

بررسی اثر تخریبی انفجار در فواصل مختلف بر دیوار حائل بتنی

محمدحسین تقوی پارسا^{۱*}، علی گراوند^۲

۱- دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه اصفهان

(دریافت: ۹۸/۱۰/۲۱، پذیرش: ۹۹/۰۶/۱۵)

چکیده

استفاده از دیوارهای حائل بتنی به دلیل جرم زیاد گزینه مطلوبی برای مقاومت در برابر انفجار است. این دیوارها عموماً به صورت بتن آرمه یا بتن الیافی ساخته می شوند. در این پژوهش اثرات تخریبی انفجار بر دیوار حائل از جنس بتن آرمه و بتن الیافی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، دیوار در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده و بارهای انفجار متفاوت در فواصل مختلف بر آن اعمال شده است. سپس برای بررسی خرابی حاصل از انفجار، مواد منفجره در سه حالت چسبیده به دیوار، در فاصله یک متری و در فاصله ده متری از دیوار، عمود بر بالاترین نقطه میانی سازه و نیز محل اتصال دیوار و زمین مدل سازی شده اند. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که انفجار در محل اتصال دیوار و زمین تأثیرات مخرب تری نسبت به انفجار در بالاترین نقطه دیوار دارد. بارهای منجر به تخریب دیوار بتن آرمه و بتن الیافی در محل اتصال دیوار به زمین، در فاصله چسبیده به آن برابر با ۵ کیلوگرم C4 و ۱۰ کیلوگرم TNT و در فاصله یک متری از دیوار برابر با ۱۵ کیلوگرم C4 و ۱۵ کیلوگرم TNT خواهد بود. در فاصله ۱۰ متری از دیوار و در محل اتصال دیوار به زمین، بارهای منجر به تخریب برابر با ۶۰ کیلوگرم C4 و ۷۰ کیلوگرم TNT برای دیوار بتن آرمه و ۹۰ کیلوگرم C4 و ۱۰۰ کیلوگرم TNT برای دیوار بتن الیافی می باشد. همچنین انفجار در فاصله چسبیده به دیوار و یک متری، تأثیر موضعی بر دیوار داشته و باعث خرابی های موضعی می گردد. این در حالی است که انفجار در فاصله ده متری به علت فاصله زیاد انفجار از دیوار به صورت موضعی عمل نکرده و برای تخریب دیوار در این فاصله ماده منفجره بیشتری لازم است.

کلیدواژه ها: انفجار، آباکوس، دیوار بتن آرمه، بتن الیافی، خرابی.

Investigating the Destructive Effect of Explosions at Different Distances on Concrete Retaining Walls

M. H. Taghavi Parsa*, A. Geravand

Imam Hossein University

(Received: 11/01/2020; Accepted: 15/09/2020)

Abstract

Concrete retaining walls gratitude to their significant-high mass are considered a protective barrier and explosion resistance. The fabricated walls generally made of reinforced or fiber-reinforced concrete. This study deals with investigating the destructive effects of the explosion on retaining walls made of reinforced and fiber-reinforced concrete. For this purpose, the intended wall simulated by Abaqus software with various blast loads at different distances. Then, to investigate the damage caused by the explosion, the explosives were modeled in three positions attached to the wall, at a distance of one meter and at a distance of ten meters from the wall, perpendicular to the highest midpoint of the structure and the junction of wall and ground. The modeling results showed that the explosion at the connection of the wall to the ground has more destructive effects than the detonation at the highest point of the wall. The failure load of the reinforced concrete wall and fiber-reinforced concrete at the junction of the wall to the ground equals 5 kg C4 and 10 kg TNT and 15 kg C4 and 15 kg TNT at attached and distance of one meter from the wall respectively. The failure load was equal to 60 kg C4 and 70 kg TNT and 90 kg C4 and 100 kg TNT for reinforced concrete and fiber-reinforced concrete wall respectively at a distance of 10 meters from the wall and at the junction of the wall to the ground. Also, the explosion at the position attached to the wall and one meter from the wall showed local effects on the wall and occasion local damage. However, the explosion at a distance of ten meters did not act locally due to the large distance of the explosion from the wall, and more explosives are needed to destroy the wall at this distance.

Keywords: Explosion, Abaqus, Reinforced Concrete Wall, Fiber-Reinforced Concrete, Failure.

۱. مقدمه

پاسخ سازه در برابر بار انفجار، دینامیکی و تابعی از جرم و سختی المان‌های سازه‌ای است. علاوه بر این، امواج انفجار در مقایسه با دوره تناوب طبیعی کلی سازه در مدت‌زمان بسیار کوتاهی انتشار می‌یابند که منجر به عملکرد ضربه‌ای بارهای انفجار می‌شود. انرژی امواج انفجار به‌صورت انرژی جنبشی و در قالب سرعت اولیه به المان‌های سازه‌ای منتقل می‌گردد. با استفاده از رابطه انرژی جنبشی ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$) که با جرم جسم (m) و مجذور سرعت (v^2) رابطه مستقیم دارد، می‌توان به این نتیجه دست یافت که اندازه این سرعت اولیه متناسب با انرژی موج انفجار است و رابطه عکس با جرم سازه دارد [۱]. از این‌رو استفاده از سازه بتنی در برابر بار انفجار به‌علت جرم زیاد آن نتایج بسیار سودمندی دارد. به همین دلیل دیوارهای حائل بتنی به‌منظور ایجاد حریم، حفاظت و نیز نوعی از انسداد کاربرد دارند. این دیوارها ممکن است به‌صورت پیش‌ساخته و یا در جابجایی و از نوع بتن آرمه یا بتن الیافی اجرا شوند.

تجزیه و تحلیل رفتار سازه‌های بتن آرمه و بتن الیافی به‌منظور مقاومت در برابر بارهای دینامیکی با مدت‌زمان تأثیر کوتاه، مانند بار انفجار، در دهه‌های گذشته به‌صورت گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور درک رفتار سازه بتنی در این نوع بارگذاری، آزمایش‌های انفجار در مقیاس کامل مورد نیاز است که به‌دلیل محدودیت‌های امنیتی و منابع قابل توجه مالی مورد نیاز دچار محدودیت‌هایی هستند و در اغلب موارد سازه موردنظر به‌صورت مقیاس‌شده مورد آزمایش قرار گرفته است [۷-۲]. به‌منظور بررسی خرابی سازه‌های بتن آرمه تحت اثر بار انفجار، هم مطالعات آزمایشگاهی و هم شبیه‌سازی‌هایی در نرم‌افزارهای اجزاء محدود صورت گرفته است. در ادامه چند نمونه از کارهای انجام‌گرفته در زمینه انفجار سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیلوا و همکاران [۸] در کاری آزمایشگاهی، روشی جهت تخمین خسارت ناشی از برخی حالات بارگذاری انفجار ارائه کردند. به این منظور آنان آزمایش‌هایی بر روی دال بتن آرمه با تغییر فاصله انفجار و وزن مواد منفجره انجام دادند. سپس با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، روش پیشنهادی خود را برای تخمین سطح خرابی با توجه به وزن و فاصله ماده منفجره تا سازه بتن آرمه ارائه کردند. لوچینی و همکاران [۹]، در کاری آزمایشگاهی به همراه شبیه‌سازی عددی به بررسی تحلیل رفتار روسازی بتنی در معرض بارهای انفجار پرداختند. در این کار آنان ابتدا به‌صورت آزمایشگاهی دال بتنی را تحت اثر انفجار قرار دادند. سپس نتایج به‌دست‌آمده را با مدل‌سازی مسئله توسط نرم‌افزارهای اتودین و آباکوس مورد صحت‌سنجی قرار دادند. در انتها رابطه‌ای بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن و محل انفجار ارائه کردند.

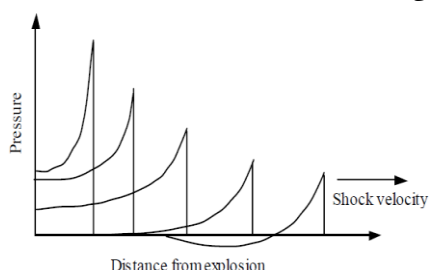
به‌دلیل خطرناک و پرهزینه بودن آزمایش‌های انفجار، می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود پدیده انفجار را شبیه‌سازی و نتایجی مشابه با آزمایش‌های صورت‌گرفته در این زمینه گرفت. از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی پدیده انفجار، نرم‌افزار آباکوس می‌باشد که محققین مسائل مختلف اثرگذاری انفجار بر اجزای مختلف سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از آن را شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۴-۱۰]. در ادامه به بررسی برخی از مقالات موجود در این زمینه پرداخته می‌شود. وانگ و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار دال‌های بتن آرمه یک‌طرفه در معرض بار انفجار از طریق آزمایش و شبیه‌سازی عددی پرداختند و معیار خرابی را برای سطوح مختلف خسارت در اثر تغییر فاصله و وزن انفجار ارائه کردند. همچنین با افزایش بار مواد منفجره در فاصله ثابت از دال، مشاهده کردند که حالت خرابی دال بتن آرمه از خمش کلی به شکست پانچ موضعی تغییر می‌کند. شاشانک و همکاران [۱۶]، در کاری عددی پاسخ دینامیکی دیوار بتن آرمه تحت بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آنان در این کار دیوار بتنی به همراه میلگردها را توسط نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی و تأثیرات پارامترهای مختلف از قبیل: ضخامت دیوار، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور، مقاومت کششی آرماتورها، قطر میلگرد و خواص وابسته به نرخ کرنش بتن و فولاد را مورد بررسی قرار دادند. درنهایت پس از تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی به این نتیجه رسیدند که عمدتاً ضخامت دیوار و درجه بتن نسبت به درصد آرماتور، قطر میلگرد و درجه فولاد، پاسخ انفجار را کنترل می‌کند. همچنین دیوارهای بتن آرمه با مدل‌سازی مشخصات مصالح وابسته به کرنش، جابه‌جایی کمتری نسبت به مشخصات مصالح مستقل از کرنش از خود نشان می‌دهند.

