مدلسازی رفتار ترمومکانیکی میله ی سوخت نیروگاه اتمی بوشهر در سیکل اول پس از راه اندازی به وسیله کد FRAPCON-3

الهی، سید محمد[۱] –شیرانی، امیر سعید[۱]– صفاری نوش آبادی ، امیر حسین[۱] –صفرزاده، امید[۲]

[۱]دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه رآکتور

[۲]دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی

چکیده:

بررسی پایداری میله ی سوخت نیروگاه های هسته ای و تعیین علل خرابی آن جایگاه ویژه ای در ایمنی رآکتور ها دارد. درک هر چه دقیق تر مکانیزم های حاکم بر تخریب میله سوخت می تواند، طراحان و کاربران رآکتور های هسته ای را از حدود بهره برداری از میله سوخت، در طول مراحل طراحی و بهره برداری هدایت نماید. در این مقاله رفتار حرارتی مکانیکی بحرانی ترین میله سوخت نیروگاه بوشهر در طول دوره اول بهره برداری پس از راه اندازی به کمک یک کد شبه دو بعدی (FRAPCON3.1)بررسی می گردد. در این تحلیل نشان داده خواهد شد که سوخت و غلاف در طول سیکل با یکدیگر برخوردی نداشته، و غلاف سوخت از دیدگاه پایداری مکانیکی از حاشیه ایمنی مناسبی برخوردار است.

کلمات کلیدی: نیروگاه بوشهر، سیکل کاری اول، FRAPCON، قرص سوخت، غلاف

مقدمه:

در فرایند راه‌اندازی قلب رآکتور هسته ای ، با بالا رفتن حرارت تولیدی در سوخت، گرادیان دمایی حاصله می تواند منجر به بروز تنش هایی در سوخت گردد، که به تبع آن سوخت تغییر شکل یافته و ترک خواهد خورد. در کنار اثرات ناشی از تنش های دمایی، در اثر وجود تخلخل های اولیه در سوخت و حرکت پاره های شکافت در ساختار قرص سوخت تغییر شکل هایی با منشأ غیر مکانیکی در سوخت ایجاد خواهند شد. از طرفی در شرایط کاری رآکتور (دما و فشار بالا و شار بالای نوترون های سریع) غلاف زیرکونیم علاوه بر تغییر شکل های الاستیک، در اثر خزش و بادکردگی

تغییر شکل هایی با منشاء غیر الاستیک خواهد کرد. به این ترتیب با افزایش حجم سوخت و از طرفی کاهش قطر غلاف در اثر تنش های وارده به آن رفته رفته فضای شکافت بین سوخت و غلاف کمتر شده و به تبع آن ضریب انتقال حرارت ناشی از گاز افزایش پیدا می کند. به این ترتیب برای شبیه سازی رفتار حرارتی–مکانیکی سوخت در طول فرایند راه اندازی رآکتور بایستی از کد هایی جامع که قادر به شبیه سازی و جمع آثار پدیده های فوق می باشند، بهره برد.

اکثر کد های رایج برای شبیه سازی رفتار میله سوخت از دیدگاه شبه دو بعدی (یا ۱,۵ بعدی) مسئله را بررسی می کنند[۱]. نظیر FRAPCON-3 [۲]، TRANSURANUS [۳] و ENIGMA [۴] که بعضی از آنها نظیر FRAPCON تنها قادر به شبیه سازی رفتار میله ی سوخت در حالت پایا(شیب کم تغییرات) و برخی قادر به تحلیل شرایط حادثه(شیب زیاد تغییرات) و یا حتی هر دو آنها می باشند.

روش کار:

در این مقاله رفتار میله ی سوخت رآکتور VVER-1000 بوشهر در طی سیکل اول پس از راه اندازی بررسی می گردد. این رآکتور،در دسته رآکتور های آب سبک تحت فشار طبقه بندی می شود. قلب این رآکتور دارای ۱۶۳ مجتمع سوخت بوده که با آرایش شش ضلعی در کنار یکدیگر چیده شده اند. الگوی بارگذاری اولیه قلب شامل شش نوع مجتمع سوخت متفاوت است، که هر کدام از این مجتمع ها دارای ۳۱۱ میله ی سوخت و ۱۸ کانال هادی می باشد.[۵]. زمان مؤثر بین هر بارگذاری سوخت ۷۰۰۰ ساعت بوده که ۱۰۰ روز از این دوره را فرایند راه اندازی رآکتور از حالت گرم صفر قدرت(HZP[۱]) تا رسیدن به توان نامی ۳۰۰۰ مگاوات حرارتی (HFP[۲]) به خود اختصاص می دهد[۶].

