

مقایسه رفتار مستهلک کننده های له شونده و شکننده

در کاهش اثر بارگذاری انفجاری بر سازه ها

فیروز عبدالزاده^۱، رمضانعلی ایزدی فرد^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: ۹۳/۱۱/۱۵، پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۶)

چکیده

حوادث انفجاری در سال های اخیر موجب آسیب پذیری و کاهش عمر بسیاری از سازه ها، از جمله سازه های حساس و حیاتی بوده است. حساسیت این مسئله، منجر به تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری در زمینه بهره گیری از لایه های جاذب به عنوان مستهلک کننده های انرژی شده است. در این مقاله رفتار دو نوع از لایه های جاذب ساندویچی لانه زنبوری فولادی و کامپوزیت شکننده بتنی به عنوان محافظ دیوار بتنی، تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS بررسی شده است. فشار انفجاری به روش CONWEP مدل سازی شده است. مقایسه نتایج حاصل از آنالیز نشان می دهد عملکردهای لایه های مذکور، متناسب با نوع هدف و همچنین مقدار نمونه های انفجاری متفاوت است به طوری که اگر چه هر دو نوع از لایه های جاذب، تأثیر بسیار زیادی بر کاهش آسیب به سازه اصلی دارند، اما در نمونه های با شدت انفجار کم، لایه شکننده با جذب انرژی بیشتر و کاهش تغییر مکان نقطه مرکزی دیوار بتنی، نسبت به لایه له شونده عملکرد بهتری دارد و در انفجارهای شدید به دلیل بروز رفتار پلاستیک، لایه های له شونده فولادی عملکرد مناسب تری دارند.

کلید واژه ها: مستهلک کننده های انرژی، بارگذاری انفجاری، لانه زنبوری، مصالح شکننده

Comparison between Ductile and Brittle Dissipaters in Reduction of Explosive Loading on Structures

F. Abdolzadeh, R. A. Izadifard*

Imam Khomeini International University

(Received: 04/02/2015; Accepted: 07/08/2015)

Abstract

Explosive accidents within recent years resulted in vulnerability and reduction of life of plenty of structures including sensitive and crucial structures. Sensitivity of this problem resulted in laboratory and theoretical studies for utilization of absorbent layers as energy dissipater. In this paper, behavior of two types of sandwich absorbent layers including steel honeycomb and fragile concrete composite as concrete wall guard under explosive loading was analyzed using finite element software ABAQUS. Explosive pressure was simulated based on CONWEP method. Comparison of results obtained from analysis shows that function of said layers differs proportional to the objective and value of explosive samples so that although the both types of absorbent layers have a considerable effect on reduction of damage to the main structure, but in samples with low explosion intensity, fragile layer with higher energy absorption and reduction of deflection of concrete wall's central point has better function than crushable layer and in severe explosions, due to emergence of plastic behavior, steel crumpled layers have better function.

Keywords: Energy Dissipaters, Explosive Loading, Honeycomb, Brittle Materials

* Corresponding Author E-mail: Izadifard@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

دونگ‌می [۹]، آزمایش‌های کلاهدک کوبش دینامیکی توسط آبشار آزاد و بر اساس اصل جذب ضربه را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، اثر سازه شش گوشه ورقه‌ای بر روی رفتار ضربه‌ای مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد منحنی ضربه دینامیکی پانل ساندویچی شش گوشه ورقه‌ای، مقعر و به سمت بالا است و ضخامت و طول جداره سلول شش گوشه‌ای، تأثیر بسیار زیادی بر روی مشخصه‌های کوبشی آن دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش چگالی نسبی شش گوشه ورقه‌ای، می‌تواند قابلیت جذب انرژی پانل‌های ساندویچی را افزایش دهد. همچنین مقوای شکل‌پذیر مجوف همانند آستر، می‌تواند مقاومت فشاری و مشخصه‌های کوبشی شش گوشه‌های ورقه‌ای را بهبود بخشد.

بانگ و همکاران [۱۰]، عکس‌العمل دینامیکی چهار پانل ساندویچی دایروی با طراحی‌های مختلفی از هسته، تحت شرایط بارگذاری انفجاری کلی و موضعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از مطالعه‌هایی که در خصوص مصالح شکل‌پذیر در برابر بارهای انفجاری انجام شده است، بررسی عملکرد عرشه پل‌ها با مصالح مختلف در برابر بار ناشی از انفجار وسیله نقلیه می‌باشد.

جین‌سون و همکاران [۱۱]، در این پژوهش، عرشه پل‌ها را در دو حالت، شامل قوطی‌های فولادی و نیز به صورت کامپوزیت تحت بررسی قرار دادند. در حالت قوطی فولادی، رفتار سه نوع فولاد مختلف و در حالت کامپوزیت، رفتار بتن معمولی و مقاومت بالا مورد بررسی قرار گرفت و جالب آنکه نتایج حاصله، حاکی از این است که مصالح فولاد و یا بتن با مقاومت پایین‌تر و شکل‌پذیری بیشتر، عملکرد به مراتب بهتری دارند. لوچیونی و همکاران [۱۲]، در بررسی آزمایشگاهی، دال بتنی را تحت اثر بار انفجاری قرار داده‌اند و سپس نتایج به دست آمده را با مدل‌سازی توسط نرم‌افزارهای Abaqus و Ansys مقایسه کرده و رابطه‌ای بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن مواد منفجره و محل انفجار ارائه و در پایان، مقایسه‌ای بین مدل‌ها و نرم‌افزارهای استفاده شده، انجام داده و در هر مورد نقاط ضعف و قوت آن‌ها را تشریح نموده‌اند.

