J. of Nucl Sci. and Tech.
Vol. 87, NO. 2, 2019, 81-88

مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
جلد ۸۷، شماره ۱، ۱۳۹۸، ۸۱-۸۸

ارزیابی گرمایی یک محفظه‌ی دومنظوره‌ی حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر در شرایط عادی بهره‌برداری

مهدی رضائیان*[۱و۲]، جمشید کمالی[۲]، سید جواد احمدی[۱]

۱. پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران ـ ایران

۲. شرکت ساخت تجهیزات نیروگاهی (ستنا)، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۳۳۹- ۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: از جمله‌ی مهم‌ترین سیستم‌های امروزی و در حال گسترش برای حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف شده‌ی رآکتورهای اتمی، محفظه‌های دو منظوره‌اند. در این مقاله، محفظه‌ی دو منظوره‌ای که با هدف حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر طراحی شده، مورد ارزیابی گرمایی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی هندسی محفظه‌ی دو منظوره با نرم‌افزار SolidWorks انجام شده و به منظور ارزیابی گرمایی آن در شرایط عادی زمان حمل و نگه‌داری موقت، از نرم‌افزار Ansys Workbench 15 استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده، حداکثر دمای غلاف سوخت از مقدار مجاز بیش‌تر نشده و در نتیجه یکپارچگی سوخت‌های مصرف شده در این شرایط حفظ خواهد شد. هم‌چنین حداکثر دمای اجزای مختلف محفظه در شرایط عادی زمان حمل و در دوره‌ی نگه‌داری موقت در محدوده‌های مجاز و ایمن قرار داشته و الزام‌های ایمنی محفظه براساس استانداردهای ایمنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تأمین خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: محفظه‌ی دومنظوره، ارزیابی گرمایی، سوخت مصرف شده، رآکتور اتمی بوشهر

Thermal Evaluation of a Dual Purpose Cask for Bushehr Nuclear Reactor Spent Fuels Under Normal Conditions

M. Rezaeian*[1,2], J. Kamali[2], S.J. Ahmadi[1]

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran

2. SATNA Co., AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Abstract: Dual purpose cask system is one of the most important developing systems of dry interim storage of nuclear spent fuels. Thermal evaluation of a dual purpose cask designed for transport and interim storage of spent fuels of Bushehr Nuclear Power Plant is carried out as appears in this paper. SolidWorks and ANSYS Workbench 15 are utilized for the modeling and thermal simulation of the cask under normal condition of transport, as well as, normal condition of interim storage, respectively. According to the results, the maximum temperature of the fuel cladding will not exceed the allowed limits and the fuel integrity will be maintainel. Furthermore, the temperatures of the other components are predicted in the range of allowed limits, demonstrating the safety of the cask under the normal conditions based on the IAEA safety standards.

Keywords: ***Dual Purpose Cask, Thermal Evaluation, Nuclear Spent Fuel, Bushehr Nuclear Reactor***

*Email: mdrezaeian@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۲۶

Archive of SID

www.SID.ir

۱. مقدمه

سوخت مصرف‌شده‌ی رآکتورهای اتمی پس از خروج از قلب رآکتور به استخر سوخت مصرف شده‌ی مجاور آن منتقل می‌شود تا با گذشت زمان از مقدار پرتوزایی و گرمای آن کاسته شود. چالش‌های فنی و اجتماعی باعث شده است که با وجود تلاش‌های فراوانِ پنج دهه‌ی گذشته، مجوزی برای دفن سوخت مصرف‌شده (و پسماند سطح بالا) در پسمان‌گور داده نشود [۱]. از آن‌جایی که اغلب استخرهای سوخت مصرف‌شده در نیروگاه‌های جهان پرشده یا در حال پرشدن هستند و بازفراوری و دفن نهایی نیز به تعویق افتاده است، فارغ از نوع سیاست برخورد با سوخت مصرف‌شده (پسماند، بازفراوری یا اقدام و بررسی[۱])، امروزه انبارش موقت[۲] یک مرحله‌ی اجتناب‌ناپذیر در قسمت انجامین مرحله‌ی نهایی چرخه‌ی سوخت[۳] هسته‌ای است [۲- ۴].

در میان انواع سیستم‌های انبارش موقت سوخت‌های مصرف شده، محفظه‌های دومنظوره (سیستم‌های نگه‌داری قابل حمل) نسبت به سایر سیستم‌ها از جای‌گاه ویژه‌ای برخوردار بوده و در حال گسترش هستند؛ مهم‌ترین دلیل این امر، عدم نیاز به تخلیه و بارگذاری مجدد آن‌ها در تأسیسات انبارش و پس از اتمام دوره‌ی نگه‌داری موقت است [۲]. مدیریت سوخت مصرف‌شده به وسیله‌ی یک محفظه‌ی دومنظوره شامل انبارش (کوتاه یا بلندمدت) سوخت مصرف‌شده، حمل درون جای‌گاهی[۴] پیش از زمان نگه‌داری و حمل برون جای‌گاهی[۵] پس از زمان نگه‌داری است. بنابراین علاوه بر الزام‌ها و ملاحظه‌های ایمنی انبارش سوخت مصرف‌شده [۵]، ملاحظه‌ها و الزام‌های مربوط به حمل‌ونقل مواد پرتوزا نیز در طراحی آن باید مد نظر قرار گیرد [۶].

