بررسی رفتار لرزه ای مهاربازویی و کمربندخرپایی به عنوان سیستم مقاوم جانبی برای ساختمان های بلند فولادی

محمدحسین محمدخانی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
hosein_mohammadkhani@yahoo.com

حسین تحقیقی
استادیار، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
tahghighi@kashanu.ac.ir

کلید واژه‌ها: *ساختمان بلند، مهارکمربندی، تحلیل طیفی، تحلیل تاریخچه زمانی، جابجایی بام*

چکیده

سیستم مهار بازویی و کمربند خرپایی (بطور خلاصه مهار کمربندی) شیوه ای بسیار مناسب جهت کنترل جابجایی سازه‌های بلند در اثر بار جانبی می‌باشد. در این مقاله یک ساختمان چهل طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه شامل یک هسته مرکزی مهاربندی شده با و بدون سیستم مهار کمربندی واقع در ترازهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آنها با هم مقایسه می‌شود. بدین منظور تحلیل‌های دینامیکی طیفی و تاریخچه زمانی ساختمان دارای چیدمان‌های متفاوت مهار بازویی و کمربند تحت تاثیر تعدادی رکورد زلزله انجام می‌گیرد. بررسی نتایج عددی نشان می‌دهد که مهار کمربندی سختی ساختمان را بطور متوسط به میزان ۲۰ تا ۶۰ درصد بر اساس تعداد سطوح قرارگیری آنها نسبت به حالت بدون مهار افزایش می‌دهد. ضمنا بر اساس نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی، تراز مناسب مهارهای کمربندی در سطوح بالاتری نسبت به نتایج تحلیل طیفی قرار می‌گیرد.

مقدمه

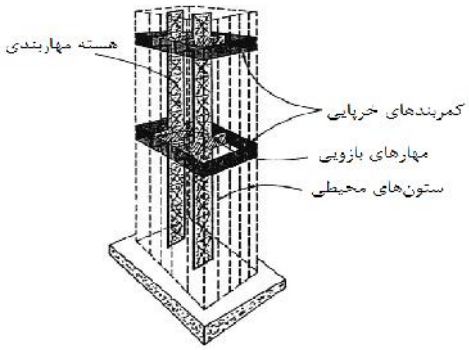
ساختمان‌های بلند از جمله ساختمان‌هایی هستند که امروزه مورد توجه بسیاری قرار دارند و دلیل آن افزایش چشمگیر جمعیت و در نتیجه افزایش نیاز به فضای بیشتر جهت کسب و کار وسکونت می باشد. این ساختمان‌ها افراد زیادی را در خود جای داده و همچنین برای ساخت آن‌ها هزینه چشمگیری باید اختصاص داده شود؛ بنابراین مستلزم این است که طراحی و ساخت آن‌ها با دقت بسیار زیادی انجام گیرد تا در هنگام وقوع حوادثی از قبیل زلزله و یا وزش بادهای شدید که اینگونه ساختمان ها را به شدت در معرض خطر قرار می دهند کمترین خسارت به آن‌ها وارد گردد و امکان بهره برداری از آن‌ها وجود داشته باشد. کنترل جابجایی بام و همچنین جابجایی نسبی طبقات از جمله معیارهای مهم در طراحی ساختمان‌های بلند می‌باشند. تاکنون سیستم‌های سازه‌ای بسیاری از جمله: قاب خمشی، قاب خمشی به همراه مهاربند یا دیوار برشی، قاب به همراه هسته برشی، لوله قابی، لوله خرپایی و ... در طراحی ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مهاربازویی و کمربندخرپایی یکی از سیستم‌هایی است که تاثیر چشمگیری در کاهش جابجایی بام و در نتیجه کاهش جابجایی نسبی طبقات دارد.هدف مقاله حاضر بررسی یک ساختمان بلند فولادی با سیستم مقاوم جانبی شامل هسته مقاوم مهاربندی شده و سطوح مختلف مهارکمربندی می‌باشد. بدین منظور، تحلیل‌های دینامیکی طیفی و تاریخچه‌زمانی خطی بر روی این سازه انجام می شود و از چیدمان‌های متفاوت مهارهای کمربندی برای بررسی میزان و چگونگی تاثیر این سیستم مقاوم جانبی بر پاسخ ساختمان استفاده می‌گردد.

