



تحلیل زیر کانال گرمترین مجتمع سوخت در قلب رآکتور ماژولار SMART

ظریفی، احسان*؛ سپانلو، کامران

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده

هدف از این تحقیق، تحلیل ترموهیدرولیکی گرمترین مجتمع سوخت رآکتور ماژولار SMART با استفاده از روش تحلیل زیرکانال می باشد. روش تحلیل زیر کانال یک روش شناخته شده برای تحلیل ترموهیدرولیکی میله های سوخت رآکتور در یک مجتمع سوخت می باشد. بر اساس این روش هر بسته سوخت به صورت شبکه ای از حجم های کنترلی با مقادیر میانگین در این حجم ها مدل سازی می گردد. براین اساس معادلات بقا توسط روش حجم محدود، جداسازی شده و دستگاه معادلات جبری غیر خطی بدست آمده، با استفاده از روشهای عددی حل شده است. جهت اعتبار سنجی نتایج از کد COBRA-EN استفاده شده است.

کلمات کلیدی: رآکتور ماژولار SMART، تحلیل زیرکانال، گرمترین مجتمع سوخت، کد COBRA-EN

Subchannel analysis of hottest fuel assembly in SMART modular reactor core

Ehsan Zarifi*, Kamran Sepanloo

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

Abstract

The purpose of this study is to investigate the thermal-hydraulic analysis of SMART modular SMART reactor hot fuel assembly by subchannel analysis method. The subchannel analysis method is a known method for the thermal-hydraulic analysis of the fuel rods in a fuel assembly. According to this method, each fuel assembly is modeled as a network of control volumes with average values in these volumes. The conservation equations and conduction heat transfer equation for fuel and clad have been derived and discretized by finite volume method. The governing non-linear algebraic equations are solved by numerical iteration methods. To validate the applied approach, the model and COBRA-EN code results are compared.

Keywords: SMART modular reactor, Subchannel analysis, hot fuel assembly, COBRA-EN code

مقدمه

در سالهای اخیر تمایل به ساخت رآکتورهایی با ابعاد کوچک و ایمنی بالا به دلیل نیاز به واحدهای کوچک در شبکه های برق بخصوص در مناطق دورافتاده و شهرهای کم جمعیت در حال افزایش می باشد. از مشخصه های اصلی این رآکتورها می توان به ایمنی ذاتی بالا، سادگی تجهیزات، زمان بهره برداری بیشتر، کارایی بالاتر، هزینه بهره برداری کمتر نسبت به رآکتورهای بزرگتر اشاره نمود. طراحی مفهومی رآکتور SMART در کره جنوبی از سال ۱۹۹۷ شروع و تا سال ۲۰۰۵ ادامه داشت. طراحی پایه این رآکتور نیز از سال ۲۰۰۲ آغاز و تا

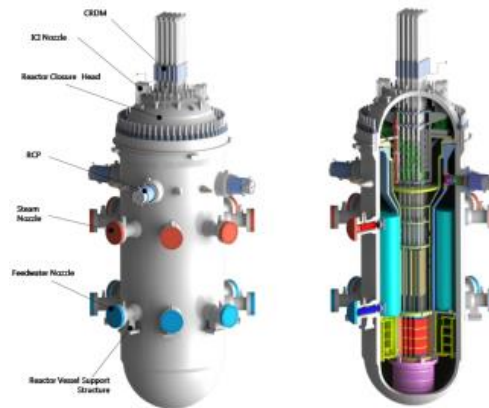
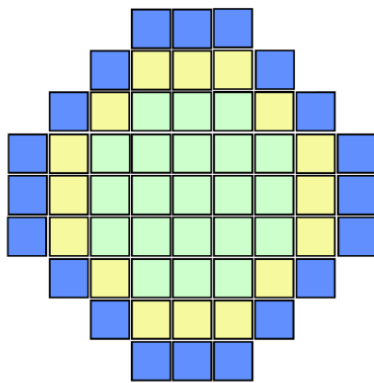


