

بررسی تأثیرات تغییر Burn up در یک Hot fuel pin بر روی ضریب هدایت حرارتی Gap در راکتور VVER-1000 بوشهر

محمد ره گشای* (استادیار گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران)

یاشار رحمانی (دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی راکتور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران)

چکیده:

در این مقاله با بهره‌گیری از مدل Gap کالزا-بینی^۱ [۱] به بررسی تأثیرات تغییر Burn up سوخت بر روی میزان ضریب هدایت حرارتی Gap در یک Hot fuel pin در راکتور VVER-1000 بوشهر می‌پردازیم. با توجه به این نکته که در اثر گذشت زمان و تغییرات Burn up سوخت، محصولات شکافت گازی از جمله گازهای زینان^۲، آرگون^۳ و کریپتون^۴ به ترکیب گازی اولیه Gap که شامل گاز هلیوم می‌باشد اضافه می‌گردد و با توجه به هدایت حرارتی اندک این گازها نسبت به گاز هلیوم، با اجراء و استفاده از کد ORIGEN در این تحقیق و به دست آوردن میزان ترکیب عناصر گازی موجود در Gap در زمان‌های مختلف کاری راکتور، و استفاده از مدل Gap کالزا-بینی، در نگاه اول متوجه می‌شویم که بایستی بروز این تغییرات در ترکیبات گازی Gap باعث کاهش در ضریب هدایت حرارتی Gap گردد، اما با در نظر گرفتن انبساط دمایی در سوخت و غلاف و کاهش ضخامت Gap (به دلیل بالا بودن میزان ضریب انبساط دمایی سوخت نسبت به غلاف) و با بهره‌گیری از مدل Gap مذکور ملاحظه می‌کنیم که ضریب هدایت حرارتی Gap در بازه وسیعی از تغییرات Burn up افزایش می‌یابد و دلیل آن را می‌توان در بالا بودن نرخ کاهشی ضخامت Gap نسبت به نرخ کاهشی ضریب هدایت حرارتی گاز موجود در Gap در خلال تغییرات Burn up دانست که با تشریح این نکته مهم، که دلیل انبساط دمایی در اثر تغییرات Burn up را باید تغییر ترکیبات گازی Gap دانست (چون به دلیل کاهش ضریب هدایت حرارتی گاز موجود در Gap [در اثر Burn up]، انتقال حرارت از سوخت به غلاف دچار نارسایی شده و در نتیجه دمای سوخت افزایش یافته و انبساط دمایی ناشی از آن باعث کاهش ضخامت Gap گردیده، که در نهایت منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی Gap می‌گردد)، بدین ترتیب می‌توان به تحلیل نتایج محاسبات براساس مدل کالزا-بینی (که تا حد زیادی مطابق با نتایج تجربی گزارش FSAR (که توسط شرکت مؤسس روسی راکتور بوشهر ارائه شده است). برای یک Hot fuel pin در راکتور بوشهر [۴] می‌باشد) پرداخت.

کلید واژه:

VVER-1000, Calza-Bini, Burn up, Gap conductivity, Hot Fuel Pin

* m.rahgoshay@Gmail.com

1- Calza- Bini
2- Xenon
3- Argon
4- Krypton

مقدمه:

با توجه به وابسته بودن میزان ضریب هدایت حرارتی Gap به نوع و ترکیبات گازی موجود در فضای Gap ، و مقدار ضخامت فضای Gap بین سوخت و غلاف، و با در نظر گرفتن تأثیر پذیری ضخامت Gap در اثر انبساط دمایی سوخت و غلاف، و لحاظ تأثیرات ناشی از تنوع ضخامتی موجود در Gap به دلیل وجود ترک خوردگی های موجود در سطح سوخت (در اثر قرارگیری سوخت تحت تابش) که در نهایت در اثر انبساط دمایی، این ترک خوردگی ها می تواند باعث اتصال مستقیم سوخت- غلاف در بعضی نقاط فضای Gap گردد، در نهایت ملاحظه می کنیم که ضریب هدایت حرارتی Gap تابعی از پارامترهای گوناگون بوده که خود این پارامترها نیز مستقل از هم نبوده و از همدیگر تأثیر می پذیرند. هدف از این مقاله بررسی تغییرات ضریب هدایت حرارتی Gap و پارامترهای مؤثر در آن در اثر تغییرات $Burn up$ در یک $Hot Fuel Pin$ در راکتور می باشد، که طبق نتایج محاسبات صورت پذیرفته، نرخ این تغییرات در حد مطلوبی مطابق با نتایج تجربی ارائه شده در گزارشات $FSAR$ راکتور بوشهر [۴] می باشد.

