تاثیر مکان بهینه مهاربازویی در ساختمان‌های بلند تحت بار باد بر روی لنگر پای سازه و حداکثر جابجایی سازه با استفاده از روش تحلیلی

سجاد بایگی*

گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران، s.baygi@esfarayen.ac.ir

چکیده

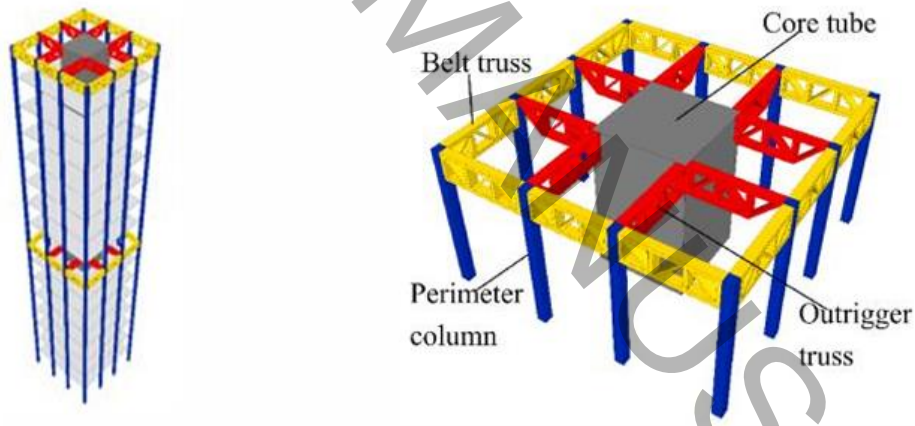
با افزایش ارتفاع سازه مقدار نیروی جانبی اعمال شده به سازه توسط نیروی باد افزایش می‌یابد، با افزایش نیروی جانبی وارد به سازه و افزایش ارتفاع سازه مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه و حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه، افزایش می‌یابد. استفاده از مهارهای بازویی و خرپای کمربندی یکی از روش‌ها برای کاهش حداکثر لنگر و حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه می‌باشد. یکی از نکات اساسی در سیستم مهاربازویی و خرپای کمربندی مکان بهینه مهارهای بازویی است. در این پژوهش، ابتدا روابط تحلیلی حاکم بر رفتار سازه دارای مهاربازویی استخراج و روابط لازم برای تعیین مکان بهینه مهاربازویی جهت کمینه‌سازی لنگر پای سازه برای سازه‌ای با n مهاربازویی ارائه شده است. سپس با حل دستگاه معادلات حاصل از شرط بهینگی و استفاده از محاسبات عددی، بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی حداکثر جابجایی سازه تحت دو شدت مختلف بار باد تعیین شده است. نتایج نشان دهنده آن است که با استفاده از یک مهاربازویی در سازه بازدهی کاهش لنگر پای سازه تا ۶۰٪ و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی تا ۵۰٪ افزایش خواهد یافت. با افزایش شدت بار باد عملکرد مهارهای بازویی افزایش یافته و بازدهی سازه افزایش خواهد یافت. با افزایش نسبت سختی خمشی مهارهای بازویی به سختی خمشی هسته مرکزی سازه بازدهی سازه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مهاربازویی، عملکرد سازه، محل بهینه، بار باد، لنگر پای سازه.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ساختمان‌های بلندمرتبه به طور گسترده ساخته شده و در حال ساخت می‌باشد. با توجه به اهمیت آنها در جوامع شهری، ساختمان‌های بلندمرتبه به پایه زیرساختی رایجی در مناطق شهری در سراسر جهان تبدیل شده است [۳-۱]. با افزایش ارتفاع سازه‌ها، مقاومت در برابر باد به یک ملاحظه طراحی محوری تبدیل می‌شود، به ویژه به دلیل ارتعاشات ناشی از باد متقاطع و گردابه‌ها، که می‌توانند حرکات ساختاری قابل توجهی ایجاد کنند [۵ و ۴]. با افزایش ارتفاع و لاغرتر شدن ساختمان‌ها، فرکانس‌های طبیعی آن‌ها کاهش می‌یابد و به محدوده‌ای می‌رسد که در آن ارتعاشات با دامنه بزرگ به راحتی می‌تواند رخ دهد. لاغری یک ساختمان بلند معمولاً با نسبتی بین ارتفاع و کمترین بُعد پلان آن توصیف می‌شود [۷ و ۶]. با افزایش ارتفاع ساختمان با اعمال بار باد و زلزله مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه نیز افزایش خواهد یافت [۸]. سیستم مهاربازویی و کمربند خرپایی یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی در ساختمان‌های بلند و فوق بلند است [۹]. این عناصر سازه‌ای به عنوان اجزای طره‌ای عمل می‌کنند که از هسته مرکزی ساختمان تا ستون‌های پیرامونی امتداد یافته و یک چارچوب سازه‌ای یکپارچه ایجاد می‌کنند [۱۰]. این سیستم دارای خواص مهم استحکام بالا، مصرف انرژی متمرکز و قابلیت جایگزینی پس از سانحه است. این یک سیستم سازه‌ای مقاوم است که به عنوان یک قاب عظیم متشکل از هسته، ستون‌های محیطی و خرپاهای مهار بازویی، سیستم مهار بازویی سختی جانبی را بهبود می‌بخشد و جابجایی جانبی ساختمان‌های بلند مرتبه را که در معرض بارهای لرزه‌ای یا باد قرار دارند، کاهش می‌دهد [۱۲ و ۱۱]. استفاده از سیستم مهاربازویی و خرپای کمربندی برای کاهش جابجایی ایجاد شده در سازه و کاهش لنگر ایجاد شده در سازه به دهه‌های گذشته برمی‌گردد [۱۳]. در شکل ۱ سیستم مهاربازویی به همراه خرپای کمربندی نشان داده شده است. در این نوع سیستم از ستون‌های خارجی در یک ارتفاع خاص به عنوان کمربند استفاده می‌شود. مهارهای بازویی این کمربند را به هسته سازه متصل می‌کنند. سیستم خرپای کمربندی ستون‌های خارجی را به هسته متصل می‌کند، در نتیجه ستون‌های خارجی و هسته داخلی در برابر چرخش مقاومت می‌کنند که باعث کاهش جابجایی سازه و لنگر ایجاد شده در پای هسته داخلی می‌شود.