پانل‌های ساندویچی معمولاً دارای ساختاری کامپوزیت هستند و معماری بهینه این سازه‌ها به همراه مزایای دیگری نظیر نسبت‌های بزرگ مقاومت به وزن و سختی به وزن، منجر به کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی و تئوری در این زمینه شده است. در حین وقوع انفجار، اگر هسته‌ها به شکل مناسبی طراحی شده باشند، می‌توانند مقدار حداکثر فشار وارده به سازه را تا حد بسیار زیادی کاهش دهند. خصوصیات مکانیکی هسته‌های فولادی، تابع نوع ساختار سلولی و چگالیشان است. با توجه به تنوع روش‌های تولید، امکان ساخت هسته‌های فولادی با چگالی‌های متفاوت وجود دارد. بنابراین برای هر سطح از قابلیت جذب انرژی، می‌توان از هسته متناسب با آن استفاده کرد.

در این راستا، تحقیقات انجام شده عمدتاً بر رفتار سازه‌های

امروزه با توجه به افزایش پتانسیل حمله به مناطق غیر نظامی و خسارت‌های سنگین ناشی از آن، بررسی ایمنی و پایداری سازه‌ها تحت اثر بارگذاری ناشی از انفجار یا ضربات تصادفی را مورد توجه قرار داده است. بنابراین شناخت پدیده انفجار و بررسی رفتار سازه‌ها در مقابل آن از ضروریات می‌باشد. انفجار، یک واکنش شیمیایی است که طی آن مقدار زیادی انرژی با سرعت بسیار بالا به صورت گرما آزاد شده و پیامد آن تغییرات شدید در شرایط محیط پیرامون است. انفجار از نظر ماده انفجاری به انفجارهای فیزیکی، هسته‌ای و شیمیایی و از لحاظ موقعیت به انفجارهای محبوس (انفجار با تهویه جزئی، انفجار با تهویه کامل و انفجار کاملاً محبوس) یا غیر محبوس (انفجار در هوای آزاد، انفجار در هوا و انفجار سطحی) تقسیم‌بندی می‌شود.

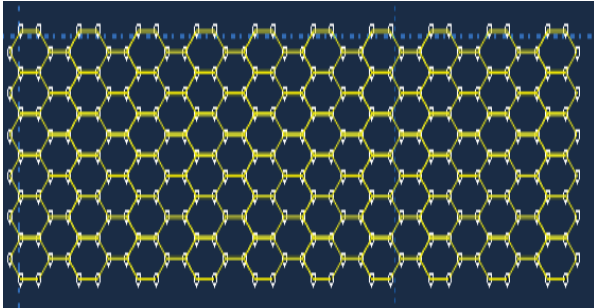
برای پیشگیری از تخریب یا آسیب حداکثری سازه‌ها در محیط‌های انفجاری، راه کارهای مختلفی متصور است که مهم‌ترین آن‌ها استفاده از شیوه‌های مقاوم‌سازی و سامانه‌های جاذب انرژی می‌باشد. در خصوص مقاوم‌سازی، مطالعاتی توسط توکلی‌زاده و همکاران درباره رفتار دیوارهای بتنی مقاوم به وسیله پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) مختلف، نظیر کربن، شیشه و آرامید و همچنین بتن‌های انعطاف‌پذیر و ... صورت گرفته است [۱]. همچنین مقاوم‌سازی تیرهای بتنی مسلح با استفاده از لایه‌های FRP توسط ایزدی‌فرد و قلی‌پور [۲]، مقاوم‌سازی آن‌ها با استفاده از CFRP و GFRP [۳] و مقاوم‌سازی با استفاده از شبکه‌های فولادی [۴] انجام شده است.

از آنجایی که در طراحی سازه‌های مهمی چون نیروگاه‌ها و سازه‌های صنعت نفت و پتروشیمی معمولاً ساخت یک سازه مقاوم در برابر انفجارات شدید مقرون به صرفه نیست، بنابراین استفاده از سامانه‌های جاذب انرژی می‌تواند در کاهش بار وارد بر سازه اصلی مؤثر بوده و به میزان زیادی صرفه‌جویی به عمل آورد.

