



محاسبه‌ی تغییرات ضریب انتقال حرارت گپ در مجتمع‌های مختلف سوخت رآکتورهای نوع VVER-1000

محمد ره‌گشای*، خلیل شکری

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، صندوق پستی: ۷۷۵-۱۴۵۱۵، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله با استفاده از دو مدل Calza-Bini و مدل گپ توصیف شده در کد Relap5 برای ضریب انتقال حرارتی گپ (فضای خالی بین قرص سوخت و غلاف) به محاسبه‌ی ضریب هدایت گپ در فواصل محوری مختلف در مجتمع‌های مختلف سوخت تابش ندیده در رآکتورهای نوع VVER-1000 پرداخته شده است. با توجه به وابستگی دو مدل فوق به دمای سطح خارجی سوخت و دمای سطح داخلی غلاف، ضریب هدایت گپ با استفاده از دو روش توزیع مدل ضریب انتقال حرارت گپ با برنامه‌ی نوشته شده برای به دست آوردن توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن، و توزیع مدل ضریب انتقال حرارت گپ با خروجی کد COBRA-EN (برای به دست آوردن توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن) محاسبه شده است. پس از انجام محاسبات و مقایسه‌ی نتایج حاصل با نتایج تجربی گزارش FSAR ارایه شده توسط شرکت سازنده‌ی رآکتور بوشهر، نتیجه گرفته شد که مدل گپ توصیف شده در کد Relap5، خطای زیادی (در حدود ۲۵ درصد) داشته اما مدل گپ Calza-Bini خطای کم‌تری (کم‌تر از ۵ درصد) دارد و تا حد زیادی با نتایج گزارش FSAR مطابقت می‌کند. بنابراین مدل جدیدی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت گپ پیشنهاد شد که با ترکیب دو مدل فوق، ضریب انتقال حرارت گپ در هر یک از فواصل محوری را با خطای کم‌تری محاسبه می‌نماید.

کلید واژه‌ها: VVER-1000، مجتمع‌های سوخت، ضریب انتقال حرارت گپ، کد COBRA-EN، مدل Calza-Bini، میله‌های سوخت

Computation of Gap Conductance in Different Fuel Assemblies in VVER-1000 Type Reactors

M. Rahgoshay*, Kh. Shokri

Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch, P.O.Box: 14515-775, Tehran - Iran

Abstract: In this paper, a calculation for fresh fuels gap conductance at different axial lengths of fuel assemblies of the VVER-1000 type reactors has been made using two models of Calza-Bini and Relap5. By applying these two models, the dependency of the fuel outer surface temperature and the clad inner surface temperature of the gap conductance has been determined upon using following procedures: Coupling gap conductance model computer programming to obtain temperature at different axial lengths of the fuel and clad; and coupling gap conductance model to the COBRA-EN output code. The results of calculations and comparison with the FSAR results showed that the Relap5 model is less accurate than the Calza-Bini model. The Calza-Bini model agrees well with the FSAR results. By combining these two models, a new model with a better accuracy was proposed for the gap conductance.

Keywords: VVER-1000, Fuel Assemblies, Gap Conductance, COBRA-EN Code, Calza-Bini Model, Fuel Rods

*email: M.rahgoshay@gmail.com



۱. مقدمه

در سوخت رآکتورهای نوع VVER-1000، بین قرص سوخت و غلاف آن فضای خالی‌ای وجود دارد که به آن گپ^(۱) گفته می‌شود. از مزایای وجود این گپ، تجمع محصولات شکافت گازی شکل در آن و افت زیاد دما بین غلاف و سوخت می‌باشد. قلب رآکتورهای نوع VVER-1000 شامل ۱۶۳ مجتمع سوخت با غناهای متفاوت می‌باشد. بعضی از مجتمع‌های سوخت دارای میله‌های کنترل و برخی دیگر شامل میله‌های جاذب حاوی سموم سوختنی^(۲) می‌باشند. در شکل ۱ قلب رآکتورهای نوع VVER-1000 و انواع مختلف مجتمع‌های سوخت نمایش داده شده است [۱].

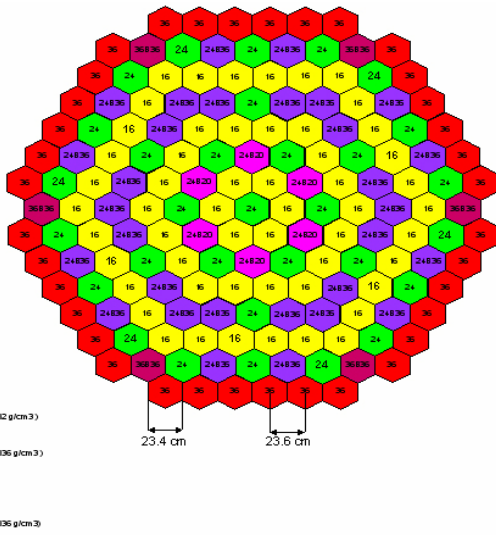
با توجه به متفاوت بودن قدرت حرارتی در هر یک از مجتمع‌های سوخت ضریب انتقال حرارت گپ (h_g) در مجتمع‌های مختلف سوخت و هم‌چنین در فواصل محوری مختلف، متفاوت خواهد بود. این مقاله به محاسبه‌ی این مقادیر می‌پردازد. لازم به ذکر است که با توجه به تقارن قلب، محاسبات برای یک ششم آن انجام پذیرفته است.

