



سازمان انرژی اتمی ایران

مقدمه‌ای بر طراحی و تحلیل ساختاری میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای با تکنیک‌کننده آب

تألیف: دکتر موجهر روشن ضمیر

زمستان ۱۳۹۷

سرشناسه: روشن ضمیر، منوچهر، ۱۳۳۰
 عنوان و نام پدیدآور: مقدمه‌ای بر طراحی و تحلیل ساختاری میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای
 با خنک‌کننده آب، تألیف: منوچهر روشن ضمیر، ویراستار فنی: علیرضا موسی خانی
 مشخصات نشر: تهران، منوچهر روشن ضمیر، سازمان انرژی اتمی ایران، اداره کل دیپلماسی عمومی
 و اطلاع رسانی، ۱۳۹۷
 مشخصات ظاهری: ۵۷۱ ص،
 شابک: شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۰۰-۱۶۲۸-۱
 وضعیت فهرست نویسی: فیپا
 موضوع: سوخت اتمی
 موضوع: Nuclear Fuels
 موضوع: راکتورهای هسته‌ای
 موضوع: Nuclear Reactors
 شناسه اف‌رده: سازمان انرژی اتمی ایران، اداره کل دیپلماسی عمومی و اطلاع رسانی
 رده بندی کتره: ۹۴۷/۱۳۹۷/TK۹۳۶۰/
 رده بندی دیویی: ۶۲۱/۴۸۳۳۵
 شماره کتاب‌شناسی ملی: ۵۴۲۳۶۱۱

نام کتاب: مقدمه‌ای بر طراحی و تحلیل ساختاری میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای با
 خنک‌کننده آب
 تألیف: دکتر منوچهر روشن ضمیر
 طراح جلد و صفحه آرایی: خشایار فرشید
 ویراستار فنی: دکتر علیرضا موسی خانی
 نوبت چاپ: چاپ اول
 سال چاپ: پاییز ۱۳۹۷
 ناشر: منوچهر روشن ضمیر با همکاری اداره کل دیپلماسی عمومی و اطلاع‌رسانی
 شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۰۰-۱۶۲۸-۱
 قیمت: ۶۵ هزار تومان
 کلیه حقوق چاپ و نشر این اثر متعلق به سازمان انرژی اتمی ایران است.

پیش گفتار

بهره‌برداری از نیروگاه اتمی بوشهر، و همچنین برنامه ریزی جهت تأمین بخشی از انرژی کشور از طریق نیروگاه‌های اتمی و لزوم تجدید نظر در طراحی و ساخت میله و مجتمع‌های سوخت، عواملی هستند که تدوین استراتژی دراز مدت جهت بهینه کردن مدیریت این نیروگاه‌ها، افزایش عمر بهره‌برداری، بهبود بازدهی اقتصادی، افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه‌ها را ضروری می‌سازد.

از طرف دیگر ملاحظات اقتصادی و برنامه ریزی جهت بهینه کردن هزینه چرخه سوخت تنها با اتخاذ دو سه است زیر امکان پذیر می‌باشد:

۱- افزایش مقدار فرسایش سوخت؛

۲- افزایش طول سیکل تعویض سوخت.

از این رو لازم است که تدوین در طراحی میله سوخت و هندسه سوخت و غلاف بوجود آورد و نیز از آلیاژهای جدید جهت ساخت غلاف سوخت استفاده نمود. از طرف دیگر با توجه به تغییرات بوم آموخته در طراحی سوخت و بویژه‌ایده افزایش برن آپ سوخت، بنظر می‌رسد که لازم است در معیارهای ایمنی سوخت تجدید نظر شود. از جنبه تاریخی، پیش‌بینی حاشیه ایمنی در طراحی و بهره‌برداری از سوخت، بر اساس تفکر محافظه کارانه در تعریف معیارهای ایمنی و حصول اطمینان از عملکرد ایمن سوخت در شرایط مختلف بهره‌برداری، انجام می‌گیرد. این معیارها را می‌توان، با رعایت ملاحظات محافظ کارانه، از طریق ملاحظات نظری و نیز دریافت‌های تجربی به شرح زیر تعریف نمود:

- از طریق مدل‌ها مورد استفاده در تحلیل ساختاری سوخت و دیدن اثر تغییر پارامترهای مختلف بر عملکرد سوخت؛
- از طریق داده‌های طراحی نیروگاه‌های اتمی و مجتمع سوخت راکتورها؛
- از طریق داده‌های تاریخی دریافت شده از تجربیات عملیاتی و بهره‌برداری.