به طور کلی محفظه‌های دومنظوره باید به گونه‌ای طراحی و ساخته شود که وظایف عملکردی نگاه‌داشت محتوای پرتوزای سوخت‌های مصرف‌شده، حفاظ‌سازی در مقابل پرتوزایی سوخت‌های مصرف‌شده، کنترل بحرانی‌شدن سوخت‌های مصرف‌شده یا ممانعت از آن، انتقال حرارت مناسب سوخت‌های مصرف‌شده و نیز حفظ یکپارچگی سازه‌ای و مکانیکی در شرایط عادی، غیرعادی و حادثه‌های زمان حمل و دوره انبارش را با توجه به ملاحظه‌ها و الزام‌های ایمنی انجام دهند. هم‌چنین توانایی بازیابی سوخت‌های مصرف‌شده پس از دوره‌ی انبارش که مهم‌ترین آن یکپارچگی[۶] سوخت است، باید حفظ شود.

در حال حاضر رآکتور اتمی بوشهر درحال بهره‌برداری است دست کم ۲ رآکتور هزار مگاواتی دیگر در آینده‌ی نزدیک، و در راستای رسیدن به ظرفیت ۲۰ هزار مگاوات برق هسته‌ای در بلندمدت، در دستور کار صنعت هسته‌ای کشور قرار دارد [۷]. در صورت عدم برنامه‌ریزی به موقع برای مدیریت سوخت مصرف‌شده‌ی این رآکتورها، در زمان نیاز، هزینه‌های گزافی به صنعت هسته‌ای کشور تحمیل خواهد شد [۸]. بنابراین، مطالعه، پژوهش و برنامه‌ریزی در سطح‌های مختلف سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری، علمی- پژوهشی و نیز صنعتی پیرامون مدیریت سوخت مصرف‌شده‌ی رآکتورهای هسته‌ای در کشور نه تنها ضروری بلکه نیازی اجتناب‌ناپذیر است. بر همین اساس، یک محفظه‌ی دومنظوره برای حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر طراحی شده است [۹- ۱۱] که در این مقاله از نقطه‌نظر گرمایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این ارزیابی، حداکثر دمای غلاف در شرایط عادی زمان حمل و دوره‌ی انبارش موقت، به عنوان پارامتر اصلی کنترل یکپارچگی سوخت مصرف‌شده، برآورد شده است.

۲. مشخصه‌های سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور بوشهر و محفظه‌ی دومنظوره

رآکتور بوشهر، رآکتور نوع آب تحت فشار روسی VVER-۱۰۰۰ مدل V-۴۶۰ است. این رآکتور ۱۰۰۰ مگاواتی حاوی ۱۶۳ مجتمع سوخت با مدت زمان اقامت[۷] ۳ تا ۴ سال در قلب رآکتور است. در هر بار سوخت‌گذاری، یک سوم سوخت یعنی حدود ۴۹ مجتمع سوخت مصرف‌شده خارج و به استخر مجاور قلب منتقل می‌شود. حداقل زمان خنک شدن مجتمع‌های سوخت در استخر ۳ سال و ظرفیت این استخر برای انبارش ایمن سوخت‌های مصرف‌شده حداکثر ۸ سال است. پس از این مدت به منظور سوخت‌گذاری مجدد و خروج سوخت‌های مصرف‌شده از قلب باید سوخت‌های مصرف‌شده‌ی قدیمی از استخر انبارش موقت خارج شوند تا فضای لازم برای سوخت‌های مصرف‌شده‌ی تازه فراهم شود [۱۲]. در واقع هدف از به کارگیری محفظه‌ی دومنظوره مدیریت ایمن سوخت‌های مصرف‌شده پس از خروج از استخر سوخت مصرف شده‌ی مجاور رآکتور تا زمان انتقال به تأسیسات مقصد است.