۲. روند انجام محاسبات

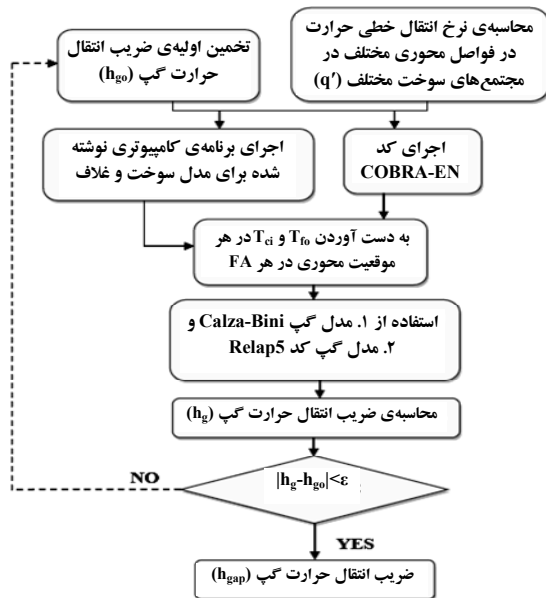
ابتدا نرخ انتقال خطی حرارت^(۳) در مجتمع‌های مختلف سوخت و در فواصل محوری مختلف با توجه به مقادیر ضریب بیشینه‌سازی قدرت^(۴) هر یک از مجتمع‌های سوخت و مقادیر قدرت نسبی در فواصل محوری مختلف به دست آمده است [۱]. سپس با استفاده از این مقادیر و تخمین یک مقدار اولیه برای ضریب انتقال حرارت گپ، و با استفاده از کد COBRA-EN یا برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده برای محاسبه‌ی توزیع حرارت در سوخت و غلاف آن، دمای سطح خارجی سوخت (T_{fo}) و دمای سطح داخلی غلاف (T_{ci}) آن تعیین شده است. با قرار دادن این مقادیر در هر یک از مدل‌های پیش گفته، ضریب انتقال حرارت گپ محاسبه شده است. در صورت همگرا شدن به محاسبه خاتمه داده شده است. در شکل ۲ روندنمای محاسبات انجام شده نمایش داده شده است.

۳. محاسبه‌ی نرخ انتقال خطی حرارت

با توجه به نیاز مدل‌های مختلف ارایه شده برای به دست آوردن h_g به T_{ci} و T_{fo} و با توجه به این که به دست آوردن این دماها خود مستلزم استفاده از کد COBRA یا برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده است، و هم‌چنین با توجه به نیاز آن‌ها به مقادیر نرخ انتقال خطی حرارت، لازم است ابتدا نرخ انتقال خطی حرارت در مجتمع‌های مختلف سوخت و در فواصل محوری مختلف محاسبه شود.



شکل ۱. قلب رآکتور نوع VVER-1000.



شکل ۲. روندنمای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت گپ.

نرخ انتقال خطی حرارت در مجتمع‌های مختلف سوخت با توجه به ویژگی‌های رآکتورهای نوع VVER-1000 (داده شده در جدول ۱) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱]

$$\dot{q}' = \frac{P_{th}}{N_{F.A} \times N_{F.R} \times L_{act}} \times (P.F) \quad (1)$$

که در آن،

P_{th} : قدرت گرمایی کل قلب؛

$N_{F.A}$: تعداد مجتمع‌های سوخت موجود در قلب؛

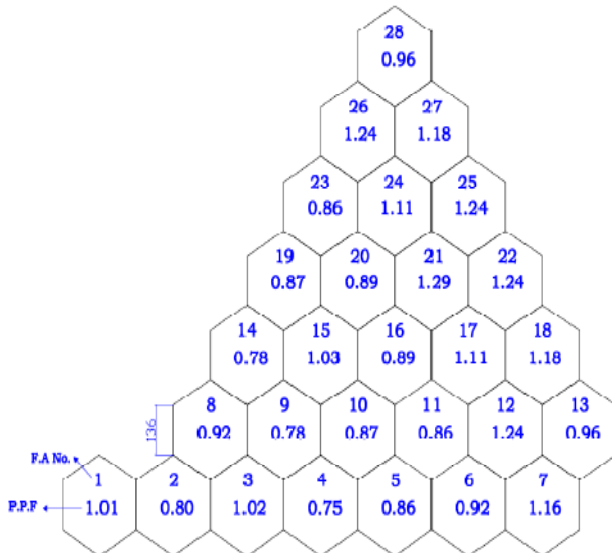
$N_{F.R}$: تعداد میله‌های سوخت موجود در یک مجتمع سوخت؛

