

# Numerical Investigation of the Perimeter Wall Behavior under blast Loading with the Approach of Protecting Structures and Facilities

Yaser Moeini

Ph.D student, Department of Civil Engineering, shahrud branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Ahmad Ganjali\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Mohammad Taji

Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Shahrood branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir

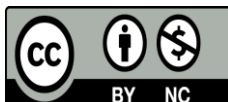
doi 10.30495/CIVIL.2023.702774

## Keywords:

Protective perimeter walls, canopied wall, explosive loading, reinforced concrete, numerical analysis, LS-DYNA

## Abstract

By increasing the risk of explosive terrorist attacks and threats to all types of structures and buildings, a careful study of the behavior of structures under explosive loading is considered as an important matter. A simple method to protect important structures against explosive loads is to improve the security of the environment by using protective perimeter walls against explosive loading. In this research, the effect of reinforced concrete perimeter walls with and without canopy has been investigated. Different parameters such as the geometrical shape of the perimeter wall, the element removal and degradation rate, wall displacement, the scaled distance change and the explosive mass have been investigated. Finite element software (LS-DYNA (R11.1.0)) has been used for modeling. For this purpose, the perimeter walls were designed in three different shapes and conditions. The results indicate that the existence of canopies for the perimeter walls under explosive loading has positive effects, so that the canopied perimeter walls with a canopy angle of 90 degrees compared to other types of wall, at different station distances and in the same conditions, reduce the displacement rate in the protected structure by about 11 percent. Furthermore, the location of perimeter walls and obtaining a safe distance in placing these walls is very effective in enhancing safety and reducing the vulnerability of the facilities and structures protected by these walls.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

## بررسی عددی رفتار دیوار محیطی در برابر بارگذاری انفجاری با

### رویکرد محافظت از سازه ها و تاسیسات

یاسر معینی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

احمد گنجعلی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

محمد تاجی

استادیار، گروه مهندسی معدن، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲۰ دی ۱۴۰۱

#### چکیده

با افزایش خطر احتمال حملات تروریستی از نوع انفجاری و تهدید انواع سازه و ساختمان‌ها، بررسی دقیق رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجاری یک امر مهم محسوب می‌شود. یک روش ساده برای محافظت از سازه‌های مهم در برابر بارهای انفجاری، بهبود امنیت محیط با استفاده از دیوارهای محیطی محافظ، در برابر بارگذاری انفجاری است. در این پژوهش، به بررسی اثر دیوار محیطی از نوع بتن مسلح دارای سایبان و بدون سایبان در پارامترهای متفاوتی از جمله شکل هندسی دیوار محیطی، حذف المان و میزان تخریب دیواره، جابجایی و خیز دیواره، تغییر فاصله مقیاسی و جرم ماده منفجره پرداخته شده است. همچنین، برای مدلسازی نرم‌افزار اجزای محدود (LS-DYNA(R11.1.0)، به کار گرفته شده است. بدین منظور، دیوارهای محیطی در ۳ شکل و شرایط متفاوت طراحی گردید و نتایج نشان می‌دهد؛ وجود سایبان برای دیوارهای محیطی تحت بارگذاری انفجاری، اثرات مثبتی را در برداشته، به گونه‌ای که دیواره‌های محیطی سایبان دار با زاویه سایبان ۹۰ درجه نسبت به دیگر اشکال دیواره، در فواصل ایستگاهی مختلف، حدوداً ۱۱ درصد میزان جابجایی و خیز را در سازه محافظت‌شونده کاهش می‌دهد. همچنین، محل قرارگیری دیواره‌های محیطی و بدست آوردن فاصله ایمن در جایگذاری این دیواره‌ها، در بالا بردن ایمنی و کاهش میزان آسیب پذیری تاسیسات و سازه‌های تحت حفاظت این دیواره‌ها، بسیار موثر است.

کلید واژگان: دیوار محیطی محافظ، دیوار سایبان دار، بارگذاری انفجاری، بتن مسلح، تحلیل عددی، LS-DYNA

## ۱- مقدمه

با افزایش تروریسم و سرعت بخشیدن به شهرنشینی در سراسر جهان، ساختارهای پیشرفته و رو به رشد، بیشتر در معرض خطر تهدید بارهای انفجاری به صورت سهوی یا عمدی قرار می‌گیرند. برای ارائه ساختار حفاظتی مناسب در برابر بار انفجار، مواد جدید و تکنیک‌های تقویت به سرعت در حال توسعه است [۱]. در سال‌های اخیر، حملات تروریستی و نظامی مکرر همراه با انفجار در سراسر جهان رخ داده است [۲]. یک روش ساده برای محافظت از سازه‌های مهم در برابر بارهای انفجاری، بهبود امنیت محیط با استفاده از دیوارهای محیطی در برابر انفجار به عنوان مانعی فیزیکی است. علی‌رغم حائز اهمیت بودن مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در خصوص دیوارهای محیطی، می‌توان با کمک گرفتن از یک روش شبیه‌سازی عددی قابل اعتماد و با دقت لازم تعداد آزمایشات میدانی و همچنین هزینه‌های مرتبط با آن را کاهش داد [۳]. ضمن اینکه آزمایشات میدانی نیاز به طرحی اولیه دارد که با انجام شبیه‌سازی عددی میسر می‌گردد. البته این امر از اهمیت و ارزش انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در این خصوص کم نمی‌کند. تحلیل دینامیکی دیوارهای بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری پیچیده بوده و مدلسازی عددی برای این چنین رفتاری، کاربرد دارد. اما دستیابی به نتایج قابل قبول نیازمند، دقت و صرف زمان قابل توجهی است. پاسخ سازه‌های بتنی به عواملی از قبیل بارگذاری انفجاری، ماهیت انفجار، مشخصات هندسی و دینامیکی سازه‌ها و ویژگی‌های پاسخ دینامیکی ماده بستگی دارد. در سال‌های اخیر از نمودار اثر پذیری برای نشان دادن فاصله (یا فاصله ایستگاهی) استفاده شده است که از یک ماده منفجره با اندازه مشخص، یک اثر مشخص نشان می‌دهد [۴]. ساختار بارگذاری با استفاده از (فاصله ایستگاهی هاپکینسون)،  $Z$ ، که به عنوان نسبت فاصله ایستگاهی به مکعب ریشه وزن بار تعریف می‌شود، مشخص شده و بسته به مقدار  $Z$ ، و مقدار فاصله میدان نزدیک، یا دور دسته بندی می‌شود. به دنبال انفجار ماده منفجره در فاصله‌ای کوتاه از یک دیوار بتنی، موج ضربه‌ای ایجاد می‌شود. بخشی از موج ضربه‌ای که به سطح دیواره برخورد می‌کند، به بتن منتقل می‌شود که منجر به موج فشاری می‌گردد. هنگامی که موج ضربه‌ای منتقل شده به سطح پشتی می‌رسد، بازتاب می‌یابد و منجر به موج کششی می‌شود. اگر تنش کششی در پشت دیوار بیشتر از

