بررسی کد PARS در تحلیل سوخت راکتورهای هسته ای و بررسی تغییرات لازم برای تعمیم آن به راکتور VVER-1000 بوشهر

افشار،نگین *(۱)- شایسته،محسن (۲)- فقیهی،فرشاد (۱)

[۱] دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

[۲] دانشگاه جامع امام حسین(ع)- گروه فیزیک

چکیده:

اکثر اجسام مورد استفاده در صنعت به طور همزمان در معرض بارهای مکانیکی و حرارتی قرار دارند. در راکتورهای هسته ای با وجود مواد رادیواکتیو و نیز بالا بودن دما و فشار این مسئله از اهمیت بالاتری برخوردار است. در تعیین توزیع دما در میله سوخت بررسی تغییرات فضای بین سوخت و غلاف ضروری می باشد. از عوامل اصلی بسته شدن فضای بین سوخت و غلاف می توان پدیده PCIاشاره کرد که ناشی از تورم و انبساط سوخت، کرنش و خزش سوخت و غلاف و جابجایی ناشی از ترک است. در این مقاله پس از بررسی کد تحلیل عملکرد میله سوخت PARS در مقایسه با کد FRAPCON-3.1 نمونه غربی آن، به ارائه روابط و تغییرات لازم برای توسعه این کد برای راکتور هسته ای بوشهر در حالت پایا پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: *سوخت هسته ای، VVER-1000، تحلیل حرارتی-مکانیکی میله سوخت، کد PARS، شرایط پایا*

مقدمه:

کد FRAPCON-3.1 برای تحلیل عملکرد حرارتی-مکانیکی میله سوخت در حالت پایا در NRC تولید شده است. در این کد از مدل تک کانالی افزایش آنتالپی خنک کننده، مدل هدایت حرارتی اختلاف محدود با فاصله های مش بندی مختلف برای محاسبه پیک توان در لبه پلیت سوخت در اثر پدیده rim، مدل کندوکتانس تماسی بین سوخت و غلاف برای پیش بینی پدیده PCI و بسیاری از مدل های دیگر از جمله خزش و کرنش لحاظ شده است[۱]. بسته جامع نرم‌افزاری که توانایی شبیه سازی عملکرد سوخت بدین نحو را داشته باشد به عنوان یک مرجع بومی در کد PARS توسط مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای توسعه یافته است. هدف این کد بررسی عملکرد میله سوخت در مدت زمان سیکل کاری یک یا چند ساله و شرایط کارکرد عادی میله سوخت است. کد PARS توانایی محاسبه پدیده های تاثیرگذار در عملکرد میله سوخت از جمله توزیع محوری خواص سیال، توزیع شعاعی توان با حل همزمان معادلات مصرف سوخت، توزیع دمای سوخت با روش اختلاف محدود، تغییر شکل سوخت با لحاظ پدیده های تورم، چگالش، انبساط حرارتی، جابجایی ناشی از ترک و بازیابی آن، تنش-کرنش الاستیک در غلاف در شرایط گپ باز و بسته، تنش-کرنش پلاستیک غلاف در شرایط گپ بسته، خزش غلاف، تولید و رها شدن محصولات شکافت گازی، حجم آزاد درون میله، فشار گاز، ضریب انتقال

حرارت گپ گازی، خوردگی غلاف و ترکیب با هیدروژن را دارا می‌باشد[۲]. کد پیشتر ذکر شده PARS همانند فرپکن در شرایط تغییرات توان و شرایط مرزی بسیار آهسته ،یعنی حالت پایا، کاربرد دارد که در اینحالت مدل‌های حرارتی تنها جریان حرارتی را در جهت شعاعی اندازه می گیرند. این شرط برای مدل کردن تنها یک میله سوخت با نسبت طول به قطر خیلی بزرگ کارایی دارد. تمامی محاسبات حرارتی و مکانیکی، میله سوخت را متقارن، درحالتی که هیچ فشاری به آن وارد نشده باشد، فرض می کنند. این فرضیات برای مدل سازی سوخت راکتورهای آب تحت فشار معتبر هستند. این کد شامل داده های موردنیاز از مشخصات آب، مواد دیگر و روابط انتقال حرارت است [۳].

در ادامه با توجه به نیاز اساسی برای تحلیل عملکرد میله سوخت بوشهر در طی مدت کارکرد به ارائه مدلی در کد PARS که توانایی شبیه‌سازی عملکرد سوخت راکتورهای نوع VVER را داشته باشد پرداخته شده است. در این تغییرات از آخرین نسخه مواد MATPRO برای سوخت، غلاف وگازها استفاده شده که برای شرایط فرسایش بالا و آلیاژهای غلاف آنها کاربرد دارد[۴]. تنها موادی که در MATPRO موجود نمی باشند، گازهای حاصل از شکافت، خوردگی های غلاف و برداشت هیدروژنی غلاف می باشند[۵].

