

بررسی رفتار مکانیکی داغ‌ترین میله سوخت راکتور ۱۰۰۰ مگاواتی بوشهر با استفاده از مدل

قرص صلب

مجید قصابیان^۱، سعید طالبی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱)

چکیده

عملکرد ایمن و افزایش سطح مصرف سوخت از مواردی هستند که در صنعت ساخت سوخت راکتورهای هسته‌ای مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفته است. وقوع هرگونه آسیب در بدنه میله‌های سوخت ناشی از بادکردگی بیش از حد غلاف و یا فشار تماسی زیاد قرص سوخت و غلاف با یکدیگر منجر به ورود محصولات شکافت به خنک‌کننده موجود در قلب راکتور می‌شود که این اتفاق از نظر ایمنی یک امر غیرقابل قبول است. جهت پیش‌بینی کارکرد صحیح میله‌های سوخت ساخته شده برای استفاده در راکتورهای هسته‌ای از کدهای شبیه‌ساز استفاده می‌گردد، در این مقاله شبیه‌سازی بخش مکانیکی میله سوخت راکتور ۱۰۰۰ مگاواتی بوشهر با فرض صلب بودن قرص سوخت و با استفاده از مدل استوانه جدار نازک برای پیش‌بینی رفتار غلاف انجام می‌گردد. روابط تجربی مورد استفاده و همچنین الگوریتم عددی حل معادلات حاکم به نحوی انتخاب شده‌اند تا پارامترهای اصلی مکانیکی میله سوخت از قبیل شعاع خارجی قرص سوخت و تنش و کرنش غلاف با دقت مناسبی پیش‌بینی گردند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد مکانیکی میله سوخت VVER-1000 تطابق بسیار خوبی با خروجی کد تحلیل عملکرد سوخت FRAPCON-3.3 دارد. از مدل‌های به کار رفته شده در این اثر می‌توان در بررسی عملکرد سوخت راکتورهای بومی آینده کشور استفاده کرد.

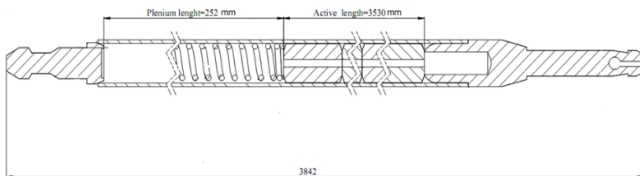
واژه‌های کلیدی: تنش، کرنش، میله سوخت، تورم، چروکیدگی

* تهران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، کد پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

پست الکترونیکی: sa.talebi@aut.ac.ir

۱. مقدمه:

در تحقیق پیش‌رو یک مدل جامع مکانیکی بر عملکرد میله سوخت نیروگاه VVER-1000 بوشهر (شکل ۱) تحت شرایط کارکرد عادی و میزان بالای مصرف سوخت پیشنهاد شده است که در آن با فرض صلب بودن قرص سوخت و استفاده از روابط تجربی مناسب و مدل‌های موجود در کدهای معتبر هسته‌ای نظیر 3-START ، FRAPTRAN2.0 ، FRAPCON-3 (TRANSURANUS) به منظور پیش‌بینی تورم، تراکم، انبساط و جابجایی فضای ترک قرص سوخت استفاده شده است؛ همچنین می‌توان مزیت مدل مکانیکی ارائه شده را در پیش‌بینی تغییرات غلاف سوخت دانست چرا که در کدهای موجود خواص مکانیکی غلاف بوشهر که از جنس آلیاژ زیرکونیوم-نئوبیوم (Zr+1%Nb) است، در نظر گرفته نمی‌شود اما در این مدل سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتها مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی حاضر با کد تحلیلی عملکرد میله سوخت FRAPCON-3.3 نشان‌دهنده دقت بالای روش حل پیشنهادی در پیش‌بینی پاسخ مکانیکی میله سوخت VVER-1000 طی مدت کارکرد آن در قلب راکتور است.



شکل ۱. نمایی از میله سوخت VVER-1000

۲. مدل‌سازی پدیده‌های مکانیکی موجود در سوخت و غلاف

جهت شبیه‌سازی رفتار مکانیکی میله سوخت در طول کارکرد راکتور، میله سوخت را به دو قسمت قرص سوخت و غلاف سوخت تقسیم و معادلات و پدیده‌های موجود را برای هر قسمت به صورت مجزا حل کرده در نهایت برهم کنش این دو را بر

پدیده‌های مکانیکی موجود در میله سوخت اعم از تورم^۲، تراکم^۳، انبساط حرارتی^۴، جابجایی قسمت‌های ترک خورده قرص^۵ و همچنین انبساط حرارتی، کرنش‌های ناشی از بارهای موجود بر غلاف و... باید در محدوده ایمن خود پدیدار شوند و اگر کنترل آنها از دست خارج شود و به محدوده نایمن روند، ممکن است مخاطرات زیادی ایجاد شود. این مخاطرات معمولاً با ذوب مقطعی قرص سوخت و یا پارگی غلاف در داغ‌ترین کانال نمایان شده و سبب ورود مواد پرتوزا به خنک کننده و در نتیجه افزایش احتمال وقوع مخاطرات انسانی می‌گردد.

بنابراین در طراحی میله سوخت هدف اطمینان از رعایت ضوابط ایمنی، طراحی و بهره‌برداری؛ تحت شرایط عادی و اضطراری کارکرد راکتور است [۱]. امروزه جهت بررسی تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد میله سوخت از کدهای شبیه‌سازی مانند FRAPCON ، FRAPTRAN ، FEMAXI-V ، COMETHE استفاده می‌گردد [۲]، که هر یک از آنها از سه منظر حرارتی، مکانیکی و شیمیایی به پیش‌بینی رفتار میله‌ی سوخت مورد نظر در راکتور می‌پردازند، این کدها براساس کارکرد راکتور به دو بخش گذرا و پایا تقسیم می‌شوند.

اکثر کدهای موجود به‌منظور بررسی رفتار عملکرد راکتورهای LWR غربی توسعه داده شده‌اند. راکتورهای مرسوم به نوع شرقی و ساخت کشور روسیه (VVER) دارای تفاوت‌هایی در ساختار هندسه و جنس غلاف با راکتورهای نوع غربی (PWR) می‌باشند [۱]. با توجه به وجود نیروگاه VVER در کشور، ارائه مدلی که توانایی شبیه‌سازی 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.

⁴ Thermal expansion

² Swelling

⁵ Relocation

³ Densification

دمای اولیه برحسب کلونین، ΔT_i عرض مش شعاعی بر حسب متر، N تعداد مش‌های شعاعی، ε_i^s کرنش مثبت ناشی از تورم و ε_i^d کرنش منفی ناشی از چروکیدگی سوخت می‌باشد. در نهایت برای محاسبه شعاع دقیق مکانیکی^۷ باید مقدار جابجایی قرص سوخت ناشی از ایجاد ترک در سطح آن به شعاع محاسبه شده از معادله (۱) اضافه گردد.