مقاومت کششی دینامیکی بتن باشد، بتن شکسته می‌شود [۵]. مکانیزم حفاظتی دیوارهای محافظ در برابر انفجار می‌توانند سطح ایمنی لازم را برای کاهش آسیب و تلفات در سناریوهای مختلف حمله فراهم کنند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در یک شرایط خاص، دیوار می‌تواند سطح حفاظتی لازم برای سناریوهای تهدید را فراهم کند [۶]. در پژوهشی، وزن چهار مقدار مختلف ماده منفجره (TNT) که بیانگر حداقل ظرفیت مقدار قابل حمل توسط یک وسیله نقلیه می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، نتایج نشان داد که دیواره محافظ هنگام انفجار ۵ کیلوگرم وزن بار TNT، نیروی وارده ناشی از انفجار را تحمل کرده و صدمه کمی به دیوار وارد شده است، اما دیواره محافظ هنگامی که در معرض وزن ۴۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT در فاصله ۲ متر قرار گرفت، با شکست مواجه شد [۷]. در سال ۲۰۱۲ بررسی‌ها نشان داد که پوشش پلی‌اوره می‌تواند در دمپ و میرایی موج انفجار در پانل‌های بتنی موثر واقع شود [۸]. نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۸، طی بررسی دوام یک پناهگاه بمب‌هسته‌ای نشان داد که می‌توان یک پناهگاه انفجار هسته‌ای را توسط بتن  $Anti-Sievert^{\circ}$  ساخت [۹]. در دیگر پژوهش در این زمینه، نتایج نشان داد که الیاف پلی‌اتیلن برای ساخت دیوار ضد انفجار سبک موثر واقع شده است [۱۰]. طی بررسی در سال ۲۰۱۴ دیواره‌ی انفجار با الگو هندسی بر اساس آیین‌نامه TM5-1300، نشان داد که مقدار معادل ۵۰ کیلوگرم بمب TNT و کمتر از آن نمی‌تواند دیواره را از بین ببرد، در نتیجه ساختمان حفاظت‌شده توسط دیوار انفجار از اثر انفجار در امان بوده است [۱۱].

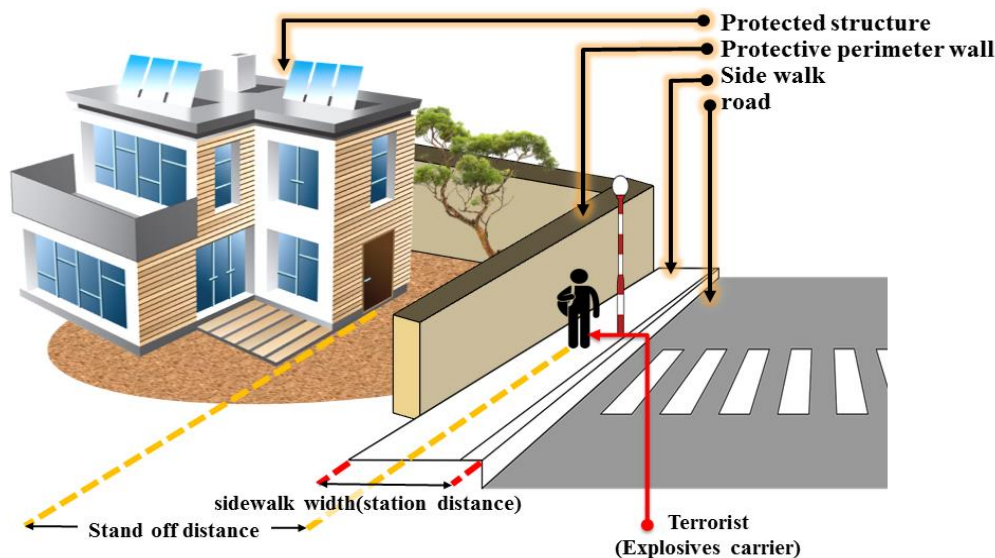
بررسی رفتار سازه‌های بتنی تحت بارگذاری انفجاری نشان می‌دهد که FRP در مقاوم سازی سازه نقش موثری دارد [۱۲]. دیوار محافظ ممکن است به طور کامل آسیب ببیند، اما ساختار کلی باید ایمن باشد، به گونه‌ای که پس از وقوع انفجار، سازه‌های تحت محافظت آسیب جدی نبینند [۱۳]. بنابراین، می‌توان با بررسی رفتار دیوارهای محیطی در شرایط و اشکال مختلف، به عنوان یک عامل محافظتی از تاسیسات، سازه‌ها و حتی افراد در برابر حملات انفجاری، میزان آسیب پذیری و خسارات ناشی از آن را کاهش داد.

## ۲- مبانی بارگذاری انفجار

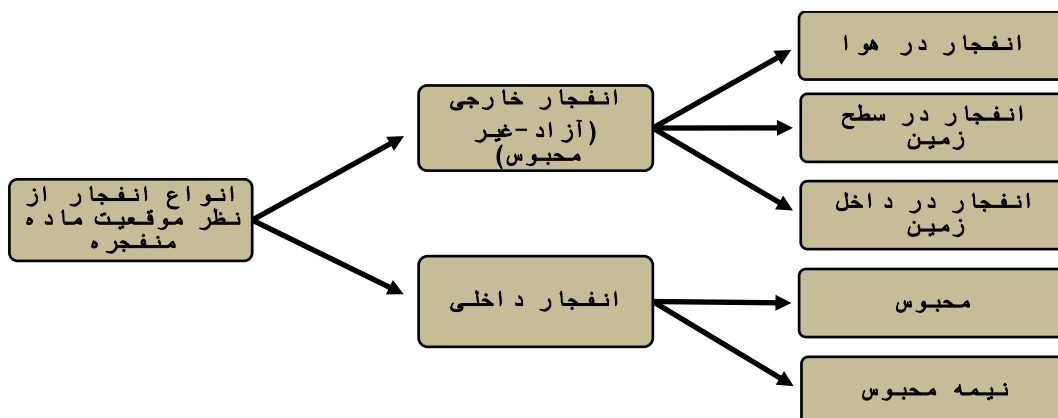
سایبان ۱ شکل، دارای سایبان T شکل و دارای سایبان Y شکل، تحت بارگذاری انفجار هوایی پرداخته است. پارامترهای متغیر شامل شکل هندسی دیواره، فاصله مقیاس شده و مقدار جرم ماده منفجره، میزان جابجایی و میزان حذف المان دیواره بوده است. بر این اساس، تحقیق حاضر، برای تعیین کارایی و شناسایی نقاط ضعف در دیوارهای امنیتی موجود، نیازمند تجزیه و تحلیل طبقه بندی شده، در مورد حفاظت سازه در برابر بارگذاری انفجار است [۱۴]. از شبیه‌سازی عددی به صورت صحت‌سنجی شده با آزمایشات، به طور وسیع برای توسعه و آزمایش مدل‌های تحلیلی، در موقعیت‌های طراحی متفاوت، استفاده می‌شود [۱۵]. مسلماً آزمایشات میدانی قابل اطمینان بوده اما از طرفی آزمایشات میدانی انفجار، پرهزینه هستند و محدودیت‌های مختلفی دارند. به منظور رفع این محدودیت‌ها و دستیابی به نتایج مختلف، محققان از نرم افزارهای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند [۱۶]. برای درک پاسخ دینامیکی ساختار طراحی شده و همچنین برای شبیه‌سازی و محاسبه میزان تنش و جابجایی برای یک قسمت از ساختار طراحی تحت بارگذاری انفجار و میزان اثر آن، از LS-DYNA استفاده می‌شود [۱۷].

