

مقاوم‌سازی درب سازه‌های امن با استفاده از ساختارهای هندسی چند قوسی

حسن صالحی

استادیار دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹)

چکیده

در مقاله حاضر عملکرد درب‌های چند قوسی در برابر انفجار با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داینما مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از ساختار چند قوسی علاوه بر کاهش وزن، حجم مصالح و در نتیجه کاهش هزینه تأمین و ساخت درب، باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکز تنش در مقایسه با درب‌های رایج با سطح صاف می‌گردد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل تعداد قوس، ارتفاع قوس، وزن ماده منفجره، تأثیر انفجارات حوزه دور، ابعاد کلی درب، مصالح مورد استفاده در ساخت درب و نوع سخت‌کننده مورد استفاده جهت افزایش مقاومت آن است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد قوس از ۱ تا ۵ قوس، حداکثر جابجایی ایجاد شده در مرکز درب تا حدود ۸۶٪ کاهش پیدا می‌کند. با افزایش ارتفاع قوس از ۵ به ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، بر اساس تعداد قوس‌های مختلف، حداکثر جابجایی مرکز درب بین ۵ و ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. در میان روش‌های مختلف مقاوم‌سازی درب، استفاده از رویه چند قوسی، افزایش بیشتری در مقاومت ایجاد می‌کند. این روش با مصرف فولاد کمتری این مقاومت را ایجاد کرده و دارای صرفه اقتصادی بیشتری است.

کلیدواژه‌ها: بار انفجار، درب ضد انفجار، تحلیل عددی، لایه چند قوسی، مقاوم‌سازی.

Reinforcing Doors of the Safe Constructions Using Multi-Arch Geometric Structures

H. Salehi

Khatam-ul-Anbiya Air Defense University

(Received: 21/09/2022 , Accepted: 30/11/2022)

Abstract

In the present paper, the performance of multi-arched doors against explosion has been investigated using modeling in the LSDYNA finite element software. The use of multi-arch structure, in addition to reducing the weight and volume of materials and as a result reducing the cost of providing and building the door, causes a more uniform distribution of stress and reduces the concentration of stress in comparison with common doors with a smooth surface. The parameters investigated in this research include the number of arcs, the height of the arc, the weight of the explosive, the effect of far-field explosions, the overall dimensions of the door, the materials used in the construction of the door, and the type of hardener used to increase its resistance. The numerical modeling results show that by increasing the number of arcs from 1 to 5 arcs, the maximum displacement created in the center of the door decreases by about 86%. Increasing the height of the arch from 5 to 10 and 20 cm, based on the number of different arches, the maximum displacement of the center of the door decreases between 5 and 32%. Among the different methods of strengthening the door, the use of multi-arch method increases the resistance. This method creates this resistance by consuming less steel and is more economical.

Keywords: Explosion Load, Explosion-Proof Door, Numerical Analysis, Multi-Arch Layer, Strengthening, Reinforcing.

۱. مقدمه

می‌گردد [۱۴]. بنابراین محققان متعددی در تلاش برای رفع این مشکل برآمدند. تیمش و همکاران [۱۵] بدین منظور پنج حالت درب با رویه‌های تخت (مستطیلی)، مثلثی، دوزنقه‌ای و دو نوع سهمی با ارتفاع‌های ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که در تمام پیکربندی‌ها، جابجایی در مرکز درب در مقایسه با درب مستطیلی (که به‌عنوان درب پایه در نظر گرفته شده بود) کاهش یافت. دلیل چنین رفتاری به افزایش سختی درب‌ها نسبت داده شد. همچنین تقریباً با حفظ جرم یکسان در همه پیکربندی‌ها، فرکانس طبیعی آن‌ها در مقایسه با درب مستطیلی افزایش یافت. پیمان و طولابی [۱۶] در مطالعه خود ثابت نمودند که درب‌های قوسی در مقابل انفجار دارای عملکرد بهتری نسبت به درب‌های تخت هستند. همچنین مطرح نمودند که برای بهبود رفتار درب ضد انفجار، بهتر است که محور دوران قوس موازی با بعد کوچک‌تر آن باشد.

هسی و همکاران [۱۷] با استفاده از تحلیل المان محدود، تأثیر وجود سخت‌کننده بین دولایه درب را بررسی نموده و با مقایسه تنش‌های ایجادشده در سخت‌کننده‌ها و صفحات درب، تأثیر اندازه سخت‌کننده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که استفاده از پروفیل‌های فولادی I شکل به‌عنوان سخت‌کننده، قسمت اعظمی از انرژی حاصل از انفجار را جذب می‌کند. همچنین با افزایش اندازه سخت‌کننده‌ها مقدار تنش‌های ایجادشده در آن‌ها افزایش یافته و حداکثر تنش در سخت‌کننده‌های نزدیک به تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌گردد.

جوئل و همکاران [۶] فوم کامپوزیت سیلیکا - آلومینیوم^۱ را به‌عنوان هسته پنل ساندویچی استفاده نمودند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌دینا^۲ و اندازه‌گیری حداکثر جابجایی ایجادشده در مرکز پنل، رفتار دینامیکی پنل را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین تأثیر ضخامت هسته، مشخصات سخت‌کننده و نرخ کرنش را نیز بر رفتار دینامیکی پنل بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده هم‌زمان از سخت‌کننده و فوم کامپوزیت موجب کاهش جابجایی ایجادشده در مرکز پنل می‌شود. با افزایش ضخامت فوم‌ها، مقدار جابجایی ایجادشده در مرکز درب کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که استفاده از این فوم‌ها تأثیری در نرخ ایجاد کرنش‌ها^۳ ندارد.

مینگ و همکاران [۱۸] به‌منظور ساخت درب‌های ضد انفجار سبک، ترکیبی خاص از سخت‌کننده‌ها را در پنل‌های ساندویچی مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور از رویه‌های فولادی و سخت‌کننده‌های فیبر کربنی در زیر و از سخت‌کننده‌های فلزی در بین دو لایه استفاده نموده و مقاومت درب را با درب‌های معمولی

درب‌های ضد انفجار اغلب در مراکز نظامی، تجاری و صنعتی حساس مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین استفاده از این درب‌ها در مراکز سیاسی مانند کنسولگری‌ها نیز رایج است [۱]. انفجارهای پیش‌بینی نشده ناشی از حملات و انفجارهای تصادفی در نزدیکی ساختمان‌های نظامی و مراکز تجاری موجب ایجاد خسارت‌های فراوان و خرابی‌های متعدد در داخل و خارج سازه شده و آسیب‌های جانی و مالی فراوانی ایجاد می‌کند. در هدف‌های مستحکم همچون سازه‌های امن زیرزمینی نقاطی مانند ورودی‌ها، خروجی‌ها و نظایر آن اصلی‌ترین نقاط ضعف این سازه‌ها هستند. از طرفی وقوع انفجارهای تصادفی که بر اثر اتفاقات غیرمترقبه مانند تصادفات و خطاهای انسانی رخ می‌دهند نیز می‌توانند موجب بروز خسارت جانی و مالی جبران‌ناپذیری در این سازه‌ها گردد [۲، ۳]. محققان علاوه بر تلاش برای کاهش خسارات جانی، تحقیقات گسترده‌ای را برای کاهش خطرات نفوذ امواج انفجار به داخل سازه‌های حساس نموده و طرح‌های متعددی را در این زمینه مورد بررسی قرار داده‌اند [۴، ۵].

به‌دلیل کاربرد پنل‌های ساندویچی در صنایع هوایی، اتومبیل‌سازی، ساختمانی و نظامی، امروزه استفاده از پنل‌های چندلایه با هسته‌های مختلف به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است. درب‌های سنگین چندلایه دارای ساختار فولاد-بتن - فولاد، در مطالعات مختلف تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل رفتار دینامیکی مصالح تحت اثر انفجار [۶]، تأثیر انواع سخت‌کننده‌ها بر این درب‌ها [۷]، وجود رابط‌های فنری شکل‌پذیر با هدف کاهش اثر ضربه [۸]، ساختار تک قوسی چندلایه به همراه میراگر و تیوب‌های مجوف در هسته درب [۹، ۱۰] و نیز رفتار مصالح این درب‌ها تحت اثر انفجارهای پی‌در پی [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. زهتاب و صالحی [۱۲] از پنل‌های ساندویچی برای تقویت دیوارهای پیرامونی استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این مواد می‌تواند به‌طور مؤثری مقادیر تنش و جابجایی را در انواع دیوارهای بنایی کاهش دهد و به این ترتیب احتمال شکست در دیوارهای تقویت‌شده به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در بارگذاری انفجاری پانل‌های ساندویچی، شکل هندسی هسته بسیار تأثیرگذار است و بر اساس میزان فشار انفجار، پانل ساندویچی با شکل هندسی خاص می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد [۱۳]. به‌طوری که بر اساس مطالعات صورت گرفته در فشارهای پایین مدل با هسته دارای شبکه افقی چهارضلعی و در فشارهای بالا مدل با هسته دارای شبکه عمودی شش‌ضلعی کمترین جابجایی را داشتند [۱۳].