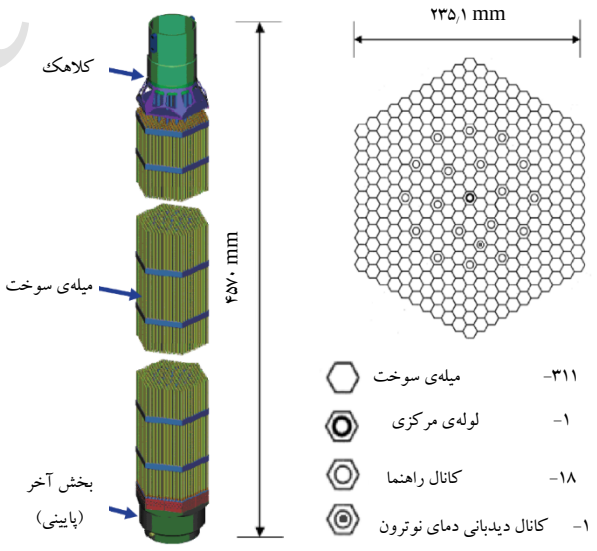
Archive of SID

www.SID.ir

طرح‌واره‌ی مجتمع سوخت رآکتور اتمی بوشهر در شکل ۱ نشان داده شده است. هر مجتمع سوخت با مقطع شش ضلعی شامل ۳۱۱ میله‌ی سوخت، ۱۸ کانال راهنما برای میله‌های کنترل و سمّ‌های سوختنی[۸]، ۱ کانال مرکزی، ۱ کانال برای آشکارساز تداخل بین سلولی[۹] (ICID) و ۱۵ صفحه‌ی مشبک (سوراخ‌دار)[۱۰] است.

براساس محاسبات انجام شده به کمک نرم‌افزار ORIGIN2.1 و نیز مقایسه‌ی نتایج محاسبات با سایر منابع، مشخصه‌های پرتوزایی سوخت مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر با میزان سوختن ۴۹ GWd/MTIHM[۱۱] پس از سه سال خنک شدن مطابق جدول ۱ تعیین شده است [۹، ۱۳]. لازم به ذکر است جزییات و فرض‌های مربوط به این محاسبه‌ها و هم‌چنین مقایسه‌ی آن‌ها با نتیجه‌های ارایه شده در سایر مرجع‌ها، در مرجع‌های [۹] و [۱۳] به تفصیل ارایه شده است.

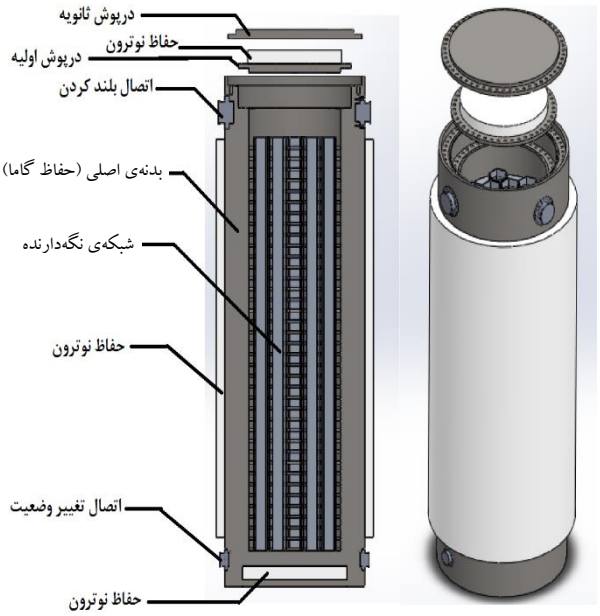
به منظور حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر، یک محفظه‌ی دومنظوره طراحی شد. طرح‌واره و جزءهای اصلی این محفظه در شکل ۲ و محفظه‌های طراحی پایه‌ی آن در جدول ۲ آورده شده است [۹].



شکل ۱. طرح‌واره، اندازه‌ها و مشخصه‌های کلی مجتمع سوخت رآکتور اتمی بوشهر.

جدول ۱. مشخصه‌های پرتوزایی هر مجتمع سوخت مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر

پرتوزایی گاما	پرتوزایی نوترون	گرمای واپاشی
۲×۱۰^{۱۶} ($s^{-۱}$)	۷×۱۰^{۸} ($s^{-۱}$)	۲ (k W)



شکل ۲. طرح‌واره و جزءهای مختلف محفظه‌ی دومنظوره برای سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر.

جدول ۲. مشخصه‌های طراحی پایه‌ی محفظه‌ی دومنظوره برای سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر

مشخصه‌های اصلی محفظه‌ی دومنظوره	
نوع محفظه	حمل و نگه‌داری موقت (دومنظوره)
نوع سوخت	WWER-۱۰۰۰
میزان سوختن	۴۹ GWd/MTIHM
حداقل زمان خنک شدن	۳ سال
ظرفیت	۱۲ مجتمع سوخت
مشخصه‌های اصلی شبکه‌ی نگه‌دارنده	
نوع	دیسک و لوله‌ای
جنس	
نمایه‌های شش وجهی	فولاد زنگ‌نزن بوردار / آلومینیم بوردار
دیسک‌ها	آلومینیم و فولاد زنگ‌نزن (یک در میان)
قطر	۱٫۳۲ متر
ارتفاع	۴٫۵۷ متر
مشخصه‌های اصلی بدنه و سایر مؤلفه‌ها	
ارتفاع	۵٫۶۵ متر
جنس حفاظ گاما	فولاد کربنی (فورج‌شده)
ضخامت حفاظ گاما	۳۴ سانتی‌متر
تعداد فین‌ها	۴۴ پره
جنس حفاظ نوترون	پلی‌اتیلن بوردار
ضخامت حفاظ نوترون	۱۲٫۵ سانتی‌متر
قطر خارجی محفظه	۲٫۲۵ متر
سیستم محدودکننده	درپوش دو مرحله‌ای و آب‌بندهای فلزی هلیکوفلکس
وزن تقریبی محفظه‌ی حاوی سوخت مصرف‌شده	۹۷٫۵ تن