معرفی سیستم مهارکمربندی

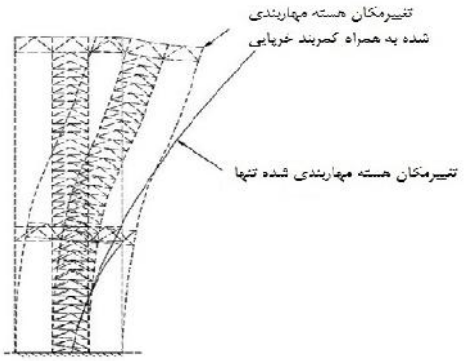
سیستم مهارکمربندی شکل اصلاح شده قاب‌های مهاربندی می‌باشد. به عنوان یک سیستم موثر و ابتکاری، مهارکمربندی متشکل از یک هسته مرکزی با خرپاهای بازویی افقی یا شاه‌تیرهایی است که هسته را به ستون‌های خارجی متصل می‌کند. علاوه بر آن‌که ستون‌هایی در انتهای

مهارها جای داده شده‌اند، مرسوم است دیگر ستون‌های پیرامونی را برای کمک به محدود کردن چرخش مهارها با مهاربندهای قطری به ارتفاع یک یا دو طبقه به یکدیگر متصل کرد که به آن کمربند خرپایی گفته می‌شود. در این حالت اگر سازه تحت بارگذاری جانبی قرار گیرد مجموعه قیود بازوها و ستون ها در برابر دوران هسته ممانعت می‌کند. سیستم مذکور می تواند تغییر مکان جانبی و لنگر فونداسیون سازه راکاهش دهد. (شکل ۱).

پاسخ سازه‌ای سیستم مهارکمربندی کاملا ساده می باشد؛ مهارها با ستون‌های پیرامونی، هنگامی که در معرض بارهای جانبی قرار می‌گیرند در برابر چرخش هسته مقاومت می‌کنند و سبب می‌شوند تا تغییر شکل‌های جانبی و ممان‌ها از حالتی که هسته آزادانه حرکت می‌کند کوچکتر باشند. این مهارهای بازویی را می‌توان با اتصالات مفصلی و یا اتصالات صلب به ستون‌های پیرامونی متصل کرد.لازم به ذکر است که مهارها در افزایش سختی خمشی سازه موثر هستند و مقاومت را برای برشی که باید توسط هسته تحمل شود افزایش نخواهند داد. هنگامی که ستون‌های پیرامونی به وسیله یک مهاربازویی به هسته متصل شده باشند تا حد زیادی از دوران در بالای سیستم جلوگیری می‌شود(شکل ۲). زیرا نیروهای قائم ایجاد شده در ستون‌های پیرامونی، هسته را توسط مهار بازویی مهار می‌کنند.



شکل ۱- فرم شماتیک سازه‌ای یک ساختمان بلند با سیستم مهارکمربندی (خیرالدین وآرامش، ۱۳۹۱)



شکل۲- مقایسه تغییر مکان جانبی در سیستم با هسته مهاربندی شده با و بدون مهارکمربندی (خیرالدین و آرامش، ۱۳۹۱)

دانستن محل بهینه مهارکمربندی در تاثیر آن بر کاهش تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی پایه بسیار مهم است. در نتیجه یکی از مسائل اساسی در این نوع سیستم سازه‌ای، تعیین موقعیت بهینه مهارکمربندی در ساختمان می‌باشد. با افزایش تعداد مهارهای کمربندی، رفتار یکپارچه هسته و ستون‌های پیرامونی بهتر تامین می‌گردد. در مقایسه با سازه‌های دارای یک مهار، سازه‌های دارای چند مهار دارای مقاومت جانبی بهتری می‌باشند. اگرچه هر مهارکمربندی اضافی سختی جانبی را افزایش می‌دهد ولی این مقدار افزایش نسبت به حالت قبل کمتر می‌باشد (Taranath, 2010).

پژوهشگران بسیاری رفتار سیستم مهارکمربندی در ساختمان بلند تحت اثر بار جانبی با هدف حداکثر کاهش جابجایی بام مورد مطالعه و بررسی قرار داده اندکه در زیر به تعدادی از آن ها اشاره می نماییم.

Smith & Coull (1991) با تحقیقات خود روی سازه‌های بلند و محل بهینه مهارهای کمربندی روی آن‌ها با روش تحلیلی، عنوان کردند که جایگاه بهینه مهارها در یک سازه با n تراز مهارکمربندی، نسبت به ارتفاع سازه از رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{(n+1)}, \frac{2}{(n+1)}, \cdots\cdots, \frac{n}{(n+1)}$$

Fawzia & Fatima (2010) یک ساختمان ۶۰ طبقه بتنی با مهارکمربندی فولادی را جهت یافتن محل بهینه مهار آن با استفاده از تحلیل طیفی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. این پژوهشگران سازه‌هایی با یک، دو و سه سطح مهارکمربندی را مورد بررسی قرار دادند. برای سازه با یک تراز مهارکمربندی، مهارها و کمربندها را جهت یافتن محل بهینه در کلیه طبقات جابجا نمودند. از آن‌جایی که کنترل جابجایی در طراحی سازه‌های بلند بسیار مهم و مورد توجه است این محققان نیز مطالعاتشان را بر مبنای کنترل این معیار انجام داده‌اند. آنان از تحلیل‌های خود نتایج زیر را مشاهده نمودند:

- زمانیکه از یک سطح مهارکمربندی استفاده‌کردند، به میزان ۳۴٪ از جابجایی بام کاسته شد.
- زمانیکه از دو سطح مهارکمربندی استفاده‌کردند، به میزان ۴۱٪ از جابجایی بام کاسته شد.
- زمانیکه از سه سطح مهارکمربندی استفاده‌کردند، به میزان ۵۱٪ از جابجایی بام کاسته شد.

همچنین محل بهینه مهارکمربندی برای حالات مختلف را به صورت زیر بیان نمودند:

- محل بهینه مهارکمربندی در ساختمان با یک سطح مهار: طبقه ۳۶ (۰/۶H)
- محل بهینه مهارکمربندی در ساختمان با دو سطح مهار: یکی ثابت در بام و دیگری طبقه ۳۰ (۰/۵H)
- محل بهینه کمربند در ساختمان با سه سطح مهارکمربندی: یکی ثابت در بام و دو سطح دیگر در طبقات ۲۵ و ۳۵

Haghollahi et al. (2012) دو سازه ۲۰ و ۲۵ طبقه را با دو روش تحلیل طیفی و تاریخچه‌زمانی غیرخطی جهت یافتن محل بهینه مهارکمربندی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آنان عنوان کردند زمانی‌که بار جانبی به این سازه وارد می‌شود، خمش ایجاد شده در هسته سبب خمش در تیرهای مهاربازویی شده و به ستون‌های پیرامونی منتقل می‌شود و این سبب افزایش انعطاف‌پذیری سازه می‌گردد. در نتیجه مشخص می‌شود که عملکرد این سیستم مستقیما به سختی و مقاومت مناسب تیرهای بازویی بستگی دارد. این پژوهشگران محل بهینه مهارکمربندی را برای ساختمان ۲۰ طبقه از طبقه ۱۰ تا ۱۴ و برای ساختمان ۲۵ طبقه از طبقه ۱۴ تا ۱۶ به‌دست آوردند. سایر نتایج ایشان به شرح زیر می‌باشد:

- با استفاده از تحلیل طیفی محل بهینه مهارکمربندی برای ساختمان ۲۰ طبقه در طبقه ۱۰ (۰/۵H از بالا) و برای ساختمان ۲۵ طبقه در طبقه ۱۴ (۰/۴۴H از بالا) به‌دست آمد.
- با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی محل بهینه مهارکمربندی برای ساختمان ۲۰ طبقه در طبقه ۱۴(۰/۳H از بالا)و برای ساختمان ۲۵ طبقه در طبقه ۱۶ (۰/۳۶H از بالا) حاصل شد.

Jahanshahi & Rahgozar (2013) تعیین جایگاه بهینه مهارهای کمربندی با استفاده از روش انرژی را پیشنهاد کردند. اکثر مطالعات برای تعیین جایگاه بهینه مهارها بر مبنای جابجایی بام می باشد اما این پژوهشگران به بررسی این مسئله بر اساس ضابطه انرژی پرداخته‌اند. در این مدل قاب تیوبی شکل پیرامونی که از ستون‌های محیطی تشکیل شده، به عنوان یک تیر باکسی شکل فرض گردیده و تاثیر مهارها و تیوب روی هسته برشی به عنوان یک فنر پیچشی در محل آن‌ها مدل شده‌است. محل بهینه فنر جایی است که فنر بیشترین انرژی را جذب کند. بدین منظور مشتق انرژی با فرض محل اولیه فنر در پایه، برابر صفر در نظر گرفته شده‌است. ایشان بارجانبی را در سه حالت مختلف به صورت متمرکز در بالا، مثلثی و گسترده یکنواخت به سازه اعمال کردند و محل بهینه مهارکمربندی را در این سه حالت تعیین کردند که یافته‌های آنان به شرح زیر می‌باشد:

- محل بهینه در مدل با یک بارجانبی متمرکز در بالای سازه : ۰/۶۶۷H از بالای سازه
- محل بهینه در مدل با بارجانبی مثلثی: ۰/۴۹H از بالای سازه
- محل بهینه در مدل با بارجانبی گسترده یکنواخت: ۰/۴۴۱H از بالای سازه

Kiran Nanduri et al. (2013) یک سازه ۳۰ طبقه بتنی با مهاربازویی و کمربندخرپایی فولادی را با هدف یافتن محل بهینه مهارها و کمربندها با استفاده از تحلیل استاتیکی خطی مورد بررسی قراردادند. این محققان پس از تحلیل سازه‌های مذکور و مشاهده نمودارهای جابجایی جانبی بام و نیروی‌محوری ایجاد شده در ستون‌های پیرامونی عنوان کردند که محل بهینه یک سطح مهارکمربندی تقریبا در وسط ارتفاع سازه (۰/۵H) می‌باشد.