علی‌رغم وجود تحقیقات متعدد، استفاده از مصالح مختلف در جهت بالا بردن مقاومت این درب‌ها، موجب ایجاد وزن نسبتاً بالا

¹ Aluminum cenosphere syntactic foam

² LS-DYNA

³ Strain rate

۱-۲. مدل آسیب و شکست مواد در نرم افزار ال اس داین

در تحلیل رفتار دینامیکی مواد، انتخاب مدل آسیب ماده تحت بارهای دینامیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این آسیب می‌تواند جدایش و شکست یا تغییر در خواص سختی و پلاستیک ماده باشد. فرایندهای مربوط به شکست^۱ مواد تحت تأثیر نرخ تنش، کرنش و تاریخچه بارگذاری قرار دارد. یکی از قابلیت‌هایی که در نرم افزار ال اس داین تعریف شده است امکان حذف المان^۲ و شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ در حین حل مسئله است. این قابلیت، حل برخی مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ را از طریق فرمولاسیون لاگرانژی فراهم می‌کند و مشکل منفی شدن حجم المان که در حل این گونه مسائل بروز می‌نماید را از بین می‌برد. مبنای استفاده از این روش آن است که حضور المان‌های دارای تغییر شکل زیاد اغلب نشان‌دهنده وجود آسیب، شکست و ضعیف شدن ماده در آن بخش از ماده است؛ به‌گونه‌ای که در آن ناحیه ماده توانایی حمل بار کمتری را دارد. تداوم حضور این المان‌ها در مدل سبب می‌شود که گام‌های زمانی خیلی کوچک شده و هزینه تحلیل بالا برود [۲۰]. نرم‌افزار ال اس داین برای حذف المان از معیار شکست مبتنی بر کرنش پلاستیک بحرانی استفاده می‌نماید. استفاده از این معیار در مدل‌سازی مسائل نفوذ و انفجار نتایج مطلوبی را در بر داشته است. البته این معیار تنها به کرنش پلاستیک وابسته نیست بلکه میزان تنش نیز بر چگونگی شکست تأثیرگذار خواهد بود.

۲-۲. معادلات حاکم بر مدل رفتاری جانسون-کوک

امروزه مدل رفتاری‌های مختلفی در فرآیندهای مدل‌سازی فلزات استفاده می‌شوند که هر یک از آن‌ها در شرایط خاص خود، پاسخ‌های قابل قبول‌تری از خود نشان می‌دهند. در فرآیند مدل‌سازی انفجار نیز مدل‌های رفتاری مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که فرآیند مورد بررسی در این مطالعه دارای ماهیت دینامیکی و بارگذاری با سرعت بالا است، مدل رفتاری جانسون - کوک برای این وضعیت بسیار مناسب است. در این پژوهش به‌منظور هماهنگی بهتر مدل رفتاری و سخت‌شوندگی، در شبیه‌سازی‌ها از مدل سخت‌شوندگی جانسون - کوک اصلاح شده استفاده شده است. در این مدل میزان کرنشی که ماده تا لحظه گسیختگی می‌تواند تحمل کند (کرنش شکست ماده)، به‌صورت تابعی از تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می‌شود که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 \text{EXP}(D_3(\eta))) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}) (1 + D_5 \theta^m) \quad (1)$$

بدون سخت‌کننده مقایسه کردند. بر اساس مطالعه آزمایشگاهی، مشاهده شد که پس از انفجار، کرنش و تغییر شکل ماندگار ایجادشده بر روی پوسته درب ناچیز است و می‌توان فرض نمود که مصالح مورد استفاده وارد فاز پلاستیک نمی‌شوند. نتایج تحقیقات نشان‌دهنده افزایش چهار برابری مقاومت درب‌ها و نیز کاهش جابجایی ایجادشده در مرکز درب به نصف بود. همچنین استفاده از الیاف‌های فیبر کربن به‌عنوان سخت‌کننده موجب کاهش عرض ترک‌های ایجاد شده، کاهش خرابی سخت‌کننده‌ها و افزایش شکل‌پذیری درب‌ها شد. شن و همکاران [۱۹] درب تک قوسی ساخته‌شده از پنل ساندویچی آلومینیومی با هسته فوم آلومینیومی را تحت اثر انفجارهایی در فواصل مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان دادند که تغییر ارتفاع قوس موجب ایجاد تغییر در نحوه جذب انرژی، مود گسیختگی و نرخ کرنش‌های ایجادشده در درب می‌شود. همچنین ملاحظه شد که جابجایی ماندگار و حداکثر ضربه در درب با ارتفاع قوس ۳۰۰ میلی‌متر کمتر از درب با ارتفاع قوس ۶۰۰ میلی‌متر است.

همان‌طور که در بالا ذکر شد محققین متعددی به بررسی رفتار درب‌های ضد انفجار پرداخته‌اند. اغلب این محققین با بررسی پنل‌های ساندویچی توپر، تأثیر جنس مصالح هسته بر مقدار تنش و کرنش ایجادشده در لایه‌های درب را بررسی نموده‌اند. این مطالعه در نظر دارد تا با بررسی ساختار جدید چند قوسی، تأثیر تعداد و ارتفاع قوس و نیز شکل و جنس مصالح رویه را بر مقاومت درب ضد انفجار بررسی نموده و ضمن افزایش ایمنی و بهبود رفتار این درب‌ها، وزن آن‌ها را نیز کاهش دهد.

۲. روش تحقیق

در این مطالعه از نرم‌افزار ال اس داین برای تحلیل و مدل‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. این نرم‌افزار توانایی مدل‌سازی انواع مدل‌های دو و سه بعدی را داشته و با به‌کارگیری حل‌گرهای غیرخطی قادر به حل مدل‌های پیچیده دینامیکی مانند انفجار، ضربه، شکل‌دهی فلزات، ورق‌کاری و موارد گسترده دیگر است [۲۰]. قابلیت دیگری که در این نرم‌افزار وجود دارد، قابلیت شروع مجدد است که سبب می‌شود تحلیل مدل به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم شود. یعنی پس از تکمیل حل هر بخش، یک فایل مجازی مجدد ایجاد می‌شود که تمام اطلاعات لازم برای ادامه تحلیل را در بر دارد. قابلیت حل مجدد برای تحلیل مدل، از حذف مازاد المان‌های تخریب شده و نیز حذف مواد و سطوح تماسی که دیگر در تحلیل اهمیت خاصی ندارند، استفاده می‌نماید. عموماً این تغییرات سبب می‌شود که یک تحلیل در زمان مناسب به نتیجه مطلوب برسد [۲۰]. با توجه به این‌که یکی از اصلی‌ترین پارامترها در مدل‌سازی عددی، مدل رفتاری مورد استفاده است، در این بخش فرمولاسیون مدل عددی به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته و نحوه محاسبه پارامترهای مدل شرح داده شده است.

¹ Failure

² Element Deletion یا Element Erosion

در رابطه بالا $\Delta \varepsilon_{eq}$ میزان تغییر کرنش معادل در طول یک دوره انتگرال گیری بوده و شکست هنگامی رخ می‌دهد که D برابر واحد شود.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد رفتار فولاد با استفاده از مدل رفتاری جانسون- کوک اصلاح شده مدل‌سازی شده است. این مدل جریان تنش را مطابق رابطه زیر به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما بیان می‌کند [۲۳]:

$$\sigma_{eq} = \left[A + B (\varepsilon_e^{pl})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_e^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - \theta^m) \quad (5)$$

که در آن $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مینا، ε_e^{pl} کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\varepsilon}_e^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک و θ دمای نرمال شده است که در رابطه (۱) در خصوص آن توضیح داده شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در این مدل از کالیبره نمودن مدل عددی با آزمایشگاهی تعیین می‌گردد [۲۴].

۳. صحت‌سنجی

جابجایی ایجادشده در سطح درب یکی از اصلی‌ترین پارامترهای تحلیل رفتار آن است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینما به شبیه‌سازی رفتار درب فولادی تحت اثر انفجار پرداخته می‌شود و با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی مین و همکاران [۲۵]، صحت نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مین و همکاران [۲۵] برای بررسی رفتار ورق فولادی تحت اثر بار انفجار، ۱۵۰ گرم ماده منفجره C4 را در فواصل ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متری از سطح صفحه فلزی منفجر نمودند. بدین منظور آن‌ها آزمایشی مطابق شکل (۱) را اجرا کرده و جابجایی‌های ایجادشده در مرکز صفحه فولادی را توسط جابجایی‌سنج ثبت نمودند.



