



ارزیابی ایمنی کسک سربی انتقال سوخت و مواد ساختاری تابش‌دیده در شرایط حادثه سقوط با شبیه‌سازی ANSYS

رضا گستریانی^{۱*}، نوید اقره^۲، جاوید دبیری^۱

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران
۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، تهران - ایران

*Email: rgostariani@aeoi.org.ir

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۴/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۶

چکیده

ارزیابی رفتار تابشی سوخت هسته‌ای و مواد ساختاری، با انجام آزمون‌های پس از پرتودهی در مکان هات‌سل انجام می‌شود. یکی از چالش‌های پیش‌روی انجام این آزمون‌ها، انتقال ایمن کسک حاوی سوخت‌های هسته‌ای و مواد ساختاری تابش‌دیده، از راکتور تا هات‌سل می‌باشد. از این‌رو در این مطالعه، ارزیابی ایمنی کسک سربی انتقالی برای یک صفحه سوخت راکتور تحقیقاتی، غلاف سوخت زیرکونیومی به همراه قرص‌های سوخت اکسیدی (UO₂) در مقابل رخداد حادثه سقوط با آنالیز المان محدود با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز ANSYS انجام شد. حادثه سقوط کسک از ارتفاع ۹ متری و برخورد آن به‌صورت عمودی، افقی و مایل از مرسوم‌ترین حوادث تعریف‌شده در استاندارد ایمنی شماره ۶ سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (SSR-۶) می‌باشد. در این مطالعه، تنش تسلیم مواد داخل کسک از مراجع استخراج شد و با تنش بیشینه حاصل از نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. از این‌رو حد پذیرش ایمنی پس از حادثه به‌صورت تعیین ضریب ایمنی برای هر جزء درون کسک ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی ANSYS نشان داد محتوی کسک با رخداد حادثه سقوط ۹ متری به‌خصوص سقوط عمودی و افقی دچار آسیب جدی می‌شوند. بنابراین اقدام اصلاحی با تعبیه ضربه‌گیر از جنس فوم پلی‌یورتان در زیر و کناره‌های کسک انجام شد. در نهایت شبیه‌سازی مجدد با حضور ضربه‌گیر نشان‌دهنده پذیرش ایمنی کسک در مقابل حادثه سقوط بود.

کلیدواژه‌ها: کسک انتقال سوخت هسته‌ای، مواد ساختاری تابش‌دیده، ارزیابی ایمنی، حادثه سقوط ۹ متری، نرم‌افزار ANSYS

Safety assessment of the lead cask transfer of irradiated fuel and structural materials in drop accident conditions using ANSYS simulation

R. Gostariani^{1*}, N. Egra², J. Dabiri¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14399-51113, Tehran – Iran
2. School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 1458889694, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 2.3.2024, Revised: 24.6.2024, Accepted: 26.6.2024

Abstract

The assessment of the irradiation behavior of nuclear fuel and structural materials is carried out by conducting post-irradiation examination at the hot cell facility. One of the challenges in performing this examination is the safe transfer of cask containing irradiated nuclear fuel and structural materials from the reactor to the hot cell. Therefore, in this study, the safety assessment of the lead cask transfer of a fuel plate, a zirconium fuel cladding, and oxide fuel pellets (UO₂) against the drop accident was conducted using finite element analysis with ANSYS software. The drop of the cask from a height of 9 meters in vertical, horizontal, and inclined directions is one of the most common accidents defined in IAEA Safety Standards No. 6 (SSR-6). In this study, the yield stress of the materials inside the cask was extracted from the references and compared with the maximum stress resulting from the finite element simulation results. Therefore, the safety acceptance limit after an accident was presented as determining the safety factor for each component inside the cask. The simulation results showed that the cask contents are particularly susceptible to serious damage in the drop accident of a 9-meter, especially vertical and horizontal drop. Therefore, a corrective action was taken by incorporating a shock absorber made of polyurethane foam under and around the cask. Finally, a re-simulation with the presence of the shock absorber demonstrated the safety acceptance of the cask against the drop accident.

Keywords: Nuclear fuel transfer cask, Irradiated structural materials, Safety assessment, 9-meter drop accident, ANSYS software



۱. مقدمه

اطمینان از عملکرد ایمن سوخت و اجزا قلب راکتور با در نظر گرفتن اثر اقتصاد نوترونی^۱ بر توان یک راکتور هسته‌ای و همچنین حفظ استحکام و یکپارچگی در بهره‌برداری‌های بلندمدت از نکات بسیار مهم در طراحی و ساخت سوخت و اجزا قلب راکتورهای هسته‌ای می‌باشند. بنابراین به‌منظور اطمینان از دستیابی به این اهداف، نیاز به انجام آزمون‌ها نه تنها قبل از پرتودهی، بلکه در زمان پرتودهی و پس از آن می‌باشد تا طراحان، سازندگان، بهره‌برداران و واحدهای قانونی از ایمن بودن آن‌ها اطمینان حاصل نمایند. از این رو آزمون‌های مختلف قبل و پس از پرتودهی به‌صورت دوره‌ای بر روی سوخت و مواد ساختاری در هات‌سل انجام می‌شود [۱].

سوخت‌های صفحه‌ای به دلیل توزیع شار نوترون یکنواخت، برداشت حرارت مناسب، دانسیته تراکم بالا و کاهش حجم قلب راکتور [۲] به‌طور متداول به‌عنوان سوخت به‌کار رفته در راکتورهای تحقیقاتی هسته‌ای در سراسر جهان استفاده می‌شوند [۳].

همچنین قرص‌های سوخت اکسید اورانیم (UO_2) به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد نظیر پایداری حرارتی و تابشی بالا و دمای ذوب و دانسیته بالا به‌عنوان سوخت اصلی راکتورهای هسته‌ای قدرت به‌کار گرفته می‌شوند [۴].

برای انتقال سوخت و مواد ساختاری پس از تابش از یک محفظه محافظ در برابر پرتو به‌عنوان کسک انتقال^۲ استفاده می‌شود. این کسک از دو پوسته استوانه‌ای متحدالمرکز با یک صفحه بالایی پیچ و مهره و یک صفحه فلزی انتهایی که در قسمت کف جوش داده شده، ساخته می‌شود. فضای بین دوایر متحدالمرکز تشکیل شده توسط این دو پوسته با سرب ریختگی، پر می‌شود تا محافظت در برابر پرتو گاما را فراهم کند [۵].

حادثه سقوط از ارتفاع در کسک انتقال سوخت و مواد ساختاری یکی از محتمل‌ترین حوادثی است که در حین انتقال کسک، پس از بارگذاری سوخت و مواد ساختاری در استخر راکتور تا هات‌سل، ممکن است رخ بدهد. به منظور انتقال ایمن کسک‌های حاوی سوخت‌های هسته‌ای و همچنین اطمینان از حفظ یکپارچگی در حین بروز حوادث، لازم است تا الزامات استاندارد ایمنی شماره ۶ سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (SSR-۶) [۶] در طراحی کسک انتقال سوخت رعایت شود.