۲ و ۱. کرنش منفی ناشی از چروکیدگی قرص سوخت

در ابتدای بهره‌برداری از سوخت، بر اثر محو سریع تخلخل‌های ریز (با قطر کمتر از ۲ میکرومتر) موجود در قرص‌های دی‌اکسید اورانیوم، سوخت متراکم شده و حجم آن کاهش می‌یابد. چرا که تخلخل‌های ریز در اثر برهم کنش با پاره‌های شکافت، حتی در دمای پایین به سرعت محو می‌شوند. تراکم قرص‌های سوخت UO_2 به سه دلیل زیر اتفاق می‌افتد:

- فشار هیدرواستاتیک بالا که سبب سینترینگ فشاری می‌شود.
- دماهای بالا که سبب سینترینگ حرارتی می‌شود.
- وزین شدن بر اثر تابش

اساساً تغییرات نسبی حجم سوخت بر اثر محو تخلخل را می‌توان به کمک مدل‌های نظری و یا تجربی تعیین نمود، اما استفاده از رابطه نظری برای تعیین میزان چروکیدگی سوخت در یک کد بزرگ امکان‌پذیر نیست چراکه نیاز به دانستن توزیع دقیق تخلخل‌ها در سوخت می‌باشد؛ لذا در تحلیل حاضر از رابطه تجربی زیر جهت محاسبه این کرنش استفاده شد. رولستد مقدار حداکثر مجاز کاهش تخلخل بر اثر چروکیدگی در واحد طول را در رابطه زیر معرفی می‌کند [۵]:

$$\frac{\Delta L}{L_{\max}} = 22.2 * \frac{(100 - TD)}{(TS - 1180)} \quad (2)$$

TD: چگالی تئوری قرص UO_2 برحسب درصد

TS: دمای سینترینگ بر حسب سانتیگراد

یکدیگر در فضای گپ^۶ (فضای خالی بین قرص سوخت و غلاف) به دست می‌آوریم. تحلیل مکانیکی سوخت و غلاف شامل دو موضوع زیر می‌شود: الف. تعیین توزیع تنش و کرنش و نیز تغییر شکل مربوطه در سه راستای اصلی. ب. تعیین فشار تماس بین سوخت و غلاف در صورت در تماس قرار گرفتن سوخت با غلاف.

بارهای زیر که به سوخت و غلاف وارد می‌شوند در تحلیل‌های مکانیکی در نظر گرفته خواهد شد:

- فشار خنک کننده و فشار داخلی میله سوخت
- تورم و چروکیدگی سوخت
- خزش ایجاد شده در سوخت و غلاف
- انبساط حرارتی سوخت و غلاف
- رشد ناهمسانگرد غلاف زیرکالوی بر اثر برخورد نوترون‌های سریع

۲ و ۱. شبیه‌سازی رفتار مکانیکی قرص سوخت

در حل معادلات و پدیده‌های مکانیکی حاکم بر قرص سوخت اعم از تورم ناشی از محصولات شکافت، چروکیدگی، انبساط دمایی و همچنین ترک خوردگی و فضای خالی بین ترک‌ها از روش قرص صلب [۳] استفاده می‌کنیم؛ در این مدل فرض بر این است که هیچ‌گونه تنشی که منجر به خزش شود در قرص اتفاق نمی‌افتد و تنها پدیده‌های چروکیدگی، تورم، انبساط و ترک خوردگی در آن وجود دارد [۴]. جهت محاسبه میزان تغییر شکل رخ داده در قرص سوخت، آن را در راستای شعاعی تقسیم‌بندی می‌کنیم و برای هر مش محاسبات مربوط را انجام خواهیم داد. لازم به ذکر است در طول محاسبات فرض همسانگرد بودن قرص کماکان برقرار است. شعاع حرارتی قرص سوخت با استفاده از این روش عبارت است از:

$$R_H = \sum_{i=1}^N \Delta r_i \left[1 + \alpha_T (T_i - T_{ref}) + \varepsilon_i^s + \varepsilon_i^d \right] \quad (1)$$

که در آن R_H شعاع قرص سوخت داغ برحسب متر، α_T

ضریب انبساط دمایی برحسب $(1/K)$ ، T_i دمای نود i و T_{ref}

^۷ شعاعی که جهت تشخیص لحظه تماس و فشار تماسی استفاده می‌شود.

^۶ Gap

کرنش ناشی از تورم سوخت در راستای شعاعی و یا محوری را یکسان در نظر گرفته و از رابطه زیر به دست می آوریم:

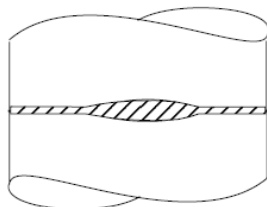
$$\epsilon_{sw} = 1/3(S_s + S_g)$$

همچنین معادلات مورد استفاده در محاسبه میزان انبساط دمایی قرص سوخت و جابجایی تکه های قرص سوخت از منابع ارائه شده در جدول ۱ استفاده می گردد.

جدول ۱. منابع مورد استفاده در شبیه ساز رفتار مکانیکی قرص سوخت

توضیحات	منبع مورد استفاده	پدیده مدل شده
--	MATPRO 11[6]	انبساط
relocation	Frapcon [3]	جابجایی تکه های قرص

جهت به دست آوردن تغییرات محوری قرص سوخت نیز کرنش های ناشی از چروکیدگی، تورم و دمایی داخل نودهای محوری در نظر گرفته می شوند. همانند شکل ۲ محاسبات انجام شده در قرص های دارای پخی^۹ و قرص های دارای سطح صاف^{۱۰} باهم متفاوت است، به نوعی که در قرص با سطح صاف میزان تغییرات محوری را برای یک مش با حجم میانگین به دست می آوریم و به کل مش های دیگر تعمیم می دهیم اما در محاسبات مربوط به قرص هایی که در خود پخی دارند ابتدا محاسبات را برای تمام مش های سطح قرص انجام داده و سپس مش دارای بیشترین تغییرات را به سایر مش ها تعمیم می دهیم.



الف) قرص دارای پخی سرد

در این مدل مقدار چروکیدگی براساس برن آپ^۸ عبارت است از:

$$\frac{\Delta L}{L} = -3.0 + .093e^{-BU} + 2.07e^{-35BU} \quad (3)$$

$$BU : burnup(GWd / t-U)$$

دمای سینترینگ در حالت پیش فرض ۲۰۰۰ درجه کلوین است.