L_{act} : طول فعال میله‌ی سوخت؛

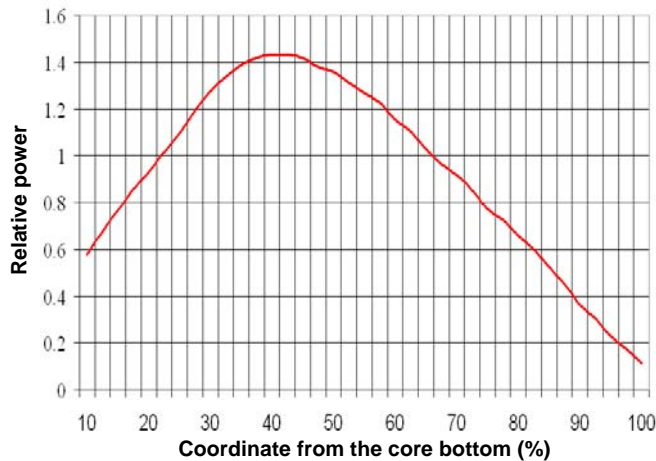


جدول ۱. مشخصات رآکتورهای نوع VVER-1000

مقدار	ویژگی
۳۰۰۰	قدرت گرمایی اسمی رآکتور (MW)
۱۵٫۷	فشار خنک کننده در خروجی قلب (Mpa)
۲۹۱	دمای خنک کننده در ورود به رآکتور (°C)
۳۲۱	دمای خنک کننده در خروج از رآکتور (°C)
۱۶۳	تعداد مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور (pcs)
	شکل هندسی مجتمع سوخت
۱٫۶۰؛ ۲٫۴۰؛ ۳٫۶۲	غناي مجتمع سوخت در ابتدای بارگذاری
۳۱۱	تعداد دسته میله‌ها در هر مجتمع سوخت (pcs)
	نوع سوخت
UO ₂	قرص‌های سوخت
۹٫۱×۱۰ ^{-۳}	قطر خارجی غلاف (m)
۷٫۷۳×۱۰ ^{-۳}	قطر داخلی غلاف (m)
۷٫۵۷×۱۰ ^{-۳}	قطر خارجی قرص سوخت (m)
۱٫۵×۱۰ ^{-۳}	قطر داخلی قرص سوخت (m)
	مواد غلاف
	Zr+۱٪Nb



شکل ۳. ضریب بیشینه‌سازی قدرت برای مجتمع‌های مختلف سوخت رآکتورهای نوع VVER-1000.



شکل ۴. توزیع قدرت نسبی برحسب فاصله از ته قلب.

و P.P.F، ضریب بیشینه‌سازی می‌باشد. این ضریب برای

مجتمع‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است [۱].

برای محاسبه‌ی نرخ انتقال خطی حرارت در فواصل محوری مختلف در یک مجتمع سوخت لازم است ضریب بیشینه‌سازی قدرت آن مجتمع سوخت در قدرت نسبی به دست آمده از نمودار شکل ۴ ضرب شود. نمودار شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی توزیع قدرت نسبی برحسب فاصله از ته قلب می‌باشد. بنابراین نرخ انتقال خطی حرارت در هر یک از فواصل محوری از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱]

$$\dot{q}' = \frac{P_{th}}{N_{F.A} \times N_{F.R} \times L_{act}} \times (P.P.F \times Relative Power) \quad (2)$$

۴. معادلات لازم برای محاسبه‌ی توزیع حرارت در سوخت و غلاف آن

معادله‌ی انتقال حرارت هدایتی در مختصات استوانه‌ای این است [۲ و ۳]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

۱.۴ معادلات انتقال شعاعی حرارت در سوخت و غلاف آن

با در نظر گرفتن تقارن زاویه‌ای و انتقال حرارت در راستای شعاعی (شکل ۵) می‌توان معادله‌ی (۳) را ساده‌تر نموده و چنین نوشت [۳ و ۴]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن شرط مرزی داریم:

- در مرز سوخت (سطح خارجی سوخت):

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_f} = \dot{q}''(r_f, t) = \left(\frac{r_g}{r_f} \right) \dot{q}''(r_g, t) \quad (5)$$

- در مرز غلاف (سطح داخلی غلاف):

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_g} = \dot{q}''(r_g, t) = h_{gap} (T_f(t) - T_g(t)) \quad (6)$$

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = \dot{q}''(r_c, t) = h_{wall} (T_c(t) - T_b(t)) \quad (7)$$



۵. مدل‌های مختلف برای محاسبه‌ی ضریب انتقال

حرارت گپ

۱.۵ مدل Calza-Bini

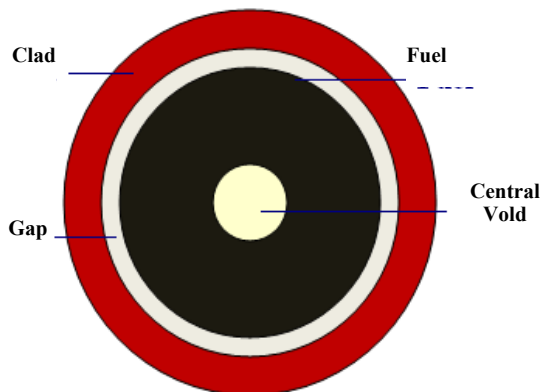
فرض می‌شود گپ یک فضای حلقوی خالی بین سوخت و غلاف است که در ابتدا از گاز خنثی معمولاً هلیوم پر شده است (شکل ۶). اما به تدریج و در اثر مصرف سوخت، گازهای حاصل از محصولات شکافت نظیر زنون و کریپتون و ... نیز به آن افزوده می‌شوند. قرص سوخت معمولاً در اثر تابش ترک می‌خورد که این امر منجر به تغییرات پیرامونی در گپ می‌شود. علاوه بر این سوخت و غلاف دارای انبساط حرارتی متفاوت می‌باشند که این امر موجب تماس مستقیم سوخت-غلاف در برخی نقاط فضای گپ می‌شود. در چنین حالتی ضریب انتقال حرارت گپ (h_g) از رابطه زیر به دست می‌آید [۲]