شناخت جنبه‌های مختلف حاشیه‌های ایمنی و ارزیابی آنها و حصول اطمینان از مناسب بودن حاشیه‌های انتخابی، از منظر واحد قانونی با اهمیت می‌باشد. در حالیکه از نظر صاحبان صنعت تولید و ساخت مجتمع‌های سوخت و نیز مصرف کنندگان، بهینه نمودن طراحی سوخت و تغییر جنبه‌های مختلف حاشیه‌های ایمنی، تنها با کاهش هزینه سیکل سوخت قابل درک می‌باشد.

بیشتر معیارهای ایمنی سوخت که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ تدوین شده‌اند. این معیارها، به کمک تجربیات بدست آمده از عملکرد میله‌های سوخت با طراحی‌های متنوع در شرایط بهره‌برداری و نیز بعضی از آزمون‌های خارج از راکتور، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

همچنین همزمان با تغییرات بوجود آمده در هندسه سوخت و غلاف، جهت کاهش خوردگی و جذب هیدروژن در غلاف، آلیاژهای جدید جهت استفاده در غلاف سوخت راکتورها توسعه یافته است. علاوه بر تغییر در ترکیب آلیاژ، ایده روکش نمودن سطح داخلی غلاف سوخت راکتورهای BWR برای مقاوم سازی آن در برابر ترک ناشی از خوردگی تنش‌ی و برهم کنش مکانیکی سوخت و غلاف و نیز در راکتورهای PWR با روکش نمودن سطح خارجی غلاف برای کاهش خوردگی که به ویژه در راکتورها با قدرت‌های بالا حائز اهمیت می‌باشد، نیز پیشنهاد شده است.

از طرفی تغییرات بوجود آمده در آلیاژ مورد استفاده در غلاف سوخت موجب شده است که از یک طرف برن‌آپ سوخت و نیز دلول سیکل بهره‌برداری از سوخت افزایش یابد، و از طرف دیگر بر نحوه تشکیل رسوبات بر روی سطح، میزان خوردگی بوجود آمده و جذب هیدروژن در غلاف و تشکیل صفحات هیدرید، ریز ساختار و شیمی سوخت، نرخ‌ها شدن گازهای حاصل از شکافت از داخل سوخت تأثیر خواهند گذاشت.

توسعه صنعت هسته‌ای در کشور و نیرو تولید انواع سوخت در داخل کشور و همچنین ضرورت توجه به ایمنی راکتور و بهره‌برداری بهینه از آن، لزوم توجه به طراحی و ساخت میله‌های سوخت و نیز ساخت سوخت‌های جدید جهت بهینه کردن هزینه چرخه سوخت که در فوق به آن اشاره شد را ایجاب مینماید.

از این رو کتاب حاضر برای معرفی مبانی تحلیل ساختاری و طراحی میله‌های سوخت و نیز پیش‌بینی عملکرد میله‌های سوخت راکتورهای آبی در شرایط بهره‌برداری تحریر شده است و شامل شش فصل و چهار پیوست به شرح زیر می‌باشد:

فصل اول: مبانی طراحی میله‌های سوخت؛

فصل دوم: نقص‌های بوجود آمده در میله‌های سوخت و لزوم بازنگری در معیارهای ایمنی سوخت؛

فصل سوم: منابع تولید انرژی هسته‌ای؛

فصل چهارم: تحلیل حرارتی سوخت و غلاف برای شرایط پایا؛

فصل پنجم: تحلیل حرارتی سوخت و غلاف برای شرایط گذرا؛

فصل ششم: تحلیل مکانیکی سوخت و غلاف و تعیین توزیع تنش و کرنش‌های الاستیک و پلاستیک در سوخت و غلاف.