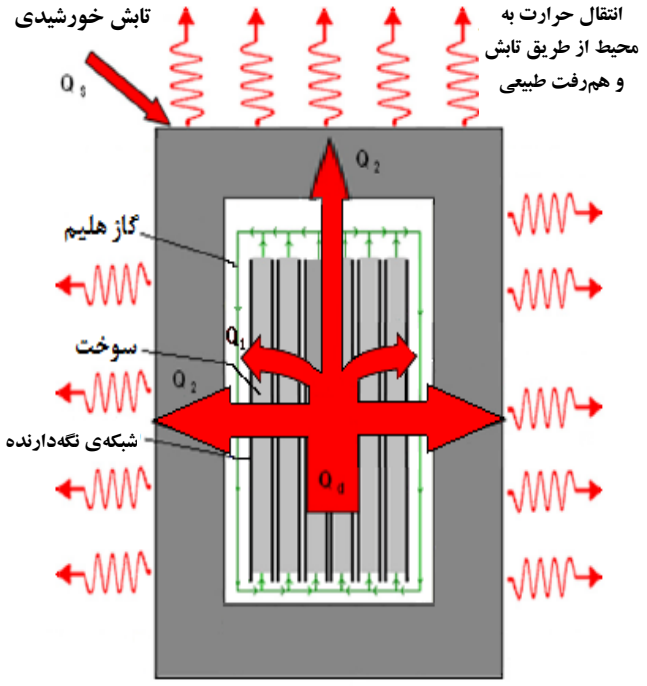
Archive of SID

www.SID.ir

۳. فرض‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره

گرمای واپاشی سوخت‌های مصرف‌شده در درون محفظه‌ی دومنظوره از طریق رسانش گرمایی، هم‌رفت، و نیز تابش به محیط منتقل می‌شود. در صورت نگه‌داری محفظه‌ی دومنظوره در فضای باز و نیز در زمان حمل، علاوه بر گرمای واپاشی، گرمای ناشی از تابش خورشید نیز روی انتقال حرارت و دمای جزءهای مختلف تأثیرگذار است. بارهای حرارتی و سازوکارهای مختلف انتقال حرارت در یک نمونه محفظه‌ی دومنظوره در شرایط عادی نگه‌داری به طور طرح‌وار در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محفظه‌ی دومنظوره باید گرمای واپاشی سوخت‌های مصرف‌شده (Q_d) و نیز گرمای ناشی از تابش خورشید (Q_s) را به محیط انتقال دهد. بخشی از این گرما از طریق هم‌رفت در گاز درون محفظه (Q_1) و غالب آن از طریق رسانش (Q_2) در اجزای مختلف نظیر شبکه‌ی نگه‌دارنده، گاز درون محفظه، بدنه‌ی اصلی و حفاظ نوترون به سطح خارجی محفظه و از آن‌جا از طریق هم‌رفت و تابش به محیط منتقل می‌شود. از جمله‌ی مزیت‌های محفظه‌های دومنظوره از نقطه‌نظر ایمنی، انفعالی (غیرفعال) بودن سیستم انتقال حرارت آن‌ها (هم‌رفت طبیعی) است. با وجود این و به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت هم‌رفتی، ملاحظه‌ها و تمهیدهای خاصی نظیر به کارگیری فین و استفاده از مانع‌های گرمایی در طراحی محفظه‌ها باید در نظر گرفته شود تا از برآورده شدن الزام‌ها و معیارهای گرمایی و به طور خاص حداکثر دمای مجاز اجزای مختلف اطمینان حاصل شود.

انتقال حرارت سوخت مصرف‌شده‌ی درون محفظه و پدیده‌های مرتبط با آن نظیر انبساط مؤلفه‌های مختلف و تغییرهای فشار درون محفظه بسیار پیچیده است. از جمله‌ی مهم‌ترین پیچیدگی‌ها، انتقال حرارت درون قرص و میله‌ی سوخت مصرف‌شده است که علاوه بر تخلخل، دچار ترک خوردگی شده و ترکیب گازهای درون میله نیز در حال تغییر است. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در پدیده‌های انتقال حرارت سوخت مصرف‌شده‌ی درون محفظه که به برخی از آن‌ها اشاره شد، مدل‌سازی کامل آن به سادگی امکان‌پذیر نبوده و انجام ساده‌سازی پدیده‌های مختلف آن اجتناب‌ناپذیر است.



شکل ۳. بارهای حرارتی و سازوکارهای مختلف انتقال حرارت در یک نمونه محفظه‌ی دومنظوره در شرایط عادی نگه‌داری.

