

تأثیر بار انفجار بر پاسخ دینامیکی غیرخطی هسته فولادی مهاربندهای کمانش ناپذیر

رضا کامگار^{۱*}، غلامرضا شمس^۲

۱ و ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۹۶/۰۱/۲۹، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

چکیده

شناخت رفتار صحیح سامانه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی از قبیل زلزله، باد، انفجار و ... می‌تواند ما را در طراحی بهتر سازه‌ها یاری نماید. مهاربندها یکی از رایج‌ترین سامانه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند و عمده ضعف آن‌ها مربوط به کمانش عضو فشاری و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری عضو است. استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر یکی از راه‌کارهای مقابله با این نقص محسوب می‌شود. در این مقاله و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، پاسخ غیرخطی هسته مهاربند کمانش ناپذیر تحت بارگذاری‌های انفجاری با مدت زمان فاز مثبت متفاوت بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان فاز مثبت سبب افزایش مقادیر بیشینه تنش فشاری، میزان جابه‌جایی ماندگار (پلاستیک) و میزان جذب انرژی در ناحیه فشاری و کاهش مقدار بیشینه تنش کششی در هسته مهاربند کمانش ناپذیر می‌شود. همچنین در ابتدای منحنی بارگذاری انفجاری و به‌ازای تمامی زمان‌های فاز مثبت، میزان جابه‌جایی کلی تقریباً یکسان است.

کلید واژه‌ها: مهاربند کمانش ناپذیر، پاسخ دینامیکی غیرخطی، بار انفجار، منحنی بار- جابه‌جایی.

Effect of Blast Load in Nonlinear Dynamic Response of the Buckling Restrained Braces Core

R. Kamgar*, Gh. R. Shams

Shahrekord University

(Received: 18/04/2017; Accepted: 08/10/2017)

Abstract

Having profound knowledge about the behavior of systems subjected to the external loads such as earthquake, wind, explosion and etc. can assist us to design more resisting structures. Braces are one of the most common lateral resisting systems and their major weakness in compression is buckling which result in a reduction to their loading capacity. Buckling restrained braces (BRB) are one of the strategies to deal with this problem. In this paper, using ABAQUS, the nonlinear dynamic response of the buckling restrained brace subjected to the blast loads with different positive phase durations is studied. Results show that the positive phase duration has no effect on the pattern of stress diagram while by increasing the positive phase duration, the maximum value of the compressive stress of the BRB is increased and the maximum value of the tensile stress is decreased. According to the results, when the blast loads are applied, for all positive phase durations, the total displacement is almost the same while the value of the plastic displacement is more for the blast load with larger positive phase duration. However, if the blast load is considered to be as an impact load, the value of the plastic displacement is less than the other types of loading. For these kinds of loading, more time is spent to reach a persistent plastic displacement. For such impact load and at the beginning of the loading, the total displacement falls sharply. This period of time is less for velocity and acceleration time history diagrams and does not depend on the positive phase duration. In addition, for the blast load with larger positive phase duration, the value of absorbed energy is more in the compression zone.

Keywords: Buckling Restrained Brace, Nonlinear Dynamic Response, Blast Load, Load-Displacement Curve

*Corresponding Author E-mail: Kamgar@eng.sku.ac.ir

۱. مقدمه

شد. در حقیقت، برای در نظر گرفتن اثر بتن محصور کننده هسته، از فنرهایی در گره‌هایی که محل تقاطع المان‌ها است، در دو راستای عمود بر سطح هسته و در راستای طولی هسته استفاده شد. نتایج نشان دهنده انطباق بسیار خوب نتایج با نتایج حاصل از آزمایش را داشت و با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن آنالیز مدل کامل، آنان پیشنهاد دادند که می‌توان مهاربندهای کمانش ناپذیر را به صورت دوبعدی و با استفاده از فنر مدل‌سازی نمود.

رفتار مهاربندهای هم‌محور ضربدری و کمانش ابتدایی ناپذیر قطری توسط پالم و همکاران [۷] و به صورت آزمایشگاهی در یک قاب سه‌بعدی دو طبقه با یک دهانه در هر راستا تحت بارگذاری چند جهتی بررسی شد. آنان نشان دادند که در مهاربند ضربدری خرابی در وسط مهاربند متمرکز می‌شود و مهاربند در ۲ درصد دریافت طبقه گسیخته می‌شود در حالی که مهاربندهای کمانش ناپذیر قطری در ۳/۶ و ۴/۲ درصد دریافت طبقه گسیخته می‌شوند. همچنین آنان نشان دادند که مهاربندهای کمانش ناپذیر به علت تحمل تغییر شکل بیشتر، خرابی بیشتری را نسبت به مهاربندهای ضربدری به اعضای تیر و ستون منتقل می‌کنند.

سامانه‌های سازه‌ای می‌بایست به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن عملکرد خوب تحت زلزله‌های شدید، توانایی بالای اتلاف انرژی همسترزیز پایداری را نیز داشته باشند. آتالیان و چارنی [۸]، سامانه فولادی جدیدی را معرفی نمودند که مقطع آن از چندین مصالح فولادی ساخته شده است. آنان جهت نشان دادن توانایی سامانه معرفی شده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی نمودی غیر خطی استفاده نمودند. رضوی طباطبایی و همکاران [۹]، نیز با توجه به هزینه‌بر و سنگین‌تر بودن سامانه‌های مهاربندی کمانش ناپذیر نسبت به دیگر سامانه‌های مهاربندی، سامانه مهاربند کمانش ناپذیر با طول کاهش یافته که علاوه بر رفع دو مشکل بیان شده، قابلیت جایگذاری راحت‌تری را دارد، معرفی نمودند و رفتار این مهاربند را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در رابطه با مدل نمودن فشار ناشی از انفجار بر روی اشیاء و سازه‌ها انجام شده است [۱۵-۱۰]. طراحی و آنالیز سازه‌ها تحت بار انفجار نیز نیاز به فهم دقیقی از پدیده انفجار و پاسخ دینامیکی المان‌های سازه تحت بار انفجار دارد. در گزارشی، ماهیت انفجار و سازوکار امواج انفجار در هوای آزاد و روش‌های متفاوت جهت تخمین بار انفجار و پاسخ سازه بررسی شده است [۱۶].

تحت بار انفجار سازه‌ها وارد ناحیه غیرخطی شده و با رفتاری شکل پذیر می‌توانند مقدار اتلاف انرژی را به بیشینه مقدار ممکن

امروزه سامانه‌های مهاربندی همگرا، یکی از متداول‌ترین سامانه‌های سازه‌ای برای مقابله با بارهای جانبی در سازه‌های فولادی هستند. با این وجود، آسیب‌های وارده به قاب‌های مهاربندی شده در زمین‌لرزه‌های اخیر، نگرانی‌های زیادی را در مورد عملکرد لرزه‌ای این سامانه‌ها ایجاد نموده است. از آنجا که کمانش عضو فشاری علت رفتار نامطلوبی است که در مهاربندها حین بارگذاری فشاری مشاهده می‌شود، استفاده از مهاربندی که در فشار و کشش رفتار یکسانی داشته باشد، مطلوب طراحان است [۱]. در دو دهه گذشته مطالعات گسترده‌ای به منظور گسترش مهاربندهایی با رفتار الاستو-پلاستیک ایده‌آل انجام شده است و مهاربندهای کمانش ناپذیر^۱ برای دستیابی به این هدف توسعه یافته‌اند. ایده استفاده از عضو فولادی تسلیم شونده برای جذب انرژی بیش از ۳۰ سال پیش مطرح شد. این ایده بر مبنای جاری شدن عضو فشاری پیش از وقوع کمانش با استفاده از پوشش بتنی محصور کننده استوار است [۲ و ۳]. استفاده از این نوع مهاربندها در دهه ۱۹۸۰ میلادی در ژاپن شروع و بعد از زلزله نورث‌ریج (۱۹۹۱) و زلزله کوبه (۱۹۹۵) متداول شد. بعد از آن نیز تحقیقاتی در رابطه با رفتار این نوع مهاربندها منتشر شد.