با توجه به تماس خاک با سازه اعم از بتنی و فولادی، تحقیقاتی نیز با در نظر گرفتن برهم‌کنش خاک و سازه تحت اثر بارهای جانبی شامل زلزله و انفجار صورت گرفته است [۲۱-۱۷]. بازبار و همکاران [۲۲] به‌منظور مقایسه عملکرد دیوار حائل وزنی بتنی و خاک مسلح به‌عنوان دیوار محافظ جاده برای جلوگیری از ریزش خاک‌ریز در پشت آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار FLAC-2D تغییرشکل‌های به‌وجود آمده در اثر بارگذاری‌های مختلف انفجار در این دیوارها را بررسی کردند. در این کار آنان انفجار را در فواصل دور از سازه و داخل خاک در نظر گرفتند و بر اساس آن بتن را به‌صورت الاستیک مدل کردند و به پیش‌بینی عملکرد این دیوارها در انفجارها با شدت و فواصل مختلف پرداختند. توی و سویم [۲۳]، با استفاده از نرم‌افزار اتودین به شبیه‌سازی دیوار حائل بتن آرمه به همراه خاک‌ریز پشت آن تحت بار انفجار در دو فاصله مختلف پرداختند. در این پژوهش انفجار در دو فاصله ۴ و ۵/۵ متری از دیوار مدل شد و نتایج جابه‌جایی‌ها و تنش‌های ایجادشده در دیوار با نمودارهای موجود در UFC 3-340-2 و روابط تجربی دیگر محققین بررسی شد. گیوری و همکاران [۲۴]، در کاری

انفجار در فواصل نزدیک، میانی و دور پرداخته شده است. به این منظور، یک دیوار حائل یکبار از جنس بتن آرمه و بار دیگر از جنس بتن الیافی بدون آرماتور، تحت بارگذاری انفجار در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. سپس با تغییر شدت انفجار و فاصله محل انفجار از دیوار، اثر تخریبی انفجار بر دیوار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق

انفجار، آزاد شدن ناگهانی انرژی با مدت زمان تداوم اندک است [۱]. در لحظه وقوع انفجار مقدار زیادی انرژی به شکل انرژی جنبشی و حرارت در زمان بسیار کوتاهی (در حدود ۰/۰۱ ثانیه) آزاد می شود. انرژی آزاد شده باعث جلو راندن توده هوای اطراف خود می شود که به آن موج انفجار می گویند. انرژی آزاد شده به صورت موج انفجار با ایجاد تغییرات شدید فشار در محیط اطراف خود، ضربه مکانیکی شدیدی به محیط وارد می کند [۲۸]. اضافه فشار انفجار^۱ مهم ترین بخش انفجار است و بیشترین اثر را روی رفتار و پاسخ سازه دارد. بار اضافه فشار به علت افزایش فشار ناشی از انبساط توده انفجاری حاصل می شود. این بار به صورت شکل (۱) با افزایش فاصله از محل انفجار کم می شود. با توجه به شکل (۱)، انفجارهایی با فاصله کم دارای بازه کوتاه و فشار بیشتر بر سازه و انفجارهای با فاصله زیاد دارای فشار یکنواخت و کمتر و بازه طولانی تری هستند.



شکل ۱. نحوه انتشار موج انفجار [۱۶].

با وقوع انفجار در فاصله مشخص از سازه، موج انفجار در زمان t_A به سازه رسیده و در این لحظه فشار وارد بر سازه از فشار محیط (P_0) به فشار حداکثر (P_{S0}) می رسد. فشار وارد بر سازه با سپری شدن زمان $t_A + t_d$ به فشار محیط می رسد. این محدوده، فاز مثبت انفجار را در بر می گیرد. پس از این لحظه، در سازه مکش یا فاز منفی اتفاق می افتد که دارای زمان تداوم بیشتر و قدرتی به مراتب کمتر از فاز مثبت است. با گذشت زمان t_d^- از لحظه شروع فاز منفی، فشار موج با فشار محیط متعادل می شود و پدیده انفجار پایان می یابد (شکل ۲).

نمودار فشار - زمان امواج انفجاری را می توان با یک تابع نمایی به صورت رابطه (۱) نمایش داد:

عددی با شبیه سازی در نرم افزار آباکوس و با تغییر مشخصات خاک پشت دیوار حائل بتنی به بررسی پایداری دیوار حائل تحت بار انفجار در فاصله یک متری از آن پرداختند. در این کار آنان بتن را به صورت الاستیک مدل کردند و با تغییر زاویه شکست داخلی و چسبندگی خاک به این نتیجه رسیدند که تغییر پارامترهای مذکور اثر قابل ملاحظه ای بر پایداری دیوار حائل ندارد.

پیشرفت های انجام شده در صنعت ساختمان و مطالعات انجام گرفته بر روی بتن، منجر به ظهور انواع مختلفی از بتن الیافی شده است. در این نوع از بتن، الیاف های مختلفی به صورت ماکروسکوپی و اختلاط فیزیکی به بتن اضافه می گردد و منجر به بالا رفتن مقاومت بتن در کشش می شود. بتن الیافی به دلیل جذب انرژی و مقاومت بالا در برابر بارهای انفجار مورد توجه محققان قرار گرفته است. فوگلار و همکاران [۲۵] در تحقیقی اثر بار انفجار نزدیک بر عرشه پل ها را با در نظر گرفتن افزایش الیاف فولادی با عملکرد بسیار بالا بر بتن مورد بررسی قرار دادند. نتیجه کار آنان به این صورت بود که افزایش درصد الیاف فولادی با مقاومت بسیار بالا تأثیر بسیار خوبی بر رفتار بتن الیافی در برابر انفجار دارد. همچنین مشاهده کردند که قرار دادن شبکه مش در دال ها منجر به بهبود رفتار بتن الیافی در برابر انفجار می شود. آبیسینگ و همکاران [۲۶] در تحقیقی به مطالعه آزمایشگاهی بر روی اثر الیاف آرامید بر مقاومت پنل های بتن الیافی پرداختند. در این پژوهش چند دال بتن آرمه و بتن الیافی با الیاف آرامید در برابر بار انفجار مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به آزمایش های انجام گرفته، آنان به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف آرامید در داخل بتن باعث افزایش جذب انرژی و افزایش مقاومت بتن می شود. یو و همکاران [۲۷] در پژوهشی به بررسی عملکرد دال های بتن آرمه مجهز به الیاف با عملکرد بسیار بالا پرداختند. در این پژوهش، آزمایش هایی بر روی دال ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی از جمله طول الیاف، جهت الیاف در بتن، بتن با مقاومت بالا و بتن معمولی تحت بارهای انفجار یا ضربه، انجام گرفت. نتیجه این پژوهش نیز همانند سایر مطالعات انجام شده مشابه، نشان دهنده عملکرد خوب بتن الیافی با مقاومت بسیار بالا نسبت به بتن آرمه بود.

اکثر کارهای انجام شده در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه بتنی، بر روی دال های بتنی صورت گرفته است. در شبیه سازی های صورت گرفته نیز عمدتاً به بحث انفجار در دیوارهای حائل پرداخته نشده است. در مطالعاتی نیز که بر روی دیوار حائل صورت گرفته، این دیوار به صورت دیوار حائل در برابر حرکت خاک ریز پشت آن در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن انفجار در فواصل میانی و دور و با الاستیک در نظر گرفتن بتن در مدل سازی ها به بررسی تغییر شکل های خاک، دیوار و پایداری آن پرداخته شده است. به همین جهت در پژوهش حاضر به بررسی اثر انفجار بر سازه دیوار حائل به عنوان سازه انسدادی و خرابی های ایجاد شده در دیوار تحت

¹ Blast Overpressure

حاصل از انفجار برخی از مواد منفجره در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. گرمای انفجار تعدادی از مواد منفجره [۳۰].

