

«علمی - پژوهش»

## بررسی رفتار میراگر اصطکاکی در مهاربندهای ضربداری در برابر نیروی انفجار

سلیمان قوهستانی<sup>۱\*</sup>، محمد کارکن<sup>۲</sup>، مجید یعقوبی<sup>۳</sup>، صفر خلیفه<sup>۴</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، ایران، ۲- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لارستان،

لارستان، ایران ۳- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تربت حیدریه، ایران ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران،

دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی تابناک لامرد، لامرد، ایران

(دریافت: ۹۸/۰۵/۲۰، پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۲)

### چکیده

خطرات متعدد اغلب بر روی پایداری سازه‌ها اثر می‌گذارد و هنگام طراحی و آنالیز سازه باید این نکته در نظر گرفته شود. با افزایش مقاومت لرزه‌ای سازه، مقاومت سازه در مقابل نیروهای دیگر نظیر نیروی انفجار نیز افزایش پیدا می‌کند. یکی از سامانه‌های متداول طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهای جانبی استفاده از سامانه مهاربند ضربداری می‌باشد. استفاده از مهاربندهای ضربداری فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی می‌تواند میراگری و جذب انرژی بیشتری در مقایسه با مهاربندهای ضربداری فولادی فاقد میراگر داشته باشد و در انفجارهای بزرگ رفتار بهتری از خود نشان دهد. در این مقاله تأثیر مهاربندهای ضربداری دارای میراگر اصطکاکی و فاقد میراگر اصطکاکی در عملکرد سازه بتنی در برابر نیروی انفجار مطالعه شده است. به این منظور جابه‌جایی و تغییر مکان نسبی طبقات در حالت‌های مختلف بارگذاری انفجار محاسبه گردیده است. در نهایت نتایج نشان‌دهنده تأثیر میراگر اصطکاکی در کاهش تغییر مکان جانبی و تغییر مکان نسبی طبقات می‌باشد؛ به طوری که در سازه با میراگر در مقایسه با سازه بدون میراگر، تغییر مکان جانبی و تغییر مکان نسبی طبقات به طور چشم‌گیری کاهش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد اضافه کردن میراگر اصطکاکی به سازه باعث افزایش سختی سازه می‌شود، بنابراین، زمان تناوب سازه کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** بار انفجار، مهاربند ضربداری، میراگر اصطکاکی، Opensees

## Investigation of Friction Damper Behavior in Cross Braces Subjected to Blast Load

S. Ghouhestani\*, M. Karkon, M. Yaghoobi, S. Kalife

\*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fasa University, Fasa, Iran.

(Received: 11/08/2019; Accepted: 11/06/2020)

### Abstract

Several hazards often affect the stability of structures, and when designing and analyzing the structure, this should be considered. With increasing seismic strength of the structure, the strength of the structure increases against other forces, such as the explosion force. One of the most commonly used building design systems for lateral loads is the use of a cross bracing system. Using cross braces with friction damper can have more damping and energy absorption compared to cross braces without friction damper; it will behave better in big bangs. In this paper, the effect of cross braces with a friction damper and no friction damper on the performance of concrete structures against explosive force has been studied. For this purpose, the displacement and relative displacement of the floors in different modes of loading of the explosion have been calculated. Finally, the results show the effect of friction damper on reducing lateral displacement and relative displacement of the floors, so that in the structure with the damper compared with the structure without a damper, the lateral displacement and relative displacement of the floors significantly decreased. Studies show that adding a friction damper to the structure increases the stiffness of the structure, so the frequency of the structure is reduced.

**Keywords:** Blast Load, Cross Brace, Friction damper, Opensees

## ۱. مقدمه

بر اساس آمارهای منتشرشده از سوی سازمان‌های بین‌المللی، کشور ایران در یکی از پرمخاطره‌ترین نقاط دنیا از نظر بروز جنگ و حملات تروریستی قرار گرفته است [۱]. این مسئله به خودی خود اهمیت پرداختن به مبحث پدافند غیرعامل در همه زمینه‌ها و به‌طور ویژه در طراحی سازه‌های مهم را انکارناپذیر جلوه می‌دهد. لذا مسلم است که بررسی پارامترهای مهم در این زمینه ضروری باشد. همچنین لازم است تا تلاش‌های جدیدی برای نگارش آیین‌نامه‌هایی در این زمینه صورت پذیرد. آیین‌نامه‌هایی که به‌راحتی در دسترس مهندسين و متخصصين باشد و به‌وسیله آن بتوان امنیت سازه‌های مهم را تأمین نمود. اولین دستورالعمل توسط بخش نیروی زمینی ارتش آمریکا در سال ۱۹۸۶ برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار تهیه شده است [۲]. پس از آن در سال ۱۹۹۰ با همکاری مشترک بخش‌های نیروی زمینی، نیروی هوایی و نیروی دریایی ارتش آمریکا دستورالعمل TM5-1300 [۳] تهیه شد و به‌طور وسیعی در طراحی سازه‌ها در برابر انفجار استفاده گردید. پس از آن در سال ۲۰۰۸ دستورالعمل UFC3-340-02 [۴] که نسخه به‌روز شده دستورالعمل TM5-1300 است؛ توسط بخش دفاع آمریکا تهیه شد و اکنون مبنای اصلی طراحی و تحقیق در این حوزه است. با توجه به خطرات روزافزون و خسارت‌های سنگین وقایع تروریستی و جنگ، شناخت پدیده انفجار و راه‌های پایداری سازه‌ها در برابر انفجار از ضروریات امروز جهان است.

معمولاً طراحی ساختمان در برابر نیروهای جانبی از قبیل انفجار و زلزله‌های قوی بر این اساس استوار است که سازه بتواند با شکل‌پذیری خود انرژی را جذب و مستهلک نماید. خطرات متعدد اغلب بر روی پایداری و عمر مفید سازه اثر می‌گذارند و هنگام طراحی و آنالیز سازه باید این نکات در نظر گرفته شود. فرض اساسی کاهش خطرات این است که سازه در مقابل یک خطر طراحی می‌شود و در برابر دیگر خطرات احتمالی مقاومت کافی دارد. یکی از سامانه‌های متداول طراحی ساختمان در کشور استفاده از قاب خمشی بتن مسلح می‌باشد. این سامانه به‌دلیل در دسترس بودن مصالح موردنیاز و نیز اجرای ساده به یکی از سامانه‌های متداول در ایران تبدیل شده است. چون ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های خمشی نشان داده است که به‌دلیل عدم رعایت ضوابط بارگذاری لرزه‌ای و نیز تغییرات ایجاد شده در آیین‌نامه‌ها، ساختمان‌های طرح‌شده موجود در برابر انفجار و حتی بارهای لرزه‌ای اصلاح‌شده مقاوم نمی‌باشند؛ استفاده از مهاربندهای ضربردی با میراگرهای اصطکاکی در این نوع قاب‌های خمشی تأثیرهای مثبت و زیادی در کاهش پاسخ‌ها دارند.