زهراپی و دهقانی [۴]، اثر استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر در مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌های خرجینی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنان رفتار لرزه‌ای قاب خرجینی، با و بدون استفاده از مهاربند کمانش ناپذیر را تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله ناغان و طبس ارزیابی نمودند. نتایج مطالعات آنان توانایی بالای مهاربندهای کمانش ناپذیر در تقویت لرزه‌ای سازه‌ها را نشان داد. لویز و همکاران [۵]، آزمایش‌هایی را بر روی مهاربندهای کمانش ناپذیر جهت ساخت یک مرکز تحقیقاتی در دانشگاه برکلی انجام دادند. آنان مشاهده نمودند که صلبیت بالای اتصال در صفحات بزرگ اتصال، سبب ایجاد لنگری می‌شود که در طراحی‌های معمول در نظر گرفته نمی‌شود. این شرایط به ویژه زمانی که ورق اتصال کمانش نماید، به شدت تأثیرگذار است. آنان بر این اساس پیشنهاد دادند که در اتصالات مهاربندهای کمانش ناپذیر طراحی بر اساس نیرو-تغییر شکل صورت گیرد. یان و همکاران نیز [۶]، با انجام آزمایش‌هایی بر روی مهاربندهای کمانش ناپذیر دریافتند که از این سامانه می‌توان برای مستهلک نمودن نیروی ارتعاش و رسیدن به ظرفیت مناسب اتلاف انرژی استفاده نمود.

شریعتمدار و عباس‌زاده [۱]، رفتار مهاربند کمانش ناپذیر را تحت اثر بارگذاری حوزه نزدیک بررسی نمودند. در این تحقیق، هسته فولادی به همراه تعدادی فنر به صورت دوبعدی مدل‌سازی

^۱ Buckling-Restrained Brace

بتن وجود دارد. شکل (۱) اجزای تشکیل دهنده مهاربند کمانش‌ناپذیر را بر اساس نوع رفتار آن‌ها حین بارگذاری نشان می‌دهد. این اجزاء عبارتند از: ۱- بخش مقید جاری شونده ۲- بخش مقید ارتجاعی و ۳- بخش نامقید ارتجاعی.



شکل ۱. بخش‌های تفکیک شده مهاربند کمانش‌ناپذیر از لحاظ رفتاری [۱۹]

۳. صحت‌سنجی مدل‌سازی مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار حوزه نزدیک

در این مقاله، از مدل ارائه‌شده در مرجع [۱] که توسط شریعتمدار و عباس‌زاده پیشنهاد شده است، جهت مدل‌سازی هندسه مهاربند کمانش‌ناپذیر و صحت‌سنجی نتایج استفاده می‌شود. شریعتمدار و عباس‌زاده [۱] تطابق نتایج مدل مهاربند کمانش‌ناپذیر مدل‌سازی شده در برنامه ANSYS را با نتایج آزمایشگاهی که در [۲۰] آورده شده است، تحت بارگذاری حوزه نزدیک SAC بررسی نمودند و نشان دادند که نتایج انطباق مناسبی با یکدیگر دارند. در این مقاله در ابتدا تطابق میان روش‌های عددی جهت صحت‌سنجی در مدل‌سازی مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بارگذاری حوزه نزدیک SAC بررسی می‌شود. در نهایت پس از صحت‌سنجی در مدل‌سازی مهاربند کمانش‌ناپذیر، رفتار این نوع مهاربند تحت بار انفجار بررسی می‌شود. شکل (۲) نمونه آزمایشگاهی مهاربند کمانش‌ناپذیر را نشان می‌دهد [۲۰]. مهاربند کمانش‌ناپذیر به صورت دوبعدی مدل‌سازی شده است که در تحقیق حاضر از مدل‌سازی سه‌بعدی به عنوان مرجع مدل‌سازی استفاده می‌شود. مشخصات مهاربند مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است [۱].

جدول ۱. مشخصات اجزای تشکیل دهنده مهاربند [۱]

تنش تسلیم فولاد (MPa)	مدول الاستیک فولاد (GPa)	سطح مقطع هسته (cm ²)	ابعاد مقطع هسته (cm)
۴۱۸/۵	۱۹۶/۲	۲۹/۰۷	۱۵/۳ × ۱/۹

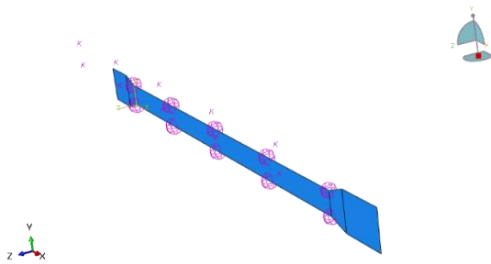
خود برسانند. تاکنون در رابطه با رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار تحقیقی انجام نشده است، بنابراین در این مقاله پاسخ غیرخطی هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار با مدت زمان فاز مثبت متفاوت^۱ و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس [۱۷] بررسی می‌شود. برای این منظور، در ابتدا هندسه و رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر مدل‌شده در برنامه آباکوس با نتایج آزمایشگاهی و عددی تحت بارگذاری حوزه نزدیک پیشنهاد شده توسط گزارش فنی SAC [۱۸] صحت‌سنجی می‌شود. سپس با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای مهاربند کمانش‌ناپذیر، پاسخ مهاربند تحت سه نوع بارگذاری انفجار با مدت زمان فاز مثبت متفاوت اما حداکثر بار و مدت زمان کلی یکسان بررسی می‌شود.

۲. معرفی مهاربند کمانش‌ناپذیر

سامانه‌های مهاربندی هم‌محور، به دلیل سختی بالا، هزینه اندک، فناوری ساده و نصب ارزان در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند. تحقیقاتی که طی دو دهه اخیر انجام شده است، نشان می‌دهد که این مهاربندها در مود فشاری دچار کمانش کلی و زوال در مقاومت و سختی می‌شوند. از این رو تحقیقات گسترده‌ای در جهت به‌سازی این مهاربندها به منظور دستیابی به یک رفتار الاستو-پلاستیک ایده‌آل که در آن مود شکست موجود در سامانه مهاربندی متداول به مود شکل‌پذیر تبدیل شود، انجام شده است. برای رسیدن به این هدف لازم بود تا با استفاده از سازوکار مناسبی از کمانش فشاری مهاربند جلوگیری شود و امکان تسلیم فشاری فولاد فراهم شود. بدین منظور مهاربندهای کمانش‌ناپذیر معرفی شدند. در این مهاربندها، با استفاده از غلاف فلزی و بتن محصور کننده از کمانش کلی مهاربند و در نتیجه کاهش مقاومت و سختی مهاربند جلوگیری شده است. نظر به این که در این حالت پاسخ سازه شکل‌پذیر و میزان جذب انرژی زیاد است و علاوه بر این مهاربند کمانش‌ناپذیر سختی و مقاومت کافی‌ای را در تغییر شکل‌های بزرگ ایجاد می‌نماید، می‌تواند در طراحی سازه‌های جدید و همچنین در به‌سازی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد.