ماده منفجره	گرمای انفجار (ft-lb/lb)
TNT	$1/97 \times 10^6$
C4	$2/22 \times 10^6$
RDX	$2/27 \times 10^6$
HMX	$2/27 \times 10^6$
PBX-9407	$2/24 \times 10^6$

سپس به منظور لحاظ نمودن هم‌زمان اثر وزن و فاصله انفجار و مقایسه بین حالت‌های ممکن از پارامتر Z به صورت رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱]:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4)$$

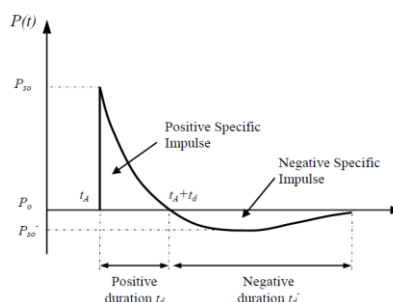
در این رابطه، R فاصله نقطه انفجار از سازه برحسب فوت (ft) یا متر، W وزن شارژ (انفجار) برحسب پوند (lb) یا کیلوگرم بسته به سیستم یکای مورد استفاده است. با در نظر گرفتن نمودارهای فشار انفجار برحسب فاصله مقیاس شده از UFC 3-340-2 [۱۷]، به صورت تقریبی این نتیجه حاصل می‌شود که فشار انفجار دارای رابطه خطی با وزن شارژ و رابطه معکوس با مکعب فاصله نقطه انفجار از سازه می‌باشد [۱]. به این معنی که دو برابر کردن وزن شارژ، تقریباً باعث دو برابر شدن فشار انفجار در فاصله ثابت از سازه می‌شود. همچنین در وزن شارژ ثابت با دو برابر کردن فاصله، فشار موج انفجار تقریباً ۸ برابر کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار Z و در نظر گرفتن واحد $\frac{ft}{lb^{1/3}}$ برای آن، می‌توان نوع انفجار را به این صورت دسته‌بندی کرد که انفجار دور^۱ برای $Z > 10$ ، انفجار نزدیک^۲ برای $3 < Z < 10$ و انفجار در محل^۳ برای $Z < 3$ را در نظر گرفت [۱]. انفجار دور در اثر انفجار با فاصله به اندازه کافی از ساختمان رخ می‌دهد، به طوری که موج انفجاری که به ساختمان می‌رسد فشار تقریباً ثابت بر روی عناصر سازه‌ای وارد می‌کند. در انفجار نزدیک به علت فاصله کم محل انفجار تا سازه، عناصر سازه‌ای بارگذاری انفجار متغیر را تجربه می‌کنند. انفجار در محل، باعث ایجاد بار انفجار با شدت زیاد و به صورت موضعی می‌شود که پاسخ‌های سازه شامل خرد شدن بتن، خرابی مستقیم برشی و پدیده انتشار موج است که می‌تواند باعث شکست کششی در امتداد ضخامت بتن شود [۱].

در این تحقیق به منظور لحاظ کردن اثر انواع انفجار و خرابی‌های ناشی از آن در دیوار حائل بتنی از نرم‌افزار آباکوس [۳۱] استفاده شده است. آباکوس یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای عددی با روش حل اجزاء محدود است که قادر به حل مسائلی با

$$P(t) = P_0 + P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b \frac{t}{t_d}} \quad (1)$$

در رابطه (۱): t_d مدت‌زمان دوام فاز مثبت و b پارامتر شکل موج نامیده می‌شود که تابعی از فشار حداکثر P_{s0} می‌باشد. مساحت زیر نمودار فشار-زمان، ضربه نامیده می‌شود. ضربه مهم‌ترین عامل ایجاد خسارت در سازه است. بخش اعظم ضربه در فاز مثبت اتفاق می‌افتد که می‌توان به صورت رابطه (۲) آن را محاسبه کرد:

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_d} P(t) dt \quad (2)$$



شکل ۲. منحنی تاریخچه زمانی فشار موج انفجار [۲۹].

تمامی پارامترهای موج انفجار را می‌توان بر اساس نمودارهای موجود در آیین‌نامه UFC 3-340-2 [۳۰] با توجه به وزن، فاصله محل انفجار تا سازه، زاویه برخورد موج انفجار به سازه و همچنین نوع انفجار به دست آورد. نوع انفجار با توجه به فاصله موج انفجار از زمین به دو صورت کلی انفجار هوایی و سطحی تقسیم می‌شود. انفجار هوایی در بالای سازه اتفاق می‌افتد و میان منبع مواد منفجره و سازه هیچ گونه تقویت موج شوک اولیه وجود ندارد. امواج انفجار در این حالت به صورت کروی در هوا منتشر می‌شوند. انفجاری که روی سطح زمین یا بسیار نزدیک به سطح زمین رخ می‌دهد، انفجار سطحی نامیده می‌شود. در انفجار سطحی موج اولیه انفجار به نقطه انفجار منعکس شده و با امواج دیگر ناشی از انفجار ادغام شده و یک موج نیمکره‌ای مجزای تقویت‌شده را به وجود می‌آورد. انفجار سطحی در بین انواع انفجارها بیشترین احتمال وقوع را دارد و نیروی فشاری ناشی از آن نیز بیشتر از انواع دیگر است.

در آیین‌نامه UFC 3-340-2، وزن شارژ به صورت معادل وزنی انرژی TNT مشخص می‌شود تا یک روش مقایسه پیوسته برای تمامی انفجارها ارائه دهد. در صورتی که ماده منفجره TNT نباشد، با استفاده از رابطه زیر می‌توان وزن معادل TNT آن را به دست آورد [۳۰]:

$$W_E = \frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \times W_{exp} \quad (3)$$

در این رابطه، W_E وزن معادل TNT، W_{exp} وزن ماده منفجره مورد نظر، H_{exp}^d گرمای انفجار مربوط به ماده منفجره و H_{TNT}^d گرمای انفجار مربوط به TNT می‌باشد. به عنوان نمونه گرمای

^۱ Far field

^۲ Near field

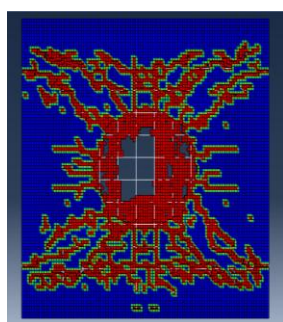
^۳ Close-in

جدول ۲. مقایسه نتایج جابه‌جایی مرکز دال در کار وانگ و شبیه‌سازی با آباکوس.

شماره دال	بار انفجار (Kg)	جابه‌جایی آزمایشگاهی (mm)	شبیه‌سازی جابه‌جایی در آتودین (mm)	شبیه‌سازی جابه‌جایی در آباکوس (mm)	درصد خطا با نتایج آزمایشگاهی	درصد خطا با نتایج شبیه‌سازی
۱	۰/۲	۱۰	۸	۱۱/۲	۱۲	۵۰
۲	۰/۳۱	۱۵	۱۳	۱۷	۱۳/۳	۳۱
۳	۰/۴۶	۳۵	۳۲	۳۷/۹	۸/۲	۱۸
۴	۰/۵۵	-	-	-	-	-

جدول ۳. مقایسه نتایج قطر حفره ایجادشده در دال در کار وانگ و شبیه‌سازی با آباکوس.

شماره دال	بار انفجار (Kg)	قطر ایجادشده در آزمایش (mm)	قطر حفره ایجادشده در شبیه‌سازی وانگ (mm)	قطر حفره مدل‌سازی شده (mm)	درصد خطا با نتایج آزمایشگاهی	درصد خطا با نتایج شبیه‌سازی
۱	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۳۱	۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۱/۱	۰
۳	۰/۴۶	۱۲۰	۱۴۰	۱۲۰	۱۴/۳	۰
۴	۰/۵۵	۱۵۰	۱۶۰	۱۵۰	۶/۷	۰



(الف)



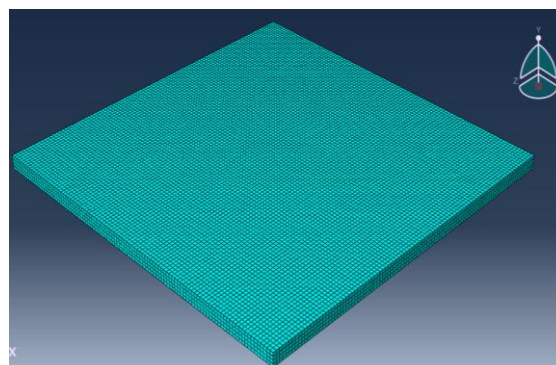
(ب)

شکل ۴. تصاویر دال شماره ۴، (الف) المان‌های تخریب‌شده در آباکوس، (ب) خرابی‌های به‌وجودآمده در دال در آزمایش وانگ [۱۵].

طیف گسترده از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل‌های غیرخطی بسیار پیچیده است. آباکوس شامل کتابخانه‌ای گسترده از اجزاء مختلف می‌باشد که بر اساس آن می‌توان هر نوع هندسه‌ای را مدل‌سازی کرد. این نرم‌افزار شامل فهرستی از انواع مدل‌های رفتاری مواد مختلف است که در نتیجه آن می‌توان رفتار اغلب مصالح مانند فلزها، لاستیک، پلیمر، کامپوزیت، بتن، خاک، سنگ و غیره را شبیه‌سازی کرد.

۳. صحت‌سنجی

جهت اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی انفجار در آباکوس، کار وانگ و همکاران [۱۵] را که شامل مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آتودین است در آباکوس مدل‌سازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. وانگ و همکاران به‌منظور انجام آزمایش، چهار دال یکسان با ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ در ۴۰ میلی‌متر را تحت بارگذاری انفجار قرار دادند. بارگذاری انفجار نیز با مواد منفجره ۰/۲ تا ۰/۵۵ کیلوگرم TNT واقع در ۰/۴ متری بالای دال‌ها رخ داده است. مش‌بندی دال مدل شده در آباکوس در شکل (۳) قرار داده شده است. دال موردنظر بتن آرمه با مصالح بتن با مقاومت فشاری ۳۹/۵ مگاپاسکال و فولاد با تنش تسلیم ۶۰۰ مگاپاسکال است. در جدول‌های (۲) و (۳) مقایسه جابه‌جایی حداکثر در مرکز دال و نیز قطر حفره ایجادشده در هریک از نمونه‌ها آورده شده است. همچنین این نتایج شامل مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار آتودین توسط وانگ و همکاران می‌باشد و نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس نیز قرار داده شده است. در شکل (۴) نیز کانتور وضعیت خرابی المان‌ها در دال شماره ۴ به همراه عکس دال مورد آزمایش قرار داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و اینکه هدف مشاهده خرابی است، خروجی‌های آباکوس همپوشانی خوبی با نتایج آزمایش دارند. از این‌رو با نحوه مدل‌سازی که در بخش ۴ ارائه می‌شود، می‌توان دیوار پیش‌ساخته تحت بار انفجار را مدل‌سازی کرد.