در این پژوهش با فرض حمله‌ای تروریستی، وزن ۲ مقدار مختلف (۵ کیلوگرم و ۱۰ کیلوگرم) ماده منفجره (TNT) که بیانگر حداقل ظرفیت مقدار قابل حمل توسط یک فرد را بیان می‌نماید، برای اشکال مختلف دیوارهای محیطی بررسی گردیده است. مطابق شکل ۱ اگر یک فرد تروریست با حمل مواد منفجره به کمک یک کوله پشتی زمان حمله انتحاری و انفجار در حریم پیاده رو حضور داشته باشد، از طرفی بدون تماس با دیواره محیطی، این انفجار اتفاق بیافتد، نوع بارگذاری مطابق شکل ۲ از نوع هوایی با شکل موج کروی خواهد بود. به همین منظور فواصل ۰/۵ و ۲ متر (به عنوان نقاط منتخب در ابتدا و انتهای عرض پیاده‌رو) برای فاصله ایستگاهی (فاصله ماده منفجره تا دیوار محیطی) در نظر گرفته شد. همچنین پس از تحلیل نتایج، منطقه‌های امن (safe zone)، جهت استقرار دیواره محیطی در حالتی که سازه محافظت شونده دچار شکست نگردد، مشخص گردید.

دیوار محیطی می‌تواند بدون سایبان یا سایبان‌دار باشد. این پژوهش به بررسی و ارزیابی رفتار دیوار محیطی بتن مسلح در ۳ شکل ظاهری بدون



شکل ۱- شمایی از دیوار محیطی در برابر بارگذاری انفجار توسط تروریست حامل بمب انفجاری

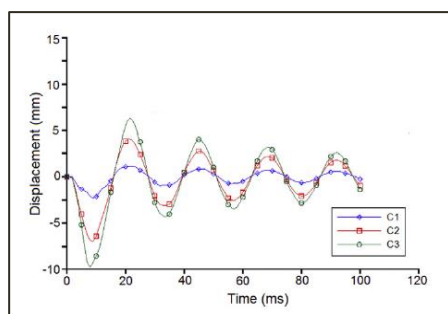


شکل ۲- انواع انفجار از لحاظ موقعیت ماده منفجره [۱۸]

اشتعال آن را در بر می‌گیرد. عیب اصلی این روش، اندازه بزرگ مدل انفجار هوا است که معمولاً برای کاهش اثرات مرزی، دامنه زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. در این پژوهش از روش عددی MM-ALE جهت مدلسازی انفجار و تاثیر آن بر سازه استفاده شده است.

### ۲-۳-۲ مدلسازی عددی

در این پژوهش، مدل‌های دیوار محیطی بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار، به کمک نرم افزار (LS-DYNA(R11.1.0) شبیه سازی شده است.



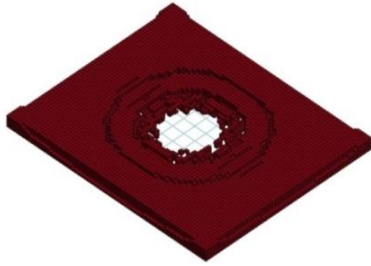
### ۳- روش‌ها و مصالح مصرفی

#### ۳-۱- روش المان محدود برای دیوار محیطی بتن مسلح

یکی از روش‌های عددی که برای مدل‌سازی انفجار و تاثیر آن بر یک سازه استفاده می‌شود، شامل مدل‌سازی هوا و مواد منفجره با استفاده از (فرمولاسیون لاگرانژی-یولرین چند ماده‌ای) (MM-ALE) است که در آن یک معادله حالت مناسب برای مواد و مدل رفتار ماده منفجره به هنگام وقوع انفجار را بیان می‌کند. در این روش سازه‌ها به صورت لاگرانژی و برهم‌کنش بین سیال و سازه با استفاده از روش هالکوئیسیت بیان می‌شوند. این روش در جایی که بار و سازه در فاصله نزدیک به هم هستند، مناسب است.

طبق گفته یی و همکاران<sup>۱</sup> [۲۰] این روش مزایای متعددی دارد: (۱) این واقعیت را نشان می‌دهد که بار موج انفجار پس از آنکه با المان‌های سطح سازه برخورد کرده، همچنان در سازه ادامه می‌یابد؛ (۲) پیش‌بینی بازتاب و پراش موج انفجار را تسهیل می‌کند و (۳) اثر شکل بار و نقطه

<sup>1</sup> Yi et al.



شکل ۴- نتایج بدست آمده خیز برای (۵ KG) ماده منفجره و میزان آسیب برای (۱۰ KG) ماده منفجره در این پژوهش

#### ۴- مشخصات دیوارهای محیطی مدلسازی شده

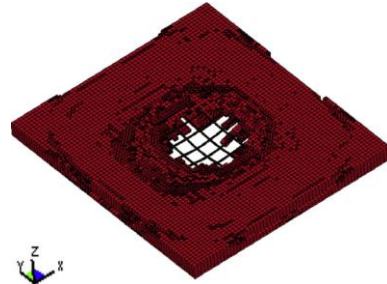
در این تحقیق، به علت سرعت بخشیدن در انجام محاسبات، تمامی مدل‌های دیوار محیطی و سازه محافظت شونده به ترتیب با ارتفاع ۱ متر و ۲ متر از سطح زمین و فاصله ایستگاهی ۲ متر و ۰/۵ متر مدلسازی شده است. همچنین فاصله ماده منفجره از سطح زمین ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. فاصله دیوار محیطی تا سازه محافظت شونده ۱ متر لحاظ گردیده است. اشکال دیوارها مطابق مشخصات در شکل ۵، و قرار گیری در موقعیت‌های متفاوت مطابق شکل ۶، مدلسازی و بررسی شده است. دیوار محیطی بدون سایبان و ساده (I) شکل و دیوار محیطی سایبان دار به دو صورت (Y) و (T) شکل انتخاب شده است. (فاصله ایستگاهی R، فاصله دیواره محافظ تا سازه‌های محافظت شونده H، ارتفاع دیواره محیطی H، ارتفاع سازه محافظت شونده h)