شکل ۱. چینه‌آزمایش جهت بررسی تأثیر انفجار بر رفتار صفحه فولادی [۲۵]

در این مطالعه برای انجام صحت‌سنجی، مقدار ۱۵۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از مرکز صفحه فولادی قرار داده شد و مرزهای صفحه فولادی نیز به صورت کاملاً گیردار در نظر

در رابطه بالا، θ دمای نرمال شده است. دمای θ به صورت $\theta = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ تعریف می‌شود، که اندیس‌های r و m به ترتیب دمای اتاق و دمای ذوب را نمایش می‌دهند. D_1 تا D_5 ضرایب ثابت وابسته به جنس هستند. برای تعیین D_1 ، D_2 و D_3 از آزمایش کشش بر روی نمونه ورق‌های شیاردار استفاده می‌شود. به این ترتیب که چندین نمونه با شیار میانی برای آزمایش کشش در نظر گرفته می‌شود. عرض نمونه‌ها باید یکسان بوده و فقط شعاع شیارها متفاوت باشد. آزمایش کشش روی نمونه‌ها انجام می‌شود و تا لحظه شکست ادامه می‌یابد. مقادیر η و ε_f برای هر نمونه به‌دست می‌آید و تعیین پارامترهای D_1 ، D_2 و D_3 از برازش منحنی منطبق بر این نقاط امکان‌پذیر خواهد بود. برای تعیین پارامتر D_4 نیز باید کرنش شکست ماده در نرخ کرنش‌های گوناگون به‌دست آورده شود. پس از تعیین کرنش شکست ماده در نرخ‌های کرنش متفاوت، با استفاده از داده‌های ε_f برحسب $\ln \varepsilon$ و برازش نمودار بر آن مقدار D_4 به‌دست می‌آید. همچنین در رابطه (۱) پارامتر η تنش سه‌محوره است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} \quad (2)$$

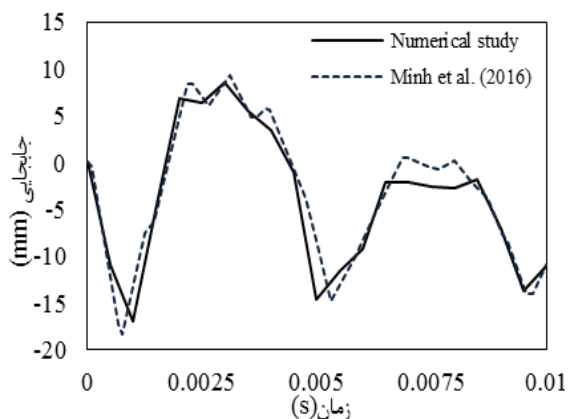
که σ_{eq} تنش معادل فون میسز و σ_h تنش هیدرواستاتیک است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3)$$

در رابطه فوق σ_1 ، σ_2 ، σ_3 تنش‌های اصلی هستند. معادله (۱) به سه قسمت تقسیم می‌گردد که قسمت اول مربوط به اثر تنش سه‌محوره بر رفتار ماده و دو قسمت بعدی به ترتیب مربوط به اثر نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$) و دما (θ) بر رفتار ماده است. برای در نظر گرفتن بخش اول معادله یعنی اثر تنش سه‌محوره بر رفتار ماده، لازم نیست که بخش‌های بعدی تعریف شوند در حالی که برای در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش و دما بر رفتار ماده، باید بخش مربوط به اثر تنش سه‌محوره در نظر گرفته شود. همان‌طور که مشخص است مدل رفتاری جانسون - کوک دارای ضرایب ثابتی است که وابسته به جنس ماده هستند و باید برای ماده مورد نظر تعیین شوند. با به‌دست آوردن ضرایب ثابت معادله، شکست ماده برحسب تابعی از تنش سه‌محوره، نرخ کرنش و دما مشخص می‌گردد و پیش‌بینی مناطق شکست به کمک این مدل امکان‌پذیر خواهد بود [۲۲]. معیار شکست نیز بر پایه تکامل آسیب^۱ گسترش می‌یابد که در آن آسیب (D) برای یک المان از ماده، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

¹ Damage Evolution



شکل ۲. مقایسه جابجایی مرکز درب مطالعه حاضر با مطالعه مین و همکاران [۲۵]

۴. نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور افزایش عملکرد درب‌های ضد انفجار در کاهش اثرات ناشی از انفجار، عواملی همچون ارتفاع قوس، تعداد قوس، فاصله انفجار، وزن ماده منفجره و ابعاد درب مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به بررسی و تشریح تأثیر هر یک از عوامل فوق بر حداکثر جابجایی ایجاد شده در مقطع درب پرداخته شده است.

۴-۱. تعداد قوس

در تمام مدل‌سازی‌های این پژوهش، به منظور بررسی پارامتریک رفتار درب، ضخامت آن برابر مقدار ثابت ۳/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۳) طول درب و ارتفاع قوس‌ها به ترتیب با پارامترهای D و h نشان داده شده است. از آنجایی که ممکن است ابعاد درب بر عملکرد آن تأثیرگذار باشد، بنابراین در بهایی با ابعاد مختلف شامل ۱، ۲ و ۴ متر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بخش برای بررسی تأثیر تعداد قوس بر عملکرد آن در کاهش اثر انفجار، در درب‌های یک و دو متری ارتفاع قوس برابر مقدار ثابت ۵ سانتی‌متر نگه‌داشته شد و مدل‌هایی با تعداد ۱ تا ۵ قوس ساخته شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. در مرحله بعد به بررسی تأثیر ارتفاع قوس بر عملکرد آن پرداخته شده است که در آن برای هر یک از تعداد قوس‌های ۲، ۳ و ۵، در درب‌های دو متری مقدار ارتفاع به صورت متغیر برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و در درب‌های چهار متری ارتفاع برابر مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در بخش بعدی نیز برای در نظر گرفتن تأثیر مقدار ماده منفجره، در درب‌های دو متری با ثابت نگه‌داشتن ارتفاع قوس (۵ سانتی‌متر)، مقدار ماده منفجره به صورت متغیر برابر ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ گرم در نظر گرفته شد و پاسخ‌ها در درب‌های دارای ۱، ۳ و ۵ قوس مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای بررسی تأثیر مصالح مختلف بر مقاومت درب

گرفته شد. برای شبیه‌سازی تأثیر موج انفجار بر سطح درب، از دستور Load-Blast نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا استفاده شد. با انجام این دستور فشار اعمالی به نمونه بر اساس معادلات تجربی محاسبه می‌گردد. معادلات تجربی مربوطه، از تحلیل نتایج هزاران آزمایش انفجار تخمین زده شده است. در این روش وزن و فاصله ماده منفجره با استفاده از مقدار معادل ماده منفجره تی‌ان‌تی شبیه‌سازی می‌شود [۲۶]. با به‌کارگیری این روش زمان تحلیل بسیار کاهش یافته و پارامترهای مورد نیاز برای تعریف مدل نیز کاهش پیدا می‌کنند. مطابق مطالعه مین و همکاران [۲۵] مقادیر مدول الاستیسیته، وزن مخصوص و ضریب پواسون فولاد مورد استفاده به ترتیب برابر مقادیر ۱۹۵ گیگا پاسکال، ۸۰۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳ در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه که از کالیبره نمودن مدل عددی با آزمایشگاهی تعیین شده‌اند در جدول (۱) ارائه شده است [۲۴].

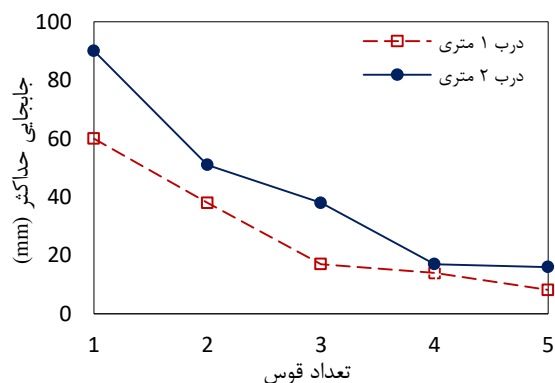
جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری جانسون کوک [۲۴]

A [MPa]	B [MPa]	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})	m	$(k)T_f$	T_m (k)	W_c (Pa)
۴۱۰	۱۹۰۲	۰/۸۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۱/۰۳	۲۹۶	۱۷۰۰	۲۳۵/۷۶

ضرایب جدول فوق دارای مقادیر ثابتی هستند و وابسته به جنس مصالح هستند. در جدول فوق ضریب ثابت A نشان‌دهنده تنش تسلیم ماده در شرایط شبه استاتیکی است که از روی منحنی تنش - کرنش در حالت شبه استاتیکی و مطابق ۰/۲ درصد کرنش پلاستیک به دست می‌آید. برای تعیین ضرایب B و n از منحنی تنش کرنش در حالت شبه استاتیکی استفاده می‌گردد. ضریب C نیز مربوط به نرخ کرنش است و از انجام سه آزمایش در دمای اتاق حاصل می‌شود.

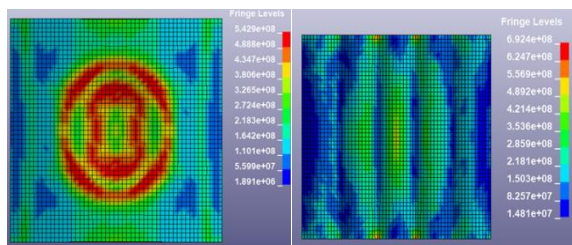
برای انجام صحت‌سنجی دقیق‌تر، علاوه بر مقایسه حداکثر جابجایی رخ داده در آزمایش میدانی با نتایج مدل‌سازی حاضر، نمودار جابجایی - زمان مطالعه حاضر با مطالعه مین و همکاران [۲۵] نیز مقایسه شده است. حداکثر جابجایی ایجاد شده در مرکز صفحه فولادی حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی حدود ۱۷ میلی‌متر بوده است که نشان‌دهنده تطابق بسیار مناسب مدل‌سازی انجام شده با نمونه آزمایشگاهی است. از طرفی نمودار جابجایی - زمان صفحه فلزی روی درب برای مدل‌های عددی در شکل (۲) نمایش داده شده است. مطابق نمودار، حداکثر مقدار جابجایی ورق فولادی مدل عددی مطالعه حاضر و مطالعه مین و همکاران [۲۵] تقریباً هم‌زمان رخ می‌دهد. این جابجایی‌ها به صورت تقریبی در فاصله زمانی ۰/۰۰۸ ثانیه از انفجار ایجاد شده است.

