

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، (پیاپی ۲۱): صص ۱-۱۲

## ارزیابی کاهش خسارت در سازه‌های فولادی تحت تأثیر انفجار با استفاده از مواد هوشمند

ناصر الوندی<sup>۱</sup>، سید یحیی روحانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲

### چکیده

در این مقاله، رفتار سازه‌های فولادی در اثر وقوع انفجار در نزدیکی آنها بررسی می‌شود. بدین منظور، قاب خمشی فولادی با ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۵ طبقه مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دار فوق‌الاستیک، تحت اثر بارگذاری انفجار و به صورت دو بعدی به کمک نرم‌افزار opensees تحلیل شده و سپس عملکرد سازه تحت اثر این بارگذاری ارزیابی می‌شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد، استفاده غیر مستقیم از این آلیاژ در سیستم‌های مهاربندی (هیبریدی) برای دستیابی به خواص بازگرداندگی و ظرفیت استهلاک انرژی بهتر در سازه به سبب کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و استفاده از فولاد به منظور بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ و با هدف کاهش تغییر شکل پسماند سازه‌ها و در نتیجه، کاهش هزینه‌های بازسازی آن پس از انفجار، سیستم ترکیبی فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی (hybrid) جایگزین مناسبی بوده و می‌تواند بسیار سودمند باشد.

**کلیدواژه‌ها:** ارزیابی عملکرد در انفجار، سیستم جذب انرژی، آلیاژ هوشمند، مقاوم‌سازی، قاب خمشی مهاربندی شده، دفاع غیرعامل.

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی امیر کبیر واحد تفرش [alvandishar@hotmail.com](mailto:alvandishar@hotmail.com) نویسنده مسئول

۲- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

## ۱- مقدمه

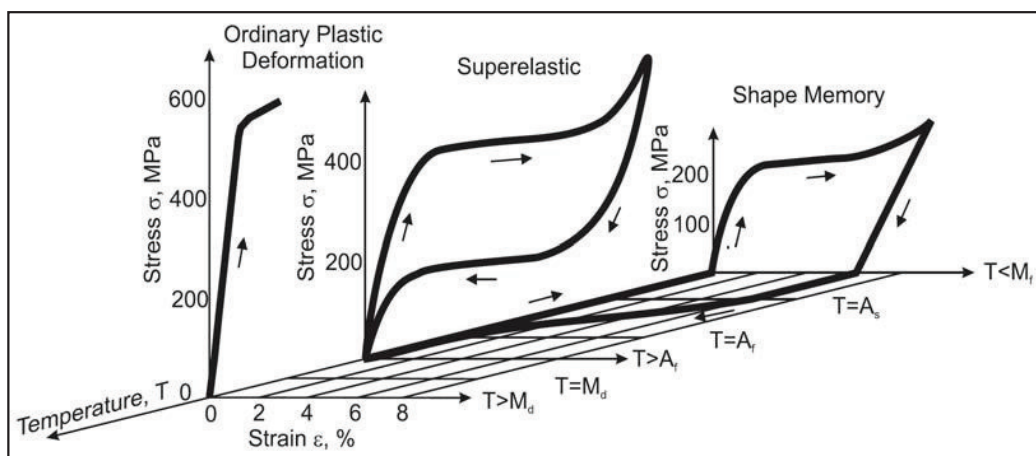
انفجار حاصل، آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انواع مختلف بمب یا در اثر انفجار هسته‌ای باشد. واحد TNT معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می‌شود. زمانی که ماده منفجره از نوع TNT نباشد، معادل آن را می‌توان با استفاده از ضرایب قیدشده در جدول به دست آورد [۳]. از مشخصه‌های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم (بین چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه) اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می‌گیرد، انرژی به صورت ناگهانی آزاد می‌شود.

اثر این آزاد شدن انرژی را می‌توان به دو بخش تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در زمین و هوا تقسیم کرد که در این مقاله، فقط بخش دوم مورد توجه قرار می‌گیرد. امواجی از انفجار که در هوا منتشر می‌شوند، عامل اصلی تخریب سازه هستند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و به سازه برخورد می‌کنند. در اثر بازتاب این امواج بر روی سطح سازه، فشار حاصل از آنها افزایش می‌یابد. همچنین بخشی از امواج هوایی از طریق درها، پنجره و بازشوها به داخل سازه نفوذ کرده و اعضای داخلی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این جریان، همه محیط قابل دسترسی سازه تحت اثر فشار موج قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، امواجی که با زمین برخورد می‌کنند، در مسیر حرکت خود، مولکول‌های هوا را فشرده کرده و یک فشار کلی محیطی (فشار اتفاقی) ایجاد می‌نمایند.

## ۲- آلیاژ حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار، دسته‌ای از آلیاژهای فلزی هستند که بعد از دادن تغییرشکل‌های بزرگ، توانایی برگشت به شکل اولیه خود را دارند. این برگشت به حالت اولیه می‌تواند در اثر اعمال حرارت یا باربرداری باشد. در حالت اول، پدیده برگشت‌پذیری را اثر حافظه‌داری SME و در حالت دوم، که برگشت‌پذیری در نتیجه باربرداری رخ می‌دهد، اثر سوپراالاستیک نامگذاری شده است [۴، ۵]. این قابلیت برگشت‌پذیری شکل، به خاطر ساختار کریستالی منظم بین دو فاز آستنایت و مارتنسایت می‌باشد، که در اثر اعمال حرارت یا اعمال تنش، ماده تبدیل فاز مارتنزیتی خواهد داشت. دیگر جنبه‌های ریز ساختار ماده حافظه‌دار، مانند بافت ذرات و جابجاشدگی ذرات، بر خواص این مواد تأثیر می‌گذارد و پروسه برگشت شکل را بهبود می‌دهند. در مقایسه بزرگ و ماکرو، مواد سوپراالاستیک حافظه‌دار، در بارهای سیکلی، هیستریزیسی همانند شکل (۱) خواهند داشت. این نمودار هیستریزیس نشان‌دهنده بازگرداندگی شکل اولیه و خاصیت استهلاک انرژی در این مواد می‌باشد. کمل کرنش‌های محوری بیش از ۶ تا ۹ درصد و بخش زیادی از کرنش‌های محوری با مقادیر بیشتر از ۹ درصد قابل برگشت می‌باشند. وجود این خواص منحصربه‌فرد در مواد حافظه‌دار باعث توسعه تنوع کاربردهای این مواد در دو دهه اخیر شده است.

خاصیت دیگری که باید به آن اشاره کرد، ترموالاستیک بودن تبدیل فاز مارتنزیتیک می‌باشد که نشان می‌دهد، رفتار آلیاژهای حافظه‌دار علاوه بر تنش و کرنش به درجه حرارت نیز وابسته می‌باشد.