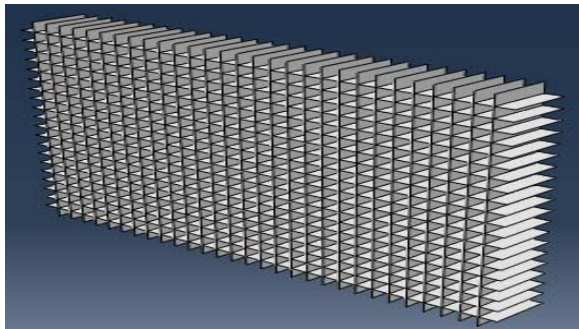
استفاده صحیح از لایه‌های جاذب در کاربری‌های مختلف، نیازمند داشتن اطلاعات بهتر از رفتار مکانیکی آن‌ها است. بنابراین، اگر چه مفهوم لایه‌های جاذب چندان جدید نیست، اما تأثیر آن‌ها بر سازه‌های تحت بارگذاری انفجاری، موجب ادامه فعالیت‌های تحقیقاتی جدید، جهت تأمین اطلاعات قابل اطمینان برای طراحان این لایه‌ها گشته است؛ تا جایی که منجر به افزایشی در میزان علاقه به پانل‌های جاذب انرژی با هسته‌های هانی‌کامب (لانه‌زنبوری) به علت عملکرد بسیار خوب آن‌ها در این گونه از محیط‌های بارگذاری شده است [۷-۵].

در سال‌های اخیر تعدادی از مسائل ضربه با نگرش پاسخ دینامیکی لانه‌زنبوری‌ها در محدوده پلاستیک مطرح شده است که این موضوع نسبت به درک بهتر مسائل جذب انرژی در حالت مچالگی چنین سازه‌هایی در حین برخورد کمک می‌کند [۸].

هسته شکننده نیز مشابه ابعاد دیوار بتنی و جنس آن از بتن و سایر مشخصات هندسی آن مطابق با جدول (۲) می‌باشد. هندسه سه بعدی هسته شکننده در شکل (۳) نشان داده شده است. تکیه‌گاه دیوار بتنی از چهار وجه کناری به صورت گیرداری فرض شده و اتصال لایه جاذب به دیوار، به صورت چسبیده می‌باشد.



شکل ۲. هندسه دو بعدی لانه‌زنبوری (Honeycomb)



شکل ۳. هندسه سه‌بعدی هسته شکننده (Brittle)

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل دیوار بتنی با لایه ساندویچی لانه‌زنبوری

| ضخامت سلول‌ها (mm) | زاویه‌ی بین دیواره‌های سلول (درجه) | طول دیواره سلول‌ها (cm) | | تعداد سلول‌ها | |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------|------|---------------|------|
| | | ماایل | افقی | عرضی | طولی |
| ۱ | ۶۲/۳ | ۴/۷ | ۶ | ۶ | ۱۹ |

جدول ۲. مشخصات هندسی مدل دیوار بتنی با لایه کامپوزیت شکننده

| ضخامت قطعات (cm) | زاویه‌ی بین دیواره‌های قطعات (درجه) | طول دیواره‌های قطعات (cm) | | | تعداد قطعات | |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------|------|------|-------------|------|
| | | عمق | عرضی | طولی | عرضی | طولی |
| ۲ | ۹۰ | ۰/۳۵ | ۱/۸۸ | ۳ | ۲۰ | ۲۹ |

۳-۲. مشخصات مصالح

برای تعریف رفتار الاستیک متناسب با نوع مشخصات مقاطع (بتنی و فولادی)، خصوصیات متناظر با هر کدام، شامل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چگالی، مطابق با جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

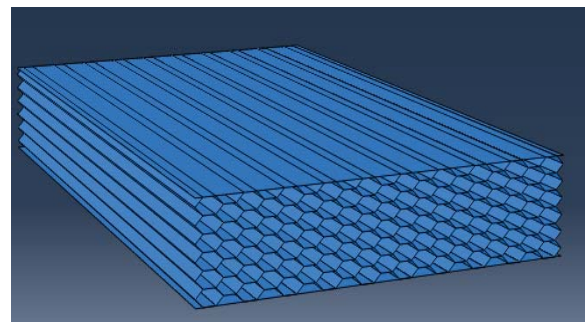
ساندویچی با هسته‌های لانه‌زنبوری^۱ شکل‌پذیر و له‌شونده، متمرکز بوده است. ایزدی‌فرد و نظری با انجام آزمایش‌های میدانی نشان داده‌اند که هسته‌های شکننده می‌توانند نقش مؤثری در جذب انرژی انفجاری و کاهش آسیب به دال‌های بتنی داشته باشند [۱۳]. از این رو در این تحقیق به مقایسه رفتار لایه‌های شکننده با لایه‌های له‌شونده از نظر خاصیت جذب انرژی، تغییر مکان سازه اصلی و سایر رفتارهای مربوط پرداخته شده است.

این یافته‌ها می‌تواند به درک بهتری از رفتار این لایه‌ها منجر شود و طراحی بهینه لایه‌های جاذب در معرض بارگذاری انفجاری را هدایت نماید.