۲.۱.۲. محاسبه میزان تورم قرص سوخت

بر اثر بوجود آمدن محصولات گازی و نیز جامد حاصل از شکافت در داخل سوخت به ویژه در انتهای بهره برداری از سوخت و بوجود آمدن حجم زیادی از محصولات شکافت، سوخت متورم می شود. البته بر اثر تورم، تخلخل جدیدی در سوخت بوجود نمی آید بلکه بخشی از تورم سوخت ناشی از انباشته شدن پاره های شکافت در زمینه سوخت و بزرگ شدن شبکه کریستالی سوخت می باشد و بخش دیگر نیز بر اثر انباشته شدن پاره های شکافت در تخلخل موجود در سوخت و بزرگ شدن آنها می باشد. محققان بسیاری با انجام آزمایش های گوناگون مدل هایی جهت پیش بینی میزان تورم سوخت به دست آورده اند که در این تحقیق از مدل ارائه شده در MATPRO11 استفاده گردید [۶]:

$$S_s = 2.5 * 10^{-29} B_s$$

$$S_g = 8.8 * 10^{-56} (2800 - T)^{11.73} \exp[-0.0162(2800 - T)] * (\exp(-8.0 * 10^{-27} B)) * B_s$$

(۴)

که در آن:

S_s : تورم ناشی از پاره های شکافت جامد

S_g : تورم ناشی از پاره های شکافت گازی

B_s : مصرف سوخت در هر گام زمانی

B : کل میزان مصرف سوخت ($fission/m3$)

T : دما در هر نقطه برحسب کلوین

¹⁰ Flat-ended

⁸ Burn up

⁹ Dished-pellets

در سراسر ضخامت وارد خواهد شد. روابط تنش و کرنش با در نظر گرفتن تمام بارهای وارده در شرایط کاری راکتور در یک گام زمانی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta} - \nu^* \sigma_z) + \varepsilon_{\theta}^{pl} + \varepsilon_{\theta}^{th} \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{-\nu}{E}(\sigma_{\theta} + \sigma_z) + \varepsilon_r^{pl} + \varepsilon_r^{th} \quad (8)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu^* \sigma_{\theta}) + \varepsilon_z^{pl} + \varepsilon_z^{th} \quad (9)$$

در معادلات بالا ε_i^{pl} عبارت است از مقدار کرنش پلاستیک در بازه زمانی قبل به اضافه $d\varepsilon_i^{pl}$ مقدار کرنش پلاستیکی ایجاد شده در این بازه زمانی می‌باشد. محاسبه $d\varepsilon_i^{pl}$ یکی از مراحل پیچیده شبیه‌سازی مکانیکی غلاف می‌باشد و عبارت است از: الف. ابتدا با استفاده از مقادیر تنش اصلی مقدار تنش موثر σ_e را به دست می‌آوریم.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta})^2 + (\sigma_z)^2]^{1/2} \quad (10)$$

ب. اگر مقدار کرنش موجود را $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$ و تابع تنش-کرنش را f بدانیم، مقدار تنش تسلیم از تکرار در رابطه زیر به دست می‌آید:

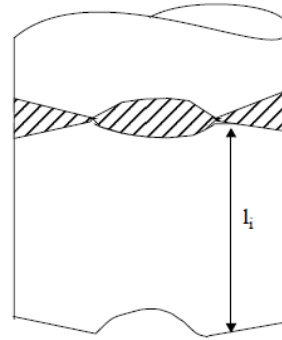
$$\sigma_y = f \left(\frac{\sigma_y}{E} + \varepsilon^p \right) \quad (11)$$

اکنون با استفاده از مقدار تنش تسلیم و همچنین تنش موثر محاسبه شده در غلاف، مقدار کرنش پلاستیک کل به شرح زیر خواهد شد:

$$\text{if } \sigma_e \leq \sigma_y \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma_e}{E} + \varepsilon^p \\ \varepsilon_{new}^p = \varepsilon_{old}^p \end{cases}$$

$$\text{if } \sigma_e > \sigma_y \quad \begin{cases} \varepsilon = f(\sigma_e) \\ \varepsilon_{new}^p = \varepsilon - \frac{\sigma_e}{E} \\ d\varepsilon^p = \varepsilon_{new}^p - \varepsilon_{old}^p \end{cases} \quad (12)$$

پ. توزیع کرنش پلاستیکی در جهات مختلف را با استفاده از قانون جریان پرانتل روسو به دست می‌آوریم:



(ب) قرص دارای پخی داغ

شکل ۲. قرص دارای پخی در حالت سرد و داغ

۲.۲. شبیه‌سازی رفتار مکانیکی غلاف و گپ

بارهای وارد به غلاف را در شرایط گپ باز^{۱۱} می‌توان فشار خنک کننده از بیرون، فشار گاز گپ از داخل، برخورد نوترون‌های سریع دانست، برای حل معادلات تنش و کرنش در حالتی که تماس اتفاق نمی‌افتد از مدل پوسته نازک استوانه‌ای با شرایط مرزی فشار خنک کننده از بیرون و فشار گاز هلیوم از داخل استفاده می‌کنیم. این در حالیتیست که در شرایط وجود تماس میان غلاف و قرص سوخت، شرایط مرزی برای داخل غلاف را جابجایی ناشی از تورم قرص سوخت در نظر خواهیم گرفت؛ فرض جدار نازک بودن محفظه زمانی قابل قبول است که نسبت شعاع داخلی غلاف به ضخامت آن بزرگتر از ۱۰ باشد. [۷]

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_{in} * P_{in} - r_{out} * P_{out}}{t_{clad}} \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{r_{in}^2 * P_{in} - r_{out}^2 * P_{out}}{r_{out}^2 - r_{in}^2}$$

کرنش‌های اصلی نیز در تئوری پوسته نازک استوانه‌ای با جابجایی نقطه میانی دیواره غلاف رابطه مستقیم دارد:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r} \quad (6)$$

همانطور که گفته شد با فرض بالا تنش شعاعی در غلاف نادیده گرفته می‌شود اما با توجه به تنش‌های محوری و محیطی موجود، هنگامی که خمیدگی اتفاق بیفتد مقدار ضخامت غلاف نیز ثابت نخواهد بود؛ لذا کرنش شعاعی نیز ناشی از اثر پواسون

¹¹ open gap

$$B = E \{ \varepsilon_z - \varepsilon_z^p - d\varepsilon_z^p - \varepsilon_z^{th} \}$$

$$C = -\nu \left(\frac{t}{2\bar{r}} + 1 \right) \quad D = 1 - \frac{\nu t}{2\bar{r}} \quad E = -\nu$$

در معادلات بالا میزان ε_z برابر است با مقدار کرنش محوری قرص سوخت که به طور مستقیم به غلاف وارد می شود. با توجه به در دست نداشتن مقادیر تنش محوری و شعاعی، مقدار کرنش پلاستیک $d\varepsilon_i^{pl}$ در این بخش با اندکی تغییر نسبت به مدل عدم تماس محاسبه می شود:

الف. مقادیری برای $d\varepsilon_i^{pl}$ حدس زده می شود.

