

بررسی پاسخ‌های صوتی و ارتعاشی اتاق ایمن بتنی زیر اثر انفجار در هوا

سعیدرضا مساح*

گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

درک پاسخ حقیقی یک سازه، مانند یک اتاق ایمن از گونه‌ی بتن مسلح، در برابر بارهای انفجاری و ارزیابی آسیب‌های وارد شده به آن می‌تواند دید بهتری به مهندس طراح در طراحی آن بدهد. در این پژوهش، پاسخ‌های صوتی و ارتعاشی چنین سازه‌ای زیر اثر انفجار در هوا با بکارگیری الگوی بتن آسیب دیده‌ی مومسان در نرم‌افزار آباکوس بررسی شده‌اند. هم‌چنین حساسیت اتاق نسبت به شبه‌سنگه‌های (پارامترهای) جرم ماده منفجره و دوری آن از محل انفجار تحلیل شده و سپس رفتار نزدیک‌ترین دیوار اتاق به نهاده‌ی انفجاری ارزیابی شده است. در این راستا، شبه‌سنگه‌های بیشینه جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار و بیشینه نیروهای واکنش‌های تکیه‌گاهی در محل تکیه‌گاه‌های دیوار بررسی شده‌اند. هم‌چنین برای ارزیابی ایمنی شنوایی ساکنین، پاسخ صوتی در مرکز اتاق ارزیابی شده است. یافته‌های مربوط به بیشینه جابه‌جایی نشان دادند که با افزایش ماده منفجره، بیشینه جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار افزایش می‌یابد و این افزایش، به سبب خرد شدن بتن، شیب کاهشی دارد. هم‌چنین نتایج مربوط به بیشینه نیروهای واکنش‌های تکیه‌گاهی نشان می‌دهند که با افزایش ماده منفجره، بیشینه نیروهای واکنش تکیه‌گاهی در آغاز افزایش یافته و پس از آسیب‌دیدگی بتن کاهش می‌یابد. برای بیشینه پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق می‌توان یک رابطه خطی میان پاسخ صوتی و میزان ماده منفجره به دست آورد.

کلید واژه‌ها: پاسخ صوتی، پاسخ ارتعاشی، انفجار در هوا، الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان، اتاق ایمن

۱. مقدمه

بتن یک ماده‌ی پرکاربرد در ساخت سازه‌های عمرانی و دفاعی است. در سازه‌های دفاعی نیاز به طراحی و ساخت سازه‌هایی است که بتوانند در برابر بارهای انفجاری ایستادگی نموده و پایدار بمانند. با افزایش سرعت توسعه صنعتی و شهرنشینی، سازه‌های عمرانی مانند ساختمان‌های دولتی، مراکز تجاری، ساختمان‌های مسکونی و سازه‌های صنعتی ممکن است به دلیل اقدامات خصمانه، انفجار پیشامدی ناشی از نگهداری نادرست، بکارگیری و انباشت نامناسب مواد منفجره، انفجارهای بزرگ^۱ و بارهای ضربه‌ای^۲ را تجربه کنند. انفجاری که در مرکز شهر و یا در درون یک سازه رخ می‌دهد می‌تواند پیامدهای ناگواری هم‌چون شمار بالای تلفات انسانی، آسیب انفجاری مهم و در بدترین حالت فروریزی سازه‌ای^۳ را به همراه داشته باشد.

۱-۱. پیشینه‌ی پژوهش

تلاش‌های پژوهشی فراوانی برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی و آسیب‌دیدگی سازه‌های بتنی در برابر بارهای انفجاری بزرگ انجام شده‌اند. در این راستا، ارزیابی تراز حفاظت^۴ از شماری از ساختمان‌های موجود و گسترش و بهبود طراحی آیین‌نامه‌ها برای اطمینان از تراز حفاظت معینی برای سازه‌های نوساخته در برابر بارهای انفجاری لازم است. برخی از آیین‌نامه‌ها هم‌چون آیین‌نامه وزارت دفاع آمریکا روش‌هایی را برای ارزیابی سریع ایمنی سازه‌ها زیر اثر انفجار بر پایه‌ی ملاک مقدار-دوری^۵ (اندازه‌ی ماده منفجره و دوری آن از سازه^۶) پیشنهاد کرده‌اند [۱]. ولی تعریف تراز آسیب در این منابع به گونه‌ای روشن بیان نشده، به گونه‌ای که نمی‌توان گفت آسیب، مربوط به ترک‌خوردگی^۷ یا فروریزی دیوارهای درونی یا دیوارهای بیرونی است و یا مربوط به گونه‌ی دیگری از شکست یا

* نویسنده پاسخگو: massah@iust.ac.ir

⁴ Level of protection

⁵ Q-D; Quantity-Distance criteria

⁶ Stand-off distance

⁷ Cracking

¹ High-rate blasts

² Impulsive loads

³ Structural collapse

گسیختگی^۱ در سازه یا عناصر سازه‌ای است.

وزارت دفاع آمریکا در سال ۲۰۰۸ آیین‌نامه‌ی ملاک تأسیسات یکپارچه^۲ را منتشر کرده است که در آن روش‌های تحلیل گام به گام و طراحی برای مهندسان را پیشنهاد داده تا بتوانند سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجار را طراحی کنند [۲]. روش تحلیل و طراحی پیشنهاد شده می‌تواند به گونه‌ای تقریبی پاسخ و آسیب‌دیدگی عناصر سازه‌ای را زیر اثر بارگذاری‌های انفجاری در زمانی که پاسخ و آسیب‌دیدگی از سوی مودهای پاسخ سازه‌ای^۳ تعیین می‌شود، یعنی مودهای برشی یا مودهای خمشی^۴، پیش‌بینی کرده و دقت پیش‌بینی پاسخ سازه‌ای را نشان دهد. از آن‌جا که این روش بر پایه رویکرد یک درجه آزادی^۵ است، نمی‌تواند پیش‌بینی درستی از آسیب‌دیدگی محلی سازه، ناشی از موج تنشی که آسیب‌دیدگی از گونه‌ی پوسته‌شدگی^۶ و خردشدگی^۷ را پدید می‌آورد، به‌دست دهد. همچنین دقت آن به میزان چشمگیری بستگی به چگونگی تغییر شکل دینامیک^۸ سازه دارد. پژوهش‌های در دست انجام، بیش‌تر بر پایه‌ی چگونگی تغییر شکل استاتیکی است که گاهی پیش‌بینی درستی از پاسخ سازه‌ای را به‌دست نمی‌دهد. بنابراین، برای پیش‌بینی دقیق پاسخ و آسیب‌دیدگی سازه‌ها، افزایش کیفیت تحلیل و جزئیات بیش‌تر عناصر متناهی^۹ نسبت به رویکرد یک درجه آزادی گاهی بایسته است.

آزمایش‌ها یا آزمون‌های میدانی بسیاری برای بررسی رفتار سازه‌های بتنی زیر اثر انفجار در سال‌های گذشته انجام شده است. لپانن در سال ۲۰۰۵ تأثیر موج انفجاری و اثر ضربه‌ی تکه‌های^{۱۰} ناشی از آن را روی یک دال بتنی بررسی نمود [۳]. او در این پژوهش به این نتیجه رسید که آسیب ناشی از یک موج انفجاری و اثرات ضربه‌ی تکه‌ها در سطح ناحیه برخورد تمرکز می‌یابد. ونگ و

همکاران [۴] آزمون‌های انفجاری را روی دال‌های بتن مسلح انجام داده و قانون مقیاس‌بندی^{۱۱} پاسخ دینامیکی دال‌های بتن مسلح مربع یک طرفه^{۱۲} را زیر بارگذاری انفجاری نزدیک به سطح^{۱۳} بررسی کردند. میس و همکاران [۵] آزمون‌های تجربی را روی دیوارهای جداگر بتن مسلح با بازشوها^{۱۴} انجام دادند و داده‌های آزمایش را برای راستی‌آزمایی روش‌های پیشنهاد شده‌ی پیشین، با به‌کارگیری ضریبی برای مقاومت نهایی استاتیکی در به‌دست آوردن ظرفیت انفجاری ضربه‌ای، به‌کار بردند.