$$h_g = h_{g.open} + h_{g.contact} \quad (18)$$

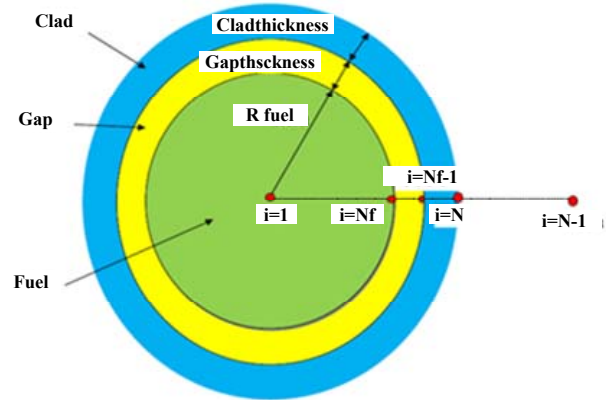
که در آن، $h_{g.open}$ ضریب انتقال حرارت گپ در نبود اتصال و $h_{g.contact}$ ضریب انتقال حرارت گپ در حالت اتصال بین سوخت و غلاف می‌باشد، و

$$h_{g.open} = \frac{k_{gas}}{\delta_{eff}} + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \frac{T_{fo}^4 - T_{ci}^4}{T_{fo} - T_{ci}} \quad (19)$$

که در آن، σ ثابت استفان-بولتزمن، δ_{eff} ضخامت مؤثر گپ، k_{gas} ضریب هدایت حرارتی گاز موجود در گپ، T_{ci} (K) دمای سطح داخلی غلاف، ϵ_c و ϵ_f ضریب بیرون‌دهی سطحی سوخت و غلاف، T_{fo} (K) دمای سطح خارجی سوخت است.



شکل ۶. سوخت رآکتورهای نوع VVER-1000



شکل ۵. نمای بالایی یک میله سوخت رآکتورهای نوع VVER-1000.

۲.۴ روش حل عددی

در حالت پایا داریم [۳ و ۴]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}''' = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}''' = 0 \quad (9)$$

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = q''(r_c, t) = h_{wall} (T_c(t) - T_b(t)) \quad (10)$$

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_f} = q''(r_f, t) = \left(\frac{r_g}{r_f} \right) q''(r_g, t) \quad (11)$$

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = q''(r_c, t) = h_{wall} (T_c(t) - T_b(t)) \quad (12)$$

۳.۴ محاسبه‌ی انتقال حرارت هدایتی در مرکز سوخت ($i=1$) [۲]

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{k}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{dk}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \\ &= \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{dk}{dT} \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} \end{aligned} \quad (13)$$

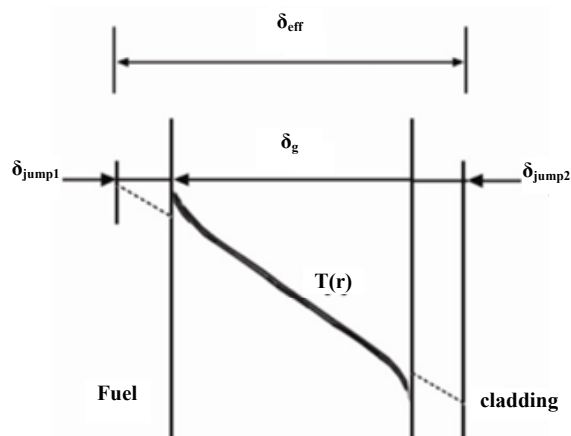
$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_{r=0} \quad (14)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 2k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_{r=0} \quad (15)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 2k_1 \frac{T_2 - 2T_1 + T_0}{h^2} + O(h^2) \quad (16)$$

به واسطه‌ی شرط تقارن $T_r = T_0$ ، بنابراین

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 4k_1 \frac{T_2 - T_1}{h^2} = \frac{-4k_1}{h^2} T_1 + \frac{4k_1}{h^2} T_2 \quad (17)$$



شکل ۷. عدم پیوستگی دمایی در سطح مشترک سوخت-گپ و غلاف-گپ.