به منظور ارزیابی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره‌ی حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر مدل هندسی تهیه شده در محیط نرم‌افزار سالید ورکس[۱۲] در محیط نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ[۱۳] مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است تأثیر جزییاتی مانند پیچ‌ها، راهگاه‌های تخلیه‌ی آب و تزریق گاز، شیرآلات آزمایش نشتی روی درپوش‌ها و نظایر آن که عمدتاً در طراحی تفصیلی تعیین می‌شوند، روی توزیع دما قابل اغماض است. به منظور ارزیابی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره‌ی حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر، مدول گرمایی با حالت پایا[۱۴] نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ مورد استفاده قرار گرفت. در این مدول معادله‌های گرمایی حاکم، به روش اجزای محدود و با توجه به مش‌بندی و شرایط مرزی تعریف شده حل می‌شوند [۱۴].

فرض‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی محفظه‌ی دومنظوره‌ی حمل و انبارش موقت سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور بوشهر به شرح زیر است:

۱. از انتقال حرارت هم‌رفتی گاز هلیم درون محفظه صرف‌نظر شده و انتقال حرارت گاز درون محفظه از طریق صرفاً رسانش در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است انتقال حرارت

Archive of SID

www.SID.ir

از طریق هم‌رفت در درون محفظه با توجه به این‌که فضای داخل محفظه محدود بوده و محفظه آب‌بندی شده است، قابل اغماض است.

۲. ضرایب رسانش گرمایی مؤلفه‌های مختلف بسته به جنس مواد با توجه به داده‌های نرم‌افزار، مورد استفاده قرار گرفت.

۳. ضریب انتقال حرارت از طریق هم‌رفت در روی بدنه‌ی اصلی به صورت زیر در نظر گرفته شد [۱۵]:

$$h_C = ۱٫۳۰۹۸ \left(T - T_{amb.}\right)$$

که در آن، T دمای سطح و T_{amb} دمای محیط است.

لازم به ذکر است با توجه به هندسه‌ی محفظه (استوانه با قطر بزرگ)، برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت از طریق هم‌رفت از رابطه‌های ارایه شده برای صفحه‌های عمودی در مرجع‌های [۱۶، ۱۷، ۱۴] نیز استفاده شد و پاسخ‌های کم و بیش مشابه با رابطه‌ی فوق به دست آمد.

۴. براساس محاسبه‌های انجام شده (جدول ۱)، گرمای واپاشی هر مجتمع سوخت ۲ کیلووات و در مجموع با توجه به ظرفیت محفظه (۱۲ مجتمع) ۲۴ کیلووات در نظر گرفته شد.

۵. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در رفتار گرمایی و مکانیکی قرص‌های سوخت، به جای مدل‌سازی دقیق آن‌ها گرمای واپاشی به صورت شار ثابت به سطح‌های داخلی میله سوخت اعمال شده است.

۶. به منظور ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبه‌ها، تنها میله‌های سوخت در مدل‌سازی هندسی در نظر گرفته شده و از جزییاتی نظیر صفحه‌های مشبک و سایر مؤلفه‌های مجتمع سوخت صرف‌نظر شده است.

۷. در شرایط عادی نگه‌داری، محفظه بدون جاذب ضربه است. هم‌چنین موقعیت قرارگیری محفظه به صورت عمودی فرض شده و از انتقال حرارت از سطح زیرین محفظه صرف‌نظر شده است.

۸. با توجه به ضریب رسانش گرمایی پایین مواد مرسوم مورد استفاده در جاذب‌های ضربه، در شرایط عادی حمل از انتقال حرارت از طریق سطح‌های اتصال جاذب ضربه به محفظه صرف‌نظر شده است. به عبارت دیگر به جای مدل‌سازی جاذب‌های ضربه از شرط سطح‌های بی‌دررو در محل اتصال آن‌ها به بدنه‌ی محفظه استفاده شده است.

۹. در شرایط عادی حمل، فرض شده است محفظه در معرض نور خورشید قرار دارد (الزام‌های طراحی). بر همین اساس مقدار شار ورودی روی سطح محفظه $۴۰۰\ W/m^۲$ در نظر گرفته شده است [۶، ۱۶].

۱۰. در شرایط عادی حمل، دمای محیط $۳۸\ ^\circ C$ در نظر گرفته شده است (الزام‌های طراحی). این فرض به عنوان یک فرض محتاطانه برای شرایط عادی نگه‌داری نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

۱۱. در شرایط عادی نگه‌داری و نیز شرایط عادی حمل، علاوه بر انتقال حرارت از طریق هم‌رفت، تابش از سطح به محیط نیز در نظر گرفته شده است.

۱۲. گاف[۱۵] بین مؤلفه‌های مختلف نظیر شبکه‌ی نگه‌دارنده و بدنه‌ی اصلی حداکثر مقدار در نظر گرفته شده و از کاهش آن در اثر انبساط مؤلفه‌ها و نیز از سایر برهم‌کنش‌های مکانیکی مؤلفه‌های مختلف در اثر تغییر دما صرف‌نظر شده است.

لازم به ذکر است مجموعه فرض‌های فوق همگی محتاطانه بوده و به منظور اطمینان از ایمنی، همواره بدترین شرایط در نظر گرفته شده است. با توجه به فرض‌های فوق طرح‌واره‌ی محفظه، بارهای حرارتی و سازوکارهای انتقال حرارت در نظر گرفته شده برای شرایط عادی حمل و نگه‌داری مطابق شکل ۴ است.