میراگرهای اصطکاکی برای اولین بار توسط دو کانادایی به

نام‌های پال و مارش در سال ۱۹۸۲ معرفی گردید. در این نوع، میراگرها در محل تلاقی مهاربندها در یک قاب خمشی نصب می‌شوند که تاکنون در ساختمان‌های زیادی در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است [۵].

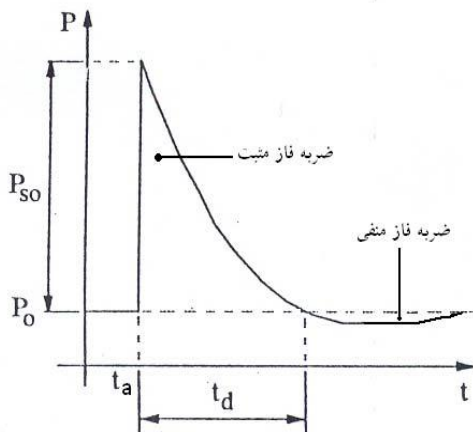
بیکر و همکارانش [۶] در سال ۱۹۸۳ بارهای ناشی از انفجارهای داخلی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که در یک سازه نیمه محبوس دو نوع بار انفجاری ایجاد می‌شود که نوع اول فشار بازتاب و نوع دوم فشار گاز می‌باشد که هر دو نوع برای خروج نیاز به بازشو دارد. در سال ۱۹۸۸ رزکی [۷] به بررسی ساختمان کنترل در کارخانه‌های صنعتی تحت اثر فشار ناشی از انفجار پرداخته است. وی الزامات بارگذاری، ملاحظات ایمنی، فلسفه طراحی، انتخاب مفاهیم سازه‌ای انفجار و رفتار مواد در حالت بارگذاری دینامیکی را مورد بررسی قرار داد. یان و همکارانش [۸] در سال ۱۹۹۳ میرایی بهینه میراگرهای اصطکاکی را برای یک سازه محاسبه کرد. مولا و بیلو [۹] در سال ۲۰۰۲ به بررسی قاب فولادی یک طبقه دارای سامانه مهاربند جانبی فلزی پیش‌تنیده مجهز به میراگر اصطکاکی پرداختند. آن‌ها اثر نیروی پیش‌تنیدگی را بر روی رفتار میراگر اصطکاکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که میزان نیروی پیش‌تنیدگی مهاربند در تغییر پاسخ سازه نقشی ندارد و پیش‌تنیدگی باعث اقتصادی شدن مقطع مهاربند و جلوگیری از کماتش آن می‌گردد؛ به‌نحوی که حداکثر تفاوت بین پاسخ دو سازه یکی با مهاربند دارای ۱۰۰ درصد نیروی پیش‌تنیدگی و دیگری با مهاربند دارای ۲۰ درصد نیروی پیش‌تنیدگی بیش از ۴ درصد نیست. یوامین و چری در سال ۲۰۰۰ مقالاتی در زمینه طراحی سازه‌های با میراگر تحت اثر بار جانبی ارائه کردند. وی و همکارانش [۱۰] در ادامه تحقیقات قبلی با انجام آزمایش‌هایی، به بررسی تأثیر پارامترهایی مانند دامنه جابه‌جایی، تعداد دفعات بارگذاری، مقدار نیروی پیش‌تنیدگی مهاربندها بر روی قاب فلزی دارای مهاربند فلزی مجهز به میراگر اصطکاکی پرداخته‌اند. بینگ و همکارانش [۱۱] مدل‌سازی یک قاب از ساختمان شش طبقه بتنی را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام داده‌اند. آن‌ها به بررسی اثر وجود یا عدم وجود میان‌قاب‌ها بر روی رفتار قاب تحت اثر بار انفجار پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که اثر بار انفجار بر قاب‌های دارای میان‌قاب بسیار بزرگ‌تر است و سازه برای مستهلک کردن انرژی ناشی از انفجار، تغییرشکل‌های بزرگ‌تر و خسارت بیشتری را تجربه خواهد کرد. در این مطالعه تغییرمکان نسبی طبقه به‌عنوان یک معیار کلی ملاک ارزیابی قرار گرفته است.

یاسر و همکارانش [۱۲] به بررسی رفتار قاب بتن مسلح تحت

سامانه مهاربند برون محور نسبت به سایر سامانه‌ها عملکرد بهتری در برابر بارهای ناشی از انفجار دارد. کامکار و شمس [۱۹] به بررسی تأثیر بار انفجار بر پاسخ دینامیکی غیرخطی هسته فولادی مهارندهای کمانش ناپذیر پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، پاسخ غیرخطی هسته مهاربند کمانش ناپذیر تحت بارگذاری‌های انفجاری با مدت زمان فاز مثبت متفاوت را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان فاز مثبت سبب افزایش مقادیر بیشینه تنش فشاری، میزان جذب انرژی در ناحیه فشاری و مقدار جابجایی پلاستیک و کاهش مقدار ماکزیمم تنش کششی در هسته مهاربند کمانش ناپذیر می‌شود.

## ۲. مروری بر مفاهیم انفجار

انفجار واکنش شیمیایی مواد منفجره است که انرژی قابل ملاحظه‌ای را آزاد می‌نماید. در اثر فشار و دمای بسیار زیاد، مواد منفجره به گاز تبدیل شده و با ازدیاد بسیار سریع فشار هوا، موج انفجار به وجود می‌آید که با سرعت اولیه حدود ۲۰۰۰ تا ۱۰/۰۰۰ متر بر ثانیه، منتشر می‌شود. امواج انفجار بر حسب منشأ آن به دو نوع موج ضربه و موج فشار تقسیم می‌شوند. موج ضربه، ناشی از انفجار، در حوزه نزدیک مواد منفجره جامد است. مطابق شکل (۱) در هر نقطه از مسیر انتشار موج، در وهله اول، فشار محیط به فشار مبنای انفجار افزایش یافته و با گذشت زمان به فشار محیط کاهش می‌یابد که به آن فاز مثبت می‌گویند. با عبور موج، کاهش فشار یا مکش رخ می‌دهد که به آن فاز منفی می‌گویند. فشار گام منفی، نسبتاً کوچک و تدریجی بوده و در اکثر مواقع، از اثر آن صرف‌نظر می‌شود [۲۰ و ۲۱ و ۲۳].



شکل ۱. موج ضربه.