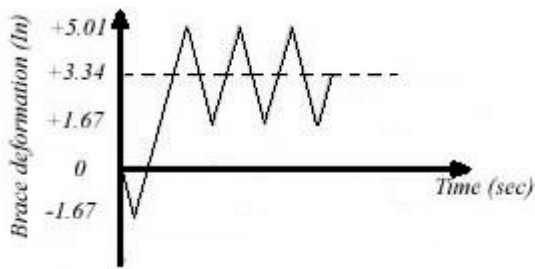
در سال‌های اخیر شکل‌های متفاوتی از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر معرفی شده‌اند که همگی دارای مفهوم مشترک محصورسازی هسته فولادی توسط یک سازوکار خارجی برای جلوگیری از وقوع کمانش هسته هستند. عمومی‌ترین شکل این مهاربندها، شامل یک هسته فولادی است که درون یک غلاف فلزی پر شده از بتن قرار می‌گیرد. در این نوع سامانه، نیاز به فراهم نمودن یک نوع لایه ناپیوستگی مابین هسته فولادی و بتن محصور کننده به منظور اعمال بار به هسته فولادی بدون دخالت

^۱ Positive Phase Duration

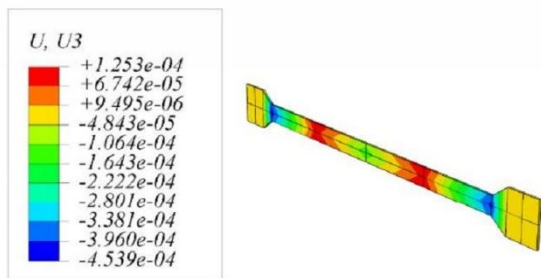


شکل ۴. مدل دوبعدی هسته و فنر مطابق مرجع [۱]

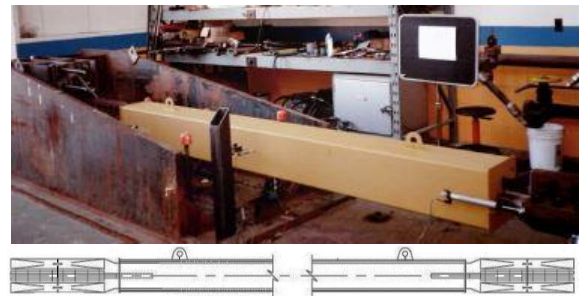
مدل سه بعدی مهاربند کمانش ناپذیر تحت بارگذاری حوزه نزدیک که توسط گزارش فنی SAC [۱۸] پیشنهاد شده است، آنالیز می شود. این بارگذاری شامل یک نیم سیکل مربوط به دو درصد دررفت طبقه، یک نیم سیکل مربوط به چهار درصد دررفت طبقه و سه سیکل کامل مربوط به دو درصد دررفت طبقه است [۱۸] (شکل (۵)). شکل های (۶ و ۷) به ترتیب نشان دهنده مدل سه بعدی هسته مقید شده به وسیله فنر و مدل سه بعدی هسته بدون قید جانبی تحت بارگذاری پیشنهادی پروتکل حوزه نزدیک برنامه تحقیقاتی SAC هستند. شکل (۶) کفایت میزان سختی فنرهای متصل شده به هسته را نسبت به مهاربند مقید نشده (شکل (۷)) نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، هسته دچار کمانش نمی شود. در این دو شکل (شکل های (۶ و ۷))، ابعاد المان ها در راستای طولی هسته همانند مرجع [۱] برابر ۷۵۰ میلی متر و در راستای عرضی هسته برابر ۷۵ میلی متر در نظر گرفته می شوند. همچنین در راستای ضخامت هسته، ضخامت المان ها برابر با ضخامت هسته در نظر گرفته می شوند.



شکل ۵. بارگذاری پیشنهاد شده توسط SAC [۱۸]



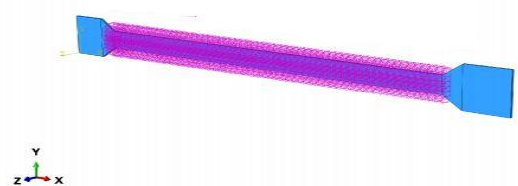
شکل ۶. تغییر مکان مدل سه بعدی هسته مقید شده توسط فنر تحت بارگذاری حوزه نزدیک SAC بر حسب متر



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی و نمای مهاربند کمانش ناپذیر مورد مطالعه [۲۰]

بر اساس جدول (۱)، در این مقاله مصالح فولادی با رفتار الاستو-پلاستیک و با در نظر گرفتن اثر سخت شوندگی کرنش با استفاده از مدل کینماتیک به صورت دوخطی و با نسبت سختی پس از تسلیم به سختی اولیه برابر با ۰/۵ درصد مدل می شوند. علاوه بر این فرض می شود به جای مدل سازی پوشش بتنی، ماده مجزا و غلاف فولادی، تنها از فنرهایی خطی جهت محصور نمودن مهاربند و جلوگیری از کمانش هسته استفاده شود.

با توجه به این که مدل سازی و تحلیل واقعی و کامل مهاربند کمانش ناپذیر (شامل هسته فولادی، ماده مجزا کننده، قطعه محصور کننده و غلاف) زمان بر و هزینه بر است، تحلیل قاب هایی که دارای مهاربند کمانش ناپذیر هستند با استفاده از مدل سه بعدی کامل توجیه پذیر نیست. بنابراین، در این مقاله جهت مدل سازی این گونه مسائل، با در نظرگیری دقت، صرف هزینه و زمان مناسب، از مدل ساده تری که توسط شریعتمدار و عباس زاده ارائه شده است، استفاده می شود [۱]. بنابراین در ابتدا، با استفاده از مدل سازی فنر خطی جهت محصور کردن هسته فولادی به جای تعریف مصالح بتنی، صحت سنجی مدل تحت بارگذاری حوزه نزدیک انجام می شود. برای این منظور، مطابق مرجع [۱] در تمامی گره های واقع بر یک خط واقع در عرض هسته فولادی، یک فنر در جهت خارج از صفحه و یک فنر در راستای عرضی مقطع هسته قرار داده می شود. مقدار سختی محوری فنرها برابر ۱۰۰۰۰ kg/cm در نظر گرفته می شود. شکل های (۳ و ۴) مدل دو و سه بعدی هسته و فنر را نشان می دهند.

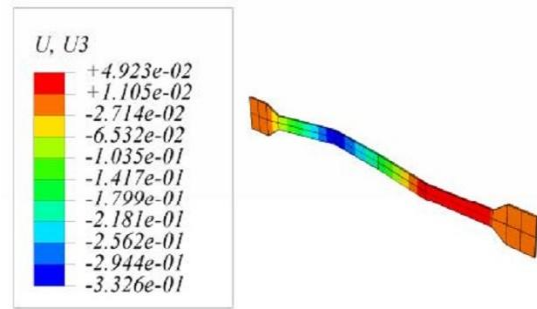


شکل ۳. مدل سه بعدی هسته و فنر در پژوهش حاضر

تدریجی در فشار اتمسفری را ایجاد می‌کند. بنابراین، موج انفجاری دارای دو فاز است. ۱- ازدیاد سریع فشار که افزایش فشار اتمسفری را به دنبال دارد و به نام فاز مثبت^۱ یا فاز فشاری شناخته می‌شود و ۲- کاهش فشار به حد اتمسفری که یک بازگشت به حالت اتمسفری را به دنبال داشته و به نام فاز منفی^۲ یا فاز مکنده شناخته می‌شود. بنابراین، در یک فاصله مشخص از محل انفجار، با گذشت مدت زمانی کوتاه، فشار در آن محل به طور ناگهانی بالا رفته تا اینکه به نقطه اوج خود برسد. بعد از آن، فشار رفته‌رفته میرا شده و به فشار محیط و حتی پایین‌تر از آن تنزل می‌یابد [۲۳-۲۱].