ب. با استفاده از رابطه زیر و نمودار تنش-کرنش غلاف مقدار $d\varepsilon^p$ و σ_e را به دست می آوریم.

$$d\varepsilon^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\left(d\varepsilon_r^p - d\varepsilon_\theta^p \right)^2 + \left(d\varepsilon_\theta^p - d\varepsilon_z^p \right)^2 + \left(d\varepsilon_r^p - d\varepsilon_z^p \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

پ. حال با استفاده از روابط معادله (۱۸) مقادیر σ_θ, σ_z را محاسبه می کنیم.

ت. از معادلات زیر جهت به روزرسانی کرنش های پلاستیکی غلاف استفاده می کنیم و این روند را تا همگرا شدن مقادیر این کرنش ها ادامه خواهیم داد.

$$d\varepsilon_\theta^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \left[\sigma_\theta - \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \sigma_z) \right]$$

$$d\varepsilon_z^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} \left[\sigma_z - \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \quad (20)$$

$$d\varepsilon_r^p = -d\varepsilon_\theta^p + d\varepsilon_z^p$$

میزان فشار تماسی بعد از همگرا شدن مقادیر فوق از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_{int} = \frac{t\sigma_\theta + r_{out}P_{out}}{r_{in}} \quad (21)$$

با توجه به نابرابر بودن تنش های محوری و محیطی، غالباً فشار تماسی از فشار گاز در شرایط تماس کمتر می شود، در این حالت فشار تماسی را برابر با فشار گاز موجود در گپ فرض کرده و معادلات را مجدداً مانند حالت عدم تماس حل کرده و جواب ها را بازنویسی خواهیم کرد.

در حل معادلات فوق نیز مانند حل معادلات مکانیکی قرص، از عبارات تجربی برای به دست آوردن میزان مدول یانگ، نمودار

$$d\varepsilon_i^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon^p}{\sigma_e} S_i; \quad i = r, \theta, z \quad (13)$$

$$S_i = \sigma_i - \frac{1}{3}(\sigma_\theta + \sigma_z) \quad i = r, \theta, z \quad (14)$$

مقادیر محاسبه شده کرنش پلاستیک، در محاسبات مربوط به تعیین مقدار تنش و کرنش غلاف پس از تجمیع مقادیر کرنش های خزشی استفاده می شوند. همچنین میزان تغییر شکل ناشی از حرارت موجود در غلاف که با ε_i^{th} مشخص گردید، از روابط ارائه شده در MATPRO محاسبه می گردد [۶].

با توجه به معادلات فوق، در حالت گپ باز میزان جابجایی شعاع داخلی غلاف از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$u_{in}^{clad} = \frac{r_{in}^{clad} + t_{clad}^n}{2} \cdot \varepsilon_\theta - \frac{t_{clad}^n}{2} \cdot \varepsilon_r \quad (15)$$

$$t_{clad}^n = (1 + \varepsilon_r) * t_0$$

t_{clad}^n ضخامت غلاف در لحظه n و u میزان جابجایی شعاع داخلی غلاف می باشد.

همانطور که گفته شد در حالت تماس با توجه به اینکه فشار داخلی ناشی از تماس به طور مستقیم قابل محاسبه نیست، شرایط مرزی را تغییر داده و برای جدار داخلی غلاف مقدار جابجایی سوخت را با مقدار جابجایی غلاف یکسان گرفته و به عنوان شرایط مرزی داخلی غلاف در نظر گرفته می شود. در مدل عدم تماس جابجایی صفحه میانی غلاف عبارت است از:

$$u_{r(n)} = \bar{r} \varepsilon_\theta - \frac{t}{2} \varepsilon_r \quad (16)$$

با جایگذاری معادله های شماره (۸) و (۱۶) در معادله شماره (۷) خواهیم داشت:

$$\frac{E}{\bar{r}} \left\{ u_{r(n)} + \frac{t}{4} [\varepsilon_r^p + \varepsilon_r^{th}] - [\varepsilon_\theta^p + \varepsilon_\theta^{th}] \right\} = \left(1 + \frac{\nu t}{2\bar{r}} \right) \sigma_\theta + \nu \left(\frac{t}{2\bar{r}} - 1 \right) \sigma_z \quad (17)$$

با استفاده از ماتریس ایجاد شده در معادله های (۹) و (۱۷) مقادیر تنش های اصلی را به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\sigma_\theta = \frac{A - BC}{D - EC}, \quad \sigma_z = \frac{BD - AE}{D - EC} \quad (18)$$

$$A = \frac{Eu(r)}{\bar{r}} + \frac{Et}{2\bar{r}} \{ \varepsilon_r^{pl} + d\varepsilon_r^{pl} + \varepsilon_r^{th} \} - E \{ \varepsilon_\theta^{pl} + d\varepsilon_\theta^{pl} + \varepsilon_\theta^{th} \}$$

حالت تماس مجددا محاسبه می‌گردد، این محاسبات در یک استپ زمانی برای کل نودهای محوری اجرا می‌شود. سرانجام با استفاده از تغییرات حجم‌ها، دما و میزان پاره‌های شکافت مقدار فشار داخلی محاسبه و اطلاعات را به عنوان ورودی به گام زمانی بعد منتقل خواهد کرد.

تنش - کرنش غلاف زیرکالوی، انبساط دمایی غلاف، رشد محوری غلاف بر اثر برخورد نوترون‌های سریع، خزش ناشی از فشارهای محیطی موجود استفاده می‌شود. منابع استفاده شده در این معادلات تجربی که خاص غلاف راکتور بوشهر می‌باشد؛ در جدول ۲ مشخص است.

جدول ۲. منابع مورد استفاده جهت شبیه سازی پدیده‌ها و ثابت‌های

مکانیکی موجود در غلاف E110

منبع	مدل استفاده شده
B.Yu.Volkov e. a. [8]	مدول یانگ و مدول برشی
LYegorova, [9]	نمودار تنش-کرنش
Hesketh[10]	رشد غلاف بر اثر برخورد نوترونهای سریع
A.S.Zaimovsky et. al. [11]	انبساط دمایی غلاف
Franklin[12]	خزش غلاف

۳. الگوریتم روش محاسبه

الگوریتم محاسباتی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده می‌شود، هندسه، جنس مواد مورد استفاده، و تاریخچه قدرت میله سوخت به عنوان مقادیر ورودی داده شده سپس در هر گام زمانی و نود محوری مقادیر برن آب، شار نوترون‌های سریع و در نهایت دمای سطح میله سوخت محاسبه شده که در این مطالعه محل بحث نمی‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از معادلات (۱)، (۳)، (۴) و جدول شماره ۱ تغییرات شعاعی و محوری قرص سوخت بدست می‌آید.