سال ۲۰۱۵ ادامه داشت. این رآکتور هم اکنون در فاز عملیاتی قرار دارد و هم اکنون نمونه اولیه آن در حال ساخت می باشد و مطابق قراردادی که بین کره جنوبی و عربستان سعودی در مارس ۲۰۱۵ منعقد شد، قرار شد این رآکتور در کشور عربستان نیز ساخته شود. Chang از انستیتو تحقیقات انرژی کره جنوبی، در کنفرانس بین المللی آینده سیستم های هسته ای در ایالات متحده آمریکا رآکتور SMART را به عنوان یک رآکتور پیشرفته سایز کوچک یکپارچه برای تولید توان و تولید آب شیرین معرفی نمود [۱]. Kang و همکارانش طی مقاله ای طرح مطالعاتی رآکتور تحت فشار یکپارچه SMART را بررسی نمودند [۲]. Kim و همکارانش با ارائه مقاله ای در چهارمین کنفرانس بین المللی رآکتورهای سایز کوچک و متوسط به عنوان گزینه های جدید نیروگاههای هسته ای در کشورها به بررسی توسعه طراحی و بازبینی رآکتورهای تحت فشار ماژولار یکپارچه از جمله SMART پرداختند [۳]. همچنین Kim و همکارانش طی مقاله ای در کنفرانس رآکتورهای نسل چهارم در ژاپن برنامه های تایید و بازبینی رآکتور SMART ارائه نمودند [۴]. Zee در سال ۲۰۰۷ طی گزارشی به بررسی توسعه طراحی سیستم های رآکتور SMART پرداخت [۵]. Lee و همکارانش طی مقاله ای با استفاده از کد COREDAX به بررسی رفتار نوترونی قلب رآکتور SMART پرداختند [۶]. Kim و همکارانش در ژورنال مهندسی انرژی و قدرت، SMART را به عنوان نخستین رآکتور پیشرفته مجتمع دارای مجوز بررسی نمودند [۷]. در این تحقیق با استفاده از روشهای حل عددی به بررسی رفتار ترموهیدرولیکی گرمترین مجتمع سوخت رآکتور SMART پرداخته شده و پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دما، فشار، سرعت و چگالی، تعیین گردیده است.

روش کار

SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) یک رآکتور سایز کوچک از نوع آب تحت فشار به صورت مجتمع و یکپارچه بوده که تمامی تجهیزات مدار اول آن در داخل محفظه تحت فشار رآکتور قرار داده شده است. توان حرارتی این رآکتور ۳۳۰ MW(th) و توان الکتریکی آن در حدود ۱۰۰ MW(e) می باشد. در شکل (۱) نمایی از محفظه تحت فشار این رآکتور نشان داده شده است. محفظه تحت فشار این رآکتور شامل قلب، مولد بخار، ناحیه پائین رونده، شومینه، مکانیزم هیدرولیکی میله های کنترل، محفظه بخار و کنترل کننده فشار داخلی می باشد. در رآکتور SMART برداشت حرارت از طریق مکانیزم جریان اجباری سیال انجام می پذیرد. گرمای ناشی از شکافت در سوخت تولید و این گرما در اثر انتقال حرارت رسانشی به غلاف سوخت منتقل می گردد. افزایش دمای غلاف باعث ایجاد یک جریان همرفتی از سطح آن به سیال اطراف می گردد. جریان سیال پس از عبور از یکسری صفحات مشبک در قسمت بالای محفظه تحت فشار، وارد مولد بخار می گردد. در اثر تبادل حرارتی بین سیکل اولیه و ثانویه مولد بخار، دمای سیال کاهش یافته و به سمت پائین محفظه جریان یافته و در نهایت دوباره وارد قلب رآکتور می گردد. قلب رآکتور SMART

شامل ۵۷ بسته سوخت مربعی با غنای کمتر از ۵ درصد طول فعال ۲۰۰۰ mm می باشد. نمایی از قلب این رآکتور در شکل (۲) نشان داده شده است. هر بسته های سوخت این رآکتور شامل ۲۶۴ میله سوخت، ۲۴ کانال راهنمای میله کنترل و ۱ کانال اندازه گیری می باشد. بسته های سوخت این رآکتور مشابه رآکتورهای PWR می باشد. رآکتیویته قلب رآکتور با استفاده از میله های جاذب سوختنی Gd_2O_3 با ترکیب اورانیوم با ۱/۸ درصد وزنی کنترل می گردد. در جدول (۱) مشخصات رآکتور SMART که به عنوان شرایط مرزی مسئله استفاده شده است ارائه گردیده است.