قوس سبب بهبود عملکرد درب می‌شود ولی بعد از افزودن تعداد مشخصی از آن، دیگر کاهش محسوسی در جابجایی رخ نمی‌دهد.



شکل ۴. مقایسه تأثیر تعداد قوس بر حداکثر جابجایی ایجاد شده در درب

مطابق شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد قوس، مقدار حداکثر تنش فون میسرز ایجاد شده در رویه درب تعدیل شده و توزیع تنش به صورت یکنواخت‌تر رخ می‌دهد. بدین ترتیب از تمرکز تنش در یک نقطه از درب جلوگیری گردیده و سبب بهبود رفتار درب و کاهش احتمال خرابی می‌گردد. مطابق شکل (۵) با افزایش تعداد قوس، سطح حداکثر تنش فون میسرز تقریباً ثابت بوده ولی نحوه توزیع تنش تغییر می‌کند. به این ترتیب، با افزایش تعداد قوس سطوحی که دارای تنش حداکثر هستند به شدت کاهش یافته و تمرکز تنش در نواحی بسیار کوچک‌تری رخ می‌دهد.

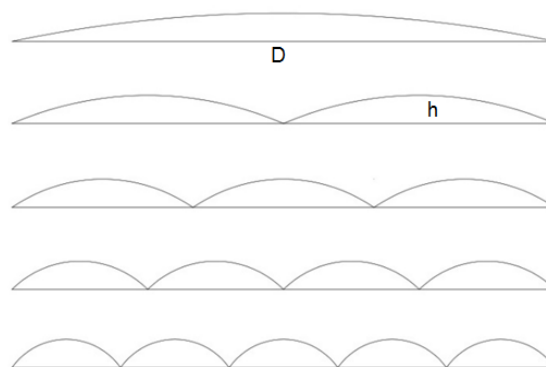


شکل ۵. تنش فون میسرز درب یک متری، سمت راست دارای یک قوس و سمت چپ دارای پنج قوس

۴-۲. ارتفاع قوس

پس از بررسی تأثیر تعداد قوس بر عملکرد درب در مقابل انفجار، در این بخش به بررسی تأثیر ارتفاع قوس بر عملکرد آن خواهیم پرداخت. بدین منظور برای ابعاد درب ۲ و ۴ متری و نیز تعداد قوس ۲، ۳ و ۵ عددی مدل‌سازی صورت گرفت. در این مدل‌سازی‌ها برای درب ۲ متری سه حالت قوس با ارتفاع‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و برای درب ۴ متری چهار حالت با ارتفاع قوس‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله ماده منفجره از سطح درب برابر ۲۰ سانتی‌متر و وزن ماده منفجره نیز معادل ۲۵۰ گرم تی‌ان‌تی در نظر گرفته شد. مدل‌سازی مشابه حالت قبل بوده و پس از انجام تحلیل مقادیر جابجایی مرکز درب مورد بررسی قرار گرفت.

نیز از درب‌هایی با ابعاد چهار متر، تعداد ۴ قوس و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد.



شکل ۳. نمایی شماتیک از تعداد قوس نصب‌شده بر روی درب

در این مدل‌ها مقدار ۲۵۰ گرم ماده منفجره TNT در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از سطح درب منفجر شد. پس از انجام تحلیل، جابجایی‌های حداکثر ایجاد شده در نقطه‌ی میانی درب اندازه‌گیری شده و نتایج برای ابعاد مختلف درب در شکل (۴) نمایش داده شده است.

با بررسی نتایج ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد قوس مقادیر جابجایی در مرکز درب کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان نمونه برای درب ۱ متری تک قوسی حداکثر مقدار جابجایی ثبت شده برابر با ۶ سانتی‌متر است. با افزایش تعداد قوس این مقدار کاهش یافت، به طوری که در درب‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ قوس، این مقدار به ترتیب به ۳/۸، ۱/۷، ۱/۴ و ۰/۸ سانتی‌متر کاهش یافت. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد قوس از ۱ به ۳ مقدار جابجایی ۴/۲ سانتی‌متر معادل ۷۲٪ کاهش یافته است، این در حالی است که افزایش تعداد قوس از ۳ به ۵ باعث کاهش حدود ۵۰ درصد از جابجایی یعنی معادل ۰/۹ سانتی‌متر می‌شود. لذا تأثیر افزایش تعداد قوس‌ها با یکدیگر برابر نبوده و در مقادیر اولیه یعنی از ۱ به ۳ بیش از ۳ به ۵ است.

روند فوق برای درب‌های دو متری نیز برقرار بوده و با افزایش تعداد قوس مقدار جابجایی کاهش پیدا می‌کند. در این درب‌ها جابجایی برای حالت تک قوسی برابر با ۹ سانتی‌متر بود که با افزایش به ۳ قوس این جابجایی به ۳ سانتی‌متر و برای ۵ قوسی به ۱/۴ سانتی‌متر کاهش پیدا کرده است. در این حالت نیز با افزایش تعداد قوس‌ها، مقدار جابجایی به تدریج کاهش یافته است، به طوری که مقدار جابجایی درب ۵ قوسی معادل ۱۶٪ جابجایی درب تک قوسی است. همچنین مشاهده می‌شود که میان جابجایی درب چهار و پنج قوسی اختلاف چندانی وجود ندارد. این بدان معنی است که برای درب با ابعاد مختلف باید تعداد قوس بهینه را با طراحی محاسبه نمود. یعنی علیرغم اینکه افزایش تعداد

در این بخش به ارائه وزن هر یک از مدل‌ها پرداخته شده است. در جدول (۲) وزن دربهایی با تعداد و ارتفاع قوس‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در دره‌های ۱ متری با ارتفاع قوس ۵ سانتی‌متر، در دره‌های ۲ متری با ارتفاع قوس‌های، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر و در دره‌های ۴ متری با ارتفاع قوس‌های، ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، اختلاف وزن دره‌های یک و پنج قوسی بین ۱ تا ۷ درصد و به‌طور میانگین حدود ۰.۴٪ است. با افزایش ارتفاع قوس اختلاف وزن دره‌ها نیز افزایش می‌یابد به‌طوری که در دره‌های ۲ متری با شعاع قوس ۲۰ سانتی‌متر و در دره‌های ۴ متری با شعاع قوس ۳۰ سانتی‌متر اختلاف وزن دره‌های یک و پنج قوسی برابر ۲۶ و ۱۶ درصد خواهد بود. همچنین به‌طور میانگین در هشت مجموعه مدل‌های ارائه شده تا این بخش، اختلاف وزن دره‌های یک و پنج قوسی به‌طور میانگین حدود ۰.۸٪ است.

جدول ۲. وزن دره‌های مدل‌شده با ابعاد و تعداد قوس‌های متفاوت

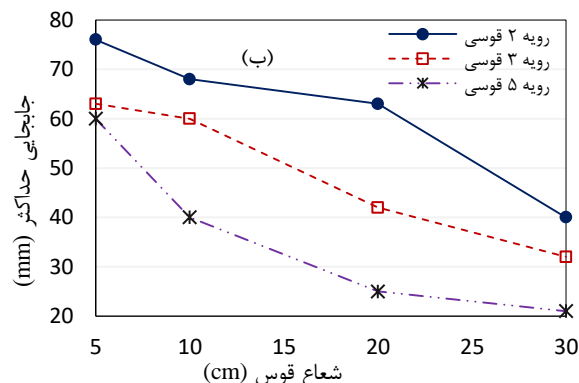
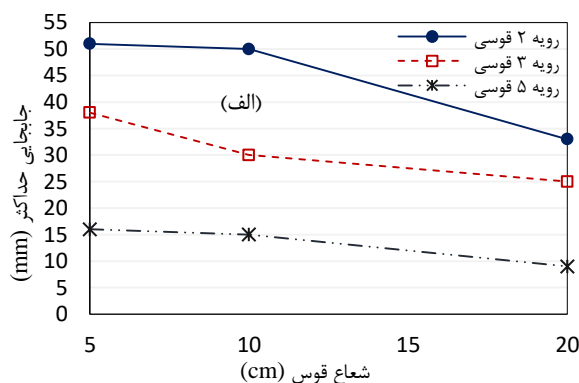
تعداد	ابعاد درب (m ²)				ارتفاع قوس (cm)				قوس
	۴×۴	۲×۲	۱×۱		۴	۵	۱۰	۲۰	
۱	۸۶۱	۲۱۴	۵۳	۵	۳۰	۲۰	۱۰	۵	۱
۲	۸۷۹	۲۱۴	۵۴	۵	۳۰	۲۲۵	۲۱۶	۲۱۴	۲
۳	۹۰۹	۲۱۵	۵۴	۵	۳۰	۲۳۷	۲۲۰	۲۱۵	۳
۴	۹۵۰	۲۱۶	۵۶	۵	۳۰	۲۵۴	۲۲۴	۲۱۶	۴
۵	۹۹۹	۲۱۸	۵۷	۵	۳۰	۲۷۴	۲۳۰	۲۱۸	۵

۳-۴. وزن ماده منفجره

پس از انجام بررسی در خصوص تعداد و ارتفاع قوس‌ها، این تردید وجود دارد که اگر مقدار ماده منفجره تغییر کند و انفجار شدیدتر شود، آیا باز هم نتایج فوق قابل حصول است یا تغییرات اساسی در آن‌ها رخ خواهد داد. بنابراین در بررسی اثر وزن ماده منفجره بر رفتار درب، مدل‌سازی برای دره‌های دو متری تک قوسی، ۳ و ۵ قوسی صورت گرفت. در این مدل‌سازی‌ها وزن ماده منفجره از ۲۵۰ گرم تا ۱۲۵۰ گرم متغیر بوده و فاصله انفجار از مرکز درب برابر با ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب مقادیر حداکثر جابجایی مرکز درب اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار گرفت.