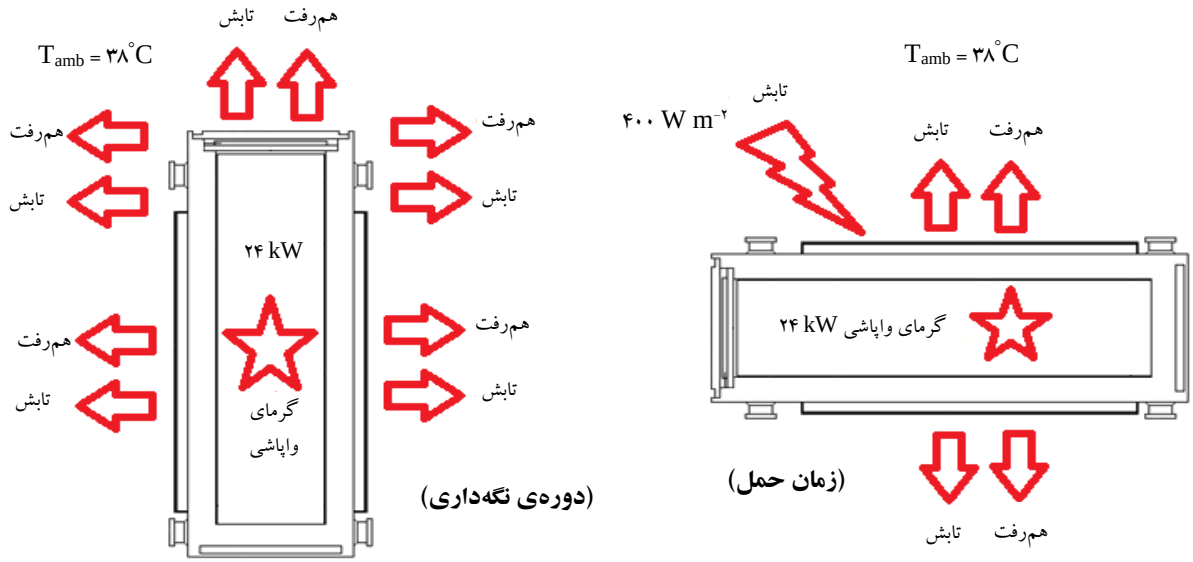
مش‌بندی مدل هندسی محفظه‌ی دومنظوره در شکل ۵ نشان داده شده است. مش‌بندی مدل‌های هندسی تا جایی که پاسخ مستقل از مش‌بندی باشد، بهبود یافته است.

۴. نتیجه‌های ارزیابی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره

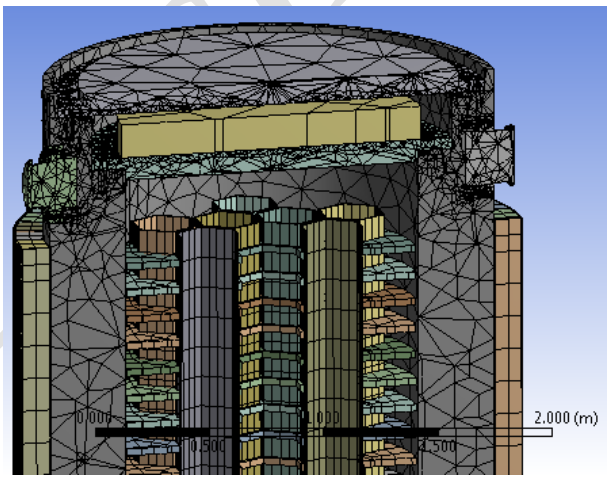
شبیه‌سازی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره با توجه به فرض‌ها و شرط‌های مرزی ارایه شده در بخش قبل برای شرایط عادی زمان حمل و دوره‌ی نگه‌داری (شکل ۴) انجام شده است. براساس نتیجه‌های حاصل از این شبیه‌سازی‌ها، توزیع دما در مؤلفه‌های مختلف محفظه‌ی دومنظوره مطابق شکل‌های ۶ و ۷ است. حداکثر دمای برآورد شده برای مؤلفه‌های مختلف محفظه‌ی دومنظوره در شرایط عادی حمل و نگه‌داری براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول‌های ۳ و ۴ درج شده است.

Archive of SID

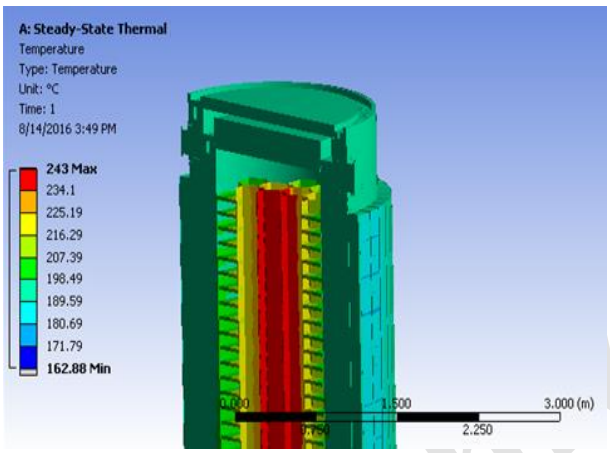
www.SID.ir



شکل ۴. بارهای حرارتی و سازوکارهای انتقال حرارت برای شرایط عادی حمل و نگه‌داری محفظه‌ی دومنظوره‌ی سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر.