کسر انباشت برای گازهای هلیوم و زنون از روابط

$$a_{He} = 0.425 - 2.3 \times 10^{-4} T_g(\text{helium}) \quad (26)$$

$$a_{Xe} = 0.740 - 2.5 \times 10^{-4} T_g(\text{xenon}) \quad (27)$$

و برای سایر گازها از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۵]

$$a_i = a_{He} + \frac{(M_i - M_{He})}{(M_{Xe} - M_{He})} (a_{Xe} - a_{He}) \quad (28)$$

ترک خوردگی سوخت (در اثر تابش)، تورم سوخت یا انبساط ناهمگون سوخت و غلاف آن باعث کاهش ضخامت گپ و در نتیجه تماس احتمالی بین سوخت و غلاف در بعضی نقاط می‌گردد (شکل ۸). با استفاده از رابطه‌ی زیر در محاسبات

گپ این موارد را می‌توان مدل‌سازی کرد [۲]

$$h_{g.contact} = c \frac{2k_f k_c P_i}{k_f + k_c H \sqrt{\delta_g}} \quad (29)$$

که در آن، k_c (W/mK) ضریب هدایت حرارتی غلاف، P_i فشار سطح تماس برحسب پاسکال، C ($18,1130 \text{ m}^{-1/2}$) ثابت عددی، δ_g (m) ضخامت متوسط گپ، H ضریب سختی میسر^(۵)، k_f (W/mK) ضریب هدایت حرارتی غلاف است.

ضریب هدایت حرارتی کل برای ترکیبی از گازها (k_{gas}) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۲]

$$k_{gas} = \prod_{i=1}^n (k_i)^{X_i} = (k_1)^{X_1} \times (k_2)^{X_2} \dots (k_n)^{X_n} \quad (20)$$

با توجه به این که محاسبات این مقاله برای سوخت تابش ندیده انجام شده است و تنها گاز موجود در این حالت هلیوم می‌باشد، بنابراین داریم

$$k_{gas} = (k_{He})^{X_{He}} \quad (21)$$

که در آن، X_{He} کسر مولی گاز هلیوم و برابر ۱، و k_{He} ضریب هدایت حرارتی هلیوم و برابر است با

$$k_{He} = A_{He} \times T_g^{B_{He}} \quad (22)$$

که در آن T_g ، دمای گاز گپ می‌باشد که آن را به صورت میانگین T_{fo} و T_{ci} در نظر می‌گیریم، و

$$A_{He} = 2.64 \times 10^{-3}, \quad B_{He} = 0.0708 \quad (23)$$

با توجه به تعداد اندک مولکول‌های گاز موجود در نزدیکی سطح، عدم پیوستگی دمایی ایجاد شده است (شکل ۷). لذا، ضخامت مؤثر گپ بزرگ‌تر از ضخامت واقعی آن بوده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۵]

$$\delta_{eff} = \delta_{gap} + \delta_{jump1} + \delta_{jump2} \quad (24)$$

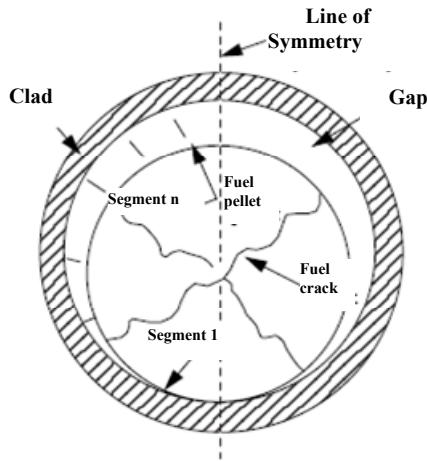
که در آن،

$$\delta_{gap} = 0.108 \text{ (mm)}$$

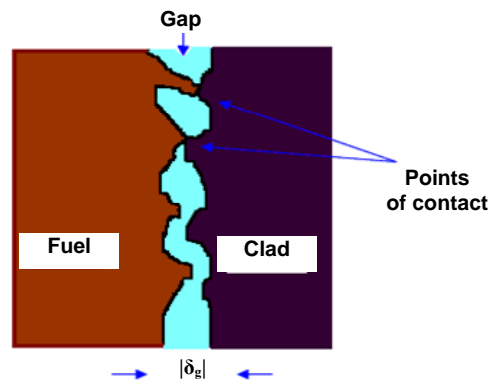
و

$$\delta_{jump1} + \delta_{jump2} = \frac{0.024688 k_g T_g^{0.5}}{P_g \sum_i f_i a_i M_i^{-0.5}} \quad (25)$$

که در آن، M_i ، a_i و f_i به ترتیب، جرم مولکولی کسر انباشت و کسر مولی جزء نام، و P_g فشار گاز گپ برحسب پاسکال می‌باشد.



شکل ۹. شبکه‌بندی گپ.



شکل ۸. تماس بین سوخت و غلاف در بعضی نقاط گپ.

از رابطه‌ی (۳) و در نرخ‌های انتقال حرارت بالاتر از آن از رابطه‌ی (۱۸) برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت گپ استفاده می‌نماید. تمامی این مراحل توسط یک برنامه‌ی کامپیوتری هوشمند انجام می‌پذیرد. مراحل مختلف محاسباتی در مدل جدید به شرح زیر می‌باشد

$$\text{If } q' < 9(\text{kW/m}) \Rightarrow h_g = \frac{k_g}{t_0 + 3.2(R_f + R_c) + (g_1 + g_2)}$$

$$\text{If } q' > 9(\text{kW/m}) \Rightarrow h_g = h_{g.open} + h_{g.contact}$$

$$h_{g.open} = \frac{k_{gas}}{\delta_{eff}} + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \frac{T_{fo}^4 - T_{ci}^4}{T_{fo} - T_{ci}} \text{ و } h_{g.contact} = c \frac{2k_f k_c}{k_f + k_c} \frac{P_i}{\sqrt{\delta_g}}$$