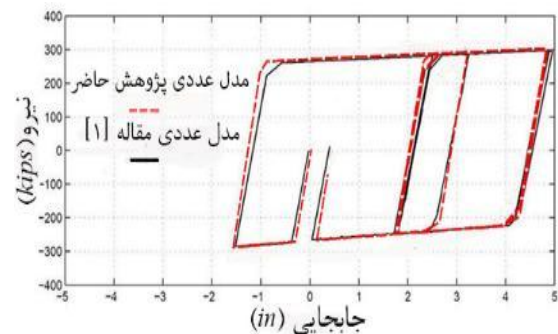
در این مقاله از سه بارگذاری متفاوت انفجاری جهت مطالعه رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار استفاده می‌شود. تفاوت بارهای انفجاری انتخابی در مدت زمان فاز مثبت بار انفجار است. در حقیقت بارهای انتخابی، همگی دارای مدت زمان کلی و حداکثر بار یکسان اما مدت زمان فاز مثبت متفاوت هستند. شکل (۹) نمودار تاریخچه زمانی این بارها را نشان می‌دهد. مقدار این بارها بر حسب نیوتن و در هر زمان دلخواه (بر حسب ثانیه) مابین ۰ تا ۱۰ ثانیه بر اساس روابط (۱) قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که مقدار بیشینه نیروی فشاری که در شروع انفجار ($t=0$ sec) به مهاربند وارد می‌شود، بیش از مقدار بار تسلیم فشاری و کششی هسته مهاربند در نظر گرفته می‌شود تا سبب ورود مهاربند کمانش‌ناپذیر به ناحیه غیرخطی شود. همچنین مقادیر مدت زمان کلی بار انفجار و بیشینه بار انفجار در هر سه حالت یکسان در نظر گرفته می‌شوند تا نتایج قابل مقایسه باشند.

در این مقاله، پارامتر مقیاس (Z) جهت محاسبه اثر انفجار بر مبنای وزن معادل TNT مطابق رابطه $Z = \frac{R}{\sqrt{W}}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه، R فاصله از محل انفجار و W وزن ماده منفجره معادل TNT می‌باشد. لازم به ذکر است که جهت تعیین پارامترهای موج انفجار می‌توان از منحنی‌های ارائه‌شده در دستورالعمل UFC 3-340-02 استفاده نمود که بر اساس آن می‌توان با توجه به محاسبه فاصله مقیاس شده (Z)، پارامترهایی نظیر بیشینه فشار انفجار در فاز مثبت و منفی، مدت زمان فاز مثبت و منفی انفجار، ضربه ناشی از انفجار در فاز مثبت و منفی و ... را تعیین نمود [۲۴]. بنابراین، در این مقاله جهت تعیین بار محوری ناشی از انفجار که در مهاربند کمانش‌ناپذیر قرار گرفته در سازه‌های دلخواه ایجاد می‌شود، مقدار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده انفجاری در فاصله ۲۰ متری از سازه‌ای که توسط مهاربند کمانش‌ناپذیر مقاوم‌سازی شده است، قرار داده می‌شود. فرض بر این است که تحت اثر بار انفجار وارد بر سازه نیروی محوری برابر



شکل ۷. تغییر مکان مدل سه‌بعدی هسته کمانش یافته بدون قید جانبی تحت بارگذاری حوزه نزدیک SAC بر حسب متر

حال به منظور بررسی صحت مدل‌سازی انجام شده، منحنی بار-جابجایی مهاربند کمانش‌ناپذیر مربوط به مقاله مرجع [۱] و نمونه عددی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی در آباکوس با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در شکل (۸)، نمودار قرمز رنگ نشان دهنده نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی پژوهش حاضر و نمودار مشکی رنگ نیز مربوط به مقاله مرجع [۱] است. همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، منحنی حاصل از آنالیز با منحنی ارائه شده در مقاله مرجع [۱] تطابق خوبی دارد و این امر بیان‌کننده مدل‌سازی صحیح هندسه، بار و مصالح است.



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در پژوهش حاضر و نتایج ارائه شده در مقاله [۱]

۴. بارگذاری انفجار

انفجار آزاد شدن ناگهانی، سریع و در مقیاس زیاد انرژی است. موج حاصل از انفجار به صورت فشاری بیشتر از فشار محیط اطراف (وجه پرفشار) به سمت خارج از منبع انفجار توسعه یافته و با گذر زمان از شدت آن کاسته می‌شود. بعد از مدت زمان کوتاهی، فشار پشت جبهه موج ممکن است به زیر فشار محیط تقلیل یابد. در این حین، خلأ جزئی‌ای تشکیل شده و هوا را به درون خود می‌مکد. این امر با تولید بادهایی با مکش زیاد همراه است که آوارها را برای مسافت طولانی به دور از منبع انفجار حمل می‌نمایند. به بیان دیگر موج انفجار در اثر افزایش سریع فشار هوا از نقطه اتمسفری به فشار اوج انفجار حاصل می‌شود و به دنبال آن کاهشی سریع در فشار اتمسفری و سپس افزایشی

^۱ Positive Phase

^۲ Negative Phase

۵. بررسی کفایت سختی فنرها و عدم کماتش هسته در مهاربند کماتش ناپذیر تحت بارهای انفجار انتخابی

در مقاله حاضر برای مش‌بندی المان‌های فولاد از المان‌های استاندارد سه‌بعدی، شش وجهی^۲ هشت‌گره‌ای با ۶ درجه آزادی در هر گره و انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده می‌شود. به منظور بررسی تأثیر مش‌بندی بر روی دقت فرکانس‌های مودهای اول و دوم هسته مقید شده توسط فنر، مدل‌های با ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۶۸، ۱۹۲ و ۲۲۸ المان ساخته و تحلیل فرکانسی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. در تمامی مدل‌ها، مقدار سختی هر فنر برابر با $7/5 \times 10^5$ نیوتن بر متر و فاصله مابین فنرها در راستای طولی هسته برابر با ۲۵ سانتی‌متر است. در این مدل‌ها تنها پارامتر متغیر تعداد المان‌ها است که با ریزتر کردن مش‌بندی، تعداد المان‌ها افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که مطابق مرجع [۱]، اگر سختی فنرها به گونه‌ای باشد که کماتش در هسته رخ ندهد و طول المان‌های (L) مابین دو فنر از مقدار پیشنهاد شده توسط رابطه (۲) کمتر باشد، در این صورت می‌توان با ثابت بودن سختی و تعداد فنرها، المان‌های مابین دو فنر را جهت دستیابی به دقت بالاتر ریزتر نمود.

$$L < \frac{\pi \times t}{\sqrt{\frac{12 \times F_y}{E}}} \quad (2)$$

به گونه‌ای که t ، F_y و E به ترتیب ضخامت، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته هسته مهاربند کماتش‌ناپذیر را نشان می‌دهند. در این مقاله طول هر المان در راستای طولی هسته در مدل با ۱۲ و ۲۲۸ المان به ترتیب برابر با ۲۵ و $1/316$ سانتی‌متر است که بسیار کمتر از مقدار محاسبه شده توسط رابطه (۲) ($37/67$ سانتی‌متر) است.

جدول (۲) مقادیر فرکانس‌های مود اول و دوم هسته مقید شده با فنر و به ازای تعداد المان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، با ریزتر شدن مش‌ها و افزایش تعداد المان‌ها دقت نتایج نیز افزایش می‌یابد به گونه‌ای که تا دو رقم بعد از اعشار جواب‌ها در تعداد ۱۹۲ المان همگرا می‌شوند. در این مقاله، جهت دستیابی به دقت بالاتر، از مدل با ۲۲۸ المان استفاده می‌شود.

با 1765800 نیوتن در سطح مقطع بادبند کماتش‌ناپذیر ایجاد می‌شود.

