کاهش خرابی ناشی از برخورد هواپیما به سازه‌های محافظ بتنی

امیرحسین بولوری کاشانی (کارشناس ارشد)

حسن استادحسین* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه کاشان

مهندسی عمران شهریه، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۴/۲، ص. ۳۷-۶۱

برخورد هواپیما به سازه‌های محافظ بتنی نیروگاه‌های هسته‌ای از جمله رویدادهایی است که می‌تواند پیامدهای زیست محیطی ناگواری به همراه داشته باشد. بارگذاری دینامیکی ناشی از برخورد انواع هواپیماها به صورت منحنی‌های فشار - زمان برای کاربردهای طراحی در مراجع مربوط از جمله استانداردهای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ذکر شده است. اندرکنش پرتابه و پوسته‌ی محافظ بتنی و حالت‌های خرابی مربوط هنوز موضوع بسیاری از مطالعات است. در این مقاله پدیده‌ی برخورد هواپیما به پوسته‌ی محافظ بتنی، با مدل‌سازی غیرخطی با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری بتن و فولاد متناسب با بارگذاری سریع و با در نظر گرفتن زوال مصالح در کرنش‌های زیاد به منظور مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر پدیده‌های نفوذ و قله‌کنی با نرم‌افزار ANSYS AUTODYN مطالعه شده است. در این پژوهش اثر ضخامت پوسته و میزان میلگرد خمشی بر مودهای گسیختگی بررسی شده است و پیشنهاد برای انتخاب ضخامت بهینه برای کنترل خرابی در پوسته‌ی محافظ ارائه شده است.

واژگان کلیدی: برخورد هواپیما، سازه‌ی محافظ بتنی، الگوی خرابی، تحلیل غیرخطی اجزای محدود با ANSYS AUTODYN، روابط رفتاری RHT برای بتن.

amirhossein.boluri@grad.kashanu.ac.ir
hostad@kashanu.ac.ir

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی تحقیقات

از اواسط قرن ۲۰ انرژی هسته‌ای به یکی از ارکان مهم توسعه برای تولید انرژی و کاهش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی در سراسر جهان تبدیل شده است و با گسترش امکانات هسته‌ای نگرانی در مورد خطرات و حوادث پیش‌بینی نشده برای نیروگاه‌های هسته‌ای ایجاد شده است؛ به این دلیل باید از سازه‌های بتنی مهم شامل ساختمان‌های در برگیرنده‌ی راکتور^۱، پوشش سازه‌های نیروگاهی و سازه‌های کنترل در برابر خطراتی از جمله آتش، فشار، اثرات دمای و برخورد هواپیما حفاظت به عمل آید.^[۱] بررسی اثرات ناشی از برخورد پرتابه و محاسبه‌ی میزان نفوذ، از جمله موضوعاتی است که مورد توجه مهندسان و محققان قرار دارد و در این زمینه تحقیقات زیادی انجام گرفته است. برای حفظ ایمنی یک نیروگاه هسته‌ای تهدیدها و پیامدهای مختلفی لحاظ می‌شود که تمام آنها در آیین‌نامه‌های خاص به صورت ضوابط جمع‌آوری شده است. از جمله‌ی این تهدیدات لحاظ کردن اثرات برخورد پرتابه با سازه‌ی نیروگاه است. اهمیت این موضوع به حدی زیاد است که به طور کلی در روند جانمایی موقعیت یک نیروگاه ضوابط رعایت حداقل فاصله از مسیرهای هوایی الزامی است و همچنین سازه‌ی نیروگاه برای برخورد پرتابه‌ی استاندارد طراحی می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۸/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۲/۵، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2020.54430.2646

در اثر برخورد پرتابه‌ها، خرابی‌های موضعی نظیر نفوذ^۲، پوسته‌پوسته شدن^۳، ترک‌خوردگی^۴ در سازه‌ی بتنی ممکن است اتفاق بیافتد. این خرابی‌ها اگرچه کلیت سازه‌ی بتنی هدف را تهدید نمی‌کند، اما اثرات موضعی‌شان می‌تواند منجر به آسیب دیدن اجزای سازه‌ی یا تجهیزات ایمنی شود.

در سال ۱۹۶۸ میلادی، نخستین مقاله در زمینه‌ی برخورد هواپیما با سازه‌ی نیروگاه هسته‌ای، توسط ریرا^۵ منتشر شد. وی پاسخ سازه را محاسبه کرد و به جای نیروی هواپیما از تابع نیرو - زمان، که در همان سال توسط هالی^۶ به دست آمده بود، استفاده کرد. روابط تحلیلی ریرا برای به دست آوردن تابع نیرو - زمان در اثر برخورد عمودی هواپیما در مقابل یک سطح سخت و مقاوم بر اساس جرم، توزیع سختی و بارکمانشی است. او برای برخورد عمودی به سازه‌ی صلب، فرض کرد که هواپیما فقط در مقاطع جلویی خرد می‌شود و همچنین این بارکمانشی از شتاب جرم باقی‌مانده می‌کاهد و باعث می‌شود که قسمت خرد نشده، رفتار صلب داشته باشد.^[۲]

در سال ۱۹۷۰ بانگ^۷ و گودفری^۸ مطالعه‌ی ریرا را گسترش دادند و اثر برخورد بر روی دال بتنی را با شرایط مرزی غیرساده مطالعه کردند. آنها همچنین تحلیل اجزای محدودی برای دال‌ها با در نظر گرفتن خمش انجام دادند و رفتار بتن را کشسانی نامیرا در نظر گرفتند.^[۳] در سال ۱۹۷۵ شارپ^۹ و در سال ۱۹۷۶ شالک^{۱۰} نشان دادند که برخورد هواپیما، شتاب‌های بالایی تولید می‌کند و نمودار پاسخی را

ارائه دادند که مقدار شتاب بالای تجزیه شده توسط تجهیزات مربوط در مقایسه با شتاب زلزله در محدوده‌ی بسامد بالا، بیشتر است.^[۴] در سال ۱۹۷۷ دریترا^[۵] و همکاران، تحلیل الاستوپلاستیک هواپیما با احتمال جدا شدن قطعات را انجام داد، همچنین وی نیروهای برخورد در مقابل زمان را برای سرعت‌های اولیه‌ی مختلف از پرتابه به دست آورد. آنها به این نتیجه رسیدند که تفاوت میزان بیشینه تابع بارگذاری در شرایطی که سازه‌ی هدف شکل‌پذیر باشد یا صلب در نظر گرفته شود، بیش از ۱۰٪ نیست؛ بنابراین تابع بارگذاری حساسیت زیادی به شکل‌پذیری سازه‌ی هدف ندارد. در بعضی حالات شکل‌پذیر لحاظ کردن سازه‌ی هدف بر حسب افزایش تغییرمکان در زمان بیشینه بارگذاری می‌شود.^[۵] در همان سال هورنیک^[۶] توانست رابطه‌ی ریرا را بر اساس انرژی و فرض بر رفتار صلب - پلاستیک پرتابه، توسعه دهد.^[۶] همچنین در همان سال ولف^[۷]، بوچر^[۸] و اسکریکورد^[۹] برای برخورد هواپیما از مدل جرم متمرکز الاستوپلاستیک برای بدنه‌ی هواپیما استفاده کردند. آنها دریافتند که برای یک مدل اجزای محدود، کافی است تأثیر بردار بار را بر ماتریس سختی، ماتریس میرایی و ماتریس جرم در پاسخ به دست بیاورند. آنها به این نتیجه هم رسیدند که میرایی سبب می‌شود که پاسخ با افزایش فاصله از نقطه‌ی برخورد کاهش یابد. همچنین به دلیل کوچک بودن ناحیه‌ی برخورد، حالت‌های با بسامد بالا تحریک می‌شوند.^[۷] در سال ۱۹۹۳، آزمایش تمام مقیاس برخورد هواپیما فانتوم F-۴ توسط سوگانو و همکارانش^[۱۰] به منظور ارزیابی پاسخ برخورد صورت گرفت. آنها از نتایج آزمایش دریافتند که روش ریرا با کمی اصلاح، منطبق بر پاسخ دقیق است. آنها بر اساس آزمایش صورت گرفته مساحت برخورد برای هواپیما فانتوم F-۴ را برابر ۱۰ متر مربع پیشنهاد دادند^[۸]، در حالی که در استاندارد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی مساحت مؤثر برخورد برای این رویداد ۷ مترمربع تعیین شده است.^[۹] در سال ۱۹۹۶ حسین عباس و همکارانش^[۱۱] نیروی ناشی از برخورد سه هواپیمای جت جنگنده‌ی فانتوم F-۴D، بوئینگ ۷۰۷ و جت جنگنده‌ی FB-۱۱۱ را بر اساس بقای جرم، انرژی، تکانه و مود اصلی شکست هم به صورت عمودی و هم به صورت زاویه‌دار با سازه‌ی NPP، بررسی و محاسبه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که بتن با کرنش ترک‌خوردگی بالا به دلیل کاهش خرابی ناشی از ترک‌خوردگی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای استفاده باشد. همچنین برخورد افقی در نزدیکی اتصال گنبد به دیواره‌ی سازه‌های NPP استوانه‌ای با گنبد نیم‌کره را بحرانی‌ترین مکان برای برخورد برشمردند. آنها بیان کردند که اگر ضخامت گنبد از دیواره کمتر باشد، برخورد در نزدیکی محل اتصال یا نقطه‌ی در یک‌چهارم گنبد می‌تواند بحرانی باشد. از دیگر نتایج این بررسی می‌توان به بالا بودن قابلیت خرابی هواپیمای جنگنده‌ی فانتوم F-۴D در مقایسه با دو هواپیمای دیگر اشاره کرد.^[۱۰] در سال ۲۰۰۴ کاتایاما و همکاران^[۱۲] با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN اثر برخورد هواپیمای F-۴ را با دیواره‌ی بتن مسلح شبیه‌سازی کردند. آنها نتایج شبیه‌سازی عددی خود را با آزمایش برخورد تمام مقیاس آزمایشگاه ملی ساندا^[۱۳] مقایسه کردند و به مطلوب بودن نتایج شبیه‌سازی و پاسخ دینامیکی دیواره با آزمایش انجام شده در نیروی برخورد، خسارت وارد شده به دیوار و رفتار خرد شدن هواپیما رسیدند.^[۱۱]

