



ارزیابی ایمنی حادثه سقوط مجتمع سوخت در رآکتور تحقیقاتی تهران (۱)

بهاره روستایی^{*}، بهروز رک‌رک، سعیده صفائی عرشی

پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۵۹۳۳، تهران - ایران

*Email: broostaii@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

با توجه به مراحل انجام بارگذاری یا جابه‌جایی مجتمع سوخت در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران، بر اساس الزامات ایمنی می‌بایست احتمال سقوط یک مجتمع سوخت و آسیب وارده به آن در نظر گرفته شود تا از حفظ یکپارچگی مجتمع‌ها و عدم آسیب به صفحات سوخت پس از حادثه سقوط احتمالی اطمینان حاصل گردد. در این شبیه‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل برخورد استفاده می‌شود. سه حالت برای سقوط مجتمع سوخت و برخورد آن به کف استخر در نظر گرفته می‌شود که شامل برخورد عمودی، با زاویه ۴۵ درجه و برخورد افقی است. براساس تحلیل تنش انجام شده مشخص گردید که حالت برخورد عمودی با کف استخر بدترین نوع برخورد بوده که می‌تواند آسیب به side plate ها یا همان صفحات کناری مجتمع را دربرداشته باشد اما صفحات سوخت داخل مجتمع آسیب جدی ندیده و یکپارچگی خود را حفظ می‌نمایند.

کلیدواژه‌ها: رآکتور تحقیقاتی، مجتمع سوخت، حادثه سقوط، نرم‌افزار ABAQUS، تحلیل تنش

Safety assessment of the fuel assembly drop accident in Tehran Research Reactor (1)

B. Roostaii*, B. Rokrok, S. Safaei Arshi

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399-55933, Tehran - Iran

Research Article

Received 4.12.2022, Accepted 12.3.2023

Abstract

According to the process of loading, unloading, and shuffling a fuel assembly in Tehran Research Reactor core, the possibility of a fuel assembly fall and consequent damage must be considered in order to ensure the integrity of the assembly and no damage to the fuel plates after a possible drop accident based on the safety requirements. In this simulation, ABAQUS software is used for collision analysis. Three modes are considered for the drop of the fuel assembly and its impact on the bottom of the pool, which includes a vertical impact, with an angle of 45 degrees, and a horizontal impact. Based on the stress analysis, it was determined that the vertical collision with the bottom of the pool was the worst type, which could damage the side plates of the assembly, but the fuel plates inside the assembly were not seriously damaged and kept their integrity.

Keywords: Research reactor, Fuel assembly, Drop accident, ABAQUS software, Stress analysis



۱. مقدمه

بررسی حوادث مرتبط با حمل و نقل مجتمع‌های سوخت رآکتورهای هسته‌ای از منظر ایمنی بسیار حائز اهمیت می‌باشد و می‌بایست حوادث محتمل در این خصوص در نظر گرفته شود. در رآکتور تحقیقاتی تهران هنگام بارگذاری مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور، جابه‌جایی مجتمع‌ها و یا خارج‌سازی آن‌ها از قلب، احتمال سقوط و در نتیجه آسیب فیزیکی وجود دارد تا جایی که ممکن است محصولات شکافت در محیط آزاد شوند و در نتیجه می‌بایست تحت تحلیل ایمنی قرار گیرد.

نحوه جابه‌جایی مجتمع‌های سوخت، هنگام اضافه نمودن یک مجتمع سوخت جدید به قلب رآکتور و یا خارج‌سازی یک مجتمع از قلب به این صورت است که مجتمع مربوطه در ابتدا به استخر وارد شده و مسیری در سطح معینی زیر آب (به علت ایجاد حفاظ مورد نیاز جهت به حداقل رسانیدن دز دریافتی کارکنان) حرکت داده می‌شود تا به محل قلب رسیده و در موقعیت مورد نظر قرار گیرد و برای خارج‌سازی یک مجتمع نیز عکس این فرایند طی می‌شود. در این حالت احتمال سقوط مجتمع سوخت و برخورد آن به کف استخر و یا سقوط آن بر روی قلب و سایر مجتمع‌ها وجود خواهد داشت. حادثه سقوط مجتمع سوخت، که به عنوان یک جابه‌جایی نادرست طبقه‌بندی می‌شود، به عنوان یکی از دلایل اصلی رویدادهای آغازگر فرضی در طراحی رآکتور در نظر گرفته می‌شود [۱]. در سری استانداردهای ایمنی آر‌انس بین‌المللی انرژی اتمی [۲]، آسیب مکانیکی به قلب یا سوخت ناشی از جابه‌جایی نادرست به عنوان یک رویداد آغازین فرضی برای رآکتورهای تحقیقاتی در نظر گرفته می‌شود. رویدادهای آغازگر فرضی به رویدادهای ناخواسته‌ای گفته می‌شود که به طور مستقیم یا غیرمستقیم عملکردهای اساسی ایمنی را به خطر می‌اندازند و باید به طور مناسب مورد تحلیل قرار گیرند.

در دنیا بررسی و تحلیل‌هایی در مورد حوادث سقوط مجتمع سوخت مورد استفاده در رآکتورهای قدرت انجام شده است. از جمله می‌توان به کار Hotta و همکاران [۳] و نیز Liang و همکاران [۴] اشاره نمود که در آن به روشی جهت ارزیابی یکپارچگی مجتمع سوخت مصرف شده یک رآکتور قدرت طی حادثه سقوط مجتمع پرداخته شده است. Wu و همکاران [۵] حوادث سقوط در رآکتور BWR (رآکتور آب جوشان) را بررسی نمودند. در این بررسی مجتمع سوخت به کف استخر می‌افتد و در آن یکپارچگی ساختاری سوخت از طریق محاسبه تنش بررسی می‌گردد. Petkevich و همکاران [۶] سقوط مجتمع

سوخت یک رآکتور PWR (رآکتور آب تحت فشار) را در طول حمل و نقل شبیه‌سازی کرده‌اند. Aleshin و همکاران [۷] مجتمع‌های سوخت مصرف‌شده نیروگاه‌های هسته‌ای را به عنوان هدف تحقیق در نظر گرفته و تحلیل یکپارچگی آن‌ها پس از حادثه سقوط را بر اساس نرم‌افزار LS-DYNA انجام داده‌اند. Dai و همکاران [۸] و نیز Xiao و همکاران [۹] حادثه سقوط مجتمع سوخت مصرف شده در رآکتور قدرت را شبیه‌سازی نموده‌اند. در مورد سقوط مجتمع سوخت رآکتورهای تحقیقاتی کارهای کمی انجام شده است. از جمله Kim و همکاران [۱۰] حادثه سقوط یک مجتمع سوخت صفحه‌ای در یک رآکتور تحقیقاتی را توسط نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی کرده‌اند و در مقاله دیگری نیز [۱۱]، آزمون سقوط یک مجتمع سوخت صفحه‌ای جهت اندازه‌گیری سرعت سقوط و بررسی میزان خسارت انجام شده است.

در زمینه ارزیابی ایمنی سقوط مجتمع سوخت در استخر رآکتور تهران تاکنون تحلیلی انجام نشده است و از لحاظ ایمنی انجام این تحلیل جهت پیش‌بینی رفتار مجتمع و صفحات سوخت بسیار مهم می‌باشد. در کار حاضر تنها به بررسی سقوط یک مجتمع و برخورد آن با کف استخر پرداخته می‌شود و به علت کثرت مطالب، سقوط یک مجتمع و برخورد آن با سایر مجتمع‌ها در مقاله بعدی تحلیل می‌گردد.

برای تحلیل سقوط یک مجتمع سوخت و برخورد آن با کف استخر، سه فرض در نظر گرفته می‌شود:

- ۱) برخورد عمودی مجتمع با کف استخر،
 - ۲) برخورد مجتمع با کف استخر تحت زاویه ۴۵ درجه،
 - ۳) برخورد افقی مجتمع با کف استخر.
- در حالت‌های مختلف برخورد، تحلیل تنش مجتمع و صفحات سوخت برای اطمینان از حفظ یکپارچگی آن‌ها انجام می‌گیرد.

۲. روش انجام تحلیل برخورد

۲.۲ مدل‌سازی قطعات مجتمع سوخت در نرم‌افزار

یک مجتمع سوخت صفحه‌ای استاندارد شامل ۱۹ صفحه سوخت است. صفحات سوخت به صورت ساندویچی و توسط نورد تولید می‌شوند. بخش پایینی مجتمع End Fitting نام دارد که درون صفحه مشبک رآکتور قرار می‌گیرد. در بخش بالایی مجتمع سوخت قطعه‌ای به نام «Handling Pin» وجود دارد که برای جابه‌جایی مجتمع و قراردادن آن در قلب رآکتور استفاده می‌شود.



۳.۲ شرایط مرزی و محاسبه سرعت برخورد

در شبیه‌سازی‌ها قرارگیری صفحات سوخت در شیارهای Side Plate به‌صورت قیدی لحاظ شده است به طوری که اگر مقدار نیرو در این قید از حد مشخص شده‌ای تجاوز کند قید حذف شود و اجازه حرکت بدون قید بین صفحه سوخت و Side Plate داده شود. با این مدل شبیه‌سازی امکان بررسی احتمال جدا شدن صفحات سوخت از مجتمع سوخت وجود خواهد داشت.

برای مشخص کردن حداکثر نیروی لازم برای حذف اتصال بین صفحات سوخت و Side Plate، تست بیرون کشیدن (Pull out) صفحات سوخت نیز شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی جانبی که تنها برای مشخص کردن مقادیر پارامترهای اتصال است، تست بیرون کشیدن یک صفحه سوخت از Side Plate با فیکس در نظر گرفتن قطعه Side Plate و اعمال جابه‌جایی به صفحه سوخت و مقایسه نیروی عکس‌العمل ماکزیمم با مقدار به‌دست آمده از آزمایش تجربی، شبیه‌سازی شده است. حداکثر نیروی ۲۷/۵ N/mm برای این اتصال در نظر گرفته شده است که با توجه به طول کل صفحه سوخت مقدار کل نیروی عکس‌العمل به‌دست می‌آید. پارامترهای شرایط اتصال به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که به این مقدار نیروی عکس‌العمل برسد. مقادیر به‌دست آمده از این شبیه‌سازی جانبی برای مدل کردن اتصال صفحات سوخت و Side Plate در همه مدل‌های شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی تست بیرون کشیدن در شکل ۱ نشان داده شده است. برای شرایط تماسی بین محل‌های برخورد با سطح استخر از مدل کلمب با ضریب اصطکاک ۰/۱ استفاده شده است که در مسائل سقوط با توجه به زمان کم تماس مناسب است. مدل اصطکاکی کلمب تنش اصطکاکی (یا برشی) حداکثر را به فشار تماسی بین دو سطح مرتبط می‌کند. در شکل کلی مدل اصطکاکی کلمب، دو سطح می‌توانند تنش برشی بین یک‌دیگر را تا حد مشخصی تا قبل از شروع به لغزش نسبت به یک‌دیگر، تحمل کنند. مدل کلمب این حد بحرانی تنش برشی (τ_{crit}) را به صورت $\tau_{crit} = \mu p$ مشخص می‌کند که در این رابطه μ ضریب اصطکاک است.

سرعت برخورد مجتمع در لحظه برخورد در مدل‌های مختلف با توجه به رابطه (۲) محاسبه شده است. در رابطه‌های (۲) و (۳) سرعت لحظه‌ای سقوط، v_i حداکثر سرعتی است که مجتمع می‌تواند تحت گرانش در آب استخر به آن دست یابد و m جرم مجتمع، ρ چگالی آب استخر، V حجم معادل مجتمع سوخت، CD ضریب درگ، g شتاب جاذبه، ma جرم افزوده بر روی مجتمع و A سطح مقطع مجتمع در حال سقوط است [۱۱].

پس از ایجاد هندسه قطعات در نرم‌افزار SolidWorks، هندسه اجزای مجتمع سوخت صفحه‌ای به نرم‌افزار ABAQUS وارد و در محل صحیح خود مونتاژ شده‌اند.

۲.۲ خواص مواد

خواص ماده الاستیک-پلاستیک استفاده شده برای همه قطعات مجتمع سوخت یکسان و از جنس Al6061-T6 بوده و مطابق جدول ۱ است [۱۲]. برای صفحات سوخت نیز خواص مشابه، همگن و به‌صورت Elastic-Perfect Plastic (تنش تسلیم و تنش نهایی یکسان) در نظر گرفته شده است. برای تعیین امکان آسیب از مدل آسیب جانسون-کوک با مقادیر $D_1 = -0.77$ ، $D_2 = 1.45$ ، $D_3 = -0.47$ ، $D_4 = 0.10$ ، $D_5 = 1.6$ استفاده شده است. [۱۳-۱۵]

برای پیش‌بینی نواحی وقوع شکست مدل‌های آسیب مختلفی در نرم‌افزار ABAQUS وجود دارد. یکی از مدل‌های شناخته شده و معتبر پیش‌بینی شکست مدل آسیب جانسون-کوک است. مدل آسیب جانسون-کوک تنها در حلگر ABAQUS/Explicit وجود دارد. در این مدل کرنش پلاستیک شکست نرم $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] (1 + d_5 \theta) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ضرایب d_1 تا d_5 پارامترهای شکست هستند که از آزمایش تجربی به‌دست می‌آیند. هم‌چنین در این رابطه η نسبت تنش سه محوره، $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ نرخ کرنش مرجع و دمای فلز است. مدل شکست جانسون-کوک را می‌توان در ترکیب با انواع مدل‌های ماده استفاده کرد.

جدول ۱. خواص ماده استفاده شده در شبیه‌سازی

مواد	مدول الاستیک (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش نهایی	چگالی (Kg/m ³)
Al6061-T6 ^{۱*}	۶۹	۲۷۵	۳۱۰	۰/۱۷	۲۷۰۰
Fuel Plates ^{۲*}	۶۹	۱۱۰	۱۱۰	۰/۱۷	۲۷۰۰

^{۱*} این خواص برای تمام اجزای مونتاژی مجتمع سوخت استفاده شده است.

^{۲*} این خواص برای تمام صفحات سوخت موجود در مجتمع سوخت استفاده شده است.

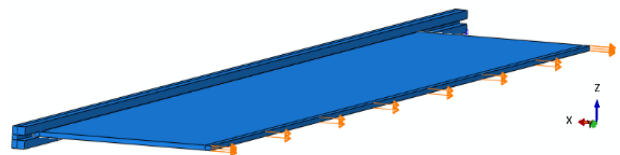


عمودی، سقوط با زاویه ۴۵ درجه و سقوط افقی به ترتیب از مقادیر ۳/۹۶۵ m/s، ۱/۳۸۲ m/s و ۱/۰۳۸ m/s برای سرعت لحظه برخورد استفاده شده است.

اگر با توجه به رابطه (۳) و بدون در نظر گرفتن ارتفاع سقوط حداکثر سرعت سقوط محاسبه شود برای حالت های سقوط عمودی، سقوط با زاویه ۴۵ درجه و سقوط افقی به ترتیب حداکثر سرعت ۴/۱۵۵ m/s، ۱/۳۸۲ m/s و ۱/۰۳۸ m/s به دست می آید. بنابراین فقط در حالت اول (سقوط عمودی) سرعت برخورد کم تر از حداکثر سرعت برخورد است و در دو حالت دیگر مجتمع به حداکثر سرعت سقوط رسیده است و افزایش ارتفاع سقوط تأثیری در سرعت لحظه برخورد نخواهد داشت. بیشترین سرعت برخورد در حالت سقوط عمودی است که سطح تصویر شده مجتمع در صفحه عمود بر جهت سقوط (A) کمترین مقدار ممکن است و بنابراین کمترین نیروی مقاوم در جهت سقوط وجود دارد. شکل ۲ سه مدل از برخورد مجتمع با کف استخر را نشان می دهد. بر اساس جدول ۲ سرعت سقوط در حالت عمودی نسبت به حالت های دیگر بیش تر است و حالت بحرانی خواهد بود و بنابراین در دیگر مدل های شبیه سازی فقط حالت سقوط عمودی که بدترین شرایط را دارد مدل شده است.

۳. نتایج شبیه سازی المان محدود

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی سه حالت مختلف سقوط مجتمع و برخورد آن با کف استخر بررسی شده است.



شکل ۱. مدل ایجاد شده برای به دست آوردن پارامترهای لازم شبیه سازی اتصال صفحات سوخت و Side Plate.

با انتگرال گیری از رابطه (۲) جابه جایی جسم در حال سقوط به دست خواهد آمد. بنابراین برای ارتفاع سقوط های مختلف، از رابطه (۲) سرعت لحظه برخورد محاسبه می شود.

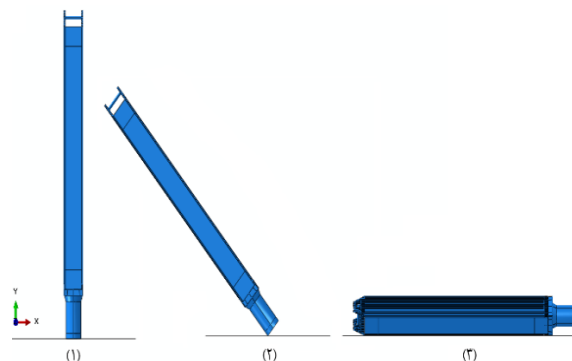
$$v = \sqrt{\frac{(m - \rho v)g}{\frac{1}{2}\rho AC_D}} \tanh \left[t \sqrt{\frac{(m - \rho v)g \cdot \frac{1}{2}\rho AC_D}{m + m_a}} \right] \quad (2)$$

$$v_D = \sqrt{\frac{(m - \rho v)g}{\frac{1}{2}\rho AC_D}} \quad (3)$$

در تمامی مدل ها قطعه Ground در همه جهت ها فیکس می شود. هم چنین اتصال قطعه Handling Pin به قطعه Side Plate و اتصال قطعه Side Plate به قطعه End Fitting که در واقعیت به صورت جوشکاری شده است، با قیدهای مناسب تمام درجات آزادی آنها به یکدیگر وابسته می شود. سرعت برخورد محاسبه شده از رابطه (۲) برای مدل سقوط از ارتفاع ۳/۳۵m در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به مقادیر آورده شده در این جدول، برای شبیه سازی سقوط

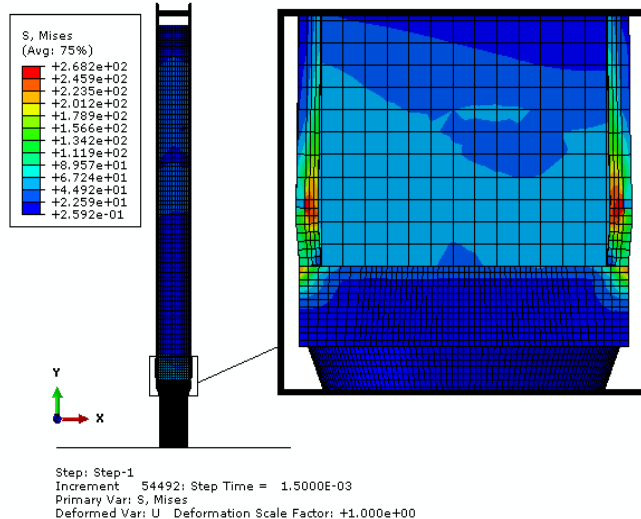
جدول ۲. محاسبه سرعت برخورد مجتمع با کف استخر تحت زوایای مختلف برخورد

جرم مجتمع (m)	چگالی آب استخر [۱۳] (ρ)	حجم معادل مجتمع (V)	ضریب درگ [۱۳] (C_D)
۶۵ Kg	۹۹۲/۲۵ Kg/m ^۳	۲۴۰۰ cm ^۳	۰/۸
۱	سقوط عمودی ارتفاع = ۳/۳۵ m	سطح مقطع تصویر (A) = ۵۸۹۶ cm ^۲	سرعت برخورد (v) = ۳/۹۶۵ m/s
۲	سقوط زاویه ۴۵ ارتفاع = ۳/۳۵ m	سطح مقطع تصویر (A) = ۵۳۲ cm ^۲	سرعت برخورد (v) = ۱/۳۸۲ m/s
۳	سقوط افقی ارتفاع = ۳/۳۵ m	سطح مقطع تصویر (A) = ۹۴۴ cm ^۲	سرعت برخورد (v) = ۱/۰۳۸ m/s

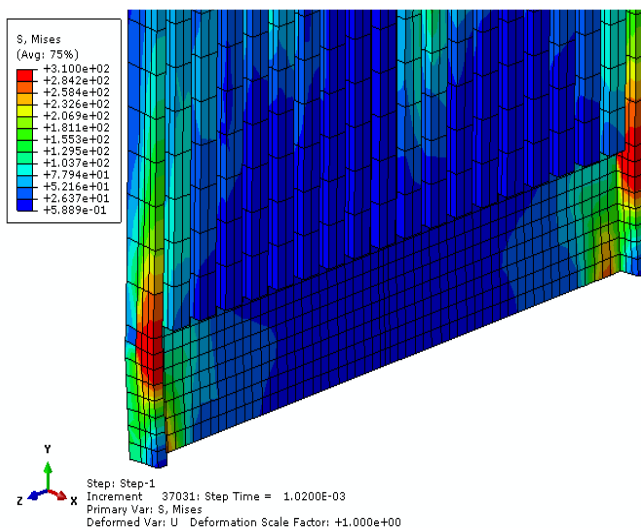


شکل ۲. سه مدل از برخورد مجتمع با سطح کف استخر، (۱) سقوط عمودی، (۲) سقوط تحت زاویه ۴۵ درجه و (۳) سقوط افقی.

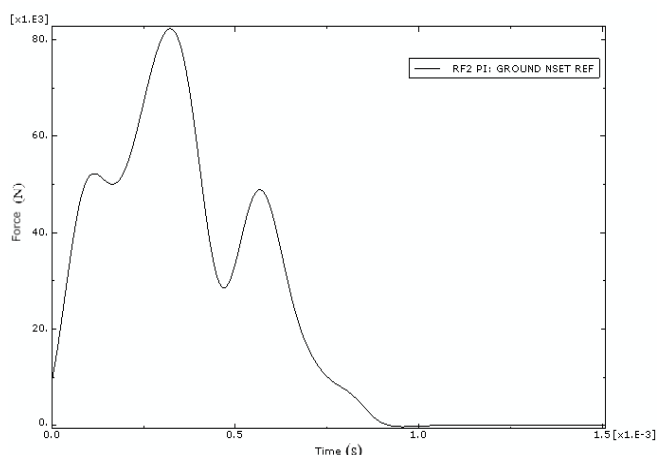




شکل ۳. نتیجه نهایی برخورد عمودی مجتمع به کف استخر.



شکل ۴. توزیع تنش در قطعه Side Plate در لحظه‌ای که بیش‌ترین تنش به آن وارد شده است.



شکل ۵. نیروی عمودی وارد به کف استخر در برخورد عمودی مجتمع.

۱.۳ سقوط عمودی

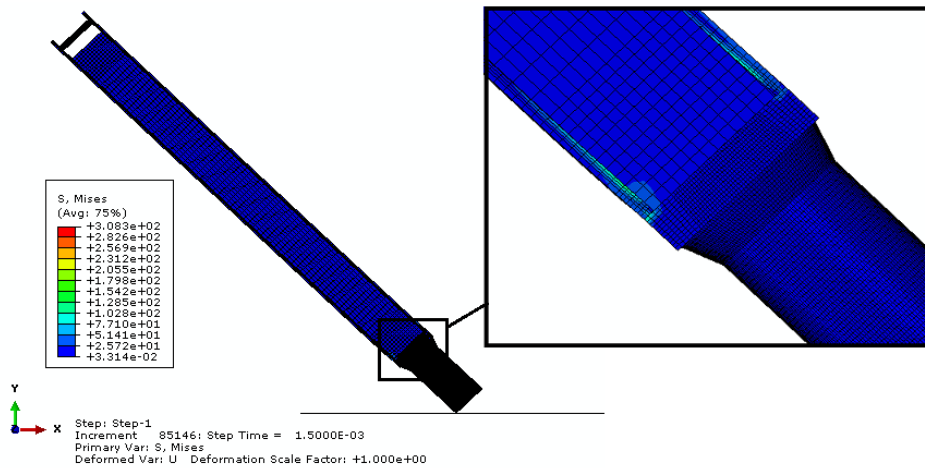
نتیجه برخورد عمودی مجتمع به کف استخر در انتهای فرایند در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است بیش‌ترین مقدار تنش در انتهای فرایند برخورد در بخش پایینی قطعه SidePlate و به اندازه 268 MPa و به اندازه تنش تسلیم ماده است. با توجه به این موضوع احتمال آسیب به این قطعه وجود دارد. در شکل ۴ توزیع تنش تنها در قطعه Side Plate در زمانی که بیش‌ترین تنش به آن وارد شده، نشان داده شده‌است. در این شکل می‌توان تغییر شکل موضعی ایجاد شده در بخش پایینی قطعه را بهتر مشاهده کرد. در این حالت برخورد، به صفحه سوخت کناری تنشی کم‌تر از 100 MPa وارد شده است که از تنش تسلیم ماده کم‌تر است و بنابراین به صفحات سوخت کناری آسیب جدی وارد نخواهد شد. در مورد صفحات سوخت داخلی نیز مقدار تنش کم‌تر از تنش تسلیم است.

مقدار نیروی عمودی وارد به کف استخر در شکل ۵ نشان داده شده‌است. مقدار بیشینه این نیرو بیش‌تر از 80 kN است. صفر بودن نیرو در در بخش انتهایی منحنی نشان می‌دهد که قطعه End Fitting با کف استخر تماس ندارد و در اثر برخورد و آزاد شدن کرنش‌های الاستیک، مجتمع به سمت بالا و جدا شدن از سطح کف استخر حرکت کرده‌است. از این منحنی برای تعیین مدت زمان برخورد (در این‌جا حدود ۱ میلی ثانیه) و مقایسه حالت‌های برخورد مختلف استفاده می‌شود.

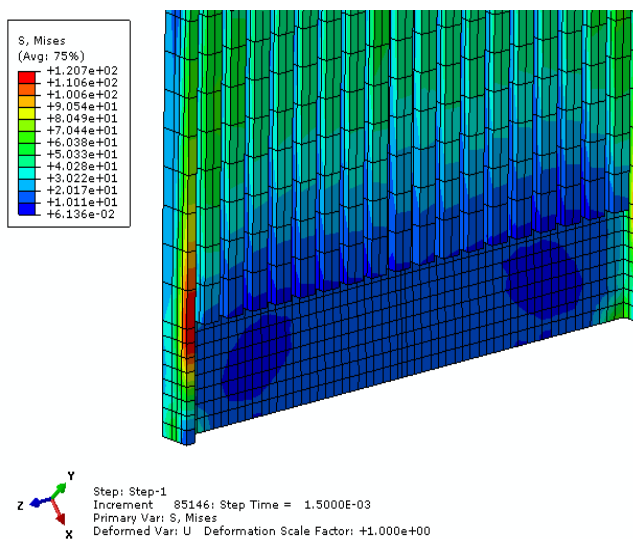
۲.۳ سقوط با زاویه ۴۵ درجه

در شکل ۶ نتیجه نهایی برخورد مجتمع با زاویه ۴۵ درجه به کف استخر نشان داده شده‌است. در حالت برخورد با زاویه ۴۵ درجه شدت آسیب به قطعه Side Plate و صفحات سوخت داخلی و کناری نسبت به حالت برخورد عمودی کم‌تر است زیرا در مقایسه با حالت عمودی برخورد، هم مقدار و هم محدوده تنش ماکزیمم (نواحی قرمز رنگ در شکل) کاهش پیدا کرده است. برای مقایسه بهتر در شکل ۷ توزیع تنش تنها در قطعه Side Plate نشان داده شده‌است. مقدار نیروی عمودی وارد به سطح کف استخر در شکل ۸ نشان داده شده‌است. مقدار نیروی عمودی نیز در این حالت کم و در حدود 4 kN است. کم بودن آسیب وارده و نیروی ناشی از برخورد به دلیل کم‌تر بودن سرعت لحظه برخورد ($1/382 \text{ m/s}$) است.





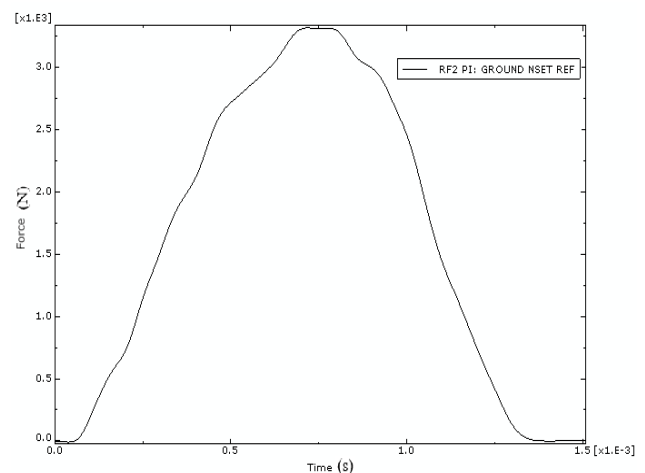
شکل ۶. نتیجه نهایی برخورد مجتمع با کف استخر با زاویه برخورد ۴۵ درجه.



شکل ۷. توزیع تنش در قطعه Side plate در حالت برخورد با زاویه ۴۵ درجه.

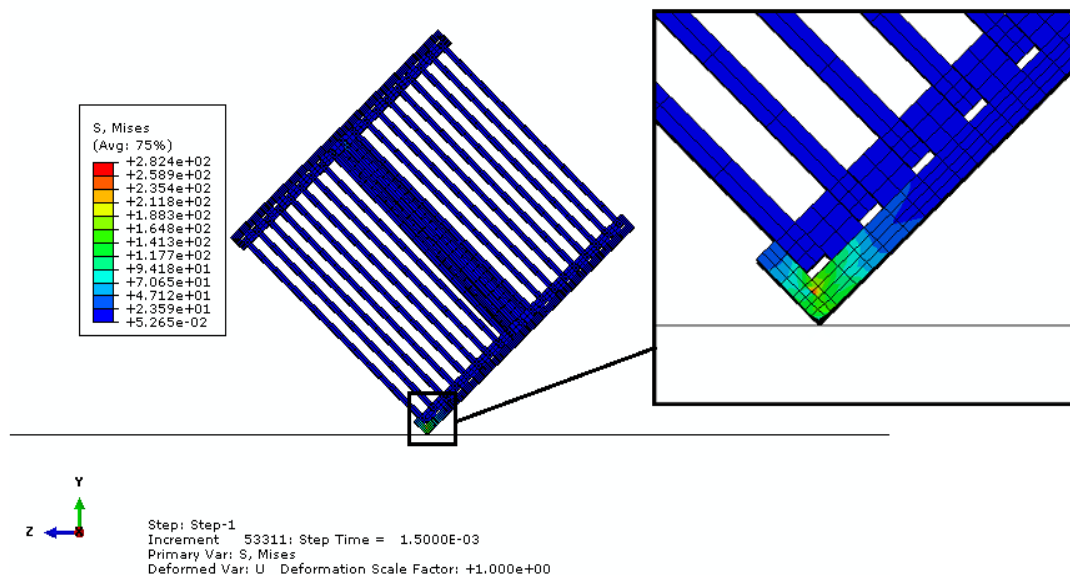
۳.۳ سقوط افقی

در شکل ۹ نمای جانبی نتیجه برخورد افقی مجتمع با کف استخر نشان داده شده است. برای بهتر دیده شدن محل برخورد و مشاهده میزان آسیب وارده به صفحات سوخت، در این شکل قطعه End Fitting از نمایش حذف شده است. همان طور که در این شکل مشخص است مقدار آسیب به صفحات سوخت نسبت به دو مدل قبلی کمتر است زیرا مقدار و محدوده تنش بیشینه (محدوده قرمز رنگ در شکلها) نسبت به حالت های برخورد قبلی کمتر است که دلیل اصلی آن سرعت کم برخورد می باشد. مقدار نیروی عمودی وارد به سطح کف استخر در برخورد افقی مجتمع در شکل ۱۰ نشان داده شده و مقدار بیشینه آن در حدود ۱۲ kN است که در مقایسه با بیشینه نیرو در مدل برخورد عمودی کمتر است. کم تر بودن مقدار آسیب به صفحات سوخت و نیروی عمودی به دلیل سرعت کم لحظه برخورد است. (۱/۰۳۸ m/s)



شکل ۸. مقدار نیروی عمودی وارد به سطح کف استخر در برخورد با زاویه ۴۵ درجه.



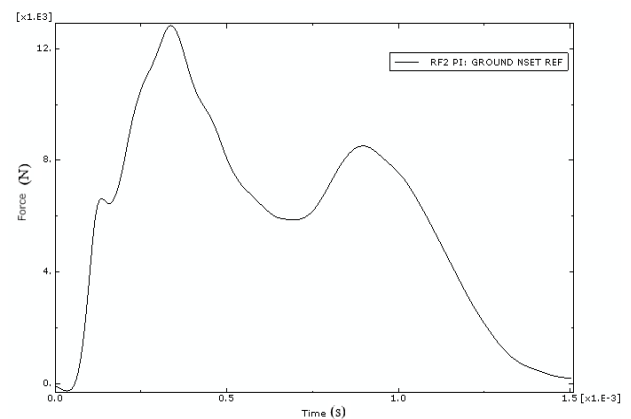


شکل ۹. نمای جانبی نتیجه نهایی برخورد افقی مجتمع به کف استخر با حذف قطعه End Fitting از حالت نمایش به منظور بهتر دیده شدن آسیب وارد به صفحات سوخت.

کف استخر برخورد می‌کند. در شکل ۱۱ نتایج نیروی عمودی وارد به کف استخر در سه حالت برخورد با یکدیگر مقایسه شده‌است.

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده در این بخش امکان مطالعه به‌صورت Mesh Study وجود ندارد زیرا در این حالت مطالعه باید تعداد المان‌ها در هر بار بررسی دو برابر شود و باتوجه به این‌که در حال حاضر ابعاد المان‌ها به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شده‌است، کوچک‌تر کردن آن‌ها با توجه به افزایش شدید زمان حل منطقی نیست. بنابراین از روش بررسی انرژی‌ها صحت‌سنجی نتایج بررسی شده‌است.

در شکل ۱۲ نتایج انرژی‌های جنبشی، درونی و انرژی کل آورده شده‌است. برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی باید روال انرژی‌ها منطقی باشد و مقدار انرژی کل سیستم ETOTAL ثابت باقی بماند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است مقدار انرژی کل سیستم در این شبیه‌سازی ثابت مانده و هیچ‌گونه تغییری نداشته‌است. به بیان دیگر مقدار سختی المان در حین فرایند برخورد به‌صورت مصنوعی افزایش یا کاهش نداشته‌است. مورد دیگر بررسی روال انرژی جنبشی (ALLKE) و انرژی درونی (ALLIE) سیستم است. در مورد شبیه‌سازی انجام شده باتوجه به این‌که مقدار سرعت اولیه برخورد، در ابتدای فرایند تحلیل مقدار انرژی جنبشی زیاد و برابر با انرژی کل سیستم است. از لحظه برخورد مجتمع به کف استخر از سرعت مجتمع کاسته شده و انرژی حاصل از آن به انرژی



شکل ۱۰. نیروی عمودی وارد به کف استخر در برخورد افقی مجتمع.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش زاویه برخورد و تغییر حالت برخورد از عمودی به حالت افقی، با توجه به این‌که مقدار سرعت برخورد نیز کم‌تر می‌شود، نیروی عمودی وارد به سطح کف استخر کاهش پیدا کرده‌است. همچنین همان‌گونه که از شکل‌های قبلی مشخص شد، مقدار آسیب وارد به صفحات سوخت در حالت افقی کم‌تر بوده و بیش‌ترین آسیب در مدل برخورد عمودی ایجاد شده‌است. کم‌تر بودن سرعت لحظه برخورد به این دلیل است که در حالت سقوط عمودی مجتمع سوخت، نیروی درگ ناشی از سیال که در برابر حرکت مقاومت می‌کند، به‌دلیل کم‌تر بودن سطح مقطع تصویر شده، کم‌تر است و بنابراین بیش‌ترین سرعت برخورد مربوط به حالت سقوط عمودی است که مجتمع با سرعت $3/965 \text{ m/s}$ با سطح

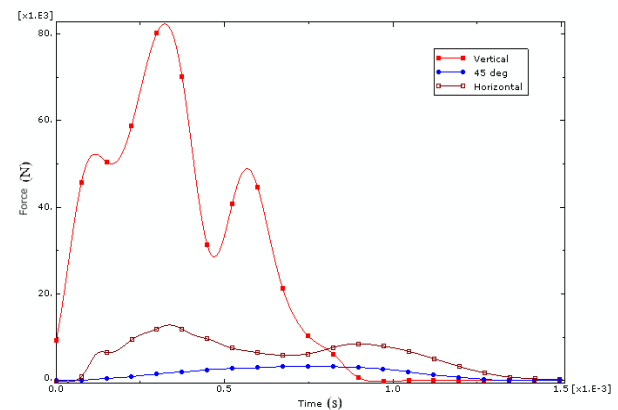


است (به علت سرعت برخورد بیش‌تر، $3/965 \text{ m/s}$ side plate یا همان صفحات کناری مجتمع به حد تنش تسلیم می‌رسند در واقع بیش‌ترین مقدار تنش در انتهای فرایند برخورد در بخش پایینی قطعه‌ی SidePlate و به اندازه 268 MPa و به اندازه تنش تسلیم ماده است. اما صفحات سوخت داخل مجتمع آسیب چندانی ندیده و یکپارچگی خود را حفظ می‌کنند. در سایر حالت های برخورد مقدار تنش و تعداد نواحی که حداکثر تنش به آن وارد می‌شود کم‌تر می‌باشد. صحت‌سنجی محاسبات با استفاده از روش بررسی انرژی‌ها انجام شده است.

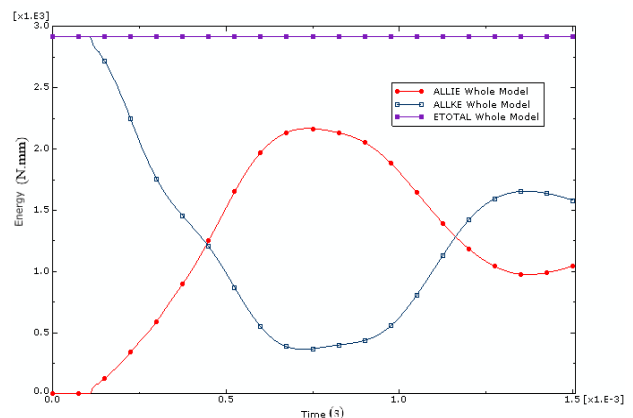
مراجع

1. International Atomic Energy Agency, Accident Analysis for Nuclear Power Plants. [IAEA Safety Reports Series](#). No. 23. Vienna (2002).
2. International Atomic Energy Agency, Safety of Research Reactors. [IAEA Safety Standards Series](#). No. NS-R-4. Vienna (2005).
3. Hotta A, Kawahara H. Study on fuel assembly drop accident. Transactions of the 10th international conference on structural mechanics in reactor technology. [United States](#). 1989.
4. Liang Y, Yang Jie. Study on Numerical Simulation of Drop Impact of Spent Fuel Transfer Equipment. [Nuclear Energy Engineering Journal](#). 2022;43(2):122-125.
5. Wu H.J, Tseng C.C, Cheng S.C. A Numerical Analysis for a BWR Fuel Assembly Drop Event. [J. Nucl. Sci. Technol](#). 2006;43:1068-1073.
6. Petkevich P, Abramov V, Yuremenko V, Piminov V. Makarov V, Afanasiev A. Simulation of the nuclear fuel assembly drop test with LS-Dyna. [Nuclear Engineering and Design](#). 2014;269:136-141.
7. Aleshin Y, Cerracin A, Park N.G, Yoo Y.I. Simulation methodology for fuel assembly drop accident during handling. American Nuclear Society-ANS, 555 North Kensington Avenue, [La Grange Park, IL 60526 \(United States\)](#). 2016.
8. Dai M, Fu P, Zhao J. Criticality Safety Analysis of Fuel Storage Under Fuel Assembly Dropping Accident. International Conference on Nuclear Engineering. [American Society of Mechanical Engineers](#). 2022;86366.
9. Xiao D, Fan Y, Liu Y, Guo S, Wang H. Impact Simulation Analysis of Spent Fuel Assembly Drop Accident. MEMAT 2022; 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology. [VDE](#). 2022.
10. Kim H.J, Yim J.S, Lee B.H, Oh J.Y, Tahk Y.W. Drop impact analysis of plate-type fuel assembly in research reactor. [Nuclear Engineering and Technology](#). 2014;46(4):529-540.

داخلی هر المان به صورت تغییر شکل الاستیک و پلاستیک تبدیل می‌شود. بنابراین مقدار انرژی درونی (ALLIE) با ادامه فرایند برخورد افزایش پیدا می‌کند. با ادامه پیدا کردن فرایند برخورد و با کاهش مقدار انرژی جنبشی (ALLKE) باید انرژی داخلی سیستم افزایش یابد و مجموع این دو انرژی مهم سیستم برابر با انرژی کل مدل خواهد بود. در شکل ۱۲ به خوبی این روند تبدیل انرژی‌ها نشان داده شده است که نشان‌دهنده صحت نتایج شبیه‌سازی به دست آمده است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج نیروی عمودی وارد به کف استخر در سه مدل برخورد.



شکل ۱۲. تغییرات انرژی‌های سیستم حین سقوط مجتمع و برخورد آن با کف استخر.

۴. نتیجه‌گیری

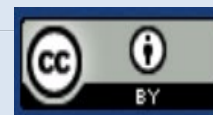
در این مطالعه حادثه سقوط یک مجتمع سوخت صفحه‌ای رآکتور تحقیقاتی تهران حین جابه‌جایی درون استخر رآکتور و برخورد آن با کف استخر مورد بررسی و تحلیل مکانیکی قرار گرفت. سه حالت برخورد عمودی، با زاویه 45° و افقی در نظر گرفته شد. نتیجه تحلیل تنش برای برخوردهای فرض شده در سه حالت مذکور، نشان داد که در حالت برخورد عمودی مجتمع سوخت به کف استخر که بدترین حالت برخورد



11. Kim H.J, Yim J.S, Tahk Y.W, Oh J.Y, Kong E.H. Drop behaviors of a plate-type fuel assembly used in research reactor for a drop accident. *Progress in Nuclear Energy*. 2019;113:255-262.
12. Handbook A.S.M. ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. *ASM International*. 1992.
13. Boldyrev I.S, Shchurov I.A, Nikonov A.V. Numerical Simulation of the Aluminum 6061-T6 Cutting and the Effect of the Constitutive Material Model and Failure Criteria on Cutting Forces' Prediction. *Procedia Engineering*. 2016;150:866-870.
14. Sumesh C.S, Ramesh A. Numerical Modelling and Optimization of Dry Orthogonal Turning of Al6061-T6 Alloy. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2018;62(3):196-202.
15. Akram S, Jaffery S.H.I, Khan M, Fahad M, Mubashar A, Ali L. Numerical and Experimental Investigation of Johnson-Cook Material models for Aluminum (Al 6061-T6) Alloy Using Orthogonal Machining Approach. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(9):1-14.

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**

روستایی، بهاره، رک‌رک، بهروز، صفائی‌عرشی، سعیده. (۱۴۰۳)، ارزیابی ایمنی حادثه سقوط مجتمع سوخت در رآکتور تحقیقاتی تهران (۱). مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۸ (۲)، ۴۵-۵۳.
DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1552>
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1552.html