۲. روش تحقیق

۲-۱. لایه‌های جاذب

لایه‌های جاذب، مصالحی می‌باشند که انرژی جنبشی را به انواع دیگری از انرژی تبدیل می‌کنند. این لایه‌ها معمولاً دارای ساختاری ساندویچی و یا کامپوزیت هستند که از یک یا چند لایه هسته به همراه ورق فولادی تشکیل یافته‌اند. ورق‌های فولادی ضخامت کمی داشته و فقط نقش پوشش و توزیع فشار بر روی پانل‌ها را بر عهده دارند. هسته پانل‌های ساندویچی نیز متفاوت بوده و می‌تواند از جنس فوم، لانه‌زنبوری فولادی و یا مصالح شکننده باشد (شکل (۱)).



شکل ۱. پانل ساندویچی هانی‌کامب (لانه‌زنبوری)

۲-۲. مدل‌های مورد مطالعه

در این تحقیق، دو مدل دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری و مدل دیوار بتنی با لایه شکننده^۲ مورد بررسی قرار گرفته است. سازه اصلی، دیواری بتنی به ابعاد ۳×۱/۸۹ متر و ضخامت ۰/۱۰ متر است که با شبکه آرماتورهای فولادی به قطر ۶ و به فاصله ۱۰ سانتی‌متر مسلح شده است. این آرماتورها دارای پوشش بتنی به ضخامت ۲ سانتی-متر می‌باشد. ابعاد هسته لانه‌زنبوری نیز مشابه ابعاد دیوار بتنی و با مشخصات هندسی شش ضلعی از جنس فولاد، مطابق با جدول (۱) است. هسته از دو طرف با پلیت فولادی به ضخامت یک میلی‌متر محصور شده است (هندسه سه بعدی مونتاز شده در شکل (۱) و هندسه دو بعدی آن در شکل (۲) نشان داده شده است). ابعاد

^۱ Honeycomb

^۲ Brittle

جدول ۳. خصوصیات مصالح

| نام پارت | چگالی (kg/m ³) | الاستیسیته (GPa) | نسبت پواسون |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|
| دیوار بتنی | ۲۴۰۰ | ۱۹/۷ | ۰/۱۹ |
| میلگردهای شبکه مش | ۷۸۰۰ | ۲۱۰ | ۰/۳ |
| لانه‌زنبوری | ۷۸۰۰ | ۲۱۰ | ۰/۳ |
| پلیت فولادی | ۷۸۰۰ | ۲۱۰ | ۰/۳ |

برای تعریف رفتار پلاستیک میلگردها، لانه‌زنبوری و پلیت فولادی و همچنین مقادیر تنش و کرنش، مطابق با جدول (۴) و برای تعریف رفتار پلاستیک دیوار بتنی، مقادیر پلاستیسیته، تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در ناحیه کشش و فشار، مطابق با جدول‌های (۷-۵) در نظر گرفته شده است [۱۴ و ۱۵].

جدول ۴. خصوصیات پلاستیسیته مقاطع فولادی

| کرنش پلاستیک | تنش تسلیم (MPa) |
|--------------|-----------------|
| ۰ | ۳۰۰ |
| ۰/۰۲۵ | ۳۵۰ |
| ۰/۱ | ۳۷۵ |
| ۰/۲ | ۳۹۴ |
| ۰/۳۵ | ۴۰۰ |

جدول ۵. خصوصیات پلاستیسیته مقطع بتنی (دیوار بتنی)

| ویسکوزیته | نسبت انحراف تنش به خط نصف‌النهار کششی (k) | پارامتر تابع گسیختگی (f=Fb0/fc0) | گریز از مرکز | زاویه اتساع |
|-----------|--|--|-----------------|----------------|
| 0 | ۰/۶۶۶ | ۱/۱۲ | ۱ | ۳۸ |

جدول ۶. مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در ناحیه فشاری

| آسیب فشاری بتن | | رفتار فشاری | |
|--|----------------------------------|---|--------------------|
| کرنش انعطاف ناپذیر (×۱۰ ^{-۶}) | عدد آسیب (×۱۰ ^{-۶}) | کرنش انعطاف ناپذیر (×۱۰ ^{-۶}) | تنش تسلیم (MPa) |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۱۵ |
| ۷۵ | ۰ | ۷۵ | ۲۰/۲ |
| ۹۹ | ۰ | ۹۹ | ۳۰ |
| ۱۵۴ | ۰ | ۱۵۴ | ۴۰/۳ |
| ۷۶۲ | ۰ | ۷۶۲ | ۵۰/۰۸ |
| ۲۵۵۸ | ۱۹۵۴۰۲ | ۲۵۵۸ | ۴۰/۲ |
| ۵۶۷۵ | ۵۹۶۳۸۲ | ۵۶۷۵ | ۲۰/۲ |
| ۱۱۷۳۳ | ۸۹۴۸۶۵ | ۱۱۷۳۳ | ۵/۳ |