در سال ۲۰۰۵، بررسی‌های کاکس و همکاران^[۱۴] در انتخاب مدل خرابی برای بتن مسلح تحت بارهای ضربه‌ی منتشر شد. در گزارش دوم آنها در سال ۲۰۰۶ با کار بر روی فرضیه و روش ریرا و مشاهدات تجربی به دست آمده از مدل‌های خرابی بتن تحت برخورد هواپیما، در نهایت به محافظه‌کارانه بودن روش ریرا برای محاسبه‌ی بارهای وارد شده در اثر برخورد هواپیما رسیدند.^[۱۲] در سال ۲۰۱۱ سیفوری و لیاقت، یک مدل نیمه‌تحلیلی برای محاسبه‌ی عمق نفوذ پرتابه

در هدف بتنی با حفظ انرژی ارائه کردند.^[۱۳] در مقاله‌ی که سال ۲۰۱۴ توسط مرادلو و همکاران ارائه شد، روابط تجربی و تحلیلی معتبر که برای محاسبه‌ی عمق نفوذ به همراه روش شبیه‌سازی عددی به وسیله‌ی نتایج تعدادی از آزمایش‌های تجربی بررسی و مقایسه شد.^[۱۴] در سال ۲۰۱۶، هیروساکا و همکارانش با مدل‌سازی برخورد هواپیمای F-۴ با سرعت‌ها و جرم‌های متفاوت به چند دال بتنی با ضخامت‌های متغیر، میزان نفوذ و نیز اثرات محلی آن را با نتایج آزمایشگاه ملی ساندا بررسی و مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که یکی از دلایل تفاوت در سرعت پسماند، عدم در نظر گرفتن سرعت رها شدن بتن در مدل بوده است و نیز به نتایج مشابهی با آزمایش تمام‌مقیاس انجام شده دست یافتند. همچنین با مدل کردن برخورد موتور هواپیما با چند دال به این مهم رسیدند که افزایش ضخامت دال، کاهش میزان نفوذ و اثر خرابی در جلو و عقب دال‌ها را به دنبال دارد.^[۱۵]

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی^[۱۶] توصیه می‌کند که اگر احتمال وقوع سانحه‌ی هوایی به مساحت ۱ هکتار در حدود 10^{-6} در سال باشد، اثر برخورد هواپیما در نیروگاه‌های هسته‌ی در نظر گرفته شود. در نتیجه یک تابع نیرو - زمان ایده‌آل برای نوع خاصی از هواپیما به عنوان نماینده برای برخورد در زمینه‌ی طراحی در کشورهای مختلف انتخاب می‌شود.^[۱۶]

روش تاریخی‌ی زمانی در عین سادگی به دلیل آن‌که استفاده از تابع نیرو - زمان، همه‌ی پدیده‌های فیزیکی را شامل نمی‌شود به عنوان روش اصلی در این مقاله استفاده نمی‌شود. برای بررسی دقیق‌تر پدیده‌های فیزیکی ایجاد شده، لازم است از رویکرد برخورد مستقیم پرتابه به هدف بتنی با روش‌های عددی استفاده شود. برخورد هواپیما، یک برخورد بسیار نرم و شکل‌پذیر تلقی می‌شود. با توجه به این موضوع، انرژی برخورد وابسته به نحوه‌ی توزیع جرم هواپیما و سرعت برخورد است. در برخورد نرم، پرتابه به کلی تخریب می‌شود و تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های هدف در قیاس با پرتابه کوچک است.

کاربرد و ابهامات موجود در پدیده‌ی برخورد پرتابه به هدف بتنی تا حدی زیاد است که موضوع تحقیقات جدید را نیز به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۹ کو و همکاران^[۱۷] اثر برخورد دو هواپیمای ایرباس A۳۲۰ و A۳۸۰ را بر سازه‌ی نیروگاه هسته‌ی بررسی و مقایسه کرده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند مرجع مناسبی برای ارزیابی ایمنی تجهیزات داخلی نیروگاه هسته‌ی در برابر اصابت باشد.^[۱۷] همچنین اثر تخریب موضعی دال‌های بتنی در برابر برخورد پرتابه‌ی اعطاف‌پذیر در سال ۲۰۱۹، توسط ژو و همکاران^[۱۸] بررسی شده است. در این تحقیق اثر سرعت پرتابه بر مود خرابی هدف بررسی شده است.^[۱۸]

در این نوشتار، بعد از توصیف انواع تخریب‌ها در اثر برخورد و معرفی مدل‌های رفتاری بتن، فولاد، هواپیما و در نهایت موتور به شبیه‌سازی برخورد انجام شده پرداخته می‌شود و تأثیر پارامترهایی نظیر فرسایش، اندازه‌ی شبکه، میزان ضخامت هدف بتنی، میزان میلگرد خمشی و محل برخورد هواپیما به سازه‌ی هدف بر عمق نفوذ بررسی شده است. همچنین توزیع خسارت در هدف بتنی و عوامل دیگر آن همچون نفوذ، سوراخ‌شدگی، پوسته‌شدگی و قله‌کنی ارائه شده است. در این مقاله با شبیه‌سازی پدیده‌ی برخورد و مقایسه‌ی نتایج با نتایج حاصل از بارگذاری پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌ها، ثابت شد که روش مورد استفاده قابلیت مدل‌سازی برخورد با دقت مناسب، امکان پیش‌بینی الگوی خرابی، میزان نفوذ و سرعت پرتابه‌ی عبور کرده از مانع را دارد. همچنین مشخص شد که میزان نفوذ در مدل‌سازی تمام‌مقیاس، تابع ضخامت سازه‌ی بتنی و محل برخورد هواپیماست و همچنین افزایش میلگرد خمشی تأثیر چندانی در کاهش عمق نفوذ ندارد.

۲. انواع تخریب در اثر برخورد هواپیما به سازه‌ی نیروگاهی

برخورد هواپیما به پوشش بتنی محافظ نیروگاه می‌تواند باعث ایجاد دو نوع متمایز از تخریب شود:

۱. تخریب موضعی^{۲۴}: اگر این تخریب در هنگام برخورد ایجاد شود، اثراتی همچون نفوذ پرتابه به هدف بتنی، ترک‌خوردگی مخروطی شکل، پوسته‌شدگی، قلوه‌کنی سطح تماس هواپیما با هدف و نفوذ کامل هواپیما را در هدف به دنبال خواهد داشت و منجر به آسیب دیدن اجزای سازه‌ی یا تجهیزات ایمنی ناشی از پرتابه‌های اولیه و ثانویه می‌شود. اثر ثانویه آن پوسته‌پوسته شدن بتن از سطح داخلی سازه است. به منظور مقاومت و جلوگیری از آسیب‌های بیش از حد تخریب موضعی، تغییر در ضخامت دیواره و استفاده از مصالح با مقاومت بالاتر باید در نظر گرفته شوند (شکل‌های ۱ و ۲).

۲. تخریب کلی^{۲۵}: تغییر شکل، جابه‌جایی، خرابی و فروپاشی قسمت‌های بزرگی از پوشش دیواره‌ی بتنی، طبقات و اعضای باربر را می‌توان از آسیب‌های عمده‌ی این تخریب برشمرد. این تخریب ناشی از انرژی وارده در اثر برخورد هواپیما به یک هدف بتنی است که وابسته به ویژگی‌های دینامیکی هدف و هواپیماست.^[۹] در سال ۱۹۷۶ کندی^{۲۶}، هنگام توصیف اثرات موضعی به هفت پدیده که در اثر برخورد پرتابه روی اهداف بتنی ایجاد می‌شود، اشاره کرد.^[۱۹] از مهم‌ترین اثرات موضعی که برای ارزیابی نوع خرابی در نتایج این مقاله نیز استفاده می‌شود، می‌توان به چهار مورد زیر اشاره کرد:

شکل ۱. اثر برخورد ترکش‌ها به سازه محافظ بتنی در حال ساخت.

شکل ۲. نفوذ پرتابه در سازه محافظ بتنی.

۱. نفوذ^{۲۷}: وارد شدن پرتابه به داخل هدف (طول وارد شده‌ی پرتابه در سازه‌ی هدف را عمق نفوذ^{۲۸} می‌نامند (شکل ۳ - الف)).
۲. قلوه‌کنی^{۲۹}: جدا شدن مصالح سازه‌ی هدف در وجه روبه روی برخورد (شکل ۳ - ب).
۳. پوسته‌شدگی^{۳۰}: جدا شدن و خروج قسمت‌هایی از مصالح هدف در وجه پشت به برخورد (شکل ۳ - ج).
۴. سوراخ‌شدگی^{۳۱}: عبور کامل پرتابه از هدف با سرعت پسماند یا بدون آن (شکل ۳ - د).

۳. مدل‌های مصالح به کار رفته

در این بخش مدل رفتاری مصالحی که برای مدل‌سازی قسمت‌های مختلف استفاده شده است، بیان می‌شود.

الف) مدل رفتاری بتن: با داشتن عملکرد بالا و فوق‌العاده در برابر ضربه و انفجار، می‌توان از بتن به عنوان ماده‌ی مقاوم برای ساخت این‌گونه سازه‌ها نام برد.^[۲۰] برخورد هواپیما دو تأثیر اساسی بر رفتار بتن دارد. نخست این‌که فشار هیدرواستاتیک نسبت به مقاومت فشاری بتن در محل برخورد با هدف بتنی به چندین برابر خود می‌رسد و بتن در این شرایط رفتار کاملاً غیرخطی از خود نشان می‌دهد. دوم این‌که، سرعت وارد شدن بار بسیار بالاست و این موضوع باعث می‌شود که بتن یک رفتار دینامیکی پیدا کند.^[۲۱] وقتی هواپیما به هدف برخورد می‌کند، بتن شکسته می‌شود و ترک برمی‌دارد و کل هدف نیز دچار لرزش‌های شدید می‌شود و فشار جانبی نیز افزایش می‌یابد. در نوک هواپیما، بتن در معرض تنش‌های دورگیر بزرگی قرار می‌گیرد و در نتیجه با نشان دادن رفتار کاملاً خمیری، باعث استهلاک بخش زیادی از انرژی می‌شود. علاوه بر این، استفاده از میلگردها نیز از آن‌جا که باعث تقویت اثر دورگیری می‌شود، جذب انرژی را افزایش می‌دهد.^[۲۲]

در سال‌های اخیر مدل‌های پیچیده‌ی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن تحت بارهای دینامیکی ارائه شده است که می‌توان از این میان به مدل‌های RHT^[۲۳-۲۵] K&C،^[۲۶] و^[۲۷] مدل اصلاح شده‌ی دراگر - پراگر^[۲۸]، HJC^[۲۹] و GR^[۳۰] اشاره کرد. در سال ۱۹۹۳ میلادی هولمکوئیست و جانسون مدل خسارت ترد را برای بتن توسعه داد.^[۲۹] بر اساس این مدل، مدل RHT در

شکل ۳. اثرات برخورد پرتابه به هدف بتنی.^[۱۹]

جدول ۱. مشخصات معادله‌ی حالت P- α برای بتن ۵۰ مگاپاسکال. [۳۲، ۳۶-۳۸]

سرعت صوت متخلخل	چگالی متخلخل	چگالی مرجع	پارامتر
$2/92 (m/ms)$	$2/314 \times 10^9 (mg/m^3)$	$2/75 \times 10^9 (mg/m^3)$	مقدار
توان تراکم	فشار تراکم جامد	فشار تراکم اولیه	پارامتر
۳	$6 \times 10^9 (Pa)$	$2/33 \times 10^9 (Pa)$	مقدار
A_T	A_T	A_1	پارامتر
$9/04 \times 10^9 (Pa)$	$3/958 \times 10^{10} (Pa)$	$2 \times 10^{10} (Pa)$	مقدار
T_1	B_1	B_0	پارامتر
$3/527 \times 10^{10} (Pa)$	$1/22$	$1/22$	مقدار

جدول ۲. مشخصات مدل مقاومت و شکست RHT و فرسایش برای بتن ۵۰ مگاپاسکال. [۲۳، ۳۲، ۳۷ و ۳۹]

$\frac{f_t}{f_c}$	f_c	G	پارامتر
$0/1$	$5 \times 10^9 (Pa)$	$1/627 \times 10^{10} (Pa)$	مقدار
N	A	$\frac{f_s}{f_c}$	پارامتر
$0/61$	$1/6$	$0/18$	مقدار
$\frac{G_{elas}}{G_{elas-plas}}$	BQ	Q_T	پارامتر
۲	$0/105$	$0/6805$	مقدار
B	$\frac{Elastic Strength}{f_c}$	$\frac{Elastic Strength}{f_t}$	پارامتر
$0/7$	$0/53$	$0/7$	مقدار
δ	α	M	پارامتر
$0/36$	$0/26$	$0/8$	مقدار
ε_{fmin}	D_T	D_1	پارامتر
$0/1$	۱	$0/4$	مقدار
نوع کرنش هندسی	کرنش فرسایشی	G_{res}	پارامتر
Instantaneous	$0/1$	$0/13$	مقدار

سال ۱۹۹۹ و سپس در سال ۲۰۰۰، مدل GR توسعه یافت. در سال ۱۹۹۶ مدل پیچیده‌ی K&C توسط شرکتی به همین نام ارائه شد. در سال ۲۰۰۶ لاپان^{۳۷} مدل RHT را با استفاده از ضریب افزایش مقاومت دینامیکی متفاوت برای کشش و نرمی ترک‌های دوخطی توسعه داد.^[۳۱] مدل بتن به کار رفته برای شبیه‌سازی، مدل بتن RHT است. مدل RHT ابتدا توسط ریدل، توما و هایرمایر در سال ۱۹۹۹ میلادی در بنیاد علمی ارنست ماخ پیشنهاد و توسط ریدل در سال ۲۰۰۰ توسعه داده شد. این مدل، مدل خمیری پیشرفته‌ی است که برای شبیه‌سازی بتن تحت بارگذاری دینامیکی شدید بسیار کارآمد است و تمام ویژگی‌های مواد بتن تحت بار با نرخ کرنش بالا را شامل می‌شود. این مدل در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی در هیدروکدهای تجاری نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN در دسترس قرار گرفت و از سال ۲۰۰۰ به بعد به یک مدل استاندارد تبدیل شد.^[۳۲] مدل‌سازی بتن با مدل RHT سبب بهبود پارامترهایی همچون عمق نفوذ و سرعت خروجی پرتابه می‌شود.^[۳۳] مشخصات و ویژگی‌های رفتاری مدل مورد استفاده‌ی بتن توسط معادله‌ی حالت P-a، مدل مقاومت و مدل شکست RHT و نیز فرسایش کرنش هندسی معرفی می‌شوند (جدول ۱ و ۲). پارامترهای به کار رفته برای مدل بتن با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. در جدول ۱ پارامترهای P_{crush} ، فشار متناظر با گسیختگی کشسانی منافذ که برابر با یک سوم مقاومت فشاری بتن است، P_{lock} ، فشار متناظر با گسیختگی خمیری و n توان تراکم در تخلخل بتن است. ضرایب B_0 ، B_1 ، A_1 ، A_T و T_1 ثابت‌های عددی معادله‌ی حالت

هستند که توسط کاربر به نرم‌افزار داده می‌شوند. همچنین در جدول ۲، G مدول برشی، f_c مقاومت فشاری تک‌محوری بتن، $\frac{f_s}{f_c}$ و $\frac{f_t}{f_c}$ به ترتیب مقاومت کششی و برشی بتن، A و N به ترتیب ضریب ثابت و توان سطح شکست هستند که توسط کاربر تعریف می‌شوند و شکل منحنی را تعیین می‌کنند، Q_T بخشی از مقاومت در نصف‌النهار کششی نسبت به فشار سه‌محوری است و انتقال ناحیه‌ی ترد به شکل‌پذیر با افزایش فشار توسط ضریب خطی BQ انجام می‌شود. به پارامتر $\frac{G_{elas}}{G_{elas-plas}}$ نسبت مدول برشی کشسان به تفاضل مدول برشی خمیری از کشسان، شیب سخت‌شدگی گفته می‌شود. $\frac{Elastic Strength}{f_t}$ و $\frac{Elastic Strength}{f_c}$ نیز به ترتیب نسبت مقاومت کشسان به مقاومت کششی و فشاری است. پارامترهای B و M ثابت و توان مقاومت باقی‌مانده‌ی شکستگی در معادله‌ی سطح مقاومت باقی‌مانده‌ی نرمال شده است که هر دو ثابت‌های عددی هستند و توسط کاربر نرم‌افزار مقداردهی می‌شوند. ترکیب مقادیر مقاومت باقی‌مانده‌ی شکستگی و معیار فرسایش پیشینه، جذب انرژی بالاتری را نسبت به ترکیب مقادیر مقاومت باقی‌مانده‌ی شکستگی و معیار فرسایش کمینه خواهند داشت.^[۳۴] همچنین α و δ توان‌های نرخ کرنش به ترتیب برای فشار و کشش در ضریب افزایش مقاومت دینامیکی^{۳۸} است. در نهایت، ضرایب D_1 و D_T ثابت‌های خسارت مصالح هستند که برای اثر کرنش در شکست به کار می‌روند و توسط کاربر تعیین می‌شوند. ضریب D_1 حد پایین خسارت و D_T حد بالای آن هستند. انتخاب مقادیر مناسب برای این دو ضریب، تأثیر به سزایی در تعیین نرم‌شدگی مصالح منطبق بر واقعیت دارد.^[۳۵] ε_{fmin}

جدول ۳. مشخصات معادله‌ی حالت خطی برای مسلح‌کننده‌ها. [۳۲]

پارامتر	چگالی مرجع	مدول حجمی
مقدار	$7/85 \times 10^4 (mg/m^3)$	$1/67 \times 10^{11} (Pa)$

جدول ۴. مشخصات مدل مقاومت جانسون کوک و شکست کرنش پلاستیک و فرسایش برای مسلح‌کننده‌ها. [۴۱، ۴۳]

پارامتر	G	A	B
مقدار	$8/18 \times 10^{10} (Pa)$	$4/53 \times 10^8 (Pa)$	$5/1 \times 10^8 (Pa)$
پارامتر	n	c	m
مقدار	۰٫۲۶	۰٫۱۴	۱٫۰۳
پارامتر	کرنش پلاستیک	کرنش فرسایشی	نوع کرنش هندسی
مقدار	۰٫۲	۰٫۱	Instantaneous

G_{res} نیز به ترتیب کمینه‌ی کرنش شکست و مدول برشی باقی‌مانده پس از شکست هستند.

ب) مدل رفتاری مسلح‌کننده‌ها: در سازه‌های بتن مسلح، ضعف بتن در کشش به وسیله‌ی فولادگذاری جبران می‌شود. فولاد تا حد زیادی از گسترش ترک در سازه‌های بتنی جلوگیری می‌کند. میلگردهای مسلح‌کننده به صورت لایه‌های فولادی با ضخامت معادل مدل می‌شوند که هر لایه‌ی فولادی یک رفتار تک‌محوری الاستوپلاستیک کامل دارد و فقط نیروی محوری در امتداد میلگرد را می‌تواند تحمل کند. رفتار فولاد در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته می‌شود و برای گسیختگی فولاد معیار پیشینی کرنش در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌های جانسون کوک [۳۹]، پلاستیک جنبشی [۴۰]، پلاستیسیته‌ی چندخطی [۴۱] مدل‌های مورد استفاده برای تقویت فولاد به کار رفته در میلگردهاست. همچنین از مدل جانسون کوک می‌توان برای سایر فلزات مانند آلومینیوم که در ساخت هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهره برد. [۱]

برای مدل‌سازی مسلح‌کننده‌ها از مدل مقاومتی جانسون کوک و شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده می‌شود. مدل فون میسر [۴۲] که در برخی مطالعات برای پرتابه به کار می‌رود مدل ساده‌ی است در حالی که مدل جانسون کوک، مدل کاملی است که می‌تواند علاوه بر آثار نرخ کرنش، درجه‌ی حرارت را نیز در روند نفوذ پرتابه در بتن مدل کند. این مدل مقاومت برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی فلزات تحت بارگذاری شدید و اثر نرخ کرنش‌های بزرگ استفاده می‌شود. در این مدل تنش تسلیم وابسته به پارامترهای کرنش، نرخ کرنش و حرارت است. از دیگر مشخصات رفتاری مدل مورد استفاده مسلح‌کننده‌ها می‌توان به معادله‌ی حالت خطی و مدل فرسایش کرنش هندسی اشاره کرد. جداول ۳ و ۴ پارامترهای به کار رفته برای مدل مصالحی مسلح‌کننده‌ها را نشان می‌دهند. در جدول ۴ پارامترهای، B و c به ترتیب ثابت تنش تسلیم پایه در کرنش‌های پایین، ثابت و توان سخت‌شدگی و m توان نرم‌شدگی حرارتی در مدل جانسون کوک هستند.

ج) مدل رفتاری هواپیما: جنس بدنه‌ی هواپیما از آلومینیم AL۲۰۲۴-T۳۵۱ است. از مدل جانسون کوک برای مدل مقاومت بدنه استفاده شده است که برای تغییرشکل‌های با نرخ بالا و شبیه‌سازی‌های دینامیکی پویا مناسب است. جداول ۵ و ۶ پارامترهای به کار رفته برای مدل مصالحی هواپیما را نشان می‌دهد.

د) مدل رفتاری موتور هواپیما: برای مدل‌سازی موتور هواپیما از مدل مصالحی مقاومت جانسون کوک و معیار شکست کرنش پلاستیک استفاده شده است. جداول ۷ و ۸ پارامترهای به کار رفته برای مدل مصالحی موتور را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مشخصات معادله‌ی حالت خطی هواپیما. [۳۲]

پارامتر	چگالی مرجع	مدول حجمی
مقدار	$7/85 \times 10^4 (mg/m^3)$	$7/1976 \times 10^{10} (Pa)$

۴. مدل‌سازی

۴.۱. ابزار و روش تحلیل

برخورد پرتابه به سازه، بارهای قابل توجهی را در مدت زمان بسیار کوتاه بر سازه اعمال می‌کند. پس طراحی ایمن سازه‌ها برای مقابله‌ی مستقیم با پدیده‌ی انفجار و ضربه‌ی ناشی از آن بسیار پیچیده و در عین حال هزینه‌بر است و نیازمند شناخت دقیق این پدیده‌ها و اثرات آن بر سازه است. به طور حتم، کسب چنین اطلاعاتی جز با انجام یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه میسر نخواهد بود. حال با توجه به پیچیدگی‌های این‌گونه مسائل، استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی با قابلیت ویژه برای رسیدن به نتایج مطلوب نیاز است.

از بین نرم‌افزارهایی که توانایی مدل کردن مسائل برخورد را دارند، می‌توان به هیدروکد ANSYS AUTODYN اشاره کرد. هیدروکد [۴۳] به آن دسته از نرم‌افزارهایی گفته می‌شود که قابلیت حل مباحث دینامیکی با نرخ بسیار بالا را دارا هستند. این برنامه دارای مصالح کتابخانه‌ی است که بسیاری از مواد و معادله‌ی حالت، مدل مقاومتی و شکست را در بر دارد. نرم‌افزار AUTO-DYN در ابتدا با معرفی AUTODYN-۲D در سال ۱۹۸۶ توسط شرکت Century Dynamics برای مسائل دینامیک غیرخطی عرضه شد. در سال ۱۹۹۱، AUTODYN-۳D مشابه با AUTODYN-۲D معرفی شد. با فروش این شرکت به شرکت ANSYS نسخه‌های تکامل‌یافته‌ی نرم‌افزار به شکل یک مجموعه در محیط Workbench نرم‌افزار ANSYS ارائه می‌شود. این نرم‌افزار از قدرتمندترین هیدروکدهایی است که به صورت تخصصی برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی مانند انفجار و برخورد به کار می‌رود. از حل‌گر صریح اجزای محدود لاگرانژین استفاده می‌شود که حل‌گری سریع و مؤثر به هنگام بارگذاری ضربه‌ی و دارای تغییرشکل‌های بزرگ مناسب است. [۴۲] برای انجام این شبیه‌سازی از نرم‌افزارهای AUTOCAD، ANSYS APD2 و AUTODYN استفاده شده است.

پیچیدگی هندسی و رفتار ماده، شرایط مرزی و نیز بارگذاری‌های متنوع رسیدن به حل دقیق را با دشواری‌های فراوان رو به رو ساخته است. استفاده از حل‌های تقریبی با دقت قابل قبول که در زمان محدود به دست می‌آید، گشایشی عظیم در حل این مسائل به شمار می‌رود. روش اجزای محدود شامل دو دسته‌ی صریح [۴۴] و ضمنی [۴۵] است. در روش اجزای محدود صریح بر خلاف روش ضمنی حل معادلات غیرخطی بزرگ بدون تشکیل ماتریس سختی انجام می‌گیرد. سازوکار حل در این روش بر پایه‌ی بررسی جزء به جزء انجام می‌شود و نیازی به تشکیل ماتریس سختی کل نیست. بنابراین روش اجزای محدود صریح می‌تواند روشی کارآمد برای حل و انجام مدل‌سازی‌های بزرگ با هزاران درجه‌ی آزادی با استفاده از حافظه‌ی رایانه‌ی کمتری است. در این تحقیق از نرم‌افزار ANSYS AUTODYN به همراه روش اجزای محدود استفاده شده است.

۴.۲. نوع اجزا

در نرم‌افزار ANSYS APDL از اجزای SOLID۱۶۴ و SHELL۱۶۳ برای

جدول ۶. مشخصات مدل مقاومت جانسون کوک برای هواپیما. [۳۲]

پارامتر	G	A	B
مقدار	$2/76 \times 10^{10} (Pa)$	$2/65 \times 10^8 (Pa)$	$4/26 \times 10^8 (Pa)$
پارامتر	n	c	m
مقدار	۰٫۳۴	۰٫۱۵	۱

جدول ۹. مشخصات سازه‌ی هدف.

پارامتر	ارتفاع دیوار	ارتفاع گنبد	قطر
مقدار	۱۶٫۹۴ (m)	۱۱٫۶۳ (m)	۴۳٫۸ (m)
پارامتر	مقاومت فشاری بتن	مقاومت کششی بتن	ضخامت دیوار و گنبد
مقدار	۵۰ (MPa)	۵ (MPa)	۱٫۲ (m)
پارامتر	قطر و فاصله میلگرد		
مقدار	۵۷/۳۳@۳۰۴ ($\times 10^{-2} m$)		

تا موقعی که به شدت تغییر شکل دهند و مقاومت فشاری یا جرم آنها بر نتایج کلی تأثیر نگذارد. [۳۲]

اساساً از آن‌جا که فرسایش یک ابزار عددی برای جلوگیری از اعوجاج بزرگ ابعاد شبکه است، ضوابط باید بر اساس محدودیت‌های کرنش انتخاب شوند. معمولاً محدوده‌ی کرنش استاتیکی به صورتی افزایش می‌یابد که اثرات نرخ کرنش را شامل شود. پارامتر اندازه‌ی شبکه باید زمانی که معیار فرسایش بر اساس کرنش در ترکیب با روش اجزای محدود استفاده می‌شود، بررسی شود. معیار فرسایش راه‌حل عددی مناسب برای اجتناب از واگرایی و ناپایداری در هنگام استفاده از روش لاگرانژ است. [۴۶] در اجزای با انتگرال کاهش یافته ۵۰ احتمال وقوع ناپایداری ساعت شنی ۵۱ وجود دارد. برای انتگرال‌گیری در اجزای مذکور فقط از یک نقطه‌ی انتگرال‌گیری استفاده می‌شود. این اجزا در مسائل دینامیکی دچار حالت‌های تغییر شکل انرژی صفر می‌شوند که در نهایت تحلیل را دچار ناپایداری می‌کنند. برای جلوگیری از ناپایداری عددی در نرم‌افزار AUTODYN پارامتر ساعت شنی تعریف می‌شود که مقدار آن در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق برابر پیش‌فرض برنامه، عدد ۰٫۱، است.

۵. مشخصات کلی مدل

۱.۵. مشخصات سازه

مشخصات سازه‌ی هدف در جدول ۹ آورده شده است. در این بخش میزان میلگرد با توجه به سازه‌ی نمونه موجود در استاندارد ASCE ۵۸ با فرض اولیه‌ی میلگرد با قطر ۵۷/۳۳ میلی‌متر در فاصله‌ی ثابت ۳۰۴ میلی‌متر انتخاب شده است. [۴۷] مسلح‌کننده‌ها در دو لایه‌ی شبکه‌ی میلگرد با پوشش بتن ۱۰ سانتی‌متر به کار برده شده است. همچنین در شکل ۴ نمایی از مدل هندسی سازه‌ی هدف نشان داده شده است.

پس از مدل‌سازی سازه با مشخصات مندرج در جدول ۹، که نتایج آن در بخش‌های ۸، ۷ و ۹ از این مقاله ارائه شده است، در بخش ۱۰ از مقاله حساسیت‌سنجی نسبت به تأثیر ضخامت پوسته‌ی بتنی و میزان میلگرد بر نوع و مقدار خرابی مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۷. مشخصات معادله‌ی حالت خطی موتور هواپیما. [۳۲ و ۴۴]

پارامتر	چگالی مرجع	مدول حجمی
مقدار	$7/85 \times 10^9 (mg/m^3)$	$1/675 \times 10^{11} (Pa)$

جدول ۸. مشخصات مدل مقاومت جانسون کوک موتور هواپیما. [۳۲، ۴۱، ۴۲، ۴۴ و ۴۵]

پارامتر	G	A	B
مقدار	$7/73 \times 10^{10} (Pa)$	$3/491 \times 10^8 (Pa)$	$5/1 \times 10^8 (Pa)$
پارامتر	n	c	m
مقدار	۰٫۲۶	۰٫۱۴	۱٫۰۳
پارامتر	کرنش خمیری		
مقدار	۰٫۹		

مدل‌سازی سازه‌ی بتنی محافظ با مدل رفتاری RHT و از جزء LINK۱۶۰ برای مدل‌سازی مسلح‌کننده‌ها با مدل رفتاری جانسون کوک استفاده شده است. همچنین برای مدل کردن سازه‌ی هواپیما و موتور آن از اجزای پوسته‌ی SHELL ۱۶۳ با مدل رفتاری جانسون کوک بهره گرفته شده است. اجزای SOLID۱۶۴، SHELL۱۶۳ و LINK۱۶۰ به ترتیب با عنوان‌های VOLUME، SHELL و BEAM در نرم‌افزار AUTODYN شناخته می‌شوند.

برای مدل‌سازی سازه‌ی بتنی از اجزای مربعی شش وجهی ۴۶ هشت گرهی و برای مسلح‌کننده‌ها از اجزای تیر دو گرهی استفاده شده است. برای مدل کردن سازه‌ی هواپیما و موتور از جزء سه وجهی ۴۷ سه گرهی استفاده شده است.

۳.۴. پارامترهای فرسایش و پایداری سازه

پارامتری که تأثیر زیادی در روند نفوذ دارد فرسایش ۴۸ نام دارد. در مدل‌سازی‌های صریح، اجزا به شدت خرد می‌شوند و می‌توانند گام‌های زمانی بسیار کوچکی را ایجاد کنند که منجر به استفاده از چرخه‌های محاسباتی زیادی با پیشرفت ناچیز در زمان شبیه‌سازی شوند. علاوه بر این اجزای لاگرانژی که از شکل اولیه‌ی خود خارج شده‌اند موجب اعوجاج غیرواقعی در مش محاسباتی می‌شوند. تابع فرسایش اجزا ۴۹، یک راه حل عددی برای رفع این مشکلات را فراهم می‌کند. در شبکه‌ی مش بندی، تابع فرسایش با تفکیک فیزیکی اجزای فرسایش شده از بقیه‌ی اجزا مشخص می‌شود. تابع فرسایش به اجزای لاگرانژی در صورتی که به یک مقدار از پیش تعیین شده رسیده باشند، اجازه‌ی حذف از محاسبات را می‌دهد. هنگامی که یک جزء از محاسبات حذف می‌شود، جرم آن جزء در شبکه‌ی مش بندی شده می‌تواند به گره‌های گوشه منتقل شود یا در طول شبکه توزیع شود. [۴۶] فرسایش باعث از بین رفتن انرژی داخلی، مقاومت و (احتمالاً) جرم می‌شود، بنابراین، محدوده‌ی فرسایش باید به صورتی انتخاب شود که اجزا از بین نروند یا به عبارتی فرسایش کنند

شکل ۴. موتور GE-JV9 هواپیما به همراه مدل ساده‌سازی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر است). [۴۹ و ۴۸، ۴۴]

شکل ۵. طرح برخورد هواپیما به سازه‌ی هدف

۶. تأثیر پارامترهای فرسایش و اندازه‌ی شبکه

قلوه‌کشی و شکست در بتن در مسائل ضربه و نفوذ هنگامی اتفاق می‌افتد که تغییرشکل و کرنش از حد مشخصی تجاوز کند. برای لحاظ کردن پدیده‌های فوق در روش‌های عددی یکی از راه‌حل‌ها، تعریف مدل فرسایش است. با تعریف این معیار در مدل‌سازی نفوذ، اجزایی که دچار تغییرشکل‌های زیاد و بیش از حد گسیختگی مصالح شده‌اند، از روند محاسبات حذف می‌شوند و امکان نفوذ پرتابه در هدف فراهم می‌شود. علاوه بر این خطای محاسبات در اثر نافرمان شدن اجزا در روش اجزای محدود مبتنی بر دیدگاه لاگرانژی قابل کنترل است. در الگوریتم موجود در نرم‌افزار AUTODYN افزایش مقدار پارامتر فرسایش به این مفهوم است که اجزا می‌توانند کرنش‌های بزرگتری را تحمل کنند و سوراخ‌شدگی در مدل به تأخیر خواهد افتاد و در پی آن عمق نفوذ کاهش می‌یابد. با انجام مدل‌سازی و بررسی بازه‌ی پارامتر فرسایش از مقدار ۰/۱ تا ۳ می‌توان نتیجه گرفت که اگر میزان پارامتر فرسایش از عدد ۰/۱ کمتر شود، جواب به دست آمده قابل اتکا نیست و خلاف روند گفته شده است و از ضابطه‌ی فرسایش ۰/۱ به بعد، روند کاهش فرسوده شدن اجزا به یکدیگر نزدیک است و تقریباً به عدد یکسانی میل می‌کنند. پس عدد ۰/۱ میزان فرسایش مناسبی برای مدل‌سازی است و سایر مدل‌سازی‌های با این عدد انجام می‌شوند (جدول ۱۰).

شکل ۶. نمایی از مشخصات مدل سازه‌ی هدف.

شکل ۷. هندسه‌ی نهایی و شبکه‌بندی هواپیما به همراه موتور GE-JV9.

۲.۵. مشخصات هواپیما و موتور

هواپیمای مد نظر، فانتوم RF-۴E با سرعت ۲۱۵ متر بر ثانیه دارای مشخصات طول ۱۷/۷ متر، قطر بدنه‌ی ۲/۵ متر و وزن کل ۲۰ تن است. مدل بر اساس اطلاعات موجود در مقالات و نیز تصاویر هواپیما با در نظر گرفتن ساده‌سازی در هندسه ایجاد شده است. هندسه‌ی نهایی و شبکه‌بندی هواپیما با وزن ۱۷ تن و ضخامت کل بدنه ۱۴ میلی‌متر مطابق شکل ۵ است.

موتور واقعی هواپیما از سه قسمت کمپرسور، محفظه احتراق و توربین و نیز لوله‌ی خروجی دود ساخته شده است. به علاوه سه قاب در موتور وجود دارد که می‌توان جرم آنها را متمرکز لحاظ کرد. این سه قاب به نام‌های قاب جلویی کمپرسور، قاب پشتی کمپرسور و قاب توربین هستند. بخش‌های بین این سه قاب از اعضای نرم و سبک ساخته شده‌اند. صلبیت لوله‌ی خروجی دود نسبت به سایر قسمت‌ها ناچیز است. بر پایه‌ی این اطلاعات مدل ساده شده‌ی موتور شامل سه جرم متمرکز و دو پوسته‌ی استوانه‌یی است که در آن لوله‌ی خروج دود مدل‌سازی نشده است و جرم آن به جرم متمرکز انتهایی اضافه شده است. در شکل ۶ نمای اصلی موتور ۳ تنی GE-JV9 و همچنین مدل ساده‌سازی شده‌ی آن به همراه ابعاد و سایر مشخصات مدل ایده‌آل‌سازی شده نشان داده شده است. [۴۹ و ۴۸، ۴۴]

برخورد مستقیم هواپیما با سازه‌ی محافظ بتنی به صورت عمودی که بحرانی‌ترین حالت برخورد در نظر گرفته شده است، صورت می‌پذیرد. به دلیل طولانی بودن زمان انجام تحلیل، برخورد هواپیما تا زمان ۰/۱ ثانیه بررسی می‌شود. باید به این نکته اشاره کرد که در شبیه‌سازی انجام شده، اثرات ثانویه نظیر انفجار و آتش‌سوزی در نظر گرفته نشده است. شکل ۷ طرح برخورد را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. میزان تأثیر پارامتر فرسایش بر عمق نفوذ.

مدل	مقدار پارامتر فرسایش	عمق نفوذ نهایی (متر)	نوع پدیده خرابی موضعی در اثر برخورد	نفوذ	سوراخ شدگی	پوسته شدگی	قلوه کنی
۱	۰/۰۱	۰/۱۰	✓	✓	✓	✓	✓
۲	۰/۰۶	۰/۳۳	✓	✓	✓	×	✓
۳	۰/۱	۰/۴۵۶	✓	✓	✓	×	✓
۴	۰/۵	۰/۴۵	✓	✓	×	×	✓
۵	۱	۰/۴۴	✓	✓	×	×	✓
۶	۱/۵	۰/۴۴	✓	✓	×	×	✓
۷	۲	۰/۴۴	✓	✓	×	×	✓
۸	۲/۵	۰/۴۲	✓	✓	×	×	✓
۹	۳	۰/۴۲	✓	✓	×	×	✓

جدول ۱۱. میزان تأثیر ابعاد شبکه بر عمق نفوذ.

مدل	ابعاد اجزای شبکه (متر)	عمق نفوذ نهایی (متر)	نوع پدیده خرابی موضعی در اثر برخورد	نفوذ	سوراخ شدگی	پوسته شدگی	قلوه کنی
۱	۱/۵	۰/۰۴۳	✓	✓	×	×	×
۲	۱	۰/۰۵۳	✓	✓	×	×	×
۳	۰/۷	۰/۱۱	✓	✓	×	×	✓
۴	۰/۵	۰/۴۵۶	✓	✓	✓	×	✓
۵	۰/۴	۰/۵۳	✓	✓	✓	×	✓
۶	۰/۳	۰/۶۱	✓	✓	✓	✓	✓

۷. نحوه توزیع خسارت در هدف بتنی

برای درک بهتر از وضعیت برخورد، نفوذ و میزان تغییرات سرعت روی سطوح مسلح‌کننده‌ها و سازه‌ی بتنی سنجه‌های تعریف شده به صورت شکل ۸ مشخص شده است که سنجه‌ی شماره ۱ روی سطح مسلح‌کننده و در محل برخورد و شماره‌های ۲ تا ۱۹ روی سطح سازه‌ی بتنی با فاصله‌ی ۰/۲۵ متری از هم قرار گرفته‌اند.

الگوی خسارت ایجاد شده ناشی از برخورد هواپیما در بتن به صورت نواحی

شکل ۸. سنجه‌های روی سطح مدل.

کاهش عمق نفوذ با افزایش مقدار پارامتر فرسایش نتیجه‌ی بی است که در سایر مراجع نظیر مرجع شماره [۵۰] ذکر شده است.

واضح است که اندازه‌ی شبکه‌ی عددی بر نتایج تحلیل‌ها تأثیرگذار است و کوچک کردن اندازه‌ی این شبکه‌بندی به صورت قابل توجهی زمان انجام تحلیل را افزایش می‌دهد. با افزایش تعداد اجزای رفتار اجزای محدود مدل بهبود پیدا می‌کند. هر چه اندازه‌ی شبکه کوچک‌تر می‌شود، عمق نفوذ افزایش می‌یابد و باعث بهبود پاسخ‌ها می‌شود؛ اما کوچک شدن بیش از حد اجزا باعث افزایش شدید زمان تحلیل می‌شود. با انجام مدل‌سازی و بررسی بازه‌ی اندازه‌ی شبکه از مقدار ۱/۵ تا ۰/۳ می‌توان نتیجه گرفت که از اندازه‌ی شبکه ۰/۵ به بعد زمان تحلیل به شدت افزایش می‌یابد و با ریزتر کردن آن تغییرات مشهودی در نتایج حاصل نمی‌شود. پس در ادامه برای انجام تحلیل‌ها از اندازه‌ی شبکه‌ی ۰/۵ استفاده می‌شود (جدول ۱۱).

همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود در تمام مدل‌ها، نفوذ و قلوه‌کنی رخ داده است و از مدل شماره ۴ به بعد عدم سوراخ‌شدگی هدف، کاهش میزان نفوذ را به دنبال دارد.

با توجه به جدول ۱۱، هر چه اندازه‌ی اجزای شبکه ریزتر می‌شود، پدیده‌های خرابی موضعی در هدف بتنی نمایان‌تر می‌شود، به صورتی که در مدل شماره ۶ هر چهار پدیده‌ی خرابی رخ داده است. پدیده‌ی قلوه‌کنی از مدل شماره ۳ و سوراخ‌شدگی از مدل شماره ۴ به بعد در هدف ایجاد شده است که ادامه داشتن این روند، افزایش عمق نفوذ را در پی دارد.

شکل ۱۱. نمایش الگوی خسارت ایجاد شده در هدف بتنی با رویکرد تاریخی زمانی ریرا.

شکل ۹. نمایش الگوی خسارت ایجاد شده در هدف بتنی در اثر برخورد مستقیم هواپیما.

در اثر برخورد خرد شده و بخش‌های کمی از آن که غالباً انتهای هواپیماست، باقی می‌ماند. یک دنباله از تصاویر گرفته شده توسط دوربین‌های با سرعت بالا در آزمایش انجام گرفته، نشان می‌دهد که بال‌های هواپیما در اثر برخورد توسط دیواره‌ی بتنی هدف قطع می‌شوند.^[۱۱]

تنش‌های کششی و فشاری بیشینه و کمینه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند، با توجه به تغییر شکل‌های پوسته‌ی بتنی در سطوح جلو و پشت برخورد اتفاق می‌افتد. بازه‌ی اعداد منفی در فشار و اعداد مثبت در کشش قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هنگام برخورد در وجه جلوی سازه‌ی محافظ که در معرض برخورد است، تنش اصلی در جهت ۱۱ (مماسی) فشاری است و در نواحی اطراف آن میدان تنش اصلی در همین جهت به صورت کششی است. در ناحیه‌ی مذکور، تنش اصلی در جهت ۲۲ (محور قائم) فشاری است و در نواحی اطراف آن میدان تنش اصلی در همین جهت به صورت کششی است. در وجه پشت برخورد نیز عکس این مطلب رخ می‌دهد.

منحنی سرعت - زمان روی بتن، از دیگر نتایج شبیه‌سازی است. با انتگرال گرفتن از متغیر سرعت در راستای z این نمودار، منحنی عمق نفوذ به دست می‌آید. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ منحنی سرعت - زمان و نیز نمودار میزان نفوذ را در نقطه‌ی برخورد نشان می‌دهند که از خواندن سنج‌های مد نظر روی بتن به دست آمده است. بر طبق این نمودار بیشینه‌ی میزان نفوذ هواپیما در اثر برخورد ۰/۴۵۶ متر است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که نفوذ پس از حدود ۸۰ میلی‌ثانیه متوقف شده است.

۹. تحلیل حساسیت میزان نفوذ نسبت به متغیرها

در این بخش با تغییر پارامترهای مؤثر در میزان نفوذ و الگوی خرابی، مقدار تأثیر تغییر هر پارامتر به صورت کمی بررسی شده است. سه متغیر مورد مطالعه عبارت‌اند از ضخامت پوسته‌ی بتنی، میزان میلگرد خمشی و موقعیت برخورد که در ادامه بیان شده است.

۹.۱. تأثیر ضخامت بتن

تغییرات عمق نفوذ در اثر برخورد هواپیما با سازه‌ی بتنی محافظ با اندازه‌ی شبکه

شکل ۱۰. تابع نیرو - زمان هواپیمای فانتوم RF-۴E.^[۹]

هم‌مرکز به مرکزیت نقطه‌ی برخورد در سطح هدف است و میزان خسارت به فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از محل برخورد بستگی دارد. به طور کلی اجزای نزدیک به مرکز اصابت دچار تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بسیار زیادی می‌شوند و با دور شدن از این نقطه، این تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابند. نکته‌ی حائز اهمیت این است که مساحت ناحیه‌ی خسارت به دست آمده از مدل‌سازی با روش برخورد مستقیم، در لحظه‌ی ۱۰۰ میلی‌ثانیه که اثرات اصابت بر خرابی تثبیت شده است، ۳۳/۲ متر مربع است (شکل ۹).

همچنین این سازه در معرض تاریخی زمانی نیروی ریرا با در نظر گرفتن تابع نیرو - زمان هواپیمای فانتوم RF-۴E نیز قرار داده شده است. در استاندارد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، تابع نیرو - زمان مأخوذ از برخورد هواپیمای نظامی RF-۴E با سرعت برخورد ۲۱۵ متر بر ثانیه به صورت شکل ۱۰ آورده شده است. تابع نیرو - زمان طیف گسترده‌ی از هواپیماهای نظامی و تجاری را پوشش می‌دهد.^[۹]

مساحت ناحیه‌ی خسارت به دست آمده از مدل‌سازی با رویکرد تاریخی زمانی ریرا ۲۸/۳ متر مربع است. توزیع خسارت نشان می‌دهد که نتایج هر دو روش تطابق مناسبی دارند (شکل ۱۱).

۸. ارزیابی پاسخ سازه

طبق نتایج مدل‌سازی‌های و آزمایش‌های صورت گرفته، بیشتر قسمت‌های هواپیما

شکل ۱۲. توزیع تنش اصلی (Pa).

جدول ۱۲. میزان تأثیر تغییر ضخامت بتن بر عمق نفوذ.

ضخامت بتن (متر)	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل	ضخامت بتن (متر)	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل
۱/۲	۰/۴۵۶	۳	۱/۸	۰/۲۵	۱
۱/۵	۰/۵۲	۴	۲	۰/۲۱	۲

می‌کند، پیشنهاد می‌شود. تفاوت ضخامت ۱/۲ متر با ضخامت‌های ۱/۸ و ۲ متر برای ارزیابی اثرات ثانویه در نواحی جلو و پشت سازه‌ی بتنی در این است که به هنگام برخورد هواپیما سوراخ‌شدگی بتن را به همراه دارد، در حالی که ضخامت‌های دیگر این پدیده را شامل نمی‌شوند و همچنین در همه‌ی ضخامت‌ها پدیده‌ی نفوذ و قله‌کشی رخ داده است.

۵/۰ و پارامتر فرسایش ۱/۸، ۱/۵، ۲ متر در جدول ۱۲ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۱۲ و نیز شکل ۱۵، هر چه به ضخامت بتن افزوده می‌شود، عمق نفوذ حاصل از برخورد کاهش می‌یابد. ضخامت بتن ۱/۵ متر به عنوان ضخامت بهینه و ایمن که از نفوذ و ایجاد ترکش‌های ثانویه جلوگیری

جدول ۱۳. میزان تأثیر میلگرد خمشی بر عمق نفوذ برای هدف با ضخامت ۱٫۲ متر.

مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)
۱	۰٫۰۰۲۷	۰٫۴۷	۶	۰٫۱۹۱	۰٫۴۵۳
۲	۰٫۰۰۵۴	۰٫۴۶۵	۷	۰٫۲۴۶	۰٫۴۴۸
۳	۰٫۰۰۷۰	۰٫۴۵۶	۸	۰٫۳۲۸	۰٫۴۴۱
۴	۰٫۰۰۸۲	۰٫۴۵۷	۹	۰٫۳۵۶	۰٫۴۳۹
۵	۰٫۱۳۷	۰٫۴۵۴			

جدول ۱۴. میزان تأثیر میلگرد خمشی بر عمق نفوذ برای هدف با ضخامت ۱٫۸ متر.

مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)
۱	۰٫۰۰۱۸	۰٫۲۵۹	۶	۰٫۱۲۸	۰٫۲۵۴
۲	۰٫۰۰۳۶	۰٫۲۵۸	۷	۰٫۱۶۴	۰٫۲۵۴
۳	۰٫۰۰۴۷	۰٫۲۵۵	۸	۰٫۲۱۹	۰٫۲۵۳
۴	۰٫۰۰۵۴	۰٫۲۵۵	۹	۰٫۲۳۷	۰٫۲۵۳
۵	۰٫۰۰۹۱	۰٫۲۵۴			

جدول ۱۵. میزان تأثیر میلگرد خمشی بر عمق نفوذ برای هدف با ضخامت ۲ متر.

مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل	میزان میلگرد ($\rho = \rho'$)	عمق نفوذ نهایی (متر)
۱	۰٫۰۰۱۶	۰٫۲۱۳	۶	۰٫۱۱۵	۰٫۲۱۱
۲	۰٫۰۰۳۲	۰٫۲۱۲	۷	۰٫۱۴۸	۰٫۲۱۰
۳	۰٫۰۰۴۲	۰٫۲۱۲	۸	۰٫۱۹۷	۰٫۲۱۰
۴	۰٫۰۰۴۹	۰٫۲۱۲	۹	۰٫۲۱۳	۰٫۲۰۶
۵	۰٫۰۰۸۲	۰٫۲۱۱			

۲.۹. تأثیر میزان میلگرد خمشی

در این بخش پس از تعیین کمینه و بیشینه میلگرد خمشی مقطع بر اساس ضوابط طراحی خمشی و تغییر میزان میلگرد بین دو مقدار حدی مذکور و انجام تحلیل‌های متعدد، میزان حساسیت نفوذ به مقدار پارامتر مورد نظر به صورت کمی در جداول ۱۳ تا ۱۵ ذکر شده است. از جداول و شکل ۱۶ استنباط می‌شود که برای کاهش عمق نفوذ، افزایش میزان میلگرد خمشی در کاهش نفوذ در هر سه ضخامت سازه‌ی بتنی هدف تأثیر کمی دارد؛ زیرا سرعت زیاد بارگذاری اجازه‌ی ایجاد تغییر شکل خمشی و فعال شدن میلگردهای خمشی را نمی‌دهد، بلکه مود خرابی بیشتر تابع گسیختگی از نوع سوراخ‌شدگی است. به همین دلیل میلگرد خمشی تأثیر چندانی در کنترل عمق نفوذ نداشته است.

تفاوت هدف با ضخامت بتن ۱٫۲ متر با دو ضخامت دیگر برای ارزیابی نوع

شکل ۱۵. منحنی اثر ضخامت بتن بر عمق نفوذ.

جدول ۱۶. میزان تأثیر محل برخورد بر عمق نفوذ.

مدل	ناحیه‌ی برخورد	عمق نفوذ نهایی (متر)	مدل	ناحیه‌ی برخورد	عمق نفوذ نهایی (متر)
هدف بتنی با ضخامت ۱٫۵ متر			هدف بتنی با ضخامت ۱٫۲ متر		
۱	شماره ۱	۰٫۴۵۶	۴	شماره ۱	۰٫۰۵۲
۲	شماره ۲	۰٫۰۶۴	۵	شماره ۲	۰٫۰۲۶
۳	شماره ۳	۰٫۰۴۳	۶	شماره ۳	۰٫۰۰۹
هدف بتنی با ضخامت ۱٫۸ متر			هدف بتنی با ضخامت ۲ متر		
۷	شماره ۱	۰٫۰۲۵	۱۰	شماره ۱	۰٫۰۲۱
۸	شماره ۲	۰٫۰۱۶	۱۱	شماره ۲	۰٫۰۱۴
۹	شماره ۳	۰٫۰۰۲۸	۱۲	شماره ۳	۰٫۰۰۷

شکل ۱۷. نواحی برخورد.

شکل ۱۶. منحنی اثر تغییرات میلگردهای خمشی بر کاهش عمق نفوذ.

عمودی به گنبد است که هر سه ناحیه در شکل ۱۷ قابل مشاهده‌اند. نتایج در جدول ۱۶ آورده شده است. از جدول ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت سازه نسبت به عمق نفوذ برای هر چهار ضخامت از ناحیه‌ی برخورد شماره ۱ تا ۳ کاهش می‌یابد.

۱۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل روش تاریخی‌چهی زمانی ریرا و روش برخورد مستقیم هواپیما به سازه‌ی بتن مسلح محافظ نیروگاه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AUTODYN بررسی شد. انواع تخریب و اثرات آن که بر روی سازه بررسی شد و نیز به کارگیری مناسب مدل‌های رفتاری مصالح عنوان شد.

نتایج نشان داد که توزیع خسارت در دو روش برخورد مستقیم و تاریخی‌چهی زمانی ریرا از تطابق مناسبی برخوردار بود. از دیگر نتایجی که می‌توان به آنها اشاره کرد عبارت‌اند از:

- ۱- با افزایش ضخامت هدف بتنی، تنش کششی ایجاد می‌شود و اثر پوسته‌شدگی در آن کاهش پیدا می‌کند.

پدیده‌ی خرابی موضعی ایجاد شده در اثر برخورد، فقط در پدیده‌ی سوراخ‌شدگی است که برای دو ضخامت دیگر رخ نمی‌دهد، همچنین در این برخورد نفوذ و قلوه‌کنی برای هر سه ضخامت مشاهده می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد تغییرات میلگرد خمشی از کمینه تا بیشینه با فرض ثابت بودن فاصله‌ی میلگردها برای ضخامت‌های کم تأثیر بیشتری دارد. با این حال در ضخامت حدود ۱٫۲ متر تغییرات میلگرد خمشی از کمینه تا بیشینه میزان نفوذ را بیشینه ۷ درصد کاهش می‌دهد. با افزایش ضخامت تا ۲ متر این تأثیر در کاهش نفوذ تا ۲ درصد کاهش دارد. این موضوع در کنار بررسی به عمل آمده در تأثیر ضخامت سازه‌ی محافظ در کاهش نفوذ نشان می‌دهد برای کنترل خسارت در سازه‌ی محافظ افزایش ضخامت مؤثرتر است.

۳.۹. تأثیر محل برخورد هواپیما به هدف بتنی

سه ناحیه برای برخورد هواپیما به سازه‌ی بتنی در نظر گرفته شده است. ناحیه‌ی شماره ۱، برخورد افقی به نقطه‌یی در فاصله‌ی ۱۲ متری از پایین هدف که در تحلیل‌های پیشین به عنوان فرض اولیه در نظر گرفته شده بود، ناحیه‌ی شماره ۲ که برخورد به محل اتصال دیوار و گنبد است و در نهایت ناحیه‌ی شماره ۳ که برخورد

- ۷- افزایش مقدار پارامتر فرسایش و ابعاد اجزای شبکه، کاهش عمق نفوذ را به دنبال دارد.
- ۸- سرعت هواپیما در هنگام برخورد ثابت نیست و با گذشت زمان تحلیل به صورت محسوسی کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های شرکت مادر تخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران برای انجام این پژوهش تشکر نمایند.

- ۲- با افزودن به ضخامت سازه بتنی، عمق نفوذ حاصل از برخورد کاهش می‌یابد تا جایی که با افزایش این پارامتر میزان نفوذ به عدد ثابتی میل می‌کند.
- ۳- افزایش میزان میلگرد خمشی نقش کمی در روند کاهش عمق نفوذ ایفا می‌کند.
- ۴- تغییر ناحیه‌ی برخورد هواپیما از دیواره‌ی سازه‌ی محافظ به محل تلاقی دیواره و گنبد و نیز گنبد کاهش میزان نفوذ را به دنبال دارد.
- ۵- ضخامت بتن ۱/۵ متر به عنوان ضخامت بهینه و ایمن که از نفوذ و ایجاد ترکش‌های ثانویه جلوگیری می‌کند، پیشنهاد می‌شود.
- ۶- با دور شدن از محل برخورد تغییر شکل‌های سازه‌ی بتنی که به صورت دواير هم‌مرکز به مرکزیت نقطه‌ی برخورد است، کاهش می‌یابد.

پانویس‌ها

1. reactor containment
2. penetration
3. scabbing
4. cracking
5. Riera
6. Holley
7. Yang
8. Godfrey
9. Sharpe
10. Schalk
11. Dritler
12. Hornyik
13. Wolf
14. Bucher
15. Skrikerud
16. Sugano et al.
17. Husain Abbas et al.
18. Katayama et al.
19. Sandia National Laboratories (SNL)
20. Cox et al.
21. International Atomic Energy Agency (IAEA)
22. Qu et al.
23. Xu et al.
24. local damage
25. global damage
26. Kennedy
27. penetration
28. penetration depth
29. spalling
30. scabbing
31. perforation
32. Riedel-Hiermaier-Toma (RHT model)
33. Karagozian & Case (K&C model)
34. Modified Drucker-Prager Model
35. Holmquist-Johnson Cook (HJC model)
36. Gebbeken and Ruppert (GR model)
37. Leppanen
38. dynamic increase factor (DIF)
39. Johnson Cook Model
40. plastic kinematic model
41. piecewise linear plasticity model
42. Von Mises Model

43. Hydrocode
44. explicit
45. implicit
46. hexahedral
47. triangle
48. erosion
49. element erosion function
50. reduced integration
51. hourglass

منابع (References)

1. Jiang, H. and Chorzepa, M.G. "Aircraft impact analysis of nuclear safety-related concrete structures: A review", *Engineering Failure Analysis*, **46**, pp. 118-133 (2014).
2. Riera, J.D. "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **8**(4), pp. 415-426 (1968).
3. Yang, H.T.Y. and Godfrey, D.A. "Structural analysis of aircraft impact on a nuclear containment vessel and associated structures", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **11**(2), pp. 295-300 (1970).
4. Kheiri, F. "Dynamic analysis of NPP concrete structures against impact", *M.Sc. Thesis in Hydraulic Structures*, Shahid Chamran University, Ahvaz, (1998). (in persian)
5. Dritler, K., Gruner, P. and Krivy, J. "Calculation of forces arising from impacting projectiles upon yielding structures", *The 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, USA paper No.J7/4, pp. 1-12 (1977).
6. Hornyik, K. "Analytic modeling of the impact of soft missile on projective walls", *The 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, USA paper, No.J7/3, pp. 1-12 (1977).
7. Wolf, J.P., Bucher, K.M. and Skrikerud, P.E. "Response of equipment to aircraft impact", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **47**(1), pp. 169-193 (1977).

8. Sugano, T., Subota, H., Kasai, Y. and et al. "Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **140**(3), pp. 373-385 (1993).
9. *International Atomic Energy Agency, External Events Excluding Earthquakes in The Design of Nuclear Power Plant*, Vienna, Austria, IAEA Safety Guides, No. NS-G-1.5 (2003).
10. Abbas, H., Paul, D.K., Godbole, P.N. and et al. "Aircraft crash upon outer containment of nuclear power plant", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **160**(1-2), pp. 13-50 (1996).
11. Katayama, M. and Rainsberger, R. "Computer simulation of an F-4 phantom, crashing into a reinforced concrete wall", *2nd International Conference Comp. Ballistics*, Cordoba, Spain, **40**, pp. 207-217 (2005).
12. Cox, P.A. and Wilt, T. "Response of reinforced concrete structures to aircraft crash impact", *U.S. Nuclear Regulatory Commission Contract NRC-02-006* (2011).
13. Seifoori, S. and Liaghat, G.H. "A semianalytical and numerical study of penetration and perforation of an ogive-nose projectile into concrete targets under normal impact", *Journal of Mechanical Engineering Science*, **225**(8), pp. 1782-1797 (2011).
14. Moradloo, J., Alizadeh, T. and Nasser Asadi, K. "Numerical simulation of concrete target penetration and investigation of experimental relations", *Journal of Civil Modares Science*, **14** (1), pp. 169-179, (2014). (in persian)
15. Hirotsaka, K., Miyazaki, K., Nakane, M. and et al. "Numerical simulation of impact of aircraft and engine into concrete wall", *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Mechanical Engineering Journal*, **3**(3), pp. 1-9 (2016).
16. *International Atomic Energy Agency, External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plant*, Vienna, Austria, IAEA Safety Guides, No. NS-G-3.1 (2002).
17. Qu, Y.G., Wu, H., Xu, Z.Y. and et al. "Safety assessment of generation III nuclear power plant buildings subjected to commercial aircraft crash Part II: structural damage and vibrations", *Journal of the Nuclear Engineering and Technology*, **52**(2), pp. 397-416 (2020).
18. Xu, Liang-Yu., Cai, Fei., Xue, Ying-Ying. and et al. "Numerical analyses of local damage of concrete slabs by normal impact of deformable solid projectiles", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**(1), pp. 5121-5132 (2019).
19. Kennedy R.P.A. "Review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **37**(2), pp. 183-203 (1976).
20. Lian, Y.P., Zhang, X., Zhou, X. and et al. "A FEMP Method and its Application in Modeling Dynamic Response of Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **200**(17-20), pp. 1659-1670 (2011).
21. Mahmoudzadeh, A. and Bagheri Noghrehdehi, A., "Assessment of aircraft crash on concrete protecting NPP", *Journal of the Faculty of Engineering*, **39**(5), pp. 609-619, (2005). (in persian)
22. Malvar, L.J. and Ross, C.A. "Review of strain rate effects for concrete in tension", *Journal ACI Materials*, **95**(6), pp. 735-739 (1998).
23. Riedel, W., Thoma, K. and Hiermaier, S. "Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500, numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes", *Proceedings of 9th Internationales Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin Strausberg*, pp. 315-322 (1999).
24. Riedel, W., Kawai, N. and Kondo, K. "Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials", *International Journal of Impact Engineering*, **36**(2), pp. 283-293 (2009).
25. Riedel, W. "Beton unter dynamischen lasten: Meso- und makromechanische modelle und ihre parameter", ed.: *Fraunhofer EMI/IRB, Freiburg*, ISBN 3-8167-6340-5 (2004).
26. Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W. and et al. "A plasticity concrete material model for DYNA3D", *International Journal of Impact Engineering*, **19**(9-10), pp. 847-873 (1997).
27. Malvar, L.J., Crawford, J.E. and Morrill, K.B. "K&C concrete material model release III: automated generation of material model input", *TR-99-24, Karagozian and Case Structural Engineers, Glendale*, K&C technical Report, CA (2000).
28. Drucker, D.C. and Prager, W. "Soil mechanics and plastic analysis or limit design", *Journal Quarterly Applied Mathematics, Brown University*, **10**, pp. 157-165 (1952).
29. Holmquist, T.J., Johnson, G.R. and Cook, W.H. "A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures", *14th International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada*, **2**, pp. 591-600 (1993).
30. Gebbeken, N. and Ruppert, M. "A new material model for concrete in high-dynamic hydrocode simulations", *Archive of Applied Mechanics*, **70**(7), pp. 463-478 (2000).
31. Leppänen, J. "Concrete subjected to projectile and fragment impacts: modeling of crack softening and strain rate dependency in tension", *International Journal of Impact Engineering*, **32**(11), pp. 1828-1841 (2006).
32. ANSYS Autodyn User's Manual, Version 15, Century Dynamics Inc., USA (2013).
33. Zhenguo, Tu. and Yong, Lu. "Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete", *International Journal of Impact Engineering*, **37**(10), pp. 1072-1082 (2010).
34. Leppanen, j. "Dynamic behavior of concrete structures subjected to blast and fragmen impacts", *Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg*, p. 71 (2002).
35. Nystrom, U. "Concrete structures subjected to blast and fragment impacts", *Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg*, p. 148 (2008).
36. Herrmann, W. "Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials", *Journal of Applied Physics*, **40**(6), pp. 2490-2499 (1969).

37. Sadegh Azar, M., Attarnejad, R. and Khosravi, A. "Evaluation of response of buried concrete structure under surface explosion by numerical simulation", *First National Structure-Earthquake-Geotechnical Conference, Mazandaran, Babolsar*, pp. 1-10 (2010). (in persian)
38. Zhou, X. and Hao, H. "Numerical prediction of reinforced concrete exterior wall response to blast loading", *Advances In Structural Engineering*, **11**(4), pp. 355-367 (2008).
39. Tham, C.Y. "Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D", *Finite Elements in Analysis and Design*, **41**(14), pp. 1401-1410 (2005).
40. Cook, W.H. "A constitutive model and data Johnson, G.R. and for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", *In: Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands*, pp. 541-547 (1983).
41. Hansson, H. "Warhead penetration in concrete protective structures", *Licentiate Thesis Stockholm, Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Sweden* (2011).
42. Laal Abadi, H., Malek, S. and Faraji, F. "The impact digit modeling and steel projectile penetration having tumbling with aluminum targets", *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, **3**(2), pp. 01-06 (2014).
43. Wang, K. and Eng, B. "Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process", *M.Sc. Thesis McMaster University, Mechanical Engineering* (2016).
44. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y. and et al. Koshika, "Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles part 1, test program, method and results", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **140**(3), pp.387-405 (1993).
45. Khosravi, A. "Comparison of the aircraft crash and an explosive projectile on a reactor protective dome", *M.Sc. Thesis of Structural Engineering, University of Tehran*, (2010). (in persian)
46. Luccioni, B.M., Araoz, G.F. and Labanda, N.A. "Defining erosion limit for concrete", *International Journal of Protective Structures*, **4**(3), pp.315-340 (2013).
47. ASCE-58, Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, Manuals and Reports on Engineering Practice, American Society of Civil Engineers, New York (1980).
48. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y. and et al. "Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2, evaluation of test results", *Journal of the Nuclear Engineering and Design*, **140**(3), pp. 407-423 (1993).
49. Muto, K., Sugano, T., Tsubota, H. and et al. "Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part 3: full-scale tests", *Transaction of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 10), Anaheim, California, August 14-19, 1989. Los Angeles, California: American Association for Structural Mechanics in Nuclear Reactors* (1989b).
50. Alizadeh, T. and Moradloo, J. "Investigation and calibration of projectile and target behavioral models in the modeling of steel projectile impact on concrete target", *Sharif Journal of Civil Engineering, Tehran*, **30-2**(4/2), pp. 101-115 (2014). (in persian)