جدول ۱- مشخصات عمومی بتن

مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیته (GPa)
۲۵	۳	۰/۱۵	۲۴۰۰	۱۸/۹۷

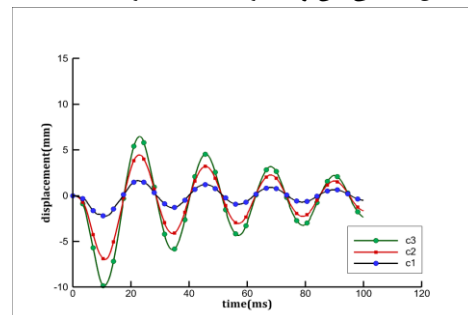
جدول ۲- مشخصات عمومی فولاد

تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیته (GPa)
۴۰۰	۰/۳	۷۸۰۰	۲۱۰



شکل ۳- نتایج خیز برای (۵ kg) ماده منفجره و میزان آسیب برای (۱۰ kg) ماده منفجره در آزمایشات تای و همکاران [۱۹]

همچنین جهت مدل سازی از المان Solid و مدل مصالح Johnson-Holmsquist Concrete استفاده شده است [۲۱-۲۲]. برای مدلسازی آرماتورها از المان Beam و مدل plastic-kinematic استفاده شده است. روش و الگوهای مختلفی برای بیان در تماس بودن میان بتن و میلگرد وجود دارد. ترکیب کردن المان‌های تیر با المان‌های بتن در گره‌های مشترک و متصل کردن المان‌های تیر به المان‌های بتن با استفاده از مدل 1-D contact که اتصال لغزشی میان بتن و فولاد را در نظر می‌گیرد، انجام شده است. با توجه به نرخ بالای بارگذاری حاصل از انفجار می‌توان از اتصال لغزشی میان بتن و میلگرد صرف نظر کرد [۲۳]. همچنین، مدل Lagrange in Solid برای تماس و اتصال بین بتن و میلگرد انتخاب شده است. در این پژوهش، صحت سنجی بتن و میلگرد به همراه شبیه سازی انفجار، امری مهم برای اطمینان از نتایج به دست آمده خواهد بود. به همین منظور در این راستا، جهت صحت مدل عددی بتن و میلگرد و همچنین شبیه سازی انفجار از نتایج مطالعات و آزمایشات تای و همکاران [۱۹] مطابق شکل ۳، استفاده شده است، که پس از رسیدن به نتایج تای و همکاران مطابق شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبیه سازی انفجار، بتن و میلگرد دارای صحت سنجی است و می‌توان از آن برای هر نوع شکل هندسی بتن و میلگردی استفاده کرد.

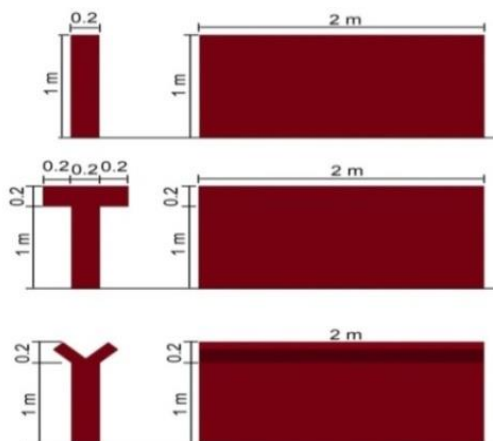


<sup>1</sup> Tai et al.

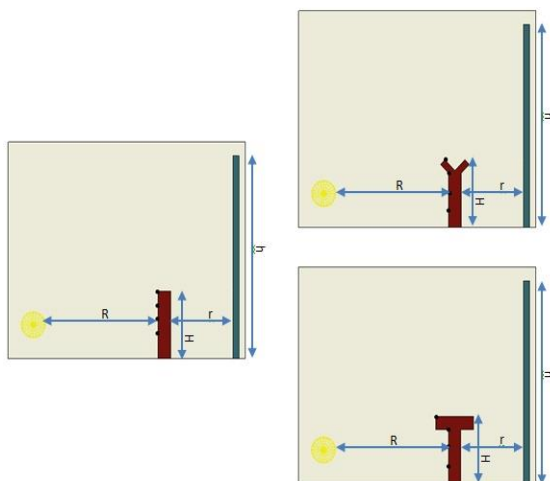
مشخصات عمومی بتن و فولاد استفاده شده در این شبیه سازی مطابق جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. کلیه مدل های مورد بررسی مطابق جدول شماره ۳ قابل مشاهده می باشند.

جدول ۳- مشخصات دیوارهای مدلسازی شده

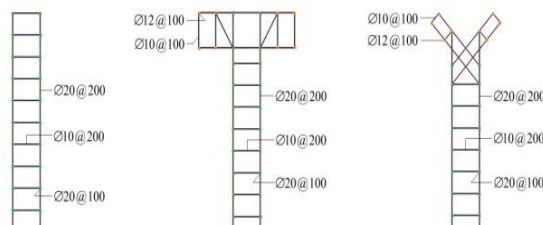
ردیف	نوع دیوار محیطی	فاصله ایستگاهی (m)	مقدار ماده منفجره (kg)	نام نهایی مدل
۱	بدون سایبان	۰/۵	۵	0.5m-5kg-I
		۰/۵	۱۰	0.5m-10kg-I
۲		۲	۵	2m-5kg-I
		۲	۱۰	2m-10kg-I
۳	سایبان دار با زاویه ۹۰ درجه	۰/۵	۵	0.5m-5kg-T
		۰/۵	۱۰	0.5m-10kg-T
۴		۲	۵	2m-5kg-T
		۲	۱۰	2m-10kg-T
۵	سایبان دار با زاویه ۴۵ درجه	۰/۵	۵	0.5m-5kg-Y
		۰/۵	۱۰	0.5m-10kg-Y
۶		۲	۵	2m-5kg-Y
		۲	۱۰	2m-10kg-Y



شکل ۵- مشخصات نمونه دیواره های مورد بررسی



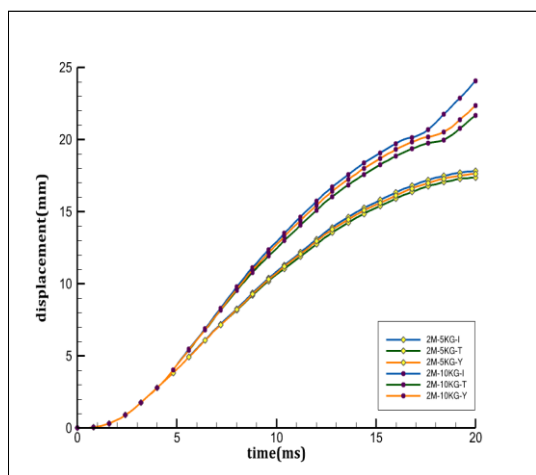
شکل ۶- فواصل ایستگاهی و محل های قرارگیری سازه های محافظت شونده و ماده منفجره