نوع دیگر موج انفجار، موج فشار می‌باشد. موج فشار، از انفجار حوزه نزدیک مواد منفجره گازی و مایع و حوزه دور مواد منفجره جامد ایجاد می‌شود. مطابق شکل (۲) در هر نقطه از مسیر انتشار

اثر بار انفجار پرداخته‌اند. در این تحقیق تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای ارزیابی عملکرد قاب بتن مسلح انجام شده است. به این منظور یک مدل دو بعدی از قاب بتنی چهار طبقه انتخاب شد. پاسخ مدل ایجاد شده تحت بارهای انفجاری شبیه‌سازی شده نشان داد که با تغییر ستون‌های خارجی، به ویژه با استفاده از لوله‌های فولادی پر شده از بتن، عملکرد سازه بهبود می‌یابد. در پژوهشی دیگر زبیر و همکارانش [۱۳] نیز به بررسی عملکرد قاب‌های بتنی تحت اثر بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها اقدام به مدل‌سازی سه‌بعدی سازه و طراحی آن بر اساس آیین‌نامه IBC و ACI318-11 با شرایط منطقه ابوظبی کردند. سپس این سازه در شرایط مختلف فاصله مقیاس شده و وزن ماده منفجره تحلیل شد. تحلیل‌ها منجر به تعیین فاصله ایمن در برابر انفجار در این نوع سازه‌ها گردید. آن‌ها تأثیر تغییر پارامترهایی از قبیل خصوصیات مواد و همچنین نوع پیکره‌بندی سازه در نحوه عملکرد آن در برابر بار انفجار را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. یانگ و همکارانش [۱۴] به تحلیل احتمالاتی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی تحت اثر بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها یک روش دو مرحله‌ای برای ارزیابی پتانسیل واژگونی سازه‌ها در برابر بار انفجار ارائه کردند. در مرحله اول، درجه تخریب و واکنش‌های اعضای سازه‌ای تحت اثر بار انفجار بر اساس سامانه معادل یک درجه آزادی تعیین می‌شوند. در مرحله دوم، رفتار خرابی سازه فولادی پس از انفجار با استفاده از یک مدل عددی غیرخطی سه‌بعدی ماکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که چارچوب ارزیابی قابلیت اطمینان مورد استفاده در این مطالعه، یک پیش‌بینی دقیق از خطر خرابی سازه‌ها در برابر بار انفجار ارائه می‌کند که در مقایسه با روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو دقیق‌تر است.

در سال‌های اخیر در کشور ما نیز پژوهش‌هایی در زمینه انفجار صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات تدوین پیش‌نویس مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان (پدافند غیرعامل) می‌باشد [۱۵]. این آیین‌نامه شامل ضوابط مربوط به بارگذاری انفجار و نیز طراحی ساختمان‌ها در برابر این بارگذاری است. نوری‌زاده و همکارانش [۱۶] عملکرد قاب بتنی مسلح طراحی شده بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران [۱۷] را در برابر بارگذاری انفجار بررسی کرده‌اند. آن‌ها بارگذاری انفجاری را بر اساس پیش‌نویس مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان بر قاب مورد مطالعه اعمال و با لحاظ نمودن آثار غیرخطی مصالح و هندسه، تحلیل را انجام داده‌اند. شیراوند و همکارانش [۱۸] به بررسی رفتار سازه‌های فولادی با قاب خمشی ویژه و قاب مهاربندی تحت اثر بار انفجار پرداخته‌اند. آن‌ها با مطالعه عددی بر روی مدل‌های سازه‌ای سه‌بعدی با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۱۰ نشان دادند که

$$P_{s0} = (14.072)/z + (5.54)/z^2 + (0.357)/z^3 + (0.00625)/z^4 \quad (0.05 \leq z < 0.3) \quad (۴)$$

$$P_{s0} = (6.194)/z + (0.326)/z^2 + (20.32)/z^3 \quad (0.3 \leq z < 3) \quad (۵)$$

$$P_{s0} = (0.662)/z + (4.05)/z^2 + (3.288)/z^3 \quad (3 \leq z \leq 10) \quad (۶)$$

طبق آیین نامه مقررات ملی ساختمان مبحث ۲۱ مدت زمان فاز مثبت انفجار بر اساس فاصله مقیاس شده بر حسب ثانیه مطابق رابطه زیر پیشنهاد شده است.

$$\log\left(\frac{t_d}{w^3}\right) = 2.5 \log_{10}\left(\frac{R}{w^3}\right) + 0.28 \quad (z \leq 1) \quad (۷)$$

$$\log\left(\frac{t_d}{w^3}\right) = 0.31 \log_{10}\left(\frac{R}{w^3}\right) + 0.28 \quad (z \geq 1) \quad (۸)$$

## ۲-۲. پارامترهای مهم موج انفجار در هوا

الف- سرعت جبهه‌ی موج انفجار ( $U_s$ )

سرعت انتشار جبهه‌ی موج انفجار (موج فشار و موج ضربه) در هر نقطه، از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$U_s = 340 \times (1 + 0.83 P_{s0})^{0.5} \quad (۹)$$

که در این رابطه  $U_s$ ، سرعت انتشار موج بر حسب متر بر ثانیه و  $P_{s0}$  فشار مبنای انفجار بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است.

ب- مدت زمان گام مثبت (زمان اقدام انفجار -  $t_d$ )

مطابق شکل (۱) مدت زمان گام مثبت ( $t_d$ ) زمانی است که فشار، بیش از فشار محیطی ( $P_0$ ) است و مقدار آن برای سطوح بارگذاری مختلف محاسبه شده است.

پ- تکانه ویژه انفجار ( $i_s$ )

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است سطح زیر منحنی فشار- زمان را تکانه ویژه انفجار برای هر نقطه محدوده انفجار گویند که به دو جزء مثبت و منفی تقسیم می‌گردد. تکانه مثبت از رابطه زیر به دست می‌آید.

برای موج ضربه

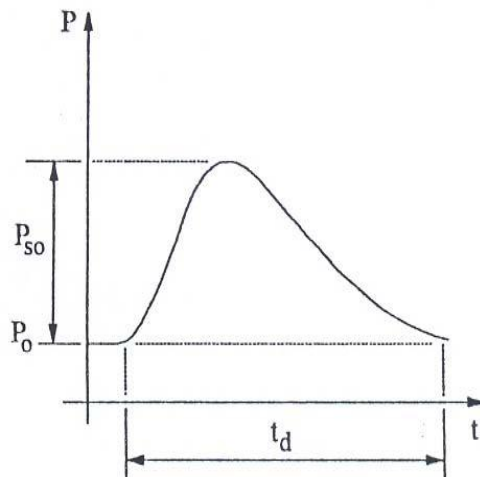
$$i_s = 0.5 \times P_{s0} \times t_d \quad (۱۰)$$

برای موج فشار

$$i_s = 0.64 \times P_{s0} \times t_d \quad (۱۱)$$

به دلیل کوچک بودن مقدار تکانه منفی، از آن صرف نظر شده است.

آن میزان فشار محیط به صورت تدریجی تا فشار مبنای انفجار افزایش یافته و سپس به فشار محیط کاهش می‌یابد و معمولاً گام منفی ندارد.



شکل ۲. موج فشار.

## ۲-۱. پیش‌بینی فشار ناشی از موج انفجار

قدرت یک بارگذاری انفجار، همواره توسط دو عامل وزن ماده منفجره و فاصله از منبع انفجار که به صورت پارامتر فاصله مقیاس شده ( $Z$ ) است؛ طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Z = \frac{R}{w^3} \quad (۱)$$

که  $w$  = وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم، معادل‌سازی شده وزن بر حسب وزن TNT.