سیلو و لوروش گام به گام برای پیش‌بینی تراز آسیب دال‌های بتن مسلح بر پایه وزن ماده منفجره و دوری آن از سطح دال پیشنهاد دادند که با نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی داشت [۶]. هم‌چنین آن‌ها آزمون‌های آزمایشگاهی روی دال‌های بتن مسلح یک طرفه که مقاوم‌سازی نشده‌اند و دال‌هایی که با بسپارهای تقویت‌شده^{۱۵} با رشته‌های کربنی یا فولادی، در یک یا هر دو طرف، مقاوم‌سازی شده بودند^{۱۶}، انجام دادند [۷]. بر پایه‌ی یافته‌های آزمایش‌ها، پیشنهاد گردید که دال‌ها در هر دو طرف مقاوم‌سازی شوند، زیرا که لنگرهای منفی بهبود مؤثر مقاومت در برابر انفجار را به همراه خواهند داشت. اگرچه آزمایش‌های بسیاری انجام شده و یافته‌های سودمندی بدست آمده‌اند، ولی بسیاری از پژوهشگران یادآور شده‌اند که نتیجه‌گیری بر پایه‌ی یافته‌های آزمایش‌های اندک بسیار دشوار است و پیشنهاد آزمایش‌ها و تحلیل‌های بیش‌تری را داده‌اند [۸-۹]. این از آن روی است که آزمون‌های انفجاری میدانی و آزمایشگاهی عدم قطعیت‌های زیادی را به همراه دارند که ممکن است تأثیر چشمگیری بر روی یافته‌های آزمایش بگذارند. افزون بر این، یافته‌های آزمون‌های انفجاری^{۱۷} نمی‌توانند با اطمینان برون‌یابی شوند، زیرا بیشتر غیرخطی مرتبه بالا هستند. از آن‌جا که همواره انجام آزمون‌های انفجاری زمان‌بر و هزینه‌بر بوده و این‌گونه آزمون‌ها را نمی‌توان از دید

¹ Failure

² Unified Facilities Criteria

³ Structural response modes

⁴ Flexural modes

⁵ SDOF; Single Degree of Freedom approach

⁶ Spalling

⁷ Crushing

⁸ Dynamic deflection

⁹ Finite elements

¹⁰ Fragment impacts

¹¹ Scaling rule

¹² One-way square reinforced concrete (RC) slabs

¹³ Close-in explosive loading

¹⁴ RC wall panels with openings

¹⁵ Reinforced polymers

¹⁶ Retrofitted slabs, on one or both sides, with polymers reinforced with carbon or steel fibers

¹⁷ Blasting test results

درست گرد (اورتوتروپیک) همگن^۸ در نظر گرفته شد که روی کردی ساده‌تر و کاربردی‌تر است. همچنین، اندرکنش سازه-شماره با بکارگیری الگوی اندرکنش مودال گسترش داده شده از سوی فهی [۲۳] برای تراگسیل موج با هر ریخت از جداگری که کاواکی در پشت آن جای دارد، جفتیدگی کامل^۹ در نظر گرفته شد. روی کرد مودال برای این مسئله مانند بسیاری از انرژی‌های ناشی از غرش آوایی، در برگیرنده‌ی بازه‌ی بسامدی بسیار پایین بوده و بنابراین تنها نیاز به در نظر گرفتن شمار اندکی از مدهای صوتی و سازه‌ای است. وهبا در دنباله‌ی پژوهش خود یک بررسی شبه‌سنجه‌ای (پارامتری) برای ارزیابی تأثیر شبه‌سنجه‌های موج برخوردی^{۱۰} و اندازه‌های اتاق و دیواره‌ی جداگر بر روی پاسخ صوتی سازه انجام داد. ریمیلیکس الگوی اندرکنش مودال^{۱۱} را برای مسئله‌ی تراگسیل امواج ناشی از انفجار صوتی به درون یک کاواک مستطیلی با دیواره‌ی چوب-گچ پیشنهاد داد [۲۴].

نرم‌افزار آباکوس توانایی بالایی در الگوسازی اثر انفجار بر روی سازه‌ها دارد. در این پژوهش با بکارگیری الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان، اثر انفجار روی یک اتاق بتنی (به عنوان اتاق ایمن در میدان عملیات) بررسی شده و حساسیت آن نسبت به شبه‌سنجه‌های جرم ماده منفجره و دوری از محل انفجار تحلیل شده است. سپس رفتار یک دیوار از اتاق در برابر بار انفجاری ارزیابی می‌شود. همچنین برای ارزیابی ایمنی شنوایی ساکنین، پاسخ صوتی در درون اتاق ارزیابی شده و برای این کار هوای درون اتاق نیز با نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. پاسخ صوتی بدست آمده مربوط به فشار صوتی ثبت شده به وسیله‌ی میکروفون (اختلاف فشار پدید آمده نسبت به فشار زمینه^{۱۲} در اثر نهاده‌ی انفجاری) در میانه‌ی اتاق است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان

۲-۱-۱. ویژگی‌های فشاری بتن در الگوی عناصر متناهی
بر پایه مرجع [۲۵]، شش آزمایش مقاومت فشاری بر روی

ملاحظات ایمنی به سادگی انجام داد، گسترش الگوهای عددی با کیفیت برای پیش‌بینی درست پاسخ‌های سازه در برابر بارگذاری انفجاری مهم است.

با گسترش فن‌آوری رایانه در مکانیک محاسباتی، شبیه‌سازی عددی کارآمد آزمایش‌های انفجاری ممکن شده است. شبیه‌سازی عددی دید بهتری از پاسخ سازه‌ای و فرآیند آسیب^۱ و همچنین اجازه‌ی ثبت شمار بیش‌تری از پاسخ‌های سازه‌ای در هر موقعیت دلخواه را می‌دهد. بسیاری از پژوهش‌ها بر روی رفتار سازه‌های بتن مسلح زیر اثر بارگذاری انفجاری، بر پایه‌ی شبیه‌سازی‌های عددی انجام و منتشر شده‌اند [۱۰-۱۸].

بررسی مسئله‌ی تراگسیل امواج صوتی ناشی از انفجار به درون کاواک‌ها نخستین بار به کمک پیریتلاو انجام شد [۱۹]. او راه‌حلی برای ارتعاش آزاد یک جداگر مستطیلی^۲ که یک کاواک بسته در پشت آن جای دارد، با جداکردن مودها^۳ پیدا کرد. سپس این روی کرد به ارتعاش واداشته جداگر مستطیلی با بارگذاری فشاری تصادفی^۴ گسترش داده شد [۲۰]. این مسئله در دامنه‌ی بسامدی به کمک تبدیل فوریه رابطه‌ی دینامیک سازه‌ای حل شد. سرانجام، این رویکرد به کمک پیریتلاو و کرگز برای پیش‌بینی مودهای پایه‌ای سامانه‌ی جفتیده^۵ ساده‌سازی شد [۲۱].

