

بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار با تمرکز بر ساختار و مشخصات سازه‌ای سخت‌کننده‌ها

حسن صالحی^{۱*}، فرید محمودی صاهبی^۲

۱- استادیار، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴، انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳)

DOR: <https://dorl.net/dor/>

چکیده

این مطالعه به بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار با تمرکز بر پیکربندی، چینش و مشخصات سخت‌کننده‌ها می‌پردازد. در این راستا مدل‌سازی عددی گسترده‌ای جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای فوق بر عملکرد درب مستطیلی تحت اثر بار انفجار صورت گرفته است. درب‌های مدل شده دارای تعداد متعددی سخت‌کننده در وجه درونی خود هستند که به آن‌ها در جذب انرژی و کاهش تغییر مکان کمک می‌نماید. علاوه بر شکل سخت‌کننده‌ها، برای تعیین تعداد سخت‌کننده بهینه به گونه‌ای که ضمن کاهش جابه‌جایی، میزان فولاد مصرفی نیز بهینه گردد عملیات بهینه‌سازی صورت گرفته است. همچنین ضخامت بهینه سخت‌کننده‌ها با توجه به تعداد سخت‌کننده‌ها تعیین شد. بر اساس تحلیل‌های انجام شده مشخص گردید که در عین ثابت بودن وزن درب ضد انفجار، استفاده از سخت‌کننده غیر منشوری باعث کاهش جابه‌جایی مرکز آن تا حدود ۳۰ درصد خواهد شد. همچنین با توجه به بهینه‌سازی‌های انجام شده، در صورتی که ضخامت در نظر گرفته شده برای سخت‌کننده کمتر از ۲۵ درصد ضخامت صفحه درب باشد، تعداد ۷ سخت‌کننده، در صورتی که ضخامت سخت‌کننده بین ۲۵ تا ۴۰ درصد باشد، تعداد ۵ سخت‌کننده، هنگامی که ضخامت سخت‌کننده بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد، تعداد ۳ سخت‌کننده و با ضخامت بیشتر از ۶۰ درصد، تعداد یک سخت‌کننده بهترین حالت عملکردی درب ضد انفجار را ایجاد خواهد نمود.

کلیدواژه‌ها: بار انفجار، درب ضد انفجار، تحلیل عددی، بهینه‌سازی، سخت‌کننده منشوری، ساختار غیر منشوری.

Enhancing the Performance of Explosion-Proof Doors by Focusing on the Configuration of Stiffeners

H. Salehi^{*}, F. Mahmoudi Sahebi

Khatam Ol Anbia University

(Received: 2023/08/03, Revised: 2023/10/25, Accepted: 2023/11/05, Published: 2023/12/04)

Abstract

This study aims to enhance the performance of explosion-proof doors by analyzing the structure, arrangement, and features of their stiffeners. Numerous numerical models were developed to assess how the above parameters affect the performance of rectangular doors under blast loads. The modeled doors consist of stiffeners on their inner face that help them absorb energy and reduce displacement. An optimization process was also carried out to determine the best number and thickness of stiffeners that can minimize displacement while optimizing steel consumption. The analysis revealed that using a non-parallel stiffener can decrease the displacement of the door's center by about 30% while maintaining the same weight. Moreover, the optimal number of stiffeners depends on their thickness. If the thickness of the stiffener is less than 25% of the door panel's thickness, seven stiffeners should be used. If the thickness is between 25% to 40%, five stiffeners are optimal. When the thickness ranges from 40% to 60%, three stiffeners are sufficient, and if the thickness is greater than 60%, one stiffener will provide the best functionality for the explosion-proof door.

Keywords: Explosion Load, Explosion-Proof Door, Optimization, Prismatic Stiffener, Non-Prismatic Structure, Numerical Analysis.

۱. مقدمه

فنری شکل‌پذیر باهدف کاهش اثر ضربه [۹]، ساختار تک قوسی چندلایه به همراه میراگر و تیوب‌های مجوف در هسته درب [۱۰ و ۱۱] و نیز رفتار مصالح این درب‌ها تحت اثر انفجارهای پی‌درپی [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نقطه‌ضعف این درب‌ها علی‌رغم عملکرد مناسب، وزن بالای آن‌ها است که انجام تحقیقات جهت بهینه‌سازی وزن درب‌ها را ضروری می‌سازد [۱۳].

در یک تحلیل عددی هسی و همکاران [۱۴] تأثیر وجود سخت‌کننده را در درب‌های چندلایه بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که استفاده از سخت‌کننده‌های I شکل باعث جذب بخش زیادی از انرژی آزاد شده ناشی از انفجار می‌گردد. این بررسی نشان داد مقدار تنش ناشی از انفجار در سخت‌کننده‌ها با افزایش عمق آن‌ها رابطه مستقیم دارد. افزایش ۳ میلی‌متری ضخامت جان سخت‌کننده‌ها موجب ایجاد ۳۰٪ کاهش تنش در آن‌ها می‌گردد. همچنین آن‌ها ملاحظه کردند که حداکثر تنش در سخت‌کننده‌های نزدیک به تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌گردد. از طرفی هرچه به تکیه‌گاه نزدیک‌تر شویم مقدار تنش ناشی از انفجار در سخت‌کننده‌ها بیشتر می‌گردد.

جاکتو و همکاران [۱۵] باهدف مقایسه پاسخ نتایج آزمایشگاهی و پاسخ عددی صفحات فلزی در برابر بارهای انفجاری و همچنین ارائه راهنمایی برای مدل‌سازی عددی، چهار صفحه فلزی را در اندازه واقعی و با شرایط تکیه‌گاهی متفاوت تحت بارگذاری انفجاری قرار دادند. پاسخ تاریخچه زمانی شتاب و همچنین فشار ناشی از انفجار در نقاط مختلف این نمونه‌ها بررسی و همچنین برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی یک تحلیل دینامیکی خطی با استفاده از نرم‌افزار اباکوس انجام شد. بر اساس این مقایسه این نتیجه حاصل شد که هرچه تعداد مودهایی که در تحلیل در نظر گرفته می‌شود، بیشتر باشد، اختلاف نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی به‌صورت محسوسی کاهش می‌یابد و این امر به علت نوع خاص بارگذاری انفجار است که باعث تشدید فرکانس‌های بالاتر می‌شود.

پن و همکاران [۱۶] تأثیر شرایط تکیه‌گاهی را بر صفحات دارای سخت‌کننده بررسی کردند. در این تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شد که تحت بارگذاری سرویس شرایط تکیه‌گاهی برون صفحه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، اما در هنگام بارگذاری انفجار، این شرایط تکیه‌گاهی درون صفحه است که اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. همچنین این پژوهش نشان داد پس از کمانش صفحات سخت‌کننده، دیگر تفاوتی بین صفحات دارای سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده وجود ندارد. همچنین لوکا

در مکان‌هایی که در آن‌ها احتمال وقوع انفجار وجود دارد، به جهت حفظ اموال و جلوگیری از وارد آمدن خسارت‌های مالی و جانی از درب‌های ضد انفجار استفاده می‌گردد. موارد استفاده از درب‌های ضد انفجار بسیار گسترده بوده و در صنایع مختلفی از قبیل صنعت نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع نظامی و دفاعی، مراکز سیاسی نظیر کنسولگری‌ها، صنایع دریایی و کشتی‌ها، کوره‌ها و مراکز صنعتی که احتمال انفجار وجود دارد، آزمایشگاه‌های مرتبط، مراکز استراتژیک که جزء اهداف احتمالی تهاجم هستند و کلیه مکان‌هایی که در مبحث پدافند غیرعامل مطرح می‌شوند می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [۱]. درب‌های ضد انفجار تنها تجهیزات مقاوم در برابر ورود امواج و ترکش‌ها به داخل فضاهای امن هستند؛ به این ترتیب در صورت طراحی و ساخت صحیح آن‌ها می‌توان به ایمنی فضای مربوطه امیدوار بود. لذا در طراحی این درب‌ها بایستی نکاتی که باعث افزایش ایمنی آن‌ها می‌گردد مدنظر قرار گیرد. از دیدگاه دفاع غیرعامل، سعی بر این است که طراحی این درب‌ها به‌گونه‌ای باشد که در زمان معمول دارای بهره مناسب بوده و در زمان بحران نیز بتوانند حداکثر کارایی خود را حفظ نمایند. البته باید به این موضوع نیز توجه نمود که باتوجه به سطح اهمیت بنا و تهدیدات متوجه آن، عواملی که در طراحی درب‌های آن بنا استفاده می‌شود، متفاوت است.