شکل ۱- رابطه تنش، کرنش و دما به صورت سه‌بعدی در رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار [۶]

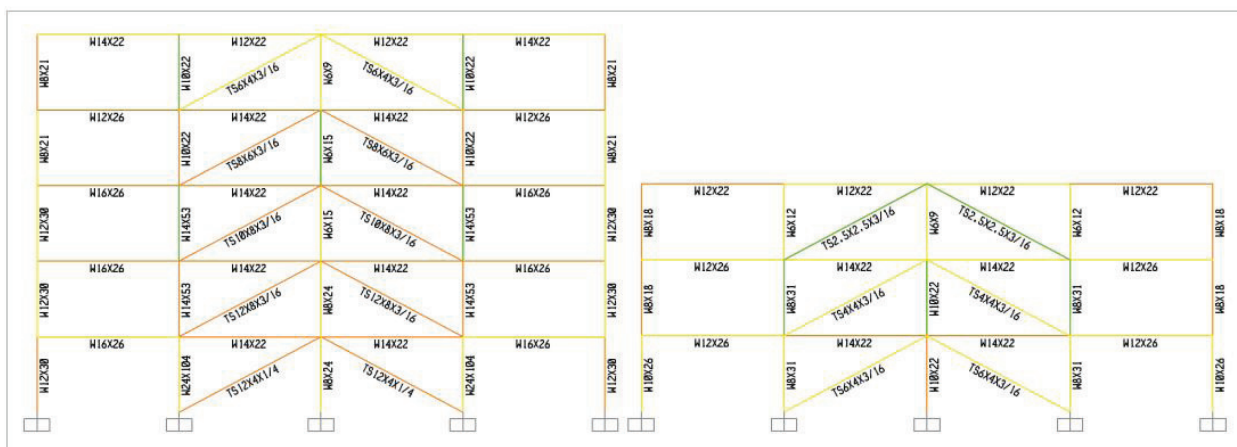
ستون‌ها نیز ۶ متر لحاظ شده است. مهاربندها در دهانه‌های میانی قاب‌ها قرار داشته و به صورت تک‌قطری می‌باشند. اتصال تیرها به ستون‌ها در قاب‌های میانی به صورت صلب و اتصال پای ستون‌ها به پی گیردار می‌باشد. کف سازه نیز از نوع دال با تیرهای مختلط فرض شده است. از آنجا که رفتار غیرالاستیک قاب‌های خمشی مهاربندی شده در برابر بارهای جانبی تا حدودی وابسته به رفتار اعضای مهاربندی است و با توجه به محدودیت‌های کاربردی، مدول الاستیسیته پایین و ناحیه سخت‌شدگی ثانویه در آلیاژ حافظه‌دار شکلی، به‌جای استفاده به‌عنوان اعضای اصلی سیستم‌های باربر جانبی، به‌عنوان اعضای سیستم ثانویه بازگرداننده (Re-centering device) استفاده شده است. طراحی متعارف سازه به کمک نرم‌افزار رایج طراحی ساختمان‌های طبقاتی، Sap2000 [۸]، مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱] و تحت اثر بارهای مرده، زنده و زلزله که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲] محاسبه گشته‌اند، انجام شده است. لازم به ذکر است، بارهای ناشی از زلزله با این فرض به دست آمده‌اند که سازه در شهر تهران قرار دارد و بر روی زمینی با خاک نوع I بنا شده است.

به‌منظور به حساب آوردن احتمال تغییرات اتفاقی توزیع جرم و سختی از یک سو و نیروی ناشی از مؤلفه پیچشی زلزله از سوی دیگر، مطابق آئین‌نامه زلزله ایران در ساختمان‌های بالاتر از ۵ طبقه یا بلندتر از ۱۸ متر باید اثرات پیچش تصادفی لحاظ گردد؛ یعنی فرض می‌شود مرکز جرم در جای محاسبه اعمال نشود. بنا به پیشنهاد آئین‌نامه باید محل اعمال بار زلزله به میزان ۰.۰۵ بعد ساختمان در جهت عمود بر زلزله جابجا شود. یک پیچش تصادفی مثبت و یک پیچش تصادفی منفی محتمل است. در سیستم دوگانه، ۱۰۰ درصد زلزله به مهاربندها و ۲۵ درصد زلزله به

طبیعت ترموالاستیک چنین است که کاهش در درجه حرارت آلیاژ حافظه‌دار، اثری معادل با افزایش تنش خواهد داشت؛ چون رشد و گسترش صفحات مارتنزیتی باعث افزایش تنش درونی خواهد شد. [۷] به همین خاطر است که رفتارهای حافظه‌داری و فوق‌الاستیک در دماهای مختلف دیده می‌شود. در دمایی بالاتر از  $M_d$ ، تنش ایجاد تبدیل مارتنزیتی در سطحی بالاتر از تنش بحرانی حدلغزش می‌باشد و در نتیجه، به خاطر طبیعت ترموالاستیک مواد حافظه‌دار، در این حالت ( $T > M_d$ )، تغییر شکل پلاستیک ماندگار رخ می‌دهد. این پدیده با نام تغییر شکل پلاستیک معمولی، در شکل (۱) دیده می‌شود. این اثرات دما در کاربردهای مواد حافظه‌دار، وقتی که شامل محدوده وسیعی از تغییرات دما می‌شود، باید مورد توجه قرار گیرد. در دمایی بالاتر از  $A_f$  می‌بینیم که حالت نیمه‌کشسانی روی می‌دهد که در شکل (۱) نشان داده شده است. در دماهای بالاتر از  $M_d$  هیچ فلز سخت و شکننده فشاری شکل نمی‌گیرد و در عوض، فاز اصلی در تغییر شکل کشسانی معمولی دیده می‌شود.

### ۳- صورت مسئله

برای بررسی رفتار سازه‌های فولادی به هنگام وقوع انفجار بیرونی و در نزدیکی آن‌ها، قاب‌های فولادی با ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۵ طبقه تحت اثر بار انفجاری قرار داده می‌شود. سیستم باربری جانبی سازه در قاب‌های بیرونی سازه و در هر دو جهت  $x$  و  $y$  در دهانه‌های میانی به صورت قاب خمشی به همراه مهاربند انتخاب شده است. پلان در نظر گرفته‌شده برای این مقاله، مربعی شکل و به طول ۲۴ متر می‌باشد. فاصله قاب‌ها از یکدیگر همگی ۶ متر فرض شده است. ارتفاع طبقات ۳،۲ متر و فاصله آکس به آکس



شکل ۲- مقاطع سازه نمونه ۳ و ۵ طبقه

مهاربندها سه تیپ متفاوت دارند: (۱) مهاربندهای تیپ A، که مهاربند شامل یک قطعه صلب و یک قطعه از جنس آلایژ حافظه‌دار می‌باشد. از آنجا که طول عضو حافظه‌دار در مهاربند کمتر از طول کل مهاربندی می‌باشد از قطعه صلب استفاده شده است. با این عمل مطمئن می‌شویم که کل تغییر شکل در مهاربند ناشی از تغییر شکل در عضو حافظه‌دار است، که عضو حافظه‌دار بدون کماتش بار فشاری را حمل می‌کند. با انتخاب مناسب سطح مقطع و طول آلایژ حافظه‌دار محدودیت‌های کاربردی آن مرتفع می‌گردد. (۲) مهاربندهای تیپ B، که سیم‌هایی از جنس آلایژ حافظه‌دار در راستای طولی مهاربند امتداد یافته و به صورت یک سیستم هیبریدی استفاده می‌گردد. (۳) مهاربندهای تیپ C، که کل مهاربند از جنس فولاد بوده و هیچ ماده حافظه‌داری در آن به کار نرفته است.