تحلیل پاسخ دینامیکی دیواره‌ی ساخته شده از چوب-گچ^۶ زیر یک بارگذاری فشاری اختیاری به کمک وهبا انجام شد [۲۲]. در این پژوهش دیواره با گروهی از عناصر با ویژگی‌های مصالح گوناگون شبیه‌سازی شد. با بکارگیری روش حل سری برای جابه‌جایی، روابط لاگرانژ برای فرمول‌بندی حرکت دیواره بکار رفت. سپس این معادلات برای پیش‌بینی تراگسیل امواج صوتی ناشی از غرش آوایی (سانیک بوم)^۷ از دیواره بکار گرفته شد. همچنین، در این پژوهش برای به‌دست آوردن راه‌حلی برای جابه‌جایی دیواره با هر ریخت، رفتار دیواره‌ی چوب-گچ، با بکارگیری شیوه عناصر متناهی بررسی شد. این دیواره یک جداگر

¹ Damage process

² Free vibration of a rectangular panel

³ Modal decomposition

⁴ Random pressure loading

⁵ Fundamental mode of the coupled system

⁶ Plaster-wood wall

⁷ Sonic boom

⁸ Orthotropic homogenous

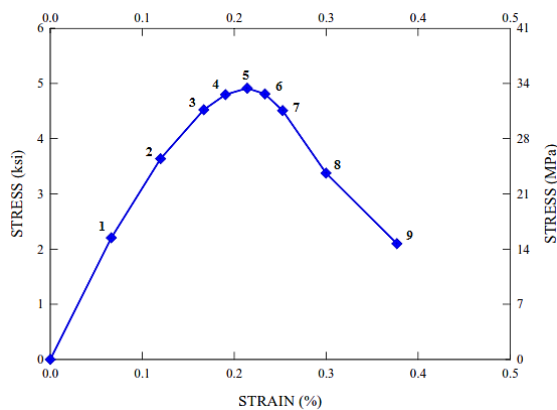
⁹ Full coupling

¹⁰ Incident wave parameters

¹¹ Modal interaction model

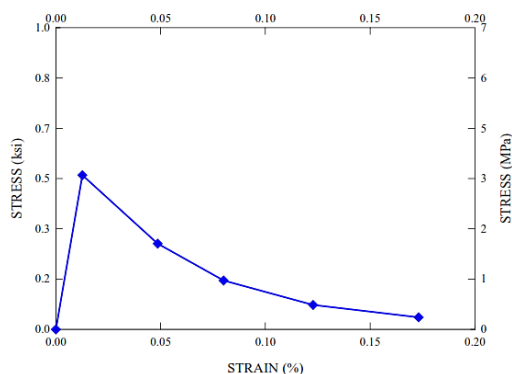
¹² Background pressure (atmospheric pressure)

فشاری $0.45 f_c'$ خواهد بود. در آیین‌نامه پیش‌گفته، تنش جاری‌شدن بتن برابر با $0.45 f_c' = 15.11$ (MPa) تعریف شده است. شکل ۳، منحنی چندخطی تنش-کرنش فشاری بتن را نشان داده که بر پایه مرجع [۲۵] با ۹ نقطه تعریف شده است. در این پژوهش مقاومت فشاری تک‌محوره بتن در نرم‌افزار آباکوس بر پایه این نقاط داده شده است.



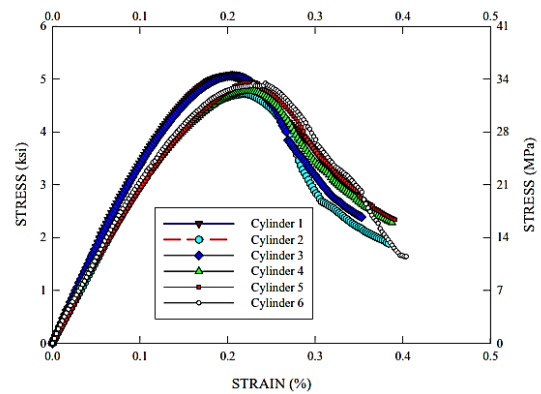
شکل ۳ منحنی چند خطی تنش-کرنش فشاری بتن الگوی عناصر متناهی [۲۵].

۲-۱-۲. ویژگی‌های کششی بتن در الگوی عناصر متناهی با توجه به مرجع [۲۵] و داده‌های بدست آمده از آزمایش، میانگین مقاومت کششی بتن $f_{ct} = 3.45$ (MPa) خواهد بود. شکل ۴ رفتار بتن در برابر کشش را نشان می‌دهد. در این پژوهش، داده‌های بدست آمده از این منحنی در الگوی عناصر متناهی بکار رفته‌اند.

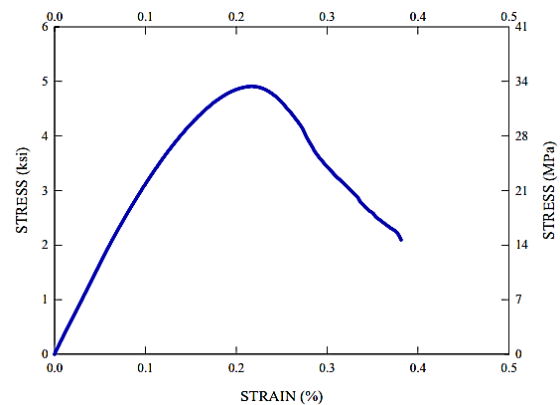


شکل ۴ منحنی چند خطی برای نشان دادن رفتار کششی بتن [۲۵].

نمونه‌های استوانه‌ای انجام شده که در شکل‌های ۱ و ۲ میانگین داده‌های آزمایش با میانگین مقاومت فشاری بتن برابر 33.58 مگاپاسکال گزارش شده است.



شکل ۱ گزارش یافته‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های گوناگون [۲۵].



شکل ۲ گزارش یافته‌های آزمایشگاهی میانگین مقاومت فشاری بتن [۲۵].

در این پژوهش برای الگوسازی رفتار بتن در الگوی عناصر متناهی، الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان در نرم‌افزار آباکوس بکار گرفته شده است. بنابراین برای تعریف ویژگی‌های بتن بر پایه‌ی روش گفته شده در مرجع [۲۵]، تنش جاری‌شدن آغازین^۱ بتن بر پایه‌ی تعریف آیین‌نامه انجمن بتن آمریکا از ضریب کشسانی بتن به‌دست آمده است. بر پایه این آیین‌نامه، ضریب کشسانی بتن^۲ E_c ، برابر با شیب خطی است که میان تنش فشاری صفر و تنش

¹ Initial yield stress

² Elastic modulus of concrete

جدول ۱ داده‌های ورودی برای تعریف رفتار بتن در الگوی عناصر متناهی.

رفتار فشاری بتن		مقادیر آسیب بتن در فشار	
تنش فشاری (مگاپاسکال)	کرنش ناکشسان	شبه‌سنجی آسیب (d _c)	کرنش ناکشسان
۱۵/۱۱	۰	۰	۰
۲۴/۷۸	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۹۲۴	۰/۰۰۰۸۵
۳۰/۷۹	۰/۰۰۱	۰/۱۶۴۹	۰/۰۰۱۳۲۴
۳۲/۶۷	۰/۰۰۱۲۳	۰/۱۹۵۷	۰/۰۰۱۴۸
۳۳/۵۸	۰/۰۰۱۴۷	۰/۲۶۶۳	۰/۰۰۱۷۷
۳۲/۸۰	۰/۰۰۱۶۷	۰/۳۵	۰/۰۰۲۰۸
۳۰/۶۸	۰/۰۰۱۸۶	۰/۴۰۷۳	۰/۰۰۲۲۹
۲۳/۰۷	۰/۰۰۲۳۴	۰/۴۵۹	۰/۰۰۲۵۹
۱۴/۳۴	۰/۰۰۳۱	۰/۴۹۳۸	۰/۰۰۲۸۱
رفتار کششی بتن		مقادیر آسیب بتن در کشش	
تنش کششی (مگاپاسکال)	کرنش ترک‌خوردگی	شبه‌سنجی آسیب (d _t)	کرنش ترک‌خوردگی
۳/۴۵	۰	۰	۰
۱/۷۲	۰/۰۰۰۳۶	۰/۲۲۵	۰/۰۰۰۰۷۷۱۵۹
۱/۱۳۶	۰/۰۰۰۶۷۴	۰/۴۰۴	۰/۰۰۰۱۳۵
۰/۵۶۶	۰/۰۰۱۱	۰/۵۳۶	۰/۰۰۰۱۹۳
۰/۲۹۵	۰/۰۰۱۶	۰/۶۴	۰/۰۰۰۲۵۱
		۰/۷۲۵	۰/۰۰۰۳۰۹
		۰/۷۹۵	۰/۰۰۰۳۸۱
		۰/۸۵۲	۰/۰۰۰۵۳۲
		۰/۹۰	۰/۰۰۰۶۸۶
		۰/۹۳۹	۰/۰۰۰۸۹
		۰/۹۷	۰/۰۰۱۱۱

جدول ۲ عناصر به کار برده شده در ساخت بخش‌های گوناگون الگوی شبیه‌سازی شده.