شکل ۱- نمایی از محفظه رآکتور SMART [۶] شکل ۲- نمایی از قلب رآکتور SMART [۶]

جدول ۱- مشخصات رآکتور SMART [۶]

Parameter	Value
Reactor Type:	Integral PWR
Thermal Capacity (MW(th)):	330
Coolant/Moderator:	Light water
Primary Circulation:	Forced circulation
System Pressure (MPa):	15.5
RPV Diameter (m):	6.5
Coolant Temperature, Core Outlet (°C):	323
Coolant Temperature, Core Inlet (°C):	296
Fuel Type/Assembly Array:	UO ₂ pellet/17x17 square
Fuel Active Length (m):	2
Number of Fuel Assemblies:	57
Fuel Enrichment (%):	< 5

معادلات بقا بصورت زیر استخراج می گردند [۸].

- معادله پیوستگی

معادلات بقا جرم در حجم کنترل انتخابی k ، شامل جریان محوری و عرضی بین کانالهای مجاور می باشد. معادله فوق بیان می کند که جریان خروجی از زیر کانال شماره k ، شامل جریان ورودی به این کانال و جریانهای عرضی از کانالهای مجاور می باشد.



$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} - G'_{jk}) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* = 0 \quad (1)$$

در معادله فوق $\Delta Z(m)$ معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی، $t (s)$ معرف زمان، $S_{kj} (m)$ بیانگر فاصله عرضی مابین دو زیر کانال مجاور j, k ، معرف چگالی سیال، $\rho (kg/m^3)$ معرف سرعت سیال در حجم کنترل انتخابی می باشد. G^* و \dot{G} معرف جریان عرضی اغتشاش و دگرسویی بین دو کانال مجاور می باشد.

- معادله مومتم محوری

$$-A \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - A \frac{\partial(P)}{\partial z} - AC_k \rho u^2 - A \rho_{nf} g \sin \theta = A \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} u_k - G'_{jk} u_j) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* u_{kj}^* \quad (2)$$

ضریب C_k در معادله مومتموم به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$C_k = \frac{f}{2D_e} \quad (3)$$

که در این معادله $P(Pa)$ معرف فشار سیال در حجم کنترل انتخابی از زیر کانال، f معرف ضریب اصطکاک، $De(m)$ قطر هیدرولیکی، $A(m^2)$ معرف سطح مقطع زیر کانال $\rho (kg/m^3)$ معرف چگالی سیال، Δz معرف ارتفاع حجم کنترل انتخابی، $g (m/s^2)$ شتاب جاذبه، $u_k (m/s)$ و $u_j (m/s)$ سرعت های محوری در زیرکانال های مجاور k و j می باشد.

- معادله مومتم عرضی [۹]

معادله مومتم عرضی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\Delta X_k}{\Delta t} (w_k - w_k^n) + \overline{U'_{kj} w_k^*} - \overline{U'_{k-1} w_{k-1}^*} = \frac{s_k}{l_k} g_c P_{kj-1} \Delta X - \frac{1}{2} (k_G \frac{\Delta X v^*}{sl}) |w_k| w_k \quad (4)$$

ترم اول در سمت راست معادله فوق، اختلاف فشار جانبی روی سطوح (مرزهای) حجم کنترل مومتم می باشد در حالی که ترم بعد، افت فشار در جریان جانبی از طریق گپ می باشد.

- معادله انرژی

معادله انرژی را نیز می توان به همین ترتیب استخراج نمود.

$$A \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + A \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} + \sum_j S_{kj} (G'_{kj} h_k - G'_{jk} h_j) + \sum_j S_{kj} G_{kj}^* h_{kj}^* = q' + A \frac{DP}{Dt} \quad (5)$$

$q' (w/m^2)$ معرف گرمای اضافه شده به زیر کانال k از میله های سوخت مجاور می باشد. $h (kJ/kg)$ معرف آنتالپی سیال می باشد. عبارتهای در سمت چپ معادله معرف نرخ افزایش آنتالپی سیال، تغییرات محوری آنتالپی و آنتالپی منتقل شده در اثر جریان عرضی دگرسویی و اغتشاش می باشد. با توجه به مقاومت های حرارتی بین سطح خارجی دیواره غلاف و بالک سیال، معادله انتقال حرارت به صورت زیر نوشته می شود.



$$\Delta T_w = (T_w - T_b) = \frac{\dot{q}''}{h} = \frac{\dot{q}'}{2\pi R_{co} h} \quad (6)$$