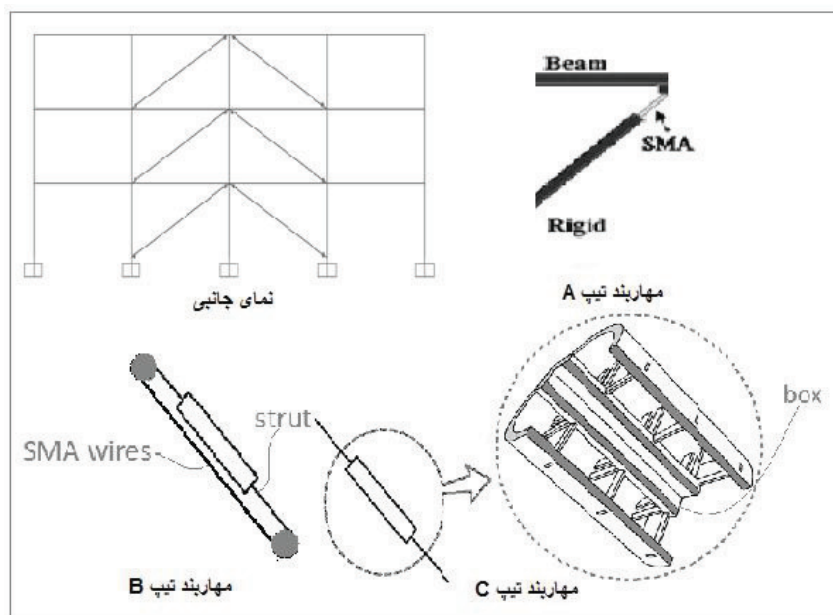
جدول ۱- خواص مکانیکی در نظر گرفته شده برای ماده حافظه‌دار [۱۰]

مقدار	واحد	کمیت
۲۰۰۰۰۰	mpa	مدول الاستیسیته فولاد
۲۷۵۷۹	mpa	مدول الاستیسیته ماده حافظه‌دار
۴۱۴	mpa	تنش شروع تبدیل از فاز استنایت به مارتنزیت
۵۵۰	mpa	تنش پایان تبدیل از فاز استنایت به مارتنزیت
۳۹۰	mpa	تنش شروع تبدیل از فاز مارتنزیت به استنایت
۲۰۰	mpa	تنش پایان تبدیل از فاز مارتنزیت به استنایت
۳,۵	%	کرنش معادل طول هموارشدگی تنش

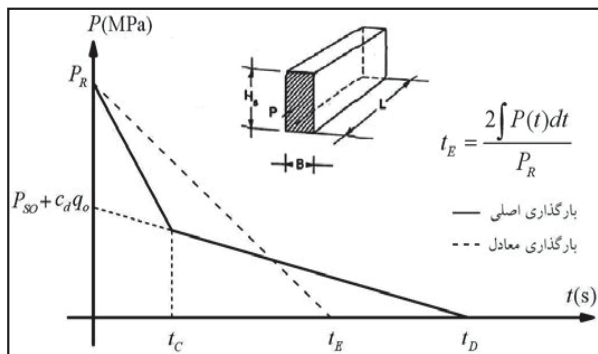
قاب‌های خمشی اعمال می‌گردد. طراحی در چند مرحله صورت گرفته است تا از یک سو، انتخاب مقاطع، نزدیک به حالت بهینه از نظر مقدار تنش‌ها و تغییرمکان جانبی سازه بوده و از سوی دیگر، طراحی اجزاء ساده و یکنواخت باشد. بدین ترتیب می‌توان در بخش‌های آبی که اثر بارهای انفجاری بر سازه بررسی می‌شود، میزان تاثیر هر یک از انواع اعضا را بر رفتار کلی سازه - به گونه‌ای مناسب و قابل درک - تجزیه و تحلیل نمود. توجه شود که در همه تحلیل‌ها فرض خواهد شد اتصالات برای ظرفیت نهایی عضو متصل به خود طراحی شده‌اند و از بحث درباره اتصالات صرف نظر خواهد شد.

#### ۴- بارگذاری انفجاری

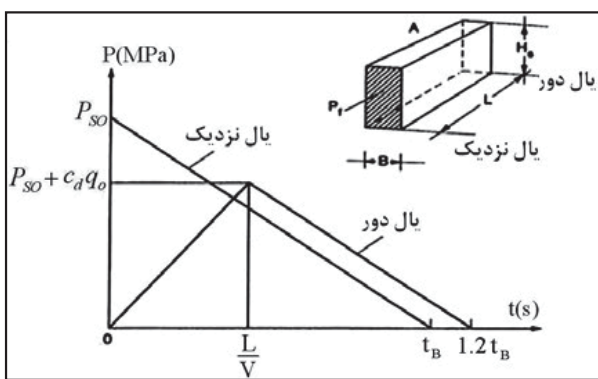
انفجاری برابر با ۸۰۰ kg-TNT در فاصله ۱۵ متر از بر سازه و در ارتفاع بسیار کمی از سطح زمین تقریباً در تراز ارتفاعی صفر به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. با استفاده از رابطه‌های (۱ تا ۶) می‌توان نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار را برای گره‌های سازه‌ای وجوه مختلف سازه مطابق شکل (۴) به دست آورد. [۹،۳] سپس، بارهای گره‌ای از حاصل ضرب فشار گره‌ها در سطح بارگیر متناظر گره‌ها محاسبه می‌شود. در محاسبه سطح بارگیر گره‌ها با فرض اینکه بازشوهای نمای سازه در برابر موج انفجار از خود مقاومت نشان می‌دهند، از اثر آنها در کاهش نیروی وارد به قاب چشم‌پوشی شده است.



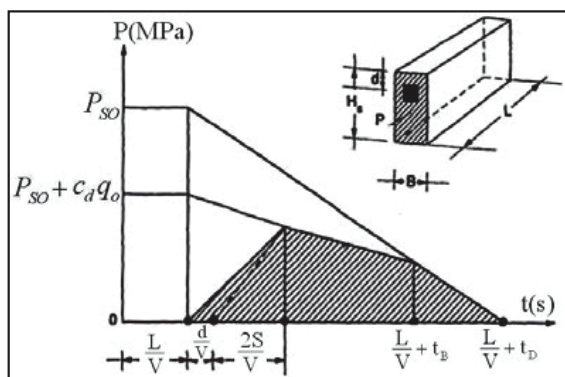
شکل ۳- مشخصات هندسی سازه



تغییرات فشار بر روی وجه جلویی (رو به انفجار) سازه



تغییرات فشار بر روی وجوه کناری و بام سازه



تغییرات فشار بر روی وجه پشتی

شکل ۴- نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان ناشی از انفجار روی وجوه مختلف سازه

بارگذاری انفجاری سازه به‌طور کلی در دوگام زمانی انجام شده است. در گام نخست، همه نیروهای انفجاری در مدت زمان متناظرشان بر سازه اعمال می‌شوند و در گام بعدی، به سازه اجازه ارتعاش آزاد داده می‌شود. لازم به ذکر است همانند شکل (۵)، یک حالت برای موقعیت انفجار در نظر گرفته شده است و آن، انفجار روی محور