روش کار:

در کد PARS با هدف پیاده سازی نرم افزار جامع نحوه عملکرد میله سوخت در راکتورهای آب تحت فشار و جوشان، مدل‌سازی پدیده‌های هسته‌ای، حرارتی و مکانیکی پرداخته شده است. همچنین در توسعه کد PARS از دستور ماژول استفاده شده است که در کنار ساختار منظم، این کد را به کدی کارآمد با قابلیت توسعه آسان‌تر تبدیل کرده است[۲]. شبیه سازی حرارتی مستلزم حل معادله انتقال حرارت در سوخت، گاز درون گپ و غلاف و همچنین معادله انرژی در راستای شعاعی میله سوخت بین غلاف و سیال خنک کننده می باشد. مدل‌های حرارتی پیاده‌سازی شده عبارتند از؛ مدل افزایش آنتالپی سیال در کانال، دمای سطح خارجی دیواره، دمای سطح داخلی غلاف، مدل هدایت حرارتی میله سوخت، ضریب هدایت حرارتی بصورت تابعی از دما و فرسایش سوخت، مدل حرارتی محفظه بالای میله سوخت، ضریب انتقال حرارت گپ گازی، آنتالپی سوخت و خواص ترموفیزیکی گاز هلیوم. در مدل‌سازی پدیده های مکانیکی مدل های تغییر شکل قرص سوخت، مدل تغییر شکل الاستیک غلاف در شرایط گپ باز، مدل تغییر شکل الاستیک غلاف در شرایط گپ بسته با وجود پدیده خزش، مدل تغییر شکل پلاستیک غلاف، مدل تغییر شکل خزشی غلاف، حجم فضای آزاد درون میله سوخت، فشار گاز در میله سوخت، خواص مکانیکی غلاف و رشد محوری غلاف پرداخته شده است. از دیگر پدیده های مدل شده در کد PARS می‌توان به مدل مدل مصرف سوخت و توزیع شعاعی توان، مدل تولید و رهایش محصولات شکافت گازی، مدل Forsberg & Massih برای محاسبه میزان رهایش گازهای

حاصل از شکافت، مدل رهایش گاز شکافت دما پایین در فرسایش بالا و میزان خوردگی غلاف و ترکیب آن با هیدروژن اشاره کرد. همانطور که ملاحظه می شود با مدلسازی‌های انجام شده تحلیل کامل و جامعی از سوخت راکتورهای هسته‌ای LWR امکان‌پذیر است در حالی که نتایج این کد بر حسب زمان و فرسایش سوخت تطبیق بسیار مطلوبی با کد FRAPCON-3.1 دارد[۱].

کدهای تحلیل عملکرد میله سوخت بمنظور بررسی عملکرد راکتورهای غربی توسعه داده شده اند. راکتورهای موسوم به نوع شرقی و ساخت کشور روسیه (VVER) در ساختار هندسه و جنس غلاف با راکتورهای نوع PWR متفاوت می‌باشند. در ساختار هندسی و جنس غلاف کد FRAPCON-3.5 که آخرین نسخه توسعه یافته این کدها در سال ۲۰۱۵ است مشخصات سوخت راکتورهای VVER لحاظ نشده است. از این رو ارائه مدلی که توانایی شبیه سازی عملکرد سوخت راکتورهای VVER را داشته باشد یک نیاز اساسی برای تحلیل عملکرد میله سوخت در طی مدت کارکرد خود در قلب راکتور قدرت بوشهر است. پس هدف توسعه کدی است که بر پایه کد بومی PARS در تحلیل عملکرد میله سوخت راکتورهای تحت فشار و آب جوشان توانایی مدلسازی هندسه های پیچیده تر از جمله سوخت راکتورهای VVER-1000 را و نیز مدلسازی غلاف راکتور بوشهر (Zr+%1 nb) داشته باشد.