پس از محاسبه تنش و تغییرات شعاعی و محوری غلاف از معادلات (۵) تا (۱۵) و جدول (۲) می‌توان ضخامت گپ را محاسبه کرد؛ حال با استفاده از ضخامت گپ شرط تماس و عدم تماس میان قرص سوخت و غلاف سنجیده شده و در نهایت اگر تماس رخ داده باشد محاسبات مربوط به غلاف در

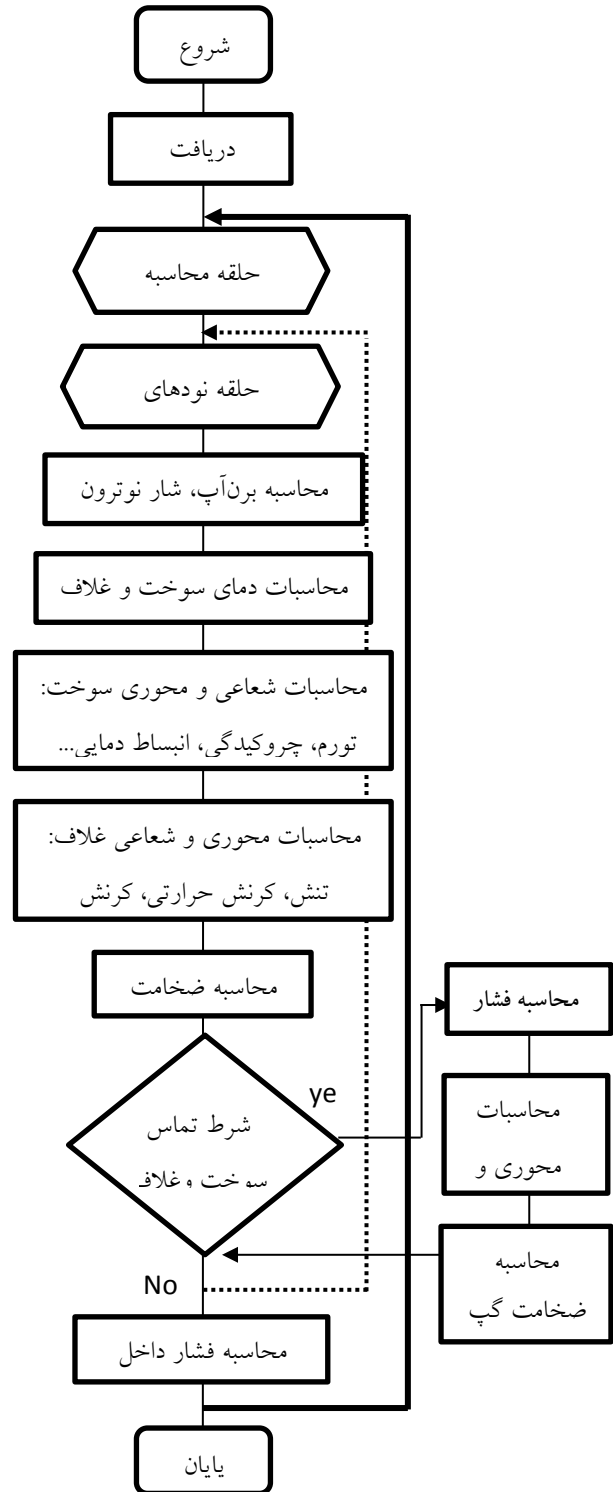
۴. نتایج :

۴.۱. بررسی نتایج شبیه سازی مکانیکی راکتور بوشهر با جنس غلاف راکتورهای غربی و مقایسه روش حل با کد فرپکن ۳.۳^{۱۲}

مشخصات عملیاتی میله سوخت راکتور بوشهر که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد در جدول ۳ ارائه شده و تاریخچه قدرت فرضی راکتور به صورت یکنواخت در ۱۰۰۰ مگاوات الکتریک می باشد. دمای سطح قرص سوخت و غلاف برای شرایط کاری مشابه با استفاده از کد فرپکن لحاظ شده است؛ در ادامه نتایج به دست آمده در این مقاله برای تحلیل مکانیکی میله سوخت با نتایج به دست آمده از کد فرپکن ۳،۳ به مقایسه گذاشته می شود. لازم به ذکر است که جنس غلاف در این ورودی جهت تست صحت روش حل ارائه شده، زیرکالوی ۴^{۱۳} یعنی غلاف موجود در فرپکن در نظر گرفته شده که در انتهای بخش تاثیر تفاوت جنس غلاف با استفاده از منابع ذکر شده در جدول ۲ ارائه خواهد شد.

جدول ۲. مشخصات در نظر گرفته شده برای آزمایش کد شبیه-ساز

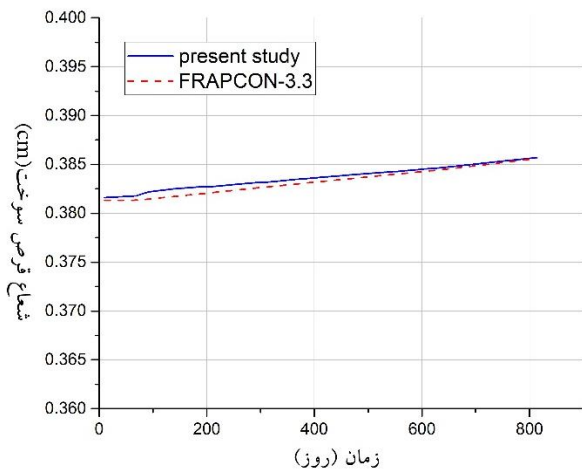
موضوع	مقدار/ نوع
نوع راکتور	VVER
فشار خنک کننده	۱۵,۷ Mpa
توان	۱۰۰۰ MW
فشار داخل میله سوخت	۲ Mpa
ماده سوخت	UO ₂ %۲,۴
قطر خارجی قرص سوخت	۷,۵۷ mm



شکل ۳. الگوریتم روش محاسبه

¹³ Zircaloy_4

¹² Frapcon3.3



شکل ۵. تغییرات شعاع قرص سوخت بحرانی داغ‌ترین میله سوخت راکتور

در ابتدای کار راکتور اثر چروکیدگی بر اثر تورم و انبساط سوخت غالب بوده و تا ۸۰ روز بعد از کارکرد راکتور با پرشدن تخلخل‌های موجود در قرص از گازهای ناشی از شکافت، قرص شروع به متورم شدن می‌کند.