پیوست ۱: پیامد حادثه اتلاف خنک‌کنند (LOCA) ناشی از شکست بزرگ و شکست کوچک مدار اولیه راکتور بر دمای میله سوخت و تغییرات ساختاری بوجود آمده در آن‌ها؛
پیوست ۲: فهرست تعدادی از کدهای مورد استفاده در تحلیل ساختاری میله‌های سوخت راکتورهای حرارتی و سریع؛

پیوست ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی سوخت UO_2 و غلافی از آلیاژ زیرکونیوم که در تحلیل ساختاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛
پیوست ۴: تحلیل تنش‌های حرارتی ایجاد شده در جداره یک استوانه.

یادآور می‌شود که فرمول‌بندی ریاضی و تحلیل ساختاری سوخت و غلاف که در فصول چهارم تا ششم آورده شده است با توجه به رویکرد نگارنده به این موضوع خاص انجام شده است و کوشش شده است که تا حد ممکن از روش‌های کلاسیک برای این منظور استفاده شود، البته تا کنون کدهای کامپیوتری ساده و با پیچیده متعددی برای این منظور تدوین شده است که ممکن است در فرمول‌بندی ریاضی به منظور تحلیل حرارتی مکانیکی و نیز روشهای حل معادلات دیفرانسیل با رویکرد نگارنده تفاوت داشته باشد. همچنین در تحلیل مکانیکی سوخت و غلاف برای تعیین کمی بسیاری از پارامترها از مدل‌های فیزیکی متعدد و نیز روابط تجربی استفاده شده که در کتاب این مدل‌ها توصیف شده‌اند. از طرف دیگر کتاب شامل بیش از صد مثال حل شده در خصوص موضوعات عنوان شده در هر فصل می‌باشد که می‌تواند به خوانندگان و دانشجویان محترم در شناخت بیشتر موضوع کمک نماید.
در فصول و پیوست‌های معرفی شده در فوق مطالب زیر به رشته تحریر در آمده است:

۱- **فصل اول:** توجه به ایمنی راکتورهای تجارتي در حین بهره‌برداری از جهت جلوگیری از رسیدن آسیب به افراد جامعه بر اثر پرتوگیری، حائز اهمیت می‌باشد. از طرفی سوخت و غلاف محصولات حاصل از شکافت را در خود جا داده و مانع از خروج مواد پرتوزا به بیرون از غلاف می‌شوند، بنابراین بی نقصی میله‌های سوخت نقش اساسی در تأمین ایمنی راکتورها به عهده دارند. از این رو حصول اطمینان از کیفیت طراحی میله سوخت و استفاده از معیارهای مناسب در طراحی برای جلوگیری از وقوع نقص در میله‌های سوخت در حین بهره‌برداری عادی از راکتور و نیز کاهش پیامد ناشی از وقوع حادثه و آسیب دیدن هسته راکتور، ضروری می‌باشد. لذا در

این فصل مبانی طراحی میله سوخت و نیز ملاحظات عمومی در شبیه‌سازی عملکرد میله‌های سوخت بشرح زیرتوصیف شده است:

- ۱- ساختار میله‌های سوخت و نقش آن در تولید انرژی؛
- ۲- جایگاه میله‌های سوخت در تأمین ایمنی راکتور در حال بهره‌برداری؛
- ۳- معیار های ایمنی مورد استفاده در طراحی میله سوخت؛
- ۴- تحلیل ساختاری و شبیه‌سازی عملکرد میله سوخت؛
- ۵- اهمیت تحلیل ساختاری میله سوخت در ارزیابی حوادث بوقوع پیوسته در راکتور؛
- ۶- مدل‌های فیزیکی مورد استفاده در تحلیل حرارتی مکانیکی میله سوخت.