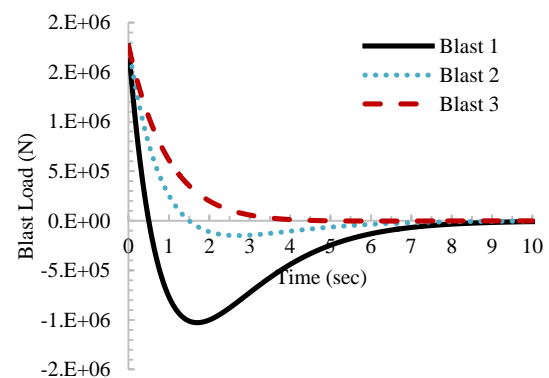
$$P_1(t) = 1765800 \times (1 - 2t) \times e^{-\frac{2t}{\tau}} \quad (\text{Blast 1})$$

$$P_2(t) = 1765800 \times \left(1 - \frac{2t}{3}\right) \times e^{-\frac{2t}{\tau}} \quad (\text{Blast 2}) \quad (1)$$

$$P_3(t) = 1765800 \times (1 - 0.72t) \times e^{-\frac{2t}{\tau}} \quad (\text{Blast 3})$$

با توجه به معادلات (۱)، مدت زمان فاز مثبت این بارها به ترتیب برابر با $t_d = 0.5$ (sec)، $t_d = 1.5$ (sec) و $t_d = 5$ (sec) است. لازم به ذکر است که بر اساس شکل (۹) در حالتی که $t_d = 0.5$ (sec) است، (بار انفجار یک) مدت زمان فاز فشاری کوتاه و مدت زمان فاز کششی بلند است. در این حالت در فاز فشاری به علت زمان کوتاه فاز فشاری، بار به صورت ضربه بر عضو اثر می‌نماید. همچنین در این حالت بارگذاری، بیشترین بار کششی بر سازه اعمال می‌شود. در حالت $t_d = 1.5$ (sec)، مدت زمان فاز فشاری بیشتر از حالت $t_d = 0.5$ (sec) است و علی‌رغم داشتن مقدار حداکثر بار فشاری یکسان نسبت به حالت $t_d = 0.5$ (sec)، در فاز کششی مقدار بار حداکثر کمتری را دارا است. در حالت $t_d = 5$ (sec) نیز مدت زمان فاز فشاری بسیار بیشتر از حالات $t_d = 0.5, 1.5$ (sec) است و علی‌رغم داشتن مقدار حداکثر بار فشاری یکسان نسبت به حالات $t_d = 0.5, 1.5$ (sec)، در فاز کششی مقدار بار حداکثر بسیار ناچیزی را دارا است.

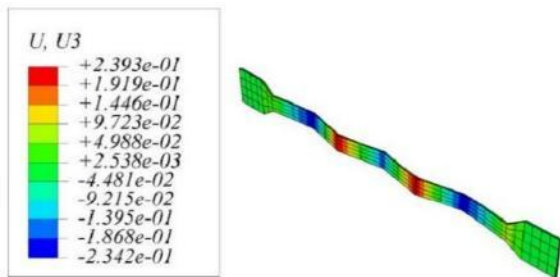
سطح زیر نمودار تاریخچه زمانی بار انفجار در مدت زمان فاز مثبت انفجار تحت عنوان ضربه مشخصه مثبت^۱ بار انفجار نامیده می‌شود. مقدار این کمیت برای این سه بار به ترتیب برابر است با 0.16183×10^6 (N.sec) و $9/0949 \times 10^5$ (N.sec) و $3/8605 \times 10^5$ (N.sec).



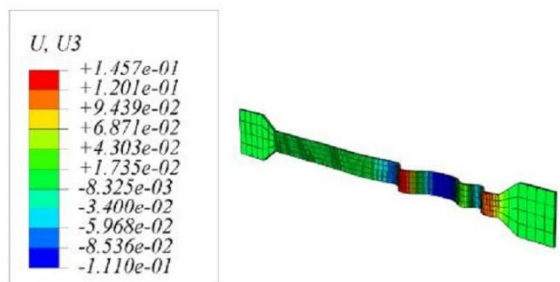
شکل ۹. نمودار تاریخچه زمانی بارهای انفجار با مدت زمان فاز مثبت متفاوت

² Hexahedral

¹ Positive Specific Impulse



شکل ۱۰. تغییر مکان مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده هسته مقید شده (۱۲ المان در راستای طولی هسته) تحت بار انفجار (کمانش هسته) بر حسب متر



شکل ۱۱. تغییر مکان مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده هسته مقید شده (۲۲۸ المان در راستای طولی هسته) تحت بار انفجار (کمانش هسته) بر حسب متر

با توجه به کمانش هسته تحت بار انفجار، چندین آنالیز پی‌درپی انجام می‌شود و تعداد و سختی فنرها به گونه‌ای افزایش می‌یابد تا مدل با ۲۲۸ المان که دقت بالاتری دارد، دیگر دچار کمانش نشود. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) به ترتیب وضعیتی از هسته مقید شده که دیگر امکان کمانش ندارد را به همراه وضعیت کمانش یافته هسته بدون قید جانبی تحت بار انفجار نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که جهت اطمینان از عدم کمانش هسته تحت بار انفجار، تعداد ۱۱۶۲ فنر به سختی هر کدام ۴ مگا نیوتن بر متر در مدل ۲۲۸ المانی استفاده می‌شود. در این مدل، فاصله مابین فنرها برابر با ۵/۲۶۳ سانتی‌متر است که سبب تغییر فرکانس مد اول و دوم سازه به ۳۰۳ و ۸۵۲ هرتز می‌شود و بنابراین، ضرایب میرایی رایلی به ازای میرایی $\xi = 0.105$ برابر با $\alpha = 140/46$ و $\beta = 0.000012$ می‌شوند. در این مقاله از این مدل جهت بررسی رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار استفاده می‌شود.

جدول ۲. تغییرات فرکانس مود اول و دوم با تغییر در تعداد المان‌ها

تعداد المان	فرکانس مود اول (Hz)	فرکانس مود دوم (Hz)
۱۲	۱۷۹/۶۸	۱۸۰/۹۱
۲۴	۱۷۹/۶۰	۱۸۰/۷۴
۴۸	۱۷۸/۷۲	۱۷۹/۸۳
۷۲	۱۷۸/۵۰	۱۷۹/۵۹
۹۶	۱۷۸/۴۰	۱۷۹/۴۹
۱۲۰	۱۷۸/۳۵	۱۷۹/۴۴
۱۶۸	۱۷۸/۳۰	۱۷۹/۳۹
۱۹۲	۱۷۸/۲۸	۱۷۹/۳۶
۲۲۸	۱۷۸/۲۸	۱۷۹/۳۶

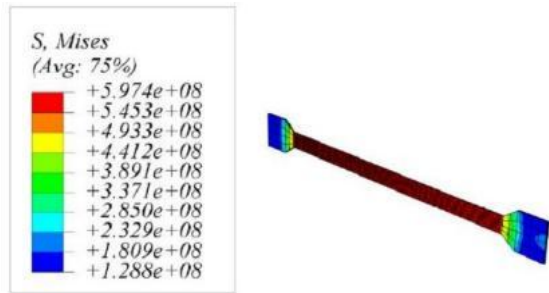
در تحلیل دینامیکی سازه‌ها خاصیت میرایی از اهمیت بالایی برخوردار است و به علت محدود بودن شناخت ما از میرایی، مؤثرترین و کاراترین روش برای در نظر گرفتن میرایی در تحلیل سازه‌ها، انتخاب میرایی به صورت میرایی رایلی است [۲۵]. بنابراین، ضرایب استهلاک رایلی به ازای میرایی ۵ درصد مطابق جدول (۳) برای هر دو مدل مورد بررسی (مدل با ۱۲ و ۲۲۸ المان) مطابق مرجع [۲۵] محاسبه می‌شوند.

جدول ۳. ضرایب میرایی رایلی در مدل با ۱۲ و ۲۲۸ المان

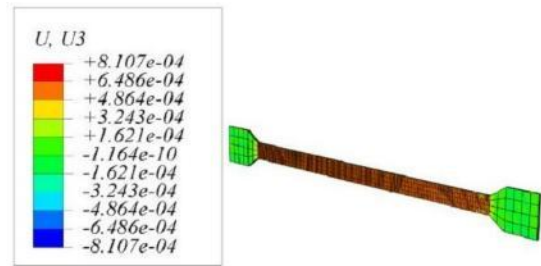
تعداد المان	ضریب α	ضریب β
۱۲	۵۶/۶	۵۶/۲۲
۲۲۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴

مدل‌های مورد بررسی (مدل‌های با ۱۲ و ۲۲۸ المان) تحت بار انفجار (Blast I) قرار می‌گیرند. نتایج (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) نشان می‌دهند، با این‌که طول المان‌ها در هر دو مدل بسیار کمتر از طول ارائه شده توسط رابطه (۲) است، اما چون سختی فنرها به اندازه کافی بزرگ نیست، در هر دو مدل کمانش رخ می‌دهد. بنابراین، جهت مدل‌سازی مهاربند کمانش‌ناپذیر به روش ارائه‌شده در [۱] تحت بار انفجار نسبت به بار حوزه نزدیک SAC نیاز به فنرهایی با سختی بیشتر احساس می‌شود. همچنین با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، مشخص است که با ریزتر نمودن المان‌ها، میزان بیشینه جابه‌جایی خارج از صفحه هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر ۳۹ درصد کاهش یافته است و این نشان می‌دهد که با ریزتر نمودن المان‌ها، می‌توان سختی فنرها را جهت محدود نمودن کمانش خارج از صفحه کاهش داد. به بیان دیگر، سختی فنرها با طول المان رابطه مستقیم دارد.