محققان مختلفی آزمون سقوط ۹ متری را به‌طور متداول برای ارزیابی حفظ یکپارچگی کسک‌های سوخت‌های مصرف‌شده انجام داده‌اند [۷-۹]. از طرفی، آزمون سقوط ۹ متری نقش حیاتی در ارزیابی ایمنی بسته‌بندی سوخت‌های تابش‌ندیده^۳ ایفا می‌کند [۱۰]. آنالیز المان محدود^۴ (FEA) به‌طور متداول برای شبیه‌سازی و تحلیل حوادث و ارزیابی حفظ یکپارچگی کسک‌ها در حین حوادث استفاده می‌شود تا با صحت‌سنجی طراحی در این مرحله، ریسک آزمون محیطی را به جهت هزینه‌بر بودن و خطرناک بودن آن به حداقل برساند [۱۱].

در کشور ایران، طراحی و ارزیابی ایمنی کسک‌های دومنظوره برای انتقال و نگهداری سوخت‌های مصرف‌شده نیروگاه بوشهر انجام شده است. رضائیان [۱۲] به طراحی این دسته از کسک‌ها پرداخت و ارزیابی گرمایی در کسک دومنظوره را با آنالیز المان محدود با ANSYS بررسی کرد. صدیق و همکارش [۱۳] ایمنی کسک انتقال سوخت مصرف‌شده نیروگاه بوشهر را در عبور از تونل آتش با شبیه‌ساز ANSYS مورد ارزیابی قرار دادند.

استفاده از کسک‌های انتقال سوخت هسته‌ای یک جزء حیاتی از چرخه کلی سوخت هسته‌ای است که مدیریت ایمن و مطمئن سوخت هسته‌ای تابش‌دیده از ذخیره‌سازی در سایت‌های راکتور تا حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی یا دفع بالقوه درازمدت را تضمین می‌کند. همچنین بررسی حوادث در کسک راکتورهای سوخت هسته‌ای برای بهبود ایمنی، حفظ اعتماد عمومی، اطمینان از انطباق با مقررات و ارتقای دانش در صنعت هسته‌ای حیاتی است. بررسی پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد مطالعات محدودی در زمینه ارزیابی حادثه سقوط کسک‌های سربی انتقال سوخت و مواد تابش‌دیده با شبیه‌سازی المان محدود انجام گرفته است و بیشتر توجهات معطوف به کسک‌های فولادی دو منظوره انتقال و نگهداری سوخت‌های مصرف‌شده بوده است. در این راستا ارزیابی ایمنی یک کسک سربی طراحی‌شده جهت انتقال سوخت و مواد ساختاری تابش‌دیده در مقابل حادثه سقوط ۹ متری به‌عنوان پیش‌نیاز انجام آزمون‌های پس از تابش با شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار ANSYS آنالیز و تحلیل شد.

3. Fresh Fuels

4. Finite Element Analysis

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46(1), Serial Number 111, 2025, P 188-198

1. Neutron Economy

2. Transfer Cask

مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای

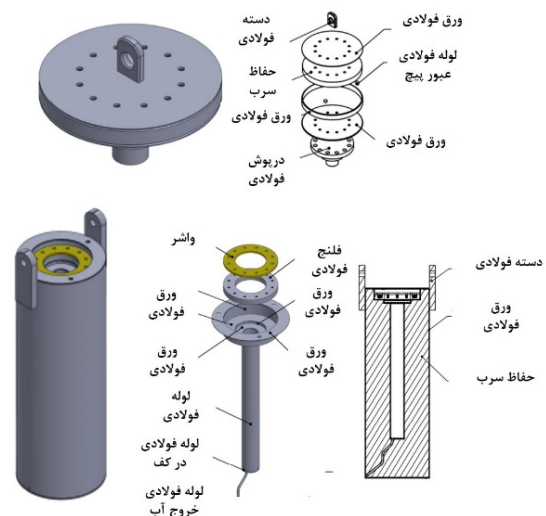
دوره ۴۶، شماره ۱، جلد ۱۱۱، بهار ۱۴۰۴، ص ۱۸۸-۱۹۸



۲. مشخصات مواد و هندسه اجزاء در مدل سازی

۱.۲ مشخصات کسک

شکل ۱ قسمت‌های مختلف اجزاء کسک طراحی شده برای ارزیابی ایمنی را نمایش می‌دهد. در این کسک بدنه، فلنچ‌ها، سبد نگه‌دارنده سوخت همگی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ طراحی شده است و حفاظ از جنس سرب با ضخامت ۱۵۰ mm تشکیل شده است. الاستومر در زیر درب کسک و واشر بر روی فلنچ قرار گرفته است. قطر و ارتفاع نهایی کسک به ترتیب ۴۰۰ mm و ۱۳۳۰ mm طراحی شد. وزن کسک در حدود ۱۷۰۰ kg برآورد شد.



شکل ۱. قسمت‌های مختلف کسک انتقال سوخت طراحی شده.

۲.۲ مشخصات سوخت

در این شبیه‌سازی از یک صفحه سوخت صفحه‌ای و از یک میله سوخت محتوی قرص سوخت UO_2 استفاده شده است. طول صفحه سوخت ۷۰۵ mm، عرض ۷۰/۸ mm و ضخامت آن ۱/۵ mm است. همچنین طول مؤثر میله سوخت ۶۰۰ mm و طول کامل آن ۷۱۴ mm و قطر ۹/۱ mm در نظر گرفته شد. غلاف میله از جنس Zr-۱Nb انتخاب شد.

۳.۲ خواص مکانیکی مواد

جدول ۱ خواص مکانیکی مربوط به مواد به کار رفته در تحلیل ایمنی را نشان می‌دهد.

۳. روش مدل سازی المان محدود

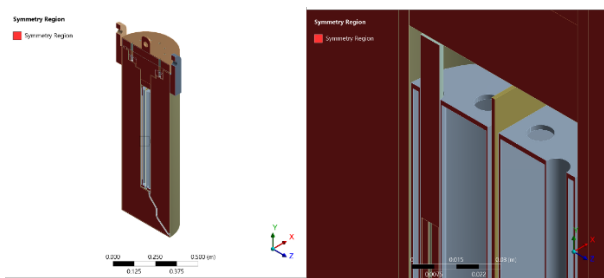
مدل سازی و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود R3 ۲۰۱۹ ANSYS Workbench و ماژول Explicit Dynamics انجام شده است. مراحل و پارامترهای در نظر گرفته شده و همچنین تعریف آزمون استاندارد ایمنی شماره ۶ سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (SSR-۶) سازمان بین‌المللی انرژی اتمی انجام شده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد به کار رفته در کسک و محتوی آن در تحلیل ایمنی