مواد منفجره به زبان ساده، موادی هستند که در صورت آغاز فرایند انفجار، با سرعت بالایی واکنش نشان می‌دهند و حجم زیادی گاز تولید می‌کنند. به‌طور کلی، تعریف انفجار یعنی آزاد شدن مقدار زیادی گاز با سرعت و فشار بالا، این آزاد شدن به نوبه خود می‌تواند باعث پرتاب شدن قطعات و اشیاء به اطراف و تبدیل شدن آن‌ها به ترکش شود. همان‌طور که بیان شد بازشوها نقاط ضعف سازه‌ها هستند و سهل‌انگاری در طراحی دقیق آن‌ها می‌تواند موجب خسارات متعدد گردد [۲ و ۳]. تلاش پژوهشگران علاوه بر کاهش خسارات جانی و مادی، در راستای کاهش خطرات نفوذ امواج نیز بوده است و در این راستا طرح‌های متعددی پیشنهاد و مورد ارزیابی عددی و آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند [۴ و ۵].

درب‌های چندلایه یا همان پنل‌های ساندویچی که در صنعت ساختمان، صنعت نظامی و صنایع هوایی کاربرد دارد یکی از راهکارهایی است که با بهره‌گیری از ترکیب مواد فولادی و بتنی موجب بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار در برابر بارهای دینامیکی شده است [۶ و ۷]. در راستای بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار چندلایه، پژوهشگران دیگری تأثیر سخت‌کننده‌ها بر این درب‌ها را بررسی کرده‌اند [۸]. همچنین وجود رابط‌های

۲. روش تحقیق

در این پژوهش برای تحلیل و مدل‌سازی درب‌های ضد انفجار از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نرم‌افزار المان محدود آباکوس قابلیت مدل‌سازی مدل‌های دو و سه‌بعدی را داشته و با استفاده از حل‌گرهای غیرخطی توانایی حل مدل‌های دینامیکی مانند ضربه، انفجار و موارد دیگر را دارد.

یکی از انواع مسائل در تحلیل سازه‌ها، پاسخ سازه‌ها به انفجار و بارگذاری ناشی از شوک است. وقوع انفجار در هوا سبب وقوع یک جبهه فشاری از هوا می‌شود که به سازه‌ها برخورد می‌کند. سازه‌ها بخشی از این انرژی را جذب کرده و بخشی دیگر را دوباره به محیط اطراف خود منعکس می‌نمایند. انرژی جذب‌شده توسط سازه باعث ایجاد تنش و کرنش مکانیکی در آن می‌شود. بر اساس میزان انرژی جذب‌شده توسط سازه، بخش‌هایی از سازه می‌توانند وارد ناحیه پلاستیک و یا حتی آسیب شوند.

در آباکوس، روش‌های متعددی برای مدل‌سازی انفجار وجود دارد. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از مدل‌سازی انفجار به‌صورت فشار معادل و اعمال مستقیم آن بر سازه، مدل‌سازی ماده منفجره به‌صورت معادله حالت جونز ویلکنز لی^۱ (JWL) (استفاده از تکنیک‌های تطبیقی لاگرانژی اویلرین^۲ (ALE) و اویلرین-لاگرانژی لاگرانژی جفت شده (CEL)^۳ برای مش‌بندی مدل انفجاری) و در نهایت مدل سازه انفجار با استفاده از روش کانوپ. در روش اول، فشار معادل وارده بر سازه به‌صورت تابعی از زمان با استفاده از تعریف دامنه انفجار و یا تابعی از زمان و مکان تعریف شده و مستقیماً بر سازه اعمال می‌گردد. در روش دوم، ماده منفجره به‌صورت ماده JWL مدل‌سازی می‌شود و هوا نیز با استفاده از تکنیک‌های ALE و یا CEL مدل‌سازی می‌شود. در روش سوم نیز در حالتی که سازه تحت شوک ناشی از انفجار هوایی قرار گرفته است، می‌تواند با استفاده از روش کانوپ مدل‌سازی شود.

از آنجایی که نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی برای صحت سنجی از روش فشار معادل برای مدل‌سازی انفجار استفاده نموده است، بنابراین در این مطالعه نیز برای مدل‌سازی انفجار از همان روش استفاده شده است. برای انجام تحلیل غیرخطی و سه‌بعدی مدل‌ها از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶،۱۴،۱ استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات، مدل قاب‌ها با المان‌های ایزوتروپیک S4R شکل چهار‌گره‌ای ساخته شده و از معیار گسیختگی ون‌میسز و قوانین حاکم بر آن برای مدل‌کردن پلاستیسته مدل استفاده شد.

و همکاران [۱۷] علاوه بر شرایط تکیه‌گاهی، یک مطالعه پارامتریک در رابطه با تأثیر وجود عیوب اولیه و همچنین کماتش موضعی سخت‌کننده‌ها بر روی نتایج عملکرد این نوع صفحات در برابر بارگذاری انفجار انجام دادند.

یوئن و لانگدون [۱۸ و ۱۹] در دو بخش به بررسی بارگذاری انفجار بر روی صفحات دارای سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده پرداختند. در بخش اول [۱۸] از بارگذاری یکنواخت و در بخش دوم [۱۹] از بارگذاری موضعی انفجار بر روی این صفحات استفاده شده است. طبق این پژوهش به‌واسطه افزایش سخت‌کننده‌ها، امکان گسیختگی و پارگی صفحات کاهش پیدا نمی‌کند بلکه حتی زودتر نیز اتفاق می‌افتد و در واقع سخت‌کننده‌ها، صفحات را صرفاً به تغییرات پلاستیک محدود می‌کنند. همچنین این پژوهش ادعا می‌کند که اکثر گسیختگی در صفحات دارای سخت‌کننده به‌واسطه تغییر شکل‌های زیاد است و بخش کمتری از آن به‌واسطه پارگی برشی در تکیه‌گاه‌ها رخ می‌دهد.