جدول ۷. مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در ناحیه کششی

| آسیب کششی بتن | | رفتار کششی | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| کرنش ترک (×۱۰ ^{-۶}) | عدد آسیب (×۱۰ ^{-۶}) | کرنش ترک (×۱۰ ^{-۶}) | تنش تسلیم (pa) |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۹ |
| ۳۳ | ۰ | ۳۳ | ۲/۸ |
| ۱۶۰ | ۴۰۶۴۱۱ | ۱۶۰ | ۱/۹ |
| ۲۸۰ | ۶۹۶۳۸۰ | ۲۸۰ | ۰/۹ |
| ۶۸۵ | ۹۲۰۳۸۹ | ۶۸۵ | ۰/۲ |
| ۱۰۸۷ | ۹۸۰۰۹۳ | ۱۰۸۷ | ۰/۰۵ |

۴-۲. مدل‌سازی

مدل‌های مورد اشاره، در نرم‌افزار المان محدود Abaqus مدل‌سازی شده‌اند [۱۵]. بدین ترتیب که برای مدل‌سازی دیوار بتنی، از المان توپر که جزء خانواده تنش سه‌بعدی، ۸ گرهی با درون‌یابی خطی و نوع انتگرال‌گیری روی آن، از نوع کاهش‌یافته می‌باشد، استفاده شده است. این المان از کتابخانه المان‌های با حل صریح می‌باشد.

برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی و عرضی از المان خرپایی^۱ که یک المان دوگره‌ای با درون‌یابی خطی و از کتابخانه المان‌های با حل صریح است و برای مدل‌سازی لانه‌زنبوری و همچنین صفحه فولادی از المان پوسته‌ای^۲ که از خانواده چهارگره‌ای و انتگرال آن از نوع کاهش‌یافته می‌باشد، استفاده شده است. در مونتاژ مدل، با توجه به اینکه مش‌بندی جداگانه قطعات مدنظر می‌باشد، از گزینه Dependent استفاده شده است. اندرکنش شبکه مش و دیوار بتنی Embedded Region و تماس‌های بین سایر سطوح، Tie و شرایط تکیه‌گاهی برای سطوح کناری دیوار بتنی، گیرداری تعریف شده است. نوع تحلیل Dynamic Explicit و زمان بررسی نتایج، یک ثانیه انتخاب شده است. بارگذاری نیروی فشاری حاصل از انفجار مقادیر مختلف TNT، در فاصله ۱ متری از مرکز پانل‌ها، به روش Conwep محاسبه و با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک و پلاستیک مصالح و با توجه به آیین‌نامه UFC مطابق با شکل (۴) تعریف شده است. برای مش‌بندی دیوار بتنی، از المان‌های C3D8R، میلگردهای شبکه، از المان‌های T3D2 و پلیت فولادی و لانه‌زنبوری از المان‌های S4R استفاده شده است.

مدل‌سازی نهایی دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری در شکل (۵) و دیوار بتنی با لایه شکننده در شکل (۶) نشان داده شده است.

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی، مدل مورد تحقیق با مدل سایر محققان مقایسه شده است. نتایج، حاکی از صحت مدل‌سازی و نتایج این تحقیق می‌باشد [۱۴].

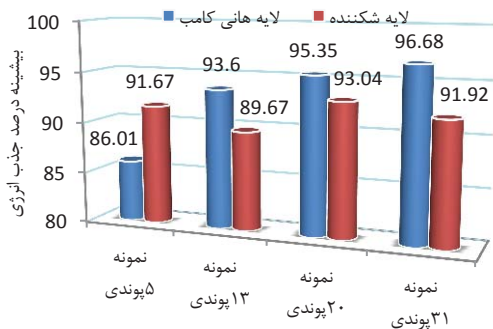
^۱ Truss^۲ Shell

۳. نتایج و بحث

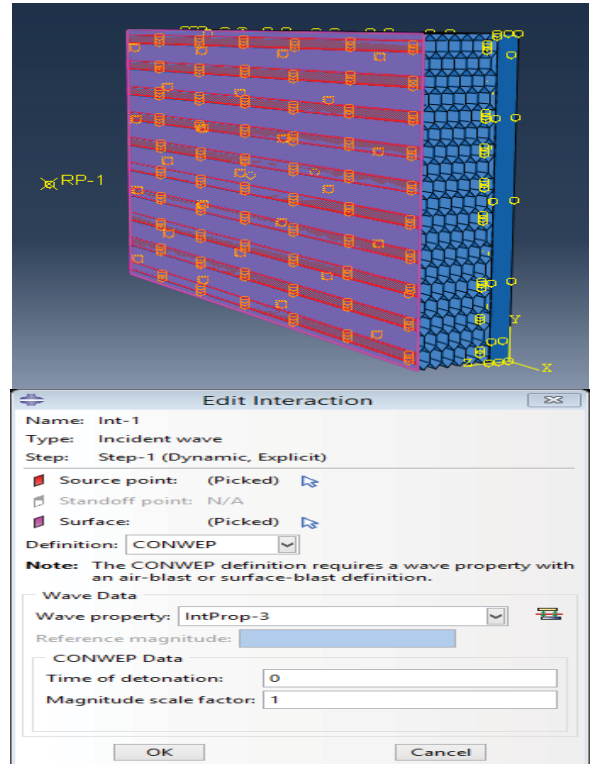
مدل‌ها، تحت انفجارهای متفاوت، از نظر استهلاک انرژی در کل مدل، دیوار بتنی، شبکه مش و لایه‌ها و همچنین تغییر مکان نقطه مرکزی دیوار بتنی در زمان یک ثانیه بررسی شده است. به عنوان مثال، در نمونه انفجار ۵ پوندی، درصد انرژی اتلاف پلاستیک توسط دیوار بتنی نسبت به کل مدل، در مدل دیوار بتنی ساده ۸۱/۴۶ درصد بوده، ولی در صورت استفاده از لایه لانه‌زنبوری به ۱۴/۲۷ درصد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ۸۵/۶۶ درصد از انرژی، توسط لایه لانه‌زنبوری تلف می‌شود. در صورت استفاده از لایه شکننده، درصد انرژی تلف شده توسط دیوار ساده به ۸/۱۸ درصد می‌رسد که حاکی از جذب انرژی ۹۱/۶۷ درصدی لایه شکننده می‌باشد. نتایج اتلاف انرژی به تفکیک منابع تشکیل دهنده مدل، در جدول (۸) ارائه شده است.