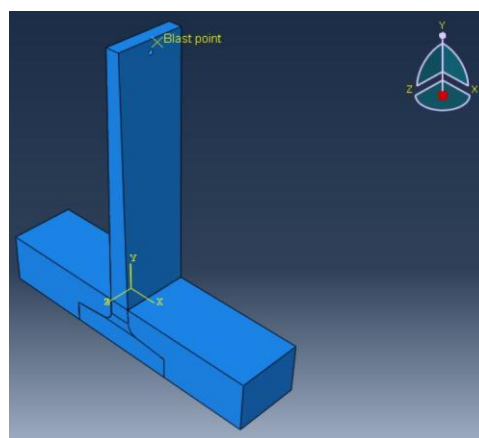


شکل ۳. مش‌بندی صورت گرفته برای دال در آباکوس با ابعاد مش برابر با ۱۰ سانتی‌متر.

۴. شبیه‌سازی انفجار دیوار حائل بتنی

۴-۱. مدل‌سازی هندسی

دیوار مدل شده در آباکوس دارای ارتفاع کلی ۷ متر، پاشنه ۱/۵ متر در ۲/۵ متر با ضخامت متغیر ۰/۵ متر از لبه تا ۰/۶ متر در محل اتصال با قسمت عمودی دیوار است. ضخامت دیوار نیز به‌صورت متغیر از ۰/۳ متر در انتهای آن تا ۰/۵ می‌باشد. همچنین ۱/۲ متر دیوار را فرض شده که پوشیده از خاک است و طول ۳ متر از خاک در هر طرف دیوار مدل شده است. هندسه کلی دیوار و خاک مدل شده در آباکوس در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۵. هندسه مدل در آباکوس.

در قسمت شرایط تکیه‌گاهی، کف دیوار و خاک به‌صورت گیردار تعریف شده و سطوح کناری خاک متقارن نسبت به محور Z و سطوح پشتی خاک متقارن نسبت به محور X مدل شده است. منظور از متقارن نسبت به محور Z، مقید کردن جابه‌جایی در راستای محور Z و چرخش در راستای محور X و Y می‌باشد. منظور از متقارن نسبت به محور X نیز مقید کردن جابه‌جایی در راستای محور X و چرخش در راستای محور Z و Y می‌باشد.

۴-۲. مشخصات بتن

در آباکوس می‌توان به سه روش مدل بتن ترک‌اندود^۱، مدل آسیب پلاستیسیته بتن^۲ و مدل ترک ترد^۳ رفتار بتن را وارد کرد. تمامی این مدل‌ها قابلیت مدل‌سازی بتن در انواع سازه شامل تیرها، خرپاها، پوسته‌ها و اعضای توپر را دارند و می‌توانند برای مدل‌سازی بتن مسلح و بتن غیرمسلح استفاده شوند. مدل بتن ترک‌اندود برای کاربردهایی که در آنها بتن در معرض کرنش یکنواخت در فشارهای محدودکننده پائین قرار می‌گیرد طراحی شده است. بنابراین، با توجه به ماهیت غیریکنواخت تنش‌ها و کرنش‌ها در پدیده انفجار، از این مدل نمی‌توان استفاده کرد.

مدل آسیب پلاستیسیته برای کاربردهایی که بتن در معرض بارگذاری‌های یکنواخت، چرخه‌ای و یا دینامیکی قرار می‌گیرد طراحی شده است و در آن می‌توان اثرات سختی حین بارگذاری چرخه‌ای بازایی کرد. در مدل ترک ترد فرض می‌شود که بتن در ناحیه فشاری در حالت الاستیک قرار دارد و خرابی بتن ناشی از ترک‌خوردگی کششی است. استفاده از این روش در بارگذاری‌های چرخه‌ای مانند زلزله نتایج درستی را نمی‌دهد زیرا در این نوع بارگذاری‌ها سازه متناوباً تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد و حتی اگر سازه تحت کشش دچار خرابی هم شده باشد اما باز هم می‌تواند فشار را تحمل کند. بنابراین، در بار انفجار که چرخه‌ای نیست و در مدت‌زمان بسیار کوتاهی نسبت به نوسان طبیعی سازه رخ می‌دهد می‌توان از این روش استفاده کرد. از مزیت‌های این نوع مدل‌سازی، توانایی حذف المان بر اساس معیار گسیختگی ترد می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان از هر دو مدل آسیب پلاستیسیته بتن و ترک ترد استفاده کرد. با توجه به اینکه هدف اینکار مشاهده خرابی دیوار تحت بارهای انفجار می‌باشد، برای مدل‌سازی بتن از مدل ترک ترد استفاده شده است. در مدل ترک ترد باید محدوده غیرالاستیک بتن، ضریب بقای برش^۴ و کرنش شکست ترد^۵ بتن در کشش وارد گردد. منظور از ضریب بقای برش، کاهش مقاومت برشی بتن در کشش پس از ترک‌خوردگی است. یکی از راهکارهایی که آباکوس برای وارد کردن این ضریب پیشنهاد می‌دهد در نظر گرفتن رابطه خطی است. به این‌صورت که ضریب بقای برش برابر با یک برای بتن در شروع لحظه ترک‌خوردگی و صفر در هنگام شکست، متناظر با کرنش‌های ترک‌خوردگی و شکست در نظر گرفته شود. همچنین در مستندات آباکوس آورده شده است که منظور از کرنش شکست ترد بتن، در واقع همان کرنش ترک‌خوردگی یا حداکثر کرنش الاستیک بتن در کشش است. در فشار نیز فرض می‌گردد بتن در حالت الاستیک است و وارد کردن مدول الاستیسیته و ضریب پواسون کفایت می‌کند.

بتن الیافی شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش، دارای الیاف فولادی با طول ۶۰ میلی‌متر، قطر ۰/۹۲ میلی‌متر، مقاومت کششی ۱۱۱۶ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال می‌باشد [۳۲]. همچنین در مدل‌سازی بتن الیافی، الیاف‌های فولادی مدل نشده‌اند ولی اثر آن‌ها در مدول الاستیسیته و نمودار تنش-کرنش بتن الیافی در کشش دیده شده است. مشخصات بتن مورد استفاده در دیوار بتن آرمه و بتن الیافی در دیوار بتنی بدون آرماتور در

^۴ Shear retention factor

^۵ Brittle failure strain

^۱ Smeared crack concrete model

^۲ Concrete damaged plasticity model

^۳ Brittle cracking

جدول ۵. مشخصات قسمت غیرخطی نمودار تنش-کرنش بتن عادی و الیافی موردنظر جهت مدل‌سازی رفتار آن‌ها در آباکوس.

بتن عادی		بتن الیافی	
تنش (MPa)	کرنش غیرالاستیک	تنش (MPa)	کرنش غیرالاستیک
۳/۴۵	۰	۴/۳۹	۰
۲/۳	۰/۰۰۰۲۹	۴/۸۶	۰/۰۰۲۷۴
۱/۸۸	۰/۰۰۰۵۵	۴/۳۶	۰/۰۰۵۱۶
۱/۶۵	۰/۰۰۰۸۰	۳/۶۸	۰/۰۰۹۶۳
۱/۵	۰/۰۰۱۱	۳/۰۳	۰/۰۱۳۱
۱/۳۸	۰/۰۰۱۳	۲	۰/۰۱۹۷۷

جدول ۶- ضریب بقای برش و کرنش شکست ترد بتن عادی و الیافی موردنظر جهت مدل‌سازی رفتار آن‌ها در آباکوس.

مصلح	کرنش غیرالاستیک	ضریب بقای برش	کرنش شکست ترد
بتن عادی	۰	۱	۰/۰۰۰۱۳۸
	۰/۰۰۱۳	۰	
بتن الیافی	۰	۱	۰/۰۰۲۹۷
	۰/۰۱۹۷۷	۰	

۳-۴. مشخصات فولاد

در مدل‌سازی فولاد، مدل رفتاری به‌صورت الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده است. در این مدل، رفتار فولاد قبل از رسیدن به تنش تسلیم به‌صورت کاملاً الاستیک و خطی بوده و پس از آن تا رسیدن به تنش حد گسیختگی به‌صورت پلاستیک و غیرخطی است. مشخصات فولاد مدل شده در آباکوس در جدول‌های (۷) و (۸) آورده شده است. برای تعیین اندرکنش بین میلگردها و بتن در سازه بتن آرمه، میلگردها به‌صورت مدفون^۱ در بتن در نظر گرفته شده‌اند. جهت مدل‌سازی آرماتورها از المان‌های دو گرهی میله‌ای B31 با درون‌یابی خطی، استفاده شده است. این المان از کتابخانه المان‌های با حل صریح است. طول مش‌ها نیز ۰/۲ متر می‌باشد.

جدول ۷. مشخصات الاستیک و چگالی فولاد A615 [۳۳].

مصلح	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)
فولاد A615	۲۰۰	۰/۳	۷۸۵۰

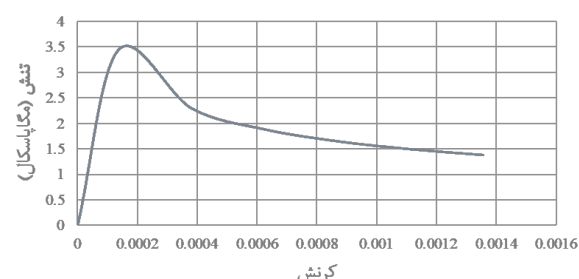
جدول ۸. مشخصات منحنی تنش-کرنش فولاد A615 در قسمت غیرالاستیک.