۶. نتایج

با توجه به استفاده از دو مدل Calza-Bini و مدل گپ توصیف شده در کد Rela5 برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت گپ و به کارگیری دو روش متفاوت برای محاسبه‌ی دمای سطح خارجی سوخت و دمای سطح داخلی غلاف، ۴ حالت برای نتایج حاصل وجود دارد:

- ضریب انتقال حرارت گپ، به دست آمده از مدل گپ Calza-Bini و از برنامه‌ی نوشته شده برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف سوخت،
- ضریب انتقال حرارت گپ به دست آمده از مدل گپ توصیف شده در کد Rela5 و استفاده از برنامه‌ی نوشته شده برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن،

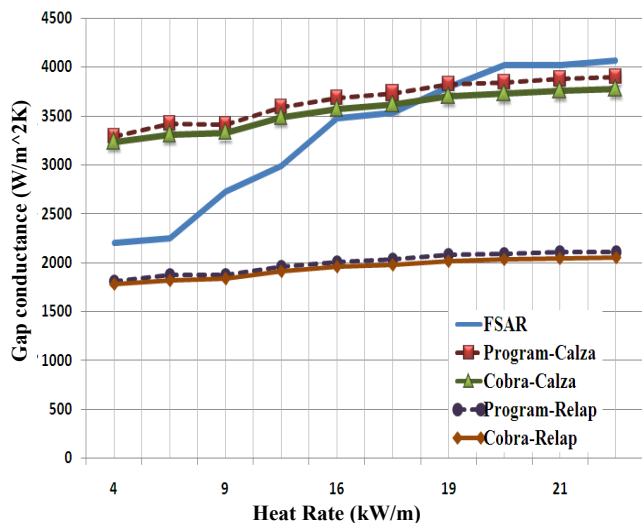
۲.۵ مدل ضریب انتقال حرارتی گپ توصیف شده در کد Relap5 در این مدل، گپ به چندین قسمت با طول‌های مساوی تقسیم می‌شود (شکل ۹). حداکثر تعداد تقسیمات گپ در مقاله‌ی حاضر ۸ می‌باشد [۵].

در این مقاله محاسبات برای سوخت تابش ندیده انجام پذیرفته و از انبساط و انقباض سوخت نیز صرف نظر شده است. ضریب انتقال حرارت گپ در این حالت با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۵]

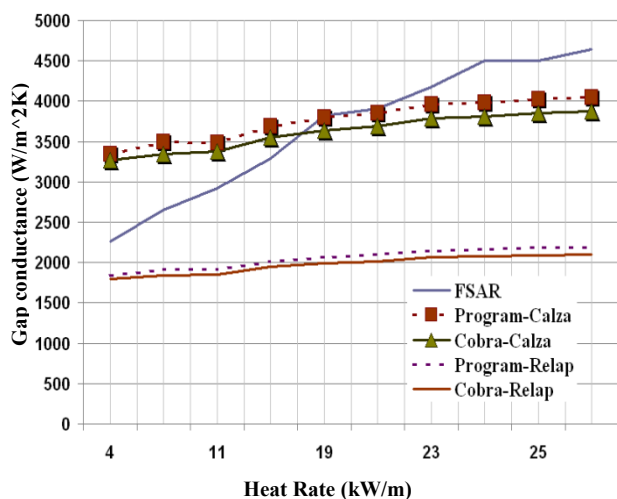
$$h_g = \frac{k_g}{t_0 + 3.2(R_f + R_c) + (g_1 + g_2)} \quad (۳۰)$$

که در آن، k_g (W/mK) ضریب هدایت حرارتی گپ، R_f و R_c (m) ضریب انتقال حرارت گپ، h_g (W/m²K) ناهموازی‌های سطح سوخت و غلاف، T_0 (m) ضخامت اولیه‌ی گپ، $g_1 + g_2$ افزایش ضخامت گپ در اثر عدم پیوستگی دمایی است.

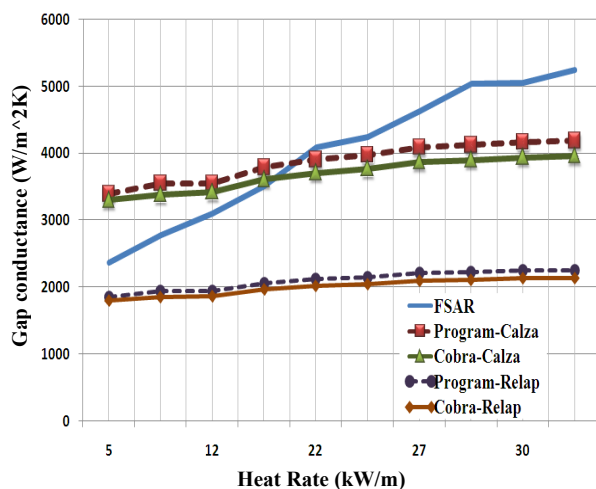
۳.۵ مدل جدید پیشنهادی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت گپ خطای مدل Calza-Bini در مجموع کم‌تر از مدل توصیف شده در کد Relap5 بوده و نتایج آن تا حد زیادی نزدیک به نتایج تجربی FSAR^(۶) می‌باشد. اما در بعضی از فواصل محوری و در نرخ‌های انتقال حرارت کم‌تر از ۹kW/m خطای حاصل از مدل Relap5 در مقایسه با مدل Calza-Bini کم‌تر می‌باشد. لذا برای رسیدن به نتایج بهتر، مدل جدیدی پیشنهاد گردید که ضریب انتقال حرارت گپ را با ترکیب دو مدل فوق محاسبه می‌نماید و در نرخ‌های انتقال حرارت کم‌تر از ۹kW/m از مدل گپ توصیف شده در کد Relap5 و در نرخ‌های انتقال حرارت بالاتر از آن از مدل Calza-Bini استفاده می‌نماید. به عبارت دیگر مدل جدید در نرخ‌های انتقال حرارت کم‌تر از