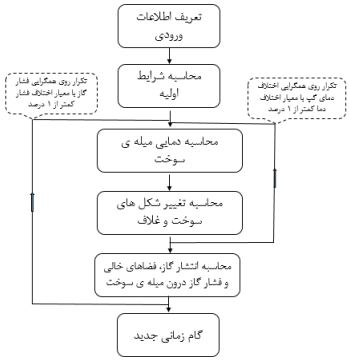
در این مقاله از کد FRAPCON 3.1 برای تحلیل رفتار ترمومکانیک سوخت نیروگاه بوشهر در سیکل اول استفاده شده است. این کد قادر به شبیه سازی رفتار پایای میله ی سوخت هسته ای به ازای مصرف سوخت های خیلی بالا از مرتبه ی 62 GWd/MTU می باشد. این کد ابزاری مناسب برای شبیه سازی رفتار رآکتورهای خنک شونده با آب خنک می

[۱] Hot Zero Power
[۲] Hot Full Power

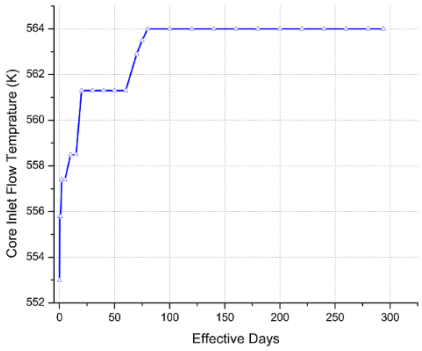
باشد. این کد رفتار میله ی سوخت را به صورت شبه دو بعدی شبیه سازی می کند به طوریکه تمام مدل های محاسباتی این کد برای شبیه سازی رفتار حرارتی و مکانیکی میله ی سوخت به صورت یک بعدی در راستای شعاع می باشد، که با تقسیم کردن میله سوخت در راستای محور آن، محاسبات یک بعدی در راستای شعاعی را برای هر بخش محوری به صورت مجزا انجام می دهد.

برای شبیه سازی رفتار ترمومکانیک سوخت نیروگاه بوشهر در کد FRAPCON 3.1، مشخصات هندسی، شرایط ساخت سوخت و غلاف ، فشار، دما و دبی جرمی سیال ورودی به قلب، تغییرات نرخ خطی متوسط تولید حرارت در قلب، بایستی تعریف گردد.[۲]. هندسه و روند تغییرات پارامتر های ترموهیدرولیکی (توان تولیدی متوسط میله ی سوخت، فشار و دمای سیال ورودی قلب) و توزیع محوری تولید توان برای داغ ترین میله از بحرانی ترین شبکه ی سوخت با بهره گیری از اطلاعات مرجع [۶] برای ورودی کد تعریف می گردد. شکل شماره(۱) الگوریتم محاسباتی کد FRAPCON-3 را به طور خلاصه بیان می کند.

شکل های (۲) و (۳) به ترتیب روند تغییرات دمای سیال ورودی و تولید حرارت در قلب را در طول روز های کاری آن را در طول سیکل اول کاری نشان می دهد.



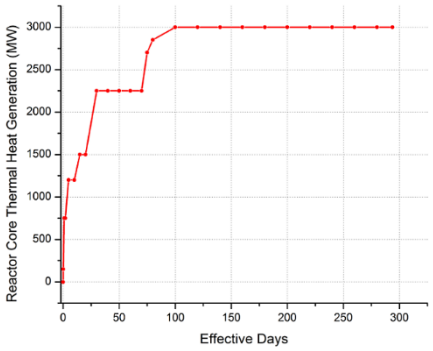
شکل شماره (۱): الگوریتم محاسباتی کد FRAPCON



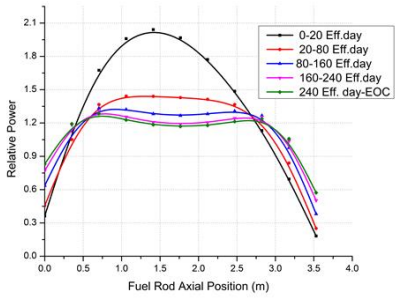
شکل شماره(۱) :تغییرات دمای سیال ورودی به قلب رآکتور بوشهر در سیکل اول

برای محاسبه نرخ متوسط توان محوری در هر بازه زمانی، بایستی میزان توان حرارتی تولیدی قلب رآکتور بر طول کل تعداد میله های سوخت قلب تقسیم شود. و برای اعمال توزیع توان محوری در داغ ترین میله ی سوخت از توریع های

محوری معرفی شده در[۶] بهره گرفته می شود. با توجه به محدودیت در تعداد توزیع توان قابل تعریف در کد FRAPCON3.1، از بین توزیع های محوری معرفی شده در[۶]، پنج منحنی با پیش فرض تشابه در منحنی تولید نسبی توان و میزان متوسط تولید توان در کل میله انتخاب می شود. شکل شماره (۴) منحنی های توزیع توان محوری در داغ ترین میله ی سوخت را در بازه های زمانی مختلف کاری رآکتور را نشان می دهد.