$R$  = فاصله سازه موردنظر از منبع انفجار بر حسب متر.

آیین نامه مقررات ملی ساختمان مبحث ۲۱ برای تعیین حداکثر فشار برخورد ناشی از انفجار در هوای آزاد برای فواصل مبانی و دور، روابط براد و برای فواصل نزدیک به حوزه، روابط هنریش که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند را پیشنهاد کرده است.

- روابط براد

$$P_{s0} = (6.7)/z^3 + 1 \quad (۲)$$

$$(P_{s0} > 10 \text{ kg/cm}^2)$$

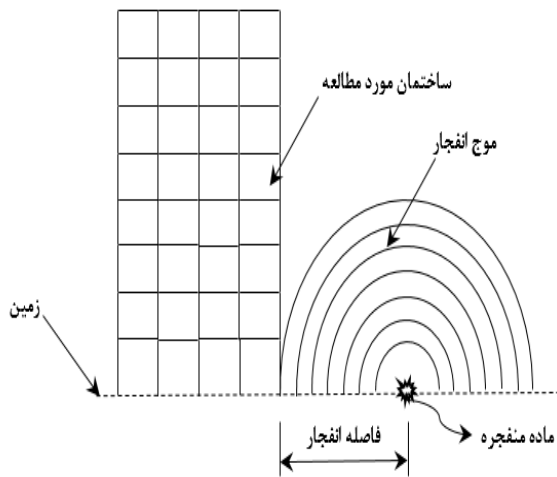
$$P_{s0} = (0.975)/z + (1.455)/z^2 + (5.85)/z^3 - 0.019 \quad (0.1 < P_{s0} < 10 \text{ kg/cm}^2) \quad (۳)$$

- روابط هنریش

$$Z \text{ فاصله مقیاس شده بر حسب } (m/kg^{1/3})$$

#### ۲-۴. نوع انفجار مورد مطالعه

با توجه به موقعیت وقوع انفجار نسبت به سازه، انفجار به دو گروه انفجار داخلی و انفجار خارجی تقسیم می‌گردد. انفجار خارجی نیز با توجه به فاصله محل وقوع آن نسبت به سطح زمین به سه دسته انفجار در هوای آزاد، انفجار هوایی و انفجار سطحی تقسیم‌بندی شده است. انفجار در هوای آزاد نوعی از انفجار خارجی در بالای یک سازه می‌باشد به نحوی که هیچ‌گونه تقویت‌کننده موج ضربه اولیه میان محل وقوع انفجار و سازه وجود ندارد. حال چنانچه انفجار در فاصله‌ای مشخص از سطح زمین واقع شود موج اولیه ناشی از انفجار پس از برخورد با زمین و انعکاس، به سطح خارجی سازه برخورد می‌کند. در این حالت موج انفجار در امتداد سطح زمین در ارتفاعی موسوم به ارتفاع ماک منتشر می‌شود. نوع دیگر انفجار خارجی، انفجار سطحی است. انفجار در نظر گرفته‌شده در این تحقیق، از این نوع انفجار می‌باشد. انفجار در این حالت در سطح زمین رخ می‌دهد. موج ناشی از انفجار پس از برخورد با زمین منعکس می‌گردد و با ترکیب این موج با موج اولیه ناشی از انفجار، موج حاصل به صورت یک موج به شکل نیم‌کره مطابق شکل (۴) منتشر می‌گردد.

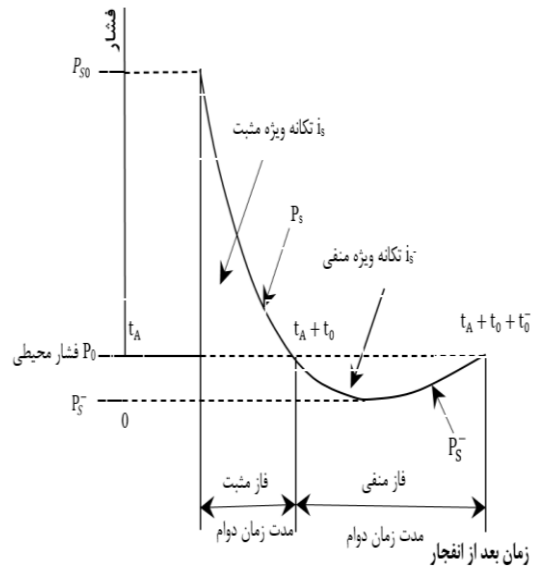


شکل ۴. شماتیک امواج کروی شکل انفجار.

مطالعات انجام‌شده [۲۵] نشان می‌دهد که در شرایط یکسان از نظر مقدار ماده منفجره و فاصله، انفجارهای سطحی دارای اثرات شدیدتری نسبت به سایر انواع انفجار می‌باشد.

#### ۳. روش تحقیق

یک ساختمان ۸ طبقه بتن مسلح با کاربری اداری، بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش



شکل ۳. تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۲۴].

ت- طول موج ( $\lambda_{rw}$ )

فاصله هر نقطه تحت فشار مینا واقع در سطح جبهه انفجار تا اولین نقطه تحت فشار محیطی واقع در پشت جبهه انفجار، «طول موج» نامیده می‌شود. مقدار طول موج بر حسب متر، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$(\lambda_{rw}) = U_s \times t_d \quad (12)$$

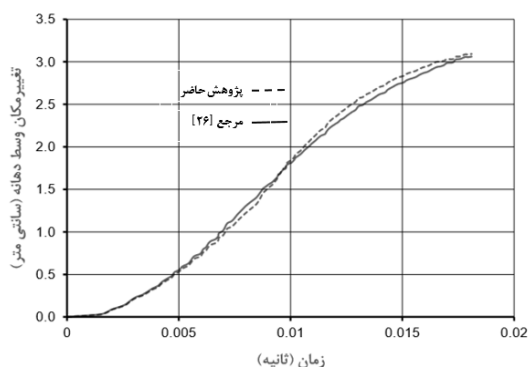
که در آن،  $U_s$  (m/s) و  $t_d$  (sec) به ترتیب سرعت انتشار موج و مدت زمان گام مثبت در انفجار است.

#### ۲-۳. انواع حالت انفجار

اثر امواج ناشی از انفجار بر سازه در سه حالت قابل بررسی است. در حالت اول امواج ناشی از انفجار به وجهی از ساختمان که دارای نزدیک‌ترین فاصله به محل وقوع انفجار است برخورد می‌کند. که با توجه به شدت انفجار باعث آسیب و یا تخریب اجزای ساختمان می‌گردد. در حالت دوم با نفوذ موج از بازشوهای ساختمان، فشار بر روی پوشش‌های کف و سقف طبقات وارد می‌شود. این فشار باعث تغییر طول اعضای سازه‌ای و آسیب به پوشش کف و سقف ساختمان می‌گردد. در انتها، موج انفجار در حالت سوم تمام سازه را احاطه کرده و باعث ایجاد فشار بر روی پشت‌بام، دیوارهای پیرامونی و دیوارهای دورتر نسبت به محل وقوع انفجار می‌گردد. در این پژوهش با توجه به اثرات قابل‌ملاحظه حالت اول ناشی از انفجار بر روی سازه‌ها، به بررسی اثر حالت اول بر سازه پرداخته شده است.