کرنش غیرالاستیک	تنش (MPa)
۰	۴۲۰
۰/۰۲۲۴۶	۵۴۶
۰/۰۶۴۳۷	۶۴۴
۰/۱۰۶۴۹	۶۹۸
۰/۱۴۸۶۹	۷۳۷
۰/۱۶۹۸۰	۷۵۴
۰/۲۱۲۰۶	۷۸۲

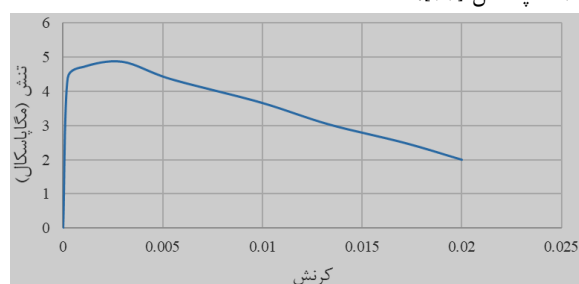
جدول (۴) آورده شده است. همچنین در مدل‌سازی بتن الیافی به‌منظور وارد کردن سایر پارامترهای لازم برای مدل‌سازی بتن، نمودار تنش-کرنش بتن عادی و بتن الیافی در کشش در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. بر اساس این شکل‌ها، در جدول (۵)، مشخصات قسمت غیرخطی نمودار تنش-کرنش در کشش و در جدول (۶) ضریب بقای برش و کرنش شکست ترد بتن عادی و الیافی که باید در آباکوس وارد شوند، ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات الاستیک و چگالی بتن عادی [۳۳] و الیافی موردنظر [۳۲].

مصلح	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)
بتن عادی	۳۰	۲۵۱۰۰	۰/۲	۲۴۰۰
بتن الیافی	۶۰	۳۲۷۰۰	۰/۲	۲۴۰۰



شکل ۶. منحنی تنش-کرنش بتن عادی در کشش با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال [۳۴].



شکل ۷. منحنی تنش-کرنش بتن الیافی در کشش با مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال [۳۲].

همچنین جهت مدل‌سازی بتن از المان‌های هشت‌گرهی (C3D8R) توپر استفاده شده که جزء خانواده تنش سه‌بعدی و تابع شکل با درون‌یابی خطی می‌باشد و نوع انتگرال‌گیری از آن کاهش یافته است. این المان از کتابخانه المان‌های با حل صریح است. این نوع المان قابلیت لحاظ کردن تغییرشکل‌های پلاستیک و ترک‌خوردگی در سه جهت متعامد در هر نقطه انتگرال‌گیری را دارا می‌باشد. ابعاد مش در نظر گرفته‌شده برای دیوار نیز ۰/۱ متر می‌باشد.

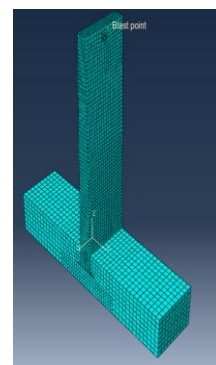
^۱ Embedded region

۴-۴. مشخصات خاک

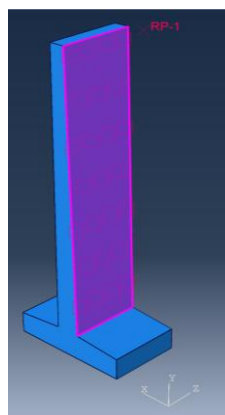
خاک مدل شده در آباکوس، به صورت خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک خاک نیز از معیار مور-کولمب استفاده شده است. در جدول (۹) پارامترهای لازم برای مدل‌سازی خاک در آباکوس آورده شده است. برای تعریف اندرکنش بین خاک و بتن، ضریب اصطکاکی مماسی برابر با $0/47$ و رفتار عمودی بتن و خاک در تماس با یکدیگر به صورت تماس جسم سخت تعریف شده است [۳۵]. جهت مدل‌سازی خاک از المان‌های هشت‌گره‌ای (C3D8R) توپر استفاده شده است. مش‌بندی مدل در شکل (۸) نشان داده شده است. ابعاد مش مورد استفاده برای مدل‌سازی خاک نیز $0/15$ متر می‌باشد.

جدول ۹. مشخصات الاستیک و پلاستیک خاک موردنظر [۳۵].

مصلح	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	زاویه اصطکاک (درجه)	زاویه اتساع (درجه)
خاک	۸۰	$0/3$	۱۸۰۰	۳۵	۵



شکل ۸. مش‌بندی مدل کامل.



شکل ۹. تصویر نمونه از تعیین نقطه اثر انفجار و سطح رو به انفجار دیوار حائل در نرم‌افزار آباکوس.

۴-۶. تجزیه و تحلیل عددی

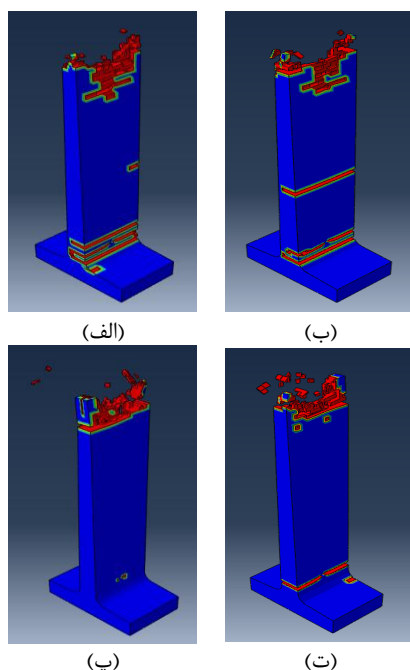
در این بخش تأثیر مواد منفجره TNT و C4 در فواصل مختلف و با خرج‌های متفاوت بر دیوار حائل بتن آرمه و بتن الیافی با مشخصات ذکرشده بررسی می‌گردد. با توجه به این که در آباکوس تنها مدل‌سازی انفجار TNT امکان‌پذیر است، به منظور مدل‌سازی ماده منفجره C4 از وزن معادل TNT آن استفاده شده است. برای بررسی تأثیر محل ماده منفجره علاوه بر تغییر فاصله افقی از دیوار، مواد منفجره یکبار در راستای بالاترین نقطه دیوار و بار دیگر در راستای محل اتصال دیوار و زمین در نظر گرفته شده‌اند. در مدل‌سازی آباکوس نیز از معادلات انفجار در هوا برای انفجار در بالاترین نقطه دیوار و معادلات انفجار سطحی برای انفجار در محل اتصال دیوار و زمین استفاده شده است.

تصاویر مربوط به انفجار در فواصل چسبیده به دیوار و یک متری از دیوار در راستای بالاترین نقطه دیوار و محل اتصال دیوار

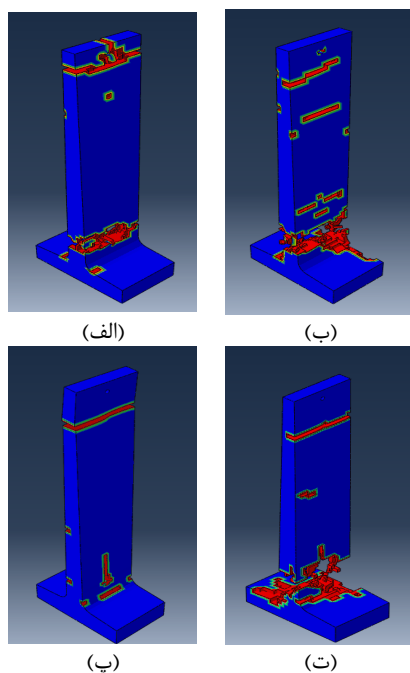
۴-۵. مدل‌سازی انفجار

وارد کردن بار انفجار در آباکوس به دو صورت امکان‌پذیر است. در روش اول، بایستی بار انفجار را معادل‌سازی و به صورت بار فشاری تبدیل نموده و سپس بر وجه رو به انفجار مدل اعمال کرد. در روش دوم، مقدار TNT به صورت مستقیم در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود. در صورتی که ماده منفجره TNT نباشد، بایستی با توجه به جدول (۱) و رابطه (۳) وزن معادل آن را در آباکوس وارد کرد. سپس محل انفجار و وجه رو به انفجار مدل مشخص می‌شود. مزیت این روش، محاسبه فشار انفجار وارد بر سازه توسط نرم‌افزار و امکان تغییر فواصل انفجار از سازه با تغییر مختصات نقطه مرجع^۱ (نشان‌دهنده محل اثر بار انفجار) است. در این روش فقط فاز مثبت انفجار در نظر گرفته می‌شود که با توجه به شکل (۲) که بیشتر ضربه وارد بر سازه، مساحت زیر نمودار فشار-زمان، در فاز مثبت رخ می‌دهد، نتایج حاصل از استفاده از این روش

^۲ Air blast^۳ Surface blast^۱ Reference point



شکل ۱۰. تصاویر تخریب دیوار حائل در انفجار در بالاترین نقطه دیوار و فاصله چسبیده آن: (الف) دیوار بتن آرمه تحت بار ۱۵ کیلوگرم C4، (ب) تخریب دیوار بتن آرمه تحت بار ۱۵ کیلوگرم TNT، (پ) دیوار بتن الیافی تحت بار ۱۵ کیلوگرم C4، (ت) دیوار بتن الیافی تحت بار ۲۰ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۱. تصاویر تخریب دیوار حائل در انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و فاصله چسبیده آن: (الف) دیوار بتن آرمه تحت بار ۵ کیلوگرم C4، (ب) دیوار بتن آرمه تحت بار ۱۰ کیلوگرم TNT، (پ) دیوار بتن الیافی تحت بار ۵ کیلوگرم C4، (ت) دیوار بتن الیافی تحت بار ۱۰ کیلوگرم TNT.

