

تجزیه و تحلیل انفجار در ساختمان گنبد خستی حرم امام رضا (ع) با هدف مدیریت عوارض

عباس مومن زاده^۱ و امیر محمودزاده^۲ و ابراهیم علامتیان^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

چکیده: امروزه، به دلیل افزایش حملات تروریستی در سراسر جهان و احتمال بمب گذاری در نزدیکی ساختمان‌ها و اماکن مذهبی قدیمی، مدیریت عوارض ناشی از انفجار مورد توجه ویژه قرار گرفته است. حرم امام رضا (ع) از بسیاری جهات دارای اهمیت است. جدا از خاستگاه تاریخی بنا که عامل مشترکی بین بناهای تاریخی است، ارزش‌های مذهبی و استفاده مداوم از آن باعث تمایز بیشتر آن از سایر بناهای تاریخی می‌شود. در این مقاله، تأثیر انفجار بر میزان تخریب ساختمان گنبد خستی حرم امام رضا (ع) بررسی شده است. شبیه سازی انفجار با نرم افزار Autodyn و شبیه سازی گنبد حرم با نرم افزار Abaqus انجام شده است. نتایج نشان داد که اگر ۱۰ کیلوگرم TNT در وسط گنبد و روی زمین منفجر شود، هیچ آسیب جدی به گنبد وارد نمی‌شود و سازه پایداری خود را حفظ خواهد کرد. اما اگر انفجار در مجاورت دیوارها باشد، باعث از بین رفتن دیوار و در نتیجه تخریب گنبد می‌شود.

واژگان اصلی: حرم امام رضا (ع)، مدیریت عوارض، بمب‌گذاری.

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده عمران، پژوهشگاه شاخص پژوه، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول)

A_momenzade@yahoo.com

۲. استاد، پژوهشکده عمران، پژوهشگاه شاخص پژوه، اصفهان، ایران.

۳. استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.

مقدمه

شناسایی خطر صدمات احتمالی نقش مهمی در آماده سازی برای مواجهه و خنثی کردن اثرات منفی حملات تروریستی به مناطق شهری دارد. اگر شناخت ابعاد این خطرات برای مناطق شهری و آسیب احتمالی آن به درستی در نظر گرفته شده باشد، می توان سطح و نوع مقابله با این صدمات را تعریف و عوارض ناشی از آن را مدیریت نمود (Bing and Others, 2009: 455-469). هدف از آسیب شناسی، شناسایی و استاندارد سازی امکانات و راه حل- های محافظت از ساختمان ها در برابر حملات تروریستی و اثرات انفجار است. مقاومت یک ساختمان در برابر موج انفجار به شکل و فرم سقف ساختمان، تعداد روزنه ها، نوع و مقدار مواد انفجاری مورد استفاده در ساختمان بستگی دارد. در نتیجه، مطالعه و ارزیابی شکل و فرم سقف های ساختمان در برابر پیامدهای انفجار مهم است. با توجه به اینکه در بیشتر حملات تروریستی، انفجار در سطح زمین انجام می شود، بر سقف ساختمان های با ارتفاع کم، بسیار تأثیر می گذارند. در ساختمان های با ارتفاع سقف بلند، امواج انفجار بیشتر بر روی دیوارها و تخریب آن ها مؤثر است. سقف ساختمان ها با اشکال متنوعی مورد استفاده می باشد و در نتیجه پاسخ آن ها در برابر اثرات انفجار متفاوت است. مطالعات پیشین نشان داده است که انتخاب شکل و فرم سقف ساختمان می تواند در بهبود رفتار سازه در انفجار و کاهش آسیب تأثیر به سزایی داشته باشد (Elyasian, 2010).