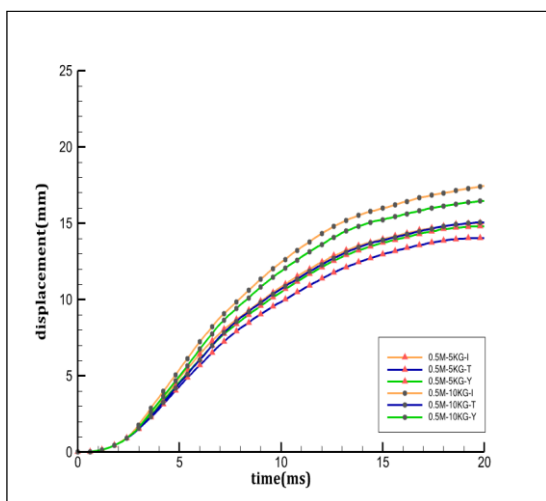
## ۵- بارگذاری انفجاری

به منظور درک پاسخ دینامیکی ساختار طراحی شده و همچنین برای شبیه سازی و محاسبه میزان تنش و جابجایی تحت بارگذاری انفجار و بررسی میزان اثر آن، از نرم افزار LS-DYNA استفاده می شود [۱۷]. یکی از مسائل مهم در طراحی، تجزیه و تحلیل سازه های مقاوم در برابر انفجار، مقایسه آثار انفجار مواد منفجره در فواصل مختلف از سازه هدف است. چنین مقایسه ای با به کارگیری مقیاس قابل قبول در مسئله، با

محافظةت برای فواصل ایستگاهی ۲متر و ۰/۵ متر را نشان می‌دهد. مطابق راهنما در شکل ۸، عنوان 0.5m-5kg-T، بیانگر جابجایی و خیز سازه تحت محافظت در حالی است که فاصله بین ماده منفجره تا دیوار محافظ (فاصله ایستگاهی) ۰/۵متر، میزان ماده منفجره ۵کیلوگرم و دیوار محافظ از نوع دیوار T شکل بوده است.



شکل ۷- جابجایی و خیز در سازه تحت محافظت برای فاصله ایستگاهی ۲متر



شکل ۸- جابجایی و خیز در سازه تحت محافظت برای فاصله ایستگاهی ۰/۵متر

سهولت انجام می‌شود. یک روش معمول، استفاده از ریشه سوم مقیاس است که در آن آثار انفجارهای مختلف را با سطوح انرژی متناظر آنها مرتبط می‌کنند. اگر R بیانگر فاصله از ماده منفجره با واحد طول و W وزن خرج انفجاری باشد، در این صورت فاصله مقیاس شده به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (1)$$

مبنای تعریف رابطه (۱) بر این است که سطوح انرژی آزاد شده از انفجار نقطه‌ای به صورت کروی انتشار می‌یابد. به عبارت دیگر، آثار مختلف انفجار با انرژی واحد حجم (یا همان انرژی مخصوص) متناسب خواهد بود. برای مواد منفجره با فاصله‌ای دور از هدف، می‌توان هر نوع انفجار را به صورت انفجار نقطه‌ای فرض کرد و از روابط مربوط به ریشه سوم مقیاس شده استفاده کرد [۲۴]. در این پژوهش، مدل‌ها با مقادیر ماده منفجره ۱۰کیلوگرم برای فاصله مقیاس شده  $(\text{Kg}/\text{m}^3)^{1/3}$  ۰/۹۳ و  $(\text{Kg}/\text{m}^3)^{1/3}$  ۰/۲۳ و مدل‌ها با مقادیر ماده منفجره ۵کیلوگرم برای فاصله مقیاس شده  $(\text{Kg}/\text{m}^3)^{1/3}$  ۱/۱۸ و  $(\text{Kg}/\text{m}^3)^{1/3}$  ۰/۲۹ بررسی گردیده است.

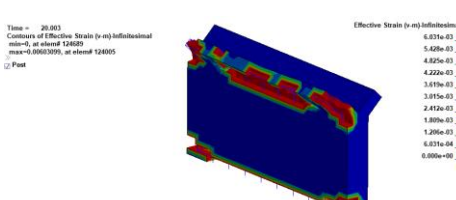
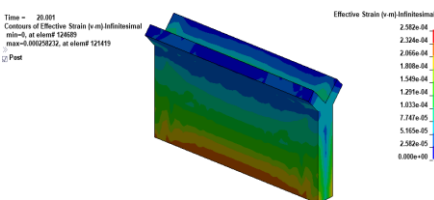
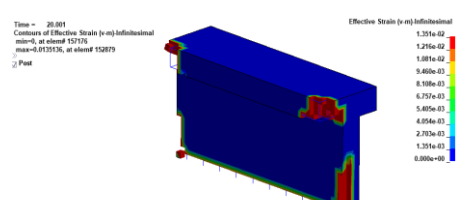
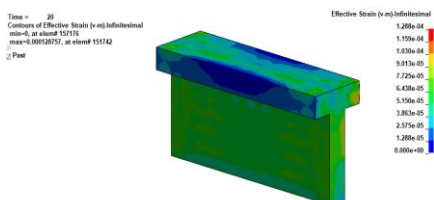
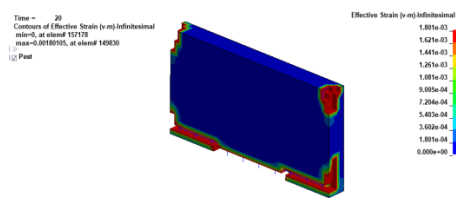
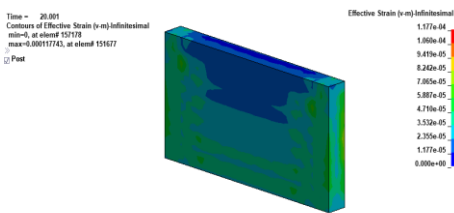
جدول ۴- حداکثر میزان جابجایی و خیز دیواره محیطی در لحظه برخورد موج انفجار