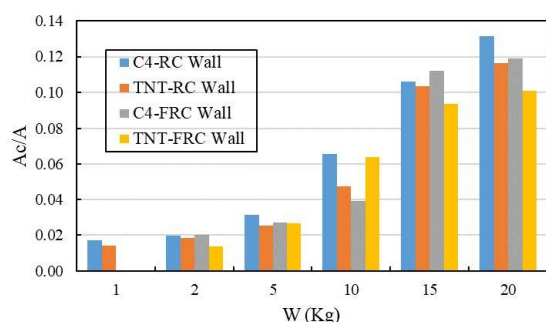
و زمین در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) آورده شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق تخریب دیوار حائل اهمیت است، در این شکل‌ها فقط تصاویر دیوار تخریب‌شده نشان داده شده است، رنگ آبی نشان‌دهنده المان‌های سالم، رنگ قرمز المان‌های در حال تخریب است و المان‌های تخریب‌شده نیز با توجه به مدل‌سازی خرابی بتن از روش ترک ترد، توسط نرم‌افزار حذف شده‌اند. در انفجار در فاصله ده متری از دیوار برخلاف انفجار چسبیده و در فاصله یک متری دیوار، خرابی‌های جزئی رخ نمی‌دهد. برش پایه زیادی در محل اتصال دیوار به پاشنه وارد می‌شود و سازه دیوار دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌گردد. به همین دلیل در این بخش تصاویر مربوط به انفجار در فاصله ده متری آورده نشده است و در بخش ۵ با توجه به سطح عملکردی دیوار، خرابی آن بررسی می‌شود.

در شکل (۱۰) تصاویر خرابی‌های دیوار بتن آرمه و بتن الیافی تحت بارهای انفجاری C4 و TNT تخریب‌کننده دیوار در انفجار در بالاترین نقطه دیوار و چسبیده به آن آورده شده است. با توجه به اینکه در این حالت ماده منفجره به دیوار چسبیده است، همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، تخریب به‌صورت موضعی و در محل انفجار رخ می‌دهد و همچنین به‌علت برش پایه وارد بر دیوار در اثر انفجار، در محل اتصال دیوار به پاشنه نیز خرابی جزئی به‌صورت ترک‌خوردگی و از بین رفتن المان‌ها رخ می‌دهد. در شکل (۱۱) نیز تصاویر خرابی‌های دو دیوار موردنظر تحت بارهای انفجاری C4 و TNT منجر به تخریب آن‌ها در انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و چسبیده به آن آورده شده است. در این حالت خرابی در محل اتصال دیوار و پاشنه و انتهای دیوار رخ می‌دهد. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشابه با شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، تصاویر خرابی‌های دیوار تحت انفجار C4 و TNT به ترتیب در بالاترین نقطه دیوار و محل اتصال دیوار و زمین در فاصله یک متری از دیوارها آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که خرابی‌های دیوار بتن آرمه در فاصله یک متری، به‌دلیل وجود آرماتورها به‌صورت خرد شدن به قطعات کوچک در کل ارتفاع دیوار رخ می‌دهد. در دیوار بتن الیافی دیوار به‌صورت قطعات درشت تخریب می‌شود، چرا که هرچند الیاف فولادی مانع از تشکیل ترک‌های ریز در کل دیوار بتن الیافی می‌شود ولی به‌دلیل عدم وجود آرماتور در دیوار این نوع تخریب رخ می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) این نتیجه حاصل می‌شود که دیوار بتن آرمه هرچند مقاومت کمتری نسبت به دیوار بتن الیافی در انفجار دارد، اما به‌دلیل وجود آرماتور در آن شکل‌پذیری بیشتری داشته و در انفجار به قطعات ریزتری تقسیم می‌شود.

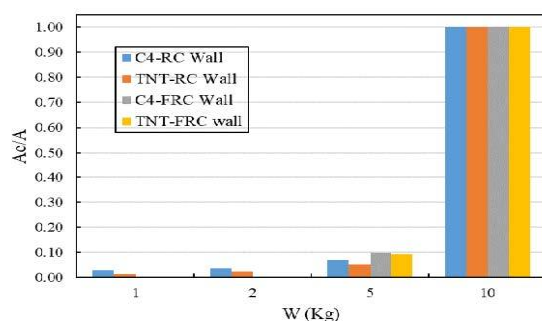
۵. نتایج و بحث

پس از مدل‌سازی و گرفتن خروجی‌های آباکوس، نتایج به دو بخش تقسیم می‌گردند. در بخش اول برای انفجارهای مختلف در فواصل چسبیده به دیوار و یک متری از دیوار، نتایج بر اساس نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل ارائه شده است. این نتایج برای ماده منفجره چسبیده به دیوار در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، به ترتیب برای انفجار واقع در بالاترین نقطه دیوار و انفجار واقع در محل اتصال دیوار و زمین ارائه شده است. در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نیز برای ماده منفجره در فاصله یک متری از دیوار، نتایج به ترتیب برای انفجار واقع در بالاترین نقطه دیوار و انفجار واقع در محل اتصال دیوار و زمین آورده شده است. در این شکل‌ها محور قائم بیانگر نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت سطح رو به انفجار دیوار (A_c/A) است. محور افقی نیز بیانگر وزن ماده منفجره برحسب کیلوگرم است.

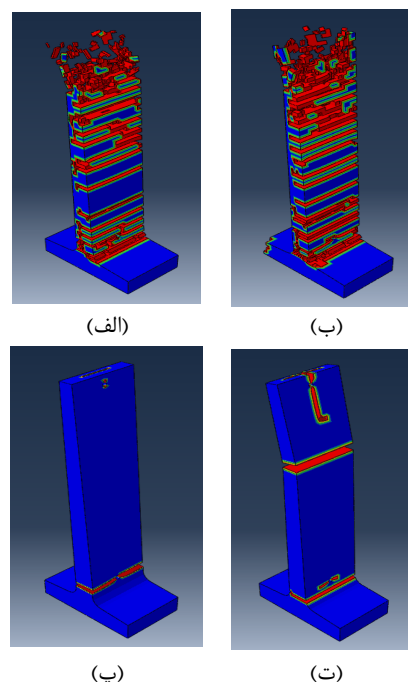
در این قسمت بار انفجاری که منجر به خرابی (نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل) بیش از ده درصد شود، به‌عنوان عامل تخریب دیوار در نظر گرفته شده است.



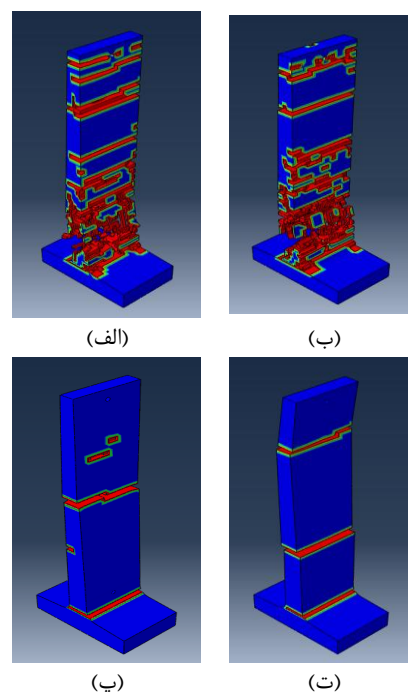
شکل ۱۴. نتایج انفجار در بالاترین نقطه دیوار و در فاصله چسبیده به آن بر اساس، نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل (A_c/A) و تغییر خرج انفجار (W).



شکل ۱۵. نتایج انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و در فاصله چسبیده به آن، بر اساس نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل (A_c/A) و تغییر خرج انفجار (W).



شکل ۱۲. تصاویر تخریب دیوار حائل در انفجار در بالاترین نقطه دیوار و فاصله یک متری: (الف) دیوار بتن آرمه تحت بار ۲۰ کیلوگرم C4، (ب) دیوار بتن آرمه تحت بار ۲۰ کیلوگرم TNT، (پ) دیوار بتن الیافی تحت بار ۲۰ کیلوگرم C4، (ت) دیوار بتن الیافی تحت بار ۲۵ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۳. تصاویر تخریب دیوار حائل در انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و فاصله یک متری: (الف) تخریب دیوار بتن آرمه تحت بار ۱۵ کیلوگرم C4، (ب) تخریب دیوار بتن آرمه تحت بار ۱۵ کیلوگرم TNT، (پ) تخریب دیوار بتن الیافی تحت بار ۱۵ کیلوگرم C4، (ت) تخریب دیوار بتن الیافی تحت بار ۱۵ کیلوگرم TNT.

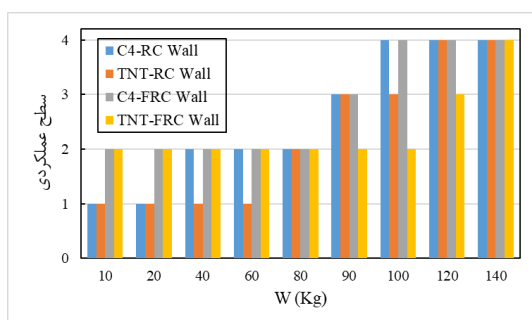
بالاترین نقطه دیوار و انفجار در محل اتصال دیوار و زمین آورده شده است. در این شکل‌ها با توجه به جدول (۱۱)، عدد ۱ بیانگر سطح عملکردی استفاده بی‌وقفه، عدد ۲ بیانگر ایمنی جانی، عدد ۳ بیانگر آستانه فروریزش و عدد ۴ بیانگر سطح عملکردی لحاظ نشده است. در این تحقیق مقدار ماده منفجره به‌وجود آورنده سطح عملکردی لحاظ نشده به‌عنوان عامل تخریب دیوار در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰. دسته‌بندی انواع خرابی در تیر بتنی تحت خمش بر اساس کتاب اسمیت [۱].