لوجینیونی تحقیقات زیادی در مورد بررسی تأثیر انفجار انجام داده است. در تحقیقات ایشان، رفتار سطوح بتنی تحت تأثیر بارهای انفجاری بررسی شده است. در تحقیق ایشان، ابتدا دال بتنی تحت بارگذاری انفجاری به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است و سپس نتایج را با مدل سازی مسئله با استفاده از نرم افزار Autodyn و Abaqus مقایسه و در نتیجه صحت مدل سازی آن ها را اثبات کرد. در ادامه، ایشان رابطه ای بین قطر حفره ایجاد شده در اثر انفجار و وزن و محل انفجار ارائه نموده است. در نهایت، مقایسه ای بین مدل ها و نرم افزارهای استفاده شده انجام شده و در هر مورد نقاط ضعف و قوت نرم افزار بررسی شده است (Myers and Others, 2010). گیگن و توگه در سال ۲۰۱۰ تحقیقی در مورد هندسه ساختمان و همچنین تأثیر محیط ساختمان در جلوگیری از ورود امواج انفجاری به داخل ساختمان انجام دادند و نتیجه گرفتند که در اشکال هندسی مختلف، بیشترین فشارهای لرزاننده، به محل انفجار، زوایای شوک انفجاری و فاصله بستگی دارد. بر اساس نتایج ایشان،

شکل عناصر یک سازه قطعاً می‌تواند اثرات بارهای انفجاری را کاهش دهد (Gebben and Döge, 2010). اثرات اشکال مختلف ساختمان مانند اشکال مکعب، استوانه، نیم دایره و منشور بر پاسخ آن‌ها به بارهای انفجاری، توسط برکت و هترینگتون بررسی شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که افزون بر اجزای ساختمان، فرم‌های معماری نیز تأثیر به‌سزایی در کاهش تأثیر انفجارها بر ساختمان‌ها دارد (Zhang and Others, 2012: 10-20). فولادگر و یزدانی نیز تحقیقات مشابهی برای بررسی اثرات فرم ساختاری بر توزیع تنش ناشی از بار انفجاری انجام داده‌اند (Fouladgar and Yazdani chamzini, 2011: 459-483).

سازه‌های بنایی نوعی سازه هستند که در ساخت آن‌ها از موادی مانند آجر، سنگ مرمر، سنگ آهک، بلوک سیمانی، بلوک شیشه‌ای، گچ و کاشی استفاده می‌شود. به دلیل قدمت بیشتر اماکن مذهبی و به ویژه حرم رضوی(ع)، مصالح این مکان‌ها معمولاً از مصالح سنتی است (Fesharaki and Others, 2011). حرم امام رضا (ع) از بسیاری جهات دارای اهمیت است. جدا از خاستگاه تاریخی بنا که عامل مشترکی بین بناهای تاریخی است، ارزش‌های مذهبی و استفاده مداوم از آن باعث تمایز بیشتر آن از سایر بناهای تاریخی می‌شود. از آنجا که تجربه تلخ انفجار در حرم مطهر امام رضا (ع) در خرداد ۱۳۷۳، هنوز از خاطره‌ها نرفته و با توجه به افزایش حملات تروریستی و بمب‌گذاری در کشورهای جهان و به ویژه در کشورهای همسایه ایران، پیشگیری و اطلاع دقیق از بناهای تاریخی و به ویژه اماکن متبرکه اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. می‌توان با آگاهی، مدل سازی و آزمایش، به‌ویژه در بحث پدافند عامل و غیر عامل از کیفیات و زمینه‌های این موضوع آگاهی جست و آمادگی لازم برای این دست اقدامات خرابکارانه را برای اماکن مذهبی و فرهنگی از پیش کسب کرد. در این مقاله، تأثیر محل انفجار بر میزان تخریب ساختمان گنبد خشتی حرم امام رضا (ع) بررسی شده است. شبیه سازی انفجار با نرم افزار Autodyn و شبیه سازی گنبد با نرم افزار Abaqus انجام شده است.

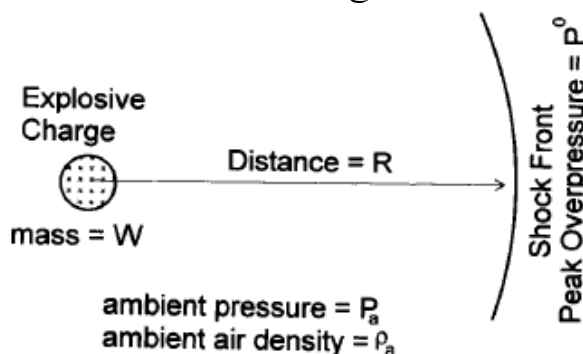
۲- چارچوب نظری و روش پژوهش

۲-۱- تخمین نیروی انفجار

انفجار با افزایش ناگهانی حجم و آزاد شدن ناگهانی انرژی همراه است که معمولاً با افزایش دما و آزاد شدن گاز همراه است. به صورت کلی در منابع علمی، برای تخمین نیروی انفجار دو روش استاندارد ذکر شده است.