در طول بارگذاری را دارد. سختی مهاربند  $0.5 \text{ kN/m}$  و نیروی آستانه لغزشی  $0.5 \text{ kN}$  در نظر گرفته شده است.

جهت صحت‌سنجی روش به‌کاررفته در این تحقیق، از نتایج کار آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی [۲۶] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود مقایسه نتایج، بیانگر سازگاری خوب بین تحلیل عددی انجام‌شده در این پژوهش با کار آزمایشگاهی مورد اشاره است. در بررسی دیگر زمان تناوب سازه هشت طبقه مدل شده در این پژوهش با نتایج کار انجام‌شده توسط واحدی [۲۷] مقایسه شده است. زمان تناوب به‌دست‌آمده در این تحقیق  $1/795$  ثانیه و نتیجه کار واحدی  $1/8$  ثانیه است که بیانگر سازگاری قابل قبول بین نتایج است.

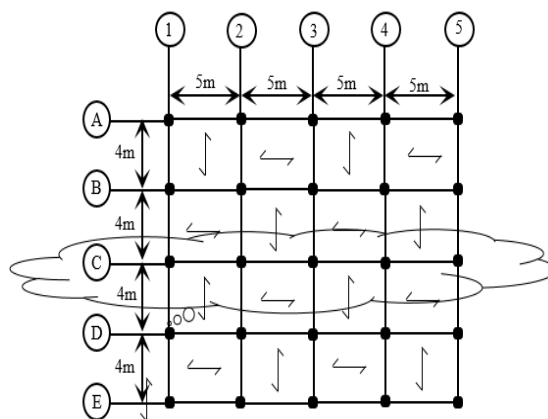


شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی.

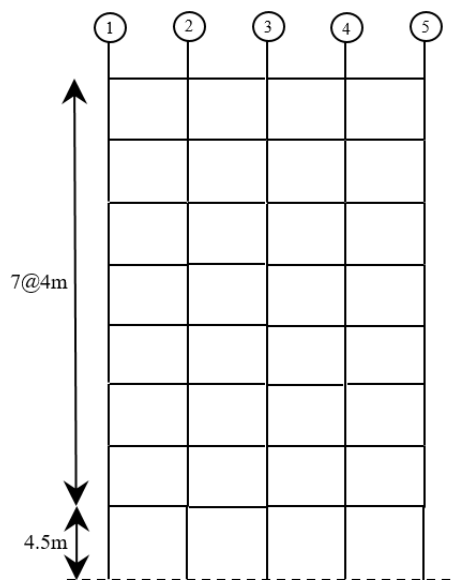
### ۳-۱. مشخصات مصالح مصرفی

با توجه به این که بارگذاری انفجاری از نوع بارگذاری‌های سریع است این خاصیت باعث ایجاد افزایش در سطح تنش تسلیم و تنش نهایی قبل از وقوع گسیختگی این نوع مصالح می‌گردد [۳-۴]. در این حالت عضو سازه‌ای تحت بارگذاری انفجاری از خود مقاومت بیشتری نسبت به حالت تحت بارگذاری استاتیکی نشان می‌دهد. این افزایش مقاومت در هر دو نوع مصالح مصرفی فولاد و بتن همراه با نرخ بالای کرنش است که در اعضای تحت بارگذاری دینامیکی اتفاق می‌افتد. این تنش‌های افزایش‌یافته یا مقاومت دینامیکی مصالح معیاری برای محاسبه مقاومت دینامیکی اعضا تحت اثر بار انفجار است. زیرا مقاومت نهایی دینامیکی اعضا تحت اثر بار انفجار بیش از مقاومت استاتیکی نهایی آن‌ها است. از ضریب افزایش دینامیکی (DIF) برای بیان این ویژگی استفاده می‌شود. این ضریب برابر نسبت مقاومت فشاری نهایی دینامیکی مصالح مصرفی به مقاومت فشاری این نوع مصالح است. شکل‌های (۸) و (۹) اثرات نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش بتن و فولاد را نشان می‌دهد.

چهارم) بارگذاری و تحلیل گردیده است. سپس بر اساس ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است. با توجه به متقارن بودن پلان، یک قاب میانی از ساختمان (قاب C) در نظر گرفته شده است. بر اساس سطح بارگیر قاب از بار ثقلی و انفجار، مدل‌سازی و تحلیل انجام شده است. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب پلان ساختمان مورد مطالعه و نمای قاب انتخاب‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵. پلان ساختمان مورد مطالعه.



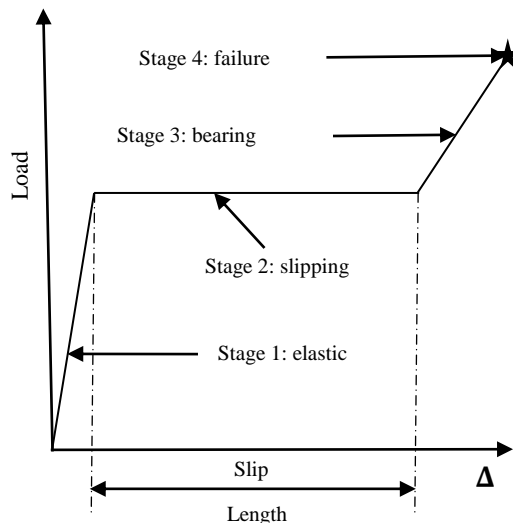
شکل ۶. قاب محور C ساختمان مورد مطالعه.

در این پژوهش برای تحلیل و طراحی ساختمان از نرم‌افزار Etabs استفاده شده است. پس از طراحی و تعیین ابعاد اعضا، قاب مورد مطالعه در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده است و تحت بارهای انفجاری با مقادیر مختلف TNT در فاصله ثابت ۱۰ متری از قاب قرار گرفته است. برای مدل‌سازی اعضای بتنی سازه، المان دویبعی به‌کار برده شد که امکان در نظر گرفتن تغییر جابجایی

است. در کلیه قاب‌ها مدت زمان تحلیل ۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد میراگر اصطکاکی در نرم‌افزار *OpenSees* به صورت یک فنر مدل می‌شود که رفتار این فنر مطابق با رفتار هیستریزیس میراگر اصطکاکی می‌باشد. برای مدل‌سازی میراگر بایستی دو پارامتر سختی و نیروی آستانه لغزشی محاسبه شود. میزان انرژی مستهلک‌شده توسط این میراگر برابر حاصل ضرب بار لغزشی در میزان جابه‌جایی میراگر است.

### ۳-۲. رفتار شماتیک میراگر اصطکاکی

در شکل (۱۰) منحنی بار- تغییر مکان میراگر در فازهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۰. رفتار شماتیک میراگر اصطکاکی.