ردیف	شکل دیوار محیطی	فاصله مقیاس شده $(\text{Kg}/\text{m}^3)^{1/3}$	حداکثر میزان جابجایی دیوار محیطی (mm)	زمان (ms)
1	I	0.23	1.928e-02	0.19699
2	T	0.23	9.227e-01	0.19699
3	Y	0.23	5.608e-02	0.19699
4	I	0.29	6.177e-03	0.19699
5	T	0.29	2.489e-01	0.19699
6	Y	0.29	2.610e-02	0.19699
7	I	0.93	1.734e-02	0.86429
8	T	0.93	9.113e-01	0.86429
9	Y	0.93	4.628e-02	0.86429
10	I	1.18	5.259e-03	0.86429
11	T	1.18	2.110e-01	0.86429
12	Y	1.18	1.920e-02	0.86429

## ۶- نتایج بدست آمده

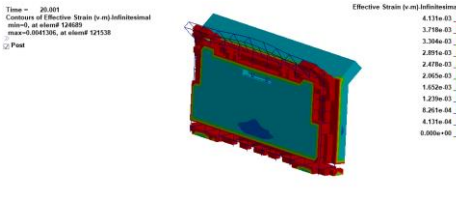
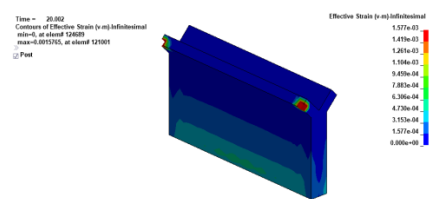
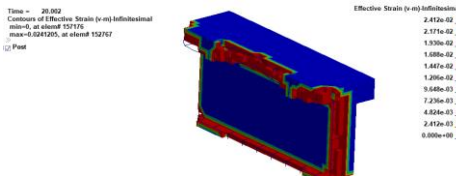
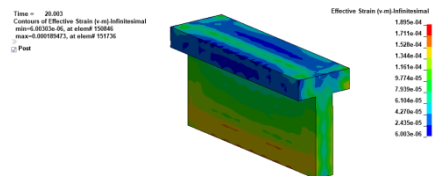
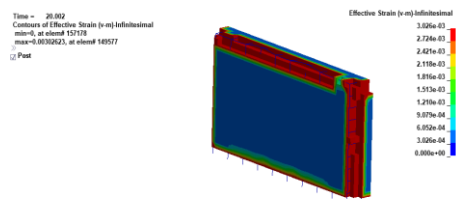
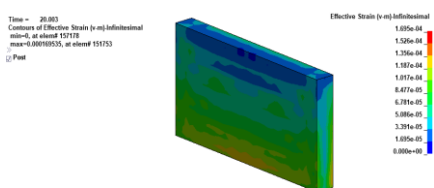
در جدول ۴ حداکثر میزان جابجایی در لحظه برخورد موج انفجار با دیوار محیطی برای دیوارهای I شکل و دیواره سایبان دار Y و T شکل نشان داده شده است. اشکال ۷ و ۸ میزان جابجایی و خیز در سازه تحت





شکل ۱۱- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی برای فاصله ایستگاهی 2M و مقدار 5KG ماده منفجره

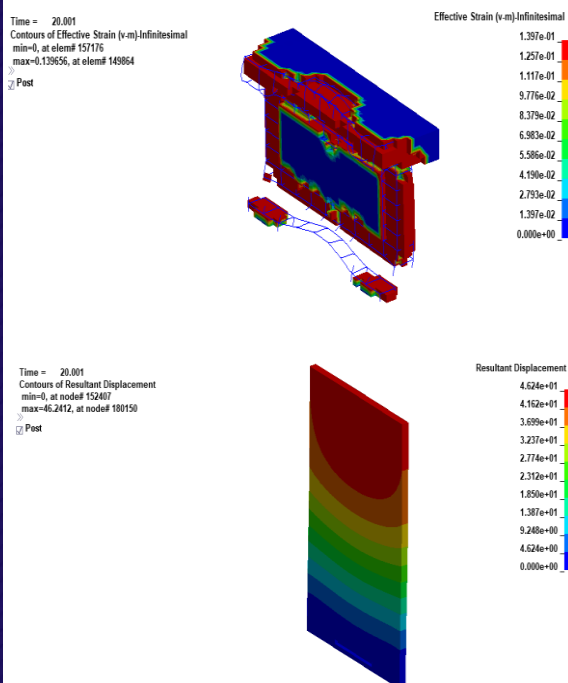
شکل ۹- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی برای فاصله ایستگاهی 0.5M و مقدار 5KG ماده منفجره



شکل ۱۲- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی برای فاصله ایستگاهی 2M و مقدار 10KG ماده منفجره

شکل ۱۰- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی برای فاصله ایستگاهی 0.5M و مقدار 10KG ماده منفجره

همانطور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، سازه محافظت شونده در قسمت پایین سطح خود دارای حذف المان بوده که نشانگر تخریب و آسیب وارده به آن است. به کمک روش آزمون و خطا برای اشکال مختلف دیواره محیطی، فواصل ایستگاهی ایمن که معرف منطقه امن برای حالت مدلسازی می‌باشد، محاسبه گردیده است. این فواصل به این معناست که اگر فاصله ماده منفجره نسبت به دیواره‌های محیطی مطابق جدول شماره ۶ باشد، علی‌رغم از هم گسیختگی دیوار محیطی، سازه یا تاسیسات محافظت شده توسط آن مطابق شکل ۱۴ بعد از وقوع انفجار، حذف المان و آسیب جدی نخواهند داشت.



شکل ۱۳- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی و جابجایی سازه محافظت شونده برای ۲۳/۵ کیلوگرم ماده منفجره در دیوار T

بررسی نمودارها و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دیواره محافظ T شکل علی‌رغم خرابی بیشتر نسبت به دیگر اشکال دیوار محافظ، باعث کاهش جابجایی بهتری در سازه محافظت شونده می‌شود و بعد از آن دیواره Y شکل عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. دیواره T شکل در شرایط یکسان و فواصل ایستگاهی مختلف نسبت به دیگر اشکال دیوار محافظ حدوداً ۱۱ درصد میزان جابجایی‌ها را در سازه محافظت شونده کاهش می‌دهد. پس از مشاهده نتایج بدست آمده مطابق جدول شماره ۵ در فواصل مقیاس شده تقریباً یکسان، میزان ماده منفجره بیشتری برای قرار گرفتن دیواره T شکل در آستانه از هم گسیختگی یا Failed شدن نیاز است، همین امر خود نشان دهنده عملکرد بهتر دیواره T شکل نسبت به دیگر اشکال بوده است.