$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{R^3}} \quad (1)$$

در این رابطه، R فاصله از مبدأ انفجار بر حسب متر، W وزن معادل TNT بر حسب tonf و  $P_{SO}$  فشار افزوده بر حسب  $\text{kgf/cm}^2$  می‌باشد. فشار افزوده (فشار مینا) فشار ناشی از انفجار است که افزون بر فشار جو ایجاد می‌شود. سایر رابطه‌های مورد نیاز به قرار زیر می‌باشند:

$$q_0 = \frac{2.5 P_{SO}^2}{7 P_{SO} + P_0} \quad (2)$$

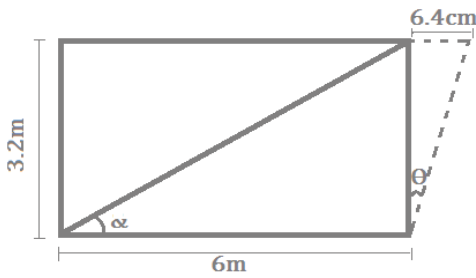
$$P_R = P_{SO} \left[ 2 + \frac{6 P_{SO}}{7 P_0 + P_{SO}} \right] \quad (3)$$

$$\begin{cases} t_D = 20.77 \left[ \frac{W}{P_{SO}} \right]^{1/3} & P_{SO} < 2 \text{ kg/cm}^2 \\ t_D = 14.35 \frac{W^{1/3}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} \geq 2 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} t_B = 10.23 \frac{W^{1/3}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} < 70 \text{ kg/cm}^2 \\ t_B = 20.77 \frac{W^{1/3}}{\sqrt{P_{SO}}} & P_{SO} \geq 70 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$t_C = \frac{3S}{V} < t_D, \quad V = u_s \left[ 1 + \frac{6 P_{SO}}{7 P_0} \right] \quad (6)$$

در این رابطه‌ها W وزن معادل TNT بر حسب  $\text{kgf}$ ،  $P_0$  فشار هوا بر حسب  $\text{kgf/cm}^2$  و  $P_{SO}$  فشار افزوده بر حسب  $\text{kgf/cm}^2$  می‌باشد.  $q_0$  فشار حداکثر دینامیکی بر حسب  $\text{kgf/cm}^2$  است که در اثر جابجایی ذرات هوا ایجاد می‌شود و در واقع، بادی است که در اثر انفجار بوجود می‌آید.  $P_R$  فشار حداکثر موج بازتابی بر حسب  $\text{kgf/cm}^2$  می‌باشد که در اثر جمع شدن فشار حاصل از برخورد و بازتاب موج از سطح سازه ایجاد می‌شود. V سرعت موج انفجار و  $u_s$  سرعت صوت بر حسب m/s می‌باشند.  $t_D$  مدت زمان اثر فشار دینامیکی بر حسب میلی‌ثانیه، فاصله زمانی است که فشار حاصل از انفجار بر وجه جلویی سازه اثر می‌کند.  $t_B$  مدت زمان اثر موج ضربه برای وجوه کناری و پشتی سازه بر حسب میلی‌ثانیه می‌باشد.  $t_C$  مدت زمان اثر موج بازتابی بر حسب ثانیه می‌باشد و بازه‌ای است که موج انفجار به وجه جلویی سازه رسیده و هم‌زمان با موج بازتاب شده، حداکثر فشار ممکن را به سازه وارد می‌کند. S نیز برابر با مقدار کوچکترین ارتفاع سازه و نصف طول وجه جلویی (رو به انفجار) سازه بر حسب متر می‌باشد [۹،۳].



شکل ۵- حداکثر تغییر مکان نسبی مجاز قاب

$\Delta_{max,b}$ : بیشینه تغییر شکل مجاز مهاربند

$$\Delta_{max,d} = 320 \times 0.02 = 6.4 \text{ cm} \quad (13)$$

$$\Delta_{max,b} = 6.4 \times \cos \alpha = 5.65 \text{ cm} \quad (14)$$

$$\epsilon / \Delta = 1 \Rightarrow L^{SMA} = \Delta_{max,b} / \epsilon_{max} = 94/11 \text{ cm} \approx 95 \text{ cm} \quad (15)$$

به این ترتیب می توان به تقریبی از حداقل طول مجاز آلیاژ حافظه دار شکلی دست یافت

$$L^{SMA} = \max (0.08 L^{steel}, 95) = 95 \text{ cm} \quad (16)$$

### ۵-۲- تعیین نسبت بهینه سطح مقطع اعضای هیبریدی:

با توجه به نمودار نیرو - تغییر مکان و براساس مفهوم نسبت توزیع نیروی متناظر با سطوح تسلیم دو عضو آلیاژی و با اهداف زیر صورت می گیرند: هدف اصلی، استفاده از بیشینه قابلیت آلیاژ حافظه دار شکلی در کاهش کرنش پسماند، و هدف ثانویه، افزایش قابلیت جذب انرژی سیستم هیبریدی و همچنین افزایش سختی آن می باشد. بدین ترتیب استفاده از سیستم هیبریدی در مهاربندی سازه ها با تکیه بر خاصیت سوپرلاستیک آلیاژ حافظه دار شکلی، علاوه بر اینکه تغییر مکان های پسماند بعد از زلزله را به حداقل می رساند، محدودیت های کاربردی این آلیاژ را نیز مرتفع خواهد ساخت. بهینه سازی نسبت سطح مقطع عضو فولادی به سطح مقطع عضو آلیاژ حافظه دار شکلی در سیستم هیبریدی، مبتنی بر مفهوم توزیع نیرو در سطوح تسلیم دو آلیاژ بوده و بنابراین، مستقل از طول آن اعضا می باشد. با توجه به سیستم موزی دو عضو آلیاژی در شکل (۵) خواهیم داشت:

نیروی تسلیم کششی شروع تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت SMA  $V_{sma,f}$

تقارن طولی سازه و در فاصله ۱۵ متر از آن می باشد.

### ۵- محاسبه سطح مقطع

#### ۵-۱- تعیین نسبت بهینه سطح مقطع اعضای مهاربندی فوق الاستیک در تیپ A:

به منظور امکان مقایسه عملکرد لرزه ای مهاربندهای تیپ A، C، مهاربندهای فوق الاستیک (تیپ A) طوری طراحی می شوند که مقاومت تسلیم  $f_y$  و سختی محوری  $k$ ، همانند مهاربندهای تیپ C داشته باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$A^{SMA}$ : سطح مقطع آلیاژ حافظه دار شکلی

$$A^{SMA} = f_y / \sigma_s^{AS} \quad (7)$$

با جایگذاری پارامترها داریم:

$$A^{SMA} = 2400 \times A^{steel} / 4140 = 0.58 A^{steel} \quad (8)$$

$L^{SMA}$ : طول آلیاژ حافظه دار شکلی

$$(EA/L)_{steel} = (EA/L)_{SMA} \rightarrow L^{SMA} = E^{SMA} \times A^{SMA} / K \quad (9)$$

در نتیجه، پس از جایگذاری پارامترها:

$$L^{SMA} = 275790 \times 0.58 A^{steel} \times L^{steel} / 2E \times A^{steel} = 0.08 \times L^{steel}$$

یک حاشیه ایمنی در تعیین طول عضو مهاربند آلیاژ حافظه دار شکلی رعایت می گردد تا این اطمینان حاصل شود که پدیده سخت شدگی ثانویه موجب خرابی اعضای مجاور نمی گردد.

$$L \geq \Delta_{am} / \epsilon_{max} \quad (11)$$

از طرفی جهت تأمین حداقل سختی مورد نیاز سازه باید ضوابط مربوط به کنترل تغییر مکان نسبی سازه ها کنترل گردد. با توجه به ضوابط آئین نامه طرح ساختمان ها در برابر زلزله، بیشینه تغییر مکان نسبی مجاز برای ساختمان های با زمان تناوب اصلی بیشتر از ۰/۷ ثانیه، برابر ارتفاع طبقه می باشد.