شکل ۱ : سازه دارای مهاربازویی با خرپای کمربندی [۱۴]

Fig. 1. Structure with outriggers and a belt truss [14]

عملکرد سیستم مهاربازویی به مشخصات سازه و نحوه استقرار مهاربازویی‌ها وابسته است. از جمله پارامترهای مؤثر می‌توان به سختی خمشی هسته مرکزی، سختی خمشی مهاربازویی، سختی محوری ستون‌های پیرامونی، تعداد مهاربازویی‌ها و محل قرارگیری آن‌ها در ارتفاع ساختمان اشاره کرد. در میان این پارامترها، تعیین محل مناسب مهاربازویی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییر محل مهاربازویی می‌تواند میزان مشارکت ستون‌های پیرامونی، توزیع لنگر خمشی در ارتفاع ساختمان و در نهایت لنگر پای سازه و جابجایی جانبی آن را تغییر دهد. مکان بهینه مهاربازویی به معیار عملکرد مورد استفاده و ویژگی‌های سختی سیستم وابسته است و یک مکان مشخص لزوماً برای تمامی معیارهای عملکردی بهینه نیست.

ACCEPTED MANUSCRIPT

اثربخشی این سیستم‌ها به ویژه در ساختمان‌های بلند مرتبه با پیکربندی‌های هندسی نامنظم، از جمله پلان‌های نامتقارن طبقات یا عقب‌نشینی‌های عمودی، که حساسیت بیشتری نسبت به نیروهای لرزه‌ای نشان می‌دهند، برجسته‌تر است [۱۵]. در زمینه طراحی بهینه سیستم مهاربازویی به همراه خرپای کمربندی با استفاده از روش‌های عددی تحقیقات زیادی انجام شده است[۱۶-۲۰]. تنش‌های ناشی از مواد در سازه‌های بلندمرتبه تحت تحریک باد معمولاً در مرحله الاستیک قرار دارند [۲۱]. ژیانگ[1] و همکاران با استفاده از روش شبه تحریک به بررسی مکان‌های بهینه مهاربازویی و پارامترهای میرایی بهینه برای سیستم‌های مهاربازویی ترکیبی مستهلک کننده انرژی در ساختمان‌های بلند مرتبه تحت بارهای لرزه‌ای و باد پرداختند [۲۲]. ژیانگ و همکاران به بررسی مکان‌های بهینه استقرار بازوهای بیرونی در سیستم‌های دوگانه صرفاً بازوی بیرونی و سیستم‌های ترکیبی بازوی بیرونی مستهلک‌کننده انرژی در ساختمان‌های بلندمرتبه تحت بار لرزه‌ای پرداختند [۲۳]. اسمیت[2] و کویل[3] به بررسی محل بهینه مهارهای بازویی جهت مینیمم کردن حداکثر جابجایی سازه‌های دارای ۱، ۲، ۳ و ۴ مهاربازویی پرداختند [۲۴]. کیم[4] و همکاران مکان‌های بهینه استقرار مهارهای بازویی که باعث کمینه‌سازی تغییر مکان جانبی بالای ساختمان‌های بلند می‌شوند، با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی غیرخطی مبتنی بر گرادیان، تعیین کردند [۲۵]. تارانا[5] محل بهینه مهار بازویی را برای یک مدل ساده‌شده با مهارهای بازویی که برای ساده‌سازی حل مسئله، صلب فرض شده بودند، بررسی کرد. با این حال، سختی مهار بازویی بر دریفت کل و گشتاور هسته و همچنین محل بهینه مهارهای بازویی برای حداکثر کاهش دریفت تأثیر می‌گذارد [۲۶]. لی[6] و همکاران یک روش طراحی برای قرارگیری سیستم مهاربازویی یک ساختمان بلند با در نظر گرفتن مهارهای بازویی به صورت صلب با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی ساختمان ارائه دادند [۲۷]. کامگار و رهگذر براساس حداکثرسازی انرژی کرنشی سیستم خرپای کمربندی-بازویی، یک روش برای تعیین مکان بهینه سیستم بازویی انعطاف‌پذیر ارائه کردند [۲۸].

بایگی [۲۹] در تحقیقی محل بهینه مهاربازویی با هدف کمینه‌سازی لنگر پای هسته برای یک سازه مجهز به چهار مهاربازویی را مشخص کرد. با وجود ارزشمند بودن نتایج حاصل، اثر تعداد مهاربازویی‌ها بر عملکرد سیستم و همچنین تأثیر مکان بهینه حاصل بر بازدهی حداکثر جابجایی ساختمان در آن پژوهش مورد بررسی قرار نگرفت. در پژوهش حاضر، ضمن توسعه چارچوب تحلیلی، سازه‌های مجهز به یک تا چهار مهاربازویی مورد بررسی قرار گرفته و علاوه بر میزان بازدهی کاهش لنگر پای سازه، بازدهی کاهش حداکثر جابجایی نیز ارزیابی شده است. از این رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر اثر تعداد مهاربازویی‌ها و ارزیابی هم‌زمان دو شاخص بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی، توسعه‌ای بر پژوهش پیشین محسوب می‌شود.

استفاده از مهارهای بازویی یک روش موثر برای کاهش دادن حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه و همچنین کاهش دادن لنگر ایجاد شده در پای سازه است. با وجود مطالعات انجام‌شده، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین بر تعیین مکان بهینه مهاربازویی با هدف کاهش حداکثر جابجایی یا دریفت سازه متمرکز بوده‌اند. در مقابل، بررسی مکان بهینه مهاربازویی با معیار کمینه‌سازی لنگر پای سازه و سپس ارزیابی هم‌زمان اثر این مکان بر لنگر پای سازه و حداکثر جابجایی، به‌ویژه با در نظر گرفتن شدت‌های مختلف بار باد و تعداد متفاوت مهاربازویی‌ها، نیازمند بررسی بیشتری است. در مقاله حاضر هدف اصلی بررسی اثر مکان بهینه مهاربازویی، که با معیار کمینه‌سازی لنگر پای سازه تعیین می‌شود، بر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی است.