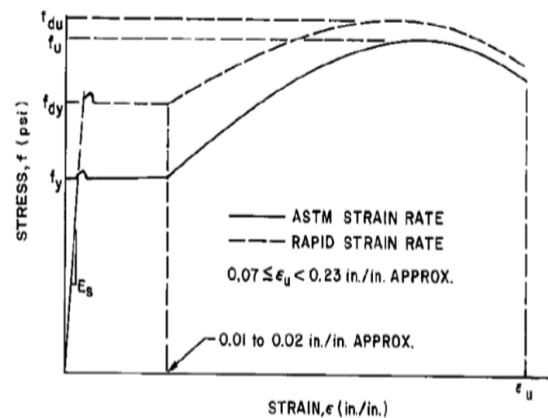
همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود رفتار میراگر تحت اثر بار به چهار فاز قابل تفکیک است که به ترتیب عبارت‌اند از:

- فاز اول سختی ( $k$ ) میراگر
- فاز دوم نیروی آستانه لغزشی
- فاز سوم طول لازم جهت لغزش
- فاز چهارم وقوع گسیختگی

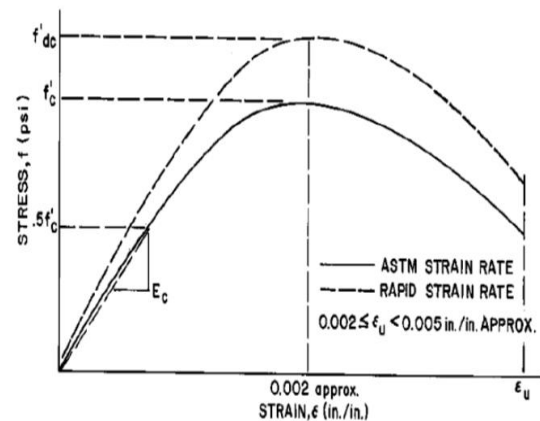
### ۴. نتایج و بحث

#### ۴-۱. نمودار تاریخچه زمانی بام

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نشان‌دهنده تغییر مکان بام در مقابل زمان می‌باشد. در این شکل‌ها نتایج تحلیل برای دو حالت سازه با

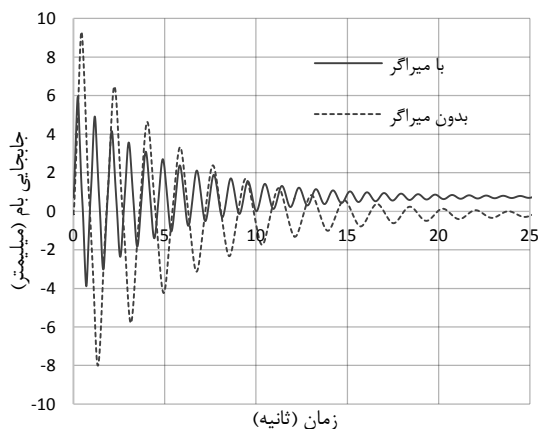


شکل ۸. اثر نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش فولاد [۲۶].

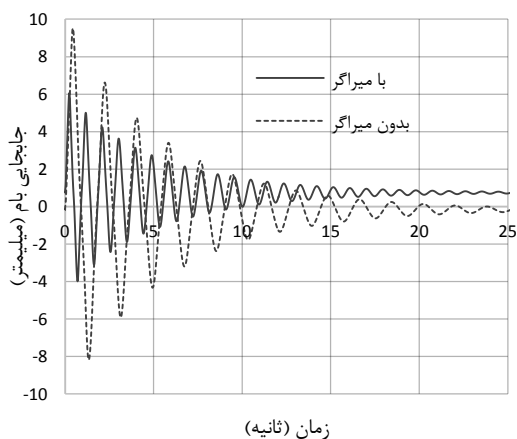


شکل ۹. اثر نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش بتن [۲۶].

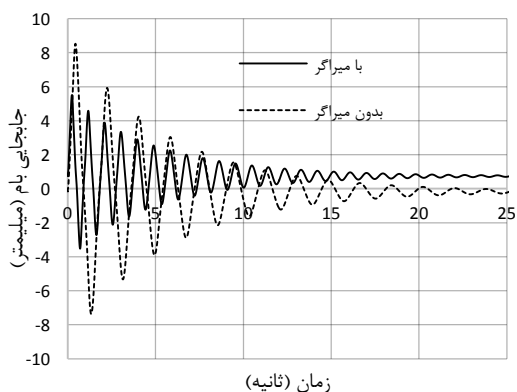
در بارهای دوره‌ای، رفتار بتن پیچیده‌تر می‌شود زیرا که شامل باز و بسته شدن ترک‌های مویی که قبلاً تشکیل شده‌اند و نیز اندرکنش آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. هدف کلی این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از میراگر اصطکاکی در مهارندهای فولادی ضربداری برای مقاوم‌سازی قاب خمشی بتنی است. به این منظور سازه ۸ طبقه طراحی شده، در نرم‌افزار *OpenSees* مدل‌سازی گردیده است. سپس قاب با مهارندهای فولادی ضربداری تحت اثر بار انفجار با مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره بر حسب قرار گرفته و نتایج بررسی شده است. در گام بعد همین قاب‌ها با مهارندهای فولادی ضربداری دارای میراگر اصطکاکی مدل شده است. میراگر اصطکاکی به صورت یک فنر در نرم‌افزار *OpenSees* با استفاده از *Buck wen material* مدل شده است. در گام آخر قاب ۸ طبقه با مهارندهای فولادی ضربداری دارای میراگر اصطکاکی تحت اثر همان بار انفجاری ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره بر حسب TNT مورد بررسی قرار گرفته



شکل ۱۱. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۱۰ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۲. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۱۵ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۳. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بام قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۲۰ کیلوگرم TNT.

مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر و سازه با مهاربند فولادی ضربدری با میراگر، تحت بار انفجار با مقادیر مختلف مواد منفجره، در فاصله ۱۰ متری از سازه نشان داده شده است.

همان گونه که ملاحظه می شود حداکثر تغییرمکان اندکی بعد از ارتعاش اجباری، در ابتدای ارتعاش آزاد رخ می دهد. این نمودار همچنین نشان دهنده توانایی سازه در میرا کردن ارتعاش ناشی از انفجار می باشد. با توجه به شکل می توان دید که سازه با مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر دارای میرایی کمی در مقابل بار ضربه ای انفجار می باشد. به طوری که در پایان تحلیل، ارتعاش سازه تقریباً به مقدار صفر رسیده است.

در این سازه حداکثر تغییرمکان جانبی در فاز ارتعاش آزاد صورت گرفته است. سازه ی مورد مطالعه در فاصله ۱۰ متری تحت بارهای انفجار ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره بر حسب TNT قرار گرفته است و نمودار تغییرمکان - زمان آن ها در شکل های (۱۱) تا (۱۳) برای دو حالت سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری با میراگر و سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود با گذشت زمان مقدار جابجایی کاهش یافته است. نرخ کاهش تغییرمکان که به صورت مقدار کاهش تغییرمکان در واحد زمان تعریف شده است در حالت سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری با میراگر بیش از سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر است.