در شکل‌های ۹ تا ۱۲ کانتورهای حذف المان- کرنش دیوارهای محیطی برای حالات مختلف بعد از آنالیز نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر وزنی ماده منفجره لازم برای قرارگیری دیوار محیطی در آستانه گسیختگی

نوع دیواره	وزن ماده منفجره (kg)	فاصله مقیاس شده ( $\text{Kg/m}^{1/3}$ )
دیواره A شکل	۱۸/۵	۰/۷۶
دیواره T شکل	۲۳/۵	۰/۷۰
دیواره Y شکل	۲۰/۸	۰/۷۳

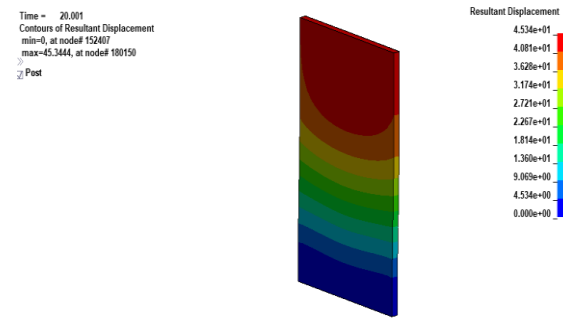
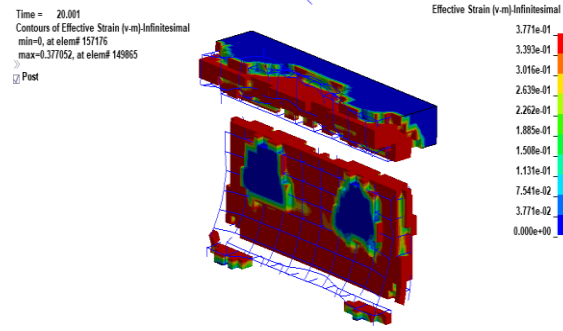
جدول ۶- مقادیر وزنی ماده منفجره لازم برای قرارگیری سازه محافظت شونده در SAFE ZONE

نوع دیواره	وزن ماده منفجره (kg)	فاصله مقیاس شده ( $\text{Kg/m}^{1/3}$ )	فاصله ایستگاهی ایمن (m)
دیواره A شکل	۱۸/۵	۰/۴۸	۱/۲۶۰
دیواره T شکل	۲۳/۵	۰/۳۸	۱/۰۸۰
دیواره Y شکل	۲۰/۸	۰/۳۹	۱/۰۷۰

دیواره ۱ و ۷ شکل، کاهش می‌دهد. کانتورهای تنش و جابجایی نشان می‌دهد که بیشترین میزان تنش و جابجایی ایجاد شده در لحظه برخورد موج انفجار برای دیوار ۱ شکل در مرکز دیوار و در دیوار ۷ و ۳ شکل در قسمت زیر سایبان اتفاق افتاده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از میزان جابجایی و خیز و همچنین بررسی حذف المان های دیواره ها در فواصل مقیاس شده مختلف، و در حالتی که فاصله دیوار محافظ تا سازه محافظت شونده ۱ متر و ارتفاع سازه محافظت شونده ۲ متر باشد، می توان دریافت که با کاهش فاصله مقیاس شده، میزان آسیب پذیری در دیواره محافظ بالا رفته اما آسیب و حذف المان را در سازه محافظت شونده کاهش داده است و بالعکس.

سازه های محافظت شونده با ارتفاع ۲ متر و در فاصله ۱ متری از دیوار محیطی برای دیوارهای ۱، ۳ و ۷ به ترتیب در فاصله های مقیاس شده  $0.076 (Kg/m^3)$ ،  $0.070 (Kg/m^3)$  و  $0.073 (Kg/m^3)$  در آستانه گسیختگی قرار گرفته و در همه حالات، این گسیختگی در  $1/3$  پایین سطح سازه آغاز می گردد. همچنین، سازه های محافظت شونده با ارتفاع ۲ متر و در فاصله ۱ متری از دیوار محیطی برای دیوار های ۱، ۳ و ۷ به ترتیب در فاصله های مقیاس شده  $0.048 (Kg/m^3)$ ،  $0.038 (Kg/m^3)$  و  $0.039 (Kg/m^3)$  در حالت SAFE و ایمن قرار گرفته و فاصله ایستگاهی ایمن برای هر یک از دیواره های ۱، ۳ و ۷ به ترتیب  $1/260$  متر،  $1/070$  متر،  $1/080$  متر گزارش شد. میزان درصد تغییرات ماکزیمم جابجایی هر دیواره نسبت به حالات مختلف دیواره های دیگر مطابق جدول ۴ قابل محاسبه و در دسترس می باشد.

در شکل شماره ۱۵ H(protected)، h(perimeter wall)، R(safe)، Z(safe)، Z(faild)، W(faild)، structure، r(wall-structure) به ترتیب بیانگر ارتفاع دیواره محیطی، ارتفاع سازه محافظت شونده، مقدار وزن ماده منفجره لازم جهت از هم گسیختگی دیواره، فاصله مقیاس شده جهت از هم گسیختگی دیوار محیطی، فاصله مقیاس شده جهت ایمن ماندن سازه محافظت شونده، فاصله ایستگاهی جهت ایمن ماندن سازه محافظت شونده، فاصله بین دیوار محیطی و سازه محافظت شونده بوده است. همچنین  $dx_{max1}$  4، نشان دهنده ماکزیمم جابجایی دیوار محیطی برای ۴ فاصله مقیاس شده متفاوت طبق جدول ۴ در نظر گرفته شده است.



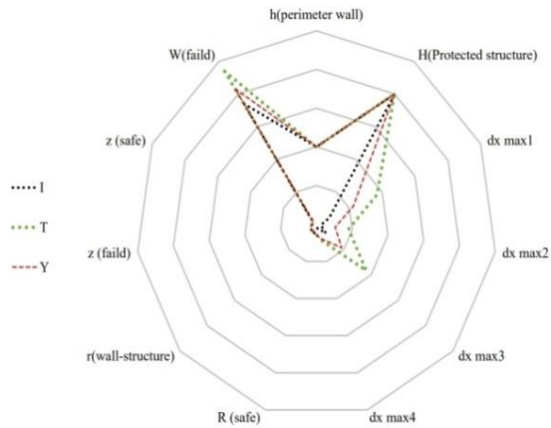
شکل ۱۴- کانتورهای حذف المان- کرنش دیوار محیطی و جابجایی سازه محافظت شونده برای  $23/5$  کیلوگرم ماده منفجره و فاصله ایستگاهی ایمن  $1/080$  متر در دیوار T شکل

### ۷- جمع بندی

با استناد به صحت سنجی انجام گرفته در این پژوهش، روش مورد استفاده در رابطه با مدل سازی رفتار دیوارهای محیطی بتن مسلح تحت اثر انفجار می‌تواند، به منظور کاهش هزینه‌ها و مشکلات انجام مطالعات آزمایشگاهی استفاده گردد. همچنین می‌توان به عنوان طراحی اولیه برای آزمایشات میدانی از روش بیان شده استفاده کرد. البته این امر از اهمیت و ارزش انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در این خصوص کم نمی‌کند.