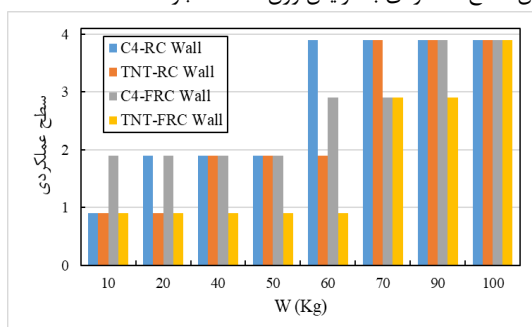
نوع خرابی	چرخش حداکثر (درجه)	شکل‌پذیری حداکثر
سطحی	-	۱
میانه	۲	-
سنگین	۵	-
لحاظ نشده	۱۰	-

جدول ۱۱. دسته‌بندی سطوح عملکردی بر اساس کتاب اسمیت [۱].

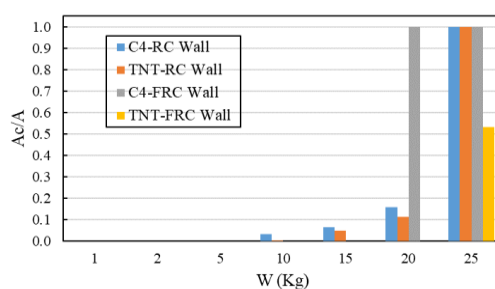
خرابی	سطح عملکردی	عدد متناظر با سطح عملکردی
سطحی	استفاده بی‌وقفه	۱
میانه	ایمنی جانی	۲
سنگین	آستانه فروریزش	۳
خطرناک	لحاظ نشده	۴



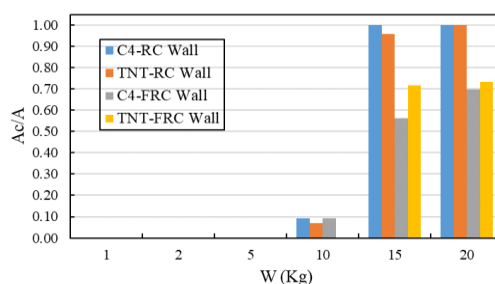
شکل ۱۸. نتایج انفجار در بالاترین نقطه دیوار و در فاصله ده متری بر اساس سطح عملکردی با افزایش وزن ماده منفجره.



شکل ۱۹. نتایج انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و در فاصله ده متری بر اساس سطح عملکردی با افزایش وزن ماده منفجره.



شکل ۱۶. نتایج انفجار در بالاترین نقطه دیوار و در فاصله یک متری، بر اساس نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل (A_c/A) و تغییر خرج انفجار (W).



شکل ۱۷. نتایج انفجار در محل اتصال دیوار و زمین و در فاصله یک متری، بر اساس نسبت مساحت تخریب‌شده به مساحت کل (A_c/A) و تغییر خرج انفجار (W).

با توجه به نمودارهای شکل‌های (۱۴) تا (۱۷)، این نتیجه حاصل می‌شود که انفجار در محل اتصال دیوار و زمین اثر تخریبی بیشتری نسبت به انفجار در بالاترین نقطه سازه دارد و همچنین دیوار بتن الیافی مقاومت بیشتری نسبت به دیوار بتن آرمه در برابر انفجار دارد.

در بخش دیگر، نتایج خرابی و سطح عملکردی دیوار حائل تحت بارهای انفجار مختلف در فاصله ۱۰ متری از دیوار بر اساس کتاب اسمیت [۱] ارائه شده است. این کار به این دلیل انجام شده که انفجار در فاصله ۱۰ متری از دیوار برخلاف انفجار چسبیده به دیوار و در فاصله یک متری به‌صورت موضعی عمل نمی‌کند و تخریب جزئی در بر ندارد. در این انفجار، برش پایه زیادی به دیوار وارد شده و تغییر شکل‌های بسیار بزرگی در دیوار اتفاق می‌افتد. به همین دلیل سطح عملکردی دیوار به‌منظور تعیین خرابی در نظر گرفته شده است.

بر این اساس با توجه به آنکه دیوار حائل به‌صورت طره‌ای است، عملکرد دیوار حائل تحت انفجار به‌صورت تیر بتنی در معرض خمش فرض شده است و جدول (۱۰) به‌عنوان معیار بررسی خرابی بر اساس کتاب اسمیت [۱] در نتایج این بخش استفاده شده است. همچنین در جدول (۱۱) سطوح عملکردی متناظر با نوع خرابی سازه آورده شده است. نتایج مربوط به سطح عملکردی دیوار در اثر قرارگیری ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری از دیوار در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب برای انفجار در

۷۰ کیلوگرم برای ماده منفجره TNT و به ترتیب برابر ۵، ۱۵ و ۶۰ کیلوگرم برای ماده منفجره C4 می‌باشد.

(۳) بارهای منجر به تخریب دیوار بتن الیافی بدون آرماتور در بالاترین نقطه سازه در فواصل چسبیده به دیوار، ۱ متری و ۱۰ متری به ترتیب برابر ۲۰، ۲۵ و ۱۴۰ کیلوگرم برای ماده منفجره TNT و به ترتیب برابر با ۱۵، ۲۰ و ۱۰۰ کیلوگرم برای ماده منفجره C4 می‌باشد.

(۴) بارهای منجر به تخریب دیوار بتن الیافی بدون آرماتور در انفجار در محل اتصال دیوار و زمین در فواصل چسبیده به دیوار، ۱ متری و ۱۰ متری به ترتیب برابر ۱۰، ۱۵ و ۱۰۰ کیلوگرم برای ماده منفجره TNT و ۱۵ و ۹۰ کیلوگرم ماده منفجره C4 می‌باشد.

(۵) بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، انفجار در فواصل چسبیده به دیوار و یک متری به‌صورت موضعی عمل کرده و تخریب موضعی در پی دارد. انفجار در فاصله ده متری از دیوار، برخلاف انفجار در فواصل چسبیده به دیوار و یک متری، در دیوار خرابی موضعی ایجاد نمی‌کند و باعث تخریب دیوار در محل اتصال به پاشنه می‌شود.

(۶) انفجار در راستای محل اتصال دیوار و زمین به‌علت انتشار نیم‌کره‌ای امواج انفجار نسبت به انفجار در بالاترین نقطه سازه به‌دلیل انتشار کروی امواج انتشار اثر تخریبی بیش‌تری دارد.

(۷) در فاصله چسبیده به دیوار، خرج لازم برای تخریب دیوار بتن الیافی بین ۱ تا ۱/۳ برابر دیوار بتن آرمه است. در فاصله یک متری از دیوار، خرج لازم برای تخریب دیوار بتن الیافی بین ۱ تا ۱/۲۵ برابر دیوار بتن آرمه است. در فاصله ده متری از دیوار، خرج لازم برای تخریب دیوار بتن الیافی بین ۱ تا ۱/۵ برابر دیوار بتن آرمه است. در نتیجه دیوار بتن الیافی در پدیده انفجار، عملکرد بهتری نسبت به دیوار بتن آرمه از خود نشان می‌دهد. علت عملکرد بهتر دیوار بتن الیافی نسبت به بتن آرمه نیز، بهبود عملکرد بتن در کشش با اضافه کردن الیاف به آن و در نتیجه اضافه شدن مقاومت کششی بتن در تمامی قسمت‌های دیوار بتن الیافی و جلوگیری نسبی از رشد ترک‌ها و کنترل خرابی به‌وسیله الیاف‌های به‌کاررفته در بتن است.

(۸) در دیوار بتن آرمه با تغییر فاصله محل انفجار از چسبیده به دیوار به فاصله یک متری، خرج لازم برای

با توجه به شکل (۱۸)، بار انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT و ۱۰۰ کیلوگرم C4 منجر به تخریب دیوار بتن آرمه در فاصله ده متری و در بالاترین نقطه دیوار شده است. بار انفجار ۱۴۰ کیلوگرم TNT و ۱۰۰ کیلوگرم C4 نیز منجر به تخریب دیوار بتن الیافی شده است. با توجه به شکل (۱۹) نیز بار انفجار ۷۰ کیلوگرم TNT و ۶۰ کیلوگرم C4 در دیوار بتن آرمه و بار انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT و ۹۰ کیلوگرم C4 نیز منجر به تخریب دیوار بتن الیافی در انفجار در فاصله ده متری و در راستای محل اتصال دیوار و زمین شده است. در انفجار در فاصله ده متری نیز مشابه با انفجار در فاصله چسبیده به دیوار و یک متری، انفجار سطحی (در راستای محل اتصال دیوار و زمین) با ماده منفجره کمتری منجر به تخریب دیوار شده است. همچنین ماده منفجره C4 با توجه به گرمای آزاد شده انفجار بیشتر نسبت به TNT اثر تخریب بیشتری دارد و با وزن کمتری نسبت به TNT قابلیت تخریب دیوار را دارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از دیوار بتن الیافی با مسلح کردن آن به آرماتورهای فولادی، باعث افزایش مقاومت دیوار در برابر انفجار می‌شود. دلیل این امر نیز افزایش مقاومت بتن در کشش با استفاده از الیاف و جلوگیری از خرد شدن بتن به قطعات بزرگ به‌علت استفاده از آرماتورهای طولی و عرضی فولادی است. همچنین با توجه به تخریب دیوار در محل اتصال به پاشنه در انفجارهای مختلف در فاصله ده متری، می‌توان با استفاده از درصد آرماتورهای طولی و عرضی بیشتر در این ناحیه، دیوار حائل انسدادی را در برابر انفجار تقویت کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش دیوار حائل بتن آرمه و بتن الیافی تحت اثر بار انفجار در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور در سه فاصله چسبیده به دیوار، یک متری و ده متری از دیوار با تغییر راستا و خرج انفجار، اثر تخریبی مواد منفجره TNT و C4 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- (۱) بارهای منجر به تخریب دیوار بتن آرمه در بالاترین نقطه سازه و در فواصل چسبیده به دیوار، ۱ متری و ۱۰ متری برای ماده منفجره TNT به ترتیب برابر ۲۰، ۱۵ و ۱۲۰ کیلوگرم و برای ماده منفجره C4 به ترتیب برابر ۱۵، ۲۰ و ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد.
- (۲) بارهای منجر به تخریب دیوار بتن آرمه در راستای محل اتصال دیوار و زمین و در فواصل چسبیده به دیوار، ۱ متری و ۱۰ متری به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۵ و