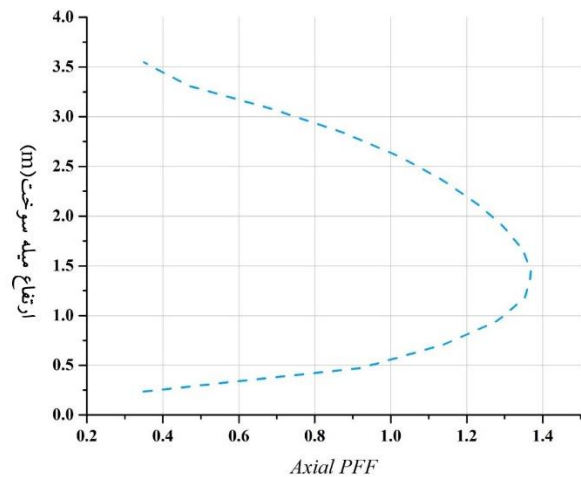
جهت ادراک بهتر تغییرات ایجاد شده در شعاع قرص سوخت، اثر هر یک از پدیده‌های موجود در شکل ۶ رسم گردیده است که حاوی نکات زیر می‌باشد:

- در ابتدای شروع کار راکتور با توجه به اینکه پدیده غالب چروکیدگی قرص بوده و شعاع قرص کاهش پیدا کرده لذا انتقال حرارت در فضای گپ کاهش یافته و دمای مرکز سوخت افزایش می‌یابد که باعث افزایش انبساط دمایی قرص می‌گردد. این افزایش دما و انبساط دمایی با افزایش شعاع در روزهای بعد تقلیل پیدا می‌کند.

- با توجه نمودار مربوط به تورم متوجه می‌شویم تا ۸۰ روز بعد از شروع کار راکتور، تخلخل‌های موجود در قرص توسط گازهای ناشی از شکافت پر می‌شود و تورمی در قرص رخ نداده اما بعد از پر شدن فضای

۱,۵mm	قطر داخلی قرص سوخت
۰,۹۴,۹	چگالی تئوری قرص سوخت
۳,۵۳m	ارتفاع میله سوخت
۹,۱mm	قطر میله سوخت
۷,۷۳mm	قطر داخلی غلاف
۱۲,۷۵mm	فاصله مرکز تا مرکز میله سوخت
زیرکالی ۴	جنس غلاف

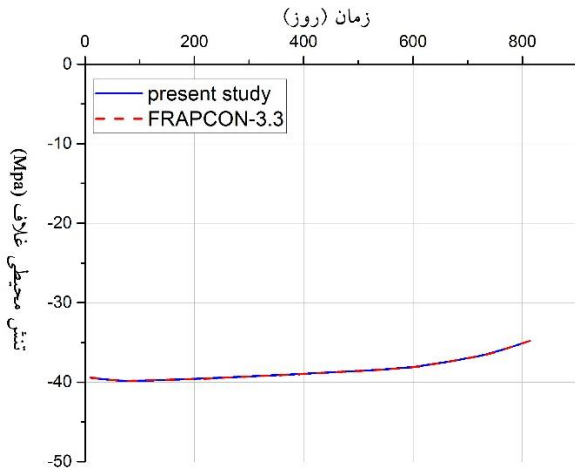
متوسط چگالی قدرت خطی مورد استفاده در راکتور بوشهر 1677 kw/m و توزیع ضرایب ماکزیمم قدرت^{۱۴} برای مجتمع سوخت‌های مختلف، متفاوت است [۱۳]. در شکل ۴ توزیع پروفیل ضریب حداکثر قدرت محوری (qf) برای داغ‌ترین میله سوخت نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۴: توزیع ضرایب قدرت ماکزیمم محوری برحسب ارتفاع میله سوخت برای داغ‌ترین مجتمع سوخت راکتور بوشهر

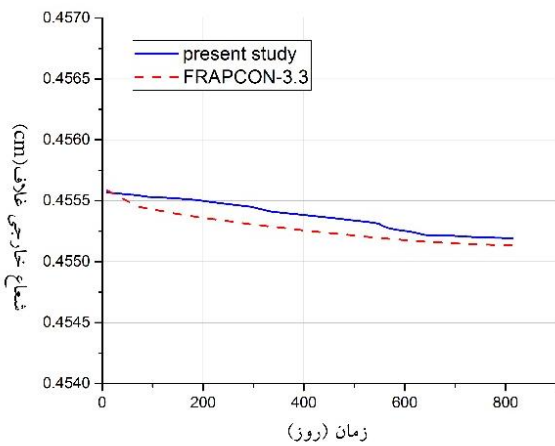
اولین آثار مصرف سوخت و افزایش دما به صورت تغییر شکل در قرص سوخت نمود پیدا می‌کند که در شکل ۵ تغییرات شعاع خارجی قرص سوخت ارائه می‌گردد.

¹⁴Power Peaking Factor



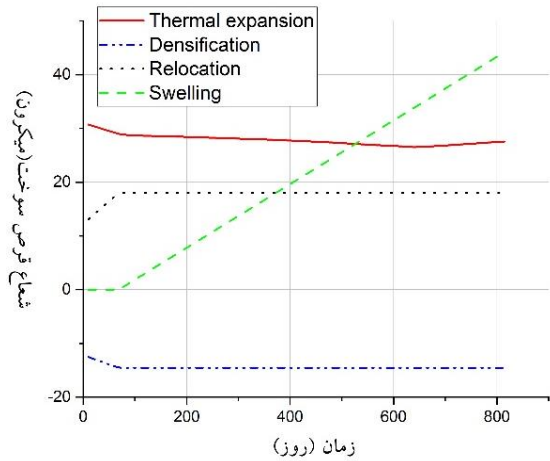
شکل ۸. تنش محوری وارده به غلاف میله سوخت راکتور ۱۰۰۰ مگاواتی برحسب روز

کاهش مقدار تنش‌های محوری و محیطی در انتهای سیکل بهره‌برداری از غلاف به علت افزایش فشار داخلی میله سوخت و در نتیجه کاهش اختلاف فشار منفی وارده به غلاف است. به طور کلی اثرات کرنش‌های الاستیک و پلاستیک غلاف را اعم از کرنش خزشی، کرنش دمایی و ... می‌توان در تغییر شعاع خارجی غلاف مشاهده کرد که در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است.



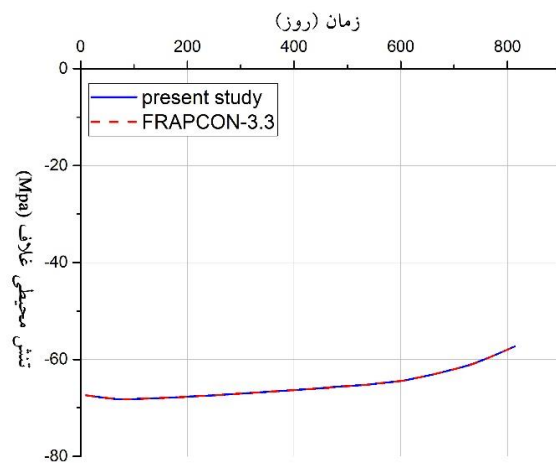
شکل ۹. شعاع خارجی بحرانی‌ترین بخش محوری از داغ‌ترین میله سوخت راکتور بوشهر

تخلخل‌های موجود، قرص شروع به متورم شدن می‌کند.