۱) تخمین نیروی انفجار با روش تحلیلی

در این روش می‌توان از معادلات انفجاری برای محاسبه تأثیر انفجارها در فواصل مختلف استفاده کرد. رابطه ارائه شده به شرح زیر است:



شکل شماره ۱: پارامترهای موثر در تجزیه و تحلیل نیروی انفجاری
(Liu and Others, 2003: 305- 322).

$$\left[\frac{P^0}{P_a} \right] = f \left[\frac{R}{\sqrt{W}} \right]$$

1

در معادله فوق، P_a فشار محیط، P^0 فشار انفجار، R فاصله انفجار، W مقدار ماده منفجره و T_a دمای محیط است (Liu and Others, 2003: 305- 322). با استفاده از این روش برای ۱۰ کیلوگرم TNT، فشار در محل انفجار (۰٫۱ میلی متر از مرکز انفجار) $Kbar$ ۷۸ معادل ۷۸۰۰۰ برابر فشار محیط یا حدود $7800 MPa$ است.

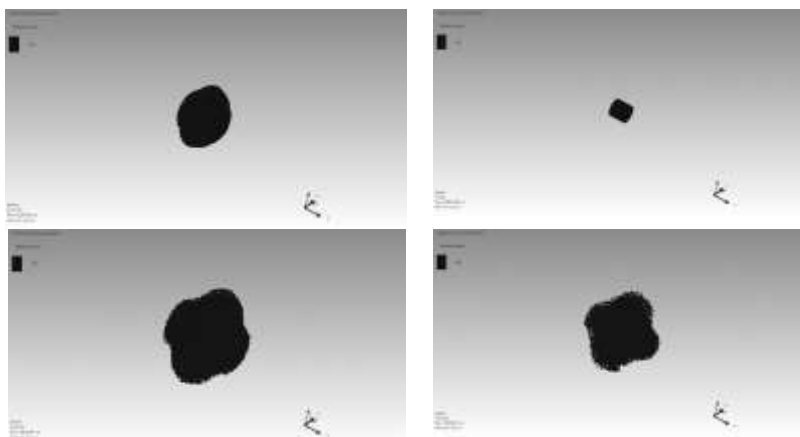
۲) تخمین نیروی انفجار با استفاده از Autodyn

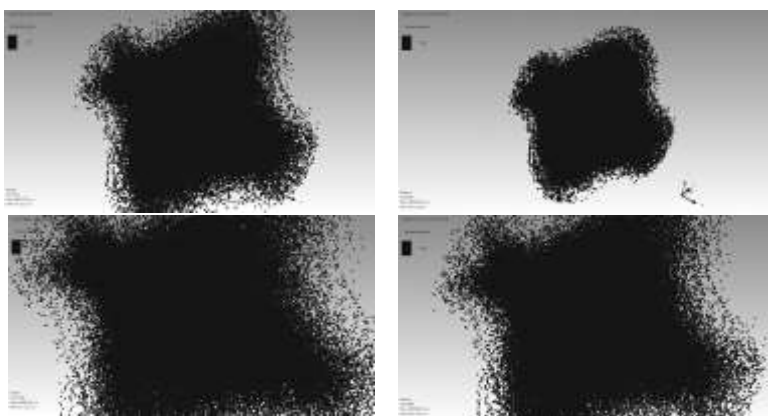
شبیه سازی دقیق فرآیند انفجار به سه موضوع بستگی دارد: انتخاب روش عددی مناسب، انتخاب مدل ماده مناسب و در دسترس بودن با دقت بالای ضرایب ماده منفجره. به طور کلی، سه روش عددی اویلری، لاگرانژی و SPH برای تجزیه و تحلیل روند انفجار وجود دارد. در تجزیه و تحلیل اویلری، مش بندی در هنگام تغییر شکل استاتیک ثابت می‌ماند. این روش که وقت گیر است، معمولاً برای محاسبه جریان سیال استفاده می‌شود. در تجزیه و تحلیل لاگرانژی مش با ماده تغییر شکل می‌دهد. در این روش میزان تجزیه و تحلیل بالاتر و سطح تماس مواد مختلف با هم به نحو مناسبی تعریف شده است. استفاده از این روش برای مدل سازی روند انفجار نیاز به تعریف الگوریتم مناسب فرسایش دارد. این

الگوریتم بر این اساس کار می‌کند که منطقه لاگرانژ که به درجه مشخصی از کرنش (معمولاً ۱۵۰٪) می‌رسد، حذف شود. مقدار این کرنش توسط کاربر تعریف می‌گردد.