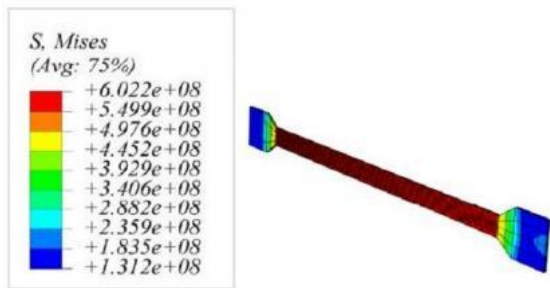
مقدار جذب انرژی (مساحت زیر نمودار بار- جابه‌جایی) در ناحیه فشاری نسبت به Blast 3 کمتر است.



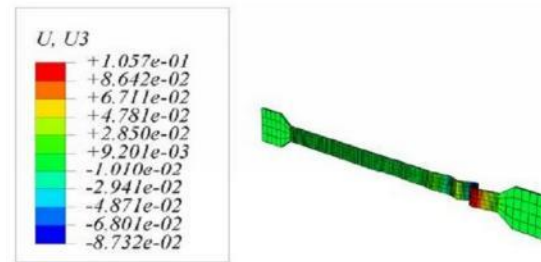
شکل ۱۳. تغییرات تنش بر اساس معیار فون میسز در هسته تحت بار انفجار 1 بر حسب پاسکال



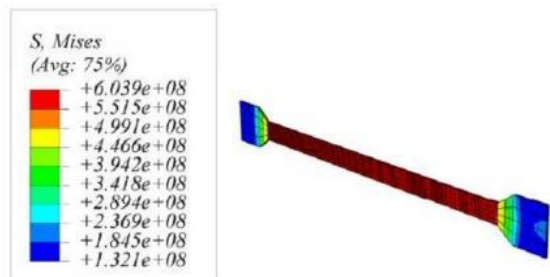
شکل ۱۲. تغییر مکان مدل سه‌بعدی هسته مقید شده به وسیله فنر تحت بارگذاری انفجار بر حسب متر



شکل ۱۴. تغییرات تنش بر اساس معیار فون میسز در هسته تحت بار انفجار 2 بر حسب پاسکال



شکل ۱۳. تغییر مکان مدل سه‌بعدی هسته بدون قید جانبی تحت بارگذاری انفجار بر حسب متر

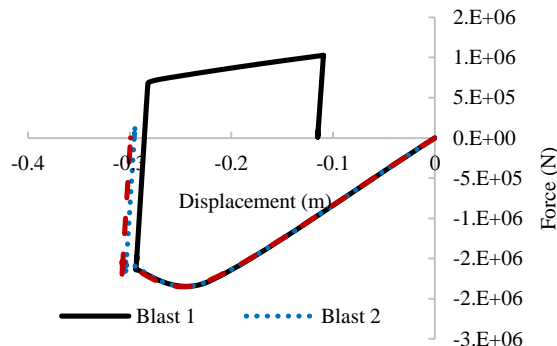


شکل ۱۵. تغییرات تنش بر اساس معیار فون میسز در هسته تحت بار انفجار 3 بر حسب پاسکال

۶. بررسی رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار ناشی از انفجار

در این قسمت، هسته مهاربند کمانش‌ناپذیری که توسط فنر مقید شده است، تحت بار انفجار با مدت زمان فازهای مثبت متفاوت قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۶-۱۴) نشان دهنده تغییرات تنش فون- میسز در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بارهای انفجاری متفاوت هستند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که الگوی تغییرات تنش تحت هر سه نوع بار، مستقل از مدت زمان فاز مثبت انفجار تقریباً یکسان است. همچنین با توجه به این شکل‌ها، تحت هر سه نوع بار، هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر تسلیم می‌شود. شکل (۱۷) نیز منحنی بار- جابه‌جایی هسته مقید شده را تحت این بارها نشان می‌دهد. مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی که نشان دهنده میزان انرژی جذب شده است، برای بارهای انفجاری نوع اول، دوم و سوم به ترتیب برابر است با $4/63 \times 10^5$ (joule)، $3/2581 \times 10^5$ (joule) و $3/3134 \times 10^5$ (joule).

با توجه به شکل (۱۷)، اگر چه حداکثر بار برای تمامی حالات بارگذاری تقریباً در یک میزان جابه‌جایی (تقریباً ۰/۲۲۵ متر) رخ می‌دهد، اما میزان جابه‌جایی ماندگار در بار انفجاری که زمان فاز مثبت بیشتری دارد (Blast 3) بیشتر است. همچنین هر اندازه میزان زمان فاز مثبت بار انفجار بیشتر باشد (Blast 3)، میزان جذب انرژی بیشتری در ناحیه فشاری رخ خواهد داد. در حقیقت در مورد Blast 1 که مدت زمان فاز مثبت برابر با ۰/۵ ثانیه را داراست و همانند باری ضربه‌ای در ناحیه فشاری عمل می‌کند،

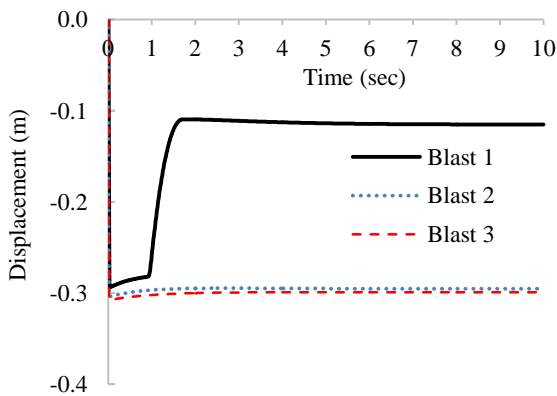


شکل ۱۷. منحنی بار- جابه‌جایی مدل سه‌بعدی هسته مقید شده تحت بارگذاری انفجار

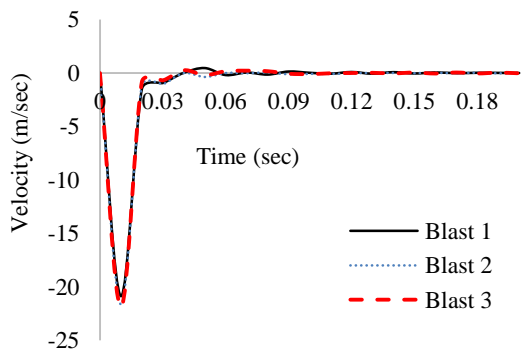
جدول (۴) نیز مقادیر بیشینه تنش کششی و تنش فشاری در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر و زمان‌های رخ دادن آن‌ها را تحت بارهای انفجار نشان می‌دهد. جدول (۴) نشان می‌دهد، با افزایش مدت زمان فاز مثبت انفجار، در حالی که بیشینه مقدار تنش فشاری افزایش می‌یابد، بیشینه مقدار تنش کششی کاهش می‌یابد. مقادیر بیشینه تنش اصلی کششی در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر، تحت بارهای انفجار یک، دو و سه به ترتیب برابر هستند با $۳۷۰/۶$ ، ۱۳۳ و ۱۳۳ مگا پاسکال در حالی که بیشینه تنش اصلی فشاری در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بارهای انفجار یک، دو و سه به ترتیب برابر هستند با $۶۴۱/۷$ ، $۶۴۷/۳$ و