۲- فصل دوم: در این فصل عناوین زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

۱- وقوع نقص در میله‌های سوخت: در این بخش ابتدا نگاهی کوتاه به روند تاریخی خرابی‌های بوقوع پیوسته در میله سوخت انداخته شده است. و آنگاه دلایل اصلی وقوع نقص در میله‌های سوخت در بین بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سپس در مورد مکانیسم‌های شناخته شده ایجاد نقص در میله‌های سوخت که عبارتند از: حرارت دیدگی، اندرکنش سوخت و غلاف (PCI)، هیدرید شدن، ترک‌شدن، شکست مکانیکی، سایش، فرو ریختگی غلاف، خوردگی، و افزایش دما ناشی از افزایش دمای میله سوخت، می‌باشند به تفصیل صحبت شده است.

۲- بازنگری در معیارهای ایمنی سوخت: در این بخش معیارهای ایمنی سوخت و ارزیابی این معیارها و نیز تغییرات به وجود آمده در طراحی سوخت و اثر این تغییرات بر پارامترهای تأثیر گذار در بهره‌برداری از راکتور نظیر: شار حرارتی بحرانی (CHF)، ضرایب راکتیویته، بحرانیت و حاشیه خاموشی، غنای سوخت، رسوبات تشکیل شده بر سطح غلاف، تنش / کرنش / خستگی، اکسیداسیون و هیدرید شدن غلاف، فشار داخلی میله سوخت، اندرکنش بین قرص و غلاف (PCI) و ترک ناشی از خوردگی تنشی (SCC)، بارهای حرارتی مکانیکی و اندرکنش مکانیکی سوخت و غلاف، ذوب سوخت، محدودیت‌های تولید خطی حرارت، خرد شدن و پخش سوخت و غیره، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- دیگر عوامل تعیین کننده در کارایی سوخت: در این بخش سایر عواملی که در ارتباط با کارایی و ایمنی سوخت حائز اهمیت می‌باشند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این عوامل عبارتند از مدیریت سوخت، ناهنجاری افت محوری قدرت راکتور، سوخت‌های مخلوط اکسیدی، هسته راکتور حاوی مجتمع‌های سوخت با طراحی‌های متفاوت، سقوط ناقص و یا آهسته میله‌های کنترل، افزایش قطر و ارتفاع غلاف، فاکتورهای پیکینگ شعاعی، و غیره.

۴- استفاده از نتایج آزمون سوخت‌های تابش دهی شده جهت حصول اطمینان از کیفیت طراحی و ساخت میله و مجتمع‌های سوخت هسته‌ای.

۳- **فصل سوم:** در این فصل، روش‌های تولید انرژی هسته‌ای از طریق جذب نوترون در مواد شکافت‌پذیر و شکافته شدن این مواد، و یا همجوشی هسته‌های سبک و نیز واپاشی رادیونوکلئیدها، در ذیل عناوین زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- ۱- سوخت هسته‌ای منبع تولید انرژی هسته‌ای؛
- ۲- تولید انرژی توسط راکتورهای شکافت هسته‌ای؛
- ۳- تولید انرژی توسط راکتورهای گداخت هسته‌ای؛
- ۴- تولید انرژی بر اثر واپاشی رادیونوکلئیدها و عناصر پرتوزا و نیز حرارت پسمانده تولید شده در سرجت‌های مصرف شده.

۴- **فصل چهارم:** در این فصل، تحلیل حرارتی سوخت و غلاف برای شرایط پایا انجام شده است. برای این منظور، معادلات دیفرانسیل انتقال حرارت حاکم بر سوخت و غلاف - جهت تعیین توزیع دما - در این دو ماده به روش عددی و یک روش شبه تحلیلی حل گردیده‌اند. برای حل معادلات دیفرانسیل انتقال حرارت و تعیین توزیع دما در هر گام زمانی می‌باید کمیت‌های زیر محاسبه شوند که در این فصل به آنها پرداخته شده است:

- ۱- تعیین توزیع چگالی قدرت در سوخت؛
- ۲- تعیین توزیع هدایت حرارتی در سوخت و غلاف؛
- ۳- تعیین اثر ترک بر هدایت حرارتی سوخت؛
- ۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت در شکاف بین سوخت و غلاف برای شرایطی که شکاف باز، نیمه باز و بسته می‌باشد و نیز شکاف انباشته از گازها. حاصل از شکافت می‌باشد؛
- ۵- محاسبه مقدار گازهای تولید شده در سوخت بر اثر شکافت هسته‌ای؛
- ۶- تعیین مقدار گازهای رها شده از داخل سوخت و تعیین ترکیب گاز موجود در شکاف بین سوخت و غلاف؛
- ۷- محاسبه فشار داخلی میله سوخت؛
- ۸- تعیین توزیع و میزان مصرف سوخت.