بر این اساس، هدف این پژوهش، ارائه یک روش تحلیلی برای تعیین مکان بهینه مهاربازویی‌ها در ساختمان‌های بلند تحت اثر بار باد و بررسی اثر این مکان بر عملکرد جانبی سازه است. ابتدا روابط تحلیلی حاکم بر سیستم سازه‌ای استخراج شده و رابطه لازم برای تعیین مکان بهینه مهاربازویی‌ها با هدف کمینه‌سازی لنگر پای سازه برای سازه دارای n مهاربازویی به دست می‌آید. سپس با استفاده از حل دستگاه معادلات حاصل از شرط بهینگی، مکان مهاربازویی‌ها تعیین شده و اثر آن بر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش

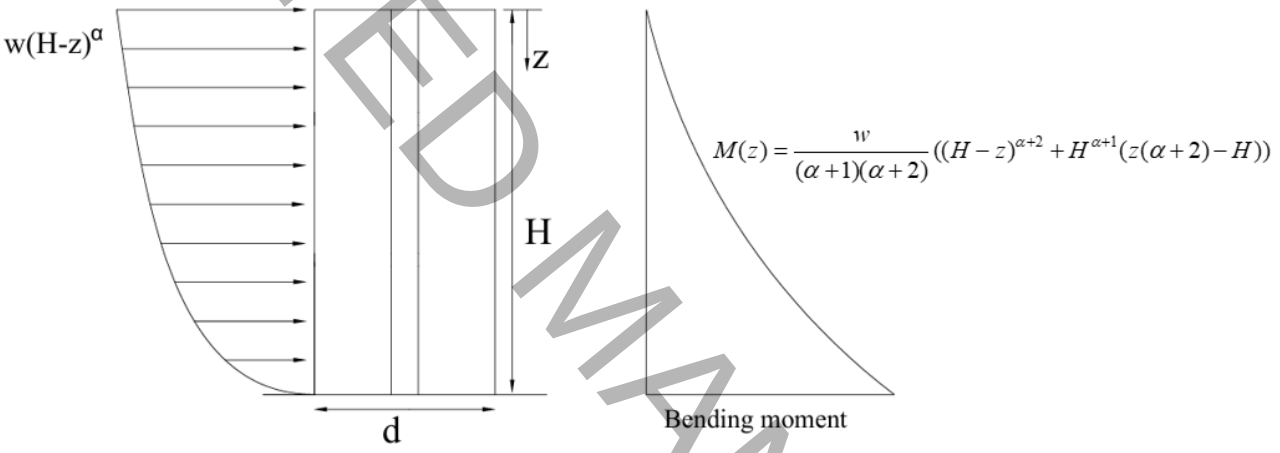
[1] Xing
[2] Smith
[3] Coull
[4] Kim
[5] Taranath
[6] Lee

ACCEPTED MANUSCRIPT

حداکثر جابجایی بررسی می‌شود. برای بررسی اثر تعداد مهاربازویی‌ها، سازه‌ای دارای یک تا چهار مهاربازویی و برای بررسی اثر شدت بار باد، دو شدت مختلف بار باد در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مرتبط با سختی خمشی مهاربازویی، سختی خمشی هسته مرکزی و سختی محوری ستون‌های پیرامونی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.
با توجه به اینکه روابط بنیادی تعادل، سازگاری و دوران مورد استفاده در این پژوهش از اصول شناخته‌شده تحلیل سازه هستند، نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه یک چارچوب تحلیلی برای اعمال این اصول به سیستم مهاربازویی تحت بار باد با توزیع متغیر در ارتفاع، تعمیم روابط برای سازه‌های مجهز به n مهاربازویی و تعیین هم‌زمان مکان بهینه مهاربازویی‌ها با هدف کمینه‌سازی لنگر پای سازه است. در ادامه، اثر مکان بهینه حاصل بر حداکثر جابجایی و لنگر پای سازه تحت شدت‌های مختلف بار باد بررسی می‌شود.

۲- روابط ریاضی

جهت بررسی موقعیت بهینه مهارهای بازویی بر روی عملکرد سازه که باعث مینیمم شدن لنگر پای سازه می‌شوند. ابتدا روابط ریاضی برای سازه دارای دو مهاربازویی بدست آمده و بعد برای سازه دارای n مهاربازویی تعمیم داده خواهد شد. در شکل ۲ توزیع نیروی باد و دیاگرام لنگر ایجاد شده در سازه بدون مهاربازویی نشان داده شده است.

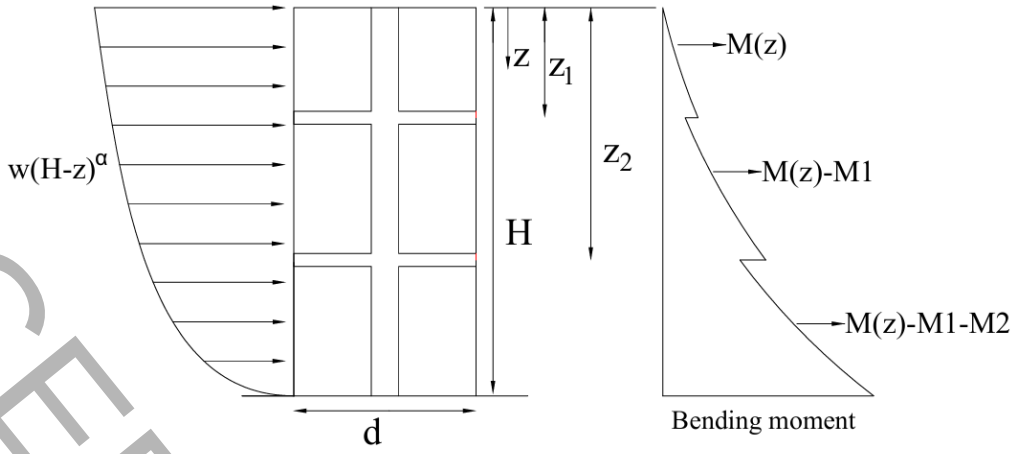


شکل ۲ : توزیع نیروی باد و دیاگرام لنگر در سازه بدون مهاربازویی.

Fig. 2. Wind force distribution and moment diagram for a structure without outrigger bracing

که w شدت بار باد مرجع، H ارتفاع کل سازه، d فاصله ستون‌های اطراف از یکدیگر، M(z) لنگر ایجاد شده در تراز z سازه و α ضریب توزیع بار باد است که تغییرات بار باد را در ارتفاع ساختمان کنترل می‌کند. ضریب α وابسته به منطقه قرارگیری سازه و پستی و بلندی آن منطقه داشته که مقدار آن از ۰,۱۴ تا ۰,۵ متغییر است [۳۰]. با افزودن مهاربازویی به سازه مقدار لنگر ایجاد شده در سازه کاهش خواهد یافت. اگر فرض شود که مقدار لنگر کاهش یافته در مهاربازویی قرار گرفته در تراز z1، مقدار M1 و در تراز z2، M2 باشد. دیاگرام لنگر ایجاد شده در سازه‌ای دارای دو مهاربازویی مطابق شکل ۳ خواهد بود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳ : دیاگرام لنگر در سازه‌ای دارای دو مهاربازویی.