شکل ۱۱. h_g برای مجتمع سوخت با $P.P.F=0.92$.



شکل ۱۲. h_g برای مجتمع سوخت با $P.P.F=1.11$.



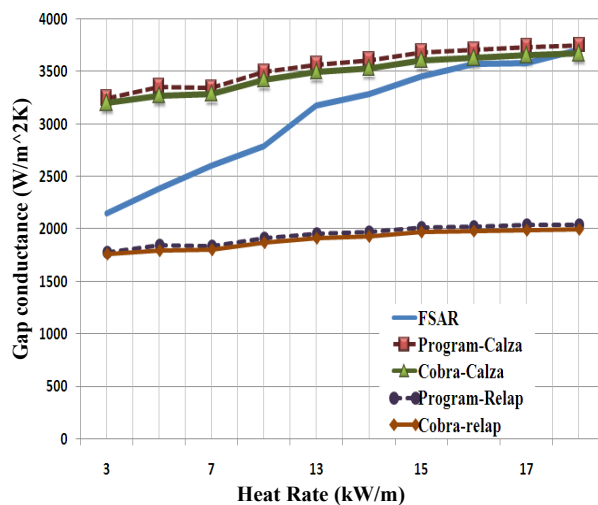
شکل ۱۳. h_g برای مجتمع سوخت با $P.P.F=1.29$.

- ضریب انتقال حرارت گپ، به دست آمده از مدل گپ Calza-Bini و با استفاده از کد COBRA-EN برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن،
 - ضریب انتقال حرارت گپ، به دست آمده از مدل گپ توصیف شده در کد Relap5 و با استفاده از کد COBRA-EN برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن،

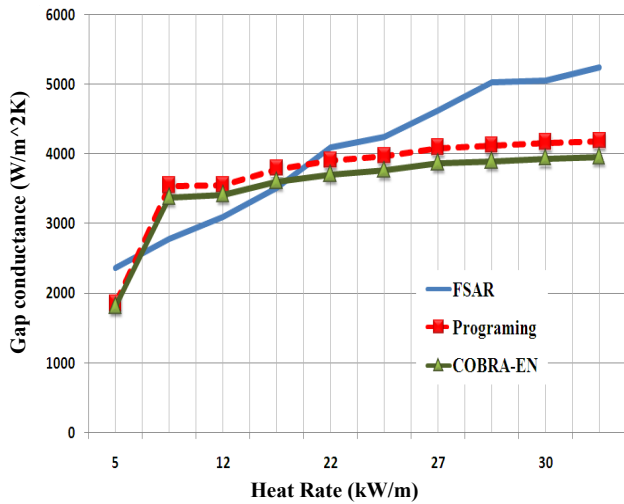
این محاسبات برای همه‌ی مجتمع‌های سوخت موجود در یک ششم قلب انجام گرفته است. ضریب انتقال حرارت گپ در ۴ حالت فوق‌الذکر برای تعدادی از مجتمع‌های سوخت در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ داده شده است.

در مدل جدید، دو مدل فوق ترکیب شده‌اند. بنابراین دو حالت برای نتایج حاصل از این مدل خواهیم داشت:

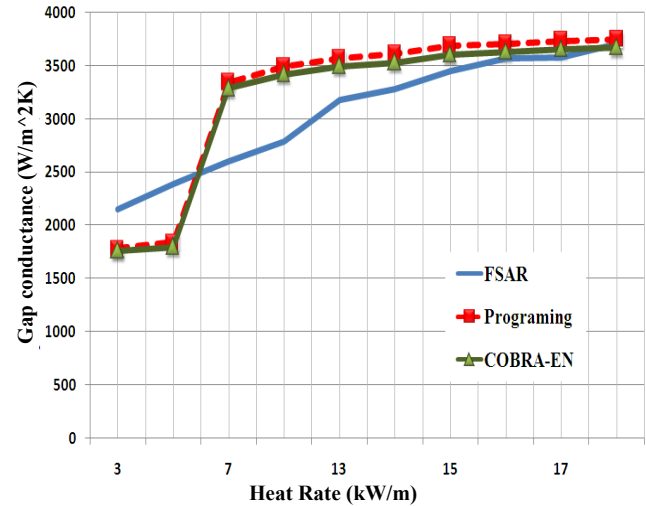
- ضریب انتقال حرارت گپ، به دست آمده از مدل جدید و با استفاده از برنامه‌ی نوشته شده برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن،
 - ضریب انتقال حرارت گپ، به دست آمده از مدل جدید و با استفاده از کد COBRA-EN برای محاسبه‌ی توزیع درجه حرارت در سوخت و غلاف آن
 تأثیر تغییرات ناشی از به کارگیری این مدل برای موارد متناظر با نمودارهای شکل‌های ۱۰ تا ۱۳، در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ مشاهده می‌شود



شکل ۱۰. h_g برای مجتمع سوخت با $P.P.F=0.75$.