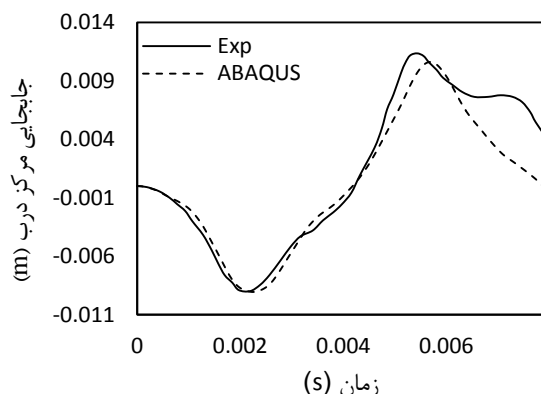
کادید [۲۰] با استفاده از تحلیل دینامیکی و پارامتر هدف تغییر مکان نقطه میانی درب‌های ضد انفجار، نشان داد که نمونه‌های دارای سخت‌کننده حساسیت بیشتری به مش‌بندی نسبت به مدل‌های بدون سخت‌کننده دارند. این تحقیقات همچنین نشان داد که عملکرد درب‌های ضد انفجار به پیکربندی متفاوت سخت‌کننده‌ها حساس بوده و میزان جابه‌جایی نقطه میانی درب‌های ضد انفجار بر اثر بارگذاری کاملاً با تغییر مش‌بندی و پیکربندی تغییر خواهد کرد و به یک آنالیز حساسیت برای پیدا نمودن بهترین مش‌بندی در هر پیکربندی نیاز است. همچنین طی مطالعه‌ای صالحی [۲۱] بر روی مقاوم‌سازی درب سازه‌های امن با استفاده از ساختارهای هندسی چند قوسی تحقیق نمود. مطابق این مطالعه استفاده از ساختار چند قوسی به جای صفحه تخت درب، موجب افزایش جذب انرژی درب‌های ضد انفجار خواهد شد. پیمان و طولابی [۲۲] نیز نشان دادند درب‌های قوسی نسبت به درب‌های بدون قوس عملکرد بهتری دارند. همچنین پیشنهاد نمودند که بهتر است محور دوران قوس موازی با بعد کوچک‌تر آن باشد.

همان‌طور که در بالا ذکر شد محققین متعددی به بررسی رفتار درب‌های ضد انفجار پرداخته‌اند. این مطالعه در نظر دارد تا با بررسی ساختار جدید سخت‌کننده‌ها، تأثیر تعداد و ضخامت سخت‌کننده را بر مقاومت درب ضد انفجار بررسی نموده و ضمن افزایش ایمنی و بهبود رفتار این درب‌ها، وزن آن‌ها را نیز کاهش دهد.

¹ The Jones-Wilkens-Lee equation of state

² Arbitrary Lagrangian-Eulerian

³ The Coupled Eulerian-Lagrangian



شکل ۱. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی

۳. صحت‌سنجی

برای انجام مدل‌سازی‌های لازم و بررسی تأثیر عوامل مطرح شده در این مطالعه بر عملکرد درب‌های ضد انفجار، ابتدا می‌بایست از صحت مدل ساخته شده و عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده اطمینان حاصل نمود؛ لذا ضروری است تا با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها، صحت مدل نرم‌افزاری ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته و دقت آن سنجیده شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تحلیل رفتاری درب‌ها در مقابل بار انفجار بررسی میزان جابه‌جایی ایجاد شده بر روی سطح آن‌ها است. در این بخش برای انجام صحت‌سنجی، مدل المان محدود شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده و انطباق نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در ادامه از نتایج تحقیقات خلیل و همکاران [۲۳] استفاده شده است.

در مطالعه مذکور به منظور بررسی رفتار درب‌های فولادی در مقابل بار انفجار یک آزمایش میدانی انجام شده است. همانند مطالعه خلیل و همکاران [۲۳] رفتار درب فولادی به ابعاد ۵۰۸ میلی‌متر و ضخامت ۳/۴ میلی‌متر در آباکوس تحت اثر انفجار مدل‌سازی شد. بر اساس اطلاعات مطالعه مذکور، جرم حجمی درب برابر ۷۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۲۰۶ گیگاپاسکال اختیار شده‌اند. تنش تسلیم و کرنش سختی نیز مطابق با اطلاعات آزمایشگاهی به ترتیب ۳۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و $۰/۶۸۹ \times 10^{-8}$ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی از مشخصات، بارگذاری، شرایط مرزی و ورق‌های پوسته‌ای مشابه مشخصات نمونه آزمایشگاهی استفاده شده است.

نمودار نتایج جابه‌جایی- زمان مرکز درب حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در هر دو مدل، مرکز درب در بازه زمانی بسیار نزدیک به هم و در حدود ۵/۵ میلی‌ثانیه از شروع انفجار به حداکثر جابه‌جایی خود رسیده است. همچنین از نظر مقدار جابه‌جایی نیز تقریباً با یک میلی‌متر اختلاف نتایج مشابهی به دست آمده است. دلیل اختلاف در انتهای نمودار را نیز می‌توان مشارکت موده‌های بالاتر در مدل آزمایشگاهی عنوان نمود. با توجه به تطابق مطلوب نتایج کار آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی و وجود میانگین اختلاف کمتر از ده درصد در نتایج، می‌توان صحت مدل انجام شده را مورد تأیید قرارداد. بدین ترتیب می‌توان در ادامه برای بررسی ایده‌های مطرح شده در این مطالعه، به مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار آباکوس و حصول پاسخ از آن‌ها اقدام نمود.

۴. نتایج و بحث

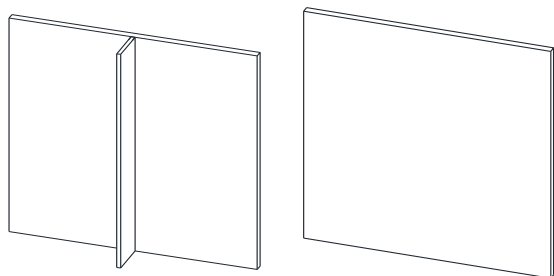
در این پژوهش برای بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار در مقابل اثرات مخرب ناشی از بار انفجار، عواملی همچون شکل سخت‌کننده‌ها، تعداد و ساختار مناسب چینش آن‌ها بررسی شده است. همچنین با انجام بهینه‌سازی، ضخامت و تعداد بهینه استفاده از سخت‌کننده در مقطع درب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه به بررسی تأثیر هر یک از عوامل فوق بر حداکثر جابه‌جایی ایجاد شده در مرکز درب پرداخته شده است.

۴-۱. شکل سخت‌کننده‌ها و ساختار مناسب چینش آن‌ها

در این بخش با بررسی دو نوع مختلف از سخت‌کننده و تغییر پیکربندی آن‌ها و با در نظر گرفتن تغییرات جابه‌جایی نقطه میانی درب ضد انفجار، مناسب‌ترین نوع پیکربندی تعیین خواهد شد. همچنین با استفاده از تحلیل‌های المان محدود، تأثیر وجود انواع مختلف سخت‌کننده بر پایداری این درب‌ها بررسی می‌شود. برای نیل به این منظور از مقایسه جابه‌جایی‌های ایجاد شده در صفحات درب‌ها استفاده خواهد شد.

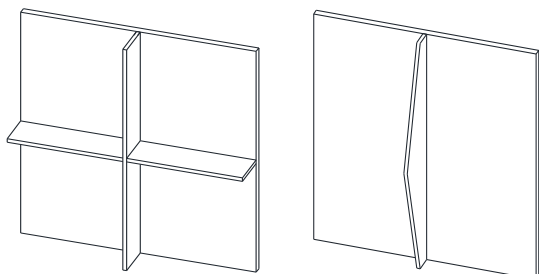
به منظور بررسی اهمیت سخت‌کننده‌ها و همچنین مقایسه نحوه چینش آن‌ها هفت مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است که در شکل (۲) تصاویر آن‌ها نمایش داده شده است. بدین منظور مدل یک درب بدون تقویت و نیز شش درب تقویت شده با سخت‌کننده‌هایی با اشکال و حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌ها از دو نوع سخت‌کننده با مقطع ثابت و مقطع غیر منشوری استفاده شده است تا اهمیت استفاده از این مقاطع مورد ارزیابی قرار گیرد. سخت‌کننده با مقطع ثابت یک سخت‌کننده مستطیلی بوده و سخت‌کننده با مقطع غیر منشوری نیز یک سخت‌کننده با مقطعی دوزنقه‌ای شکل است. برای اینکه مقایسه صحیحی از عملکرد سخت‌کننده‌ها صورت بگیرد وزن آن‌ها یکسان در نظر گرفته شد. بدین منظور جهت یکسان شدن وزن دو نوع سخت‌کننده، در سخت‌کننده‌های غیر منشوری میانگین طول دو قاعده دوزنقه برابر با طول مستطیل

جابه‌جایی به ۱۲ درصد جابه‌جایی مرکز درب بدون سخت‌کننده خواهد شد. ضخامت سخت‌کننده‌ها در تمام این حالات یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها جابه‌جایی نقطه میانی آن کاهش یافته است.