جدول ۴. مقادیر بیشینه تنش‌ها در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بارگذاری‌های انفجاری متفاوت

بارگذاری	بیشینه مقدار	زمان وقوع بیشینه	بیشینه مقدار	زمان وقوع بیشینه
	تنش فشاری در راستای عضو (MPa)	تنش فشاری در راستای عضو (sec)	تنش کششی در راستای عضو (MPa)	تنش کششی در راستای عضو (sec)
Blast 1	۶۳۵/۸	۱/۷	۳۵۶/۹	۰/۰۱۵
Blast 2	۶۴۱/۴	۲/۶۵	۱۲۴/۱	۰/۰۱۵
Blast 3	۶۴۳/۶	۶/۲۹	۶۸/۸۳	۰/۰۱۵



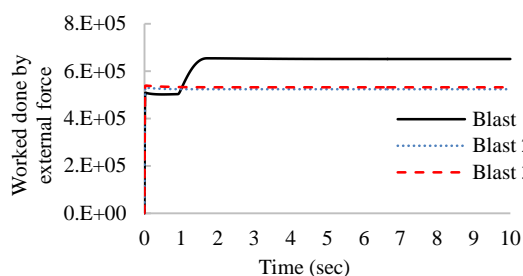
شکل ۱۸. نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی در نقطه اعمال بار انفجار



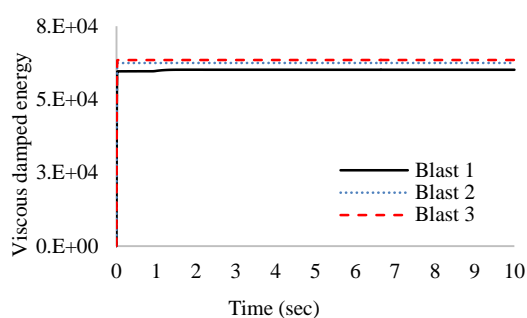
شکل ۱۹. نمودار تاریخچه زمانی سرعت در نقطه اعمال بار انفجار

مشخص است که مقدار بیشینه تنش کشش هسته زمانی که بار به صورت ضربه بر عضو اثر می‌نماید بیشترین مقدار را دارا است.

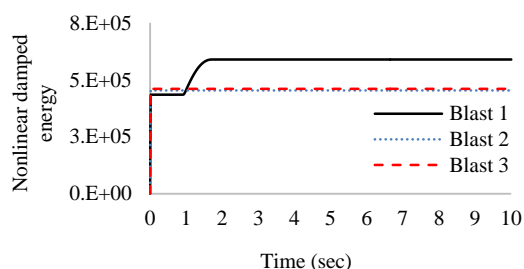
شکل‌های (۲۰-۱۸) نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی، سرعت و شتاب نقطه اعمال بار را در هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، اگر چه در ابتدای بارگذاری تقریباً میزان جابه‌جایی کلی یکسانی را برای هر سه بار انفجاری شاهد هستیم، در نهایت میزان جابه‌جایی ماندگار دربار انفجاری که مدت زمان فاز مثبت بیشتری دارد (Blast 3) بیشتر است. علاوه بر این اگر میزان زمان فاز مثبت بار انفجار کوچک باشد (Blast 1) و همانند باری ضربه‌ای بر عضو اثر نماید، میزان جابه‌جایی ماندگار (پلاستیک) عضو در مقایسه با دیگر بارها کمتر خواهد بود و روند استهلاک جابه‌جایی و رسیدن به زمانی که جابه‌جایی ظماندگار در سامانه ایجاد شود (تقریباً ۶ ثانیه) بیشتر خواهد بود. برای این‌گونه بارهای ضربه‌ای، میزان جابه‌جایی کلی سامانه در ابتدای بارگذاری به شدت نزول می‌کند. این مدت زمان برای نمودارهای تاریخچه زمانی سرعت (تقریباً ۰/۰۹ ثانیه) و شتاب (تقریباً ۰/۲ ثانیه) بسیار کوچک‌تر خواهد بود و وابستگی به مدت زمان فاز مثبت بار انفجار ندارد (شکل‌های ۱۹ و ۲۰).



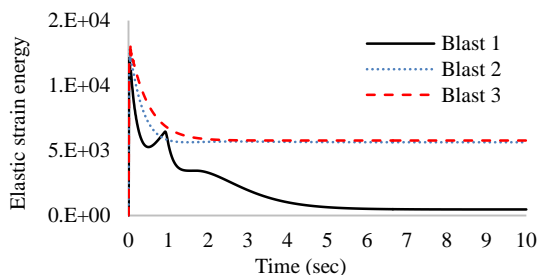
شکل ۲۲. نمودار تاریخچه زمانی کار انجام شده توسط انفجار



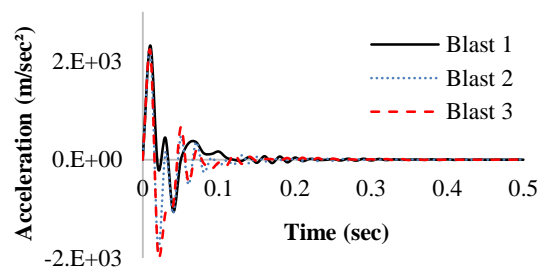
شکل ۲۵. نمودار تاریخچه زمانی انرژی مستهلک شده ویسکوز در مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار



شکل ۲۳. نمودار تاریخچه زمانی انرژی مستهلک شده غیر خطی در مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار

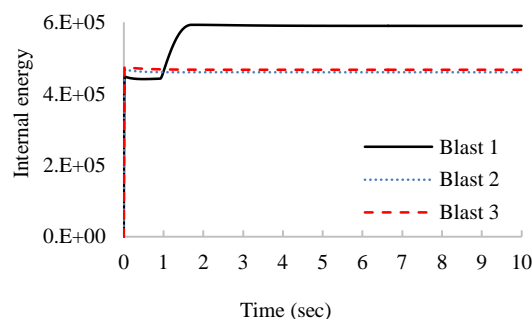


شکل ۲۴. نمودار تاریخچه زمانی انرژی کرنشی الاستیک در مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار



شکل ۲۰. نمودار تاریخچه زمانی شتاب در نقطه اعمال بار انفجار

شکل‌های (۲۱-۲۵) نیز به ترتیب نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی داخلی^۱، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی^۲ (انفجار)، انرژی مستهلک شده غیرخطی^۳، انرژی کرنشی الاستیک^۴ و انرژی مستهلک شده ویسکوز^۵ (همگی بر حسب ژول) را نمایش می‌دهند. همان‌گونه که از شکل‌های (۲۱-۲۳) مشخص است، نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی داخلی، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی و انرژی مستهلک شده غیرخطی رفتار تقریباً مشابهی را تحت بارهای انفجار با زمان فاز مثبت متفاوت از خود نشان می‌دهند. در این نمودارها هر چه مدت زمان فاز مثبت انفجار کمتر باشد (با فرض ثابت ماندن مدت زمان کل انفجار و بیشینه بار فشاری یکسان)، مقدار انرژی ابتدایی و کار انجام شده کمتری را دارد و اگر مدت زمان فاز مثبت انفجار خیلی کوچک باشد و عملاً بار به صورت ضربه‌ای بر عضو اثر نماید (Blast 1)، مقدار انرژی و کار انجام شده انتهایی بیشتری را داراست. در رابطه با انرژی‌های کرنشی الاستیک و انرژی مستهلک شده ویسکوز (شکل‌های ۲۴ و ۲۵)، هر چه مدت زمان فاز مثبت انفجار کمتر باشد، در تمامی نمودار تقریباً مقدار انرژی کمتری مشاهده می‌شود و بالعکس.