مدل سازی

در این مقاله یک ساختمان ۴۰ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه همراه با مهاربند هم محور (V معکوس) فولادی با استفاده از نرم افزار SAP2000 مدل سازی و طراحی می گردد. سپس با اضافه کردن مهارهای کمربندی و تعیین موقعیت بهینه‌شان، رفتار این مدل با مدل بدون مهارکمربندی مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت.

معرفی سازه

۱. بارمرده و زنده‌کف‌ها به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هر مترمربع و بار تیرهای پیرامونی برابر ۴۰۰ کیلوگرم در متر درنظر گرفته می‌شود.
۲. سیستم سقف سازه‌ای جهت حمل بارهای‌ثقلی، دال بتن‌آرمه یک طرفه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.
۳. اتصالات تیرهای میانی به ستون‌های هسته مرکزی به صورت صلب و به ستون‌های محیطی به صورت مفصلی می‌باشد و اتصالات بقیه تیرها به صورت خمشی در هر دو طرف می‌باشد. کلیه ستون‌ها به صورت گیردار به پی متصل می‌گردند و کلیه اتصالات مهاربندهای هسته مرکزی، مهارهای بازویی و کمربندهای خرپایی به صورت مفصلی می‌باشند.
۴. ستون ها، تیرها و بادبندها در ترازهای مختلف بر اساس طراحی اولیه دارای مقاطع مختلفی می‌باشند.
۵. مهارهای‌کمربندی در تمامی مدل‌ها دارای مقاطع یکسانی می‌باشند.
۶. دهانه‌های میانی(هسته مرکزی)از تراز اول تا تراز بام با بادبندهای هم‌محور(V معکوس) مهاربندی می‌شوند.
۷. ارتفاع کف به کف سازه‌ای در کل طبقات ۳۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع کلی سازه، ۱۲۸ متر می‌باشد.

ملاحظات طراحی و مشخصات ساختمان بر اساس آئین نامه ۲۸۰۰ به شرح زیر می‌باشد:

۱. کاربری ساختمان مسکونی در نظر گرفته می‌شود.

۲. جهت تعیین نیروی زلزله از آئین نامه ۲۸۰۰ زلزله استفاده خواهدشد و نوع زمین بر اساس آیین نامه، تیپ ۳ فرض می‌گردد.

۳. ساختمان با ضریب اهمیت متوسط (I=1) و در منطقه با لرزه‌خیزی زیاد (A=0.3g) در نظر گرفته می‌شود.

۴. سیستم سازه‌ای برای بار جانبی، قاب خمشی فولادی ویژه + مهاربندی هم محور فولادی در هر دو جهت X و Y در نظر گرفته می‌شود که ضریب رفتار این سیستم طبق آیین‌نامه، ۹ می‌باشد.

برای مدل‌سازی سازه ۴۰ طبقه از سه حالت به شرح زیر استفاده می‌گردد:

۱) سازه بدون مهارکمربندی، ۲) سازه با یک تراز مهارکمربندی، ۳) سازه با دو تراز مهارکمربندی

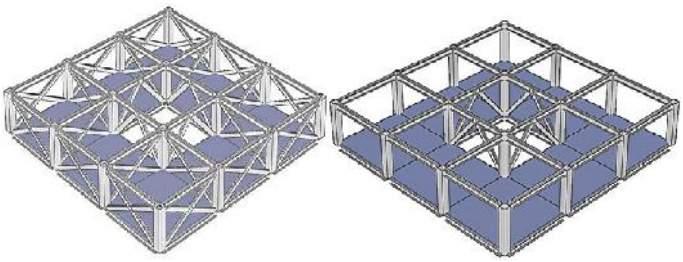
در سازه با یک تراز با جابه‌جایی مهارکمربندی از اولین طبقه تا آخرین طبقه و مقایسه نتایج حاصل از هر کدام، موقعیت بهینه برای این آرایش بدست می‌آید. برای آرایش سازه با دو تراز، یکی از مهارها در یک طبقه بصورت ثابت قرار می‌گیرد و دیگری در طبقات پایین آن جابجا می‌گردد و این‌کار برای کلیه طبقات از بالا به پایین انجام می‌شود تا به موقعیتی برسیم که حداکثر میزان کاهش را در جابجایی تراز بام داشته باشیم.