چگالی ($g.cm^{-3}$)	مدول یانگ E (GPa)	مدول برشی G (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول مماسی (MPa)	ماده / پارامتر
۱۱,۳۴	۱۴	۴,۹۲	۱۰	۱۰۰	سرب
۷,۷۵	۱۹۳	۷۳,۶۶	۲۱۰	۱۸۰۰	فولاد زنگ نزن ۳۰۴*
۶,۱۱	۶۳,۷۵	۲۴,۵۱	۱۰۰	-	سوخت صفحه‌ای [۱۴]
۱۰,۲۷	۲۰,۱۱	۷۶,۲۹	۲۵۴	-	UO_2 [۱۵]
۶,۴۱	۹۵,۱۶	۳۵,۲۴	۱۵۰	-	Zr-۱,۰ Nb [۱۷, ۱۶]
۱,۱۵	۵۳,۸ (MPa)	۰,۰۱۷	۱۲,۹	۱۵	الاستومر پلی‌یورتان [۱۸]
۰,۲۸	۱۲۴,۱۱ (MPa)	۰,۰۵۵	۶,۸۹	۱۱,۰۳	فوم پلی‌یورتان [۱۹]
۲,۳	۳۰	۱۲,۷۱	استحکام غیرخطی دراگر-پراگر		بتن [۲۰]
		فشار (MPa)		تنش تسلیم (MPa)	
		-۴		۰	
		۰		۱۰	
		۱۵		۴۰	
		۵۰		۴۴	

*: خواص مستخرج از کتابخانه داخلی نرم‌افزار.





شکل ۲. مدل نهایی کسک با اعمال صفحه تقارن.

۲.۳ فرضیات تماس اجزاء

در این مطالعه فرض شد که قسمت‌های جوش به صورت یکپارچه با بدنه درآمده‌اند و اتصال مقاطع متصل شده توسط پیچ، در محدوده فشار مؤثر به صورت چسبیده در نظر گرفته شده‌اند و در بقیه قسمت‌های سطح به صورت بدون اصطکاک است. اتصال سرب قسمت درب نیز به همین صورت اعمال شده است تا بار بیشتری به پیچ‌ها منتقل گردد و طراحی آن‌ها به صورت محافظه کارانه باشد. اتصال سرب قسمت بدنه فولاد زنگ‌نزن به صورت چسبیده و کلیه سطوح پین‌ها به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. اتصال بین صفحه سوخت و سبد سوخت، میله سوخت و سبد سوخت و همچنین سبد سوخت و کسک با توجه به وجود فواصل هوایی 1.75 mm ، 0.5 mm و 1 mm بین آن‌ها به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است، در سطوح زیرین تکیه‌گاهی نیز همین نوع اتصال اعمال شده است. اتصال دسته‌ها و صفحه در قسمت سطوح مدل‌سازی شده برای جوش، به صورت چسبیده و اتصال سطوح جانبی درب کسک و کسک نیز به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. همچنین در سناریوهای سقوط، برخورد اجزا به صورت بدون اصطکاک تعریف شده است.

۳.۳ شبکه‌بندی

برای شبکه‌بندی مدل از المان‌های شش‌وجهی با 161369 المان و 59391 گره استفاده شده است. اندازه قالب المان برای قطعات مورد مطالعه شامل صفحه سوخت، میله سوخت، قرص‌های سوخت و سبد سوخت 10 mm و برای بقیه اجزا و سرب بدنه به ترتیب 20 mm و 40 mm در نظر گرفته شده است. همچنین در محل‌ها تماس اجزا، اندازه المان بهبود یافته است که برای مثال در اتصال دسته به بدنه قابل مشاهده می‌باشد. مدل شبکه‌بندی کسک در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۱.۳ تعریف هندسه

پیش‌فرض‌های زیر در تعریف هندسه مدل ارائه شده و در نرم‌افزار در نظر گرفته شده است:

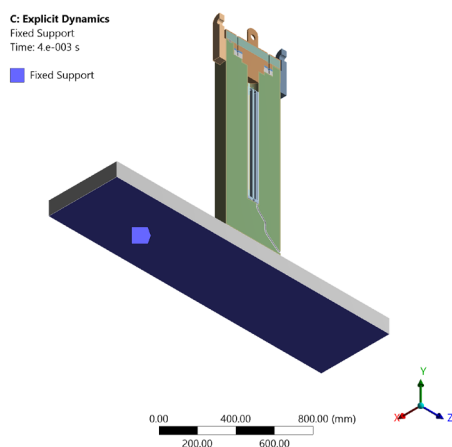
۱. جهت ایجاد سطح اتصال، پخ‌های طراحی شده برای جوش حذف شده‌اند و قطعات یکپارچه در نظر گرفته شدند.
۲. اتصال صفحه رزوه با بدنه در قسمت کناری و پایینی با در نظر گرفتن پای جوش برابر با 8 mm انجام گرفته است.
۳. در مقاطعی که اتصال با پیچ انجام گرفته است، سطح اتصال به صورت دو برابر قطر پیچ در محل هر پیچ در نظر گرفته شد و این سطوح در مدل ایجاد گردیدند. فرض شده است که در این محدوده، فشار ایجاد شده توسط پیچ جهت اتصال مؤثر بوده و تماس از طریق این محدوده برقرار می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن پیچ $M14$ ، محدوده تماس برابر با دایره‌ای به قطر 28 mm ایجاد گردید.
۴. قرص‌های سوخت در درون میله سوخت به دلیل وجود فنر در میله سوخت که تماس آن‌ها به یکدیگر را محکم می‌کند، یکپارچه در نظر گرفته شد. ضخامت میله سوخت برابر با 6.7 mm و قطر سوراخ وسط قرص‌های سوخت برابر با 1.6 mm در نظر گرفته شد. سبد سوخت نیز به گونه‌ای در نظر گرفته شد تا فاصله هوایی 0.5 mm بین سطوح جانبی میله سوخت و سبد سوخت حفظ شود.
۵. جهت جلوگیری از جابه‌جایی زیاد میله سوخت و صفحه سوخت در هنگام سقوط و ضربه، یک الاستومر از جنس پلی‌یورتان با ضخامت 40 mm به زیر درب کسک اضافه گردید تا خاصیت جذب انرژی و میراکنندگی را نیز داشته باشد.
۶. همواره بدترین شرایط حوادث برای تحلیل در نظر گرفته شده است. برای مثال فرض شده است که در سقوط افقی، کسک از سمتی که میله قرار گرفته است به زمین بتنی برخورد کرده است. با توجه به امکان تقارن در نظر گرفتن مدل، جهت کاهش حجم و زمان محاسبات، نیمی از مدل در تحلیل در نظر گرفته شد و صفحه تقارن برای آن تعریف گردید (شکل ۲).



