله در نرم‌افزار BNCP نسبت به الگوریتم مذکور در کدهای نوترونیک روسی
- کوچک بودن برخی از پارامترها که تغییرات در آنها منجر به خطای نسبی بزرگ می‌شوند مانند برخی از ضرایب راکتیویته.

جدول۱- مقایسه پارامترهای فیزیک نوترونی محاسبه شده با نرم‌افزار BNCP با مدرک آلبوم فیزیک نوترونی سیکل سوم راکتور بوشهر

T_{EFPD}	C_{ba}, g/kg (Err(g/kg))	Kq (Err(%))	Kv (Err(%))	$\partial\rho/\partial\gamma$, pcm/(g/cm^3) (Err(%))	$\partial\rho/\partial T_{H2O}$, pcm/°C (Err(%))	$\partial\rho/\partial T_U$, pcm/°C (Err(%))	$\partial\rho/\partial C$, pcm/(g/kg) (Err(%))	β_{eff}, % (Err(%))	BU MW.D/kgU (Err(%))
0.0	6.564 (-0.016)	1.2821 (-2.871)	1.4477 (-9.292)	10862.686 (-4.040)	-22.0545 (-6.031)	-2.7495 (-1.452)	-1337.4821 (-4.466)	0.647 (1.094)	13.73 (-0.290)
10.0	6.293 (-0.197)	1.2894 (-2.466)	1.4391 (-8.103)	13353.082 (15.812)	-28.3937 (16.251)	-2.7538 (-1.297)	-1296.8838 (-8.022)	0.641 (0.156)	14.156 (-0.310)
20.0	6.091 (-0.109)	1.2996 (-1.843)	1.4425 (-7.235)	14362.010 (15.683)	-30.6453 (13.520)	-2.7603 (-1.065)	-1310.2545 (-7.074)	0.635 (0.794)	14.583 (-0.253)
50.0	5.454 (-0.056)	1.3194 (-1.390)	1.4560 (-4.211)	16090.894 (15.055)	-34.6526 (12.361)	-2.7822 (-0.989)	-1321.097 (-7.616)	0.619 (-0.161)	15.864 (-0.226)
100.0	4.302 (-0.028)	1.3332 (-0.730)	1.4489 (-2.628)	18628.837 (12.222)	-39.4156 (12.842)	-2.8239 (-0.567)	-1350.5388 (-7.497)	0.594 (-1.000)	17.998 (-0.177)
150.0	3.156 (-0.006)	1.3319 (-0.307)	1.4949 (0.667)	22051.588 (12.165)	-47.6623 (13.997)	-2.8805 (-0.329)	-1382.6871 (-7.202)	0.571 (-3.220)	20.133 (-0.183)
200.0	1.998 (-0.002)	1.3228 (-0.166)	1.5077 (2.009)	25290.688 (11.413)	-54.8887 (12.662)	-2.9346 (-0.184)	-1422.6647 (-7.015)	0.549 (-3.684)	22.268 (-0.143)
250.0	0.872 (-0.018)	1.3135 (0.038)	1.5137 (3.254)	28516.607 (10.916)	-62.2591 (11.957)	-2.9858 (-0.473)	-1547.9066 (-0.755)	0.528 (-5.714)	24.403 (-0.111)

T_{EFPD}	C_{ba}, g/kg (Err(g/kg))	Kq (Err(%))	Kv (Err(%))	$\partial\rho/\partial\gamma$, pcm/(g/cm^3) (Err(%))	$\partial\rho/\partial T_{H2O}$, pcm/°C (Err(%))	$\partial\rho/\partial T_U$, pcm/°C (Err(%))	$\partial\rho/\partial C$, pcm/(g/kg) (Err(%))	β_{eff}, % (Err(%))	BU MW.D/kgU (Err(%))
291.1 (-0.11)	0 (0)	1.3049 (0.300)	1.4827 (1.694)	30611.3601 (8.628)	-66.1018 (7.886)	-3.0235 (-0.215)	-1583.9572 (-0.380)	0.512 (-6.909)	26.160 (-0.153)

شکل ۲- خطای نسبت توزیع توان نرمشده (K_q) در ابتدا و انتهای سیکل سوم کاری راکتور بوشهر



جدول۲- اثر زینان اشباع در توان‌های مختلف در طول سیکل سوم کاری راکتور بوشهر

Power, % N_{nom}	Equilibrium xenon poisoning, % (Err(%))	
	0 EFPD	290.14 EFPD
100	2915.84 (0.0)	3177.58 (6.2)
80	2727.71 (-0.4)	2970.66 (3.8)
60	2486.84 (-0.6)	2689.40 (0.8)

Power, % N_{nom}	Equilibrium xenon poisoning, % (Err(%))	
	0 EFPD	290.14 EFPD
40	2124.49 (-1.0)	2269.10 (-3.7)
0	0 (0.0)	0 (0.0)

پیشنهادها:

در جهت بهبود عملکرد نرم افزار می‌توان موارد زیر را به آن اضافه نمود:

- ایجاد کتابخانه ثوابت گروهی ماکروسکوپی توسط کد DRAGON جهت تسریع در انجام محاسبات،
- توسعه واسط گرافیکی در جهت کاربری آسان نرم افزار،
- افزودن قابلیت محاسبه پارامترهای نوترونیک میله‌های سوخت مانند توزیع توان شعاعی (K_r) و نرخ حرارت خطی (Q_l) میله سوخت.

مراجع:

[1] Use and Development of Coupled Computer Codes for the Analysis of Accidents at Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1539, 2003.

[2] K. Jareteg et al., Coupled fine-mesh neutronics and thermal-hydraulics – Modeling and implementation for PWR fuel assemblies, Annals of Nuclear Energy, 84, 244-257, 2015.

[3] A. Rais et al., Methods and Models for the Coupled Neutronics and Thermal-Hydraulics Analysis of the CROCUS Reactor at EFPL,Science and Technology of Nuclear Installations ,Article ID 237646, 2015.

[4] G. Marleau, A. H´ebert, R. Roy, A User Guide for Dragon Version4, Report IGE-294, ´Ecole Polytechnique de Montr´eal, 2013.

[5] PARCS v2.6, U.S. NRC Core Neutronics Simulator, USER MANUAL, 2004.

[6] COBRA-EN: Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, User Manual, Oak Ridge National Laboratory, 2001.

[7] In-Core Fuel Management: Album of Neutron Physical Characteristics of Bushehr NPP Unit1 Cycle 3.

[8] J. Vojackova, F. Novotny, K. Katovsky, Safety analyses of reactor VVER 1000, Energy Procedia, Vol 127, 352-359 , 2017.

[9] Y. Kozmenkov, S. Kliem, and U. Rohde, Validation and verification of the coupled neutron kinetic/thermal hydraulic system code DYN3D/ATHLET. Annals of Nuclear Energy. vol. 84. pp. 153-165, 2015.

[10] Andrew M. Ward et al., Methods and Model Development for Coupled RELAP5/PARCS Analysis of the Atucha-II Nuclear Power Plant, Science and Technology of Nuclear Installations, Article ID 759847, 2011.