اگرچه این روش ایزاری مناسب برای مدل سازی فرآیند انفجار است، اما باید توجه داشت که این روش توانایی شبیه سازی دقیق فیزیک واقعی مسئله را ندارد. روش SPH یک راهکار نسبتاً جدید برای تجزیه و تحلیل دینامیکی مواد است که در واقع یک راهکار خاص از روش لاگرانژی است و قادر به تجزیه و تحلیل دقیق اندرکنش مواد مختلف است و در استفاده از مواد مختلف انعطاف پذیر است. همچنین، به دلیل غیر سلول بودن روش SPH، مشکلات مربوط به تغییر شکل عناصر در معرض تغییر شکل شدید در روش لاگرانژی معمول، در این روش موجود نیست و لازم نیست الگوریتم فرسایش تعریف شود. به طور کلی، این روش قدرت مدل سازی فرآیند انفجار و غوطه وری مواد را دارد که به فیزیک واقعی مسئله نزدیک‌تر است (Borve and Others, 2009). برای دستیابی به نتایج دقیق، لازم است از یک ذره با اندازه ثابت برای مدل سازی SPH استفاده شود.

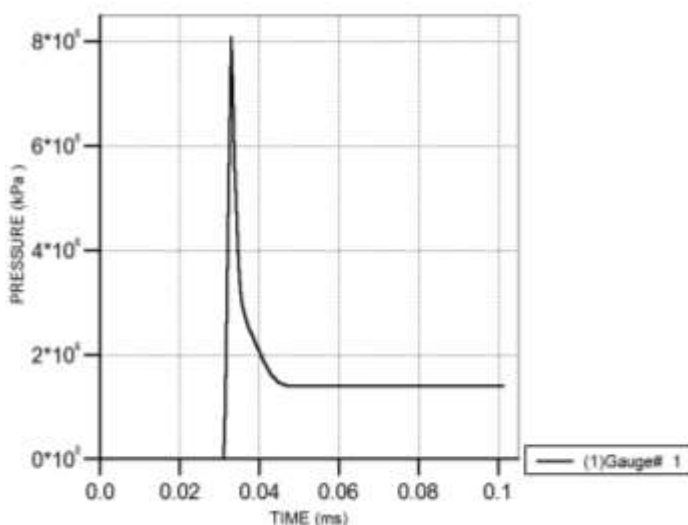
در این مقاله از نرم افزار Autodyn و روش SPH استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار Autodyn، انفجاری معادل ۱۰ کیلوگرمی TNT در سطح زمین مدل می‌شود. شکل شماره ۲، انفجار مدل سازی شده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.





شکل شماره ۲: مدل سازی انفجار با استفاده از نرم افزار autodyn

به منظور بررسی دقیق نتایج مدل سازی، در شکل شماره ۳، نمودار فشار در یک نقطه در مجاورت ماده منفجره در طول زمان انفجار نشان داده شده است. مشاهده می شود که حداکثر فشار در حدود 8000 MPa است، که در کسری از ثانیه (حدود 0.01 میلی ثانیه) به یک سطح می رسد. در حقیقت، یک موج انفجار ایجاد می شود که موج سریع حرکت کرده و به سطوح فشار وارد می کند.



شکل شماره ۳: نمودار فشار به یک نقطه چسبیده به ماده منفجره در زمان انفجار

همانطور که در رابطه تحلیلی دیده می شود، موج انفجار با افزایش شعاع کاهش می یابد. این کاهش قدرت موج انفجار ارتباط مستقیمی با توان سه شعاع دارد.