شکل ۱۷. h_g به دست آمده از مدل جدید برای مجتمع سوخت با $P.P.F=۱,۲۹$.



شکل ۱۴. h_g به دست آمده از مدل جدید برای مجتمع سوخت با $P.P.F=۰,۷۵$.

۷. بحث و نتیجه‌گیری

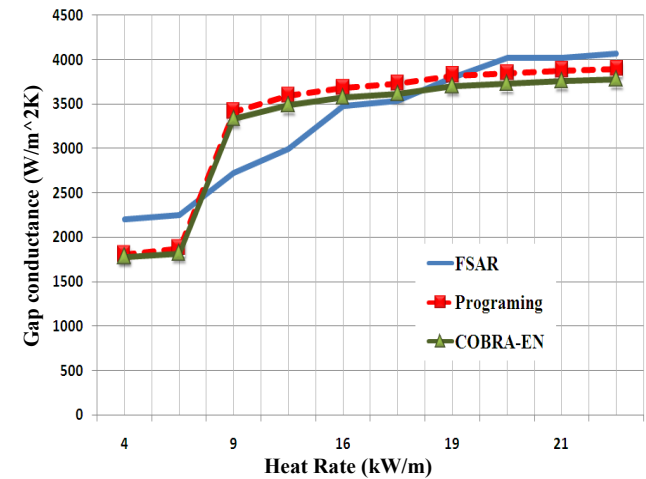
با افزایش نرخ انتقال خطی حرارت، ضریب انتقال حرارت گپ نیز افزایش می‌یابد. این مسئله در نمودارهای شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد.

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از محاسبه با نتایج تجربی مشاهده می‌شود که در مجموع مدل گپ توصیف شده در کد Relap5 خطای زیادی دارد اما نتایج حاصل از مدل Calza-Bini دارای خطای کمی بوده و تا حد زیادی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

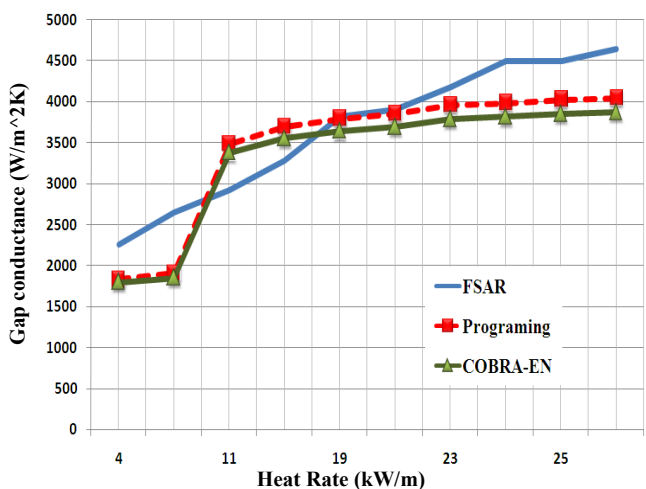
مدل Calza-Bini، مدل مطلوبی برای محاسبه‌ی h_g می‌باشد، اما خطای حاصل از این مدل در برخی فواصل محوری بیش‌تر از مدل گپ توصیف شده در کد Relap5 می‌باشد. مدل جدید پیشنهادی که از ترکیب این دو مدل به دست آمده است، با رفع این نقص، h_g را در هر یک از فواصل محوری با کم‌ترین خطا محاسبه نموده و نتایج مطلوب‌تری را ارائه نموده است. به این ترتیب، مقدار خطا در همه‌ی فواصل محوری به کم‌تر از ۵ درصد کاهش یافته است.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Gap
۲. Burnable Poison
۳. Linear Heat Rate
۴. Power Peaking Factor
۵. Meyer
۶. FSAR: Final Safety Analysis Report, Chapter4



شکل ۱۵. h_g به دست آمده از مدل جدید برای مجتمع سوخت با $P.P.F=۰,۹۲$.



شکل ۱۶. h_g به دست آمده از مدل جدید برای مجتمع سوخت با $P.P.F=۱,۱۱$.



References:

1. Final Safety Report for BUSHEHR VVER-1000 Reactor Chapter 4, Ministry of Russian Federation of Atomic Energy (Atomenergoproekt), Moscow (2003).
2. N. Todress, M.S. Kazimi, "Nuclear system I," Hemisphere Publishing Corporation, New York (1982).
3. ENEL Spa, "COBRA-EN Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Core International," Milano, Italy (1991).
4. M.M. El-WAKIL "Nuclear Heat Transport," Copyright, by International Textbook Company (1971).
5. RELAP5/MOD3 CODE MANUAL-VOLUME I: CODE STRUCTURE, SYSTEM, MODELS, AND SOLUTION METHODS; March (1998).