مقایسه بیشینه جذب انرژی هر کدام از لایه‌ها در هر نمونه انفجاری در شکل (۷) با یکدیگر مقایسه شده که عملکرد آن‌ها را در نمونه‌های متفاوت انفجار نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در نمونه انفجار ۵ پوندی، لایه لانه‌زنبوری ۸۶/۰۱ درصد و لایه شکننده، ۹۱/۶۷ درصد از انرژی را جذب می‌کند.

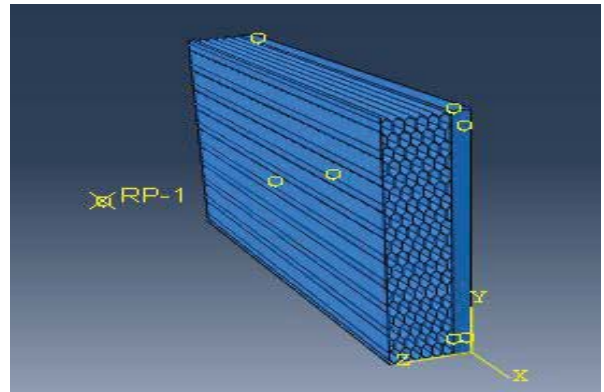
با توجه به اینکه آسیب دیوار بتنی رابطه مستقیمی با تغییر مکان وسط دهانه دارد، بررسی پارامتر جابه‌جایی می‌تواند معیار بسیار مناسبی برای آسیب‌پذیری دال بتنی باشد [۱۶]. میزان بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکزی دیوار بتنی در نمونه انفجار ۵ پوندی در مدل دیوار بتنی ساده ۳۴/۹۶ سانتی‌متر بوده است. این میزان تغییر مکان بر اساس روابطی که در مرجع [۱۶] ارائه شده است، معادل تخریب دیوار بتنی است. در صورت استفاده از لایه لانه‌زنبوری، این تغییر مکان به ۳/۷۹ سانتی‌متر کاهش می‌یابد که از تخریب کلی دیوار بتنی ممانعت به عمل آمده ولی دچار آسیب جدی شده است. در نهایت در صورت استفاده از لایه شکننده، این تغییر مکان به ۲/۴۸ سانتی‌متر می‌رسد که حاکی از آسیب جزئی دیوار بتنی می‌باشد. مقادیر تغییر مکان نقطه مرکزی دیوار در سایر نمونه‌ها در جدول (۹) ارائه و مقایسه آن‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است.



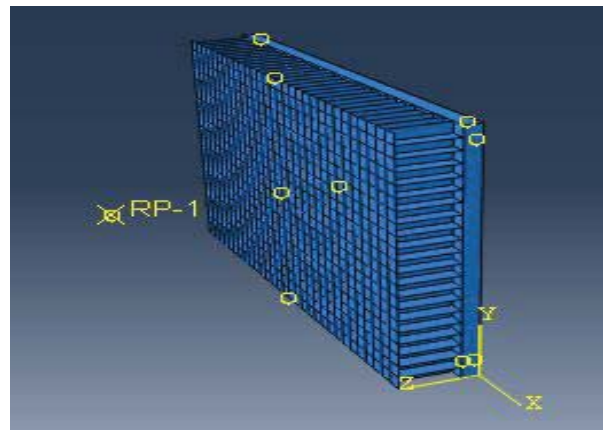
شکل ۷. مقایسه بیشینه جذب انرژی لایه‌ها در طول زمان تحلیل (۱ ثانیه)



شکل ۴. سطح تماس و اختصاص ماده انفجاری تعریف شده در بارگذاری انفجاری به روش Conwep