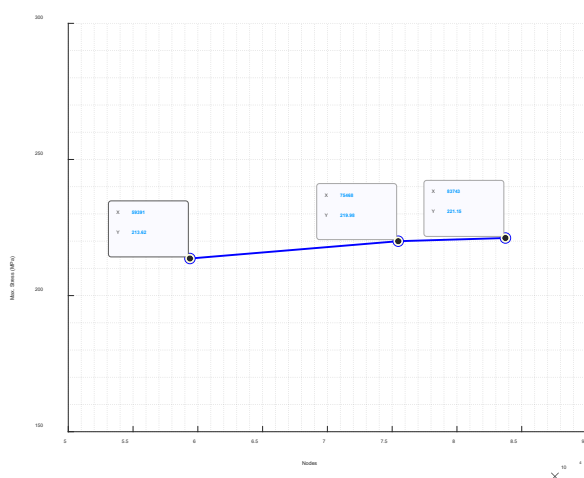
شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. تغییرات تنش بیشینه در این سه تعداد گره المان اندک و در حال همگرا شدن می‌باشد. لذا مورد قبول واقع شده است. همچنین تحلیل با گام‌های زمانی کمتر نیز انجام گرفته و بررسی گردید تا گام زمانی اثری بر روی نتایج نداشته باشد. رایانه مورد استفاده دارای پردازنده Intel® Core™ i۷-۷۷۰۰ و حافظه رم ۱۶ گیگابایت بوده است. زمان کلی هر تحلیل نیز با گام زمانی ۰/۴ میلی‌ثانیه و مشخصات ذکر شده برای شبکه، حدوداً ۸ ساعت بوده است.

۴. نتایج و بحث

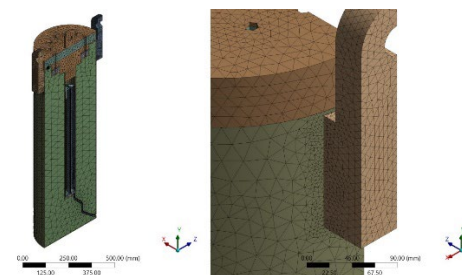
نتایج در سه سناریو سقوط عمودی، افقی و مایل از ارتفاع ۹ متری در بدترین شرایط برخورد و محافظه‌کارانه‌ترین شرایط به صورت ضریب ایمنی برای سوخت صفحه‌ای و اکسیدی، غلاف زیرکونیمی در جدول ۲ ارائه شد.



شکل ۴. نمونه شرط مرزی تحلیل سقوط بر روی سطح بتن.



شکل ۵. نمودار مطالعه تناسب شبکه.



شکل ۳. مدل شبکه‌بندی شده کسک در تحلیل حوادث.

۴.۳ تحلیل سقوط کسک

در این تحلیل، هدف اطمینان از آسیب ندیدن صفحه، میله سوخت، و قرص‌های سوخت در حین رخداد حادثه سقوط می‌باشد. سطح هدفی که کسک در آزمون با آن برخورد می‌نماید می‌بایست یک سطح صاف و هموار افقی باشد و خواص مکانیکی آن به گونه‌ای باشد که افزایش در مقاومت و استحکام مکانیکی به وجود آمده در آن در اثر تغییر شکل به وجود آمده طی برخورد کسک به آن، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش آسیب وارده بر کسک نداشته باشد. بر این اساس ابعاد صفحه برخورد بزرگ در نظر گرفته شده و جنس آن نیز بتن انتخاب شده است. شکل ۴ مدل‌سازی با تعیین شرایط مرزی برای سقوط کسک بر روی بتن را نشان می‌دهد.

ارتفاع سقوط (h) در هر سناریو به عنوان شرایط اولیه تحلیل اعمال شده است که در واقع با شتاب گرانش (g) در رابطه ۱ به سرعت اولیه جسم (v) در لحظه برخورد تبدیل می‌گردد. با توجه به زیاد بودن مرتبه نیروی برخورد نسبت به نیروی محدود جاذبه در انتگرال‌گیری، از این نیرو در شرایط مرزی صرف‌نظر شده است. درواقع در نظر گرفتن یا نگرفتن آن تأثیری بر روی نتیجه تحلیل ندارد. لازم به ذکر است که حل این شبیه‌سازی تا ۴ ms پس از برخورد در نظر گرفته شده است.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

۵.۳ مطالعه تناسب شبکه

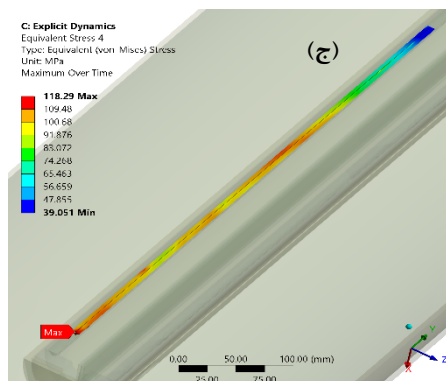
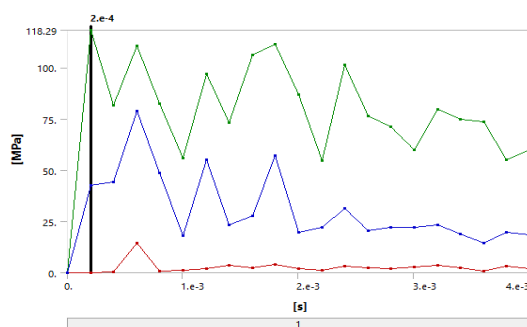
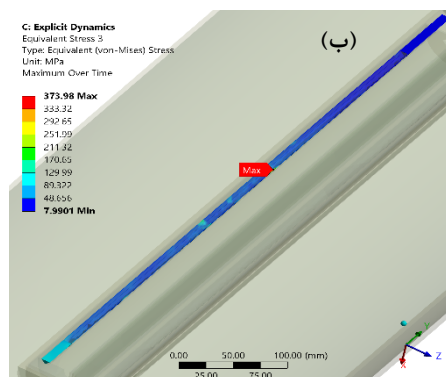
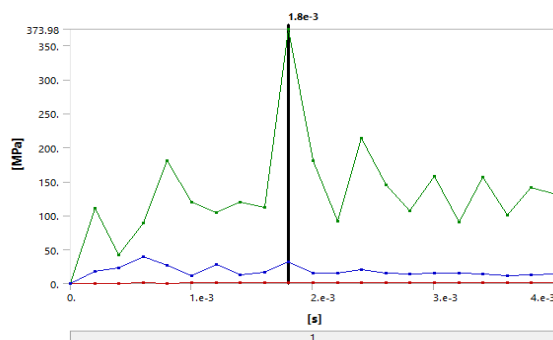
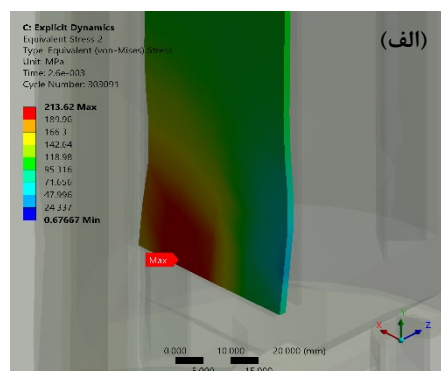
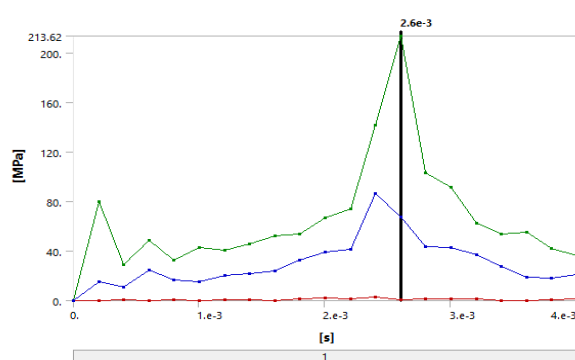
برای بررسی تناسب شبکه و انتخاب اندازه المان مناسب، یک مطالعه با مقادیر مختلف تعداد گره بر روی بیشینه تنش ایجاد شده در صفحه سوخت انجام گرفته است. برای تولید گره‌های بیشتر، اندازه المان‌ها نسبت به اندازه‌ای که در بخش شبکه‌بندی توضیح داده شد کاهش یافته است. زمان رخ دادن بیشینه تنش در همه تحلیل‌ها یکسان بوده و مقادیر تنش در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. جهت استفاده بهینه از زیرساخت پردازشی و کاهش زمان حل، تعداد ۵۹۳۹۱ گره برای