نام بخش شبیه‌سازی شده	عناصر بکار برده شده	
	ساختمان	گونه
دیوارها و سقف اتاق	شش وجهی	C3D8R
شاره‌ی هوای درون و بیرون اتاق	شش وجهی	AC3D8R
پی	شش وجهی	C3D8R
خاک	شش وجهی	C3D8R

۳-۱-۲. داده‌های ورودی نرم‌افزار آباکوس برای تعریف رفتار بتن و محیط صوتی

برای الگوسازی رفتار بتن در نرم‌افزار آباکوس، باید رفتار فشاری بتن بر پایه کرنش ناکشسان و رفتار کششی آن بر پایه کرنش ترک‌خوردگی، همان‌گونه که در جدول ۱ آمده‌اند، تعریف شوند. یادآور می‌شود که در الگوی عناصر متناهی، ضریب کشسانی بتن برابر ۲۶۵۶۸ مگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۱۷ تعریف شده‌اند. همچنین سایر متغیرهای بایسته^۱ در تعریف الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان برابر با پیش فرض نرم‌افزار آباکوس در نظر گرفته شده‌اند [۲۶].

توانمندی نرم‌افزار آباکوس در شبیه‌سازی محیط صوتی با ویژگی میرا نمودن موج صوتی گذری^۲، بکار گرفته شد. شاره‌ی درون اتاق یک محیط صوتی است و بنابراین شبکه‌بندی هندسه‌ی آن با عناصر صوتی انجام گرفت. در جدول ۲ گونه‌های عناصر بکار برده شده برای ساختن بخش‌های گوناگون الگوی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس آورده شده‌اند.

برای شبیه‌سازی بخش‌های گوناگون اتاق در نرم‌افزار و دستیابی به بهترین سازگاری میان شکل عنصر و شکل هندسی هر بخش، عناصر گوناگونی بکار برده شده است. در این شبیه‌سازی روی هم رفته ۲۲۰۴۴۰ عنصر بکار رفته که برای شبیه‌سازی اتاق ۴۸۴۰ عنصر، برای هوای درون اتاق ۷۹۲۰ عنصر، برای شبیه‌سازی هوای بیرون ۱۲۰۹۸۰ عنصر، برای شبیه‌سازی پی سازه ۷۲۲۵ عنصر و برای شبیه‌سازی خاک ۷۹۴۷۵ عنصر بکار برده شده‌اند. گونه‌ی عناصر بکار برده شده در شبیه‌سازی شش وجهی است^۳. کف اتاق بر روی تکیه‌گاه ساده استوار است و اندرکنش میان محیط صوتی و جامد به گونه‌ی گره^۴ و میان سطوح جامد به گونه‌ی سطح به سطح تعریف شده است.

^۱ Essential variables

^۲ Volumetric drag (force per unit volume per velocity)

^۳ Hexahedral

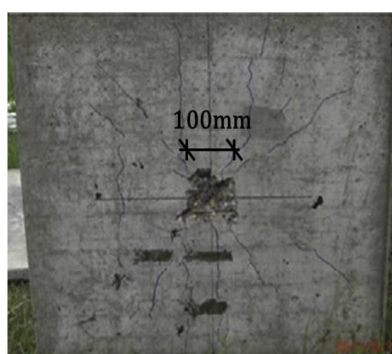
^۴ Tie

۳. شبیه‌سازی عددی و راستی آزمایشی

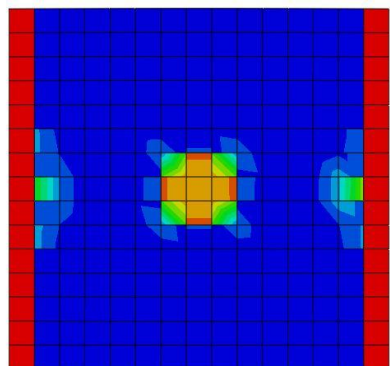
۳-۱. راستی آزمایشی الگوسازی

۳-۱-۱. تنظیم الگو

در آزمایش گزارش شده در مرجع [۴]، یک تکه دال بتن مسلح به حجم $750 \times 750 \times 300$ میلی‌متر مکعب و با نسبت میلگردگذاری ۱/۴۳ درصد آزمایش شده است. میلگردهای فولادی با قطر ۶ میلی‌متر و با فاصله ۷۵ میلی‌متر از یکدیگر به عنوان شبکه تقویت^۱ به کار گرفته شده‌اند. تنش جاری شدن و ضریب کشسانی میلگردهای فولادی به ترتیب برابر با ۶۰۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال هستند. مقاومت استاتیکی بتن برابر با ۳۹/۵ مگاپاسکال در فشار و برابر ۴/۲ مگاپاسکال در کشش است. دو لبه‌ی دال بتن مسلح گیردار و دو لبه‌ی دیگر آزاد هستند. ۰/۱۳ کیلوگرم ماده منفجره‌ی تی‌ان‌تی در فاصله‌ی ۳۰۰ میلی‌متر بالای تکه دال بتن مسلح و در میانه آن جای گرفته است [۴]. چیدمان آزمایش انجام شده^۲ در شکل ۵-الف آمده است. بر این پایه، در نرم‌افزار آباکوس آزمایش پیش‌گفته شبیه‌سازی شده و الگوی ساخته شده در شکل ۵-ب نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

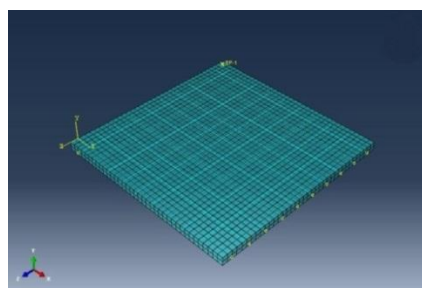
شکل ۶ هم‌سنجی یافته‌های آسیب‌دیدگی تکه دال بتن مسلح در آزمایش و شبیه‌سازی، الف) آسیب‌دیدگی در آزمایش ب) آسیب‌دیدگی در شبیه‌سازی.

۴. بحث و بررسی یافته‌ها

در شبیه‌سازی بار انفجاری، نرم‌افزار آباکوس بسیار توانمند است و انواع بارهای انفجاری همانند انفجار در زیر آب، انفجار در هوا و انفجار در روی سطح را با وارد کردن تابع



(الف)



(ب)

شکل ۵ الف) آزمایش انجام شده از سوی وانگ و همکاران [۴]. ب) الگوی ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس.

³ Residual deflection

¹ Reinforcement mesh

² Experimental test setup

۴-۱. بررسی اثر دوری نهاده‌ی انفجاری از دیوار

برای بررسی اثر دوری و اندازه ماده منفجره به گونه‌ای هم‌زمان، چهار فاصله ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری از میانه‌ی دیوار بتنی و ۱۰ مقدار برای وزن ماده‌ی منفجره به ترتیب برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۶۰، ۹۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم و دو ضخامت برابر با ۷/۵ سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر برای دیواره‌ی بتنی در نظر گرفته شدند. با بکارگیری نرم‌افزار آباکوس، بر روی هر کدام از ترکیب‌های دوری- وزن و ماده‌ی منفجره- ضخامت، تحلیل انجام پذیرفته و میزان آسیب در نزدیک‌ترین دیوار به نهاده‌ی انفجاری بررسی شد که نتایج آن در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده‌اند.