مطالعات نشان می دهد جابجایی بام در سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری با میراگر در مقایسه با سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر تا ۲۰ درصد کاهش یافته است که این مقدار کاهش در نمودارهای ترسیم شده مشاهده می شود.

بررسی نحوه تغییر میزان جابجایی بام در برابر مقدار ماده منفجره بیانگر آن است که با افزایش مقدار ماده منفجره میزان جابجایی بام کاهش می یابد. این مسئله می تواند ناشی از بروز پدیده نرخ کرنش در مصالح باشد که در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها ملاحظه می شود با توجه به ماهیت بارگذاری سریع انفجار بر سازه، این امر باعث افزایش مقاومت سازه در برابر بار دینامیکی ناشی از انفجار می گردد. نتایج به دست آمده در شکل های (۱۱) تا (۱۳) بیانگر آن است که با افزایش مقدار ماده منفجره این میزان مقاومت سازه در برابر تغییرمکان جانبی بیشتر بروز می کند.

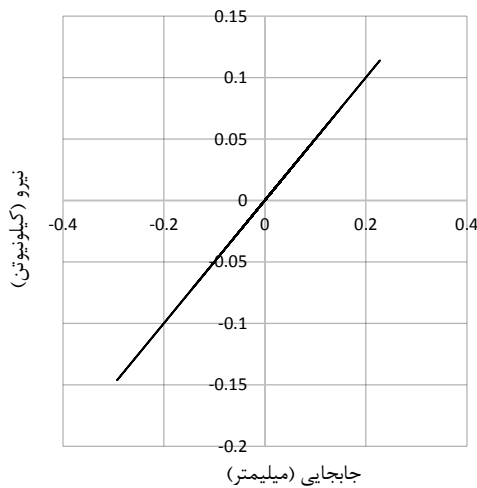


از مقایسه حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات در دو حالت سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری بدون میراگر و سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری با میراگر، کاهش قابل توجهی در حداکثر تغییرمکان نسبی سازه دارای مهاربند فولادی ضربدری با میراگر دیده می‌شود که این مطلب نشان‌دهنده تأثیر و اهمیت میراگر اصطکاکی مهاربند فولادی ضربدری در سازه است.

مقایسه حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات در سه حالت ساختمان تحت تأثیر ۱۰ کیلوگرم، ۱۵ کیلوگرم و ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری از قاب مورد مطالعه، نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده منفجره، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات کاهش یافته است. این اثر ناشی از بروز پدیده نرخ کرنش در مصالح تحت اثر بار انفجار می‌باشد.

شکل (۱۷) نمونه‌ای از نمودار هیستریزس را نشان می‌دهد که در آن نیروی میراگرها کمتر از نیروی آستانه لغزش در سازه می‌باشد. در این حالت سازه وارد فاز لغزش نمی‌شود و بنابراین، نمودار هیستریزس به صورت یک خط ملاحظه می‌شود.

نمونه ای از میراگرهایی که نیروی آنها کمتر از نیروی آستانه لغزش می باشد.

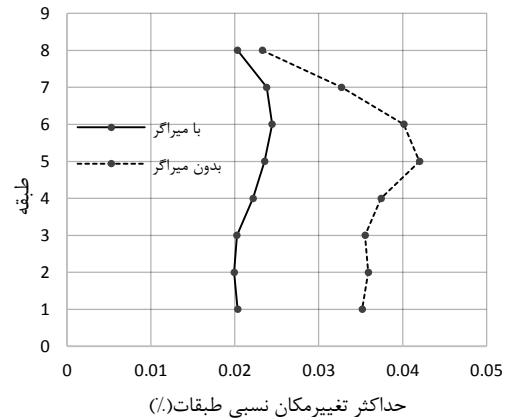


شکل ۱۷. نمودار هیستریزس در حالت نیروی میراگر کمتر از نیروی آستانه لغزش.

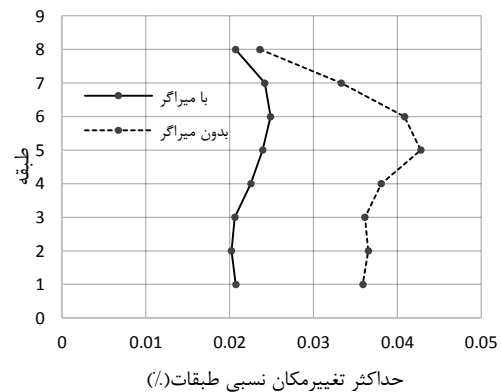
شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نمونه‌هایی از نمودار هیستریزس را نشان می‌دهند که در آن نیروی میراگر بیشتر از نیروی آستانه لغزش در سازه است و وارد فاز لغزش گردیده و شکل آن مطابق شکل (۱۰) شماتیک رفتار میراگر اصطکاکی به دست آمده است.

#### ۲-۴. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات

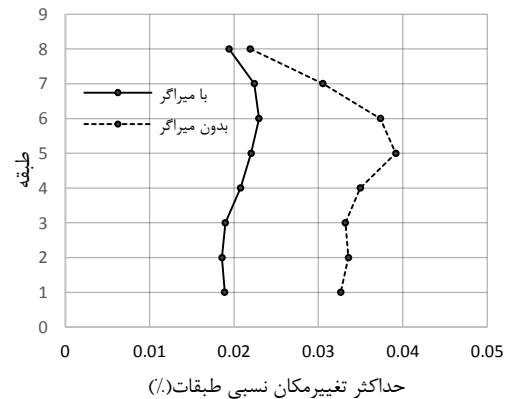
شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات سازه ۸ طبقه دارای مهاربند فولادی بدون میراگر و با میراگر در برابر نیروی انفجار در فاصله ۱۰ متری از سازه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۱۰ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۵. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۱۵ کیلوگرم TNT.



شکل ۱۶. نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات قاب ۸ طبقه در فاصله ۱۰ متری از محل وقوع انفجار در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در برابر ۲۰ کیلوگرم TNT.

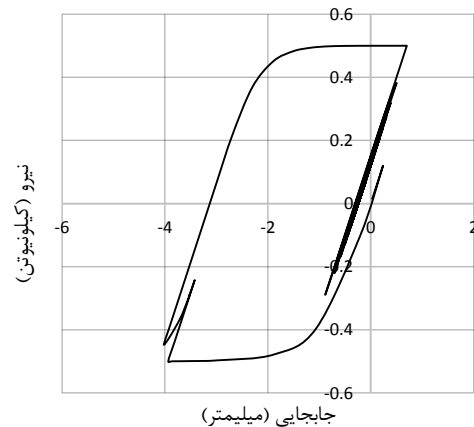
تغییر مکان اندکی بعد از ارتعاش آزاد رخ داده که در قاب دارای میراگر دارای کاهش قابل ملاحظه‌ای است. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر میراگر اصطکاکی در کاهش حداکثر جابه‌جایی بام در قاب دارای میراگر است.