۱.۴ سقوط عمودی

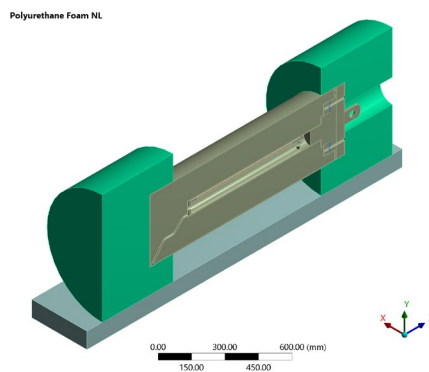
کناره فوم در سقوط افقی اهمیت پیدا می‌کند. در هر دو شرایط سقوط، کمینه ضخامت فوم جهت استفاده، با شرط ایجاد ضریب اطمینان بالاتر از ۱ انتخاب شده است. نمای شبیه‌سازی شده کسک با حضور ضربه‌گیر در شکل ۷ نشان داده می‌شود. تحلیل تنش کسک در سقوط عمودی با حضور ضربه‌گیر انجام شد و نتایج در شکل ۸ مشاهده می‌شود. تنش بیشینه در صفحه سوخت و میله سوخت به ترتیب تا مقادیر ۲۴ MPa و ۷۲ MPa کاهش یافت که ضرایب ایمنی ۴ و ۲ برای صفحه سوخت و میله سوخت فراهم شده است. مقدار تنش بیشینه در قرص‌های سوخت اکسیدی تا مقدار ۴۷ MPa کاهش یافت که نشان‌دهنده ضریب ایمنی ۵ برای این قطعه شده است.

نتایج شبیه‌سازی سقوط عمودی کسک در شکل ۶ مشاهده می‌شود. تغییرات تنش بیشینه، متوسط و کمینه همه محتویات کسک شامل صفحه سوخت، میله سوخت و قرص سوخت باگذشت زمان تا ۴ ms نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود صفحه سوخت دچار تغییر شکل پلاستیک شده است. تنش بیشینه وارد شده به صفحه سوخت و میله سوخت به ۲۱۳ MPa و ۳۷۳ MPa رسیده است که از مقدار تنش تسلیم این مواد فراتر رفته است و نشان‌دهنده رد ایمنی کسک در این حادثه می‌باشد. از این رو اقدام اصلاحی با تعبیه ضربه‌گیر از جنس فوم پلی‌یورتان به ضخامت ۳۰۰ mm در کف و ۱۵۰ mm در کناره‌ها انجام شد. در واقع در شرایط سقوط عمودی، ضخامت مؤثر فوم در راستای محور استوانه کسک می‌باشد و ضخامت

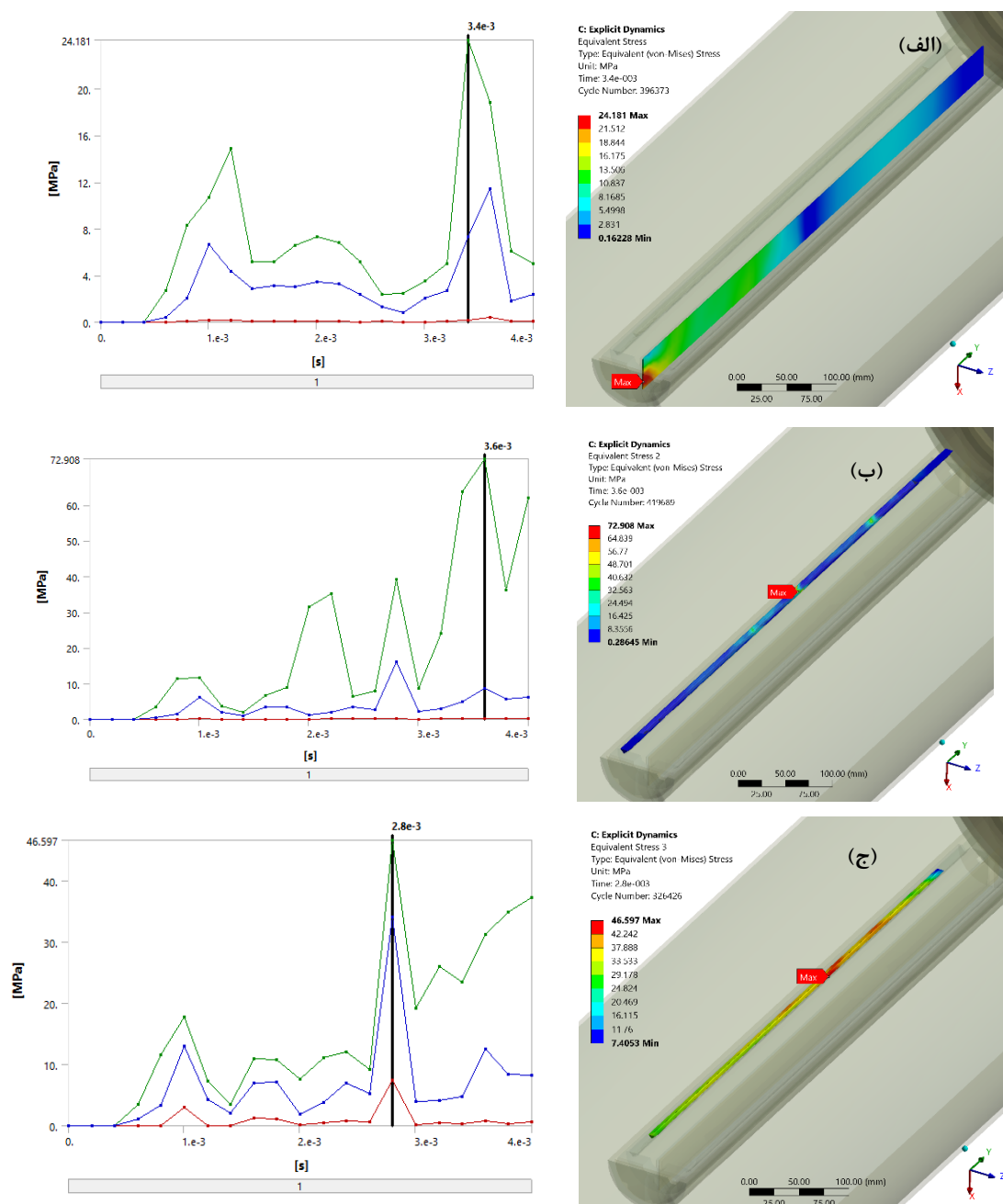


شکل ۶. کانتور و نمودار تغییرات تنش محتوی کسک در سناریو سقوط عمودی بدون حضور ضربه‌گیر (سبز: بیشینه، آبی: میانگین، قرمز: کمینه) (الف) صفحه سوخت (ب) میله سوخت (ج) قرص سوخت.