شکل ۵. مدل‌سازی دیوار بتنی با لایه هانی کامب



شکل ۶. مدل‌سازی دیوار بتنی با لایه شکننده

جدول ۸. مقایسه انرژی اتلاف پلاستیک مدل‌ها بر حسب ژول در ۴ نمونه انفجاری

| نوع مدل | نوع پارت‌ها | نمونه ۵ پوندی | | نمونه ۱۳ پوندی | | نمونه ۲۰ پوندی | | نمونه ۳۱ پوندی | |
|--------------------------------|------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| | | درصد اتلاف انرژی تلف شده | انرژی تلف شده | درصد اتلاف انرژی تلف شده | انرژی تلف شده | درصد اتلاف انرژی تلف شده | انرژی تلف شده | درصد اتلاف انرژی تلف شده | انرژی تلف شده |
| دیوار بتنی ساده | دیوار بتنی | ۸۱/۴۶ | ۱۹۹۰۷/۵ | ۸۶/۲ | ۴۳۶۷۶/۳ | ۸۱/۱۷ | ۶۷۴۲۲/۵ | ۶۳/۷۱ | ۶۷۴۲۲/۵ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | شبکه مش | ۱۸/۵۴ | ۳۲۳۶/۲۷ | ۱۳/۹۸ | ۱۰۱۳۰ | ۱۸/۸۳ | ۳۸۴۰۶/۱ | ۳۶/۲۹ | ۳۸۴۰۶/۱ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | دیوار بتنی | ۱۴/۲۷ | ۲۴۴۲۲/۹ | ۶/۶۱ | ۳۸۲۰۴/۶ | ۵/۰۴ | ۵۲۲۰۴/۴ | ۳/۳۴ | ۵۲۲۰۴/۴ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | شبکه مش | ۰/۰۷ | ۳۵۶/۵۲۵ | ۰/۱ | ۹۶۵/۸۲۷ | ۰/۱۳ | ۲۸۱۶/۴۸ | ۰/۱۸ | ۲۸۱۶/۴۸ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | لایه لانه‌زنبوری | ۸۵/۶۶ | ۳۴۴۸۵/۴ | ۹۳/۳ | ۷۱۹۱۰/۵ | ۹۴/۸۳ | ۱۵۰۶۵۶۰ | ۹۶/۴۸ | ۱۵۰۶۵۶۰ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | شبکه مش | ۸/۱۸ | ۲۵۲۳/۵۶ | ۹/۵۶ | ۵۹۹۵/۵ | ۶/۵۱ | ۱۹۶۹۹/۹ | ۷/۸۱ | ۱۹۶۹۹/۹ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | دیوار بتنی | ۰/۱۵ | ۲۰۳۰/۵ | ۰/۷۷ | ۴۰۹/۱۴۳ | ۰/۴۴ | ۸۸۵/۰۶۵ | ۰/۳۵ | ۸۸۵/۰۶۵ |
| دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | لایه شکننده | ۹۱/۶۷ | ۲۳۶۷۵/۲ | ۸۹/۶۷ | ۸۵۶۵۶/۲ | ۹۳/۰۴ | ۲۳۱۵۲۲ | ۹۱/۸۳ | ۲۳۱۵۲۲ |

جدول ۹. مقایسه بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکز دیوار بتنی در کل مدل‌ها بر حسب سانتی‌متر در طول زمان تحلیل (۱ ثانیه)

| نمونه (پوند) | نوع مدل | | |
|--------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|
| | دیوار بتنی ساده | دیوار بتنی با لایه لانه‌زنبوری | دیوار بتنی با لایه شکننده |
| ۵ | ۲/۴۵ | ۰/۲۲ | ۰/۳۲ |
| ۱۳ | ۸/۵۸ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ |
| ۲۰ | ۱۵/۹۹ | ۱/۹۹ | ۱/۵۸ |
| ۳۱ | ۳۴/۹۶ | ۳/۷۹ | ۲/۴۸ |

قابل ملاحظه‌ای از انرژی آزاد شده در اثر انفجار را جذب کرده و در کاهش آسیب سازه اصلی تأثیر بزرگی دارند.

۲- در نمونه‌های با شدت انفجار کم، درصد جذب انرژی لایه لانه‌زنبوری ۸۶ درصد و لایه شکننده ۹۱ درصد و در نمونه‌های با انفجارهای شدید، درصد جذب انرژی لایه لانه‌زنبوری ۹۶ درصد و لایه شکننده ۹۱ درصد است. این کارایی بالا در جذب انرژی، به دلیل خرد شدن لایه شکننده و له شدن لایه‌های فولادی لانه‌زنبوری در اثر فشار انفجار می‌باشد. جذب انرژی تا خرد شدن همه مصالح شکننده و له شدن کل لانه‌زنبوری ادامه دارد. اما در صورتی که فشار انفجار افزایش یابد، لایه‌های لانه‌زنبوری بر خلاف لایه‌های شکننده، پس از له شدن، وارد ناحیه پلاستیک شده و همچنان به جذب انرژی (ولی با شیب کمتر) ادامه می‌دهند.

۳- در صورت استفاده از لایه‌های جاذب انرژی شکننده و لانه‌زنبوری در انفجار با شدت کم، تغییر مکان نقطه مرکزی دیوار بتنی به ترتیب ۹۱ و ۸۷ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش شدت انفجار، این کاهش به ۹۳ و ۸۹ درصد می‌رسد. کاهش تغییر مکان وسط دهانه موجب می‌شود رفتار سازه اصلی از تخریب کامل به آسیب‌های شدید و یا حتی آسیب‌های جزئی اصلاح شود.