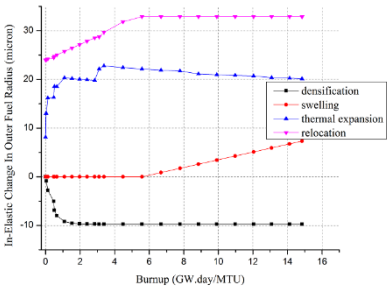
شکل شماره (۳): توان حرارتی تولیدی قلب رآکتور بوشهر در سیکل اول



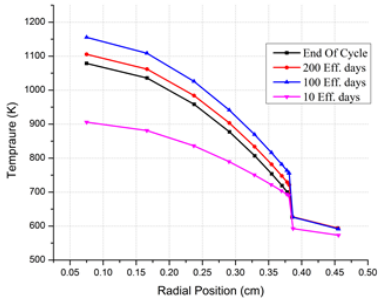
شکل شماره (۴) :منحنی های توزیع نسبی تولید توان محوری در طول سیکل

نتایج:

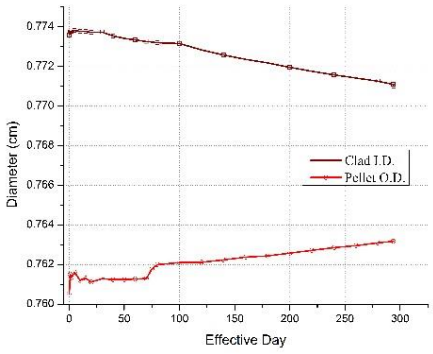
از دیدگاه کد FRAPCON-3 معیار بحرانی ترین ناحیه ی میله ی سوخت در راستای محوری، بالاترین دمای میله سوخت به نسبت دیگر ناحیه ها در هر گام زمانی می باشد[۲]. از آنجایی که توزیع محوری توان در اثر مصرف سوخت در طی سیکل تغییر می کند، لذا موقعیت محوری بحرانی ترین ناحیه میله سوخت هم در طی سیکل دستخوش تغییر خواهد شد. لذا برای بیان نتایج حاصله از شبیه سازی میله ی سوخت ناحیه ای از میله که رفتار بحرانی تری در گام های انتهایی تحلیل دارد، انتخاب شده و نتایج حاصله ارایه می گردد. شکل های (۵) و (۶) به ترتیب تغییرات قطر داخلی غلاف و قطر خارجی قرص سوخت و دما روی سطوح داخلی و خارجی سوخت و غلاف به ازای شرایط کاری رآکتور در سیکل اول(روی بحرانی ترین ناحیه میله ی سوخت) را نشان می دهند. و شکل (۷) به ترتیب توزیع شعاعی دما در بحرانی ترین ناحیه میله سوخت را به ازای چند گام زمانی، و شکل (۸) تغییرات شعاع خارجی سوخت را در طول سیکل در اثر کرنش های غیر الاستیک را نشان می دهند.



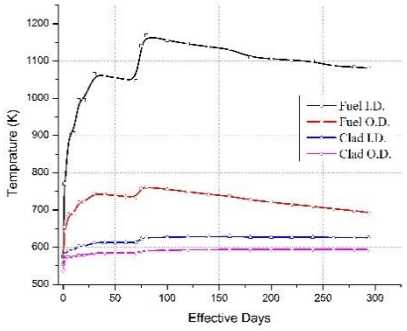
شکل شماره (۷) :منحنی تغییر شعاع خارجی سوخت در اثر کرنش های غیر الاستیک به ازای مصرف سوخت



شکل شماره (۸) :منحنی توزیع دما در میله ی سوخت



شکل شماره (۵) :تغییرات قطر داخلی غلاف و قطر خارجی سوخت در طول سیکل



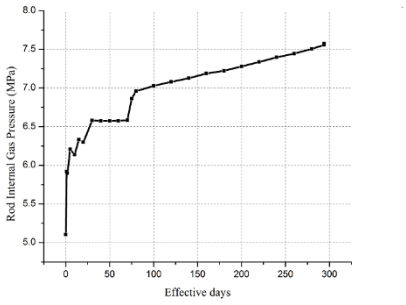
شکل شماره (۶): تغییرات دمای سوخت و غلاف در طول سیکل