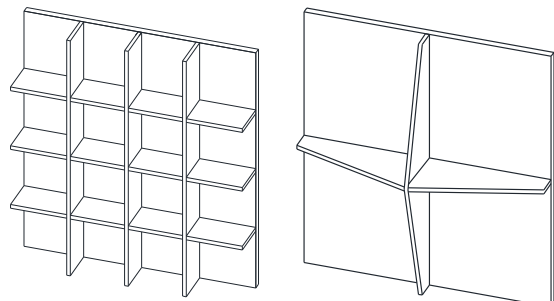
ب- یک سخت‌کننده مستطیلی

الف- ساده



ج- یک سخت‌کننده غیر منشوری

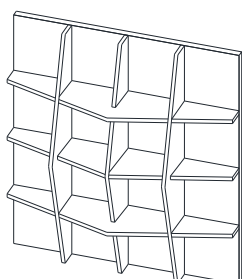
د- سخت‌کننده مستطیلی صلیبی



ه- سخت‌کننده غیر منشوری

و- سخت‌کننده مستطیلی جدولی

صلیبی



ز- سخت‌کننده غیر منشوری جدولی

شکل ۲. نمایی شماتیک از مدل‌سازی درب با انواع چینش سخت‌کننده‌ها

سخت‌کننده منشوری در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال اگر قاعده مستطیل ۱۰۰ میلی‌متر بوده است، قاعده‌های دوزنقه ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا در نهایت وزن اشغال شده توسط آن‌ها یکسان شود. براین اساس وزن هر دو سخت‌کننده با مقطع منشوری و غیر منشوری یکسان خواهد بود. علاوه بر موارد فوق، با استفاده از مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته، ساختار قرارگیری هر یک از سخت‌کننده‌ها به صورت‌های منفرد، صلیبی و جدولی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این مطالعه برای مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس از المان پوسته‌ای استفاده شده است. همه اتصالات به‌صورت گیردار در نظر گرفته شده‌اند. ابعاد صفحه درب‌ها در همه نمونه‌ها برابر مقدار ثابت نیم متر در نیم متر و ضخامت آن ۳/۴ میلی‌متر لحاظ شده است. طول سخت‌کننده‌های مورد استفاده نیز ۵۰ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها برابر با ۱ میلی‌متر طراحی شده است. برای مدل‌سازی صفحه درب و سخت‌کننده‌ها از فولاد معمولی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۳، چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و تنش تسلیم ۳۰۰ مگا پاسکال استفاده شده است.

نتایج میزان جابه‌جایی مرکز درب‌های ضد انفجار در جدول (۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، تحت تأثیر انفجار مربوطه در مرکز درب ساده و بدون سخت‌کننده ۷/۵ میلی‌متر جابه‌جایی به وجود خواهد آمد. استفاده از سخت‌کننده مستطیلی جابه‌جایی مرکز درب را ۵۶ درصد کاهش می‌دهد. این در حالی است که سخت‌کننده غیر منشوری عملکرد بهتری داشته و باعث کاهش ۷۱ درصدی مقدار جابه‌جایی میانه درب تحت اثر بار انفجار خواهد شد. همچنین استفاده از دو سخت‌کننده مستطیلی به‌صورت صلیبی و شش جابه‌جایی به میزان ۷۲ و ۸۴ درصد خواهد شد. این در حالی است که استفاده از همان سخت‌کننده‌ها به‌صورت غیر منشوری سبب کاهش جابه‌جایی به میزان ۸۱ و ۸۸ درصد مقدار اولیه خواهد شد. بنابراین با استفاده از سخت‌کننده‌های غیر منشوری رفتار این درب‌ها بهبود می‌یابد که این امر نشان می‌دهد درب‌های تجهیز شده به سخت‌کننده غیر منشوری عملکرد بهتری در کاهش جابه‌جایی نقطه میانی خواهند داشت.

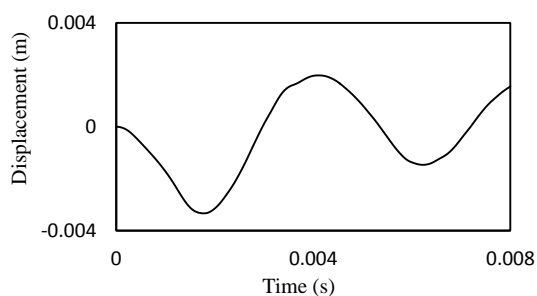
به‌طور کلی استفاده از یک سخت‌کننده مستطیلی باعث کاهش جابه‌جایی به ۴۴ درصد، یک سخت‌کننده غیر منشوری باعث کاهش جابه‌جایی به ۲۹ درصد، دو سخت‌کننده مستطیلی صلیبی باعث کاهش جابه‌جایی به ۲۸ درصد، دو سخت‌کننده غیر منشوری صلیبی باعث کاهش جابه‌جایی به ۱۸ درصد، ۶ سخت‌کننده مستطیلی به‌صورت جدولی باعث کاهش جابه‌جایی به ۱۶ درصد و ۶ سخت‌کننده غیر منشوری به‌صورت جدولی باعث کاهش

صفحه درب تأثیر بسیار موثرتری نسبت به اضافه نمودن ضخامت صفحه درب دارند.

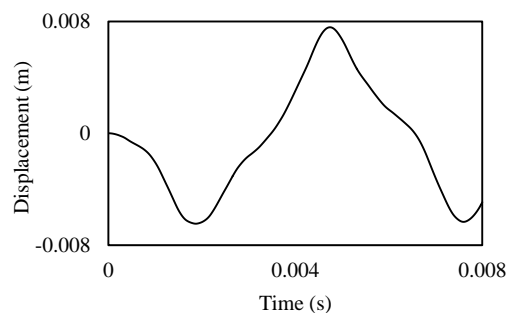
جدول ۱. جابجایی مرکز درها

میزان جابه‌جایی (میلی‌متر)	نوع درب
۷/۵	ساده
۳/۳	یک سخت‌کننده مستطیلی
۲/۲	یک سخت‌کننده غیر منشوری
۲/۱	سخت‌کننده مستطیلی صلیبی
۱/۴	سخت‌کننده غیر منشوری صلیبی
۱/۲	سخت‌کننده مستطیلی به‌صورت جدولی
۰/۹	سخت‌کننده غیر منشوری به‌صورت جدولی