- Criteria Subjected to Blast Loading.”; Civ. Eng. J. 2018, 4, 1338–1353.
- [14] Sadrnejad, S. A.; Ziaei, M. “Behavior of Beam-Column Bolted End-Plate Connections Under Blast.”; J. Adv. Def. Sci. Technol. 2013, 4, 93–101 (In Persian).
- [15] Wang, W.; Zhang, D.; Lu, F.; Wang, S.; Tang, F. “Experimental Study and Numerical Simulation of the Damage Mode of Square Reinforced Concrete Slab Under Close-in Explosion”; Eng. Fail. Anal. 2013, 27, 41–51.
- [16] Jain, S.; Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. “Dynamic Response of Reinforced Concrete Wall Under Blast Loading”; Indian Concr. J. 2015, 89, 27–41.
- [17] Tavakoli, R.; Kamgar, R.; Rahgozar, R.; “Seismic Performance of Outrigger-Belt Truss System Considering Soil-Structure Interaction.”; Int. J. Adv. Struct. Eng. 2019, 11, 45–54.
- [18] Kamgar, R.; Khatibinia, M.; “Optimization Criteria for Design of Tuned Mass Dampers Including Soil-structure Interaction Effect”; Int. J. Optim. Civil Eng. 2019, 9, 213–232.
- [19] Kamgar, R.; Gholami, F.; Sanayei, H. R. Z.; Heidarzadeh, H.; “Modified Tuned Liquid Dampers for Seismic Protection of Buildings Considering Soil-Structure Interaction Effects”; Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng. 2020, 44, 339–354.
- [20] Heidarzadeh, H.; Kamgar, R.; “Evaluation of the Importance of Gradually Releasing Stress Around Excavation Regions in Soil Media and the Effect of Liners Installation Time on Tunneling”; Geotech. Geol. Eng. 2020, 38, 2213–2225.
- [21] Tavakoli, R.; Kamgar, R.; Rahgozar, R.; “Optimal Location of Energy Dissipation Outrigger in High-Rise Building Considering Nonlinear Soil-Structure Interaction Effects”; Period. Polytech. Civ. Eng. 2020.
- [22] Baziari, M. H.; Rabeti Moghadam, M.; Gholipour, S.; “Numerical Investigation of Gravity and Reinforced Soil Wall Performance Under Blast Loading.”; J. Adv. Def. Sci. Technol. 2012, 3, 259–267 (In Persian).
- [23] Toy, A. T.; Sevim, B.; “Numerically and Empirically Determination of Blasting Response of a RC Retaining Wall Under TNT Explosive”; Adv. Concr. Constr. 2017, 5, 493–512.
- [24] GuhaRay, A.; Mondal, S.; Mohiuddin, H. H.; “Reliability Analysis of Retaining Walls Subjected to Blast Loading By Finite Element Approach”; J. Inst. Eng. Ser. A. 2018, 99, no. 95–102.
- [25] Foglar, M.; Hajek, R.; Fladr, J.; Pachman, J.; Stoller, J. “Full-Scale Experimental Testing of the Blast Resistance of HPRC and UHPFRC Bridge Decks”; Constr. Build. Mater. 2017, 145, 588–601.
- [26] Abeysinghe, T. M.; Tanapornraweekit, G.; Tangtermsirikul, S.; Pansuk, W.; Nuttayasakul, N. “Performance of Aramid Fiber Reinforced Concrete Panels Under Blast Loads”; Fourth Asian Conf. on Defence Technology-Japan 2017, 1–6.
- [27] Yoo, D. Y.; Banthia, N. “Mechanical and Structural Behaviors of Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact and Blast”; Constr. Build. Mater. 2017, 149, 416–431.
- [28] Dusenberry, D. O. “Handbook for Blast Resistant Design of Buildings”; John Wiley & Sons, 2010.
- [29] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. “Blast Loading and Blast Effects on Structures: An Overview”; Electron. J. Struct. Eng. 2007, 7, 76–91.
- تخریب دیوار بین $1/3$ تا 2 برابر با تغییر ماده منفجره و راستای انفجار افزایش می‌یابد. با تغییر فاصله محل انفجار از یک متری به ده متری دیوار، خرج لازم برای تخریب دیوار بین 3 تا 5 برابر افزایش می‌یابد.
- (۹) در دیوار بتن الیافی با جابجا کردن محل انفجار از فاصله چسبیده به دیوار به یک متری، خرج لازم برای تخریب دیوار بین $1/25$ تا 2 برابر افزایش می‌یابد. با تغییر محل انفجار از فاصله یک متری به ده متری، خرج لازم برای تخریب دیوار بین 4 تا 8 برابر افزایش می‌یابد.
۷. مراجع‌ها
- [1] Smith, S. J.; McCann, D. M.; Kamara, M. E. “Blast Resistant Design Guide for Reinforced Concrete Structures”; Portland Cement Association, 2009.
- [2] Mays, G. C.; Hetherington, J. G.; Rose, T. A. “Response to Blast Loading of Concrete Wall Panels With Openings”; J. Struct. Eng. 1999, 125, 1448–1450.
- [3] Lok, T. S.; Xiao, J. R. “Steel Fibre Reinforced Concrete Panels Exposed to Air Blast Loading”; Proc. Inst. Civ. Eng. Build. 1999, 134, 319–331.
- [4] Mosalam, K. M.; Mosallam, A. S. “Nonlinear Transient Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Loading and Retrofitted With CFRP Composites”; Compos. Part B Eng. 2001, 32, 623–636.
- [5] Li, J.; Wu, C.; Hao, H. “Investigation of Ultra-High Performance Concrete Slab and Normal Strength Concrete Slab Under Contact Explosion”; Eng. Struct. 2015, 102, 395–408.
- [6] Wang, W.; Zhang, D.; Lu, F.; Wang, S. C.; Tang, F. “Experimental Study on Scaling the Explosion Resistance of a One-Way Square Reinforced Concrete Slab Under Close-in Blast Loading”; Int. J. Impact Eng. 2012, 49, 158–164.
- [7] Wu, C.; Oehlers, D. J.; Rebentrost, M.; Leach, J.; Whittaker, A. S. “Blast Testing of Ultra-High Performance Fibre and FRP-Retrofitted Concrete Slabs”; Eng. Struct. 2009, 31, 2060–2069.
- [8] De Silva, R. V.; Pathegama Gamage, R.; Perera, A.; Samintha, M. “An Alternative to Conventional Rock Fragmentation Methods Using SCDA: A Review”; Energies. 2016, 9, 958–989.
- [9] Luccioni, B. M.; Luege, M. “Concrete Pavement Slab Under Blast Loads”; Int. J. Impact Eng. 2006, 32, 1248–1266.
- [10] Kamgar, R.; Shams, G. R. “Effect of Blast Load in Nonlinear Dynamic Response of the Buckling Restrained Braces Core”; J. Adv. Def. Sci. Technol. 2019, 9, 107–118 (In Persian).
- [11] Lezgi, L. M.; Izadifard R. “Evaluation of Nonlinear Response of Reinforced Concrete Frames Designed According to Earthquake Codes and Subjected to Blast Loading”; J. Adv. Def. Sci. Technol. 2017, 8, 201–212 (In Persian).
- [12] Kamgar, R.; Majidi, N.; Heidarzadeh, H. “Optimum Layout of Mega Buckling-Restrained Braces to Optimize the Behavior of Tall Buildings Subjected to Blast Load”; J. Adv. Def. Sci. Technol. 2020, 11, pp. 211–230 (In Persian).
- [13] Tavakoli, R.; Kamgar, R.; Rahgozar, R. “The Best Location of Belt Truss System in Tall Buildings Using Multiple

- [33] A. C. I. Committee and I. O. for Standardization; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary,"; 2008.
- [34] Belarbi, T. H. A.; "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete,"; Struct. J. 1994, 91.
- [35] Helwany, S. "Applied Soil Mechanics With Abaqus Applications"; John Wiley & Sons, 2007.
- [30] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defence, Washington DC. 2008.
- [31] Abaqus/Explicit V6.13. "User Manual"; Providence, RI, USA. Abaqus Inc. DS Simulia. 2013.
- [32] Kwan, A. K. H.; Chu, S. H.; "Direct Tension Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete Measured by a New Test Method"; Eng. Struct. 2018, 176, 324–336.