Fig. 3. Moment diagram for a structure with two outriggers.

در این تحقیق فرض شده است اتصال مهارهای بازویی به هسته مرکزی صلب و این اتصال با ستون‌های کناری مفصلی است. با توجه به فرض در نظر گرفته شده مقدار دوران ایجاد شده در مهاربازویی در تراز z1 و z2 در محل اتصال به هسته مرکزی از رابطه (۱) و (۲) بدست می‌آید.

$$\theta_1 = \frac{2M_1(H-z_1)}{d^2(EA)_C} + \frac{2M_2(H-z_2)}{d^2(EA)_C} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (۱)$$

$$\theta_2 = \frac{2(M_1+M_2)(H-z_2)}{d^2(EA)_C} + \frac{M_2 d}{12(EI)_o} \quad (۲)$$

که $(EA)_C$ صلبیت محوری ستون‌ها و $(EI)_o$ صلبیت خمشی مهار بازویی است. همچنین EI، Θ1 و Θ2 به ترتیب صلبیت خمشی هسته مرکزی، چرخش مهارهای بازویی در محل اتصال به هسته مرکزی در تراز z1 و تراز z2 می‌باشد.

با توجه به باراعمالی به سازه دوران ایجاد شده در هسته مرکزی در تراز z1 و z2 از رابطه (۳) و (۴) بدست می‌آید.

$$\theta_1 = \int_{z_1}^{H} \frac{M}{EI}\,dx = \frac{1}{EI}\int_{z_1}^{z_2}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 \right)dx + \frac{1}{EI}\int_{z_2}^{H}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 - M_2 \right)dx \quad (۳)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{EI}\int_{z_2}^{H}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 - M_2 \right)dx \quad (۴)$$

با توجه به صلب بودن محل اتصال مهارهای بازویی با هسته مرکزی، میزان دوران ایجاد شده در محل اتصال برای مهارهای بازویی و هسته مرکزی برابر است. با برابر قرار دادن دوران ایجاد شده در مهاربازویی و هسته مرکزی سازه رابطه (۵) و (۶) بدست خواهد آمد.

$$\frac{1}{EI}\int_{z_1}^{z_2}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 \right)dx + \frac{1}{EI}\int_{z_2}^{H}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 - M_2 \right)dx = \frac{2M_1(H-z_1)}{d^2(EA)_C} + \frac{2M_2(H-z_2)}{d^2(EA)_C} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (۵)$$

$$\frac{1}{EI}\int_{z_2}^{H}\left(\left(\frac{w}{(\alpha+1)(\alpha+2)}(H-z)^{\alpha+2} + H^{\alpha+1}(z(\alpha+2)-H)\right) - M_1 - M_2 \right)dx = \frac{2(M_1+M_2)(H-z_2)}{d^2(EA)_C} + \frac{M_2 d}{12(EI)_o} \quad (۶)$$

با ساده سازی روابط (۵) و (۶)، رابطه (۷) و (۸) بدست خواهد آمد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$M_1\left[S_1+S(H-z_1)\right]+M_2\left[S(H-z_2)\right]=\frac{w}{EI}\left(\frac{2(H-z_1)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_1)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_1)+2z_1)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}\right) \quad (۷)$$

$$M_1\left[S(H-z_2)\right]+M_2\left[S_1+S(H-z_2)\right]=\frac{w}{EI}\left(\frac{2(H-z_2)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_2)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_2)+2z_2)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}\right) \quad (۸)$$

که

$$S=\frac{1}{EI}+\frac{2}{d^2(EA)_C},\ S_1=\frac{d}{12(EI)_o} \quad (۹)$$

در صورتی که رابطه (۷) و (۸) به صورت ماتریسی نوشته شود، رابطه (۱۰) بدست خواهد آمد.

$$\begin{bmatrix}M_1\\M_2\end{bmatrix}=\frac{w}{EI}A_1^{-1}B_1$$

$$B_1=\begin{bmatrix}\frac{2(H-z_1)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_1)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_1)+2z_1)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)\alpha+3)}\\ \frac{2(H-z_2)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_2)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_2)+2z_2)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}\end{bmatrix}\quad A_1=\begin{bmatrix}S_1+S(H-z_1) & S(H-z_2)\\ S(H-z_2) & S_1+S(H-z_2)\end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

با توجه به روابط به‌دست‌آمده، اثر هر مهاربازویی بر لنگر پای سازه تابعی از تراز قرارگیری آن، سختی خمشی هسته مرکزی، سختی خمشی مهاربازویی و سختی محوری ستون‌های پیرامونی است. از آنجا که هدف پژوهش بررسی تاثیر مکان بهینه مهارهای بازویی بر روی بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه به‌گونه‌ای است که لنگر پای سازه حداقل شود، ابتدا رابطه لنگر پای سازه به‌صورت تابعی از مکان مهاربازویی‌ها تشکیل می‌شود. سپس با اعمال شرط لازم برای وجود نقطه بهینه، مشتق لنگر پای سازه نسبت به مختصات هر یک از مهاربازویی‌ها برابر صفر قرار داده می‌شود. حل دستگاه معادلات حاصل، مکان‌های بهینه مهاربازویی‌ها را تعیین می‌کند. با مشخص شدن محل بهینه مهارهای بازویی و استخراج روابط بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه می‌توان تاثیر محل بهینه را بر عملکرد سازه بررسی کرد.