شکل ۲۱. نمودار تاریخچه زمانی انرژی داخلی مهاربند کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار

¹ Internal Energy

² Work Done by External Forces

³ Nonlinear Damped Energy

⁴ Elastic Strain Energy

⁵ Viscous Damped Energy

۷. نتیجه‌گیری

ویسکوز، هر چه مدت زمان فاز مثبت انفجار کمتر باشد، تقریباً در کل زمان تحلیل مقدار انرژی کمتر است و بالعکس.

۸. مراجع

- [1] Shariatmadar, H.; Abbas Zadeh, H. "Modeling of Buckling Restrained Braces Subjected to Dynamic Loads"; J. Model. Eng. 2009, 18, 1-11 (In Persian).
- [2] Kelly, J. M.; Skinner, R. I.; Heine, A. J. "Mechanism of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures"; Bull. N.Z. Natl. Soc. Earthqu. Eng. 1972, 5, 63-88.
- [3] Skinner, R. I.; Kelly, J. M.; Heine, A. J. "Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures"; Earthqu. Eng. Struct. Dyn. 1974, 3, 287-296.
- [4] Zahrai, S. M.; Dehghani Ranani, M. "Using Buckling Restrained Braces in Seismic Retrofit of Khorjini Frames"; Univ. Coll. Eng. 2005, 39, 299-310 (In Persian).
- [5] Lopez, W. A.; Gwie, D. S.; Saunders, C. M.; Lauck, T.W. "Lessons Learned from Large-Scale Tests of Unbounded Braced Frame Sub Assemblages"; Proc. 71st Annual Convention, Struct. Eng. Association of California, Sacramento, California, 2002.
- [6] Yan, H.; Pan, P.; Wang, P. Q.; Makino, X. "Tests of Buckling-Restrained Braces Using Low-Yield Point Steel as Core Material"; A. M. M. 2012, 166-169, 3159-3165.
- [7] Palmer, K. D.; Roeder, C. W.; Lehman, D. E.; Okazaki, T.; Shield, C. "Experimental Performance of Steel Braced Frames Subjected to Bidirectional Loading"; J. Struct. Eng. 2013, 139, 1274- 1284.
- [8] Atlayan, O.; Charney, F. A. "Hybrid Buckling-Restrained Braced Frames"; J. Constr. Steel Res. 2014, 96, 95- 105.
- [9] Razavi Tabatabaei, S. A.; Mirghaderi, S. R.; Hosseini, A. "Experimental and Numerical Developing of Reduced Length Buckling-Restrained Braces"; J. Eng. Struct. 2014, 77, 143- 160.
- [10] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves"; J. Appl. Phys. 1955, 26, 766-775.
- [11] Henrych, J.; Major, R. "The Dynamics of Explosion and its Use"; Elsevier, Amsterdam, 1979.
- [12] Kingery, C. N.; Bulmash, G. "Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Blast and Hemispherical Surface Blast"; Technical Report ARBRL-TR-02555, Aberdeen Proving Ground, MD, Ballistic Research Laboratories, 1984.
- [13] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Digital Press, 1994.
- [14] Amini, M.; Shojaei, S.; Rostami, S. "Inelastic Dynamic Analysis of Structures Under Blast Loads Using Generalized B-Spline Method"; Asian J. Civil Eng. 2015, 16, 183-202.
- [15] Peyman, S.; Sonbolestan, S. H. "Analysis of Underground Tunnels in Explosion Loading Based on Peak Particle Velocity"; Adv. Def. Sci. Tech. 2016, 1, 45-50 (In Persian).
- [16] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview"; Ramsay E. J. Struct. Eng. 2007, 7, 76-91.
- [17] ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User Manual, Version 6.14, 2016.
- [18] Black, C. J.; Markis, N.; Aiken, I. "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces"; Technical Rep. No. PEER Report 2002/8, Pacific Earthquake Engineering Research

در این مقاله پاسخ غیرخطی هسته در مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تحت بارگذاری‌های انفجار با مدت زمان فاز مثبت متفاوت با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مدت زمان فاز مثبت بار انفجار، بیشینه مقدار تنش فشاری در راستای عضو افزایش می‌یابد در حالی که بیشینه مقدار تنش کششی در راستای عضو کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مطابق نتایج حاصله، بر اساس رویکرد طراحی، هسته مهاربند کمانش‌ناپذیر می‌بایست بر اساس مقدار بیشینه تنش اصلی فشاری طراحی گردد. هسته در هر سه حالت بارگذاری مربوط به انفجار، تحت کشش تسلیم نشده در حالی که تحت فشار تسلیم شده است. با افزایش زمان فاز مثبت بار انفجار، مقدار بیشینه تنش اصلی فشاری افزایش یافته در حالی که مقدار بیشینه تنش کششی در ابتدا کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. مشخص است که مقدار بیشینه تنش کششی هسته زمانی که بار به صورت ضربه بر عضو اثر می‌نماید بیشترین مقدار را داراست.

نتایج حاصله نشان می‌دهند که برای بارهای انفجاری با زمان فاز مثبت متفاوت اما بیشینه بار انفجاری و زمان کلی انفجار یکسان، میزان جابه‌جایی کلی تقریباً یکسان است در حالی که در پایان تحلیل میزان جابه‌جایی ماندگار (پلاستیک) در بار انفجاری‌ای که زمان فاز مثبت بیشتری دارد بیشتر است. اگر بار انفجار به صورت باری ضربه‌ای بر عضو اثر نماید، میزان جابه‌جایی ماندگار (پلاستیک) عضو در مقایسه با دیگر بارها کمتر خواهد بود و روند استهلاک جابه‌جایی و رسیدن به زمانی که جابه‌جایی ماندگار در سامانه ثابت می‌شود، بیشتر خواهد بود. برای اینگونه بارهای انفجاری ضربه‌ای میزان جابه‌جایی کلی سامانه در ابتدای بارگذاری به شدت نزول می‌کند. این مدت زمان برای نمودارهای تاریخچه زمانی سرعت و شتاب بسیار کوچک‌تر خواهد بود و وابستگی به مدت زمان فاز مثبت بار انفجار ندارد. نتایج نشان می‌دهند که هر اندازه میزان زمان فاز مثبت بار انفجار بیشتر باشد، میزان جذب انرژی بیشتری در ناحیه فشاری رخ می‌دهد. نمودارهای تاریخچه زمانی مربوط به انرژی داخلی، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی (انفجار) و انرژی مستهلک شده غیر خطی رفتار مشابهی را تحت بارهای انفجار با زمان فاز مثبت متفاوت از خود نشان می‌دهند. در این نمودارها هر چه مدت زمان فاز مثبت انفجار کمتر باشد (با فرض ثابت ماندن مدت زمان کل انفجار و بیشینه بار انفجار)، مقدار انرژی اولیه کمتر است و اگر مدت زمان فاز مثبت انفجار خیلی کوچک باشد و عملاً بار به صورت ضربه‌ای بر عضو اثر نماید، مقدار انرژی نهایی بیشتر است. در رابطه با انرژی‌های کرنشی الاستیک و انرژی مستهلک شده

- [23] Iranian National Building Code, Part 21, Passive Defense, Tehran (Iran), Ministry of Housing and Urban Development, 2012 (In Persian).
- [24] Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02. "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; U.S. Department of Defense, 2014.
- [25] Chopra, A. K. "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering"; Prentice-Hall, 2012.
- [26] Buchan, P. A.; Chen, F. J. "Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures - A State-of-the-Art Review"; Composites Part B: Engineering 2007, 38, 509-522.
- Center, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif. 2002.
- [19] Dehghan, F. "Seismic Performance and Behavior Coefficient of Reinforced Concrete Frame with Buckling-Restrained Braces"; M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010 (In Persian).
- [20] Black, C.; Aiken, I. D.; Makris, N. "Component Testing, Stability Analysis, and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces (TM)"; Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002.
- [21] De Silva, C. W. "Vibration and Shock Handbook"; CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2005.
- [22] Indian Standard Criteria for Blast Resistant Design of Structures for Explosions Above Ground (3rd Report), 1993.