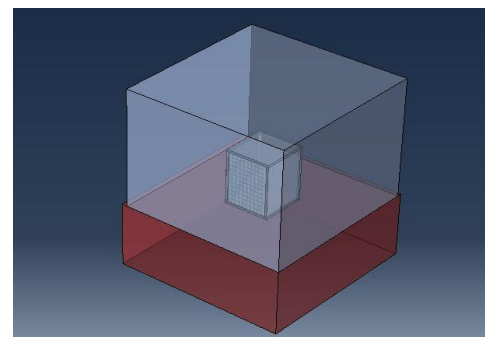
برای ارزیابی آسیب‌دیدگی فشاری و کششی و همچنین اندازه‌ی آسیب پدید آمده، نمودارهای رنگی^۲ پخش آسیب فشاری و کششی برای دیوار بتنی با ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر و با دوری ۲۰ متری نهاده‌ی انفجاری از میانه‌ی دیوار به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، با افزایش ماده‌ی منفجره، اندازه‌ی آسیب فشاری و کششی در دیوار بتنی بیش‌تر شده و این روند گسترش آسیب در نرم‌افزار آباکوس به کمک نمودارهای رنگی به خوبی نمایش داده شده است. در این نمودارها رنگ آبی نشان‌دهنده‌ی بخشی از دیوار بدون آسیب‌دیدگی است که با افزایش اندازه‌ی جرم ماده‌ی منفجره و در پی آن افزایش آسیب‌دیدگی‌ها، رنگ‌ها از آبی به رنگ قرمز می‌گرایند. همچنین، آسیب‌دیدگی از تکیه‌گاه‌های دیوار آغاز و به سوی میانه‌ی دیوار گسترش می‌یابد.

۴-۲. ارزیابی رفتار دیوار بتنی با بکارگیری الگوی بتن آسیب‌دیده‌ی مومسان

بر پایه‌ی تحلیل‌های انجام پذیرفته‌ی گوناگون، یافته‌های مربوط به بیشینه جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار بتنی در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ الف تا ج دیده می‌شود، با افزایش ماده منفجره، بیشینه

فشار، شتاب و یا سرعت در نقطه‌ی ارزیابی در گزینه‌های خود دارد. همچنین می‌توان بار انفجاری را با وارد کردن اندازه‌ی ماده‌ی منفجره‌ی تی‌ان‌تی تعریف نمود. در این پژوهش الگوی کان‌وپ^۱ نرم‌افزار آباکوس برای بارگذاری انفجاری، با وارد کردن اندازه‌ی ماده‌ی منفجره بر پایه کیلوگرم، بر روی سازه بکار گرفته شده است.

سامانه‌ی در دست بررسی یک اتاق بتنی با پهنای ۲/۲، بلندای ۲/۶ و ژرفای ۲/۳ متر به همراه هوای درون آن می‌باشد که زیر کنش (اثر) بارگذاری انفجاری است. دو ضخامت برای دیوارها برابر با ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. دو شبکه‌ی جداگانه از میلگردهای فولادی با قطر ۶ میلی‌متر و با دوری ۳۲ میلی‌متر از یکدیگر بکار گرفته شده‌اند. دوری میلگردها از یکدیگر در هر شبکه برابر با ۱۸/۴ سانتی‌متر است. تنش جاری‌شدن و ضریب کشسانی میلگردهای فولادی به ترتیب برابر با ۶۰۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال هستند. مقاومت استاتیکی بتن در فشار برابر با ۳۳/۵۸ مگاپاسکال و در کشش برابر ۳/۴۵ مگاپاسکال است. شبه‌سنگه‌های (پارامترهای) در دست بررسی: وزن ماده‌ی انفجاری، دوری نهاده‌ی انفجاری از اتاق و ضخامت دیوار بتنی می‌باشند. انگیزه‌ی این پژوهش نیز یافتن میزان آسیب‌دیدگی دیوار بتنی (ترک کششی و خردشدگی فشاری)، جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار، نیروی واکنش در محل تکیه‌گاه‌های دیوار و فشار صوتی پدید آمده در میانه‌ی اتاق است. نمایی از شبیه‌سازی عددی، در برگیرنده‌ی اتاق ایمن، هوای پیرامون سازه و خاک زیرین در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایی از شبیه‌سازی عددی، در برگیرنده‌ی اتاق ایمن، هوای پیرامون سازه و خاک زیرین.

² Damage contours

¹ CONWEP model

جدول ۳ بررسی بروز آسیب در دیواره‌ی بتنی با ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر.

تی‌ان‌تی (کیلوگرم)	۵	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۶۰	۹۵	۱۰۰	۱۵۰
فاصله (متر)	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
۵	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۱۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۲۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۳۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د

ایمن (Safe) و د: آسیب‌دیده (Damaged)

جدول ۴ بررسی بروز آسیب در دیواره‌ی بتنی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر.

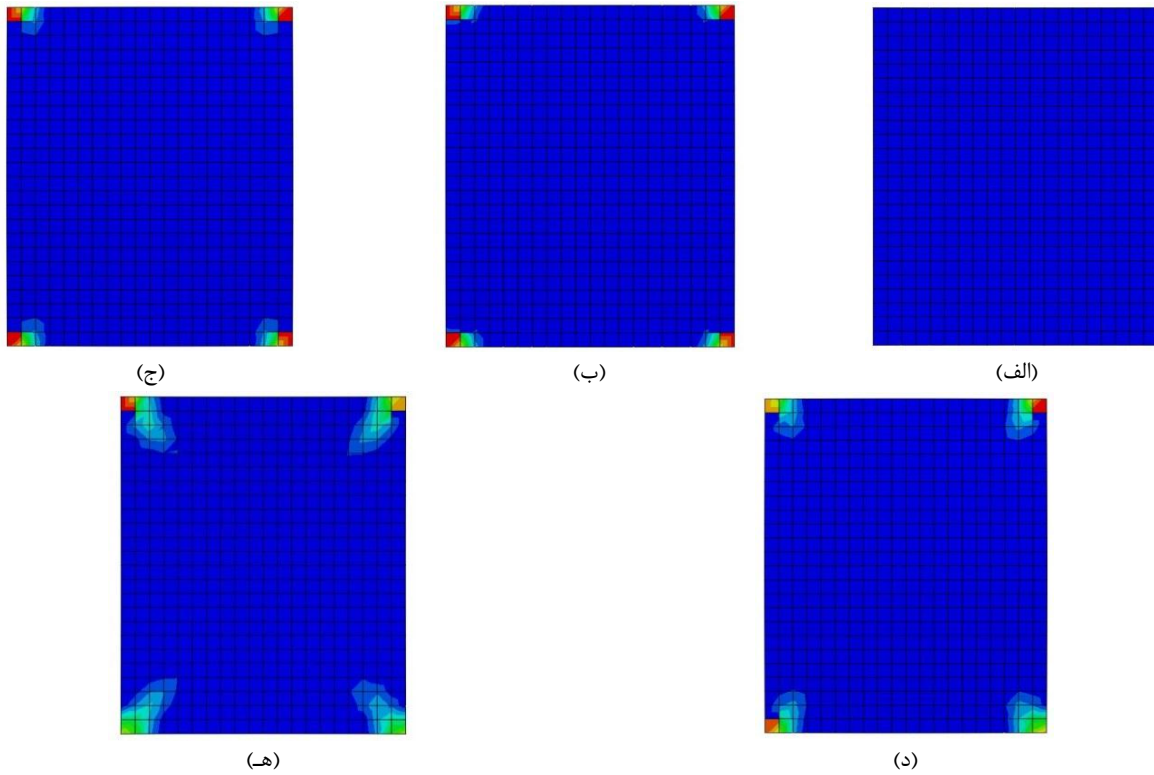
تی‌ان‌تی (کیلوگرم)	۵	۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۶۰	۹۵	۱۰۰	۱۵۰
فاصله (متر)	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
۵	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۱۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۲۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د
۳۰	د	د	د	د	د	د	د	د	د	د