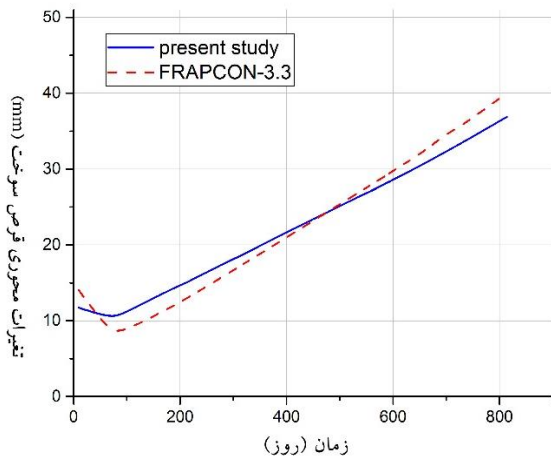


شکل ۶. تغییرات شعاع ایجاد شده توسط پدیده‌های مکانیکی موجود در شعاع سوخت

آثار مکانیکی مصرف سوخت بر غلاف را می‌توان در تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در آن مشاهده کرد، در اشکال ذیل تنش‌های محیطی غلاف که رابطه مستقیمی با اختلاف فشار ماده خنک کننده و گاز هلیوم داخل میله سوخت دارد، نشان داده می‌شود. مقادیر هر یک از این تنش‌ها در کرنش پلاستیک ناشی از خزش و کرنش‌های الاستیک وارده به غلاف موثر می‌باشند.



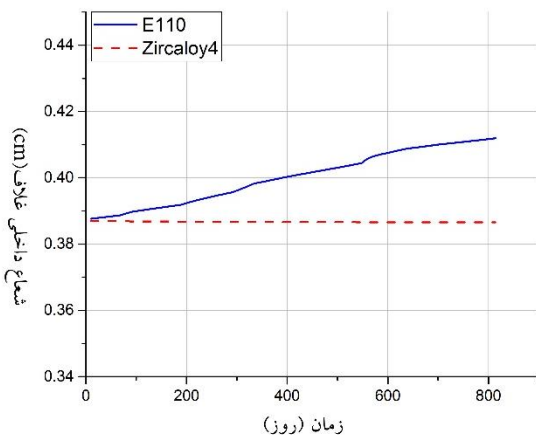
شکل ۷. تنش محیطی غلاف در داغ‌ترین میله سوخت راکتور بوشهر



شکل ۱۱. تغییرات محوری مجموعه قرص های سوخت در طول میله سوخت راکتور هزار مگاواتی

۴.۲. بررسی تاثیر جنس غلاف راکتور بوشهر در نتایج

در این بخش با وارد کردن مشخصات غلاف E110 با استفاده از منابع اشاره شده در جدول شماره ۲ به روش حل موجود و با ثابت نگه داشتن مشخصات ورودی در بخش پیشین به بررسی نتایج حاصل از این تغییرات می‌پردازیم. تفاوت موجود در محاسبه تغییرات شعاع داخلی و خارجی در دو نوع غلاف فوق که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است ناشی از تفاوت موجود در مدل‌های انبساط دمایی، خزش و کرنش پلاستیک می‌باشد که بیشترین تاثیر را در این بین کرنش پلاستیک و انبساط دمایی می‌گذارد.

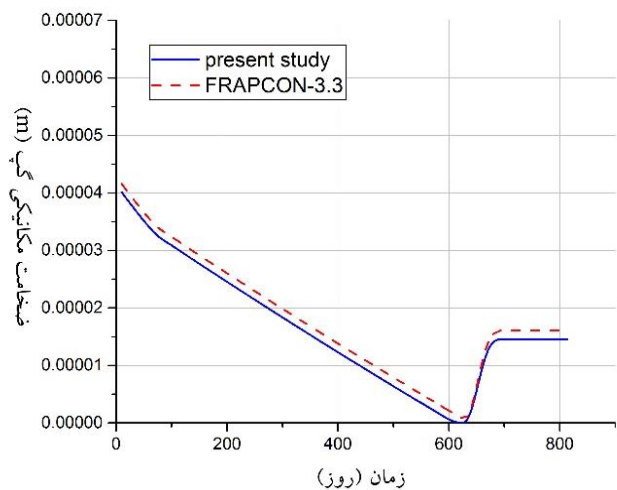


شکل ۱۲. شعاع داخلی غلاف در راکتور بوشهر با دو جنس E110 و Zircaloy4

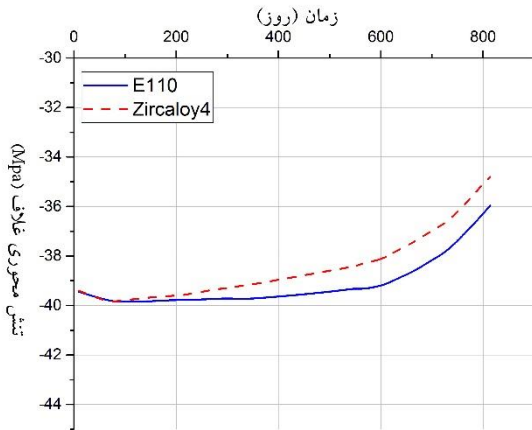
با به دست آمدن شعاع داخلی غلاف و شعاع خارجی قرص سوخت می‌توان مقدار فضای خالی گپ و سنجش برقراری تماس میان قرص و غلاف را انجام داد، در شکل ۱۰ مشاهده شد که در روز ۶۳۹ غلاف یک تماسی با قرص دارد و بعد از آن به علت فشار تماسی ایجاد شده، مقدار relocation و به بیان دیگر فضاهای میان ترک‌ها کاهش می‌یابد و قرص و غلاف مجدداً از یکدیگر جدا می‌شوند.

از موارد مهم دیگری که باید به درستی شبیه‌سازی شود، رشد محوری مجموعه قرص‌های سوخت و غلاف است چراکه به طور مستقیم بر روی حجم محفظه پلنوم و در نتیجه فشار گاز داخل گپ تاثیر می‌گذارد.

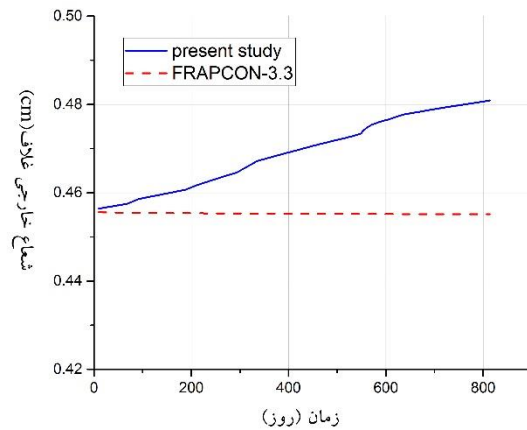
همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است تغییرات طولی مجموعه قرص‌های سوخت در ابتدا به علت دمای زیاد افزایش یافته اما در همان لحظات آغازین اثر چروکیدگی بر انبساط دمایی غالب شده تا لحظه‌ای که مجموع تغییرات محوری در روز ۶۹ به کم‌ترین حالت خود می‌رسد، در ادامه با روی کار آمدن اثر تورم ناشی از محصولات شکافت، افزایش طول شیب صعودی پیدا می‌کند.