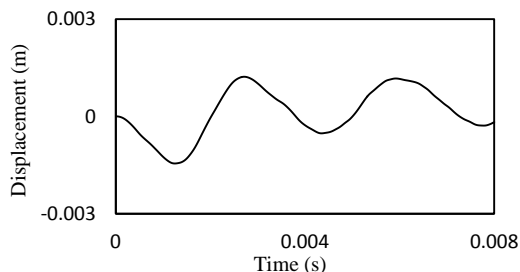
همان‌طور که در بالا مطرح شد، در حالات ذکر شده با اضافه کردن یک، دو و شش سخت‌کننده به درب، جابه‌جایی مرکز آن کاهش بسیار زیادی پیدا کرد. حال ممکن است این موضوع مطرح گردد که با اضافه نمودن سخت‌کننده به درب وزن آن افزایش خواهد یافت و اگر همین مقدار فولاد به ضخامت صفحه درب اضافه شود شاید عملکرد بهتری حاصل شود؛ بنابراین برای مشخص شدن این ابهام همان مقدار وزن سخت‌کننده‌ها به وزن صفحه درب اضافه شد و بدین ترتیب ضخامت آن به ترتیب به ۳/۴۲۹، ۳/۴۵۸ و ۳/۵۴۷ میلی‌متر افزایش پیدا نمود. نتایج حاصل نشان دادند که جابه‌جایی مرکز دربی با چنین ضخامتی به ترتیب ۱، ۲ و ۵ درصد نسبت به جابه‌جایی درب با ضخامت ۳/۴ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده از سخت‌کننده‌ها بر روی



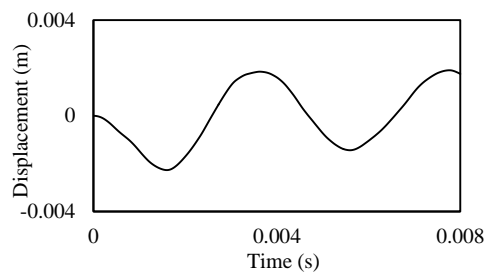
الف - ساده



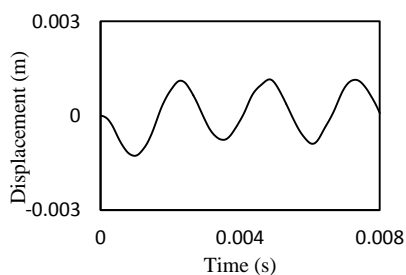
ب- با یک سخت‌کننده مستطیلی



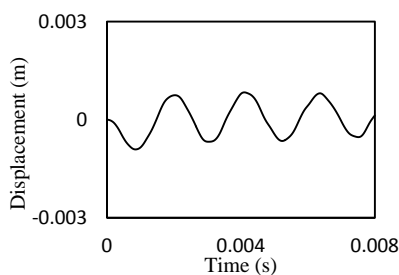
پ- با یک سخت‌کننده غیر منشوری



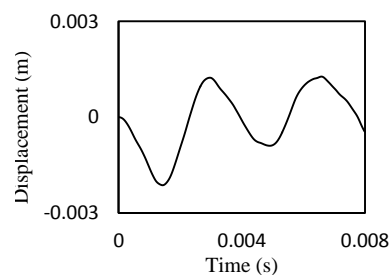
ت- با سخت‌کننده غیر منشوری صلیبی



چ- با سخت‌کننده مستطیلی به‌صورت جدولی



ج- با سخت‌کننده غیر منشوری به‌صورت جدولی



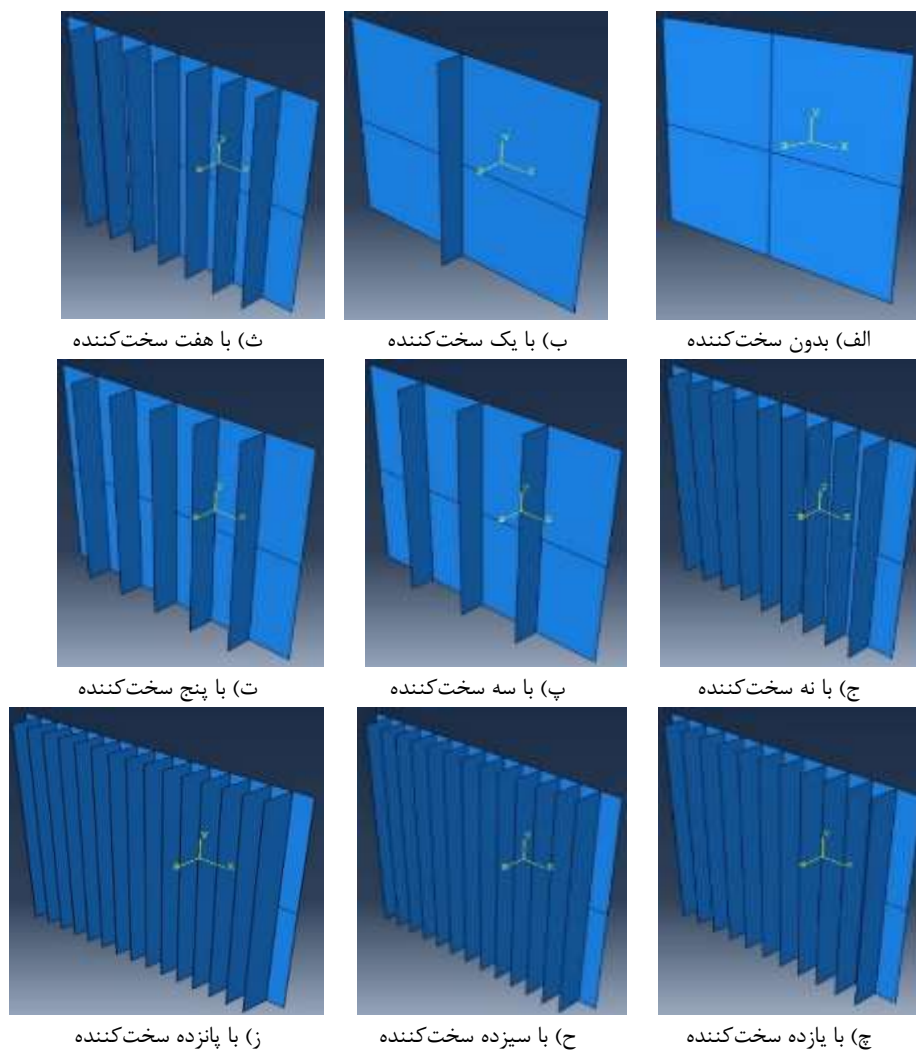
ث- با سخت‌کننده مستطیلی صلیبی

شکل ۳. عکس‌العمل صفحات با انواع چینش سخت‌کننده

۴-۲. تعداد سخت‌کننده بهینه

نهایت تعداد سخت‌کننده بهینه پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که در این انجام این تحلیل‌ها طول و عرض درب‌ها یکسان فرض شده و عمق سخت‌کننده حدوداً یک‌دهم طول درب در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب می‌توان با تقریب خوبی این نتایج را به سایر درب‌های ضد انفجار ارجاع داد.

در این مطالعه، علاوه بر استفاده از سخت‌کننده‌های غیر منشوری، بر تعداد و ضخامت مناسب سخت‌کننده‌ها نیز مطالعه عددی گسترده‌ای صورت گرفته و بهینه‌سازی انجام شده است. شکل (۴) نشان‌دهنده صفحات با تعداد متفاوت سخت‌کننده است. بر روی این صفحات عملیات بهینه‌سازی صورت گرفته و در



شکل ۴. درب ضد انفجار با تعداد سخت‌کننده‌های متفاوت

مرحله با تمرکز بر دو شاخص وزن و جابه‌جایی مرکز درب‌های ضد انفجار، بهینه‌سازی لازم صورت پذیرفت. به عبارتی درعین حال که جابه‌جایی مرکز درب کاهش پیدا می‌کند، اما این امر با افزایش تزییدی وزن درب همراه نخواهد بود. برای این منظور از مطالعات بهینه‌سازی موعلا و همکاران [۲۵] استفاده گردید. در این مطالعه برای بهینه‌سازی از شاخص عملکرد PI با تعریف زیر استفاده شده است:

$$PI = \sqrt{R_d^2 + R_m^2} \quad (1)$$

بر اساس مطالب بیان شده در بخش‌های قبل و باتوجه به اهمیت کاهش وزن در درب‌های ضد انفجار، در این بخش به بهینه‌سازی تعداد سخت‌کننده‌ها پرداخته شده است. شایان‌ذکر است برای عمومیت‌یافتن این تحلیل از سخت‌کننده‌های مستطیلی که در صنعت متداول هستند، استفاده شده است. باتوجه به مقدار ثابت وزن سخت‌کننده‌های منشوری و غیر منشوری، این تحلیل برای سخت‌کننده‌های غیر منشوری نیز حاکم خواهد بود. در این

ضخامت سخت‌کننده بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد، تعداد ۳ سخت‌کننده و با ضخامت بیشتر از ۶۰ درصد، تعداد ۱ سخت‌کننده بهترین حالت عملکردی در برابر انفجار را تشکیل خواهند داد. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است هرچه ضخامت سخت‌کننده افزایش می‌یابد نیاز به تعداد سخت‌کننده کمتری برای بهینه‌سازی وجود دارد.