مشخصات هندسی سازه و مقاطع

مشخصات هندسی سازه به شرح زیر می‌باشند:

۱. پلان سازه به شکل مربع، با سه دهانه ۶ متری در هر دو جهت X و Y می‌باشد.

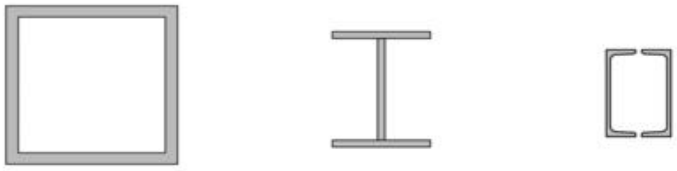
۲. پلان سازه‌ای تیپ طبقات بدون مهارکمربندی و با مهارکمربندی در شکل۳ نمایش داده می‌شود.



(ب) (الف)

شکل ۳ : (الف) نمای سه بعدی از ترازهای بدون مهارکمربندی، (ب) نمای سه بعدی از ترازهای با مهارکمربندی

شکل هندسی مقاطع سازه‌ای برای ستون‌ها، تیرها، بادبندها و المان‌های مهارهای‌کمربندی در شکل ۴ نشان داده می‌شود:



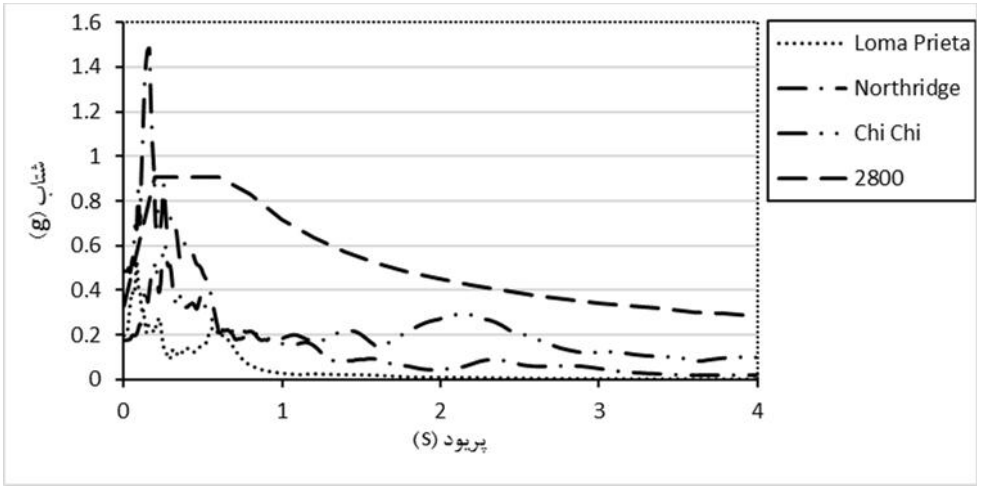
شکل ۴ - شکل هندسی مقاطع سازه ای. الف)مقطع بادبندها ب)مقطع تیرها پ)مقطع ستون ها

معرفی شتاب نگاشت‌ها

جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی از طیف پاسخ ترکیبی هر زوج شتاب نگاشت ناشی از سه زلزله نشان داده شده در جدول ۱، که مطابق با ضوابط آیین‌نامه ۲۸۰۰ از سایت دانشگاه برکلی کالیفرنیا از ایستگاه‌های واقع بر زمین از نوع خاک ۳ انتخاب شده‌اند، استفاده می‌شود. طیف‌های پاسخ شتاب میانگین زلزله‌ها در شکل ۵ نمایش داده می‌شوند.

جدول۱- مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی

زلزله	تاریخ	ایستگاه	بزرگا	جهت	PGA(g)	فاصله از گسل(km)
Loma Prieta	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	Palo Alto - 1900 Embarc	۶/۹	شمالی- جنوبی	۰/۲۰۴	۳۶/۱
				شرقی- غربی	۰/۲۱۳	
Northridge	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	LA - Centinela St	۶/۷	شمالی- جنوبی	۰/۴۶۵	۳۰/۹
				شرقی- غربی	۰/۳۲۲	
Chi Chi	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	TCU033	۷/۶	شمالی- جنوبی	۰/۱۸	۳۸/۲
				شرقی- غربی	۰/۱۵۶	



شکل ۵- طیف طرح آیین‌نامه۲۸۰۰ و طیف‌های بازتاب شتاب بر اساس رکوردهای جدول۱ به ازای میرایی ۵ درصد