ایمن (Safe) و د: آسیب‌دیده (Damaged)

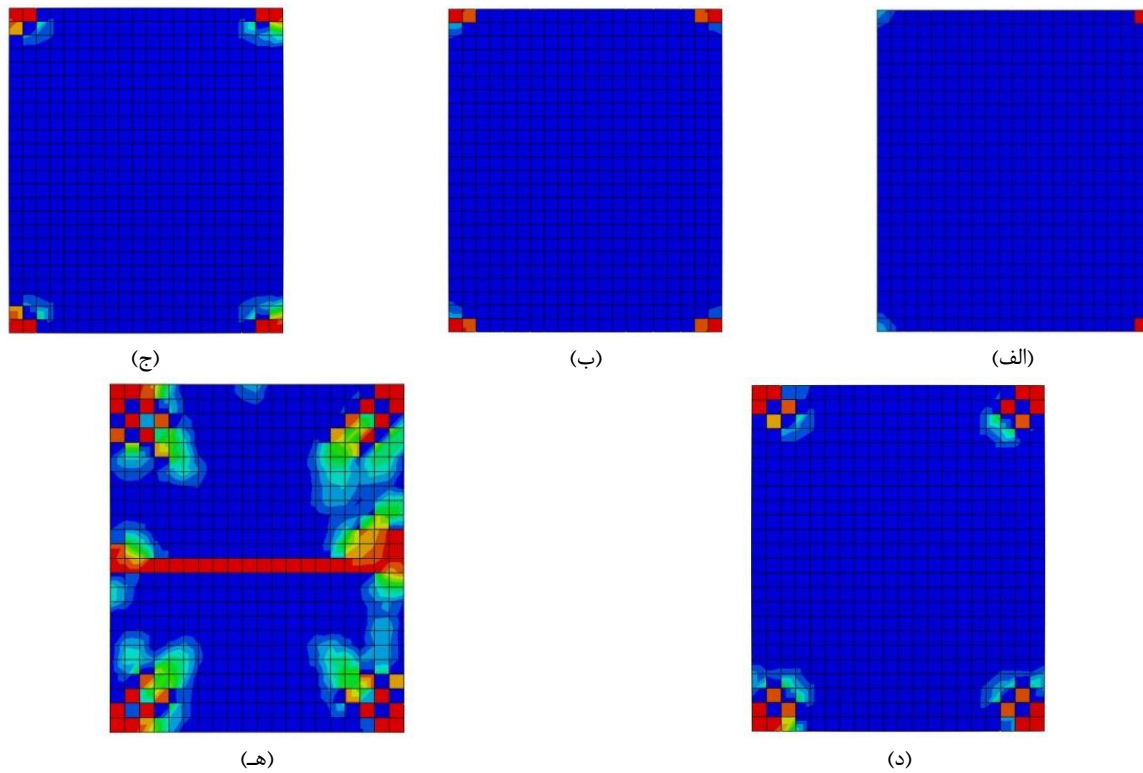
جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار افزایش می‌یابد. این افزایش در بخشی از منحنی شیب کاهشی داشته و این بدان معنی است که با افزایش ماده‌ی منفجره و در پی آن وارد شدن بتن از حالت کشسان به مومسان، مقداری از انرژی ماده‌ی منفجره با آسیب‌دیدگی بتن میرا می‌شود.

بیشینه واکنش‌ها در محل تکیه‌گاه‌های دیوار برای دوری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری نهاده‌ی انفجاری از دیوار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ الف تا ج دیده می‌شود، با افزایش ماده‌ی منفجره، بیشینه واکنش‌ها در محل تکیه‌گاه‌های دیوار در آغاز افزایش یافته و با بیش‌تر شدن ماده‌ی منفجره، اندازه‌ی بیشینه واکنش تکیه‌گاهی در محل تکیه‌گاه روند کاهشی به خود می‌گیرد. این از آن روی است که با افزایش ماده‌ی منفجره و به دنبال آن وارد شدن بتن از حالت کشسان به مومسان (پدید آمدن خردشدگی فشاری و ترک‌خوردگی کششی)، مقداری از انرژی ماده‌ی منفجره با آسیب‌دیدگی بتن میرا می‌شود.

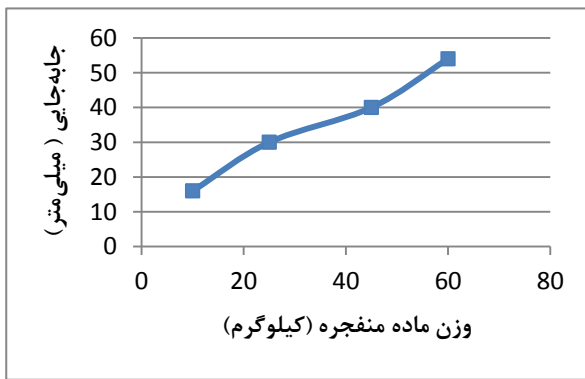
۳-۴. بررسی پاسخ صوتی ناشی از انفجار در میانه‌ی اتاق همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، رابطه‌ی میان پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق و اندازه‌ی جرم ماده‌ی منفجره تقریباً خطی است. با هم‌سنجی (مقایسه) سه منحنی در شکل ۱۲ دیده می‌شود که با افزایش دوری نهاده‌ی انفجاری از اتاق، انحراف منحنی‌ها از خطی بودن بیش‌تر می‌شود. به دیگر سخن، اندازه‌ی ضریب همبستگی برای دوری ۱۰ متری از نهاده‌ی انفجاری برابر با ۰/۹۹۴۱ است که با افزایش دوری به ۲۰ و ۳۰ متر، به ترتیب به اندازه‌های ۰/۹۷۶۰ و ۰/۹۱۵۸ کاهش می‌یابد. این از آن روی است که با افزایش دوری از نهاده‌ی انفجاری، میرایی موج صوتی بیش‌تر شده و این رفتار غیرخطی را به دنبال خواهد داشت. الگوی بارگذاری انفجاری کان‌وپ در نرم‌افزار آباکوس این موضوع را به‌خوبی نشان داده است. هم‌چنین در شکل ۱۲ دیده می‌شود که با افزایش ماده‌ی منفجره پاسخ صوتی افزایش یافته و با افزایش دوری نهاده‌ی انفجاری از اتاق، پاسخ صوتی کاهش می‌یابد. افزون بر این، منحنی‌ها نشان می‌دهند که اگرچه برای



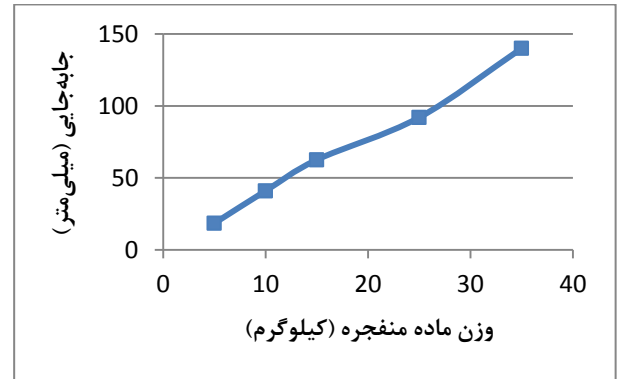
شکل ۸ گسترش آسیب‌دیدگی فشاری برای نهاده‌های انفجاری به وزن الف (۱۰، ب ۳۵، ج ۴۵، د ۵۵ و هـ) ۶۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی با دوری ۲۰ متری از دیوار.