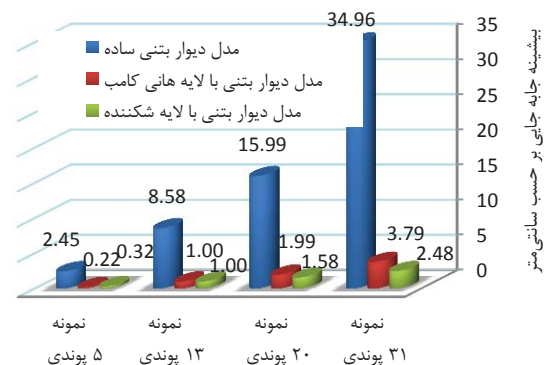
۵. مراجع

[1] Tavokkolizadeh, M.; Mojtahedpoor, M.; Fazalipoor, M. "Retrofitting One-Sided Concrete Walls by FRP Sheets against Explosive Loads Being Exerted Perpendicular to the Wall"; The Fifth National Civil Engineering Congress; Ferdusi University, Mashhad, 1389 (In Persian).

[2] Izadifard, R.; Qolipur, R. "Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Retrofitted by FRP against Explosive Loading (Full-Scale Tests)"; M.S. Thesis, Malek Ashtar University, Tehran, 1390 (In Persian)

[3] Izadifard, R.; Mehrabi, S. "Increasing the Strength of Reinforced Concrete Slabs against Explosion by Applying Composite Materials"; M.S. Thesis, Malek Ashtar University, Tehran, 1388 (In Persian).

[4] Izadifard, R.; Hosein Beygi, A. "Retrofitting Current Masonry Walls Against Explosion by Applying Steel Mesh and Shot Crete"; M.S. Thesis, Malek Ashtar University, Tehran, 1389 (In Persian).



شکل ۸. مقایسه بیشینه جابه‌جایی نقطه مرکز دیوار بتنی کل مدل‌ها

۴. نتیجه‌گیری

با عنایت به اینکه در خصوص جذب انرژی توسط لایه‌های لانه‌زنبوری توسط سایر محققان مطالعاتی صورت گرفته است، در این مقاله با پیشنهاد لایه‌های شکننده به عنوان روش نوینی برای کاهش فشار بارگذاری انفجاری بر سازه‌ها، کارایی آن در مقایسه با لایه‌های لانه‌زنبوری مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱- تحلیل‌ها نشان داده‌اند که لایه‌های شکننده و لانه‌زنبوری، مقدار

- [11] Jin, S.; Astaneh, A.; Rutner, M. "Performance of Bridge Decks Subjected to Blast Load"; The 6th Japanese-German Bridge Symposium, Munich, 2005.
- [12] Luccioni, B.; Rougier, V. "Concrete Pavement Slab under Blast Loads"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 32, 1248–1266.
- [13] Izadifard, R.; Nazarinejad, A. "Effect of Absorbent Layers on Crack Pattern of Reinforced Concrete Slabs Under Explosive Loading"; M.S. Thesis, Malek Ashtar University, Tehran, 1389 (In Persian).
- [14] Abdolzadeh, F.; Izadifard, R.; Amini Mazrae No, Mostafa. "Reduction of Blast loading Impacts on Structures by Using Absorber Layers"; M.S. Thesis Imam Hossein University, 1393 (In Persian).
- [15] Surushnia, S.; Najafian, H.; Mamaghani, M. "The Most Complete Applicable Reference for Abaqus"; *Danesh Negarandeh*, 1392 (In Persian).
- [16] Izadifard, R.; Zareshani, A.; Moghimi Kheyraadi, P. "Investigation of Residual Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Damaged by Explosive Loads"; *J. Energ. Mater.* 1392, 8, 3-14 (In Persian).
- [5] Abbasi, M.; Dardel, H.; Sead Monir, H. "Behavior of Protective Sandwich Sheets Containing Steel Foam Core and Honeycomb Core With Nonuniform Innermost Layer Under Explosive and Impact Loads"; the First National Conference of Improvement and Retrofitting Urban Areas, Tabriz, 1391 (In Persian).
- [6] Goldsmith, W.; Sackman, L.; Wirezbicki, T. "An Experimental Crushing Analysis of Metal Honeycomb"; *Int. J. Impact Eng.* 1988, 1, 1248–1266.
- [7] Tai, W. "Mechanical Response of Square Honeycomb Sandwich Plate with Asymmetric Face Sheet Subjected to Blast Loading"; *International Conference on Power Electronics and Engineering Application*, Xian, China, 2011.
- [8] Jones, N. "Structural Impact"; Cambridge University Press, 1989.
- [9] Dongmei, W. "Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels"; *Int. J. Impact Eng.* 2009, 36, 110–114.
- [10] Yong, Y.; Fallah, A.; Saunders, M.; Louca, L. "On the Dynamic Response of Sandwich Panels with Different Core Subject to Global and Local Blast Loads"; *Int. J. Structures Eng.* 2011, 33, 2781–2793.