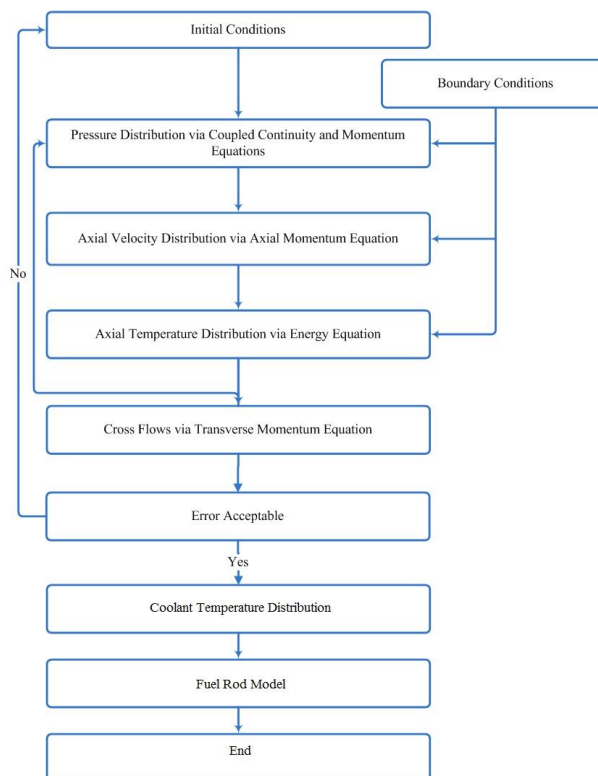
در این معادله T_w دمای دیواره غلاف و T_b دمای بالک سیال خنک کننده می باشد. h ضریب هدایت حرارتی سیال می باشد:

$$h = \frac{NuK}{D} \quad (7)$$

ضریب انتقال حرارت در رابطه (۷) در جریان آشفته برای لوله (کانال) های دایره ای از طریق معادله زیر محاسبه می گردد [۸]:

$$(Nu)_{c.t.} = 0.0256(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \quad (8)$$

معادلات بقا به روش حجم محدود با بکارگیری الگوریتم **simple** جداسازی و با از استفاده از نرم افزار فورترن برنامه نویسی شدند. در شکل زیر فلوچارت محاسبات عددی به روش زیر کانال آورده شده است.

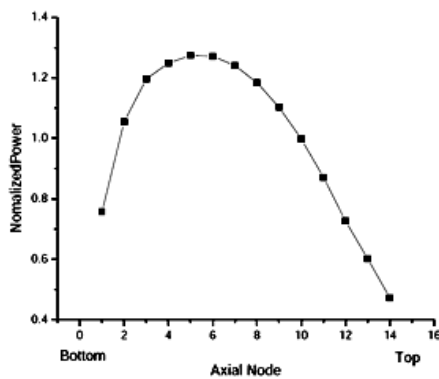


شکل ۳- فلوچارت برنامه نویسی به روش تحلیل زیر کانال

نتایج

جهت انجام محاسبات، از توزیع توان حرارتی ارائه شده در مرجع [۶] استفاده شده است. در شکل (۴) توزیع ضریب حداکثر توان (PPF: Power Peaking Factor) شعاعی و در شکل (۵) ضریب حداکثر توان

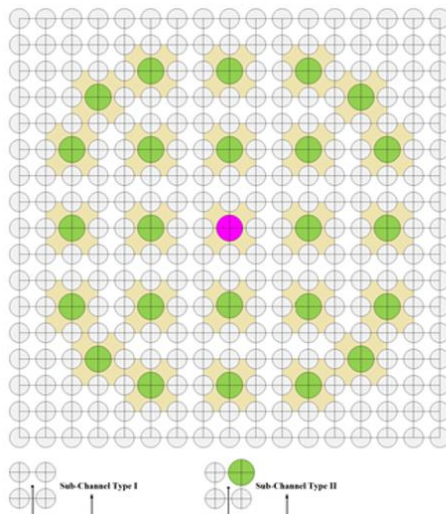
محوری در قلب رآکتور SMART نشان داده شده است [۶]. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است بیشترین توان حرارتی در سوخت مرکزی ایجاد می‌گردد که ضریب توان حرارتی شعاعی آن $PPF=1.24597$ می‌باشد. در شکل (۶) چیدمان یک مجتمع سوخت در رآکتور SMART نشان داده شده است.