با در نظر گرفتن بار اعمالی به سازه و کاهش لنگر در مهارهای بازویی، لنگر ایجاد شده در پای سازه و حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه از رابطه (۱۱) بدست خواهد آمد.

$$M_e=\frac{wH^{\alpha+2}}{\alpha+2}-M_1-M_2$$
$$\Delta_o=\frac{w(2\alpha+9)H^{\beta+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI}-\frac{1}{2EI}(M_1(H^2-z_1^2)+M_2(H^2-z_2^2)) \quad (۱۱)$$

که M_e و Δ_o به ترتیب مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه و حداکثر جابجایی ایجاد شده در سازه می‌باشد. در صورت استفاده از n مهاربازویی در یک سازه روابط (۱۰) و (۱۱) به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) تبدیل خواهد شد.

$$\begin{bmatrix}M_1 & M_2 & \dots & M_i & \dots & M_n\end{bmatrix}^T=\frac{w}{EI}A^{-1}B$$

$$A=\begin{bmatrix}S_1+S(H-z_1) & S(H-z_2) & \dots & S(H-z_n)\\ S(H-z_2) & S_1+S(H-z_2) & \dots & S(H-z_n)\\ & & \vdots & \\ S(H-z_n) & S(H-z_n) & \dots & S_1+S(H-z_n)\end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$B=\begin{bmatrix} \frac{2(H-z_1)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_1)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_1)+2z_1)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)} \\ \frac{2(H-z_2)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_2)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_2)+2z_2)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)} \\ \vdots \\ \frac{2(H-z_i)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_i)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_i)+2z_i)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)} \\ \vdots \\ \frac{2(H-z_n)^{\alpha+3}+(\alpha+3)(H-z_n)H^{\alpha+1}(\alpha(H+z_n)+2z_n)}{2(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)} \end{bmatrix}$$

$$M_e=\frac{wH^{\alpha+2}}{\alpha+2}-\sum_{i=1}^{n}M_i=\frac{wH^{\alpha+2}}{\alpha+2}-\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^Te^T$$

$$\Delta_o=\frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI}-\frac{1}{2EI}\sum_{i=1}^{n}M_i(H^2-z_i^2)=\frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI}-\frac{1}{2EI}\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^TC \quad (۱۳)$$

$$e=\begin{bmatrix}1 & 1 & \dots & 1\end{bmatrix} \quad , \quad C^T=\begin{bmatrix}H^2-z_1^2 & H^2-z_2^2 & \dots & H^2-z_n^2\end{bmatrix}$$

۲-۱- مکان بهینه مهار بازویی جهت مینیمم کردن لنگر پای سازه

مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه از رابطه (۱۳) بدست می‌آید. این رابطه علاوه بر مشخصات سازه و نیروی شدت باد به محل قرارگیری مهارهای بازویی نیز وابسته است. جهت بدست آوردن مینیمم مقدار لنگر پای سازه از رابطه (۱۳) نسبت z1, z2, z3,…, zn مشتق گرفته و مطابق رابطه (۱۴) برابر صفر قرار داده می‌شود. بعد از حل n معادله به صورت همزمان محل بهینه مهارهای بازویی جهت مینیمم کردن لنگر پای سازه براساس مشخصات سازه و شدت بار باد بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial z_1}\left(\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^Te^T\right)=0 \\ &\frac{\partial}{\partial z_2}\left(\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^Te^T\right)=0 \\ &\vdots \\ &\frac{\partial}{\partial z_i}\left(\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^Te^T\right)=0 \\ &\vdots \\ &\frac{\partial}{\partial z_n}\left(\frac{w}{EI}B^T(A^{-1})^Te^T\right)=0 \end{aligned} \quad (۱۴)$$

جهت در نظر گرفتن تمام پارامترهای سازه برای رسم مکان بهینه مهارهای بازویی پارامترهایی به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شوند [۳۱].

$$\omega=\frac{\gamma}{12(1+\lambda)},\lambda=\frac{EI}{(EA)_C(\frac{d^2}{2})}\ ,\ \gamma=\frac{EId}{(EI)_oH} \quad (۱۵)$$

از دیدگاه فیزیکی، پارامتر بدون‌بُعد معرفی‌شده بیانگر میزان مشارکت نسبی هسته مرکزی، ستون‌های پیرامونی و مهارهای بازویی در تأمین سختی جانبی کل سازه است. مقادیر بزرگ‌تر این پارامتر نشان‌دهنده غالب بودن رفتار خمشی هسته مرکزی نسبت به سایر اجزای سازه بوده و در نتیجه نقش مهارهای بازویی در کاهش لنگر پای هسته و جابجایی جانبی سازه محدودتر خواهد بود. در مقابل، مقادیر کوچک‌تر این پارامتر حاکی از افزایش سهم ستون‌ها و مهارهای بازویی در رفتار جانبی سازه است که منجر به افزایش کارایی سیستم اوتریگر و جابه‌جایی محل بهینه مهارهای بازویی به ترازهای بالاتر ساختمان می‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

با توجه به مطالب مطرح شده با تغییر پستی و بلندی محل قرارگیری سازه و همچنین منطقه قرارگیری سازه شدت باد تغییر خواهد کرد. در این تحقیق جهت در نظر گرفتن تاثیر شدت باد بر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش جابجایی بام دو مقدار ۰/۱۴ و ۰/۵ جهت مقدار α در نظر گرفته شده است. همچنین جهت بررسی تاثیر تعداد مهارهای بازویی ۱ تا ۴ مهاربازویی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- بازدهی کاهش لنگر پای هسته مرکزی

جهت بررسی تاثیر مهارهای بازویی بر روی کاهش لنگر ایجاد شده در سازه، تاثیر مهارهای بازویی با کمترین مقدار لنگری که ممکن است در پای سازه در صورت عدم وجود مهاربازویی ایجاد شود، مقایسه خواهد شد. با در نظر گرفتن رفتار هسته مرکزی و ستون‌های اطراف به صورت مرکب، سختی خمشی کل سازه بدون در نظر گرفتن مهارهای بازویی به صورت رابطه (۱۶) در نظر گرفته می‌شود [۳۱].

$$(EI)_t = \frac{(EA)_C d^2}{2} + EI \qquad (۱۶)$$

که $(EI)_t$ سختی خمشی کل سازه بدون در نظر گرفتن سختی خمشی مهارهای بازویی است. کمترین لنگری که می‌تواند در سازه ایجاد شود، از رابطه (۱۷) بدست خواهد آمد.

$$M_t = \frac{wH^{\alpha+2}}{\alpha+2} - \frac{EIwH^{\alpha+2}}{(\alpha+2)(EI)_t} = \frac{wH^{\alpha+2}}{(\alpha+2)EIS} \qquad (۱۷)$$

بازدهی کاهش لنگر پای سازه به صورت تقسیم میزان کاهش لنگر پای سازه که به وسیله مهاربازویی اتفاق می‌افتد بر حداقل لنگر ممکن پای سازه به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود.

$$E_M = \frac{\frac{w}{EI} B^T (A^{-1})^T e^T}{\frac{wH^{\alpha+2}}{(\alpha+2)EIS}} = \frac{S(\alpha+2)}{H^{\alpha+2}} B^T (A^{-1})^T e^T \qquad (۱۸)$$

که E_M بازدهی کاهش لنگر پای سازه می‌باشد.