روش کار:

با توجه به مدل محاسبات ضریب هدایت حرارتی Gap کالزا- بینی برای حالت بدون اتصال (بین سوخت و غلاف)، ضریب هدایت حرارتی توسط رابطه زیر محاسبه می گردد [۱]:

$$h_{gap-open} = \frac{K_{gas}}{\delta_{eff}} + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \cdot \frac{T_{fo}^4 - T_{ci}^4}{T_{fo} - T_{ci}} \quad (1)$$

$H_{gap-open}$: ضریب انتقال حرارت برای فضای Gap بدون اتصال: $(W / m^2 K)$ δ_{eff} : ضخامت مؤثر Gap .

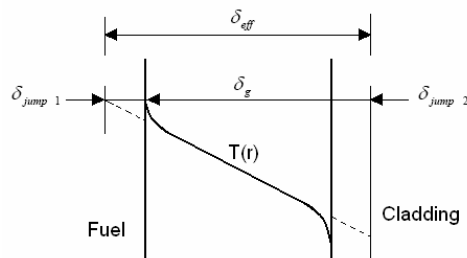
K_{gas} : ضریب هدایت حرارتی گاز موجود در gap : (W / mK) σ : ثابت استفان-بولتزمن: $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 k^4$

ϵ_f, ϵ_c : ضریب بیرون دهی سطحی سوخت و غلاف: $\epsilon_f = 0.86$ [2] $\epsilon_c \cong 0.808642$ [2]

T_{ci} (K): دمای سطح داخلی غلاف سوخت: T_{fo} (K): دمای سطح خارجی سوخت:

با توجه به وجود تعداد اندک ملکول های گازی در جوار سطح، عدم پیوستگی دمایی در این ناحیه به وجود آمده

و طبق شکل ۱ مشاهده می کنیم:



شکل ۱- عدم پیوستگی دمایی در سطح مشترک سوخت- Gap و غلاف- Gap .

بنابراین عرض مؤثر Gap بزرگتر از عرض واقعی آن می باشد که با توجه به رابطه زیر می توان ضخامت Gap را از این طریق محاسبه نمود.

$$\sigma_{eff} = \delta_{gap} + \delta_{jump1} + \delta_{jump2} \quad (2)$$

که در شرایط اتمسفریک مقدار عددی $(\delta_{jump1} + \delta_{jump2})$ برای گاز هلیم در حدود $10\mu m$ و برای گاز زینان $1\mu m$ خواهد بود که در روال محاسبه برحسب ترکیبات گازی موجود در Gap، این پارامتر محاسبه و جایگذاری می گردد. ضریب هدایت حرارتی گازی کل (Kgas) برای یک ترکیب چهار گانه (که از گازهای هلیم، زینان، کریپتون و آرگون تشکیل یافته باشد) از طریق رابطه زیر تعریف می گردد:

$$K_{gas} = (K_{He})^{X_{He}} (K_{Xe})^{X_{Xe}} (K_{Kr})^{X_{Kr}} (K_{Ar})^{X_{Ar}} \quad (3)$$

که X_{He} ، X_{Kr} ، X_{Xe} ، X_{Ar} درصد ترکیبی گازهای مذکور بوده و ضریب هدایت حرارتی هر یک از گازها از طریق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$K_{(pure\ gas)} = A \times 10^{-4} T^{0.79} (W/m^{\circ}K) \quad (4) \quad T_{gap} = \frac{T_{fo} + T_{ci}}{2} (K) \quad (5)$$