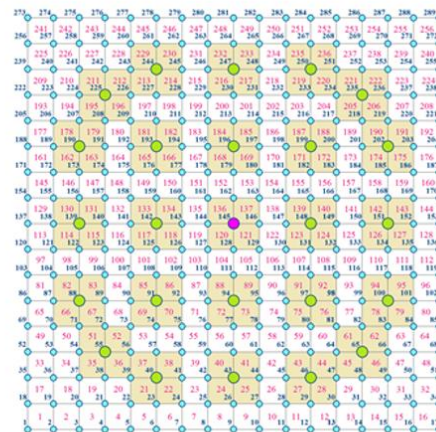
شکل ۵- توزیع ضریب حداکثر توان محوری در قلب رآکتور SMART [۶]

		0.77044	0.91345	0.77044				
		0.796	1.05127	1.10517	1.05127	0.796		
		0.796	1.0745	1.05004	1.13649	1.05004	1.0745	0.796
0.77044	1.05127	1.05004	1.1901	1.18329	1.1901	1.05004	1.05127	0.77044
0.91345	1.10517	1.13649	1.18329	1.24597	1.18329	1.13649	1.10517	0.91345
0.77044	1.05127	1.05004	1.1901	1.18329	1.1901	1.05004	1.05127	0.77044
		0.796	1.0745	1.05004	1.13649	1.05004	1.0745	0.796
		0.796	1.05127	1.10517	1.05127	0.796		
		0.77044	0.91345	0.77044				

شکل ۴- توزیع ضریب حداکثر توان شعاعی در قلب رآکتور SMART [۶]

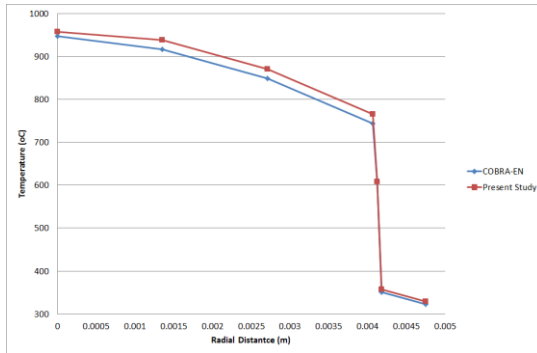


شکل ۶- مش بندی و چیدمان میله های سوخت در یک مجتمع سوخت

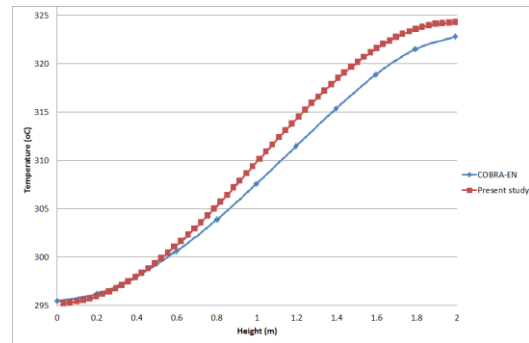


جهت اعتبار سنجی معادلات بکار رفته در روش تحلیل زیرکانال، نتایج حاصل از تحلیل گرم ترین مجتمع سوخت با نتایج کد COBRA-EN مقایسه شده است. در شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب توزیع محوری میانگین دمای سیال و توزیع شعاعی دما در مرکز گرم ترین میله سوخت با نتایج کد COBRA مقایسه شده اند. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد که همخوانی خوبی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و کد COBRA

وجود دارد به طوری که اختلافات مربوط به بکارگیری روش حل متفاوت در محاسبات سوخت و معادلات متفاوت برای ضریب انتقال حرارت در گپ می باشد.

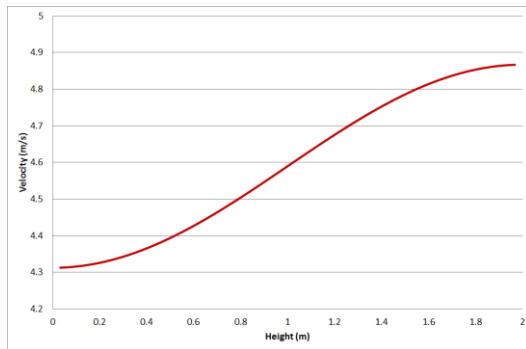


شکل ۸- مقایسه توزیع شعاعی دما در مرکز گرم ترین میله سوخت با نتایج کد COBRA

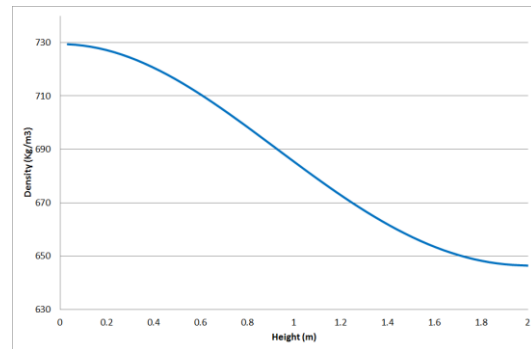


شکل ۷- مقایسه توزیع محوری میانگین دمای سیال در گرم ترین مجتمع سوخت با نتایج کد COBRA