۳- یافته‌های پژوهش

۳-۱- مدل سازی گنبد

سقف حرم در قسمت گنبد دو اسکلت است. این گنبد دارای دو پوشش است: پوشش اول، سقف از پایین (داخل حرم) قابل رویت است و پوشش دوم بر روی پوشش اول قرار گرفته و با آجرهای طلائی پوشانده شده و در معرض دید عموم قرار گرفته است. ابعاد گنبد به صورت جدول شماره ۱ است.

جدول شماره ۱: ابعاد هندسی گنبد حرم

| | |
|-------------------------------------|---------|
| ارتفاع از کف حرم تا پایین سقف | 18.8 m |
| ارتفاع از کف حرم تا انتهای گنبد حرم | 31.20 m |
| قطر گنبد حرم از سطح خارج | 42.1 m |
| ارتفاع گنبد | 16.40 m |

برای مدل سازی آجر و ملات در Abaqus، از دو روش مدل سازی خرد و مدل سازی کلان استفاده می‌شود. ابتدا از هر آجر الگو گرفته و تعداد زیادی از عناصر جمع شده برای مدل سازی آجر استفاده می‌شود. در مدل سازی از تفکیک آجرها و ملات‌ها صرف نظر می‌شود و از یک عنصر کلی با خواص متوسط آجر و ملات استفاده می‌شود.

۳-۱-۱- خصوصیات مواد مورد استفاده در گنبد

به منظور دستیابی به خصوصیات فیزیکی مواد، از ۵ نمونه $20 \times 5 \times 20$ سانتیمتری استفاده شده است. با یک لایه ملات به ضخامت ۲۰ میلی متر، قطعه‌ای از مصالح ساختمانی تشکیل می‌شود و آزمایشات لازم انجام می‌شود و مشخصات مواد با توجه به جدول شماره ۲ به دست می‌آید و در مدل سازی توسط نرم افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین لازم به ذکر است که ضریب پواسون استفاده شده در این تحقیق، با استفاده از مطالعات قبلی در مورد تأثیر فرآیندهای آزمون در تعیین خصوصیات مکانیکی آجرهای خستی بوده است.

جدول شماره ۲: مشخصات مصالح

| زاویه انبساط | Flow Stress Ratio (K) | زاویه اصطکاک (β) | Compression Strength f_c | Tension Strength f_t | Poisson Ratio ν | مدول یانگ E | چگالی ρ |
|--------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|-------------|------------------------|
| 20 | 0.8 | 46 | 3.5 Mpa | 0.38 Mpa | 0.15 | 1900 Mpa | 1800 kg/m ³ |

۳-۱-۲- شرایط مرزی

از آنجا که دیوارهای اطراف آن بسیار ضخیم و ثابت به زمین هستند، در شبیه سازی، پایین دیوار ثابت است و درجه‌ای از آزادی وجود ندارد.

۳-۱-۳- مطالعه تعداد سلول

از عناصر چهار ضلعی خطی از نوع RIEXAX برای شبکه سازی استفاده شده است. پس از مش‌بندی، تجزیه و تحلیل حساسیت مدل باید نسبت به ابعاد و تعداد سلول‌های محاسباتی انجام شود. در این تحقیق، این کار با مدل سازی یک مسئله نمونه با تراکم‌های مختلف سلول‌های محاسباتی و مقایسه نتایج با یکدیگر انجام می‌شود. تعداد عناصر مورد استفاده ۴۱۴۳۵۱ مورد است که با توجه به حجم عظیم سازه، زمان زیادی برای حل نیاز دارد. شکل شماره ۴ عناصر مدل سازی را نشان می‌دهد.