تحلیل سازه و نتایج آن

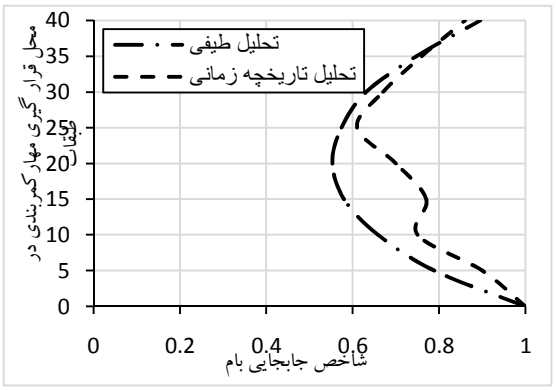
برای انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی از مولفه‌های طولی و عرضی تاریخچه‌زمانی شتاب سه‌زلزله که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه گردید، استفاده خواهدشد. زوج شتاب نگاشت‌های انتخاب شده مطابق با ضوابط آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقیاس شده و در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین برای انجام تحلیل طیفی از میانگین طیف های پاسخ هر زوج شتاب نگاشت که در شکل ۵ ارائه گردیده اند، استفاده می شود.

در این بخش نمودارهای جابجایی جانبی بام برای انواع حالات از سیستم مهارکمربندی نمایش داده می‌شوند. اعداد نمایش داده شده بر روی محور افقی نمودارها به صورت نسبت بدون بعد زیر می‌باشند.

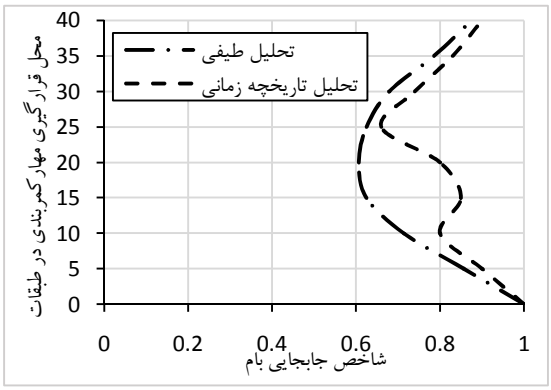
$$\text{شاخص حداکثر جابجایی بام} = \frac{\text{حداکثر جابجایی بام در حالت با مهارکمربندی}}{\text{حداکثر جابجایی بام در حالت بدون مهارکمربندی}}$$

جابجایی‌های نشان داده شده در شکل‌ها، در فرمت بدون بعد نسبت به هسته بدون مهارکمربندی می‌باشند. بنابراین، مقدار واحد نشان داده شده در آخرین نقطه سمت راست، جابجایی بام ساختمان بدون اثر مقاومت مهارکمربندی می‌باشد. جابجایی‌های شامل اثر مهارکمربندی در منحنی S شکل نمایش داده می‌شوند. این منحنی‌ها با جابجایی پی در پی محل مهارها که از بالای ساختمان شروع شده و به تدریج به سمت پایین منتقل شده، به‌دست می‌آیند. ابتدا نمودارهای حاصل از تحلیل‌های طیفی و تاریخچه‌زمانی برای سازه با یک سطح مهارکمربندی و مقایسه آن با نمودارهای حاصل از تحلیل سازه بدون مهار در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده می‌شود. سپس نمودارهای حاصل از تحلیل سازه با دو سطح مهارکمربندی و مقایسه آن با سازه با یک سطح مهار در شکل‌های ۹ تا ۱۴ ارائه می‌گردد. در نمودارهای سازه با دو سطح مهارکمربندی، جهت رسم هر منحنی جایگاه مهارکمربندی بالایی ثابت فرض‌شده و مهارپایینی در طبقات زیرین آن جابجا می‌شود که جابجا شدن آن دقیقا از طبقه زیرین مهار بالایی شروع می‌شود. شماره مشخص شده برای هر منحنی بیانگر شماره طبقه‌ای است که مهارکمربندی بالایی در آنجا قرار گرفته

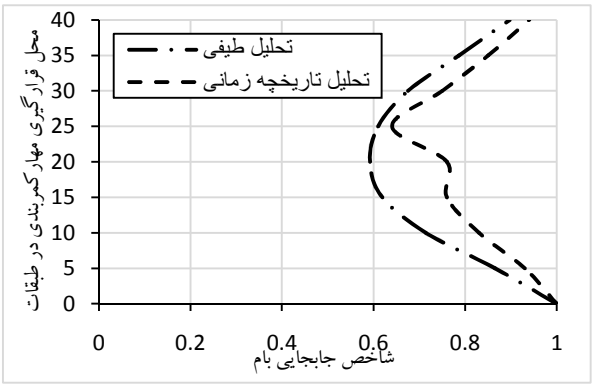
است. فاصله افقی بین منحنی‌ها و محور قائم، جابجایی بام ساختمان مختص همان چیدمان مهارها می‌باشد. به عنوان مثال، M0 بیانگر مدل با یک مهارکمربندی تنها و M32 بیانگر مدل با یک مهارکمربندی در طبقه ۳۲ و مهار دیگر در حال جابجایی در طبقات پایین ۳۲ می باشد.