شکل ۷. فوم ضربه گیر طراحی شده با ضخامت ۳۰۰ mm در کف و ۱۵۰ mm در اطراف کسک.



شکل ۸. کانتور و نمودار تغییرات تنش محتوی کسک در سناریو سقوط عمودی با حضور ضربه گیر (سبز: بیشینه، آبی: میانگین، قرمز: کمینه) الف) صفحه سوخت (ب) میله سوخت ج) قرص سوخت.



۲.۴ سقوط افقی

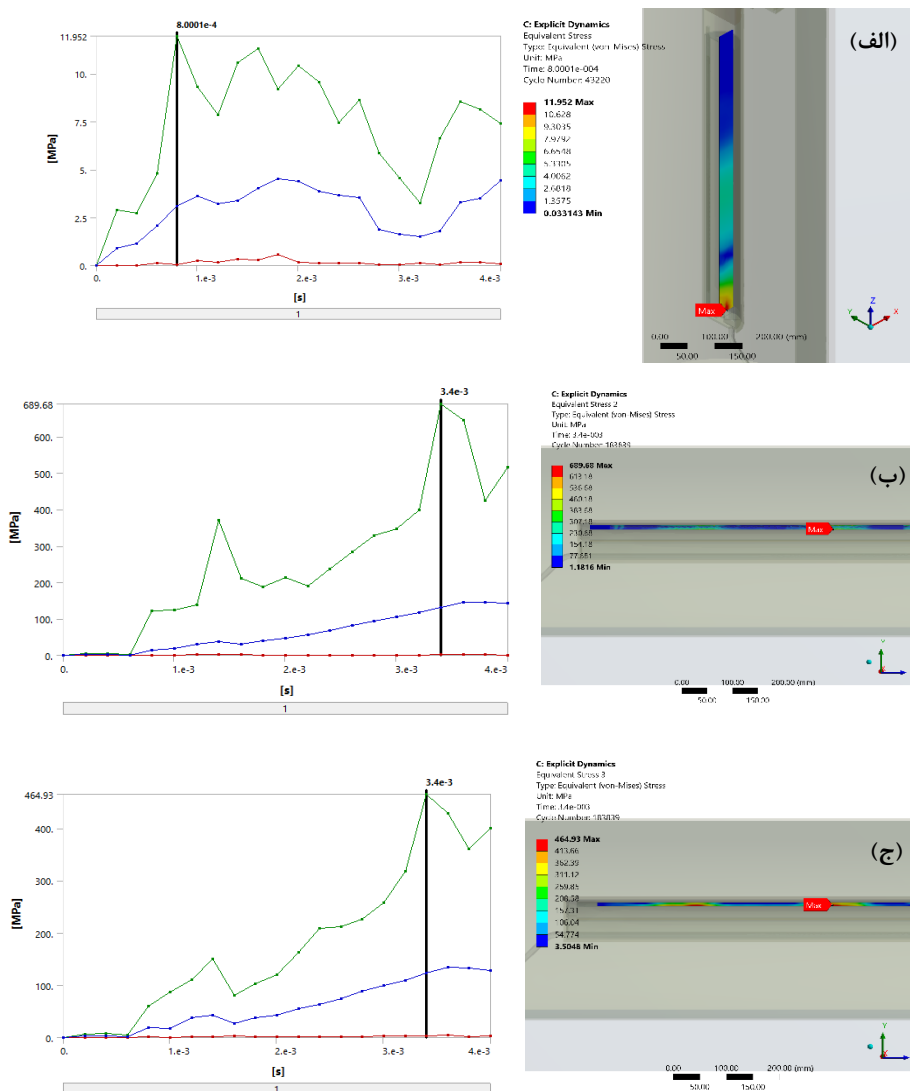
در ابتدا سناریو سقوط افقی در شرایط بدون حضور ضربه‌گیر انجام شد. وضعیت زاویه‌ای کسک حول محور استوانه خودش در این حادثه برای دستیابی به شرایط محافظه‌کارانه به‌صورتی در نظر گرفته شده که میله سوخت در شرایط آسیب قرار گیرد. نتایج تغییرات تنش در این حادثه در شکل ۹ نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش در میله سوخت و قرص‌های آن به ترتیب تا ۶۹۰ MPa و ۴۶۴ MPa افزایش یافت. در این شرایط آسیب جدی به غلاف و سوخت آن وارد می‌شود. بنابراین الزام تعبیه ضربه‌گیر برای قسمت‌های کناری کسک به‌صورت قابل توجهی مشاهده می‌شود که ضخامت مؤثر به‌دست آمده برای آن، در بخش قبلی توضیح داده شد. شبیه‌سازی تحلیل تنش با اقدام اصلاحی و حضور ضربه‌گیر ضخامت ۱۵۰ mm تکرار شد. نتایج در شکل ۱۰ نشان داد که

مقدار تنش بیشینه تا زیر تنش تسلیم زیرکونیم و اکسید اورانیم به ترتیب تا مقدار ۱۳۵ MPa و ۷۷ MPa کاهش یافت.

۳.۴ سقوط مایل

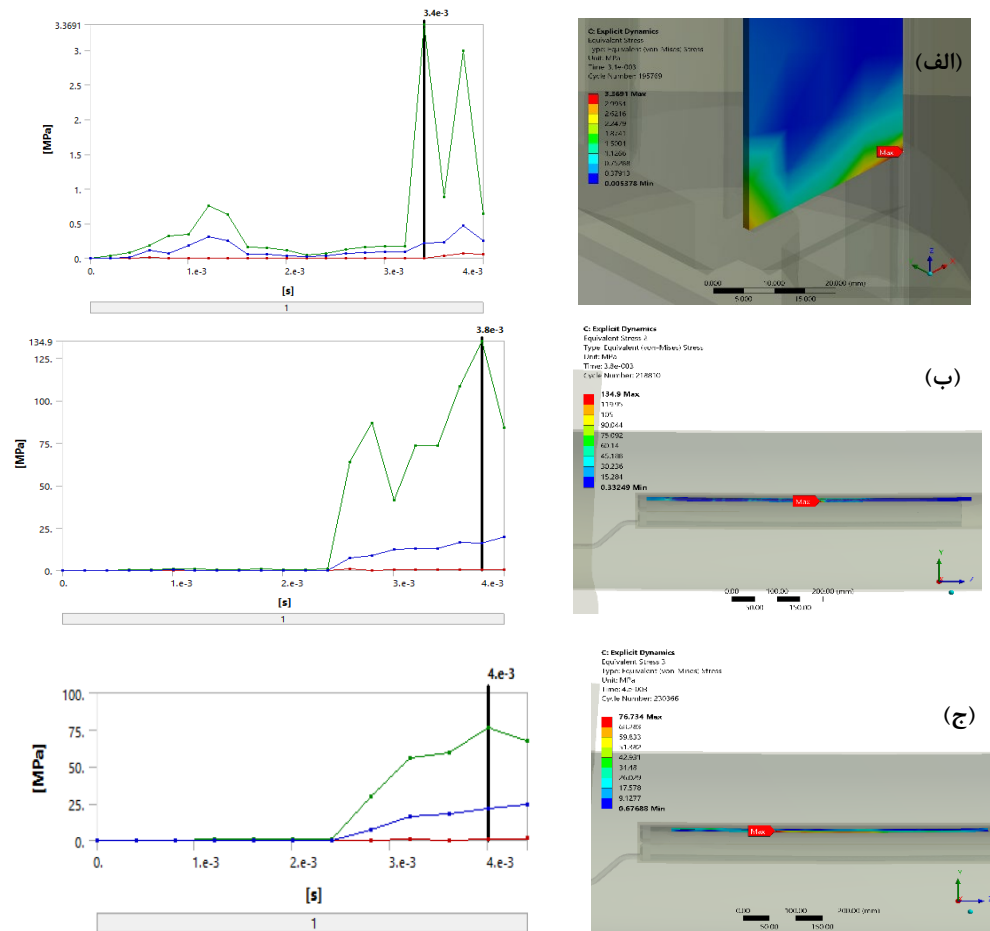
به دلیل حضور الزامی ضربه‌گیر در سناریو حادثه سقوط عمودی و افقی، ارزیابی تنش در کسک و محتویات آن برای این سناریو در حضور ضربه‌گیر انجام شد. همان‌طور که نتایج در شکل ۱۱ نشان می‌دهد، مقدار تنش بیشینه در صفحه سوخت، میله سوخت زیرکونیم و قرص‌های سوخت اکسیدی به صورت قابل توجهی پایین است که نشان‌دهنده ایمن بودن کسک در حضور ضربه‌گیر با ضریب ایمنی بالا در حین حادثه سقوط مایل دارد.

جدول ۲ مقادیر تنش بیشینه و ضرایب ایمنی در سناریوهای مختلف حادثه با حضور ضربه‌گیر در کسک را نشان می‌دهد.

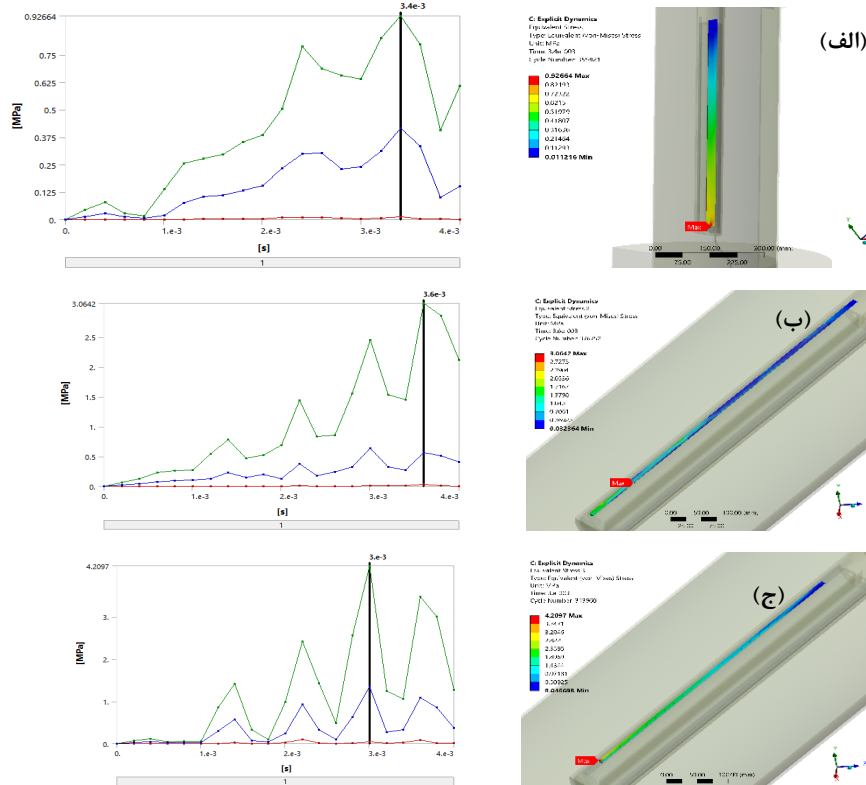


شکل ۹. کانتور و نمودار تغییرات تنش محتوی کسک در سناریو سقوط افقی بدون حضور ضربه‌گیر (سبز: بیشینه، آبی: میانگین، قرمز: کمینه) الف) صفحه سوخت (ب) میله سوخت ج) قرص سوخت.





شکل ۱۰. کانتور و نمودار تغییرات تنش محتوی کسک در سناریو سقوط افقی با حضور ضربه گیر (سبز: بیشینه، آبی: میانگین، قرمز: کمینه) الف) صفحه سوخت (ب) میله سوخت (ج) قرص سوخت.



شکل ۱۱. کانتور و نمودار تغییرات تنش محتوی کسک در سناریو سقوط مایل با حضور ضربه گیر (سبز: بیشینه، آبی: میانگین، قرمز: کمینه) الف) صفحه سوخت (ب) میله سوخت (ج) قرص سوخت.



زیر مقادیر تنش تسلیم اجزاء درون کسک کاهش یافت که نشان‌دهنده حفظ یکپارچگی کسک پس از اقدام اصلاحی می‌باشد. بنابراین نشت مواد رادیواکتیو در شرایط حادثه سقوط ۹ متری با حضور ضربه‌گیر رخ نمی‌دهد.

مراجع

1. Bhandekar A, Pandit K, Dhotre M, Nagaraju P, Rath B, Mishra P, Kumar S, Dubey J.S, Mallik G.K, Singh J.L. New Hot Cell Facility for Post Irradiation Examination. *BARE*. 2015;19.
2. Cole J.I, Jue J-F, Moore G.A. Fuel Design and Fabrication: Research Reactor Fuel. *Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States)*. 2021.
3. Durazzo M, Umbhaun P, Torres W, Souza J, Silva D, Andrade D. Procedures for manufacturing an instrumented nuclear fuel element. *Progress in Nuclear Energy*. 2019;113:166-174.
4. Lyons M, Boyle R, Davies J, Hazel V, Rowland T. UO_2 properties affecting performance. *Nuclear Engineering and Design*. 1972;21(2):167-199.
5. Alfa S, Nazar R, Sulaksono S, Fitriana R, Nagara N. Editors. Transfer cask design for plate type fuel elements of the Bandung Conversion Reactor. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing. 2019.
6. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. *Vienna: International Atomic Energy Agency*. 2018.
7. Kim K-S, Chung S-H, Kim J-S, Choi K-S, Yun H-D. Demonstration of structural performance of IP-2 packages by advanced analytical simulation and full-scale drop test. *Nuclear engineering and design*. 2010;240(3):639-655.
8. Saito Y, Kishimoto J, Matsuoka T, Tamaki H, Kitada A. Containment integrity evaluation of MSF-type cask for interim storage and transport of PWR spent fuel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2014;117:33-41.
9. Hao Y, Wang J, Li Y, Wu B, Wang H, Ma T. Editors. Study on the structural evaluation and optimization of spent nuclear fuel cask. *International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers*. 2021.
10. Hao Y, Wang J, Wu B, Ma T, Wang H, Liu B. Study on the most severe condition for structural assessment of nuclear fuel transport package under impact loading. *Progress in Nuclear Energy*. 2022;153:104447.
11. Kim S-P, Kim J, Sohn D, Kwon H, Shin M. Stress-based vs. Strain-based safety evaluations of spent nuclear fuel transport casks in energy-limited events. *Nuclear Engineering and Design*. 2019;355:110324.

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی آنالیز محدود حادثه سقوط کسک پس از تعبیه ضربه‌گیر

حادثه با حضور ضربه‌گیر	نتایج	صفحه سوخت	میله سوخت	قرص سوخت
تحلیل سقوط عمودی	تنش بیشینه (MPa)	۲۴/۳۹	۷۵	۴۷
تحلیل سقوط افقی	ضریب ایمنی	۴/۱	۲	۵/۴
تحلیل سقوط عمودی	تنش بیشینه (MPa)	۳/۳	۱۳۵	۷۷
تحلیل سقوط مایل	ضریب ایمنی	۳۰/۳	۱/۱	۳/۳
	تنش بیشینه (MPa)	۰/۹	۳	۴/۲
	ضریب ایمنی	۱۱۱/۱	۵۰	۶۰/۵

۵. نتیجه‌گیری

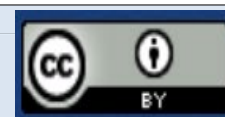
در این مطالعه ایمنی کسک حاوی سوخت صفحه‌ای، میله سوخت زیرکونیم و قرص سوخت اکسید اورانیم در مقابل حادثه سقوط ۹ متری در شرایط عمودی، افقی و مایل مورد بررسی قرار گرفت. شرایط رخداد حادثه مطابق با تعاریف موجود در استاندارد ایمنی شماره ۶ سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (SSR-۶) در نظر گرفته شد و از آنالیز المان محدود در نرم‌افزار ANSYS به‌منظور تحلیل تنش در شبیه‌سازی این حوادث استفاده شد. نتایج نشان داد که تنش بیشینه وارد شده به صفحه سوخت در داخل کسک بدون حضور ضربه‌گیر در حادثه سقوط عمودی به میزان ۲۱۶ MPa افزایش یافت که بسیار بیشتر از تنش تسلیم این جزء است و باعث تغییر شکل پلاستیک صفحه سوخت در این حادثه شد. از طرفی تنش میله سوخت و قرص سوخت در سناریو حادثه سقوط افقی کسک بدون حضور ضربه‌گیر به ترتیب از ۶۵۹ MPa و ۴۶۴ MPa تجاوز کرد که نشان‌دهنده ایجاد آسیب جدی به این اجزاء می‌باشد. از این رو اقدام اصلاحی مناسب طراحی گردید و تحلیل تنش با تعبیه ضربه‌گیر فوم پلی‌یورتان در زیر کسک به ضخامت ۳۰۰ mm و در کناره‌ها به ضخامت ۱۵۰ mm تکرار شد. نتایج تحلیل تنش با حضور فوم نشان می‌دهد تنش بیشینه وارد شده به صفحه سوخت در حین حادثه سقوط عمودی کسک تا ۲۴ MPa افزایش و سپس کاهش یافت که نشان از ایجاد ضریب ایمنی ۴ با حضور ضربه‌گیر در کسک است. همچنین مقدار تنش بیشینه در میله و قرص سوخت در شرایط اقدام اصلاحی سقوط افقی نسبت به شرایط بدون حضور ضربه‌گیر تا مقدار ۱۳۶ MPa و ۷۷ MPa کاهش یافت. بنابراین تنش بیشینه تا



12. Rezaeian M, Kamali J, Ahmadi S.J. Thermal Evaluation of a Dual Purpose Cask for Bushehr Nuclear Reactor Spent Fuels Under Normal Conditions. *J. of Nucl Sci. and Tech.* 219;87(1):81-88 [In Persian].
13. Sedigh Y, Azimfar S.A. Safety Analysis of Spent Fuel Transportation Cask of Bushehr Nuclear Power Plant through the Passing of Fire Tunnel with ANSYS®10.0. *J. of Nucl Sci. and Tech.* 2009;30(1):57-61 [In Persian].
14. Wang X-S, Xu Y. Mechanical characterizations of the dispersion U_3Si_2 -Al fuel plate with sandwich structure. *Applied Composite Materials.* 2003;10(3):159-167.
15. Sengupta A.K, Bhagat R.K, Jarvis T, Banerjee J, Kutty T.R.G, Ravi K, D'Souza O.L, Keswani R, Nair M.R, Ramachandran R, Purusnotham D.S.C. Some important properties of simulated UO_2 fuel. 1999.
16. Rosinger H, Northwood D. The elastic properties of zirconium alloy fuel cladding and pressure tubing materials. *Journal of Nuclear Materials.* 1979;79(1):170-179.
17. Hammad A, El-Mashri S, Nasr M. Mechanical properties of the Zr-1% Nb alloy at elevated temperatures. *Journal of nuclear materials.* 1992;186(2):166-176.
18. Ding F, Liu T, Zhang H, Liu L, Li Y. Stress-strain curves for polyurethane elastomers: A statistical assessment of constitutive models. *Journal of Applied Polymer Science.* 2021;138(39):51269.
19. Wellman G. Transportation system impact limiter design using rigid polyurethane foam. *Sandia National Labs.* 1985.
20. <https://www.matweb.com/>. *Materials Properties Data.*

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

گستریانی، رضا، اقرء، نوید، دبیری، جاوید. (۱۴۰۴). ارزیابی ایمنی کسک سربی انتقال سوخت و مواد ساختاری تابش‌دیده در شرایط حادثه سقوط با شبیه‌سازی ANSYS. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱(۱)، ۱۸۸-۱۹۸. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1542.2006>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1660.html