۲-۳- بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه

با توجه به توضیحات بخش قبلی، کمترین مقدار جابجایی که در بالای سازه می‌تواند ایجاد شود، از رابطه (۱۹) بدست خواهد آمد

$$\Delta_t = \frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI} - \frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)(EI)_t} = \frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI} \frac{1}{EIS} \qquad (۱۹)$$

بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه به صورت مقدار کاهش جابجایی در بالاترین ارتفاع ساختمان که به وسیله مهاربازویی اتفاق می‌افتد بر حداقل جابجایی ممکن در بالای سازه دارای مهاربازویی به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$E_\Delta = \frac{\frac{1}{2EI}\frac{w}{EI} B^T (A^{-1})^T C}{\frac{w(2\alpha+9)H^{\alpha+4}}{6(\alpha+3)(\alpha+4)EI}\frac{1}{EIS}} = \frac{3S(\alpha+3)(\alpha+4)B^T (A^{-1})^T C}{(2\alpha+9)H^{\alpha+4}} \qquad (۲۰)$$

که E_Δ بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه می‌باشد.

به منظور بررسی رفتار سیستم و شناسایی عوامل مؤثر بر مکان بهینه مهاربازویی‌ها، تحلیل پارامتریک انجام شد. در این تحلیل، پارامترهای اصلی شامل تعداد مهاربازویی‌ها، شدت بار باد و پارامترهای مرتبط با سختی هسته مرکزی، مهاربازویی و ستون‌های پیرامونی به صورت هدفمند تغییر داده شدند و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند. برای هر حالت، ابتدا مکان بهینه مهاربازویی‌ها بر اساس کمینه‌سازی لنگر پای سازه تعیین و سپس بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه متناظر با

ACCEPTED MANUSCRIPT

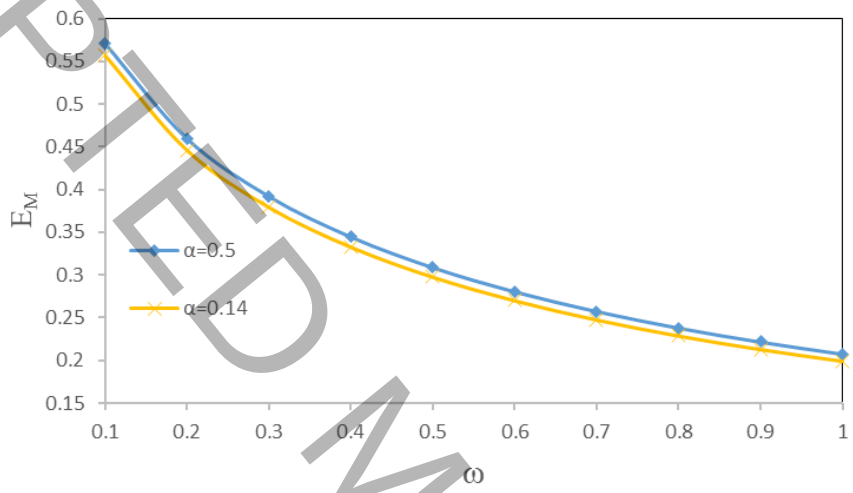
مکان بهینه محاسبه شد. بنابراین، نمودارهای ارائه‌شده در بخش بعد با هدف بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر مکان بهینه و عملکرد جانبی سازه تهیه شده‌اند.

۳- نتایج

در ادامه بررسی مکان بهینه مهارهای بازویی بر روی بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه پرداخته شده است.

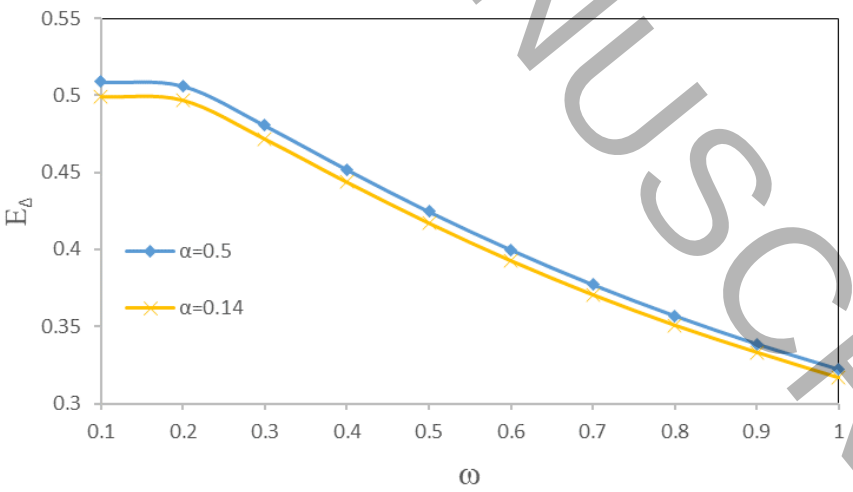
۳-۴- سازه با یک مهاربازویی

در شکل ۴ و ۵ بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه برای سازه‌ای دارای یک مهاربازویی نشان داده شده است.



شکل ۴ : بازدهی کاهش لنگر پای سازه با شدت باد مختلف در سازه با یک مهاربازویی.

Fig. 4. Efficiency of reducing the structure's base moment under varying wind intensities in a structure with one outrigger.



شکل ۵ : بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه با شدت باد مختلف در سازه با یک مهاربازویی.

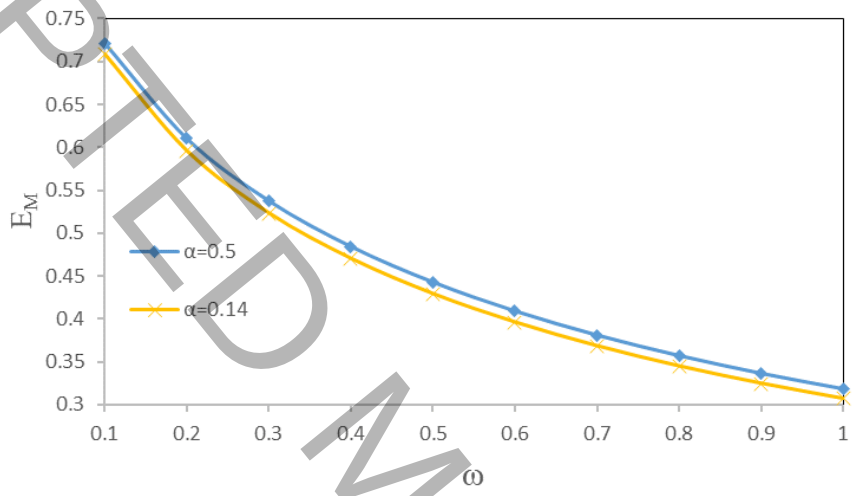
Fig. 5. Efficiency of reducing the maximum structural displacement under varying wind intensities in a structure with one outrigger.