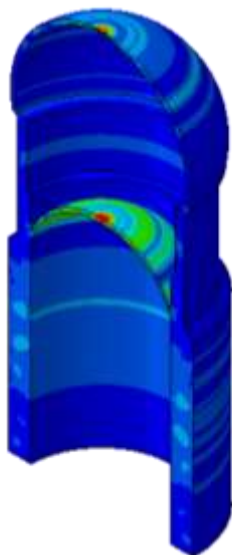


شکل شماره ۴: سلول بندی مدل

۳-۲- نتایج تحلیلی

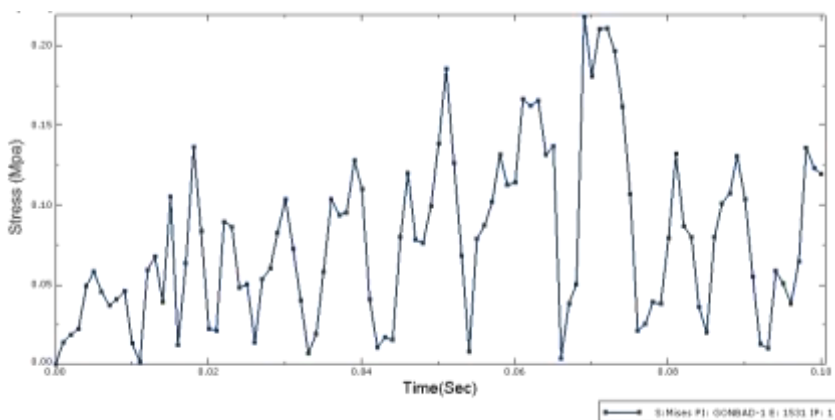
۳-۲-۱- مواد منفجره در وسط سازه

در این حالت، انفجار در زمین و مرکز گنبد اتفاق می‌افتد. بنابراین فاصله بین دیوارها تا مرکز انفجار حدود ۶ متر و سقف حدود ۱۸ متر است. در شکل شماره ۵ توزیع تنش فون میسر بر روی گنبد نشان داده شده است.



شکل شماره ۵: توزیع تنش فون میسرز در گنبد

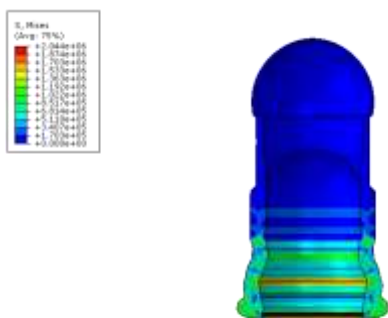
همانطور که مشخص است، فشار بر روی پوسته بیش از بقیه محل‌ها است. این رفتار به دلیل تمرکز تنش در آن نقاط است. حداکثر سطح تنش در بالای گنبد حدود ۲,۳ بار یا ۰,۲۳ مگاپاسکال است. مشخص است که میزان تنش ناشی از مقاومت کششی و مقاومت فشاری مواد کمتر است و بنابراین در این حالت نمی‌توان ساختار گنبد را تغییر شکل داد. نمودار تنش فون میسرز در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، حداکثر مقدار تنش حدود ۰,۲ MPa است که از مقاومت کششی مواد کمتر است.



شکل شماره ۶: تغییرات تنش فون میسرز با زمان در گنبد

۳-۲-۲- مواد منفجره در کنار دیوار

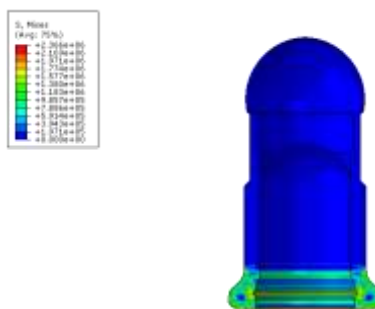
در این حالت، انفجار در روی زمین و کنار دیواره‌های گنبد رخ می‌دهد؛ بنابراین فاصله بین دیوارهای مرکز انفجار حدود ۱۰ سانتی متر و تا سقف حدود ۱۸ متر است. با استفاده از روابط، برای مقدار $Z = 0,07$ شعاع ۱۰ سانتی‌متر و انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT، فشاری معادل ۴۰۰ بار در ۰,۰۲ میلی ثانیه ایجاد می‌کند. تنش ایجاد شده در این حالت در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در این حالت تنش ایجاد شده در دیوار بیشتر از تنش مجاز است و تخریب دیوار ایجاد می‌گردد.



Step: Step-1
Increment: 215; Step Time = 3.8027E-02
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U; Deformation Scale Factor: +5.000e+02

شکل شماره ۸: صدمه به دیوار در ۰,۰۱

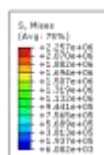
ثانیه پس از انفجار



Step: Step-2
Increment: 88; Step Time = 3.0488E-03
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U; Deformation Scale Factor: +5.000e+02

شکل شماره ۹: تخریب دیوار را در

۰,۰۰۳ ثانیه پس از انفجار



Step: Step-3
Increment: 636; Step Time = 3.0005E-02
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U; Deformation Scale Factor: +5.000e+02