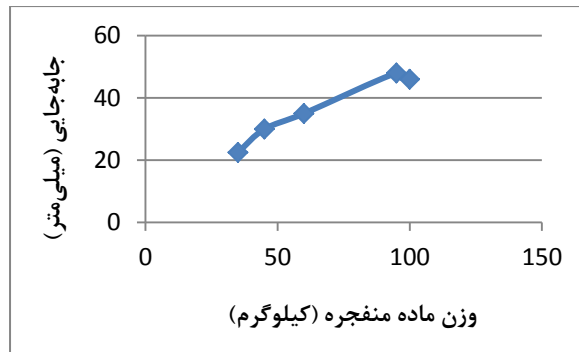
شکل ۹ گسترش آسیب‌دیدگی کششی برای نهاده‌های انفجاری به وزن الف (۱۰، ب ۳۵، ج ۴۵، د ۵۵ و هـ) ۶۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی با دوری ۲۰ متری از دیوار.



(ب)

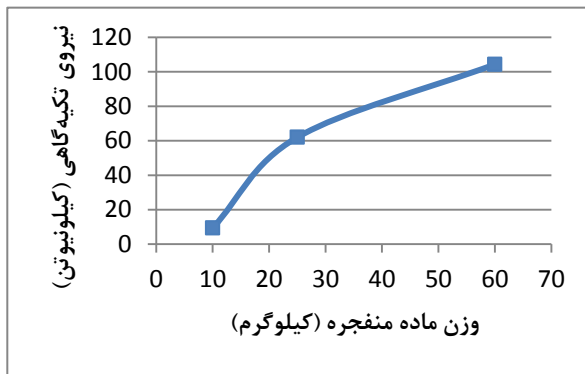


(الف)

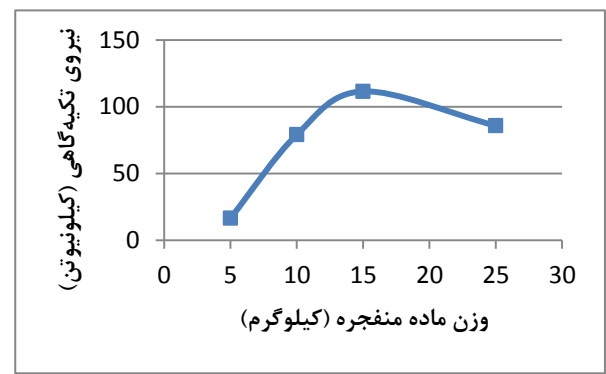


(ج)

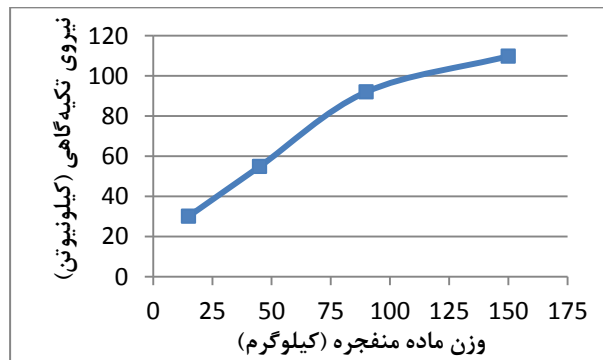
شکل ۱۰ بیشینه جاب‌جایی در میانه‌ی دیوار برای دوری الف (۱۰، ب) ۲۰ و ج) ۳۰ متری ماده‌ی منفجره از دیوار.



(ب)

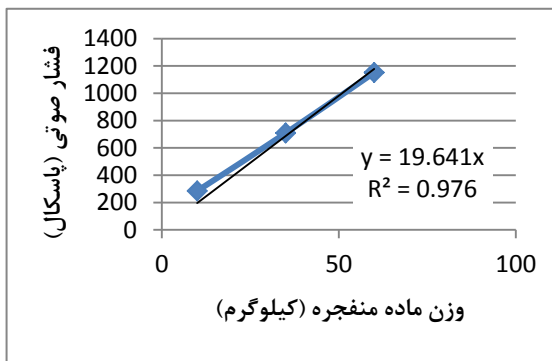


(الف)

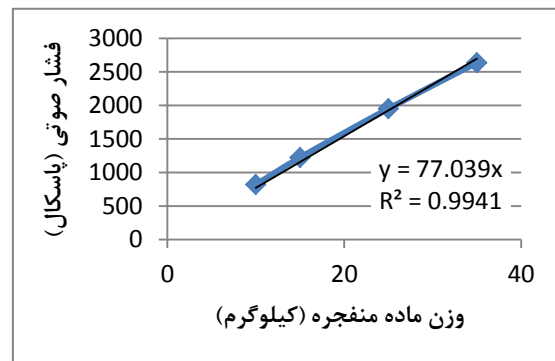


(ج)

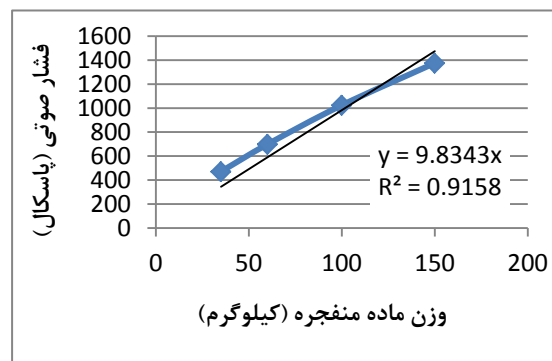
شکل ۱۱ بیشینه واکنش‌ها در محل تکيه‌گاه‌های دیوار برای دوری الف (۱۰، ب) ۲۰ و ج) ۳۰ متری ماده‌ی منفجره از دیوار.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲ بیشینه پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق در برابر وزن ماده‌ی منفجره برای دوری الف (۱۰، ب) ۲۰ و ج) ۳۰ متری ماده‌ی منفجره از دیوار.

شبه‌سنگه‌های (پارامترهای) جرم ماده‌ی منفجره و دوری از نهاده‌ی انفجاری تحلیل شد. در آغاز برای بررسی اثر اندازه‌ی جرم ماده منفجره و دوری، برای ۳۰ ترکیب دوری- وزن تحلیل انجام شده و اندازه‌ی آسیب‌دیدگی دیوار بتنی در جداولی برای دو ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر، نشان داده شد. بنابر یافته‌ها، دیده شد که با افزایش ماده‌ی منفجره اندازه‌ی آسیب فشاری و کششی در دیوار بتنی بیش‌تر می‌شود. آسیب‌دیدگی از تکیه‌گاه‌های دیوار آغاز شده و به سوی میانه‌ی دیوار گسترش می‌یابد؛ الگوی بتن آسیب‌دیده مومسان این ویژگی را به خوبی نشان می‌دهد. سپس رفتار اتاق ایمن با به‌کارگیری الگوی پیش‌گفته ارزیابی شده و یافته‌های مربوط به بیشینه جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار، بیشینه واکنش‌ها در محل تکیه‌گاه‌ها و بیشینه فشار صوتی در میانه‌ی اتاق نمایش داده شدند. یافته‌های مربوط به بیشینه جابه‌جایی نشان می‌دهند که با افزایش ماده‌ی منفجره بیشینه جابه‌جایی در میانه‌ی دیوار افزایش

دوری ۲۰ متری از نهاده‌ی انفجاری با ۱۰ کیلوگرم ماده‌ی منفجره آسیب سازه‌ای به دیوار وارد نشده است، ولی بیشینه پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق برابر با ۲۸۵ پاسکال است که در مقیاس دسی‌بل هم‌ارز ۱۴۳/۱ دسی‌بل می‌باشد (بزرگ‌تر از ۱۴۰ دسی‌بل، آستانه‌ی آسیب به سامانه شنوایی انسان) که می‌تواند به سامانه‌ی شنوایی انسان آسیب برساند. این خطر برای دوری ۳۰ متری با ۲۵ کیلوگرم ماده‌ی منفجره، که در مقیاس دسی‌بل هم‌ارز با ۱۴۱/۹ دسی‌بل است، نیز وجود دارد. هم‌چنین در دوری ۳۰ متری با ۱۵ کیلوگرم ماده‌ی منفجره نیز خطر آسیب به سامانه شنوایی وجود دارد ولی اندکی کم‌تر از آستانه‌ی آسیب‌پذیری است (پاسخ صوتی هم‌ارز با ۱۳۷/۸ دسی‌بل).