شکل ۱۰. اندازه گپ داغ‌ترین میله سوخت راکتور بوشهر



شکل ۱۵. تنش محوری غلاف در راکتور بوشهر با دو جنس E110 و Zircaloy4



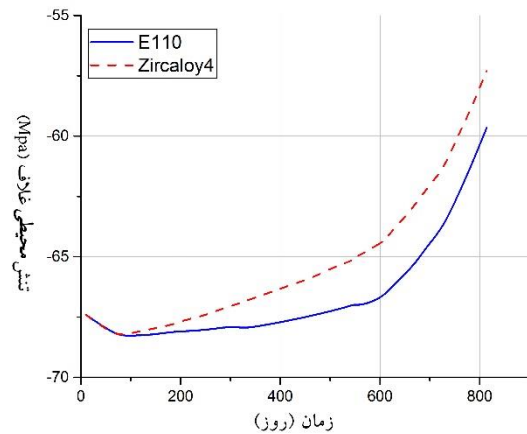
شکل ۱۳. شعاع خارجی غلاف در راکتور بوشهر با دو جنس E110 و Zircaloy4

۵. بحث و نتیجه گیری :

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده و نمودارهای رسم شده در این مقاله، الگوریتم عددی ارائه شده برای شبیه‌سازی مکانیکی میله سوخت کارآیی خوبی دارد. تغییرات مکانیکی مشهودی که در هندسه میله سوخت اتفاق می‌افتد نشان از اهمیت فراوان شبیه‌سازی هر نوع میله سوخت پیش از بکارگیری آن برای نخستین بار در راکتور دارد. همچنین می‌توان با استفاده از کد نوشته شده میله‌های سوخت بهینه‌ای از نظر مصرف برن آپ بالا و تغییرات مکانیکی مجاز، طراحی کرد؛ لازم به ذکر است تغییرات مجاز هندسی و مکانیکی تحت عنوان استانداردهایی در آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ارائه شده است. [۱۴]

در بخش‌هایی نتایج مشاهده شد هنگامی که جنس غلاف از زیرکالوی ۴ به E110 تغییر می‌کند کرنش‌های غلاف سوخت مقادیر بیشتر و در نتیجه نایمن‌تری دارند، این تفاوت ایجاد می‌کند که در شبیه‌سازی راکتورهای شرقی حتما جنس غلاف لحاظ شده و از کدهای شبیه‌ساز بومی استفاده گردد چرا که کدهای شبیه‌سازی مانند FRAPCON همانطور که در ابتدای این پژوهش اشاره شد جنس غلاف سوخت راکتور بوشهر را در کتابخانه خود ندارند. [۲]

تغییرات شعاع داخلی و ضخامت گپ نسبت به حالت پیشین موجب تغییر در دمای سطح سوخت و غلاف، تغییر در فشار گاز داخل میله سوخت و در نهایت تغییر در تنش‌های اصلی وارد بر میله سوخت می‌گردد که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تفاوت ایجاد شده در تنش‌های اصلی نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۴. تنش محیطی وارده بر غلاف در راکتور بوشهر با دو جنس E110 و Zircaloy4

مراجع

- [11] A.S. Zaimovsky, et. al. Zirconium alloys in nuclear industry, -Moscow, Energoatomizdat, 1981.
- [12] D.G. Franklin, G.E. Lucas, and A.L. Bement, Creep of Zirconium Alloys in Nuclear Reactors, ASTM STP-815,103-105, 1983.
- [13] Russia Federal Agency on Nuclear Energy, Bushehr NPP Final Safety Analysis Report, Moscow, 2003.
- [14] Beck, Winfried, et al. Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review, 2012.
- [1] IAEA, "Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and western PWR nuclear power plants," *IAEA-TECDOC-1381*, Vienna, Austria, 2003.
- [2] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, FRAPCON-4: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, 2015.
- [3] D. Lanning, C. Beyer, K. Geelhood, FRAPCON-3 Updates, Including Mixed- Oxide Fuel Properties, NUREG/CR-6534, Vol.4, PNNL-11513, 2005.
- [4] G. A. Berna, C. E. Beyer, K. L. Davis, D. D. Lanning, FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, 1997
- [5] E. Rolstad, A. Hanveik, KD Knudsen, Measurements of the Length Changes of UO₂ Fuel Pellets During Irradiation, In Enlarged Meeting on Computer Control and Fuel Research. 1973.
- [6] D.L. Hagrman, GA (comps) Reymann, Matpro-Version 11: A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, Idaho National Engineering Lab., Idaho Falls (USA). NUREG/CR-0497.
- [7] R.C. Hibbeler, Statics and Mechanics of Materials 2nd. New Jersey: Pentice Hall. 2004.
- [8] B.Yu.Volkov et. al. Material property library for Zr-1%Nb alloy cladding, Report IAE-4941/11, 1989.
- [9] A. Shestopalov, K. Lioutov, L. Yegorova, G. Abyshov, K. Mikitiouk, Modification of USNRC's FRAP-T6 fuel rod transient code for high burnup VVER fuel. International Agreement Report, 6-9, 1999
- [10] R.V. Hesketh, Non-linear Growth in Zircaloy-4, *J.Nucl.Mater.*30, 217-22, 1969.

Study Of Bushehr VVER-1000 Hot Fuel Rod Mechanical Performance With Rigid Pellet Method.

M. GHASABIAN¹ , S. TALEBI^{2*}

1. MSc Student, Department of Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran, Iran

**Corresponding author. E-mail address: sa.talebi@aut.ac.ir*

(Received: 2016/12/03 - Accepted: 2017/03/11)

ABSTRACT

Safe operation and maximum burning of fuel material are two issues that are recently considered in nuclear fuel rod fabrication industry. Any failure in nuclear fuel and cladding, such as fuel rod ballooning or pellet-clad high contact pressure, may cause release of radioactive fission fragments to the reactor coolant, which is an undesirable issue from the reactor safety point of view. To have a correct prediction of fuel rod performance used simulator codes, In this paper the simulation of mechanical part of Bushehr VVER-1000 fuel rods operation done with the rigid pellet and thin cylindrical model.

Empirical relationships and numerical algorithms to solve equations somehow have been selected to mechanical parameters such as the fuel rod's outer radius and stress-strain of clad are carefully prediction. Mechanical performance Simulations Results of VVER-1000 fuel rod in good agreement with FRAPCON-3.3 output. The models used in this paper can be used to evaluate the performance of future native reactor fuel rods.

Keywords: *Stress, Strain, Fuel rod, Swelling, Densification*