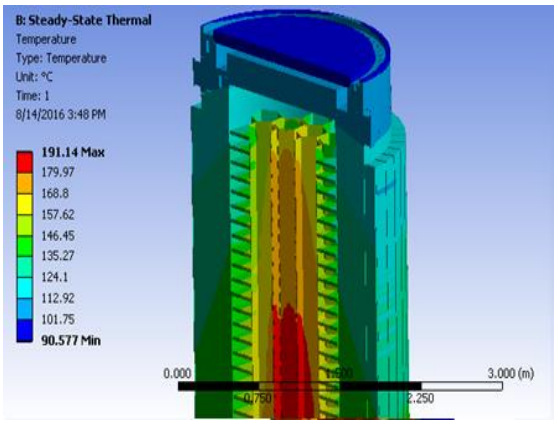
شکل ۵. مش‌بندی محفظه‌ی دومنظوره‌ی سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر به وسیله‌ی نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ.



شکل ۷. توزیع دما در مؤلفه‌های مختلف محفظه‌ی دومنظوره‌ی فین‌دار در شرایط عادی حمل.

جدول ۳. دمای برآورد شده و بیشینه دمای مجاز مؤلفه‌های محفظه‌ی دومنظوره در شرایط عادی نگه‌داری

مؤلفه‌ها	بیشینه دمای مجاز (°C)	معیار تعیین بیشینه دمای مجاز	بیشینه دمای برآورد شده (°C)
حفاظ نوترون	۱۴۹	مشخصه‌های معمول حفاظ‌های نوترون [۱۵]	۱۲۵
شبکه‌ی نگه‌دارنده	۳۱۶	مشخصه‌های معمول شبکه‌ی نگه‌دارنده از جنس آلومینیم بوردار [۱۵]	۱۸۹
آب‌بندها	۲۵۰	مشخصه‌های آب‌بند هلیکوفلکس انتخاب شده	۱۱۲
مجتمع سوخت	۳۸۰	الزام‌های طراحی	۱۹۲



شکل ۶. توزیع دما در مؤلفه‌های مختلف محفظه‌ی دومنظوره‌ی فین‌دار در شرایط عادی نگه‌داری.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴. دمای برآورد شده و بیشینه دمای مجاز مؤلفه‌های محفظه‌ی دومنظوره در شرایط عادی حمل

مؤلفه‌ها	بیشینه دمای مجاز (°C)	معیار تعیین بیشینه دمای مجاز	بیشینه دمای برآورد شده (°C)
حفاظ نوترون	۱۴۹	مشخصه‌های معمول حفاظ‌های نوترون [۱۵]	۱۳۸
شبکه‌ی نگه‌دارنده	۳۱۶	مشخصه‌های معمول شبکه‌ی نگه‌دارنده از جنس آلومینیم بوردار [۱۵]	۲۲۸
آب‌بندها	۲۵۰	مشخصه‌های آب‌بند هلیکوفلکس انتخاب شده	۱۹۷
مجتمع سوخت	۳۸۰	الزام‌های طراحی	۲۴۳

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، بیشینه دمای غلاف سوخت از مقدار مجاز ۳۸۰ °C تجاوز نکرده و در نتیجه یکپارچگی سوخت‌های مصرف‌شده در این شرایط حفظ خواهد شد. هم‌چنین بیشینه دمای مؤلفه‌های مختلف محفظه در شرایط عادی حمل و نگه‌داری در محدوده‌های مجاز و ایمن قرار دارد. نکته‌ی قابل توجه دیگر براساس نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها این است که دمای سطح محفظه از مقدار ۸۵ °C بیش‌تر بوده و در نتیجه تمهیدات لازم به منظور به کارگیری مانع‌های گرمایی در زمان حمل باید در نظر گرفته شود.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در طراحی و ارزیابی گرمایی محفظه‌ها مهم‌ترین موردها در وهله‌ی اول کنترل و برآورد بیشینه دمای غلاف (معیار حفظ یکپارچگی سوخت مصرف‌شده)، دمای آب‌بندها (ایمنی و عدم تجاوز از حداکثر نرخ نشت) و دمای حفاظ‌های نوترون و گاما (ایمنی و حفظ یکپارچگی حفاظ) است. کنترل و برآورد بیشینه دمای مؤلفه‌های مختلف، بیشینه فشار داخلی در اثر افزایش دما و نظایر آن نیز از دیگر هدف‌های طراحی و ارزیابی گرمایی محفظه‌های حمل پرتوزا است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، به منظور ارزیابی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره‌ی سوخت‌های مصرف‌شده‌ی رآکتور اتمی بوشهر، مدول گرمایی با حالت پایای نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ مورد استفاده قرار گرفت. مش‌بندی مدل‌های هندسی در این نرم‌افزار تا جایی که پاسخ‌ها مستقل از مش‌بندی باشد، بهبود یافته است. هم‌چنین نتایج حاصل به روش موازنه‌ی گرمایی ارایه شده در مرجع [۱۵] بررسی شده که براساس آن درستی نتیجه‌های شبیه‌سازی قابل قبول است.