مطابق شکل (۷) با افزایش وزن ماده منفجره، مقادیر جابجایی به‌صورت خطی افزایش پیدا کرده است. در درب تک قوسی با توجه به وقوع تسلیم در رویه درب، مقدار این جابجایی در انفجارهای با ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ گرم ماده منفجره ثابت مانده است. به‌منظور بررسی بیشتر تأثیر وزن ماده منفجره بر رفتار درب‌ها، نمودار جابجایی- زمان در مرکز درب برای هرکدام از مدل‌ها ترسیم شده است.

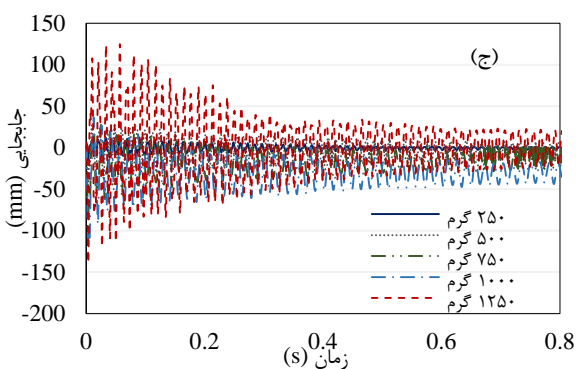
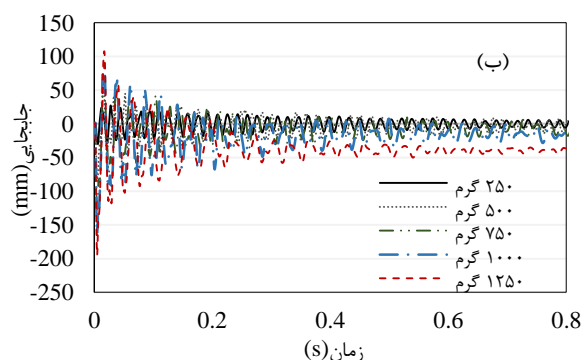
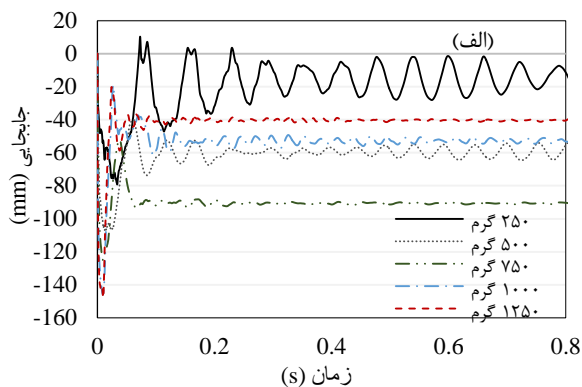
مطابق شکل (۶)، با افزایش ارتفاع قوس مقدار جابجایی حداکثر ایجادشده در مرکز درب کاهش پیدا می‌کند. در درب با ابعاد دو متر، زمانی که ارتفاع قوس از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند، مقدار جابجایی حداکثر ایجادشده در دره‌های دارای رویه ۲، ۳ و ۵ قوس به ترتیب ۳۴، ۳۵ و ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. این حالت برای درب با ابعاد چهار متر نیز رخ داده و با افزایش ارتفاع قوس نرخ کاهش جابجایی بیشتر می‌گردد. به‌طوری که در درب با رویه‌های ۲، ۳ و ۵ قوس، با افزایش ارتفاع قوس از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر مقدار جابجایی حداکثر به ترتیب ۱۷، ۳۳ و ۵۸ درصد کاهش یافته و با افزایش ارتفاع از ۵ به ۳۰ سانتی‌متر حداکثر جابجایی به ترتیب ۴۷، ۴۹ و ۶۵ درصد بهبود می‌یابد. دلیل این کاهش جابجایی درب را می‌توان به تغییر رفتار رویه درب نسبت داد. به عبارتی با افزایش ارتفاع قوس، رفتار برشی درب کاهش یافته و رفتار فشاری مصالح غالب می‌گردد که این تغییر رفتار باعث بهبود عملکرد درب می‌گردد.



شکل ۶. مقایسه تأثیر ارتفاع قوس بر حداکثر جابجایی ایجادشده در مرکز درب (الف) دو متری و (ب) چهار متری

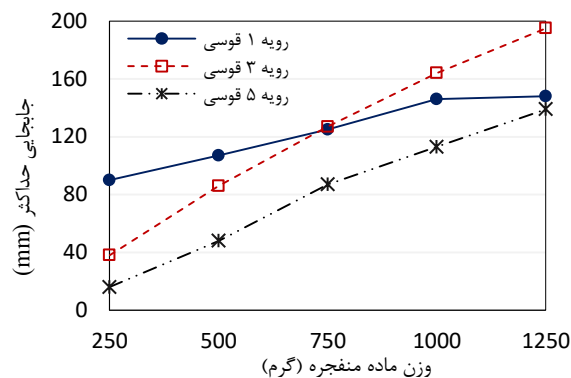
نکته دیگری که از تحلیل نتایج فوق قابل برداشت است این است که کاهش میزان حداکثر جابجایی مرکز درب با افزایش ارتفاع و تعداد قوس‌های درب در تمام مدل‌ها رابطه مسقیم دارد. به‌عبارت دیگر در تمام مدل‌ها با افزایش تعداد و یا ارتفاع قوس میزان جابجایی کاهش پیدا کرده است. با توجه به این‌که وزن درب از پارامترهای تأثیرگذار در نتیجه بوده و می‌تواند هزینه و فایده و به صرفه بودن در هنگام استفاده از آن‌ها مطرح می‌شود،

متر با تعداد ۴ قوس به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر مدل‌سازی شد. مشخصات و پارامترهای مدل رفتاری این مصالح در جدول (۳) ذکر شده است. مطابق این جدول رفتار الاستیک فولادها سخت‌تر بوده و شکل‌پذیری کمتری دارند.



شکل ۸. نمودارهای جابجایی- زمان برای وزن‌های مختلف ماده منفجره (الف) تک قوسی (ب) ۳ قوسی (ج) ۵ قوسی

بر اساس شکل (۹) تغییرات جابجایی حداکثر، به شدت تحت تأثیر مشخصات الاستیک مصالح بوده و با کاهش سختی الاستیک جابجایی حداکثر دربر افزایش می‌یابد. آلومینیوم T6 دارای بیشترین جابجایی بوده و فولاد ST37 و تیتانیوم کمترین جابجایی است. شایان ذکر است با توجه به وزن کم آلومینیوم (۳۳٪ وزن فولاد) و ارزان‌تر بودن آن نسبت به تیتانیوم مقایسه صرفاً بر اساس جابجایی درست نبوده و لازم است تا توزیع تنش و جابجایی ماندگار بررسی شده و بر اساس نیاز هر حوزه انتخاب مصالح صورت گیرد.

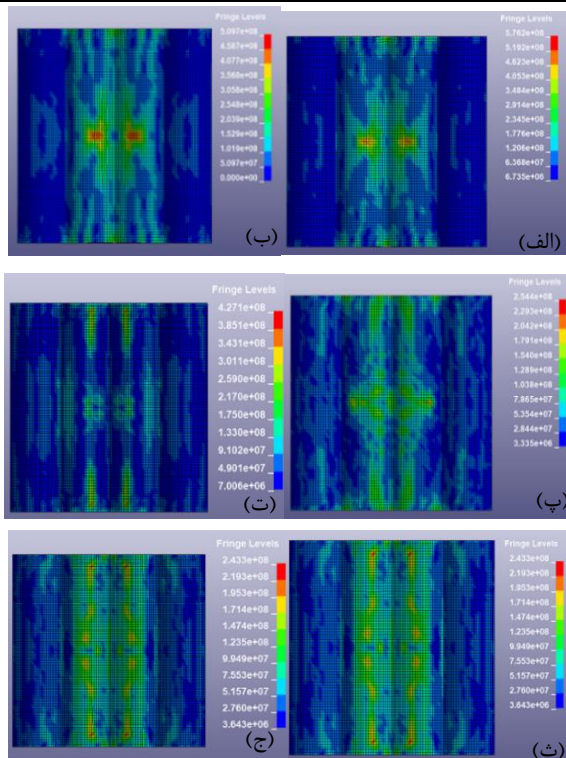


شکل ۷. تأثیر وزن ماده منفجره بر حداکثر جابجایی ایجادشده در مرکز درب

نمودارهای شکل (۸) به منظور بررسی تأثیر وزن ماده منفجره بر مقادیر دامنه نوسان، جابجایی ماندگار و مدت زمان استهلاک انرژی نمایش داده شده‌اند. با بررسی این شکل مشاهده می‌شود که مطابق انتظار با افزایش وزن ماده منفجره مقدار جابجایی حداکثر ایجادشده در درب افزایش پیدا می‌کند. به همراه افزایش مقدار جابجایی، جابجایی ماندگار رویه نیز افزایش یافته و به عبارتی ناحیه خرابی بزرگ‌تر شده است. این افزایش جابجایی به صورت خطی است و با افزایش ۲ برابری مقدار ماده منفجره، مقدار جابجایی حدود ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین مدت زمان استهلاک انرژی نیز با افزایش ماده منفجره افزایش پیدا می‌کند. با بررسی تعداد قوس‌ها ملاحظه می‌گردد که افزایش تعداد قوس علاوه بر کاهش جابجایی حداکثر، باعث کاهش دامنه نوسان سطح درب نیز می‌گردد. این امر به دلیل افزایش جذب انرژی بر اثر رفتار الاستیک درب رخ می‌دهد.