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر انفجار در هوا بر روی یک دیوار بتنی با به‌کارگیری الگوی بتن آسیب‌دیده مومسان در نرم‌افزار آباکوس بررسی شده و حساسیت دیوار نسبت به

- openings,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, pp. 1448-1450, 1999.
- [6] P.F. Silva, B. Lu, “Blast resistance capacity of reinforced concrete slabs,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 135, pp. 708-716, 2009.
- [7] P.F. Silva, B. Lu, “Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative composite materials,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, pp. 523-534, 2007.
- [8] A. Ghani Razaqpur, A. Tolba, E. Contestabile, “Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, pp. 535-546, 2007.
- [9] A. Schenker, I. Anteby, E. Gal, Y. Kivity, E. Nizri, O. Sadot, “Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 184-198, 2008.
- [10] Y. Shi, Z.X. Li, H. Hao, “A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading,” *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 1691-1703, 2010.
- [11] J. Li, H. Hao, “A two-step numerical method for efficient analysis of structural response to blast load,” *International Journal of Protective Structures*, vol. 2, pp. 103-126, 2011.
- [12] R. Jayasooriya, D.P. Thambiratnam, N.J. Perera, V. Kosse, “Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings,” *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 3483-3495, 2011.
- [13] X. Zhou, H. Hao, “Mesoscale modelling and analysis of damage and fragmentation of concrete slab under contact detonation,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 1315-1326, 2009.
- [14] X. Zhou, V. Kuznetsov, H. Hao, J. Waschl, “Numerical prediction of concrete slab response to blast loading,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 1186-1200, 2008.
- [15] A.A. Mutalib, H. Hao, “Numerical analysis of FRP-composite-strengthened RC panels with anchorages against blast loads,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 25, pp. 360-372, 2010.
- [16] A.A. Mutalib, H. Hao, “The effect of anchorages on FRP strengthening of RC walls to resist blast loads,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 82, pp. 497-502, 2011.
- [17] E.K. Tang, H. Hao, “Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations,” *Engineering Structures*, vol. 32,

می‌یابد. این افزایش در بخشی از منحنی شیب کاهشی داشته و این بدان معنا است که با افزایش ماده‌ی منفجره و در پی آن وارد شدن بتن از حالت کشسان به مومسان، مقداری از انرژی ماده‌ی منفجره با آسیب‌دیدگی بتن میرا می‌شود. همچنین نتایج مربوط به بیشینه واکنش در محل تکیه‌گاه‌ها نیز گواهی بر درستی یافته‌های پیشین است.

با نگاه به نمودارهای به‌دست آمده برای بیشینه پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق می‌توان به گونه‌ای تقریبی یک رابطه‌ی خطی میان پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق و اندازه‌ی جرم ماده منفجره به‌دست آورد. با هم‌سنجی سه منحنی به‌دست آمده در این راستا، دیده می‌شود که با افزایش دوری نهاده‌ی انفجاری از اتاق، انحراف نمودارها از خطی بودن بیش‌تر می‌شود. این از آن روی است که با افزایش دوری نهاده‌ی انفجاری، میرایی موج صوتی بیش‌تر شده و رفتار غیرخطی را به همراه می‌آورد؛ الگوی بارگذاری انفجاری کان‌وپ در نرم‌افزار آباکوس نیز این نکته را به‌خوبی نشان داده است. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهند که اگرچه در فاصله‌هایی آسیب سازه‌ای به نزدیک‌ترین دیوار به نهاده‌ی انفجاری وارد نشده است، ولی بیشینه پاسخ صوتی در میانه‌ی اتاق می‌تواند به سامانه‌ی شنوایی ساکنین آسیب برساند.

۶. فهرست منابع

- [1] US Department of Defense, “DoD 6055.09-STD. DoD ammunition and explosives safety standard,” ed. USA: US, 2008.
- [2] Unified Facilities Criteria, “Structures to resist the effects of accidental explosions,” UFC 3-340-02, Department of Defense, US army corps of engineers, Naval facilities engineering command, Air force civil engineer support agency, United States of America, 2008.
- [3] J. Leppänen, “Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, pp. 843-860, 2005.
- [4] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S.C. Wang, F. Tang, “Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 49, pp. 158-164, 2012.
- [5] G. Mays, J. Hetherington, T. Rose, “Response to blast loading of concrete wall panels with

- using a series solution,” *Computers and Structures*, vol. 35, pp. 121-140, 1990.
- [23] F.J. Fahy, P. Gardonio, “Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response,” Academic press, 2007.
- [24] M.C. Remillieux, R.A. Burdisso, G. Reichard, “Transmission of sonic booms into a rectangular room with a plaster-wood wall using a modal-interaction model,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, pp. 529-556, 2009.
- [25] S.K. Jung, D.W. White “Inelastic strength behavior of horizontally curved composite I-girder bridge structural systems: Fixed-end bridge FEA study,” *Composite Construction in Steel and Concrete VI*, pp. 754-765, 2011.
- [26] H. Hibbitt, B. Karlsson, P. Sorensen, “ABAQUS Theory Manual,” Version 6.12, Pawtucket, Rhode Island, USA, 2012.
- pp. 3180-3192, 2010.
- [18] S. Astarlioglu, T. Krauthammer, D. Morency, T.P. Tran, “Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads,” *Engineering Structures*, vol. 55, pp. 26-34, 2013.
- [19] A. Pretlove, “Free vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 2, pp. 197-209, 1965.
- [20] A. Pretlove, “Forced vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 3, pp. 252-261, 1966.
- [21] A. Pretlove, A. Craggs, “A simple approach to coupled panel-cavity vibrations,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 11, pp. 207-IN1, 1970.
- [22] N.N. Wahba, “Analysis of a plaster-wood wall

Investigating the acoustical and vibrational response of a reinforced concrete safe room under air blast effects

S.R. Massah*

Structural and Earthquake Eng. Division, Dept. of Civil Eng., Iran Univ. of Sci. and Tech.

Abstract

Capturing the true response of a structure, such as a reinforced concrete safe room, under the effects of explosive loads, and also, the evaluation of induced damages to the structure, will give a better vision to the engineer in the design process. In this paper the acoustical and vibrational response of such a structure under the effects of air blast is investigated by employing the concrete damaged plasticity model available in ABAQUS software. The sensitivity of the safe room to explosive mass and stand-off distance of explosion source is also investigated. Moreover, the behavior of any of the RC walls at the nearest to the explosion source is evaluated. For this, maximum deflection at wall center and maximum reacting forces at the wall supports are considered. Furthermore, hearing safety of residents in the safe room is evaluated by measuring the acoustical response at the room center. The results obtained for maximum deflection indicate that by increasing the explosive mass, the maximum deflection increases. Of course, this increase has a descending slope which is due to crushing of concrete. The results of maximum reacting forces at wall supports also verified the results of maximum deflection. The results of maximum acoustical response at room center show that although there is a linear correlation between acoustical response at room center and explosive mass, but an increase in stand-off distance makes it to be nonlinear.

Keywords: Acoustical response, Vibrational response, Air blast, Concrete damaged plasticity model, Safe room

pp. 21-33 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: massah@iust.ac.ir