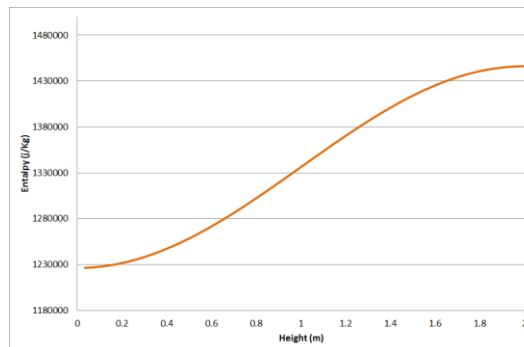
در شکل‌های (۹) الی (۱۱) به ترتیب توزیع محوری چگالی، سرعت و آنتالپی در گرمترین کانال ارائه شده اند.



شکل ۱۰- توزیع محوری سرعت سیال



شکل ۹- توزیع محوری چگالی سیال



شکل ۱۱- توزیع محوری آنتالپی سیال

بحث و نتیجه گیری



هدف از اجرای این تحقیق، بررسی رفتار ترموهیدرولیکی گرمترین مجتمع سوخت رآکتور SMART بوده است. با بررسی خروجی، حساسیت و ارتباط پارامترهای مختلف ترمونوترونیکی عملاً می‌توان با بکارگیری مدل‌های ارائه شده رفتار یک نیروگاه هسته‌ای را در شرایط پایدار و گذرا پیش بینی نمود. نتایج نشان دادند به دلیل انتقال حرارت از میله‌های سوخت به خنک‌کننده دمای سیال مطابق شکل (۷) افزایش می‌یابد. دمای ورودی در حدود ۲۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد و دمای خروجی به حدود ۳۲۴ درجه سانتیگراد می‌رسد. افزایش دما در طول کانال باعث کاهش چگالی سیال شده بطوریکه چگالی سیال از 730 kg/m^3 به حدود 650 kg/m^3 می‌رسد. همچنین بنابر قانون پیوستگی $\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$ و با توجه به اینکه سطح مقطع کانال ثابت است، هر چقدر چگالی سیال کاهش یابد به تبع آن سرعت سیال در قلب افزایش می‌یابد. بررسی توزیع دما در یک میله سوخت نشان می‌دهد که حدکثر دمای مرکز سوخت در حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد می‌گردد که این میزان بسیار کمتر از حد ایمنی دمای ذوب سوخت رآکتور (در حدود 2700°C) می‌باشد.

مراجع

- 1- M.H. Chang, et al., "SMART – AN Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation," Proc. of Global 99, International Conference on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, USA, Aug. 29 - Sept. 3, 1999.
- 2- C.S. Kang, et. al., "A Planning Study Project of Developing an Integral Reactor (SMART)", KAERI/CM-469/2001, KAERI, Taejon, Korea, 2001.
- 3- Si-Hwan Kim, Keung Koo Kim, and Moon Hee Chang, "Design Development and Verification of a System Integrated Modular PWR", Proceedings of the fourth International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Croatia, 2002.
- 4- Si-Hwan Kim, Keung Koo Kim, Ji Won Yeo, Moon Hee Chang and Sung Quun Zee, "Design Verification Program of SMART", GENES4/ANP2003, Sep. 15-19, Kyoto, JAPAN, 2003.
- 5- S.K. Zee, "Design Report for SMART Reactor System Development", KAERI/TR-2846/2007, KAERI, Taejon, 2007.
- 6- Lee, J., Hyuck Won, J., Zin Cho N., Ho Ryu, Y. and Yeop Park, J. (2010). A Preliminary Analysis of SMART Reactor Core Using the COREDAX Code. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. Jeju. Korea.
- 7- Keung Koo Kim, Wonjae Lee, Shun Choi, Hark Rho Kim and Jaejoo Ha, "SMART: The First Licensed Advanced Integral Reactor", Journal of Energy and Power Engineering 8, 94-102, 2014.
- 8- Todreas, N.E. and Kazimi, M.S., "Nuclear system II, Elements of Thermal Hydraulic Design". Taylor & Francis, USA, 1990.
- 9- Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., Brega, E. (1999) COBRA-EN, an updated version of the COBRA-3C/ MIT code for thermal-hydraulic transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores. Report no. 1010/1, Italy.