حضور محصولات شکافت گازی در پشت غلاف (نظیر ید ۱۳۱) یکی از نگرانی ها در بررسی رفتار مکانیکی و تنش فرسایش ترک در برای غلاف (در شرایط کار عادی و شرایط حادثه) می باشد. حاشیه ی ایمنی غلاف از نسبت تنش آستانه ی فرسایش ترک به تنش محیطی برای غلاف پرتو دیده در شرایط کاری رآکتور به کمک رابطه ی (۱) به دست می آید. [۵]

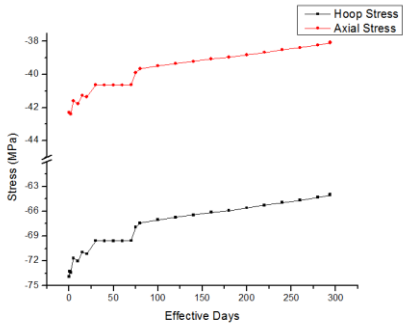
رابطه ی (۱)

$$K = \frac{\sigma_{SCC}}{\sigma_\theta} \geq [K], [K] = 1.2$$

به طوریکه K، σ_θ و σ_{SCC} به ترتیب برابر ضریب اطمینان، تنش محیطی وارده بر غلاف و تنش آستانه ی از فرسایش ترک (230 MPa) می باشد [۵]. شکل های (۹) و (۱۰)به ترتیب تغیرات فشار داخلی میله ی سوخت و تنش های محیطی و محوری غلاف را در طول دوره اول بهره برداری را نشان می دهند. ملاحظه می شود که با در اثر کاهش فضا های خالی



شکل شماره (۹) : تغییرات فشار گاز درون میله سوخت در طول دوره اول بهره داری



شکل شماره (۱۰) : تغییرات تنش محیطی و محوری در طول دوره اول بهره برداری

موجود در میله ی سوخت و افزایش دمای فضای داخلی میله فشار گاز درون میله‌ی سوخت افزایش یافته و به تبع آن، فشار نسبی دو طرف غلاف رفته–رفته کاهش می یابد. به این ترتیب تنش های محیطی و محوری وارده بر غلاف میله ی سوخت کم تر می شوند(علامت منفی به صورت قرار دادی نشان دهنده تنش فشاری است). از آنجایی در طول دوره اول بهره برداری (به خاطر عدم برخورد مکانیکی بین سوخت و غلاف) کلیه تنش های اعمالی به غلاف از نوع فشاری می باشند لذا شرایط فرسایش ترک برای غلاف پیش نمی آیند.

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله نتایج شبیه سازی رفتار میله سوخت نیروگاه بوشهر از دیدگاه ترمومکانیکی به وسیله کد FRAPCON-3 مورد بحث و بررسی قرار گرفت. دیده شد که در بحرانی ترین ناحیه از داغ ترین میله ی سوخت این رآکتور، در طول دوره ی اول بهره برداری برخورد مکانیکی بین سوخت و غلاف رخ نخواهد داد.

میله ی سوخت این نیروگاه از حاشیه ی ایمنی مناسبی برخوردار بوده، و تنش های اعمالی به غلاف از آستانه ی تحمل آن عبور نمی کنند.

منابع:

[۱] R. Williamson, "Enhancing the ABAQUS thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient LWR fuel rod behavior," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 415, pp. 74-83, 2011.

[۲] G. A. Berna, G. Beyer, K. Davis, and D. Lanning, "FRAPCON-3: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup," Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States); Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls, ID (United States)1997.

[۳] K. Lassmann, "TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 188, pp. 295-302, 1992.

[٤] W. Kilgour, J. Turnbull, R. White, A. Bull ,P. Jackson, and I. Palmer, "Capabilities and validation of the ENIGMA fuel performance code," *ANS Avignon, April*, 1991.

[٥] B. VVER, "1000 reactor (2003) Final Safety Analysis Report (FSAR), Chapter 4," *Ministry of Russian Federation of Atomic Energy (Atomenergoproekt), Moscow*.

[٦] B. FSAR, "Atomic Energy Organization of Iran, Album of Neutron and Physical Characteristics of the 1st Loading of Boushehr Nucl," Plant, Technical Report, Tehran, Iran2003.