Tgap: دمای گاز (K)

نوع گاز	He	Ar	Kr	Xe
A	15.8	1.97	1.15	0.72

با توجه به تأثیرات ترک خوردگی سوخت (در اثر تابش)، تورم سوخت یا انبساط ناهمگون در سوخت و غلاف که باعث کاهش ضخامت Gap و بروز اتصال احتمالی در بعضی نقاط Gap (بین سوخت و غلاف) می گردد بنابراین با بهره گیری از رابطه زیر می توان این تأثیرات را در محاسبات Gap مدل نمود:

$$h_{contact} = C \frac{2K_f K_c}{K_f + K_c} \cdot \frac{P_i}{H \sqrt{\delta_g}} \quad (6)$$

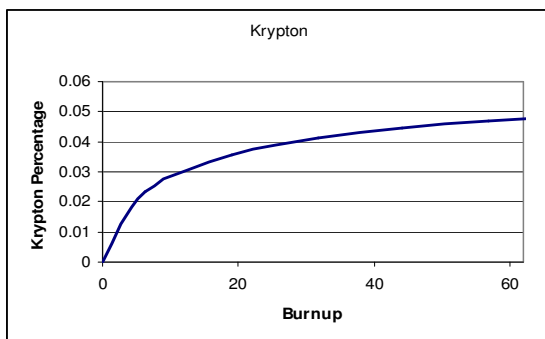
C ثابت عددی: $18.1130m^{-1/2}$ Pi فشار سطح اتصال (Pa) Kc ضریب هدایت حرارتی غلاف (W/mK)

Kf ضریب هدایت حرارتی سوخت (W/mK) H meyer سختی (Pa) δ_g : عرض متوسط gap (m)

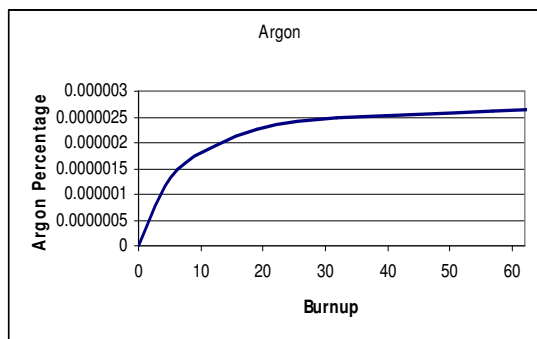
با این تفصیل ضریب هدایت حرارتی کل gap در یک Hot Fuel Pin با توجه به مطالب قید شده و لحاظ تأثیرات پارامتریک مختلف بر روی ضریب H gap، از طریق رابطه زیر تشریح می گردد:

$$h_{gap} = (h_{gap-open}) + (h_{contact}) \quad (7)$$

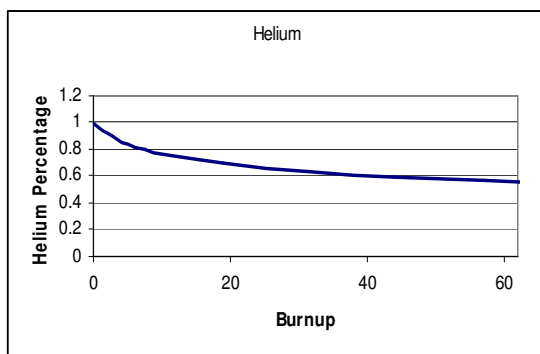
حال با نوشتن فایل ورودی متناسب با شرایط کاری موجود در مقاله و اجراء آن توسط کد ORIGEN [۳] میزان غلظت گازهای موجود در فضای Gap (بین سوخت و غلاف) یک Hot Fuel Pin را برحسب تغییرات Burn up به دست آورده و درصد ترکیبی آنها را در فضای Gap محاسبه کنیم. در نمودارهای ۲ و ۳ و ۴ و ۵ به بیان نرخ تغییرات و درصد ترکیبی گازهای هلیم، آرگون، کریپتون و زینان برحسب تغییرات Burn up می پردازیم:



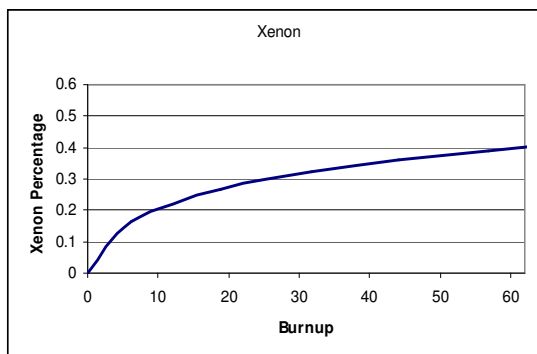
شکل (۳): درصد ترکیبی گاز کریپتون (در درون Gap)



شکل (۲): درصد ترکیبی گاز آرگون (در درون Gap)



شکل (۵): درصد ترکیبی گاز هلیم (در درون Gap)



شکل (۴): درصد ترکیبی گاز زینان (در درون Gap)

با توجه به این که نتایج گزارش FSAR [۴] (در مورد نرخ تغییرات ضریب هدایت حرارتی Gap در یک Hot Fuel Pin برحسب Burn up) در توان خطی ثابت 44.8 KW/m به دست آمده بنابراین با توجه به این که در این مقاله قصد مقایسه نتایج و محاسباتمان را با نتایج تجربی گزارش FSAR داریم بدین ترتیب اساس محاسبات را بر پایه توان خطی 44.8 KW/m قرار می دهیم و به محاسبات دمایی لازم در مدل Gap کالزا- بینی طبق راهکار زیر می پردازیم: با مفروض بودن دمای ورودی خنک کننده، به محاسبه دمای متوسط خنک کننده در لحظه آغاز محاسبات (که Burn up صفر می باشد) در قلب راکتور برای یک Hot Fuel Pin از طریق رابطه زیر

$$P = 2\dot{m}C_{cool} [T_{cool_{ave}}(0) - T_{cool_{in}}] \quad (8) \quad C_{cool} \text{ ظرفیت گرمایی ویژه آب: } \frac{J}{kgk} \quad \dot{m} \text{ دبی جرمی: } \frac{kg}{s}$$

دمای متوسط خنک کننده در لحظه صفر کاری: $T_{cool_{ave}}(0)$ توان حرارتی یک Hot Fuel Pin: P دمای ورودی خنک کننده: $T_{cool_{in}}$

با توجه به وابسته بودن پارامتر C_{cool} به دمای متوسط خنک کننده بنابراین جهت حل این رابطه با اعمال حدس دمایی برای پارامتر $T_{cool_{ave}}(0)$ و محاسبه C_{cool} برحسب این دما و جایگذاری در رابطه (۸) در صورتی که تفاضل دو طرف معادله برابر با 0.001 یا کوچک تر از آن گردید محاسبه پایان می یابد در غیر این صورت با اعمال یک سیستم هوشمند همگرایی و تکرار حدس زنی (در بازه مقداری پیش بینی شده) و انجام محاسبات به صورت چرخشی، محاسبات تکرار می پذیرد تا شرط مورد نظر محقق گردد. حال با اتمام محاسبه دمای متوسط خنک کننده (در لحظه آغاز محاسبات)، دمای سطح خارجی غلاف را نیز برای Hot Fuel Pin می توان از طریق رابطه زیر به دست آورد [۱]:

$$T_{clad_{out}}(0) = \frac{q'_0}{2\pi R_{Co} h_{cool}(0)} + T_{cool_{ave}}(0) \quad (9)$$

R_{Co} (meter) شعاع سطح خارجی غلاف سوخت: H_{cool} ضریب همرفت آب:

$T_{clad_{out}}$ (k) دمای سطح خارجی غلاف در Hot Fuel Pin

که در گام بعدی دمای متوسط غلاف نیز از طریق زیر محاسبه می گردد [۱]:

$$T_{clad_{ave}}(0) = q'_0 \left(\frac{1}{2\pi R_{Co} h_{cool}} + \frac{\ln\left(\frac{R_{Co}}{R_{ci}}\right)}{4\pi K_{clad}} \right) + T_{cool}(0) \quad (10)$$

R_{ci} ضریب هدایت حرارتی غلاف: K_{clad} شعاع داخلی غلاف:

که با توجه به وابسته بودن نحوه محاسبه K_{clad} به دمای متوسط غلاف، با بهره گیری از روش مشابه به کار برده شده در محاسبه C_{cool} دمای متوسط غلاف را در زمان آغاز محاسبه به دست می آوریم. دمای سطح داخلی غلاف نیز به سادگی از طریق رابطه زیر به دست می آید [۱]:

$$T_{clad_{in}}(0) = q'_0 \left(\frac{1}{2\pi R_{Co} h_{cool}} + \frac{\ln\left(\frac{R_{Co}}{R_{ci}}\right)}{2\pi K_{clad}} \right) + T_{cool}(0) \quad (11)$$

جهت محاسبه دمای سطح خارجی سوخت از رابطه زیر استفاده می کنیم [۱]:

$$T_{fuel_{out}}(0) = q'_0 \left(\frac{1}{2\pi R_{gap} h_{gap}} + \frac{1}{2\pi R_{Co} h_{cool}} + \frac{\ln\left(\frac{R_{Co}}{R_{ci}}\right)}{4\pi K_{clad}} \right) + T_{cool}(0) \quad (12)$$

Rgap : شعاع متوسط Gap

در این رابطه با توجه به وابسته بودن محاسبات H gap (از طریق مدل کالزا-بینی) به دمای سطح خارجی سوخت، جهت حل این مشکل، با اعمال حدس در میزان دمای سطح خارجی سوخت و جایگذاری در معادله (۱۲)، H gap را از طریق این معادله (۱۲) به دست آورده و با توجه به این که در محاسبات مدل کالزا-بینی نیاز به پارامتر Kf داریم بدین ترتیب با بهره گیری از معادله مربوط به دمای متوسط سوخت خواهیم داشت:

که در این معادله با توجه به معلوم بودن $T_{fuel_{out}}$ فرضی، و وابسته بودن پارامتر Kf به دمای متوسط سوخت مثل روش مشابهه ای که جهت محاسبه K clad و C cool به کار بردیم در این مورد نیز Kf و دمای متوسط سوخت را

$$T_{fuel_{ave}}(0) = \frac{0.5q'_0}{4\pi K_f} + T_{fuel_{out}} \quad (13)$$

در یک Hot fuel pin از این طریق محاسبه می نمائیم. حال با جایگذاری پارامترهای محاسبه شده به کار رفته در مدل gap، ضریب هدایت حرارتی gap را از این طریق به دست می آوریم، اگر H gap به دست آمده از طریق مدل gap کالزا-بینی (که در آن ترکیبات گازی gap در لحظه صفر لحاظ شده است) برابر با H gap به دست آمده از طریق معادله (۱۲) بود (یا تفاوت ناچیزی بین این دو مقدار وجود داشت) نتیجه می گیریم که حدس دمایی $T_{fuel_{out}}$ و مقدار H gap به دست آمده برحسب این دما صحیح می باشد در غیر این صورت روال چرخشی محاسبات با اعمال حدس جدیدتر تا بدانجا تکرار می گردد که شرط تفاضل ناچیز طبق رابطه زیر:

$[10^{-3} \leq (\text{به دست آمده از معادله (۱۲)}) - \text{H gap} - (\text{مدل کالزا-بینی}) \text{ H gap}]$ محقق شود (شایان ذکر است که در برنامه نویسی انجام شده، با استفاده از یک سیستم تشخیص همگرایی هوشمند در برنامه، روال چرخشی محاسبات به سرعت همگرا شده و شرط مذکور محقق می گردد). دمای مرکزی سوخت نیز از طریق رابطه زیر محاسبه می گردد [۱]:

$$T_{fuel_{in}}(0) = \frac{q'_0}{4\pi K_f} + T_{fuel_{out}}(0) \quad (14)$$

حال با توجه به روال محاسباتی مشروحه، با در نظر گرفتن معادله اول ترمودینامیک (قانون بقای انرژی) و اعمال حجم‌های کنترلی برای هر کدام از المان‌های سوخت، غلاف و خنک کننده خواهیم داشت [۲] و [۵] و [۶] و [۸]:

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = P - 4\pi K_f L_{tot} (T_{fuel_{in}}(t) - T_{fuel_{out}}(t)) \quad (15)$$

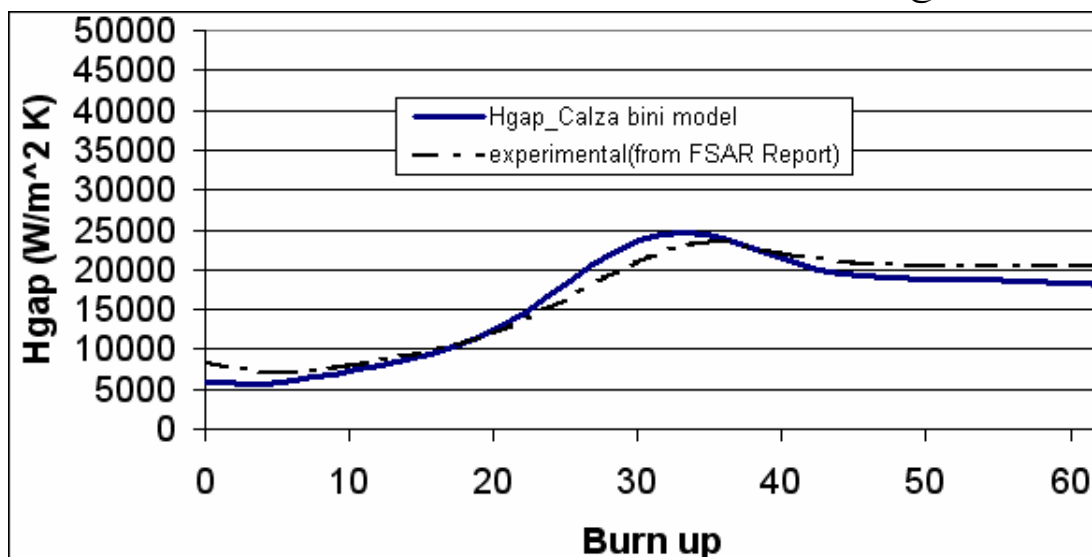
$$M_{clad} C_{clad} \frac{\partial T_{clad}}{\partial t} = (T_{fuel_{out}}(t) - T_{clad_{in}}(t))(2\pi R_{gap} h_{gap} L_{tot}) - (T_{clad_{out}}(t) - T_{cool_{ave}}(t))(2\pi h_{cool} R_{co} L_{tot}) \quad (16)$$

$$M_{cool} C_{cool} \frac{dT_{cool}}{dt} = \dot{m}_{cool} C_{cool} (T_{cool_{in}}(t) - T_{cool_{out}}(t)) + h_{cool} A [T_{clad_{out}}(t) - T_{cool}(t)] + \dot{m} g (Z_{in} - Z_{out}) + \frac{1}{2} \dot{m}_{cool} \left[\frac{\dot{m}_{cool}}{A_2^2} \left(\frac{1}{\rho_{in}^2} - \frac{1}{\rho_{out}^2} \right) \right] \quad (17)$$