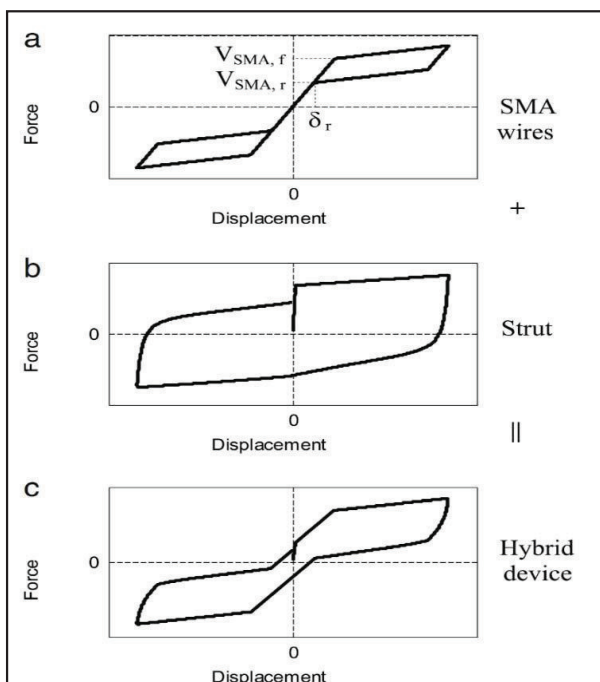
$\theta_{max}$ : بیشینه تغییر مکان نسبی مجاز قاب

$$\theta_{max} = 0.02 \quad (12)$$

لذا برای تعیین طول عضو مهاربند آلیاژ حافظه دار شکلی به صورت زیر عمل شده است:

$\Delta_{max,d}$ : بیشینه تغییر مکان نسبی دو طبقه مجاور





شکل ۶- نمودار نیرو - تغییر مکان سیستم هیبریدی

مورد نیاز برای تعریف مصالح در جدول (۲) درج شده است. همهٔ جزءهای محدود تشکیل دهندهٔ سازه از نوع قابی با تابع درونیاب درجهٔ ۳ هرمیتی انتخاب شده‌اند. در این مقاله از کامل‌ترین مقاطع (مقطع فیبری) برای مدل‌سازی مقاطع استفاده شده است. مناسب‌ترین المان برای مدل کردن تیرها و ستون‌ها و مهاربندها، المان تیر-ستون غیرخطی می‌باشد. تعداد ۶ نقطه انتگرال‌گیری برای تمامی المان‌ها در نظر گرفته شده است. در این مقاله برای تحلیل غیرخطی از الگوریتم نیوتن استفاده می‌کنیم که الگوریتم نیوتن طبق سختی اولیه سازه کار می‌کند.

بخش band general SOE، برای همگرا کردن سیستم که معمولاً عدد ۶۰ را می‌دهیم، مصالح به‌صورت نیرو-تغییر مکان می‌باشند. در مصالح تک‌محوری اندرکنش نداریم، مگر تیر به‌صورت تیر عمیق باشد که برش را به‌صورت اندرکنش نیرو و خمش می‌توان در نظر گرفت. مدل رفتاری فولاد Steel 01 می‌باشد. شیب سخت‌شدگی در فولاد تقریباً ۰.۲٪ مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده است. اثر بوشینگر در مصالح steel 01 وجود دارد و باعث می‌گردد که حلقه‌ها در بارگذاری سیکلی باز نشده و بزرگ نشوند.

وسط مقطع تحت بارگذاری سیکلی باریک می‌گردد که به آن pinching می‌گویند. پارامتر pinching در مصالح تعریف شده

نیروی کششی پایان تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت SMA:  $V_{sma,r}$

نیروی تسلیم کششی فولاد:  $V_{s,y}$

نیروی تسلیم کششی کل مهاربند هیبریدی  $V$ ، برابر است با مجموع نیروی تسلیم SMA،  $V_{sma,f}$  و نیروی تسلیم کششی فولاد  $V_{s,y}$ :

$$V - V_{s,y} = V_{sma,f} \quad (17)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$V_{sma,r} \geq V_s \quad (18)$$

به طرفین نیروی تسلیم کششی SMA،  $V_{sma,f}$  را اضافه می‌کنیم:

$$V_{sma,f} + V_{s,y} \geq V_{sma,r} + V_{sma,f} \quad (19)$$

در آلیاژ حافظه‌دار شکلی اگر نسبت نیروی تسلیم برگشت  $V_{sma,r}$  به نیروی تسلیم رفت  $V_{sma,f}$  برابر  $\beta$  باشد:

$$V_{sma,r} = \beta V_{sma,f} \quad (20)$$

با جایگذاری معادله (۲۰) و معادله (۱۷)  $V - V_{s,y} = V_{sma,f}$  در معادله (۱۹) خواهیم داشت:

$$V \geq V_{sma,f} \beta + V_{sma,f} \quad (21)$$

از  $V_{sma,f}$  در معادله بالا فاکتور می‌گیریم، در نتیجه خواهیم داشت:

$$V / 1 + \beta \geq V_{sma,f} \quad (22)$$

با جایگذاری رابطه فوق در معادله (۱۷)، خواهیم داشت:

$$V_{s,y} = \beta V / 1 + \beta \quad (23)$$

با تقسیم دو رابطه اخیر بر هم و با توجه به رابطه نیرو و تنش، نسبت بهینه (opt) سطح مقطع دو عضو آلیاژی از رابطه (۱۴) به‌دست خواهد آمد:

$$A_{sma} / A_{steel} = \beta F_y / F_{sma,f} = \lambda_{opt} = 0.28 \quad (24)$$

### ۶- تحلیل سازه تحت اثر انفجار

در این بخش، رفتار سازه تحت اثر بارگذاری انفجاری بررسی می‌شود. بدین منظور، از نرم‌افزار opensees برای تحلیل اجزای محدود دینامیکی غیرخطی سازه استفاده می‌شود. [۱۱] مشخصات

به افراد و تجهیزات درون سازه وارد می‌شود. این شتاب در لحظات اولیه انفجار بسیار زیاد است ولی به سرعت (در مدت زمان چند دهم ثانیه) کاهش می‌یابد. زمانی که شتاب به کمتر از مقدار مشخصی برسد، ساکنان احساس امنیت و آرامش می‌کنند. در حال حاضر، استاندارد مشخصی برای این حد از شتاب وجود ندارد. بنابراین، در این مقاله از معیار آسایشی که برای بررسی اثرات دینامیکی باد بر ساکنان سازه‌های بلند به کار می‌رود، استفاده خواهد شد. مقدار شتاب  $0.1 \text{ m/s}^2$  به عنوان معیار آسایش در نظر گرفته می‌شود و زمانیکه شتاب سازه به کمتر از آن می‌رسد، مورد توجه قرار می‌گیرد. بدیهی است هر چه سازه زودتر به معیار آسایش برسد، مطلوبیت آن از دیدگاه حد بهره‌برداری بیشتر خواهد بود.

۲. تغییرمکان نسبی طبقات: این کمیت، یکی از اصلی‌ترین معیارهای عملکرد سازه است.

۳. تغییرمکان مطلق طبقات: این تغییرمکان، به ویژه در تراز بام سازه، معیار مهمی است که باید بررسی شود.