برای توسعه کد PARS با قابلیت شبیه‌سازی نحوه عملکرد سوخت راکتور بوشهر باید کد در موارد زیر بروزرسانی شود؛ پروفایل دمایی سوخت و غلاف، شار حرارتی در کانال‌های درونی و بیرونی، واکنش‌های مکانیکی سوخت و غلاف در این نوع سوختها در حالت گپ بسته، تورم، انبساط حرارتی و تراکم سوخت، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک غلاف، آزادسازی گاز شکافت و فشار گاز درون میله و غلظت هیدروژن و اکسیدها. کشش های الاستیک و پلاستیک و ضخامت غلاف از محدودیت‌های اصلی در عملکرد سوخت در حالت پایا هستند که برای محاسبه آن‌ها باید واکنش‌های سوخت-غلاف محاسبه شوند. واکنش PCI سوخت این راکتورها بسیار پیچیده‌تر است و باید تغییرات ابعاد سوخت در اثر انبساط حرارتی، برآمدگی، تراکم و جابجایی سوخت محاسبه شود. برای سوخت دی‌اکسید اورانیم با غلاف زیرکونیم تغییراتی در مدل‌های سوخت مانند هدایت حرارتی، انبساط حرارتی، مشخصات مکانیکی، آزادسازی گازهای حاصل از شکافت و نیز مدل-های غلاف ازجمله هدایت حرارتی ، مشخصات مکانیکی و تجمع هیدروژن و اکسید نداریم. در طی محاسبات فرضیات زیر را در نظر می‌گیریم؛ غلاف شکل استوانه ای خود را حفظ می کند، انتقال حرارت محوری قابل صرفنظر کردن است، شیب توان خیلی کم و دمای غلاف کمتر از ۷۰۰ درجه کلوین است. پیچیدگی‌هایی که در پاسخ مکانیکی و حرارتی در اثر تغییرات فضای گپ در اینجا داریم رسیدن به همگرایی را در تکرارها مشکل می‌کند. برای محاسبات ۵ حلقه تکرار داریم؛ ۱- کندوکتانس گپ برای محاسبه اندازه گپ و بروزرسانی آن با توجه به مقادیر انبساط حرارتی، تورم، تراکم و واکنش سوخت-غلاف، ۲- انتقال حرارت شعاعی، ۳- تکرار بر

نودبندی محوری، ۴- تکرار همگرایی بر گاز شکافت و گاز پر شده در گپ و ۵- زمان. الگوریتم معرفی شده برای هر گام زمانی محاسبات را انجام می‌دهد پس در یک تاریخچه کامل، نحوه عملکرد میله سوخت راکتور بوشهر با تغییرات اعمال شده حین تابش بدست می‌آید.

مشخصات هندسی سوخت یکپارچه و نوع حلقوی راکتور VVER-1000 بوشهر در جدول ۱ آمده است. کلد راکتور بوشهر از جنس زیرکونیم بهمراه ۱٪ نیوبیوم، فشار گاز هلیوم داخل میله سوخت ۲MPa، فشار کل سیستم ۱۵,۷MPa و دمای خنک کننده ورودی ۲۹۱ درجه سانتیگراد است. گام شبکه ۱۲,۷۵mm می باشد[۶].

جدول شماره (۱) مشخصات هندسی سوخت یکپارچه و حلقوی[۶].

	قطر سوخت (mm)	قطر خارجی غلاف (mm)	ضخامت غلاف (mm)	قطر حفره درونی (mm)	ارتفاع میله سوخت (m)
سوخت یکپارچه	۷,۵۷	۹,۱	۰,۶۸۵	۰	۳,۵۵۳
سوخت حلقوی	۷,۵۷	۹,۱	۰,۶۸۵	۱,۵۳	۳,۵۵۳

معادله توزیع دمایی سوخت با استفاده از معادله هدایت حرارتی بصورت زیر است[۷]:

$$T(r) = T_{fc} - \frac{q\times r^2}{4\pi k_{fave}\left(R_f^2-R_i^2\right)}\left[1-\left(\frac{R_i}{r}\right)^2-\left(\frac{R_i}{r}\right)^2 Ln\left(\frac{r}{R_i}\right)^2\right] \;;\; R_i < r < R_f \qquad (1)$$

R_i شعاع داخلی سوخت به m، R_f شعاع سوخت به m و T_{fc} حداکثر دمای سوخت هستند. دمای متوسط سوخت از معادله زیر بدست می‌آید [۵].

$$T_{fave} = \frac{2}{R_f^2-R_i^2}\left[\frac{T_{fc}(R_f^2-R_i^2)}{2} - \frac{q\left(R_f^4-R_i^4\right)}{16\pi k_{fave}\left(R_f^2-R_i^2\right)} + \frac{q\times R_f^2}{8\pi k_{fave}} + \frac{q\times R_i^2}{4\pi k_{fave}\left(R_f^2-R_i^2\right)} \times \left[R_f^2 Ln\frac{R_f}{R_i} + \frac{R_i^2-R_f^2}{2}\right]\right] \;;\; R_i < r < R_f \qquad (2)$$