$$T_{out}(t) = 2T_{cool_{ave}}(t) - T_{in} \quad (18)$$

A_2 : Hot fuel pin مساحت کل سطح خارجی غلاف در	M clad: Hot fuel pin جرم غلاف در
Mf: Hot fuel pin جرم سوخت در یک	C clad: طرفیت گرمایی ویژه غلاف:
Cf: طرفیت گرمایی ویژه سوخت:	Ltot: طول کل میله های سوخت:
$T_{fuel_{in}}$ دمای مرکزی سوخت:	Mcool: جرم کل خنک کننده:
ρ_{in} چگالی خنک کننده در لحظه ورود به قلب:	A: مساحت سطح عبوری خنک کننده در کانال:
Z_{in} ارتفاع سطح زیرین قلب راکتور از سطح زمین:	ρ_{out} چگالی خنک کننده در لحظه خروج از کانال:
Z_{out} ارتفاع سطح بالایی قلب راکتور از سطح زمین:	

بدین ترتیب با معلوم بودن دماهای اولیه و با بهره گیری از متد محاسباتی تفاضل محدود، با ادامه روال محاسباتی متغیر با زمان در معادلات ۹ تا ۱۸، قادر خواهیم بود که تأثیرات انبساط دمایی در سوخت و غلاف و همچنین تغییرات ترکیبات گازی موجودی در gap (در اثر گذشت زمان) را در محاسبات دمایی و همچنین محاسبات مربوط به مدل gap لحاظ نماییم. حال با انجام محاسبات و بهره گیری از نتایج کد ORIGEN نرخ تغییرات ضریب هدایت حرارتی gap در توان خطی ثابت 44.8 KW/m برحسب تغییرات Burn up در یک Hot fuel pin مطابق باشکله ۶ تشریح می گردد.



شکله ۶- مقایسه تغییرات ضریب هدایت حرارتی Gap در یک Hot fuel pin

برحسب تغییرات Burn up محاسبه شده توسط مدل Calza-Bini با نتایج تجربی گزارش FSAR

(که توسط شرکت مؤسس روسی راکتور VVER-1000 یوشهر ارائه شده است.)

نتیجه گیری:

با مشاهده نمودار شکل (۶) و بررسی نرخ تغییرات H gap ملاحظه می‌کنیم که علیرغم افزایش غلظت گازهای زینان، کریتون و آرگون با افزایش Burn up، که به دلیل ضریب هدایت حرارتی اندک این گازها نسبت به گاز هلیوم بایستی شاهد کاهش ضریب هدایت حرارتی Gap باشیم، ضریب هدایت حرارتی Gap شروع به افزایش می‌کند، با مشاهده نرخ تغییرات پارامترهای K gas و ضخامت مؤثر غلاف در یک Hot fuel pin برحسب تغییرات Burn up ملاحظه می‌کنیم که نرخ کاهشی ضخامت مؤثر Gap در اثر تغییرات Burn up [در بازه خاصی] شدیدتر از نرخ کاهشی ضریب هدایت حرارتی گاز موجود در Gap در اثر تغییرات Burn up می‌باشد اما با افت نرخ کاهشی ضخامت مؤثر gap ملاحظه می‌شود که روند افزایش H gap پس از به ماکزیمم رسیدن، کاهش یافته که در نهایت نرخ کاهشی، در میزان H gap به حالت تغییرات با نرخ کاهشی بسیار اندک بدل می‌شود.

References:

- 1- NEILE.TODRESS, MUJID S.KAZIMI; Nuclear system I;1982
- 2- J.B.AINSCOUGH, GAP conduction in Zircaloy- Clad LWR Fuel Rods; APRIL 1982.
- 3- ORIGIN CODE MANUAL; ORNL-4628; MAY 1973.
- 4- FSAR REPORTS For BUSHEHR VVER-1000 Reactor; CHAPTER 4.
- 5- E.E.LEWIS; Nuclear power reactor safety; 1977.
- 6- M.M.EL-WAKIL; NUCLEAR HEAT TRANSFER; 1971.
- 7- J.P.HOLMAN; HEAT TRANSFER; 2002.
- 8- SONNTAG, BORGNAKE, VAN WYLEN; FUNDAMENTALS Thermodynamics; 1997.