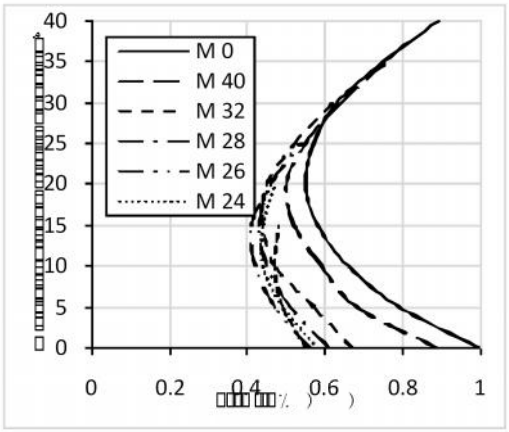
شکل ۶- نمودار حاصل از تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی مدل با یک سطح مهار کمربندی تحت زلزله Loma Prita



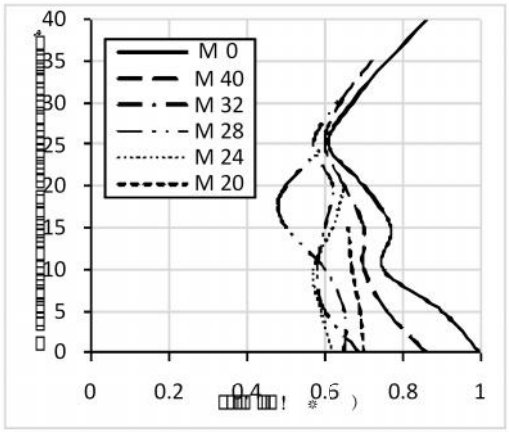
شکل ۷- نمودار حاصل از تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی



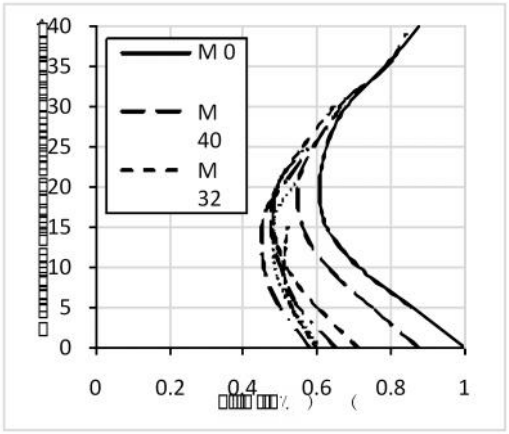
شکل ۸- نمودار حاصل از تحلیل طیفی و تاریخچه‌زمانی مدل با یک سطح مهارکمربندی تحت زلزله



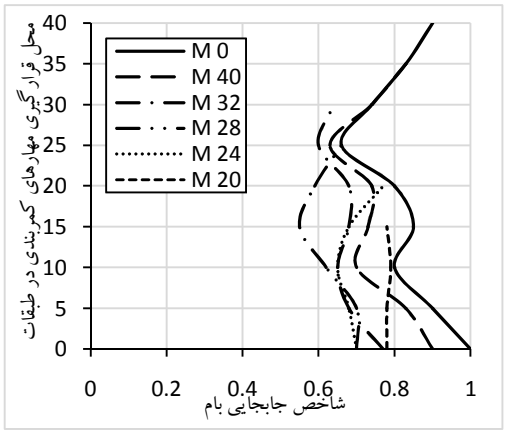
شکل ۹- نمودار حاصل از تحلیل طیفی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله Loma



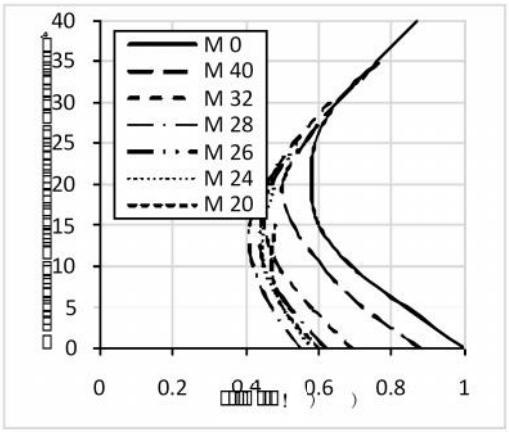
شکل ۱۰- نمودار حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله Loma Prita



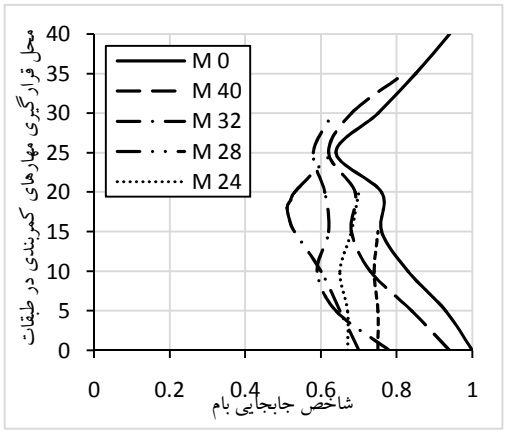
شکل ۱۱- نمودار حاصل از تحلیل طیفی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله



شکل ۱۲- نمودار حاصل از تاریخچه زمانی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله ***Northridge***



شکل ۱۳- نمودار حاصل از تحلیل طیفی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله ***Chi Chi***



شکل ۱۴- نمودار حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مدل با دو سطح مهار کمربندی تحت زلزله ***Chi Chi***

نتیجه گیری

نتایج زیر از مطالعات عددی انجام گرفته در این پژوهش حاصل شده‌اند:

۱. استفاده از سیستم مهارکمربندی سبب افزایش سختی سازه و در نتیجه افزایش بهره‌وری آن در مقابل بارهای جانبی می‌گردد. نتایج نشان داده‌اند که با اضافه کردن مهارکمربندی به هسته مهاربندی شده، کاهش چشمگیری در جابجایی جانبی ساختمان ایجاد می‌گردد.

۳. محل بهینه مهارکمربندی در حالتی‌که از یک تراز استفاده شد، در تحلیل طیفی در طبقه ۲۰ (۰/۵H از بالا) و در تحلیل تاریخچه‌زمانی در طبقات ۲۳ تا ۲۵ (۰/۴H از بالا) به‌دست آمد.

۴. محل بهینه برای مهارهای‌کمربندی با دو تراز، از نتایج تحلیل طیفی برای مهار بالایی در طبقه ۲۶ و مهار پایینی در طبقات ۱۳ و ۱۴ یعنی ۰/۳۵H و ۰/۶۵H از بالا به دست آمد و از نتایج تحلیل تاریخچه‌زمانی برای مهار بالایی در طبقه ۲۸ و برای مهار پایینی در طبقات ۱۶، ۱۷و یا ۱۸ یعنی تقریبا ۰/۳H و ۰/۵۸H از بالا حاصل شد.

۶. در حالتی‌که از یک سطح مهارکمربندی در جایگاه بهینه‌شان استفاده گردید، در تحلیل طیفی حدودا ٪۴۰ و در تحلیل تاریخچه‌زمانی حدودا ٪۳۵ از جابجایی بام کاسته شد.

۷. در حالتی‌که از دو سطح مهارکمربندی در جایگاه بهینه‌شان استفاده شد، در تحلیل طیفی تقریبا ٪۶۰ و در تحلیل تاریخچه‌زمانی تقریبا ٪۵۰ از جابجایی بام کاسته شد.

مراجع

خیرالدین ع. آرامش س (۱۳۹۱) سیستم های مقاوم سازه ای در ساختمان های بلند، ویرایش اول، دانشگاه سمنان

کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (۱۳۸۴)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، عشیری،امیر ، ویرایش سوم، تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

Fawzia S and Fatima T (2010) Deflection control in composite building by using belt truss and outriggers system, In Proceedings of the 2010 World Academy of Science, *Engineering and Technology conference*

Haghollahi A, besharat ferdous Mand kasiri M (2012) Optimization of outrigger locations in steel tall buildings subjected to earthquake loads, *15 WCEE LISBONA*

http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html.

Jahanshahi MR and Rahgozar R (2013) Optimum location of outrigger-belt truss in tall buildings based on maximization of the belt truss strain energy, *International Journal of Engineering*, Vol. 26, No. 7, 693-700.

Kiran Nanduri R, Suresh B and Ihtesham Hussain MD (2013) Optimum Position of Outrigger System for High-Rise Reinforced Concrete Buildings Under Wind And Earthquake Loadings, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol-02, Issue-08, 76-89

Stafford Smith B and Coull A (1991) Tall building structures; analysis and design, Tall building structures; analysis and design ,1st Ed, Wiley, New York

Taranath BS (2010) Reinforced Concrete Design of Tall Buildings, CRC Press