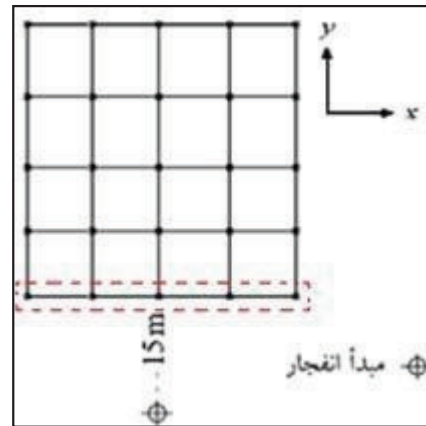
۴. انرژی جذب شده توسط تغییرشکل پلاستیک (خمیری) سازه: یکی از معیارهای مهمی که برای درجه خرابی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، انرژی است که در اثر ایجاد مفصل‌های خمیری توسط مصالح سازه جذب می‌شود. حاصل تقسیم این انرژی (در اثر انفجار اتفاقی افتاده) بر ظرفیت آن در حالت حدی مقاومت نهایی، کمیت بسیار با ارزشی است که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

برای بررسی نیازهای یک طراحی مقاوم در برابر انفجار، نمونه‌های مختلفی از ترکیب مقاطع ایجاد شده است تا اثر هر مجموعه از اعضای سازه بر رفتار کلی انفجاری آن مشخص گردد. سازه‌ها برای بارگذاری انفجاری تحلیل دینامیکی غیرخطی شده‌اند و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردیده است.

## ۷- پاسخ سازه‌های نمونه به بارگذاری انفجاری

پاسخ سازه‌های نمونه به بارگذاری انفجاری (شکل ۷) با توجه به معیارهای عملکردی انتخابی، در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آمده است. در سازه نمونه ۹ طبقه تیپ C، شتاب بعد از ارتعاش آزاد،  $0.2$  متر بر مجذور ثانیه است که ۲ برابر معیار آسایش می‌باشد. در حالی که در سازه نمونه ۹ طبقه تیپ A و B، در مدت زمان کمتر از یک ثانیه،

است. در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار تنش-کرنشی SMA در فاز آستنتیت و همچنین برای تیر و ستون، از مدل‌های موجود در OpenSees استفاده می‌شود.



شکل ۷- موقعیت انفجار در تحلیل رایانه‌ای

برای مدل‌سازی اتصالات مفصلی در انتهای تمامی مهاربندها به تیرها - ستون‌ها گره‌های جداگانه تعریف شده است. سپس با استفاده از المان با طول صفر (zero Length Elements) دو گره قرار گرفته و در محل اتصال تیر به ستون که دارای مختصات یکسانی نیز می‌باشند، به یکدیگر متصل شده و برای جابجایی محوری تعریف گردیده‌اند. همهٔ جزءها دارای جرم گسترده هستند و به بیان دیگر، بار مردهٔ سازه به‌طور مستقیم مدل‌سازی شده است. بارهای زنده نیز بر روی اعضا به‌صورت مجزا اثر داده شده‌اند. پارامترهای تحلیل (نمونه‌های زمانی، معیارهای همگرایی و ...) نیز به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پاسخ از دقت مناسبی برخوردار باشد.

جدول ۲- ویژگی‌های مصالح در الگوسازی رایانه‌ای

ضریب کشسانی (استاتیکی)	۱۹۶ GPa
ضریب پواسون	۰,۳
چگالی جرمی عضوهای سازه	$7800 \text{ kg/m}^3$
ضرایب میرایی $\alpha$ و $\beta$	۰/۰۵ و ۰/۰۵

برای بررسی چگونگی عملکرد سازه در اثر انفجار، پاسخ‌های ویژه‌ای به عنوان معیارهای رفتاری سازه انتخاب شده‌اند. این معیارها عبارتند از:

۱. معیار آسایش (واکنش روانی انسان به ارتعاش سازه): شتاب طبقاتی سازه در حالت کلی نشان‌دهندهٔ ضربه‌هایی است که

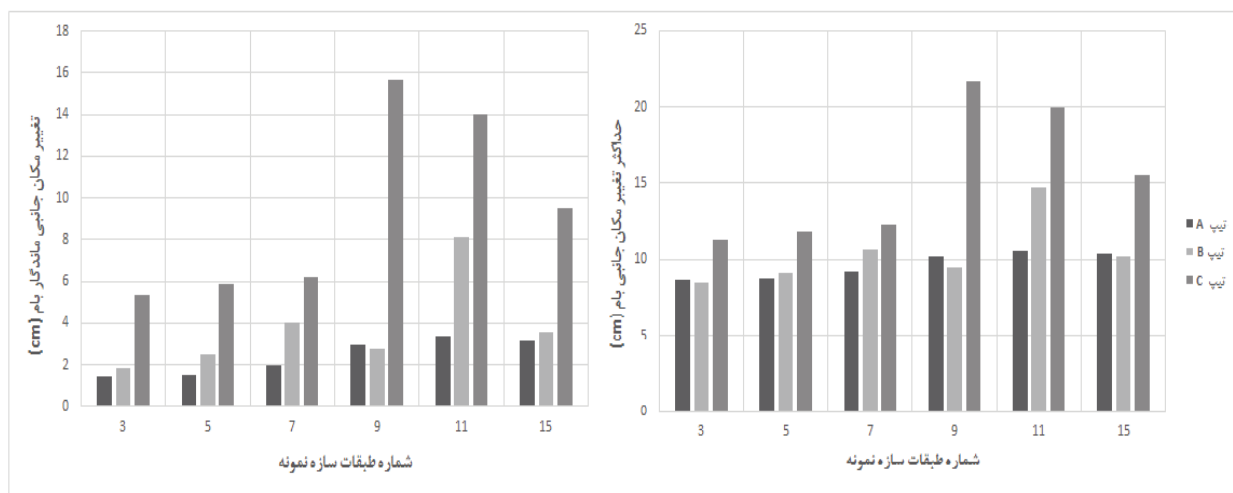


به‌نحو چشمگیری کاهش دهد. برای مثال، این کاهش برای انفجار در سازه نمونه تیپ A به بیش از ۸۸ درصد در سازه‌های نمونه دیگر می‌رسد. این بهبود قابل توجه، در تغییرمکان‌های ماندگار سازه نیز آشکار می‌باشد.