۴-۴. تأثیر مصالح مختلف بر مقاومت درب

ونگ و همکاران [۲۷] در مطالعه خود تأثیر مقاومت مصالح و هندسه بخش‌های مختلف درب ضد انفجار را بر عملکرد آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ابعاد هندسی قسمت‌های مختلف درب تأثیرات متفاوتی بر عملکرد آن خواهند داشت. افزایش ارتفاع اسکلت بیشترین تأثیر را بر عملکرد درب داشت. در مقابل ضخامت بال I شکل اسکلت و نیز ضخامت پانل‌های داخلی و خارجی تأثیرات کمتری داشتند. همچنین ثابت شد که افزایش مقاومت اسکلت درب می‌تواند به‌طور قابل توجهی حداکثر پاسخ جابجایی درب را کاهش دهد. به‌طوری که با افزایش حدود ۱۷ و ۴۷ درصدی مقاومت اسکلت درب، حداکثر جابجایی به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۳ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه عملکرد درب ضد انفجار است. بنابراین در این بخش به منظور بررسی تأثیر جنس مصالح بر رفتار درب، علاوه بر فولاد رایج ساختمانی (ST37)، پنج نوع مصالح دیگر شامل دو نوع فولاد AISI 1045 و AISI 4340، آلومینیوم T6-6082 و دو نوع تیتانیوم Ti6Al4 استفاده شده است. به این منظور دربی با ابعاد ۴ در ۴



شکل ۱۱. توزیع تنش فون میسز برای درب چهار متری (الف) ST-37

(ب) AISI 1045 (پ) AISI 4340 (ت) T6-6082 (ث) T6-A14-1 (ج) T6-A14-2

۴-۵. مقایسه درب ساده و درب مقاوم شده با اشکال متفاوت

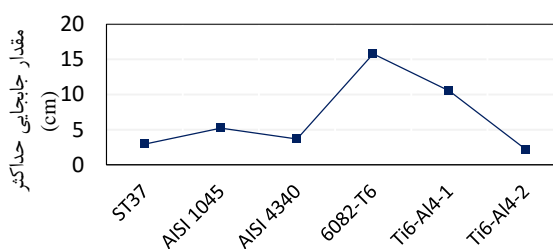
به منظور مقایسه عملکرد قوس و سایر روش‌های مقاوم‌سازی درب، مدل‌سازی برای ۵ حالت مختلف انجام گرفت، در این مدل‌ها، درب با ابعاد ۵ در ۵ متر با استفاده از، نبشی، تیر آهن IPE و چهار قوس مقاوم‌سازی شده و تحت تأثیر انفجار ۴۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۵ متری از مرکز درب قرار گرفت.

مطابق شکل (۱۲) درب مقاوم‌سازی نشده، از ورق فلزی به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر ساخته شده و دارای وزن ۴۹۰۰ کیلوگرم است، درب مقاوم‌سازی شده با چهار شاخه IPE نمره ۲۰ به فاصله ۱/۲۵ متر از یکدیگر دارای وزن ۵۷۲۰ کیلوگرم، درب مقاوم‌سازی شده با چهار شاخه نبشی نمره ۱۰ دارای وزن ۵۳۵۰ کیلوگرم، درب با ۸ شاخه نبشی ۱۰ دارای وزن ۵۸۰۰ کیلوگرم و درب مقاوم‌سازی شده با چهار قوس با ارتفاع و ضخامت قوس به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر و ۳ میلی‌متر دارای وزن ۵۵۲۰ کیلوگرم است.

در جدول (۴) وزن، حداکثر جابجایی و حداکثر تنش فون میسز ایجاد شده در درب‌ها ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، مقدار حداکثر جابجایی ایجاد شده در درب مقاوم‌سازی نشده برابر با ۱۰/۲ سانتی‌متر است. در شرایطی که از رویه قوسی استفاده شده است، بیشترین کاهش در جابجایی مرکز درب ایجاد شده است. با مقاوم‌سازی درب با استفاده از رویه قوسی، مقدار حداکثر

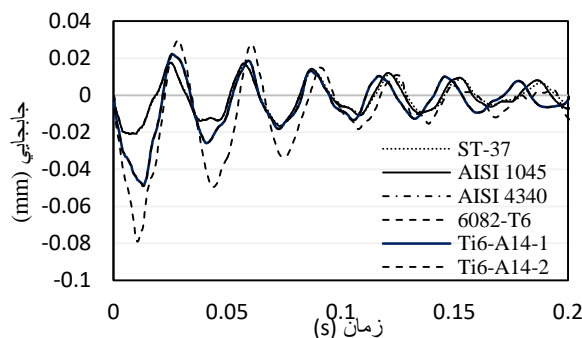
جدول ۳. مشخصات مصالح بکار رفته در مدل‌سازی درب

مصالح	Ti6-Al4-2	Ti6-Al4-1	6082-T6	AISI-4340	AISI-1045	ST37
E (GPa)	۱۱۴	۱۱۴	۷۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
G (GPa)	۴۲/۵	۴۲/۵	۲۶	۷۵	۷۵	۷۵
ν	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
ρ (kg/m^3)	۴۴۸۰	۴۴۸۰	۲۷۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰
A (MPa)	۸۹۶	۷۸۲/۷	۴۲۸/۵	۲۱۰۰	۵۲۳/۱	۴۱۰
B (MPa)	۶۵۶	۴۹۸/۴	۳۲۷/۷	۱۷۵۰	۶۰۰/۸	۱۹۰/۲
c	۰/۱۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷۴۷	۰/۰۰۲۸	۰/۰۱۳۴	۰/۰۲۴
n	-/۵	-/۲۸	۱/۰۰۸	-/۶۵	-/۲۳۴	-/۸۲
m	-/۸	۱	۱/۳۱	-/۷۵	۱	۱/۰۳
T_r (k)	۲۹۶	۲۹۶	۲۹۶	۲۹۶	۲۹۶	۲۹۶
T_m (k)	۱۹۳۳	۱۹۳۳	۸۵۵	۱۷۸۳	۱۷۳۳	۱۷۰۰



شکل ۹. حداکثر جابجایی ایجاد شده در مرکز درب بر اساس نوع مصالح

با بررسی شکل (۱۰) می‌توان مشاهده نمود که مصالح دارای سختی الاستیک کمتر بیشترین نوسان را داشته و تنها پارامترهای الاستیک مواد بر روی مدت و دامنه نوسان درب تأثیرگذار است. به این ترتیب هر سه نوع فولاد دارای مشخصات الاستیک یکسان بوده و رفتار نوسانی آن‌ها کاملاً منطبق بر هم است. این اصل در مورد رفتار تیتانیوم نیز برقرار است.



شکل ۱۰. جابجایی زمان برای مصالح مختلف درب تحت اثر انفجار

مطابق شکل (۱۱) کانتورهای تنش فون میسز مصالح فولادی با توجه به رفتار الاستیک سخت‌تر و جذب انرژی پایین‌تر دارای سطح تنش بیشتری هستند. با توجه به سختی الاستیک کمتر تیتانیوم و آلومینیم، سطح تنش حداکثر ایجاد شده در آن‌ها تقریباً با هم برابر است. از طرفی تمرکز تنش در آلومینیم به دلیل رفتار نرم‌تر کمتر است. همچنین الگوی توزیع تنش مستقل از مشخصات مصالح بوده و تنش حداکثر در هر ۶ مصالح در ناحیه میانی ایجاد می‌گردد.

۴-۶. بررسی عملکرد درب در مقابل انفجار با فاصله زیاد

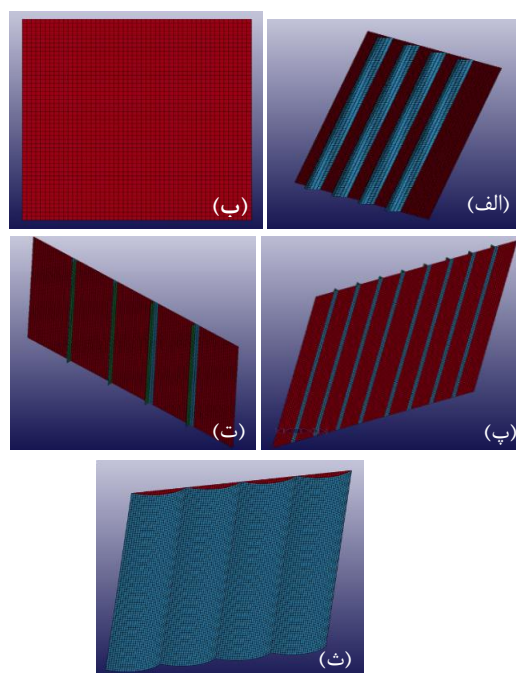
مطالعات نشان داده است که انفجارهای با فاصله کم دارای بازه کوتاه و فشار بیشتر بر سازه هستند و در مقابل انفجارهای با فاصله زیاد (حوزه دور) دارای فشار یکنواخت و کمتر و بازه طولانی‌تری هستند [۲۸].