با توجه به نتایج فوق، پیشنهاد استفاده از مهاربند فولادی مجهز به میراگر جهت تقویت و بهسازی قاب‌های بتنی، راهکار مؤثر و کارآمدی جهت مقابله با تهدیدات ناشی از بارهای جانبی ناشی از انفجار است.

## ۶. مراجع ها

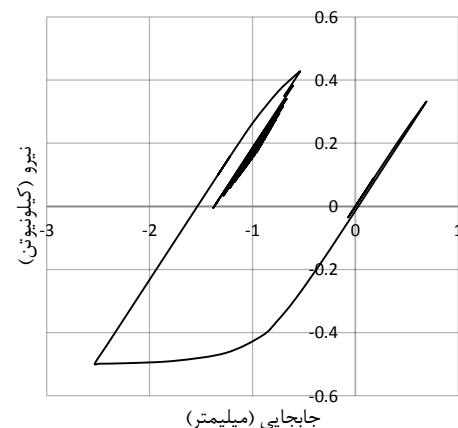
- [1] Bangash, M. Y. H. "Shock, Impact and Explosion"; Springer Berlin, Heidelberg, London, 2009.
- [2] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures, an Overview"; EJSE. Special Issue: Loading on Structures, Uni. Melbourne, Australia, 2007, 7, 76-91.
- [3] TM, 5-1300. "The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of the Army, Navy and Air Force, Washington DC, 1990.
- [4] Unified Facilities Criteria, UFC 3-340-02. "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defense, Washington DC, 5 December 2008.
- [5] Pall, A. S.; Marsh, C. "Response of Friction Damped Braced Frames"; Journal of Structural Division, ASCE. 108, 9, 1313-1323, 1982.
- [6] Baker, W. E.; Cox, P. A.; Westine, P. S.; Kulesz, J. J. "Explosion Hazards and Evaluation"; Elsevier Scientific Publishing Company. New York, 1983.
- [7] Rouzsky, N. "Blast-Resistance Control Buildings"; Structural Safety. 5, 253-266, 1988.
- [8] Ian, D. A.; Douglas, K.; Adrew, S. W.; James, M. K. "Testing of Passive Energy Dissipation Systems"; Earthquake Spectra. Vol. 9, NO. 3, Earthquake Engineering Research Institute California. August, 1993.
- [9] Mualla, I. H.; Belev, B. "Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device under Earthquake Excitation"; J. of Eng. Struct. 24, 365-371, 2002.
- [10] Mualla, I. H.; Nielsen, L.O.; Belev, B.; Liao, W. I.; Loh, C. H.; Agrawal, A. "Numerical Prediction of Shaking Table Tests on a Full Scale Friction Damped Structure"; 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, 2002.
- [11] Bing, L.; Tso-Chien P.; Anand, N. "A Case Study of the Effect of Cladding Panels on the Response of Reinforced Concrete Frames Subjected to Distant Blast Loadings"; Nucl. Eng. Des. 239, 455-469, 2009.
- [12] Yasser, E. I.; Mostafa, A. I.; Marwa, N. "Response of Reinforced Concrete Frame Structures under Blast Loading"; Procedia Eng. 171, 890-898, 2017.
- [13] Zubair I. S.; Osama A. M.; Kumail M.; Manish K. "Performance of Earthquake-resistant RCC Frame Structures under Blast Explosions"; Procedia Eng. 180, 82-90, 2017.
- [14] Yang, D.; Xiaoran, S.; Hai-Tao Z. "Probabilistic Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structures against Blast Loads"; J. of Eng. Struct. 147, 679-691, 2017.

نمونه ای از میراگرهایی که نیروی آنها از نیروی آستانه لغزش بیشتر شده است.



شکل ۱۸. نمودار هیستریزیس در حالت نیروی میراگر بیشتر از نیروی آستانه لغزش.

نمونه ای از میراگرهایی که نیروی آنها از نیروی آستانه لغزش بیشتر شده است.



شکل ۱۹. نمودار هیستریزیس در حالت نیروی میراگر بیشتر از نیروی آستانه لغزش.

## ۵. نتیجه گیری

با بررسی و مقایسه قاب بتنی ۸ طبقه دارای مهاربند فولادی ضربداری بدون میراگر و مجهز به میراگر مشاهده می‌شود که در قاب دارای مهاربند فولادی بدون میراگر، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در برابر انفجار به مراتب بیشتر از حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در قاب دارای مهاربند فولادی با میراگر می‌باشد که این امر بیانگر آن است که استفاده از میراگر باعث کاهش تغییر مکان نسبی طبقات می‌گردد. بررسی تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام نشان می‌دهد که در قاب بدون میراگر حداکثر

- [21] FEMA426.; "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Building"; Federal Emergency Management Agency, December 2003, Chapter 4, 1-20.
- [22] Bangash, N. Y. H.; Bangash, T.; "Shock, Impact and Explosion"; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 388-393, 2009.
- [23] ISC.; "Facts for Steel Buildings, Blast and Progressive Collapse"; American Institute of Steel Construction, 1-13, 2004.
- [24] Richard, L. J. "Survivability of Steel Frame Structures Subject to Blast and Fire"; Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, Pages 854-866, 2008.
- [25] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures-An Overview"; The University of Melbourne, Australia. EJSE Special Issue: Loading on Structures, 76-91, 2007.
- [26] Seabold, R. H. "Dynamic Shear Strength of Reinforced Concrete Beams, Part II"; Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1967.
- [27] Vahedi, J. "Investigation of the effect of passive dampers on controlling the response of frames against explosive loading", Master of Science (MSc), Urmia Uni, 2007. (In Persian).
- [15] Iranian National Building Code, Part 21, Passive Defense, Tehran (Iran), Ministry of Housing and Urban Development, 2012 (In Persian).
- [16] Nourizadeh, A.; Izadifard, R. A. "Performance of Reinforced Concrete Frame Designed According to Iranian Earthquake Code, Subjected to Blast Loading"; Adv. Def. Sci. Tech. 3, 169-181, 2016. (In Persian).
- [17] Standard No. 2800. "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings"; 4th Revision, Building and Housing Research Center, Tehran, 2013, (In Persian).
- [18] Shiravand, M. R.; Shabani, M. J. "Behavior of the Special Moment Frames and Braced Frames in Steel Structures under Blast Loadings"; Adv. Def. Sci. Tech. 2, 109-114, 2013. (In Persian).
- [19] Kamgar, R.; Shams, Gh. R. "Effect of Blast Load in Nonlinear Dynamic Response of the Buckling Restrained Braces Core"; Adv. Def. Sci. Tech. 1, 107-118, 2017. (In Persian).
- [20] FEMA427.; "Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks"; Federal Emergency Management Agency, December 2003, Chapter 4, 1-10.