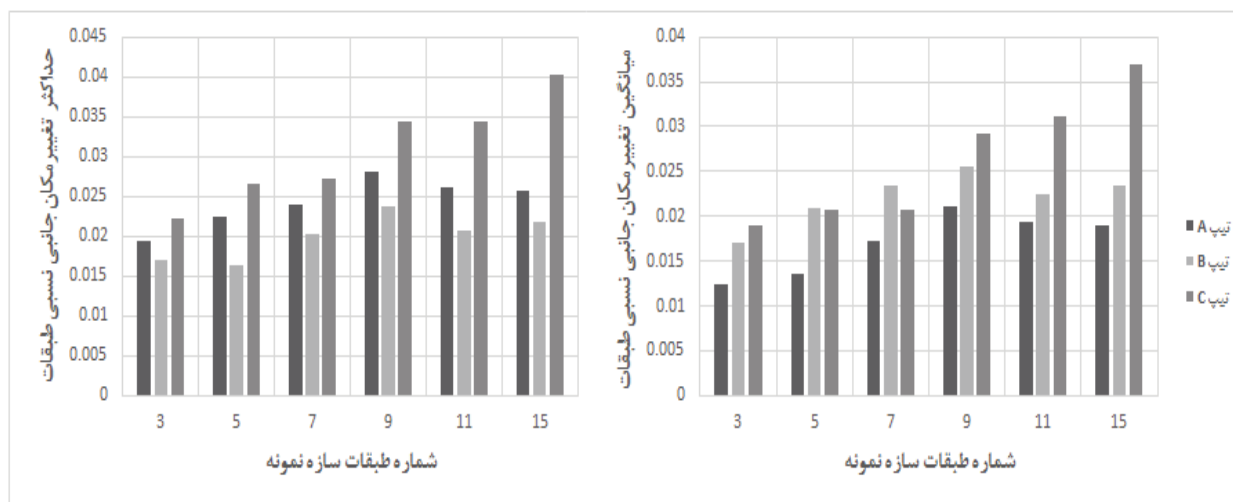
نمودار بیشینه تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه برای انفجار در راستای x در شکل (۹) آمده است. مشاهده می‌شود مهاربندهای بر پایه آلیاژ حافظه‌دار شکلی توانسته بیشینه تغییرمکان نسبی کمتری ایجاد کند، که لزوم و ضرورت طراحی سیستم‌های مهاربندی بر پایه مواد هوشمند مشاهده می‌گردد. همچنین در همه سازه‌های نمونه تیپ B، با توجه به انتقال

شتاب سازه را به کمتر از  $0.1 \text{ m/s}^2$  (معیار آسایش) کاهش می‌دهند که لزوم و ضرورت طراحی مهاربندهای بر پایه آلیاژ حافظه‌دار شکلی مشاهده می‌شود. بنابراین همواره نمی‌توان به ضوابط طرح لرزه‌ای بسنده کرد و باید ضوابط طراحی مقاوم در برابر انفجار را نیز در فرآیند طراحی برخی سازه‌های حساس وارد ساخت.

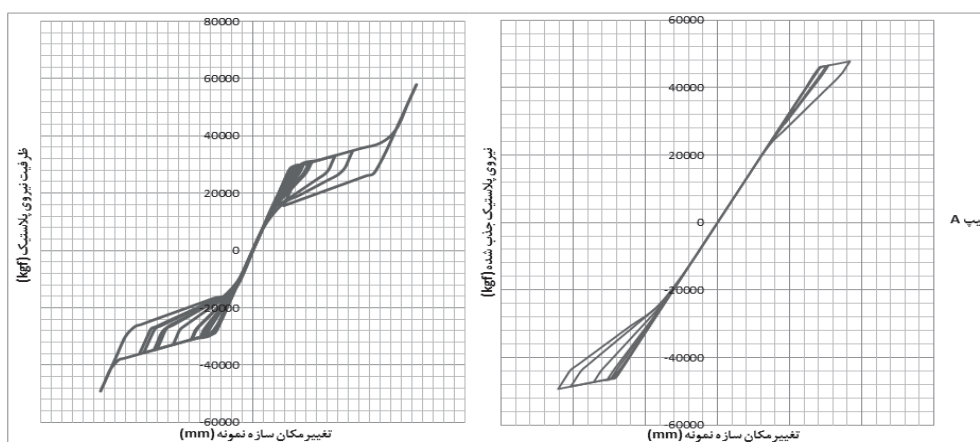
شکل (۸) مقدار بیشینه تغییرمکان جانبی سازه را به همراه مقدار بیشینه تغییرمکان ماندگار آن برای انفجار بیرونی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، استفاده از مهاربندهای بر پایه آلیاژ حافظه‌دار شکلی توانسته است بیشینه تغییرمکان مطلق سازه را



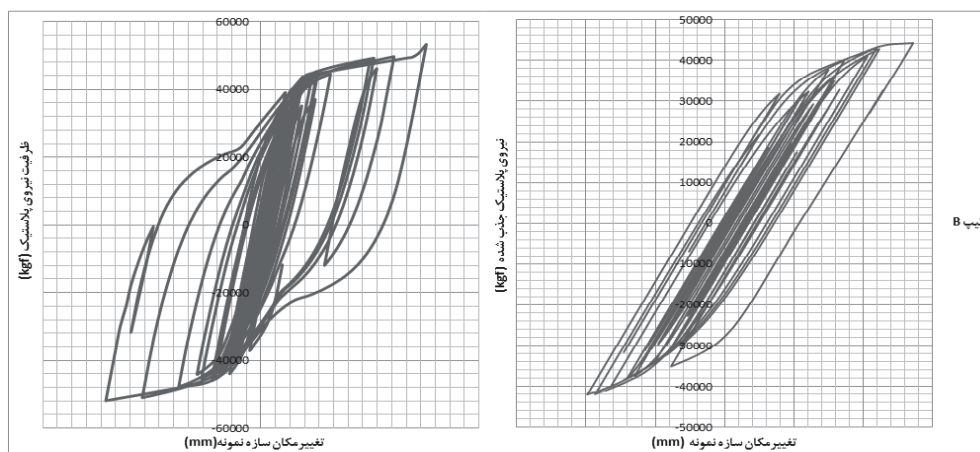
شکل ۸- بیشینه تغییرمکان جانبی و تغییرمکان جانبی ماندگار بام در سازه‌های طبقاتی نمونه تحت اثر بارگذاری انفجاری



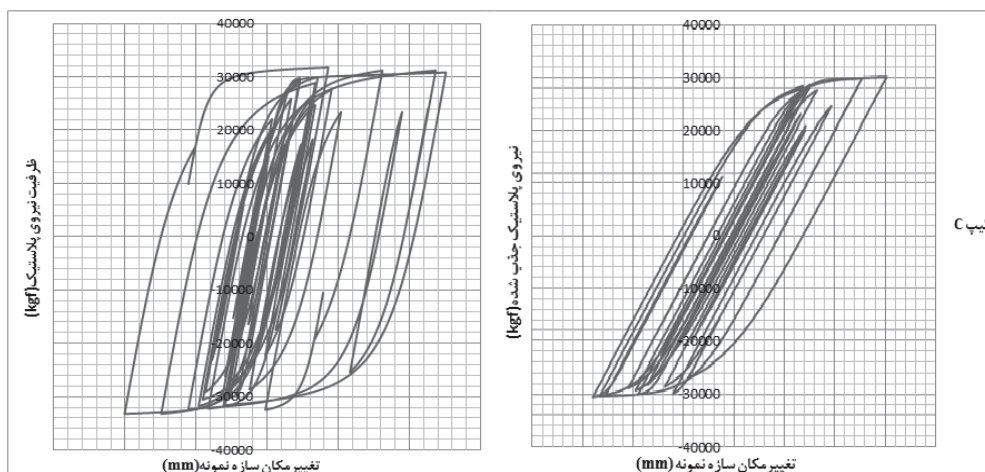
شکل ۹- بیشینه و میانگین تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در سازه‌های نمونه تحت اثر بارگذاری انفجاری



منحنی جذب انرژی سازه نمونه تیپ A



منحنی جذب انرژی سازه نمونه تیپ B



منحنی جذب انرژی سازه نمونه تیپ c

شکل ۱۰- ظرفیت پلاستیک و انرژی پلاستیک جذب شده در سازه‌های نمونه تیپ A, B, C تحت اثر بارگذاری انفجاری

انرژی اعمال شده به یک سیستم غیرالاستیک به وسیله انفجار، به علت هر دو سازوکار تسلیم و میرایی مستهلک می‌شود. این ادعا با توجه به این واقعیت که در انتهای انفجار، تمام انرژی جنبشی  $E_K$  و انرژی کرنشی  $E_S$  سیستم از بین می‌روند، کاملاً روشن است. در سیستم غیرالاستیک، میرایی نقش کمتری در استهلاک انرژی دارد که مبین سرعت کمتر این سیستم نسبت به سیستم الاستیک است. در سیستم الاستوپلاستیک اگر بخواهیم مجموع انرژی تسلیم  $E_T$  و انرژی میرایی  $E_D$ ، سازه را مستهلک کند، ظرفیت شکل‌پذیری سازه باید طوری باشد که در تغییر شکل‌های فراتر از الاستیک گسیخته نگردد. البته چنین سازه‌ای در هنگام انفجار صدمه خواهد دید و یک تغییر شکل ماندگار در آن ایجاد خواهد شد. اگر قسمتی از انرژی بتواند توسط تجهیزات خاصی که در سازه نصب شده (سیستم ابداعی) مستهلک گردد، بعد از انفجار می‌توان به راحتی این تجهیزات را تعویض نمود و صدمات وارد بر سازه را کاهش داد.

### ۸- نتیجه‌گیری

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، در تعیین رفتار جانبی قاب‌های خمشی به‌عنوان اعضای سیستم ثانویه بازگرداننده، تحت اثر بارگذاری انفجاری بیرونی مؤثر می‌باشد.

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مهاربندها، موجب گردید معیار آسایش، بهبود قابل توجهی پیدا کند. برای مثال، سازه‌های نمونه با طبقات بالاتر (۹، ۱۱ و ۱۵) طبقه، زمان رسیدن به معیار آسایش به‌طور میانگین برای انفجار بیرونی به حدود یک دوازدهم کاهش یافته است.

تغییر مکان جانبی سازه و تغییر مکان جانبی ماندگار سازه با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی به‌طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. برای مثال، سازه‌های نمونه با طبقات بالاتر (۹، ۱۱ و ۱۵) طبقه، تغییر مکان جانبی سازه و تغییر مکان جانبی ماندگار سازه به‌طور میانگین، به‌ترتیب برای انفجار بیرونی به حدود ۸ و ۹ سانتی‌متر کاهش پیدا کرده است.

با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، میانگین تغییر مکان نسبی طبقات تغییر کمی پیدا می‌کند و الزاماً کمتر نمی‌شود. میانگین تغییر مکان نسبی برای سازه نمونه ۵ و ۷ طبقه تیپ B، میانگین تغییر مکان نسبی بزرگتری نسبت به تیپ C ایجاد می‌کند. در مجموع، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه‌های با طبقات بالا توجیه‌پذیر می‌باشد.

نیروهای بزرگ از سیستم مهاربندی به تیر- ستون‌ها و مدول الاستیسیته پایین آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به فولاد، بیشینه تغییر مکان نسبی کمتری نسبت به سازه‌های نمونه تیپ A قابل توجیه می‌باشد.

شکل (۱۰) به بررسی ظرفیت جذب انرژی پلاستیک در سازه به‌عنوان معیاری از درجه خرابی سازه تحت اثر بار انفجاری پرداخته است. مشاهده می‌شود در سازه نمونه تیپ B، خرابی سازه به سرعت کاهش پیدا می‌کند، زیرا از یک سو ظرفیت خمیری عضوهای سازه افزایش می‌یابد و از سوی دیگر، به‌دلیل کاهش تنش‌ها، بخش بیشتری از سازه در حالت کشسان باقی می‌ماند. در سازه نمونه، تیپ A و C به‌ترتیب سرعت خرابی سازه کاهش می‌یابد. در سازه نمونه تیپ A و B استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی و خاصیت بازگرداندگی آن باعث کاهش تغییر شکل پسماند سازه و در نتیجه، کاهش هزینه‌های بازسازی آنها پس از انفجار می‌گردد.

مشاهده می‌شود در سازه نمونه تیپ B، سیم آلیاژی زمانی که سازه به حالت الاستوپلاستیک رسیده است، الاستیک باقی می‌ماند (با توجه به طراحی سیستم هیبریدی) و نقشی کنترلی دارد. در مجموع، مهاربند هیبریدی تیپ B میزان خرابی سازه را تقریباً ۵۰ درصد کاهش داده است.

در سازه نمونه، تیپ C در طبقات ۹، ۱۱ و ۱۵ سازه به‌طور کامل تخریب گردیده (جدول ۳) و در سازه نمونه تیپ A، سرعت خرابی سازه نسبت به سازه نمونه تیپ C کمتر شده است. در طبقات ۹ و ۱۱، سازه به‌طور کامل تخریب گردیده است.

جدول ۳- چگونگی تغییر معیار خرابی سازه‌های نمونه تیپ A، B، C

سازه نمونه	درصد خرابی <sup>۱</sup>		
	تیپ C	تیپ B	تیپ A
۳	۷۶/۴	۲۶/۲	۴۱/۱
۵	۸۴/۳	۳۵/۵	۴۷/۳
۷	۸۹/۵	۵۷/۷	۶۰/۵
۹	۱۰۰ <	۴۰/۱	۱۰۰ <
۱۱	۱۰۰ <	۸۵/۳	۱۰۰ <
۱۵	۱۰۰ <	۵۰/۸	۷۸/۵

<sup>۱</sup> ۱۰۰ X (نسبت انرژی پلاستیک جذب شده به ظرفیت پلاستیک)

بنابراین، نتایج مبین این است که رفتار نیرو - تغییر شکل دوره‌ای یک سازه، بستگی به سیستم و مصالح آن سازه دارد.

6. Desroches.R , McCormick.J , and Delemont .M, " Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wire and bars." Journal of structural engineering ,130(1), 38-46. ,(2004).
7. Wayman .C .M , and Duerig .T.W, " An intruction martensite and shape memory " , Engineering aspects of shape memory alloys, T.W.Duerig, K.N.Melton, D. Stekel, and C.M.Wayman and Butter worth- Heinemann , Boston , Ma , 3-20. (1990).
8. Sap2000 Ultimate 15.1.0 , Computers and Structures Inc., Berkeley, CA (2011).
9. ASCE, Task Committee on Blast Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division, "Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities", New York (1997).
10. Desroches.R , McCormick.J , and Delemont .M, " Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wire and bars." Journal of structural engineering ,130(1), 38-46. ,(2004).
11. Opensees command language manual" .Silvia Mazzoni , Frank Mckenna , Michael H. Scott , Gregoryl. Fenues , Et. Al (2007).

استفاده غیرمستقیم از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی (هیبریدی) تیپ B و استفاده از فولاد به‌منظور بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ و افزایش ظرفیت خمیری سازه در انفجار، ظرفیت استهلاک انرژی سازه را تقریباً دو برابر افزایش داده است.

## مراجع

۱. مقررات ملی ساختمان، "مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی". (۱۳۸۴)
۲. مقررات ملی ساختمان، "مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان". (۱۳۸۵)
3. Bangash, N.Y.H. and Bangash, T., , "Explosion-Resistant Buildings", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2006).
4. Otsuka.K, and Wayman.C.M, "Shape memory materials cambridge universitypress".New York (1998).
5. Duerig .T.W, Melton. K.N, Stockel .D, and Wayman.C.M, "Engineering aspects of shape memory alloys", Boston, Ma. (1990).