ACCEPTED MANUSCRIPT

با افزایش شدت باد بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه مقدار کمی افزایش خواهد یافت. با افزایش نسبت سختی خمشی مهارهای بازویی به سختی خمشی هسته مرکزی بیشتر شدن شدت باد باعث افزایش بیشتر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی خواهد شد. با افزایش سختی خمشی مهارهای بازویی و یا کاهش سختی خمشی هسته مرکزی و یا کاهش سختی محوری ستون‌ها بازدهی کاهش لنگر پای سازه افزایش می‌یابد. استفاده از یک مهار بازویی در سازه در مکانی که سبب مینیمم شدن لنگر پای سازه شود، باعث افزایش بازدهی کاهش لنگر پای سازه تا ۵۷٪ و افزایش بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه تا ۵۰٪ درصد خواهد یافت.

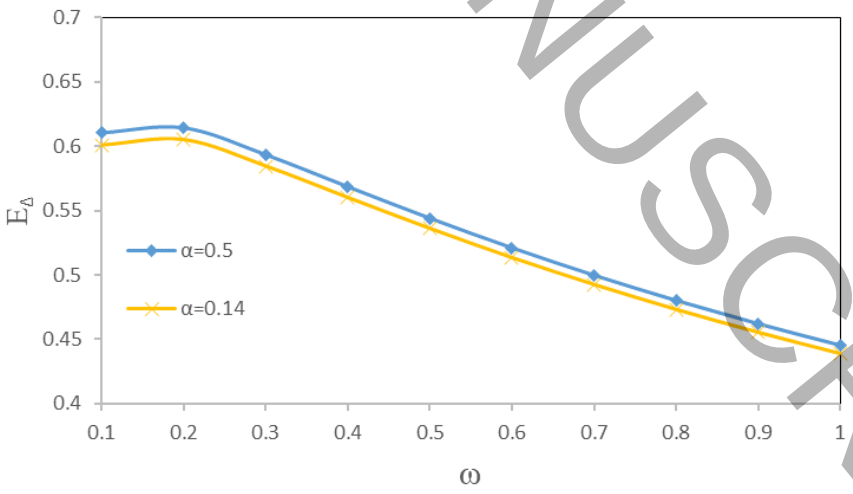
۳-۵- سازه با دو مهار بازویی

در شکل ۶ و ۷ بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه برای سازه‌ای دارای یک مهاربازویی نشان داده شده است.



شکل ۶ : بازدهی کاهش لنگر پای سازه با شدت باد مختلف در سازه با دو مهاربازویی.

Fig. 6. Efficiency of reducing the structure's base moment under varying wind intensities in a structure with two outriggers.



شکل ۷ : بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه با شدت باد مختلف در سازه با دو مهاربازویی.

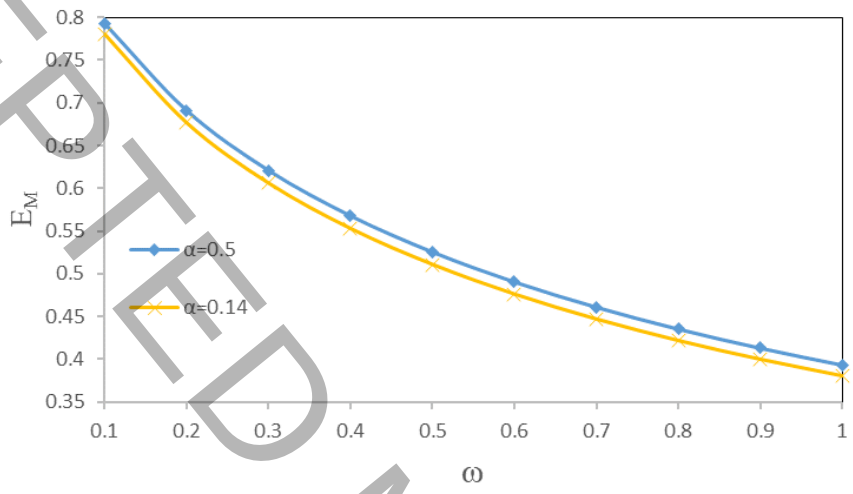
Fig. 7. Efficiency of reducing the maximum structural displacement under varying wind intensities in a structure with two outriggers.

ACCEPTED MANUSCRIPT

با افزایش تعداد مهارهای بازویی از یک به دو عدد مقدار بازدهی کاهش لنگر پای سازه بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ با توجه به سختی خمشی و محوری اعضای سازه افزایش خواهد یافت. این افزایش برای بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ می‌باشد. اضافه شدن تعداد مهارهای بازویی از یک به دو عدد در سازه‌ای که نسبت سختی خمشی هسته مرکزی به سختی خمشی مهارهای بازویی زیاد باشد، تاثیر بیشتری بر روی افزایش بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه خواهد گذاشت.

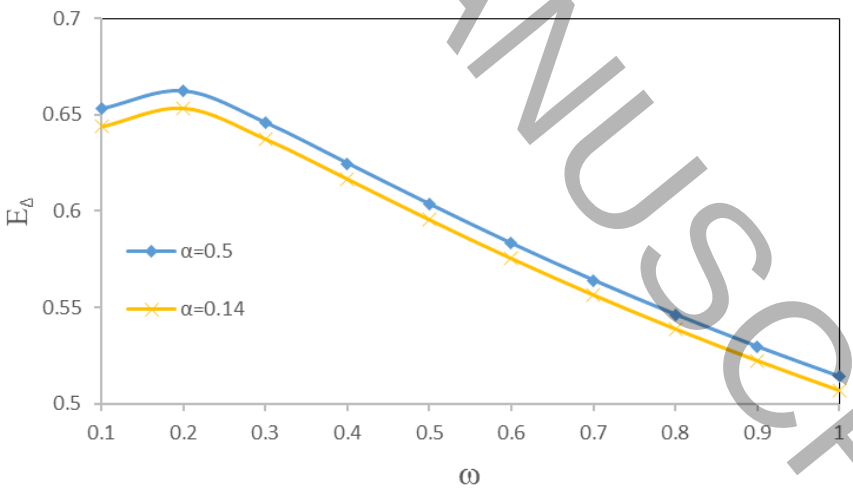
۳-۶- سازه با سه مهار بازویی

در شکل ۸ و ۹ بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه برای سازه‌ای دارای یک مهاربازویی نشان داده شده است.