شکل شماره ۱۰: صدمه به دیوار در ۰,۰۳ ثانیه پس از انفجار

۴- نتیجه گیری

امروزه، به دلیل افزایش حملات تروریستی در سراسر جهان و احتمال بمب گذاری در نزدیکی ساختمان‌ها و اماکن مذهبی قدیمی، مدیریت عوارض ناشی از انفجار مورد توجه ویژه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت فوق‌العاده حرم امام رضا (ع) در ایران و جهان اسلام و به ویژه برای شیعیان، در این تحقیق، تأثیر انفجار بر روی گنبد حرم امام رضا (ع) با استفاده از مدل سازی توسط نرم افزارهای *autodyn* و *Abaqus* بررسی شد. با انجام آزمایش‌ها، ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مواد به کار رفته در ساختار گنبد تعیین شد. با تعیین ویژگی‌های مواد و همچنین مدل گنبد و به کمک نمودارهای فشار-زمان، زمان حداکثر تنش ایجاد شده به دست آمد و حد تحمل ساختار گنبد در برابر موج انفجار به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت انفجار ۱۰ کیلوگرم TNT در وسط گنبد و بر روی زمین، هیچ آسیب جدی به گنبد وارد نمی‌شود و تنش ایجاد شده کمتر از تحمل مواد است. اما اگر انفجار در مجاورت دیوارها باشد، باعث تخریب دیوار و در نتیجه ایجاد خسارت به گنبد می‌گردد. از آنجا که تجربه تلخ انفجار در حرم مطهر امام رضا (ع) در خرداد ۱۳۷۳، هنوز از خاطره‌ها نرفته، می‌توان با مدل سازی و آزمایش، به‌ویژه در بحث پدافند عامل از کیفیات و زمینه‌های این موضوع آگاهی جست و آمادگی لازم برای این دست اقدامات خرابکارانه را برای اماکن مذهبی و فرهنگی از پیش کسب کرد.

- ABAQUS user's manual. Hibbit, Karlsson, Sorensen. Inc; 2014.
- Bing, L. Tso-Chien, P. and Anand, N. (2009). A case study of the effect of cladding panels on the response of reinforced concrete frames subjected to distant blast loadings, Nuclear Engineering and Design, Volume 239, Issue 3, March 2009, Pages 455-469.
- Borve, S., Bjerke, A., Omang, M., Svinsas E. (2009). A Comparison of AUTODYN and RSPH on Two-dimensional Shock Waves Problems, Norwegian Defense Research Establishment, <https://ffipublikasjoner.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12242/2255/09-00155.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Elyasian, I. (2010). Rehabilitation and Retrofit Structures for Explosive Loads Proceedings, 3rd International Conference on Seismic Retrofitting, Tabriz, Iran, 20-22 October 2010.
- Fesharaki, S.J., Araghizadeh, M., Bitarafan, M. (2011). Assessment the effect of architecture form on the way of structural vulnerability, the First Conference of Landscape Architecture and Urban Planning Passive Defense, Tehran.
- Fouladgar, M.J. Yazdani chamzini, A. (2011). An integrated model for prioritizing strategies of the Iranian mining sector, Technological and Economic Development of Economy, Volume 17, Issue 3, pp 459–484.
- Gebbeken Norbert and Torsten Döge (2010). Explosion Protection—Architectural Design, Urban Planning and Landscape Planning, International Journal of Protective Structures, pp 1- 22, DOI: 10.1260/2041-4196.1.1.1.
- Liu, M.B., Liu, G.R., Zong, Z., Lam, K.Y. (2003). Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology, Computers and Fluids Journal, Volume 32, Issue 3, pp 305-322.
- Myers, John J. Abdeldjelil Belarbi and Khaled A. El-Dubiety (2010). Blast Resistance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers, Department of Civil Engineering University of Missouri – Roll, <https://www.semanticscholar.org/paper/Blast-Resistance-of-Un-Reinforced-Masonry-Walls-Myers-Belarbi/3d29571580dcafeb4fc95e9ede049d90a8bea0b6>.
- Zhang, A. Wen-shan Y. and Xiong-liang Y. (2012). Numerical Simulation of Underwater Contact Explosion, Applied Ocean Research Journal, Volume 34, pp 10- 20.