در این تحقیق، رفتار اشکال مختلف دیوار محیطی در فواصل مقیاس شده  $0.023 (Kg/m^3)$ ،  $0.029 (Kg/m^3)$ ،  $0.093 (Kg/m^3)$  و  $0.093 (Kg/m^3)$  که بیانگر انفجارهای نزدیک و انفجارهای متوسط است، بررسی گردیده است. طبق نتایج بدست آمده وجود سایبان در دیوار محیطی در کاهش میزان آسیب به سازه محافظت شونده بسیار موثر بوده، همچنین در میان دو دیوار محیطی سایبان دار T و ۷ شکل، دیوار T شکل باز خورد بهتری را در برابر بارگذاری انفجار از خود نشان داده و حدودا ۱۱ درصد میزان جابجایی را در سازه محافظت شونده، نسبت به

2. Choi JH, Choi SJ, Ho J, Kim j, Hong kn .Evaluation of blast resistance and failure behavior of prestressed concrete under blast loading .*Construction and Building Materials*.2018; 317:550-572.
3. Vajdian M,Asghari k. Laboratory study of the effect of various fibers on the physical and chemical properties of fiber concrete.*Civil & Project Journal(CPJ)*.2019; 5:55-68.
4. FEMA428. Buildings and Infrastructure Protection Series Primer to Design Safe School Projects in Case of Terrorist Attacks and School Shootings .*Homeland Security Science andTechnology Edition 2*.January 2012; 2:162.
5. DoD. Ammunition and Explosive Safety Stand .*DoD 6055.09-STD, 2008*; 5:44-59.
6. Hussein A, Mahmoud H, Heyliger P. Probabilistic analysis of a simple composite blast protection wall system.*Engineering Structures, October 2020*; 203.
7. Mohammed Alias Y, RafikaNorhidayu R ,Norazman M, Ariffin I, MuhammadAzani Y, NgChoy P. Simulation of reinforced concrete blast wall subjected to air blast loading.*Journal of Asian Scientific Research*.2014; 4:522-533.
8. Raman SN, Ngo T, Mendis P, Pham T. Elastomeric Polymers for Retrofitting of Reinforced Concrete Structures against the Explosive Effects of Blast.*Advances in Materials Science and Engineering*.2012; 2012:8.
9. Ohirano T, Katakami Y, Hashimoto S , Hatsumura I, Nishitsunoi T,Yamashita Y, et al. Evaluation of the Durability of a Nuclear Bomb Shelter Made with Anti-Sievert® Concrete. *Materials Research Society*.2018;3:3061-3067.
10. Zhang B, Nian X, Jin F, Xia ZH, Fan H. Failure analyses of flexible Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) fiber reinforced anti-blast wall under



شکل ۱۵- نمودار مقایسه برخی پارامترهای موثر در بارگذاری انفجار

مطابق شکل شماره ۱۵ ارتفاع دیوار محیطی محافظ ثابت و معادل ۱ متر، ارتفاع سازه محافظت شونده ثابت و معادل ۲ متر، فاصله بین دیوار محیطی و سازه محافظت شونده ثابت و معادل ۱ متر بوده است. موقعیت های مختلف در شکل شماره ۱۵، بیانگر این است که ماکزیمم جابجایی های دیوار محیطی در دیوار T شکل از I و Y شکل بیشتر بوده است، به این معنی که، دیوار T شکل توانسته در دمپ و میرایی موج انفجار موثرتر واقع گردد. این نمودار می تواند در ارزیابی بهتر و راحت تر مفید واقع گردد.

بر اساس نتایج به دست آمده، دیواره محیطی به عنوان اولین عامل بازدارنده و محافظ در برابر حملات تروریستی موثر و مفید بوده و می توان با در نظر گرفتن بعضی پارامترها از قبیل فاصله ایستگاهی مناسب و فاصله دیوار محیطی تا سازه ها و تاسیسات تحت حفاظت و همچنین احتمال وقوع انواع بمب گذاری ها و انفجار در مکان های مختلف علی-الخصوص مراکز مهم و حساس به کمک یک استراتژی درست در ساخت و ساز شهری شرایط را به نحوی کنترل نمود که در صورت وقوع این حوادث میزان خسارت و آسیب های ناشی از آن کاهش یابد.

#### ۸- مراجع

1. Alsubaei F. Performance of Protective Perimeter Walls Subjected to Explosions in Reducing the Blast Resultants on Buildings.*Electronic Thesis and Dissertation Repository*.August 2015; 29-35.

20. Yi Z, Agrawal AK, Ettouney M, Alampalli S. Blast load effects on highway bridges I: Modeling and blast load effects. *Journal Bridge Engineering*, 2014; 19:87-92.
21. Holmquist TJ, Johnson GR, Cook WH. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Proceeding of the The 14th International Symposium on Ballistics*. 1993; 591-600.
22. Johnson GR, Beissel SR. Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile. *the 5th International Conference on Structures under shock and impact*. 1998; 32:793-806.
23. Xu K, Lu Y. Numerical Simulation Study of Spallation in Reinforced Concrete Plates subjected to Blast Loading. *Computers & Structures*. 2006; 84:431-438.
۲۴. نیری، آ. طراحی سازه های امن (اصول و مفاهیم پایه). دانشگاه صنعتی مالک اشتر. انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲، ۶۴-۶۵.
- explosion. *Composite Structures*. 2018; 184: 759-774.
11. Yi Z, Agrawal AK, Ettouney M, Alampalli S. Blast load effects on highway bridges I: Modeling and blast load effects. *Journal Bridge Engineering*. 2013; 10:1943-5592.
12. Moeini Y, Ganjali A, Hashemi Sangdehi A. Investigation of the Behavior of Concrete Structures on the Effect of Loading Due To the Explosion. *Proceeding of the 6th National Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development; 2019 Dec 10; 2-3*
13. Dass Goel M, Matsagar VA. Blast-Resistant Design of Structures. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2014; 19:1943-5576
14. Khan R, Farooq SH, Usman M. Blast Loading Response of Reinforced Concrete Panels Externally Reinforced with Steel Strips. *infrastructures*. 2019; 4:54.
15. Chiquito M, López LM, Castedo R, Caldentey P, Santos AP. Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment. *Engineering Structures*. 2019; 201:0141-0296
16. Taji M, Hosseinzadeh Barforoosh A, Abedi A. Comparison of Experiment and Simulation of Blast Loading on the Steel Beam. *Proceeding of the 11th International symposium on rock fragmentation by blasting; 2015 Aug 24-26; Sydney; Nsw*.
17. Jianchun L, Xin H, Guowei MA. Blast Protection Shelter by Using Hollow Steel Filled with Recycled Concrete. *Tianjin University and Springer*. 2008; 14:426-429.
18. DOD (Department of Defense). Design and analysis of hardened structures to Consional Weapons, *Unified Facilities Criterias (UFC) 3-340-01*. 2002; 27.
19. Tai YS, Chu TL, Hu HT, Wu JY. Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2011; 56:140-147.