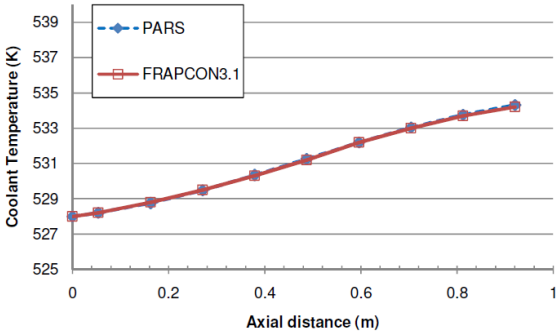
هدایت حرارتی متوسط سوخت با استفاده از معادله بکار رفته در کد FRAPCON-3.1 و با روش حل عددی روی انتگرال زیر محاسبه می‌شود[۱]:

$$k_{fave} = \frac{1}{T_{fc}-T_{fs}}\int_{T_{fs}}^{T_{fc}} k_f(T).dT \;;\; k_f = k_0\times F_D\times F_P\times F_M\times F_R \qquad (3)$$

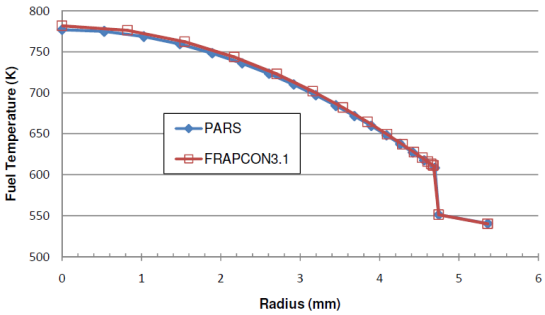
در این معادله تاثیر محصولات شکافت غیر محلول با فاکتور F_Dوابسته به برن‌آپ و دمای ، تاثیر محصولات شکافت سریع با فاکتور F_P، تاثیر تخلخل با فاکتور ماکسول F_M و تاثیر تابش با فاکتور F_R لحاظ می شود.

نتایج:

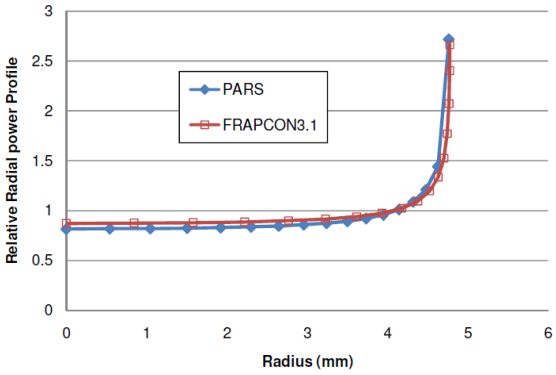
نتایج کد PARS در مقایسه با کد فریکن در شکل های ۱ تا ۶ مشاهده می شود که نشاندهنده همخوانی بسیار خوب در پاسخ است. بر این اساس از کد PARS برای توسعه معادلات مربوط به راکتور بوشهر استفاده شده است.



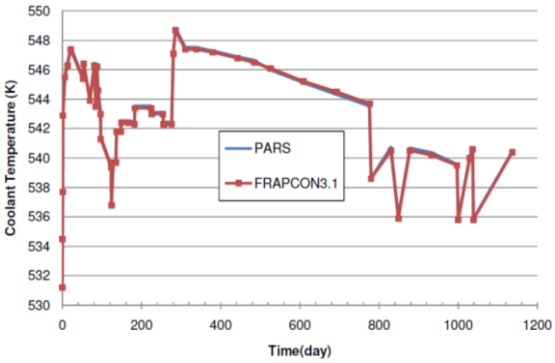
شکل (۲) توزیع محوری دمای سیال در ابتدای کار راکتور [۲].



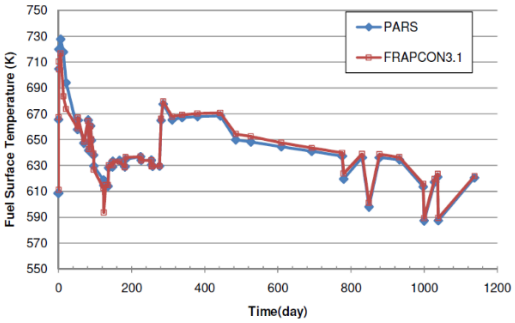
شکل (۳) توزیع شعاعی دما در میله سوخت در ابتدای کار راکتور [۲].