جدول ۲. وزن درج با تعداد و ضخامت متفاوت سخت‌کننده‌ها (ضخامت برحسب میلی‌متر و وزن‌ها برحسب کیلوگرم)

تعداد/ ضخامت	۱	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵
۰/۵	۷/۰۳	۷/۲۳	۷/۴۳	۷/۶۳	۷/۸۳	۸/۰۳	۸/۲۳	۸/۴۳
۰/۶	۷/۰۵	۷/۲۹	۷/۵۳	۷/۷۷	۸/۰۱	۸/۲۵	۸/۴۹	۸/۷۳
۰/۷	۷/۰۷	۷/۳۵	۷/۶۳	۷/۹۱	۸/۱۹	۸/۴۷	۸/۷۵	۹/۰۳
۰/۸	۷/۰۹	۷/۴۱	۷/۷۳	۸/۰۵	۸/۳۷	۸/۶۹	۹/۰۱	۹/۳۳
۰/۹	۷/۱۱	۷/۴۷	۷/۸۳	۸/۱۹	۸/۵۵	۸/۹۱	۹/۲۷	۹/۶۳
۰/۱۰	۷/۱۳	۷/۵۳	۷/۹۳	۸/۳۳	۸/۷۳	۹/۱۳	۹/۵۳	۹/۹۳
۱/۱	۷/۱۵	۷/۵۹	۸/۰۳	۸/۴۷	۸/۹۱	۹/۳۵	۹/۷۹	۱۰/۲۳
۱/۲	۷/۱۷	۷/۶۵	۸/۱۳	۸/۶۱	۹/۰۹	۹/۵۷	۱۰/۰۵	۱۰/۵۳
۱/۳	۷/۱۹	۷/۷۱	۸/۲۳	۸/۷۵	۹/۲۷	۹/۷۹	۱۰/۳۱	۱۰/۸۳
۱/۴	۷/۲۱	۷/۷۷	۸/۳۳	۸/۸۹	۹/۴۵	۱۰/۰۱	۱۰/۵۷	۱۱/۱۳
۱/۵	۷/۲۳	۷/۸۳	۸/۴۳	۹/۰۳	۹/۶۳	۱۰/۲۳	۱۰/۸۳	۱۱/۴۳
۱/۶	۷/۲۵	۷/۸۹	۸/۵۳	۹/۱۷	۹/۸۱	۱۰/۴۵	۱۱/۰۹	۱۱/۷۳
۱/۷	۷/۲۷	۷/۹۵	۸/۶۳	۹/۳۱	۹/۹۹	۱۰/۶۷	۱۱/۳۵	۱۲/۰۳
۲/۰	۷/۳۳	۸/۱۳	۸/۹۳	۹/۷۳	۱۰/۵۳	۱۱/۳۳	۱۲/۱۳	۱۲/۹۳
۲/۱	۷/۳۵	۸/۱۹	۹/۰۳	۹/۸۷	۱۰/۷۱	۱۱/۵۵	۱۲/۳۹	۱۳/۲۳
۲/۲	۷/۳۷	۸/۲۵	۹/۱۳	۹/۱۳	۱۰/۰۱	۱۰/۸۹	۱۱/۷۷	۱۲/۶۵
۳/۴	۷/۶۱	۸/۹۷	۱۰/۳۳	۱۱/۶۹	۱۳/۰۵	۱۴/۴۱	۱۵/۷۷	۱۷/۱۳

جدول ۳. جابه‌جایی مرکز درج با تعداد و ضخامت متفاوت سخت‌کننده‌ها (ضخامت درج و جابه‌جایی مرکز آن برحسب میلی‌متر)

تعداد/ ضخامت	۱	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵
۰/۵	۴/۷۰	۳/۸۶	۲/۹۴	۲/۲۷	۱/۸۱	۱/۶۱	۱/۶۰	۱/۳۶
۰/۶	۴/۴۰	۳/۴۷	۲/۵۳	۱/۹۰	۱/۶۳	۱/۵۷	۱/۴۹	۱/۳۳
۰/۷	۴/۱۱	۳/۱۳	۲/۱۹	۱/۶۷	۱/۵۵	۱/۴۵	۱/۳۲	۱/۲۵
۰/۸	۳/۸۳	۲/۸۴	۱/۹۳	۱/۵۸	۱/۴۳	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۱۶
۰/۹	۳/۵۸	۲/۵۸	۱/۷۳	۱/۵۰	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۰۵	۱/۰۳
۰/۱۰	۳/۳۴	۲/۳۶	۱/۶۰	۱/۴۱	۱/۱۹	۱/۰۶	۰/۹۶	۰/۹۲
۱/۱	۳/۱۲	۲/۱۷	۱/۵۶	۱/۳۱	۱/۰۷	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۸۲
۱/۲	۲/۹۱	۲/۰۰	۱/۴۹	۱/۲۱	۱/۰۰	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۷۵
۱/۳	۲/۷۳	۱/۸۷	۱/۴۱	۱/۱۱	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۷۰
۱/۴	۲/۵۷	۱/۷۷	۱/۳۳	۱/۰۳	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۶۴
۱/۵	۲/۴۱	۱/۶۸	۱/۲۴	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۵۷
۱/۶	۲/۲۸	۱/۶۰	۱/۱۵	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۶۸	۰/۴۹
۱/۷	۲/۱۵	۱/۵۲	۱/۰۹	۰/۸۳	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۴۲
۲/۰	۱/۸۶	۱/۳۴	۰/۹۰	۰/۷۳	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۳۳
۲/۱	۱/۸۰	۱/۲۸	۰/۸۷	۰/۷۱	۰/۵۹	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۳۱
۲/۲	۱/۷۵	۱/۲۳	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۵۷	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۳۰
۳/۴	۱/۲۶	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۲۷

در این رابطه، شاخص R_d نسبت حداکثر جابه‌جایی درج با سخت‌کننده به درج بدون سخت‌کننده است. همچنین R_m شاخص وزن است که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$R_m = \frac{m_s - m_i}{m_i} \quad (۲)$$

که در آن m_s وزن درج با سخت‌کننده و m_i وزن درج بدون سخت‌کننده است. لازم به ذکر است که در روابط فوق بر اساس اهمیت کاهش وزن درج‌ها، میزان اهمیت پارامترهای جابه‌جایی و وزن یکسان در نظر گرفته شده است. در صورتی که اهمیت جرم و حداکثر جابه‌جایی متفاوت باشد، می‌توان ضریب اهمیت w_i را به معادله بهینه‌سازی به صورت زیر اضافه نمود:

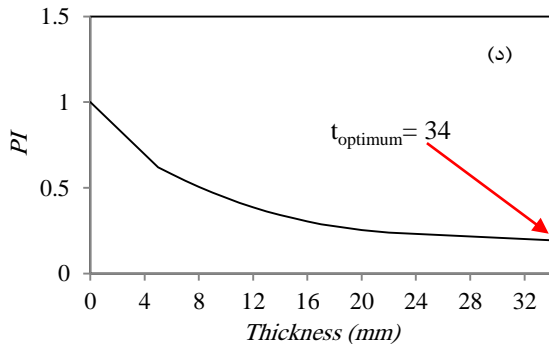
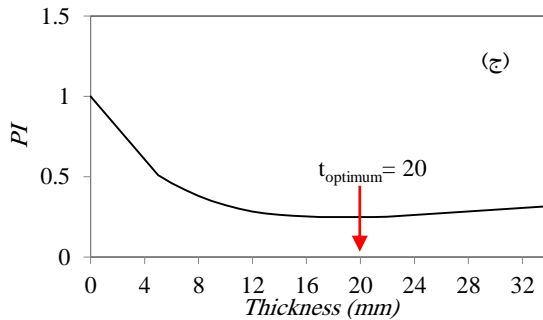
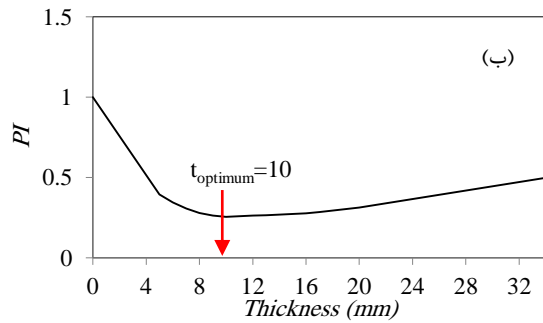
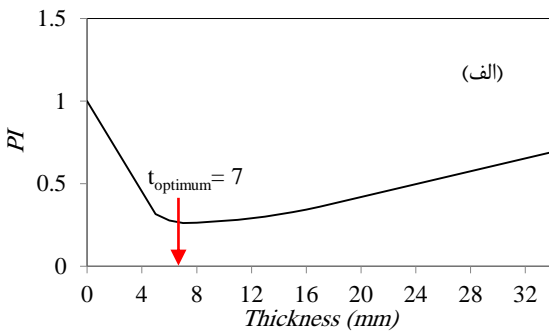
$$PI = \sqrt{w_d R_d^2 + w_m R_m^2} \quad (۳)$$

که در آن w_d و w_m به ترتیب ضریب اهمیت جابه‌جایی و جرم هستند. بدین ترتیب ضخامت و تعداد سخت‌کننده‌ها متغیر انتخاب شده و برای به دست‌یافتن به تعداد سخت‌کننده بهینه، شاخص PI تعیین می‌گردد. کمترین مقدار این شاخص بیانگر بهینه‌ترین حالت برای کاهش وزن و جابه‌جایی مرکز درج خواهد بود.

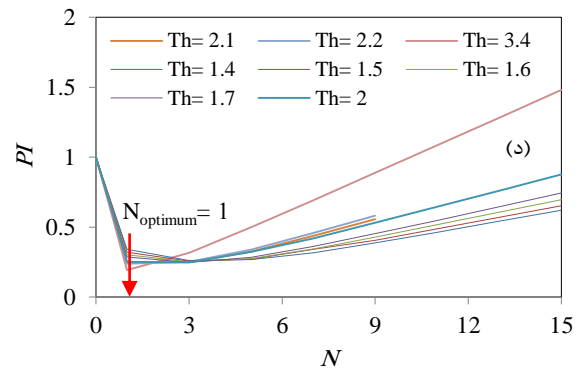
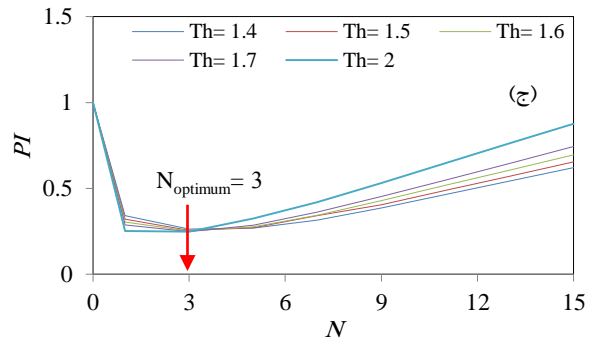
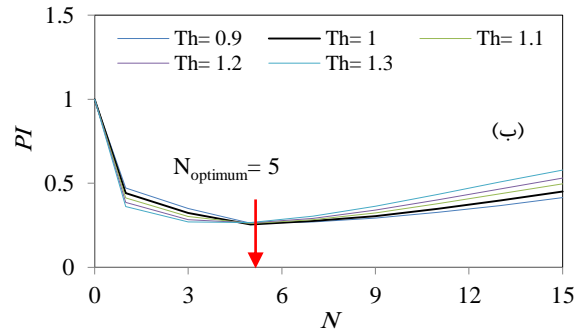
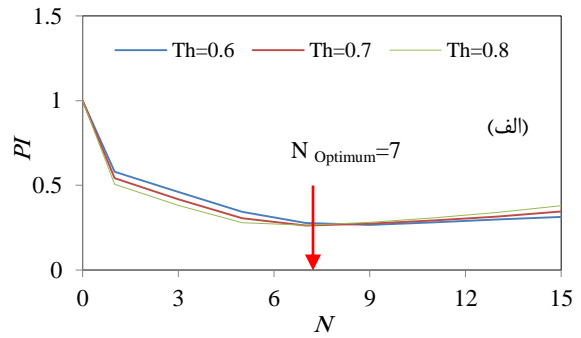
در این مطالعه ضخامت صفحه درج برابر با ۳/۴ میلی‌متر است، بنابراین جهت انتخاب ضخامت مناسب و منطقی برای تحلیل سخت‌کننده‌ها، این مقدار از یک‌ششم تا تمام ضخامت درج، یعنی از ۰/۵ تا ۳/۴ میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شده است. مقادیر وزن درج‌های ضد انفجار با ضخامت و تعداد سخت‌کننده‌های متفاوت در جدول (۲) و مقادیر حداکثر جابه‌جایی مرکز این درج‌ها در برابر بار انفجاری تعریف شده در قسمت پیشین در جدول (۳) گزارش شده است.

شکل (۵) نتایج مربوط به شاخص عملکرد درج‌های ضد انفجار با ضخامت متغیر از ۰/۶ تا ۳/۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در این بخش بهینه‌سازی تعداد سخت‌کننده‌ها برای یافتن بهترین عملکرد درج ضد انفجار با تمرکز بر عدم افزایش وزن آن‌ها صورت گرفته است. نمودارهای شکل (۵) شاخص عملکرد درج‌های ضد انفجار با متغیرهای گوناگون را نشان می‌دهد. با توجه به نتایجی که به دست آمده است، بر اساس ضخامت‌های مختلف و فرض یکسان بودن ضریب اهمیت، تعداد سخت‌کننده بهینه محاسبه گردید. بر اساس نتایج حاصل شده، اگر ضخامت سخت‌کننده از ۱/۴ تا ۳/۴ میلی‌متر باشد تعداد سخت‌کننده بهینه تنها یک عدد است. در واقع با یک سخت‌کننده درج ضد انفجار به صورت توأمان به بهینه‌ترین حالت وزن و جابه‌جایی می‌رسد. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، در صورتی که ضخامت سخت‌کننده کمتر از ۲۵ درصد باشد، تعداد ۷ سخت‌کننده، در صورتی که ضخامت سخت‌کننده بین ۲۵ تا ۴۰ درصد باشد، تعداد ۵ سخت‌کننده، در هنگامی که

در شکل (۶) مشخص است، با فرض ثابت بودن ضریب اهمیت وزن و جابه‌جایی، هنگامی‌که تعداد سخت‌کننده‌ها ۷ عدد است، ضخامت سخت‌کننده بهینه باید ۲۰ درصد از ضخامت درب اصلی باشد. چنانچه این تعداد سخت‌کننده ۵ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید ۳۰ درصد ضخامت درب، هنگامی‌که تعداد سخت‌کننده‌ها ۳ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید ۶۰ درصد ضخامت درب اصلی و زمانی که تعداد سخت‌کننده‌ها ۱ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید برابر با ضخامت درب اصلی باشد.