تا این بخش از این مطالعه، تأثیر عوامل مختلفی همچون تعداد قوس، ارتفاع قوس، وزن ماده منفجره، تغییر مصالح و نیز روش‌های مختلف مقاوم‌سازی بر عملکرد درب‌های ضد انفجار مورد بررسی قرار گرفت. حال در این بخش عملکرد درب در مقابل انفجار حوزه دور مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور درب‌هایی با ابعاد ۵ در ۵ متر، ضخامت ۳/۴ میلی‌متر و ارتفاع قوس ۱۰ سانتی‌متر مدل‌سازی شدند. در این مدل‌ها مقدار ۱۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در فاصله ۵ و ۱۰ متری از سطح درب منفجر شد. پس از انجام تحلیل، جابجایی‌های حداکثر ایجاد شده در نقطه میانی درب اندازه‌گیری شده و نتایج برای ابعاد تعداد مختلف قوس در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

بر اساس شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که در انفجار حوزه دور نیز همانند انفجار حوزه نزدیک با افزایش تعداد قوس مقادیر حداکثر جابجایی در مرکز درب کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان نمونه برای درب ۵ متری تک قوسی حداکثر مقدار جابجایی ثبت شده برای انفجارهای رخ داده در فاصله‌های ۵ و ۱۰ متری به ترتیب برابر ۲۸/۶ و ۱۹/۵ سانتی‌متر است. در حالی که با افزایش تعداد قوس رویه از ۱ به ۲ و ۳ قوس، مقدار جابجایی برای انفجار رخ داده در فاصله ۵ متری به ترتیب ۴۱ و ۵۶ درصد و برای انفجار رخ داده در فاصله ۱۰ متری به ترتیب ۵۶ و ۵۹ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد قوس از ۱ به ۳ مقدار جابجایی کاهش محسوسی دارد ولی همانند بخش مربوط به انفجار حوزه نزدیک افزایش تعداد قوس از ۳ به ۵ باعث کاهش محدودتر جابجایی می‌شود. لذا تأثیر افزایش تعداد قوس‌ها در این بخش نیز با یکدیگر برابر نبوده و در مقادیر اولیه یعنی از ۱ به ۳ بیش از ۳ به ۵ است. یعنی علی‌رغم اینکه افزایش تعداد قوس سبب بهبود عملکرد درب می‌شود ولی بعد از افزودن تعداد مشخصی از آن، دیگر کاهش محسوسی در جابجایی رخ نمی‌دهد.

شکل (۱۴) نمودار انرژی جذب شده درب، با تعداد رویه‌های مختلف را برای انفجاری در فاصله ۵ متری نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، غالباً انرژی جذب شده توسط رویه‌های قوسی با افزایش تعداد قوس افزایش می‌یابد. مطابق نتایج به‌دست آمده، رویه درب در زمانی که فقط از یک قوس تشکیل شده است کمترین و در حالتی که از چهار قوس تشکیل شده است بیشترین جذب انرژی را دارد.

جابجایی به ۱/۸ سانتی‌متر کاهش یافته و این در حالی است که مقدار افزایش وزن درب به نسبت کمتر از سایر حالات است و وزن آن فقط ۱۲٪ افزایش یافته است. همچنین تنش فون میسز ایجاد شده در درب در شرایطی که تقویت درب با استفاده از رویه قوسی انجام گرفته است، حداقل مقدار را دارا بوده و احتمال ایجاد خرابی در درب بسیار کمتر است. پس از مقاوم‌سازی درب با استفاده از قوس حداکثر کاهش جابجایی مربوط به تقویت درب با استفاده از سخت‌کننده IPE200 است. در این حالت نیز مقدار حداکثر جابجایی به ۳/۸ سانتی‌متر کاهش می‌یابد در حالی که وزن آن ۱۷٪ افزایش یافته است و نسبت به مقاوم‌سازی با رویه قوسی وزن بیشتری دارد.



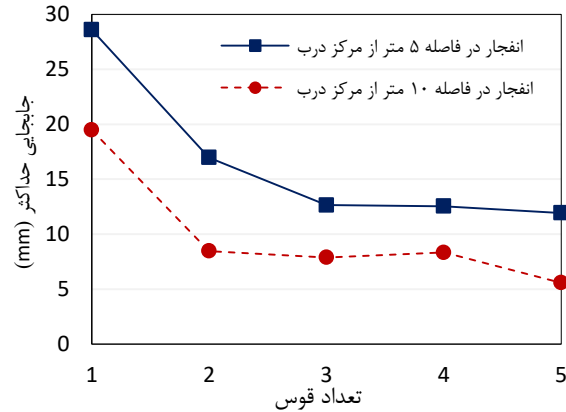
شکل ۱۲. (الف) درب تقویت نشده (ب) درب با چهار شاخه IPE (پ) درب با چهار شاخه نبشی (ت) درب با هشت شاخه نبشی (ث) درب با چهار قوس

جدول ۴. مقایسه وزن، حداکثر جابجایی و تنش فون میسز درب‌های مقاوم‌سازی شده

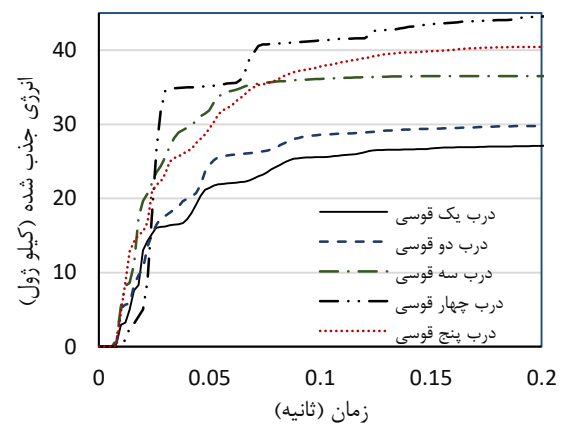
نوع درب	وزن (Kg)	جابجایی (cm)	تنش فون میسز (MPa)
- صفحه فلزی با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر	۴۹۰۰	۱۰/۲	۴۶۱
- صفحه فلزی با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و سخت‌کننده IPE200	۵۷۲۰	۳/۸	۵۰۷
- صفحه فلزی با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و چهار شاخه سخت‌کننده نبشی L10*10	۵۳۵۰	۵/۴	۴۸۹
- صفحه فلزی با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و هشت شاخه سخت‌کننده نبشی L10*10	۵۸۰۰	۵	۴۸۵
- صفحه فلزی با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و رویه قوسی به ضخامت ۳ میلی‌متر	۵۵۲۰	۱/۸	۱۶۷

۵. نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی عملکرد درب های چند قوسی در برابر انفجار با استفاده از مدل سازی در نرم افزار المان محدود ال اس داینما نشان داد که افزایش تعداد قوس باعث کاهش جابجایی ایجاد شده در مرکز درب می گردد. به این ترتیب که تحت اثر انفجار یکسان در مقایسه با درب ساده، درب دارای پنج قوس حدود ۸۶٪ جابجایی کمتری را ثبت می کند. همچنین افزایش تعداد قوس علاوه بر کاهش جابجایی حداکثر، باعث کاهش دامنه نوسان سطح درب نیز می گردد. این امر به دلیل افزایش جذب انرژی ناشی از رفتار الاستیک درب رخ می دهد. با مقایسه نمودارهای توزیع تنش مشاهده می گردد که با افزودن تعداد قوس بر روی درب، حداکثر تنش ایجاد شده در مرکز درب کاهش یافته، توزیع تنش بر روی درب یکنواخت تر شده و از حداکثر ظرفیت مصالح استفاده می گردد. با افزایش تعداد قوس ها تا ۴ عدد، روند بهبود عملکرد درب بسیار مطلوب است و کاهش جابجایی با نرخ بالایی صورت می گیرد. در درب های ۱، ۲ و ۴ متری در حالت ۴ قوسی، متوسط افزایش وزن نسبت به حالت تک قوس به ترتیب حدود ۵، ۸ و ۴ درصد و برای درب های ۵ قوسی حدود ۸، ۱۲ و ۶ درصد است. با توجه به این که تفاوت جابجایی درب های دارای ۴ و ۵ قوس تقریباً ناچیز بوده و در عین حال با افزایش تعداد قوس اندکی افزایش وزن وجود دارد، بنابراین برای درب های ۱ تا ۴ متری، تعداد چهار قوس بهینه ترین حالت بوده و نسبت به حالت تک قوسی باعث کاهش بهینه حداکثر جابجایی ایجاد شده در سطح درب می گردد. افزایش ارتفاع قوس موجب کاهش جابجایی و تنش ایجاد شده در درب می گردد. به طوری که در درب های ۲ متری با افزایش ارتفاع قوس از ۵ به ۱۰ و ۲۰ سانتی متر، بر اساس تعداد قوس های مختلف، به طور میانگین حداکثر جابجایی مرکز درب حدود ۱۰ و ۳۸ درصد کاهش می یابد. از طرف دیگر، با افزایش وزن ماده منفجره مقدار جابجایی حداکثر ایجاد شده در درب، جابجایی ماندگار رویه آن و مدت زمان استهلاک انرژی افزایش پیدا می کند و به عبارتی ناحیه خرابی بزرگتر می گردد. با افزایش دو برابری مقدار ماده منفجره، مقدار جابجایی حدود ۱/۵ برابر افزایش می یابد. در مقایسه با سایر روش های مقاوم سازی درب، استفاده از رویه چند قوسی، افزایش بیشتری در مقاومت ایجاد می کند. این روش با مصرف فولاد کمتری این مقاومت را ایجاد کرده و دارای صرفه اقتصادی بیشتری است. همچنین، انرژی جذب شده توسط رویه های قوسی با افزایش تعداد قوس افزایش می یابد. مطابق نتایج به دست آمده، رویه درب در زمانی که فقط از یک قوس تشکیل شده است کمترین و در حالتی که از چهار قوس تشکیل شده است بیشترین جذب انرژی را دارد.