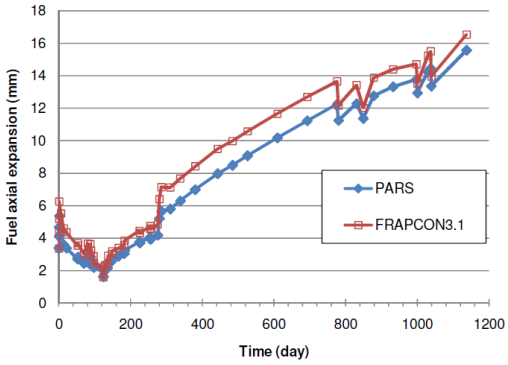
شکل (۴) توزیع نسبی شعاعی توان در سوخت با گذشت ۱۱۳۷ روز از کارکرد سوخت [۲].



شکل (۵) دمای سیال در راستای محوری میله سوخت بر حسب زمان [۲].



شکل (۶) دمای سطح سوخت در راستای محوری میله سوخت برحسب زمان [۲].



شکل (۷) تغییر طول سوخت برحسب زمان [۲].

بحث و نتیجه گیری:

کد PARS با قابلیت شبیه‌سازی میله سوخت از جنس دی اکسید اورانیم و غلاف از آلیاژ زیرکونیم به مدل‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی میله سوخت در شرایط تغییر توان و شرایط مرزی سیال را در حالت پایا دارا می‌پردازد. این تحلیل دارای ویژگی ها و پیچیدگی‌های خاصی است که از آن جمله می‌توان به رفتار سوخت در هنگام افزایش و کاهش توان، تاثیر گام های مختلف و شرایط مختلف در پدیده خزش، مشکلات همگرایی تکرارهای تغییر شکل و دما اشاره کرد. برای توسعه این کد با شرایط موجود در راکتور بوشهر مدل توزیع دمای سوخت در راستای شعاعی با توجه به حفره مرکزی سوخت مورد توجه قرار خواهد گرفت. دمای مرکز و دمای متوسط در سوخت یکپارچه بیشتر از سوخت حلقوی است. اما دمای سطح در سوخت حلقوی بیشتر از سوخت یکپارچه پیش‌بینی می‌شود که بدلیل انبساط حرارتی بیشتر در سوخت یکپارچه است که باعث کاهش ضخامت گپ و کاهش دمای سطح این سوخت می‌شود. یکی از مهمترین معیارهای ایمنی در طراحی سوخت نقطه ذوب ۲۸۰۰ درجه سانتیگراد آن است که از این لحاظ سوخت حلقوی نمونه بوشهر با کاهش ماکزیمم دمای مرکز سوخت به سوخت یکپارچه ارجحیت داشته و باید نرم‌افزار تحلیل حرارتی-مکانیکی آن پیش‌بینی شود که این کار با توسعه کد بومی PARS با انجام تغییرات ذکر شده صورت خواهد گرفت.

مراجع:

[۱] Geelhood, K.J., and W. G. Luscher. FRAPCON-3.5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burn up. NUREG/CR-7022. Vol. 1 Rev.1.PNNL-19418. Vol. 1. Pacific Northwest National Laboratory. Richland, WA, 2014a.

[۲] گزارش فنی کد تحلیل عملکرد میله سوخت در شرایط پایا (PARS)، شرکت مهندسی و ساخت نیروگاه های اتمی، معاونت محاسبات پیشرفته هسته ای، ۱۳۹۶.

[۳] MATPRO-9. A Handbook of Material Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, USNRC TREE NUREG-1005, 1976.

[۴] Hagrman D.L. and Reyman G.A. MATPRO version 11- A Handbook of Material Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev 3, 1979.

[۵] G.Weidinger. Zr-Alloys, the Nuclear Material for Water Reactor Fuel. A Survey and Updated with Focus on Fuel for Pressurized Water Reactor Systems. 7th International Conference on VVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support Albena, Bulgaria, 17-21, 2007.

[۶] Final Safety Analysis Report (FSAR), BUSHEHR VVER-1000 reactor, Ministry of R ussian Federation of Atomic Energy (Atomenergoproekt), Moscow, 2003.

[۷] A. Shestopalov, K. Lioutov and L. Yegorova, "Adaptation of USNRC's FRAPTRAN and IRSN's SCANAIR Transient Codes and Updating of MATPRO Package for Modeling of LOCA and RIA Validation Cases with Zr-1%Nb (VVER type) Cl adding", Kurchatov Institute, 2003.