۵- **فصل پنجم:** پیش‌بینی رفتار دینامیکی راکتور هسته‌ای و تحلیل رفتار آن در طی حالت گذرا با بسامد آرام و یا طی یک حادثه فرضی، که تغییرات بسیار سریع و شدید می‌باشد، ایجاب

مینماید که بتوان توزیع دما در سوخت و غلاف را تعیین نمود. لذا در این فصل تحلیل حرارتی میله سوخت برای شرایط گذرا با بسامد آرام انجام شده است، و فرض می‌شود که در حالت گذرا دمای سطح غلاف و یا دمای خنک‌کننده ثابت باقی می‌ماند. از این رو معادله انرژی خنک‌کننده کاربردی در تحلیل ندارد. در اینجا توزیع دما در سوخت و غلاف در هر گام زمانی با حل معادله دیفرانسیل انتقال حرارت در حالت گذرا تعیین می‌شود. برای حل معادلات دیفرانسیل از روش‌های عددی تفاضل محدود و حجم کنترل استفاده شده است.

۶- فصل ششم: در این فصل بمنظور دستیابی به یک راه حل شبه تحلیلی کلاسیک (تحلیل عددی) برای تحلیل مکانیکی سوخت و غلاف و تعیین توزیع تنش و کرنش‌های کشسان و ماندنی و نیز تغییر شکل و ابعاد در سوخت و غلاف در سه راستای اصلی و نیز محاسبه فشار تماس بین سوخت و غلاف در صورت در تماس قرار گرفتن این دو، معادلات بنیادی جهت تحلیل مکانیکی سوخت و غلاف یعنی معادلات تعادل تنش در سه راستای شعاعی محیطی و محوری، همسازی کرنش و نیز دینامیک ساخت مندی بطور همزمان به روش تحلیلی - عددی حل شده‌اند که با حل عددی آن‌ها توزیع تنش و نیز توزیع کرنش‌های کشسان و کرنش‌های ماندنی (تورم سوخت، تراکم سوخت، خزش سوخت و نیز کرنش‌های ناشی از خزش و همچنین رشد غلاف در برابر نوترون‌های سریع، تعیین مقدار می‌شوند. برای این منظور مدل‌های فیزیکی متنوعی که برای تعیین کمیت‌های زیر مورد نیاز می‌باشند به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- ۱- تعیین ثابت پیواسن و ضریب کشسانی در سوخت و غلاف؛
- ۲- شرایط تشکیل و بازیافت ترک در سوخت و اثر آن به ضرائب تراکم پذیری؛
- ۳- محاسبه توزیع کرنش‌های حرارتی و کشسان در سوخت و غلاف؛
- ۴- تعیین مقدار تراکم و تورم سوخت و نیز تغییر حجم خاص، سوخت بر اثر این پدیده‌ها؛
- ۵- تعیین توزیع تخلخل موجود در سوخت در هر گام زمانی؛
- ۶- تعیین مقدار خزش بوجود آمده در سوخت و غلاف (برای حالت همسان گرد و ناهمسان گرد) بر اثر حرارت و تابش‌ها؛
- ۷- محاسبه رشد ناهمسان گرد غلاف زیرکالوی در برابر نوترون‌های سریع؛
- ۸- محاسبه کرنش ناشی از جابجائی سوخت بر اثر تشکیل ترک در آن؛
- ۹- محاسبه تغییر ابعاد سوخت و غلاف و نیز تغییر حجم نواحی مختلف موجود در میله سوخت؛
- ۱۰- محاسبه فشار تماس بین سوخت و غلاف؛