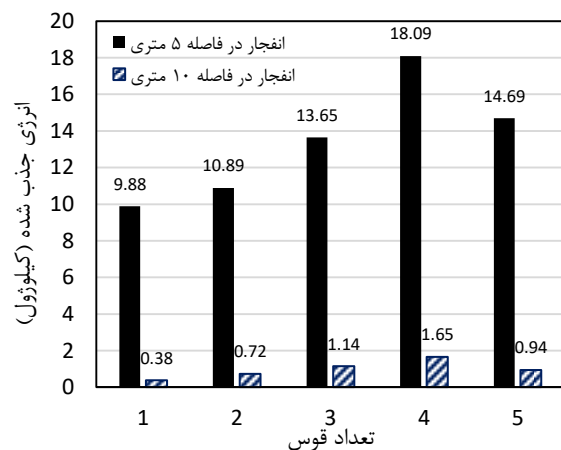


شکل ۱۳. مقایسه تأثیر تعداد قوس بر حداکثر جابجایی مرکز درب در انفجار حوزه دور



شکل ۱۴. نمودار انرژی جذب شده درب با تعداد رویه های مختلف در مقابل زمان برای انفجار در فاصله ۵ متری

برای مقایسه میزان انرژی جذب شده در انفجارهایی با فاصله ۵ و ۱۰ متر از مرکز درب، کل انرژی جذب شده توسط رویه در بازه زمانی ۰/۲ ثانیه، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که با افزایش دو برابری فاصله محل انفجار، میزان جذب انرژی به شدت کاهش می یابد. از طرفی برای هر دو فاصله انفجاری، با افزایش تعداد قوس عملکرد درب ها در جذب انرژی بهبود یافته و بیشترین جذب انرژی در درب با چهار قوس رخ می دهد.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه میزان انرژی جذب شده برای انفجار در فاصله های ۵ و ۱۰ متری

مراجع

- [15] Thimmesh, T.; Shirbhate, P.; Mandal, J.; Sandhu, I.; Goel, M. "Numerical Investigation on the Blast Resistance of a Door Panel"; *Mater. Today: Proc.*, 2021, 44, 659-666.
- [16] Peyman, S.; Toulabi, H. "Determination of Optimum Length of Blast Wave Trap and Analysis of Steel Explosion-Proof Door in the Tunnel with a Blast Wave Trap"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2021, 12, 231-242 (In Persian).
- [17] Hsieh, M. W.; Hung, J. P.; Chen, D. J. "Investigation on the Blast Resistance of a Stiffened Door Structure"; *J. Mar. Sci. Technol.* 2008, 16, 149-157.
- [18] Meng, F.; Zhang, B.; Zhao, Z.; Xu, Y.; Fan, H.; Jin, F. "A Novel All-Composite Blast-Resistant Door Structure with Hierarchical Stiffeners"; *Compos. Struct.* 2016, 148, 113-126.
- [19] Shen, J.; Lu, G.; Zhao, L.; Qu, Z. "Response of Curved Sandwich Panels Subjected to Blast Loading"; *J. Perform. Constr. Facil.* 2011, 25, 382-393.
- [20] LS-DYNA. "Finite Element Software. Lstc (Ansys, Inc.); 2014, Available: <http://www.lstc.com>.
- [21] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; *Eng. Fract. Mech.* 1985, 21, 31-48.
- [22] Holmquist, T.; Johnson, G. "Determination of Constants and Comparison of Results for Various Constitutive Models"; *J. Phys. IV*. 1991, 1, 853-860.
- [23] Jutras, M. "Improvement of the Characterization Method of the Johnson-Cook Model"; 2008.
- [24] Barvik, T.; Olovsson, L.; Hanssen, A.; Dharmasena, K.; Hansson, H.; Wadley, H. "A Discrete Particle Approach to Simulate the Combined Effect of Blast and Sand Impact Loading of Steel Plates"; *J. Mech. Phys. Solids* 2011, 59, 940-958.
- [25] Minh Thanh, V.; Santosa, S. P.; Widagdo, D.; Putra, I. S. "Steel Plate Behavior under Blast Loading-Numerical Approach Using Ls-Dyna"; *Appl. Mech. Mater.* 2016, 842, 200-207.
- [26] Ebrahimzade, A.; Peyman, S. "Optimization of Pore Size of Hollow Reinforced Concrete Slabs by Numerical Simulation through Minimizing the Two Characteristics of Deflection and the Amount of Used Concrete under Blast Loading"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2022, 12, 333-343 (In Persian).
- [27] Wang, H.; Li, Z.; Wu, Y.; Shao, L.; Yao, M.; Liao, Z.; Tang, D. "Numerical Simulation Study on Factors Influencing Anti-Explosion Performance of Steel Structure Protective Doors under Chemical Explosion Conditions"; *Mater. (Basel)* 2022, 15, 3880.
- [28] Taghavi Parsa, M. H.; Geravan, A. "Investigating the Destructive Effect of Explosions at Different Distances on Concrete Retaining Walls"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2020, 11, 369-382 (In Persian).
- [1] Anderson, M.; Dover, D. "Lightweight, Blast-Resistant Doors for Retrofit Protection against the Terrorist Threat"; ARA Inc., Panama City FL, 2003.
- [2] Tolani, S.; Bharti, S. D.; Shrimali, M. K.; Datta, T. K. "Estimation of the Effect of Surface Blast on Buildings"; *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 2021, 174, 202-214.
- [3] Salehi, H.; Akbari, E. "Providing Architectural Patterns for Designing Hidden Buildings against Military Threats Based on the Built-in Camouflage Method"; *J. PSV. Def.* 2019, 10, 83-95 (In Persian).
- [4] Adhikary, S. D.; Dutta, S. C. "Blast Resistance and Mitigation Strategies of Structures: Present Status and Future Trends"; *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 2019, 172, 249-266.
- [5] Zhu, F.; Lu, G.; Ruan, D.; Wang, Z. "Plastic Deformation, Failure and Energy Absorption of Sandwich Structures with Metallic Cellular Cores"; *Int. J. Prot. Struct.* 2010, 1, 507-541.
- [6] Goel, M. D.; Matsagar, V. A.; Gupta, A. K. "Dynamic Response of Stiffened Plates under Air Blast"; *Int. J. Prot. Struct.* 2011, 2, 139-155.
- [7] Hao, H. "Preliminary Study of the Structure and Support Forms to Mitigate Blast and Impact Loading Effects"; *Proc. 21st Australian Conf. Mech. Struct. Mater.* 2011, 597-602.
- [8] Li, C.; Qin, F.; Ya-Dong, Z.; Yi, Z.; Jun-Yu, F. "Numerical and Experimental Investigations on the Blast-Resistant Properties of Arched RC Blast Doors"; *Int. J. Prot. Struct.* 2010, 1, 425-441.
- [9] Hause, T.; Librescu, L. "Dynamic Response of Doubly-Curved Anisotropic Sandwich Panels Impacted by Blast Loadings"; *Int. J. Solids. Struct.* 2007, 44, 6678-6700.
- [10] Wang, C.; Xu, B.; Yuen, S. C. K. "Numerical Analysis of Cladding Sandwich Panels with Tubular Cores Subjected to Uniform Blast Load"; *Int. J. Impact Eng.* 2019, 133, 103345.
- [11] Qin, F.; Li, C.; Mao-lin, D. "Theoretical and Numerical Investigations in Effects of End-Supported Springs and Dampers on Increasing Resistance of Blast Doors"; *J. Eng. Mech.* 2008, 25, 194-199.
- [12] Zehtab, B.; Salehi, H. "Finite-Element-Based Monte Carlo Simulation for Sandwich Panel-Retrofit Unreinforced Masonry Walls Subject to Air Blast"; *Arab. J. Sci. Eng.*, 2020, 45, 3479-3498.
- [13] Seyman, S.; Ebrahimzade, A. "Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2020, 11, 347-355 (In Persian).
- [14] Meng, F. M.; Xu, Y.; Gong, H. D.; Ma, S.; Wu, X. "Review on Design and Research of Protective Door"; *J. Sichuan Ordnance* 2015, 10, 161-164.