شکل ۶. بهینه‌سازی ضخامت سخت‌کننده در دره‌هایی با الف) ۷ عدد (ب) ۵ عدد ج) ۳ عدد و د) ۱ عدد سخت‌کننده



شکل ۵. بهینه‌سازی با سخت‌کننده‌هایی به ضخامت الف) کمتر از ۲۵ (ب) ۲۵ تا ۴۰ ج) ۴۰ تا ۶۰ و د) ۶۰ تا ۱۰۰ درصد ضخامت درب

۳-۴. ضخامت سخت‌کننده بهینه

باتوجه به بهینه‌سازی‌های انجام شده در بخش قبل، در این مرحله اقدام به بهینه‌سازی ضخامت سخت‌کننده‌ها شد. به این ترتیب که باتوجه به تعداد سخت‌کننده‌های استفاده شده، ضخامت سخت‌کننده بهینه به دست آمده است. ابعاد درب‌های بهینه‌سازی شده در این قسمت کاملاً مشابه بخش پیشین است. همان‌طور که

۵. نتیجه‌گیری

Based on the Built-in Camouflage Method”; J. Passive 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] Seyman, S.; Ebrahimzade, A. “Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading”; J. Adv. Def. Sci. & Technol. 2020, 11, 347-355 (In Persian).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Hause, T.; Librescu, L. “Dynamic Response of Doubly-Curved Anisotropic Sandwich Panels Impacted by Blast Loadings”; Int. J. Solids Struct. 2007, 44, 6678-6700.
- [11] Wang, C.; Xu, B.; Yuen, S. C. K. “Numerical Analysis of Cladding Sandwich Panels with Tubular Cores Subjected to Uniform Blast Load”; Int. J. Imp. Eng. 2019, 133, 103345.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Jacinto, A. C.; Ambrosini, R. D.; Danesi, R. F. “Experimental and Computational Analysis of Plates under Air Blast Loading”; Int. J. Imp. Eng., 2001, 25, 927-947.
- [16] Pan, Y.; Louca, L. A. “Experimental and Numerical Studies on the Response of Stiffened Plates Subjected to Gas Explosions”; J. Const. Steel Res. 1999, 52, 171-193.
- [17] Louca, L.; Punjani, M.; Harding, J. “Non-Linear Analysis of Blast Walls and Stiffened Panels Subjected to Hydrocarbon Explosions”; J. Const. Steel Res. 1996, 37, 93-113.
- [18] Yuen, S. C. K.; Nurick, G. “Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates. Part I: Subjected to Uniform Blast Load”; Int. J. Imp. Eng. 2005, 31, 55-83.
- [19] Langdon, G.; Yuen, S. C. K.; Nurick, G. “Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates. Part II: Localised Blast Loading”; Int. J. Imp. Eng. 2005, 31, 85-111.
- [20] Kadid, A. “Stiffened Plates Subjected to Uniform Blast Loading”; J. Civil Eng. Manag. 2008, 14, 155-161.

باتوجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد پیکربندی و مشخصات سخت‌کننده‌ها بر عملکرد درب‌های ضد انفجار در برابر بار انفجار تأثیر بسزایی دارند. علاوه بر نحوه چینش سخت‌کننده‌ها، استفاده از سخت‌کننده‌های غیر منشوری نیز باعث کاهش جابه‌جایی مرکز صفحه خواهند شد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد درب ضد انفجار با استفاده از سخت‌کننده‌های غیر منشوری است. شایان ذکر است، هرچند وجود سخت‌کننده، باعث افزایش بهره‌وری درب خواهد شد؛ اما برای رسیدن به بهترین عملکرد حتماً نیاز به بهینه‌سازی تعداد و ضخامت سخت‌کننده‌ها است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سخت‌کننده غیر منشوری نسبت به سخت‌کننده منشوری باعث کاهش ۳۰ درصد جابه‌جایی مرکز درب می‌شود. این کاهش جابه‌جایی در حالی رخ می‌دهد که وزن درب ضد انفجار ثابت می‌ماند و صرفاً پیکربندی سخت‌کننده‌ها تغییر کرده است. بهینه‌سازی تعداد سخت‌کننده‌ها برای یافتن بهترین عملکرد درب ضد انفجار با تمرکز بر عدم افزایش وزن آن صورت گرفت. باتوجه به پژوهش انجام شده، با فرض یکسان بودن اهمیت وزن و مقدار جابه‌جایی، در صورتی که ضخامت سخت‌کننده کمتر از ۲۵ درصد ضخامت ورق درب باشد، تعداد ۷ سخت‌کننده، در صورتی که ضخامت سخت‌کننده بین ۲۵ تا ۴۰ درصد باشد، تعداد ۵ سخت‌کننده، در هنگامی که ضخامت سخت‌کننده بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد، تعداد ۳ سخت‌کننده و با ضخامت بیشتر از ۶۰ درصد تا همان ضخامت ورق درب، تعداد ۱ سخت‌کننده بهترین حالت عملکردی درب ضد انفجار را می‌سازد. علاوه بر تعداد سخت‌کننده، در این مطالعه اقدام به بهینه‌سازی ضخامت سخت‌کننده‌ها با تمرکز بر بهبود عملکرد آن‌ها شد. طبق این نتایج، با فرض یکسان بودن اهمیت وزن و جابه‌جایی، هنگامی که تعداد سخت‌کننده‌ها ۷ عدد است، ضخامت سخت‌کننده بهینه باید ۲۰ درصد ضخامت درب اصلی باشد. چنانچه این تعداد سخت‌کننده ۵ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید ۳۰ درصد ضخامت درب، هنگامی که تعداد سخت‌کننده‌ها ۳ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید ۶۰ درصد ضخامت درب اصلی و زمانی که تعداد سخت‌کننده‌ها ۱ عدد باشد، ضخامت سخت‌کننده باید برابر با ضخامت درب اصلی باشد.

۶. مراجع‌ها

- [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

- [24] Minh Thanh, V.; Santosa, S. P.; Widagdo, D.; Putra, I. S. "Steel Plate Behavior under Blast Loading-Numerical Approach Using Ls-Dyna"; *Appl. Mech. and Mater.*, 2016, 842, 200-207.
- [25] Mualla, I. H.; Belev, B. "Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device under Earthquake Excitation"; *Eng. & Struct.* 2002, 24, 365-371.
- [21] Salehi, H. "Reinforcing Doors of the Safe Constructions Using Multi-Arch Geometric Structures"; *J. Adv. Def. Sci. & Technol.* 2022, 13, 201-213 (In Persian).
- [22] Peyman, S.; toulabi, h. "Determination of Optimum Lenth of Blast Wave Trap and Analysis of Steel Explosion-Proof Door in the Tunnel with a Blast Wave Trap"; *J. Adv. Def. Sci. & Tech.*, 2021, 12, 231-242 (In Persian).
- [23] Khalil, M.; Olson, M.; Anderson, D. "Nonlinear Dynamic Analysis of Stiffened Plates"; *Comp. & Struct.* 1988, 29, 929-941.