شبیه‌سازی گرمایی محفظه‌ی دومنظوره‌ی فین‌دار در شرایط عادی حمل و نگه‌داری (شکل‌های ۶ و ۷) نشان می‌دهد که بیشینه دمای غلاف سوخت از مقدار مجاز ۳۸۰ °C تجاوز نکرده و در نتیجه یکپارچگی سوخت‌های مصرف‌شده در این شرایط حفظ خواهد شد. هم‌چنین براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، حداکثر دمای سایر مؤلفه‌های محفظه نیز در طراحی ارایه شده در شرایط عادی حمل و نگه‌داری در محدوده‌های مجاز و ایمن قرار دارد (جدول‌های ۳ و ۴). هم‌چنین با توجه به بالاتر از ۸۵ °C بودن دمای سطح محفظه، تمهیدهای لازم به منظور به کارگیری مانع‌های گرمایی در زمان حمل باید در نظر گرفته شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Do & See (or Alternatively Wait & See) Policy
2. Interim Storage
3. Back-End Fuel Cycle
4. On-Site Transportation
5. Off-Site Transportation
6. Fuel Integrity
7. Fuel Core Life
8. BAR: Burnable Poisons
9. Inter- Cell Interference Detector
10. Spacing Grid
11. Metric Tons of Initial Heavy Metal: تن متریک از فلز سنگین اولیه
12. SolidWorks
13. Ansys Workbench 15
14. Steady- State Thermal Module
15. Gaps

Archive of SID

www.SID.ir

مراجع

[1] International Atomic Energy Agency, Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/Containers, IAEA-TECDOC 1532, (2007).

[2] M. Bunn, J.P. Holdren, A. Macfarlane, S.E. Pickett, A. Suzuki, T. Suzuki, J. Weeks, Interim Storage of Spent Nuclear Fuel, A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management, A Joint Report from the Harvard University Project on Managing the Atom and the University of Tokyo Project on Sociotechnics of Nuclear Energy, (2001).

[3] Massachusetts Institute of Technology, The Future of Nuclear Fuel Cycle, An Interdisciplinary MIT Study, (2011).

[4] A. Carnesale, Recommendations by the Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, A Plan for Managing Spent Nuclear Fuel and High-Level Nuclear Waste, The Bridge, National Academy of Engineering, (2012).

[5] International Atomic Energy Agency, Storage of spent nuclear fuel, IAEA Specific Safety Guide (No. SSG-15), (2012).

[6] International Atomic Energy Agency, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements (No. SSR-6), (2012).

[7] M. Chiguer, A. Froment, F. Lelievre, Rethinking Used Fuel Management, A Post-Fukushima Perspective, European Nuclear Society Conference, United Kingdom, Manchester, September, (2012).

[8] D. Metaly, B.J. Garrick, N. Mote, Management of Radioactive Waste, A Socio-Technical Challenge, The Bridge, National Academy of Engineering, (2012).

[9] M. Rezaeian, Criticality, Shielding, Thermal, and Mechanical Design of a Dual-purpose Cask for Spent (Used) Fuels of Bushehr Nuclear Power Plant, Ph.D. Thesis, Nuclear Science and Technology Research Institue, (2016).

[10] M. Rezaeian, J. Kamali, Basket criticality design of a dual purpose cask for VVER 1000 spent fuel assemblies, Kerntechnik., 81 (2016).

[11] M. Rezaeian, J. Kamali, Effect of a dual-purpose cask payload increment of spent fuel assemblies from VVER 1000 Bushehr Nuclear Power Plant on basket criticality, Applied Radiation and Isotopes, 119 (2017).

[12] BNPP FSAR: Safety Analysis Report for the Bushehr Nuclear Power Plant, State Research, Design and Engineering Survey Institute, Atomenergo-ergoproekt, Moscow, (2003).

[13] M. Rezaeian, J. Kamali, Radioactive Source Specification of Bushehr's VVER-1000 Spent Fuels, Science and Technology of Nuclear Installations, (2016).

[14] ANSYS Inc., ANSYS Workbench V15 Manual, (2014).

[15] Y. Xu, J. Yang, C. Xu, W. Wang, Z. Ma, Thermal analysis on NAC-STC spent fuel transport cask under different transport conditions, Nucl. Eng. Des., 265 (2013) 682–690

[16] International Atomic Energy Agency, Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), IAEA Specific Safety Guide (No. SSG-26), (2014).

[17] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, Introduction to Heat Transfer, 3rd Edition, Wiley, (2000).

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir