

## تحلیل تأثیر فرم ساختمان محفظه ایمنی راکتور در مقابل برخورد هواپیما

سید رحمان اقبالی<sup>۱\*</sup>، مهسا ابراهیمی<sup>۲</sup>، فرزانه اسدی ملک جهان<sup>۳</sup>، محمدرضا کوچکی محمدپور<sup>۴</sup>

۱- استادیار، ۲ و ۳- دکتری معماری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،

۴- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت

(دریافت: ۹۴/۰۲/۲۲، پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۷)

### چکیده

ایمنی و امنیت ساختمان محفظه ایمنی راکتور و مقاومت آن‌ها در برابر نیروهای خارجی دارای اهمیت ویژه‌ای است. توجه به این مسئله پس از حادثه برخورد هواپیما به برج‌های دوقلو در تاریخ ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ بیشتر شده است. یکی از عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری یک ساختمان در مقابل نیروهای خارجی، فرم هندسی آن می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق انتخاب فرم هندسی بهینه ساختمان محفظه ایمنی راکتور به منظور کاهش آسیب‌پذیری آن در مقابل برخورد هواپیما است. دو فرم هندسی مختلف، یکی به صورت مکعبی با سقف صاف و دیگری با بدنه استوانه‌ای و سقف گنبدی به صورت عددی مدل‌سازی شدند. مدل‌سازی و حل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.12-1 انجام شد. از آنجا که نقطه تمرکز این مقاله مطالعه تأثیر فرم ساختمان است، به منظور کاهش زمان حل و ساده‌سازی فیزیکی، بتن به صورت جسمی همگن و بدون میلگردهای مسلح کننده انتخاب گردید. برخورد هواپیمای فانتوم F4 به بدنه ساختمان محفظه ایمنی و سقف آن در زوایای مختلف شبیه‌سازی و پاسخ‌ها در کل سازه و نیز در محل برخورد با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که فرم استوانه‌ای نسبت به فرم مکعبی، آسیب‌پذیری کمتری در برخورد یک جسم از خود نشان می‌دهد به جز در نقطه اتصال گنبد به بدنه.

**کلیدواژه‌ها:** ساختمان محفظه ایمنی، برخورد هواپیما، فرم استوانه‌ای، فرم مکعبی، فانتوم F4، آباکوس

## Analysis of Reactor's Containment Building Form Effect Against an Aircraft Crash

S. R. Eghbali\*, M. Ebrahimi, F. Asadi Malekjahan, M. Koochaki Mohamadpour

Imam Khomeini International University

(Received: 12/05/2015; Accepted: 28/10/2016)

### Abstract

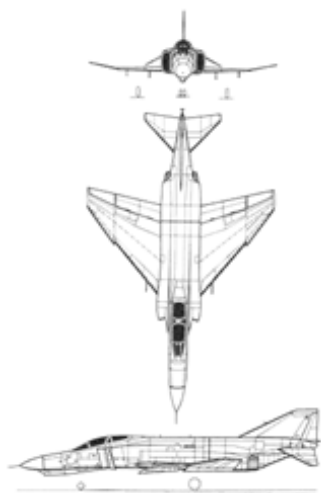
*Safety and security of reactor containment building and its resistance against external forces is particularly important. Paying attention to this subject has been increased due to the incident plane hit the twin towers on September 11, 2001. One of the factors in the vulnerability of a building against the external collision is its geometry. The purpose of this study is to select the optimal geometry of a concrete containment building with the lowest vulnerability against an aircraft crash. Thus, two different geometric forms, one with cubic body and a flat roof and the other with a cylindrical body and domed roof were modeled numerically. Numerical modeling was performed using ABAQUS 6.12-1 software. Considering the impact of building form and in order to reduce the solution time and considering physical simplicity, homogeneous concrete without reinforced bars were chosen. Strike of Phantom F4 to the roof and body of the containment building was simulated at various angles and responses were compared in the whole structure and in the contact location. Results of this study indicate that the cylindrical form is less vulnerable in comparison with cubic form except in the intersection of wall and dome.*

**Keywords:** Containment Building, Aircraft Crash, Cylindrical Form, Cubic Form, Phantom F4, ABAQUS

\*Corresponding Author E-mail: s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir



هندسی با بدنه استوانه‌ای و سقف گنبدی انجام گرفته است. با توجه به اینکه هدف در این پژوهش بررسی ساختمان محافظه ایمنی یک راکتور بدون در نظر گرفتن نوع آن است، بنابراین، به دلیل استفاده از فرم مکعبی ساختمان محافظه ایمنی در تعدادی از راکتورها با میزان ایمنی بالا همچون راکتور اپال<sup>۲</sup> در استرالیا و راکتور هانارو<sup>۳</sup> در کره جنوبی و نیز کاربرد بالای فرم هندسی استوانه‌ای با سقف گنبدی در محافظه ایمنی سایر راکتورها، لازم است که مقاومت این دو فرم هندسی مختلف در برابر انواع برخوردها با هم مقایسه شود. این تحقیق به دنبال مقایسه رفتار سازه‌ای محافظه ایمنی بتنی راکتور با توجه به فرم هندسی در برابر برخورد هواپیما می‌باشد. هواپیمای مدل شده در تحقیق حاضر، هواپیمای فانتوم F4 است (شکل ۲)، که در حال حاضر بیشترین ساعات پروازی را در مقایسه با سایر هواپیماهای جنگنده دارد. مشخصات این هواپیما در جدول (۱) آورده شده است



شکل ۲. فانتوم اف ۴ [۱۷]

جدول ۱. مشخصات فانتوم اف ۴ [۱۷]

طول بال‌های هواپیما	۱۱/۷۷ متر
طول	۱۹/۲ متر
ارتفاع	۵/۰۲ متر
وزن	۱۳۷۵۷ کیلوگرم
وزن عادی برخاست	۱۸۸۱۸ کیلوگرم
حداکثر وزن برخاست	۲۸۰۳۰ کیلوگرم
حداکثر سرعت در سطح ۱۰۹۷۵ متر	۲۳۰۰ کیلومتر / ساعت
حداکثر سرعت در سطح دریا	۱۴۵۰ کیلومتر / ساعت
حداکثر ارتفاع پرواز	۱۷۹۰۵ متر

مکعبی می‌باشد. ابعاد مرتبط با این دو فرم هندسی در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

اولین گام در این مطالعه بررسی هندسه و ایجاد شبکه‌های المان محدود<sup>۱</sup> محافظه ایمنی بتنی است. پس از آن، خواص مواد بتن، برای شبیه‌سازی رفتار غیر خطی بتن [۶ و ۱۱] مدل شده و در نهایت، تجزیه و تحلیل محافظه ایمنی در اثر برخورد هواپیما صورت گرفته است تا بتوان فرم هندسی بهینه جهت مقاومت در برابر برخورد هواپیما را تعیین نمود.

تغییر شکل محافظه ایمنی در اثر برخورد هواپیما به سرعت هواپیما، ظرفیت بارگیری، شکل‌پذیری نسبی هدف و هواپیما، زاویه و محل برخورد و غیره بستگی دارد. هنگامی که وسیله نقلیه هوایی به محافظه ایمنی برخورد می‌کند، در ابتدا انرژی جنبشی هواپیما به قسمت برخورد با محافظه ایمنی هدایت می‌شود و توسط آن بخش جذب می‌شود و باعث تغییر شکل پلاستیک و آسیب هواپیما می‌شود. سپس انرژی جذب شده به دال پایه هدایت می‌شود [۱۲]. دو پارامتر مهمی که می‌بایست برای ارزیابی سازوکار آسیب در نظر گرفته شود عبارت‌اند از: سرعت هواپیما و زاویه ضربه [۱۳].

با توجه به محل‌های مختلف برخورد هواپیما به ساختمان محافظه ایمنی، ایده‌های گوناگونی در مورد نقاط ضعف این سازه وجود دارد. برای ساختمان محافظه ایمنی استوانه‌ای با یک گنبد نیم کره‌ای، در تحقیقی [۱۴] ذکر شده است که بحرانی‌ترین بخش در برخورد افقی هواپیما، در نزدیکی تقاطع دیواره استوانه‌ای و گنبد است. اقبالی و همکاران [۱۵] نشان داده‌اند که برخورد افقی هواپیما در نقطه میانی دیواره استوانه‌ای بیشترین آسیب را ایجاد نموده و تقاطع دیوار استوانه‌ای و گنبد به دلیل تراکم بیشتر مواد آسیب کمتری می‌بیند. در بسیاری از مطالعاتی که برخورد هواپیما به محافظه ایمنی در آن‌ها بررسی شده است، تعداد موتور و همچنین منحنی زمان را در نظر گرفته‌اند [۱۵ و ۱۶]. از آنجایی که در مطالعه حاضر تنها مقایسه میزان آسیب‌پذیری دو فرم هندسی مختلف مطرح بوده است و در نظر گرفتن چنین مشخصاتی تأثیری در روند انجام مطالعه و نتیجه‌گیری نهایی ندارد، بنابراین اینگونه مشخصات هواپیما لحاظ نشده است.

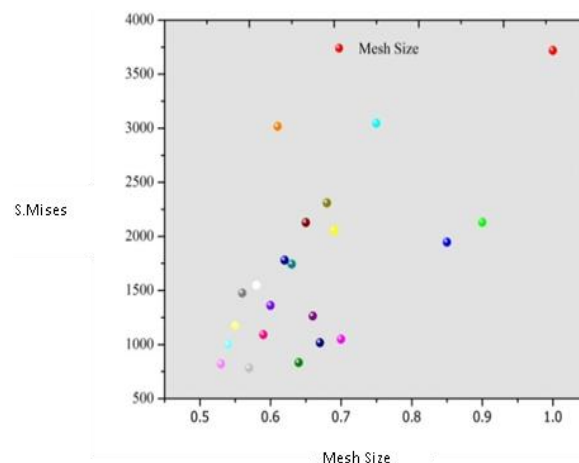
همان‌طور که در مدارک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ذکر شده است [۲] طراحی راکتورها باید با در نظر گرفتن میزان مقاومت در برابر برخورد هواپیما انجام شود. اغلب مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته، در تحلیل برخورد هواپیما به محافظه ایمنی راکتورهای قدرت بوده است که تنها با در نظر گرفتن یک فرم

<sup>۲</sup> Opal  
<sup>۳</sup> Hanaro

<sup>۱</sup> Finite Element Meshes

## ۲. روش تحقیق

کد المان محدود ABAQUS/Explicit برای تجزیه و تحلیل دو فرم مختلف در پژوهش حاضر به کار گرفته شد و هندسه محفظه ایمنی به صورت کامل مدل گردید. در اولین مرحله پیش پردازش، یک مدل سه بعدی تغییر شکل پذیر<sup>۱</sup> از محفظه ایمنی از هر دو فرم هندسی و با در نظر گرفتن ابعاد و اندازه های مشخص شده در شکل (۱) ایجاد شد. هواپیما در یک فضای سه بعدی از نوع صلب<sup>۲</sup> مدل گردید. سپس مشخصات بتن بر اساس جدول (۲) در نرم افزار اعمال شد. با توجه به در نظر گرفتن هواپیما به عنوان یک جسم صلب لزومی به تعیین مشخصات مواد آن در نرم افزار نبود. روش تماس حرکتی<sup>۳</sup> به عنوان فرمولاسیون قید مکانیکی<sup>۴</sup> و لغزش محدود<sup>۵</sup> به عنوان فرمولاسیون لغزش<sup>۶</sup> انتخاب شدند. علاوه بر این یک قید تماسی<sup>۷</sup> تعیین شد. اتصال محفظه ایمنی با زمین به صورت اتصال گیردار<sup>۸</sup> تعریف گردید. المان ها از نوع پوسته ای چهار گره ای S4R است. پس از مقایسه مش بندی های گوناگون و بررسی نمودار همگرایی آنکه در نمودار (۱) آمده است، اندازه مش ها ۰/۶۳ میلی متر در نظر گرفته شد چرا که در این محدوده جواب ها مستقل از اندازه مش می باشد. در مطالعه حاضر، کل سازه و نیز محل اصابت فانتوم در برابر برخورد هواپیما مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج برای انتخاب فرم بهینه با هم مقایسه شد.



نمودار ۱. نمودار همگرایی تنش فون میزس بر اساس اندازه مش

## ۱-۲. مدل ترکیبی بتن

در مدل سازی بتن به علت ضخامت زیاد دیوار بتنی، بتن به صورت پوسته در نظر گرفته شد. رفتار مصالح بتن در شبیه سازی عددی با استفاده از مدل آسیب الاستیسیته که در کد ABAQUS وجود دارد انجام گرفت. به دلیل تحلیل فرم هندسی، مدل الاستیسیته راه حل مناسبی برای کاهش زمان حل مسئله در تحقیق حاضر می باشد. مشخصات بتن و ویژگی های رفتاری آن با توجه به مطالعات قبلی [۶ و ۱۱] در نظر گرفته شده است که در جدول (۲) آورده شده اند.

جدول ۲. مشخصات بتن [۶ و ۱۱]

دانسیته	۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
ضریب پواسون، $\nu$	۰/۲
مدول یانگ، E	۳۰۰۰۰ مگاپاسکال

## ۲-۲. تحلیل و بررسی مدل سازی

دو فرم هندسی مختلف محفظه ایمنی بتنی در حادثه برخورد هواپیما مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته اند. مدل سازی عددی مطالعه حاضر توسط نرم افزار ABAQUS 6.12-1 و در یک محیط سه بعدی انجام شده است. تجزیه و تحلیل در چهار نقطه مختلف با زاویه برخوردهای گوناگون صورت گرفته است. رفتار سازه ای هر یک از فرم های هندسی انتخابی در برابر برخورد جنگنده فانتوم F4 بررسی شده است. در این مطالعه، همانند عباس و همکاران [۱۸] و اقبال و همکاران [۱۵]، دیوار و سقف یکپارچه در نظر گرفته شده اند. برای انجام تحلیل و بررسی مدل سازی های انجام شده جهت تعیین فرم هندسی بهینه برای ساختمان محفظه ایمنی راکتور حاضر از تنش فون میزس<sup>۹</sup> و نیز جابه جایی های<sup>۱۰</sup> ایجاد شده در ساختمان در اثر برخورد استفاده شده است. تنش فون میزس معیاری از مجموعه تنش های کششی- فشاری و تنش های برشی است و جهت و علامت ندارد و برای مدل آسیب الاستیسیته مناسب می باشد. بحث مربوط به کشش و فشار در تانسور تنش مطرح می شود. برای مشاهده تنش های اصلی از تنش در راستای محور همسو با جهت برخورد استفاده می شود. تنش های کششی و فشاری به ترتیب با مقادیر مثبت و منفی مشخص می شوند [۱۹]. یک بازه زمانی ۰/۰۴ ثانیه ای مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مقایسه شده اند. در تحلیل دینامیکی حاضر از روش آنالیز صریح<sup>۱۱</sup> استفاده شده است.

<sup>۹</sup> S.Mises

<sup>۱۰</sup> S11

<sup>۱۱</sup> Explicit

<sup>۱</sup> Deformable Model

<sup>۲</sup> Discrete Rigid Type

<sup>۳</sup> Kinematic Contact Method

<sup>۴</sup> Mechanical Constraint Formulation

<sup>۵</sup> Finite Sliding

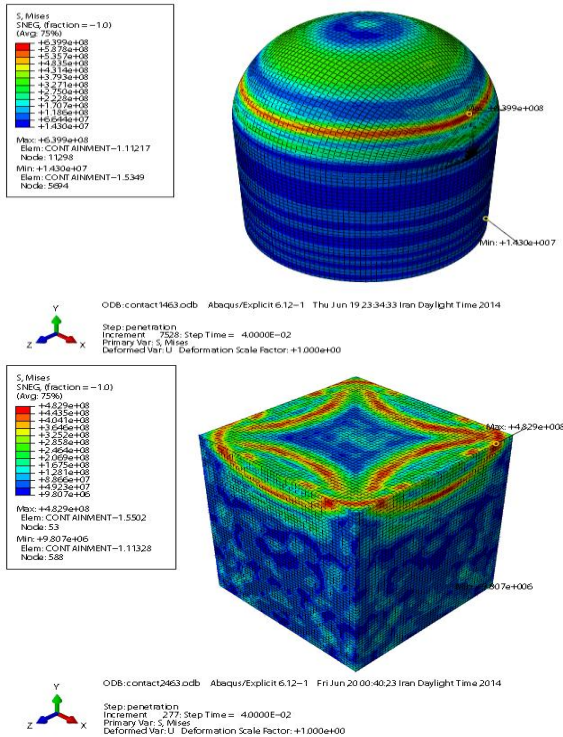
<sup>۶</sup> Sliding Formulation

<sup>۷</sup> Contact Type Intraction

<sup>۸</sup> Clamped

### ۳. نتایج و بحث

جدول (۶) مشخص است که میزان برآیند جابه‌جایی<sup>۱</sup> در محل برخورد در فرم ۲ بیشتر و برابر با ۰/۷۰۱ متر است.



شکل ۳. تنش ون میزس در برخورد به محل ۱

جدول ۵. حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد

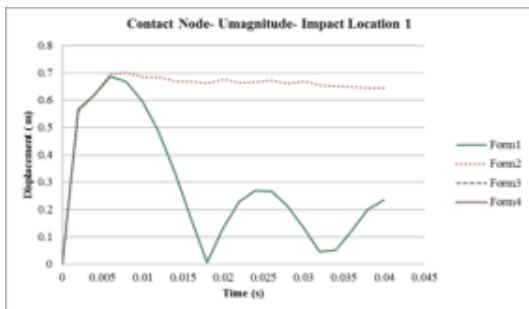
فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۱

بیشترین به کمترین جابه‌جایی در نقطه برخورد به محل ۱ (متر)	زمان
فرم ۱ (۰/۶۸۸)	فرم ۲ (۰/۷۰۰)
۰/۰۴ (ثانیه)	

جدول ۶. حداکثر برآیند جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد

فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۱

بیشترین به کمترین برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۱ (متر)	زمان
فرم ۱ (۰/۶۸۸)	فرم ۲ (۰/۷۰۱)
۰/۰۴ (ثانیه)	



نمودار ۲. برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد فانتوم به محل ۱

پس از مدل‌سازی با استفاده از مدل المان محدود و نیز مشخصاتی که در قبل برای بتن ذکر شد، به مطالعه تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در کل جسم و نیز محل‌های چهارگانه برخورد پرداخته می‌شود. این بررسی به منظور انتخاب فرم بهینه صورت خواهد گرفت.

#### ۱-۳ محل برخورد ۱

هنگامی که هواپیما به محل ۱ یعنی به صورت عمودی بر مرکز سقف و یا گنبد برخورد می‌کند، تنش ایجاد شده در راستای برخورد با توجه به جدول (۳) بیان می‌دارد که بیشترین میزان تنش کششی در محل برخورد در فرم ۲ ایجاد شده و این مقدار برابر است با  $4/43E+09$  پاسکال و در فرم ۱،  $3/97E+09$  پاسکال می‌باشد. تنش فشاری بیشینه در فرم ۱ ایجاد می‌شود و برابر است با  $4/6E+08$  پاسکال و تنش کششی ایجاد شده با مقدار  $1/7E+08$  به میزان قابل توجهی پایین‌تر از فرم ۱ می‌باشد. شکل (۳) تنش ون میزس در برخورد به محل ۱ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴)، تنش ون میزس در محل برخورد در فرم ۱ برابر است با  $5/1E+09$  پاسکال و در فرم ۲،  $4/52E+09$  پاسکال می‌باشد.

جدول ۳. حداکثر تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های

هندسی برای محل برخورد ۱

بیشترین به کمترین تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد به محل ۱ (پاسکال)	تنش	زمان
فرم ۱ ( $3/97E+09$ )	فرم ۲ ( $4/43E+09$ )	فرم ۱ ( $3/97E+09$ )
تنش کششی		۰/۰۴ (ثانیه)
فرم ۲ ( $1/7E+08$ )	فرم ۱ ( $4/6E+08$ )	فرم ۱ ( $4/6E+08$ )
تنش فشاری		

جدول ۴. حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد فرم‌های هندسی

برای محل برخورد ۱

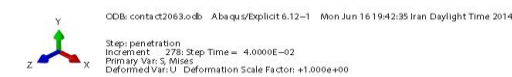
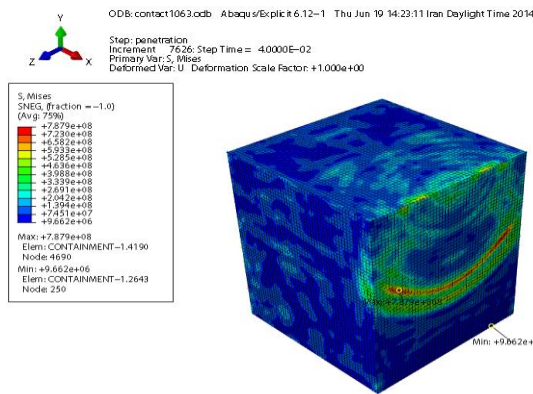
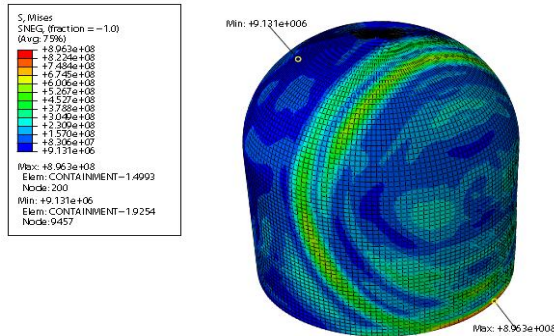
بیشترین به کمترین تنش ون میزس در نقطه برخورد محل برخورد ۱ (پاسکال)	زمان
فرم ۱ ( $4/52E+09$ )	فرم ۲ ( $5/1E+09$ )
۰/۰۴ (ثانیه)	

جدول (۵)، حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد را نشان می‌دهد. این مقادیر برای فرم‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر است با ۰/۶۸۸ و ۰/۷۰۰ متر. نمودار (۲) برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد فانتوم به محل ۱ و شکل (۴) جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۱ را نمایش می‌دهند. با توجه به

<sup>۱</sup> Umagnitude



از مقایسه نمودارها، تصاویر و جدول‌ها مرتبط با این نوع از برخورد که به صورت افقی و به محل اتصال سقف یا گنبد به بدنه می‌باشد، می‌توان مشاهده کرد که علی‌رغم تنش‌های بیشتری که در فرم ۲ ایجاد می‌شود، این فرم تغییر شکل کمتری را از خود نشان می‌دهد. این محل از نقاط آسیب‌پذیر فرم ۱ می‌باشد که می‌توان این مسئله را با ایجاد تغییراتی در ضخامت محل اتصال و آرماتوربندی و طراحی دقیق جزئیات کاهش داد.



شکل ۵. تنش ون میزس برخورد به محل ۲

جدول ۷. حداکثر تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های

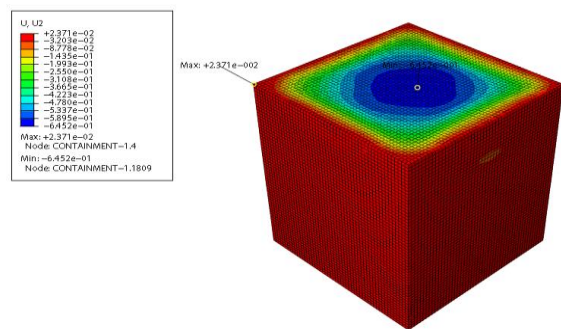
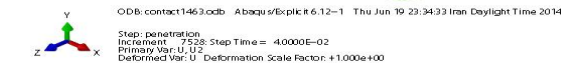
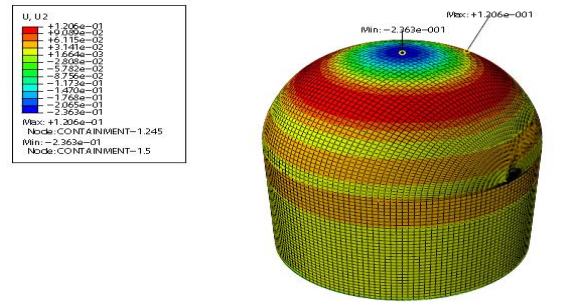
هندسی برای محل برخورد ۲

زمان	تنش	بیشترین به کمترین تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد به محل ۲ (پاسکال)
۰/۰۴ (ثانیه)	تنش کششی	فرم ۲ (۴/۳۶E+۰۹) / فرم ۱ (۴/۰۳E+۰۹)
	تنش فشاری	فرم ۲ (۱/۸E+۰۹) / فرم ۱ (۲/۳E+۰۸)

جدول ۸. حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد فرم‌های هندسی

برای محل برخورد ۲

زمان	بیشترین به کمترین تنش ون میزس در نقطه برخورد
۰/۰۴ (ثانیه)	فرم ۲ (۵/۰۵E+۰۹) / فرم ۱ (۴/۸۵E+۰۹)



شکل ۴. جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۱

با بررسی‌های دقیق می‌توان نتیجه گرفت که در این نوع برخورد، فرم گنبدی سقف نسبت به فرم صاف دارای عملکرد بهتر بوده و مقاومت بیشتری در برابر برخورد عمودی هواپیما دارد.

### ۳-۲. محل برخورد ۲

با توجه به جدول (۷) که حداکثر تنش در راستای برخورد (افقی) در نقطه اصابت جنگنده به محل ۲ را نشان می‌دهد، حداکثر تنش کششی و فشاری به فرم ۲ تعلق دارد که به ترتیب عبارت‌اند از:  $4/36E+09$  و  $1/8E+09$  پاسکال. این مقادیر برای فرم ۱ به ترتیب عبارت‌اند از:  $4/03E+09$  و  $2/3E+08$  پاسکال. همچنین با توجه به جدول (۸) حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد با مقدار  $5/05E+09$  پاسکال به فرم ۲ تعلق دارد. بیشترین تنش ون میزس در محل برخورد ۲ در فرم ۱ برابر است با  $4/85E+09$  پاسکال.

شکل (۵) و جدول‌های (۹) و (۱۰) بیان می‌دارند که هم در کل سازه و هم در محل برخورد، جابه‌جایی در راستای برخورد و جابه‌جایی برآیند در فرم ۱ به میزان قابل توجهی بیش از فرم ۱ می‌باشد. نمودار (۳) نیز تأکیدی بر این مطلب است. بنابراین در برخورد به محل ۲، علی‌رغم تنش‌های بیشتری که در فرم ۲ ایجاد می‌شود، فرم ۲ تغییر شکل کمتری را از خود نشان می‌دهد. بنابراین در این برخورد فرم ۲ عملکرد بهتری دارد. شکل (۶) به درک بهتر ما از تحلیل جابه‌جایی در برخورد به محل ۲ کمک می‌نماید.

**جدول ۹.** حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۲

زمان	بیشترین به کمترین جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۲ (متر)	
۰/۰۴ (ثانیه)	فرم ۱ (۰/۶۹۸)	فرم ۲ (۰/۵۴۸)

**جدول ۱۰.** حداکثر برآیند جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۲

زمان	بیشترین به کمترین برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۱ (متر)	
۰/۰۴ (ثانیه)	فرم ۱ (۰/۷۰۰)	فرم ۲ (۰/۵۴۸)

**۳-۳. محل برخورد ۳**

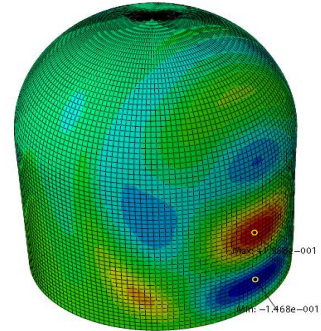
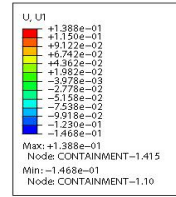
جدول (۱۱) نشان می‌دهد که تنش کششی بیشینه در راستای برخورد و در محل اصابت هواپیما به میانه بدنه با مقدار  $4/35E+09$  پاسکال به فرم ۲ و تنش فشاری بیشینه با مقدار  $3/7E+08$  پاسکال به فرم ۱ تعلق دارد. جدول (۱۲) مقایسه‌ای است از حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۳. با توجه به شکل (۶) می‌توان مشاهده کرد که تنش ون میزس ایجاد شده در کل سازه در فرم ۲ به طور قابل ملاحظه‌ای بیش از این نوع تنش در فرم ۱ می‌باشد. این مقادیر در فرم ۱ و ۲ به ترتیب عبارت‌اند از:  $6,103E+08$  و  $1,101E+09$  پاسکال. در شکل (۷) تنش ون میزس برخورد به محل ۳ و در شکل (۸) جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۳ نشان داده شده‌اند. بر اساس جدول (۱۳) حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در محل اصابت هواپیما در فرم ۲،  $0,700$  متر و در فرم ۱،  $0,697$  متر است. نمودار (۴) نیز نشان می‌دهد که بیشینه ایمن مقادیر در هر دو فرم بسیار به هم نزدیک است. جدول (۱۴) حداکثر برآیند جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۳ را مقایسه می‌نماید. با این بررسی مشخص است که در برخورد به صورت افقی به بدنه باوجود تنش‌های مختلف و متغیر بودن بیشترین مقدار تنش در دو فرم در زمان‌های گوناگون، تغییر شکل در هر دو فرم هندسی تقریباً یکسان بوده و هر دو از عملکرد تقریباً مشابهی برخوردارند. اما به طور کلی در این برخورد فرم ۱ به فرم ۲ برتری دارد.

**جدول ۱۱.** حداکثر تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۳

زمان	تنش	بیشترین به کمترین تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد - محل ۳ (پاسکال)	
۰/۰۴ (ثانیه)	تنش کششی	فرم ۲ ( $4/35E+09$ )	فرم ۱ ( $4/01E+09$ )
	تنش فشاری	فرم ۱ ( $3/7E+08$ )	فرم ۲ ( $1/8E+08$ )

**جدول ۱۲.** حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۳

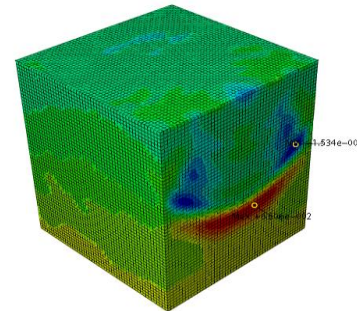
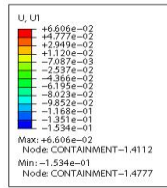
زمان	بیشترین به کمترین تنش ون میزس در نقطه برخورد در محل برخورد ۳ (پاسکال)	
۰/۰۴ (ثانیه)	فرم ۲ ( $5/14E+09$ )	فرم ۱ ( $4/81E+09$ )



ODB: contact1063.odb Abaqus/Explicit 6.12-1 Thu Jun 19 14:23:11 Iran Daylight Time 2014



Step: penetration Increment: 762; Step Time = 4.0000E-02 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

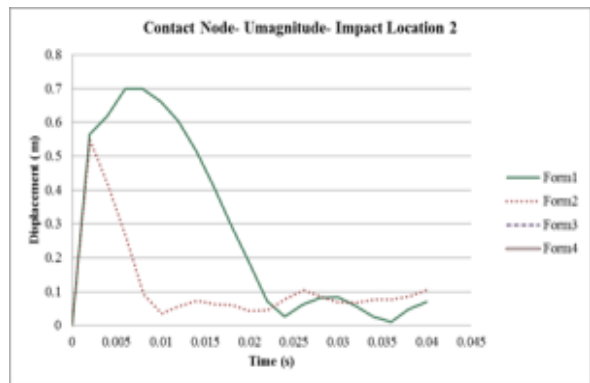


ODB: contact2063.odb Abaqus/Explicit 6.12-1 Mon Jun 16 19:42:35 Iran Daylight Time 2014

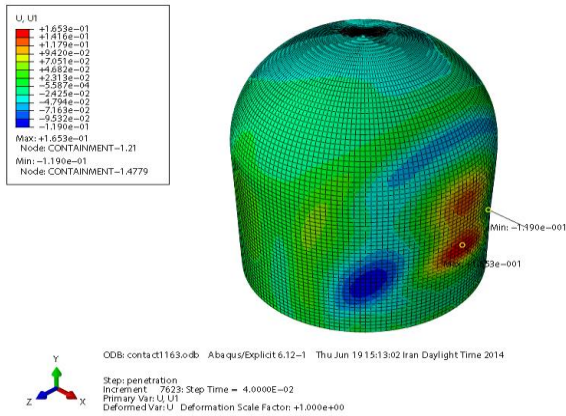


Step: penetration Increment: 278; Step Time = 4.0000E-02 Primary Var: U, U1 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

**شکل ۶.** جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۲

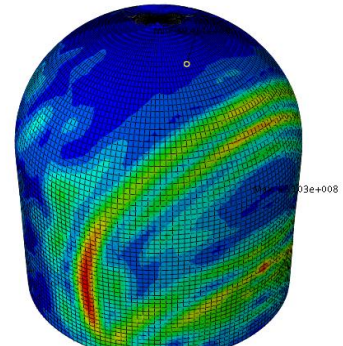
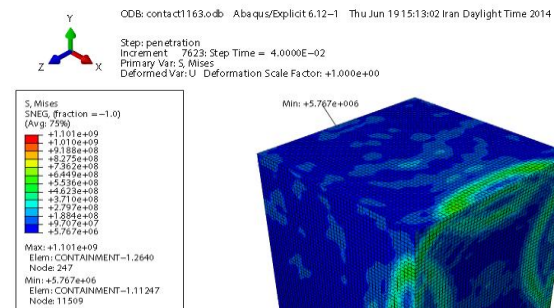
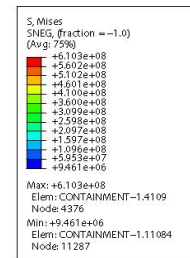
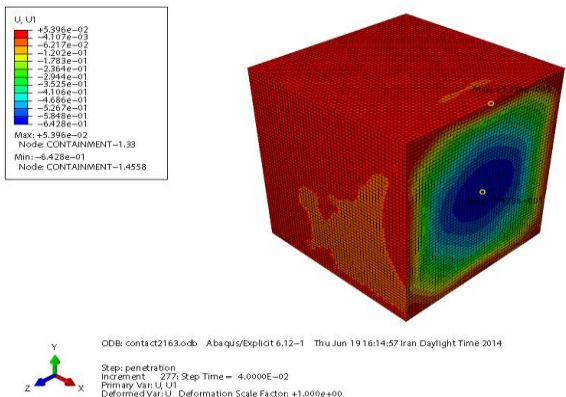


**نمودار ۳.** برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد فانتوم به محل ۲



جدول ۱۳. حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۳

بیشترین به کمترین جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۳ (متر)	زمان
فرم ۱ (۰/۶۹۷)	فرم ۲ (۰/۷۰۰)
	۰/۰۴ (ثانیه)

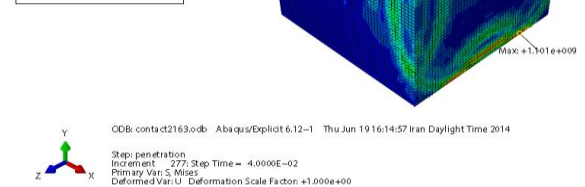


شکل ۸. جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۳

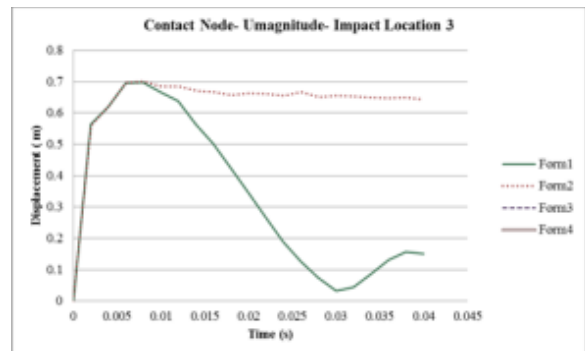
### ۳-۴ محل برخورد ۴

در بررسی برخورد هواپیما با زاویه ۴۵ درجه به سقف یا گنبد جدول (۱۵) نشان می‌دهد که بیشترین میزان تنش کششی و فشاری متعلق به فرم ۲ بوده و این مقادیر به ترتیب عبارت‌اند از: ۹/۴۱E+۰۹ و ۵/۵E+۰۸ پاسکال. همچنین با توجه به شکل (۹) مشخص است که بیشترین تنش ون میزس در کل سازه به فرم ۲ تعلق دارد که برابر است با ۶/۱۶۶E+۰۸ پاسکال. در جدول (۱۶) می‌توان مشاهده کرد که تنش ون میزس در نقطه برخورد و در زمان ۰/۰۴ ثانیه پس از اصابت هواپیما به نقطه ۴ به ترتیب در هر دو فرم برابر است با ۴/۰۳E+۰۹ و ۵/۰۶E+۰۹ پاسکال، که عدد مرتبط با فرم ۲ به مراتب بزرگ‌تر می‌باشد. با توجه به جدول (۱۷) جابه‌جایی ایجاد شده در محل برخورد در فرم ۱ بسیار بیشتر از فرم ۲ می‌باشد. اما نمودار (۵) و جدول (۱۸) حاکی از آن است که برآیند جابه‌جایی در فرم ۲ بیش از فرم ۱ می‌باشد. با شکل (۱۰) جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۴ در فرم ۲ بیش از فرم ۱ است.

از تحلیل و بررسی این نوع ضربه با زاویه ۴۵ درجه به سقف مشخص می‌گردد فرم گنبدی عملکرد بهتری دارد و کمتر آسیب‌پذیر می‌باشد.

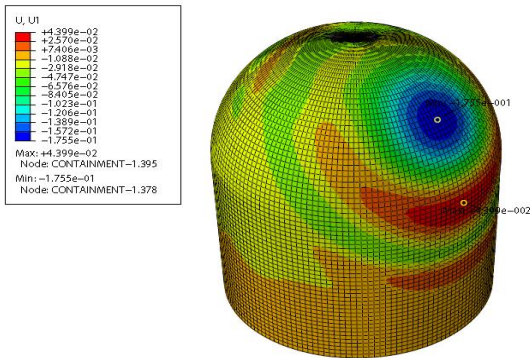


شکل ۷. تنش ون میزس برخورد به محل ۳



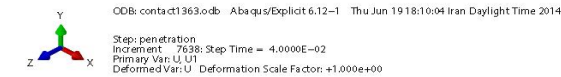
نمودار ۴. برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد فانتوم به محل ۳





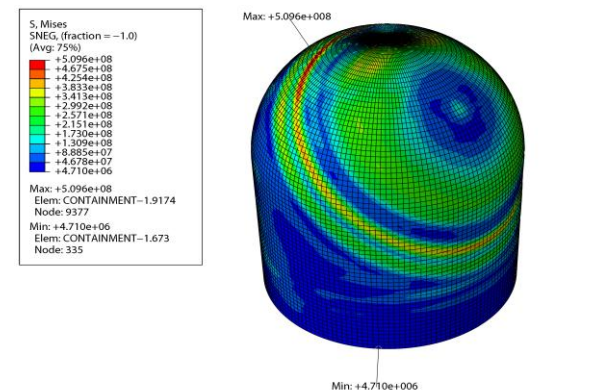
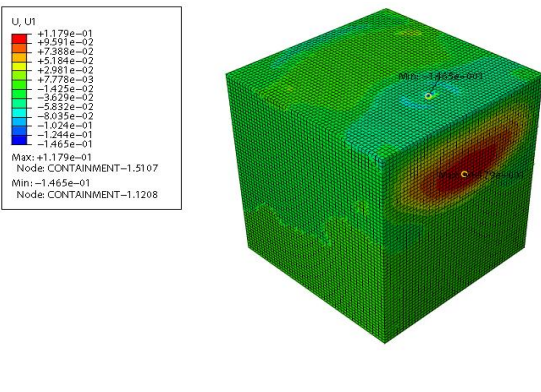
جدول ۱۵. حداکثر تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۴

زمان	تنش	بیشترین به کمترین تنش در راستای برخورد در نقطه برخورد به محل ۲ (پاسکال)	
۰/۰۴	تنش کششی	فرم ۱ (۴/۲۷E+۰۹)	فرم ۲ (۵/۴۱E+۰۹)
(ثانیه)	تنش فشاری	فرم ۱ (۳/۹E+۰۸)	فرم ۲ (۵/۵E+۰۸)

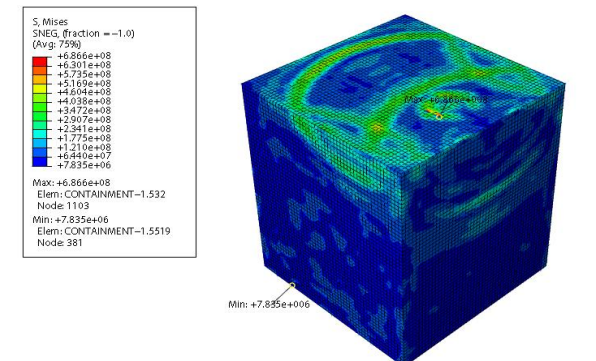
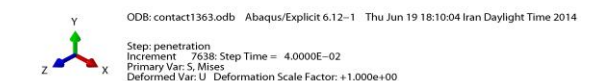
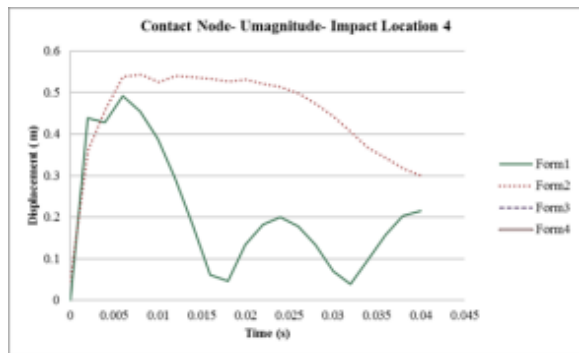


جدول ۱۶. حداکثر تنش ون میزس در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۴

زمان	بیشترین به کمترین تنش ون میزس در نقطه برخورد - محل برخورد ۴ (پاسکال)	
۰/۰۴	فرم ۱ (۴/۰۳E+۰۹)	فرم ۲ (۵/۰۶E+۰۹)
(ثانیه)		



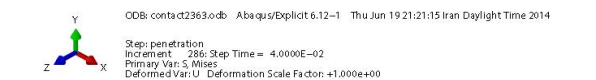
شکل ۱۰. جابه‌جایی در راستای برخورد فانتوم به محل ۴



نمودار ۵. برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد فانتوم به محل ۴

جدول ۱۷. حداکثر جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۴

زمان	بیشترین به کمترین جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۴ (متر)	
۰/۰۴	فرم ۱ (۰/۳۴۵)	فرم ۲ (۰/۰۸۷)
(ثانیه)		



شکل ۹. تنش ون میزس برخورد به محل ۴

a Dome of a Nuclear Reactor Containment Vessel"; Nucl. Eng. Des. 1975, 32, 386-393.

- [9] INVAP "SAR Chapter 4 Buildings and Structures-ANSTO Replacement Research Reactor Facility"; Document Number: RRRP-7225-EBEAN-002-REV0-Chapter-04 Revision (2004).
- [10] ANSTO "Q & A-ANSTO Research Reactor Alleged Security Threats"; ANSTO Home, 2003.
- [11] Jankowiak, T.; Lodygowski, T. "Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model"; Foundations of Civil and Environmental Engineering, University of Technology, Poznan, Poland, 2005.
- [12] Lo Frano, R.; Forasassi, G. "Preliminary Evaluation of Aircraft Impact on a Near Term Nuclear Power Plant"; Nucl. Eng. Des. 2011, 241, 5245-5250.
- [13] Degen, P.; Furrer, H.; Jemielewski, J. "Structural Analysis and Design of a Nuclear Power Plant Building for Aircraft Crash Effects"; Nucl. Eng. Des. 1976, 37, 249-268.
- [14] Abbas, H.; Paul, D. K.; Godbole, P. N.; Nayak, G. C. "Aircraft Crash upon Outer Containment of Nuclear Power Plant"; Nucl. Eng. Des. 1996, 160, 13-50.
- [15] Iqbal, M. A.; Rai, S.; Sadique, M. R.; Bhargava, P. "Numerical Simulation of Aircraft Crash on Nuclear Containment Structure"; Nucl. Eng. Des. 2012, 243, 321-335.
- [16] Riera, J. D.; Zorn, N. F.; Schueller, G. I. "An Approach to Evaluate the Design Load Time History for Normal Engine Impact Taking into Account the Crash-Velocity Distribution"; Nucl. Eng. Des. 1982, 71, 311-316.
- [17] <http://www.aerospaceweb.org/aircraft/fighter/f4/>.
- [18] Abbas, H.; Paul, D. K.; Godbole, P. N.; Nayak, G. C. "Reaction-Time Response of Aircraft Crash"; Comp. Strategy 1995, 5, 809-817.
- [19] <http://ravaji.com/abaqus/truss>.

جدول ۱۸. حداکثر برآیند جابه‌جایی در راستای برخورد در نقطه برخورد فرم‌های هندسی برای محل برخورد ۴

زمان	بیشترین به کمترین برآیند جابه‌جایی در نقطه برخورد - محل برخورد ۴ (متر)	
۰/۰۴ (ثانیه)	فرم ۲ (۰/۵۴۲)	فرم ۱ (۰/۴۹۲)

#### ۴. نتیجه‌گیری

تنها روش مناسب برای پیش‌بینی پاسخ غیر خطی فرم هندسه‌ای پیچیده ساختمان محفظه ایمنی بتنی یک راکتور به نیروی خارجی برخورد هواپیما، تجزیه و تحلیل المان محدود غیر خطی است. بدین منظور نیاز به بررسی حالت‌های مختلف برخورد در محل‌های گوناگون می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده و با مدل‌سازی عددی که در این راستا در این تحقیق صورت گرفت، مشخص شد که به طور کلی برای ساختمان محفظه ایمنی راکتور، میزان آسیب‌پذیری فرم هندسی مکعبی با سقف صاف در مقابل برخورد یک جنگنده نسبت به فرم هندسی با بدنه استوانه‌ای و سقف گنبدی در اکثر محل‌ها بیشتر است. اما محل تلاقی گنبد با دیواره استوانه‌ای نقطه ضعف فرم استوانه‌ای نسبت به فرم مکعبی است. در این محل برخورد، تغییر شکل ایجاد شده در اثر برخورد هواپیما به محل تلاقی گنبد و بدنه استوانه‌ای به مراتب بیشتر از این تغییر شکل در محل تلاقی سقف صاف و بدنه مکعبی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق بیان می‌کند که فرم استوانه‌ای نسبت به فرم مکعبی، آسیب‌پذیری کمتری در برخورد یک جسم از خود نشان می‌دهد به جز در نقطه اتصال گنبد به بدنه. لازم به ذکر است که این آسیب‌پذیری را می‌توان با طراحی دقیق و مناسب جزئیات و اتصالات سازه‌ای برطرف نمود.

#### ۵. مراجع

- [1] Jeon, S. J.; Chul-Hun Chung, C. H. "Axisymmetric Modeling of Prestressing Tendons in Nuclear Containment Dome"; Nucl. Eng. Des. 2005, 235, 2463-2476.
- [2] IAEA "Safety Analysis for Research Reactors"; Safety Reports Series No. 55, IAEA, Vienna, 2008.
- [3] IAEA "Siting of Research Reactors"; IAEA-TECDOC-403, IAEA, Vienna, 1987.
- [4] Chelapati, C. V.; Kennedy, R. P. "Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants"; Nucl. Eng. Des. 1972, 19, 333-364.
- [5] Hessheimer, M. F.; Dameron, R. A. "Containment Integrity Research at Sandia National Laboratories: An Overview"; NUREG/CR-6906, U.S. Nuclear Regulatory Commission; Washington, USA, 2006.
- [6] Hu, H.; Liang, J. "Ultimate Analysis of BWR Mark III Reinforced Concrete Containment Subjected to Internal Pressure"; Nucl. Eng. Des. 2000, 195, 1-11.
- [7] Lundqvista, P.; Nilsson, L. "Evaluation of Prestress Losses in Nuclear Reactor Containments"; Nucl. Eng. Des. 2011, 241, 168-176.
- [8] CHOO, Y. "Pressures Due to Post-Tensioned Tendons on