شکل ۸ : بازدهی کاهش لنگر پای سازه با شدت باد مختلف در سازه با سه مهاربازویی.

Fig. 8. Efficiency of reducing the structure's base moment under varying wind intensities in a structure with Three outriggers.



شکل ۹ : بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه با شدت باد مختلف در سازه با سه مهاربازویی.

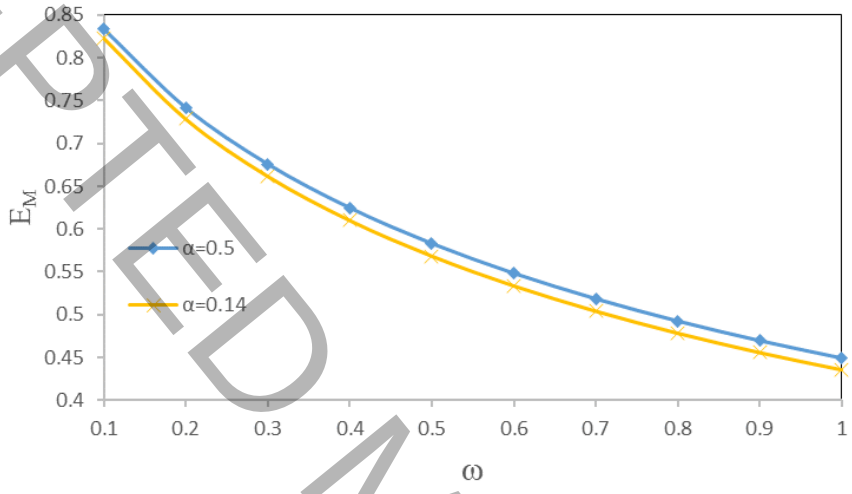
Fig. 9. Efficiency of reducing the maximum structural displacement under varying wind intensities in a structure with Three outriggers.

ACCEPTED MANUSCRIPT

با افزایش نسبت سختی خمشی مهارهای بازویی به سختی خمشی هسته مرکزی، بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه ابتدا افزایش و با افزایش بیشتر این نسبت بازدهی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش نسبت سختی خمشی مهارهای بازویی به سختی خمشی هسته مرکزی تا مقداری باعث افزایش بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه خواهد شد. با افزایش تعداد مهارهای بازویی از یک به سه عدد بازدهی کاهش لنگر پای سازه بین ۴۰٪ تا ۹۰٪ و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه بین ۳۰٪ تا ۶۰٪ افزایش خواهد یافت.

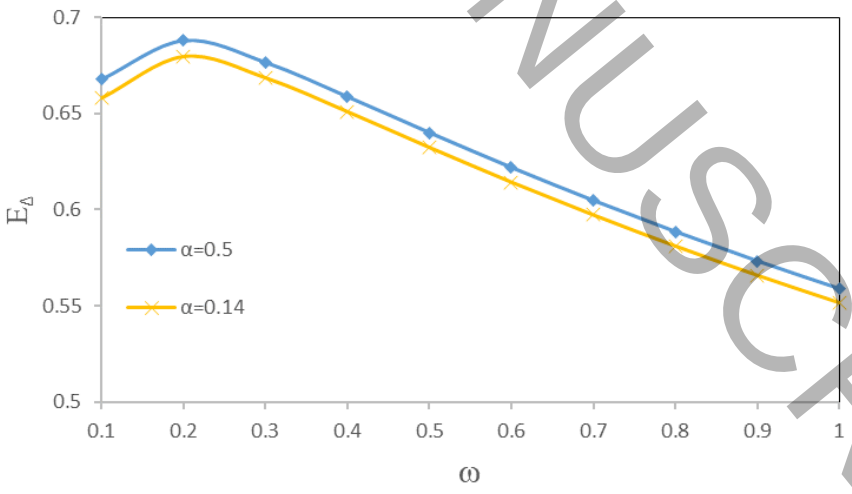
۳-۷- سازه با چهار مهار بازویی

در شکل ۱۰ و ۱۱ بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه برای سازه‌ای دارای چهار مهاربازویی نشان داده شده است.



شکل ۱۰ : بازدهی کاهش لنگر پای سازه با شدت باد مختلف در سازه با چهار مهاربازویی.

Fig. 10. Efficiency of reducing the structure's base moment under varying wind intensities in a structure with four outriggers.

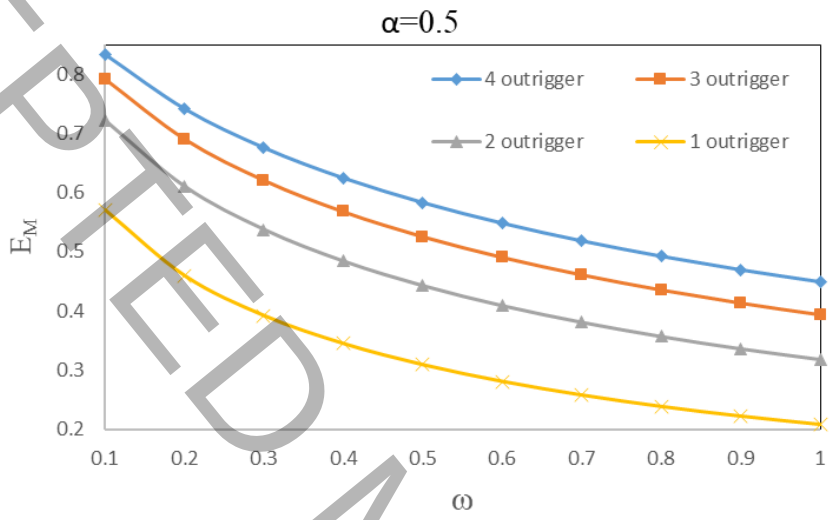


شکل ۱۱ : بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه با شدت باد مختلف در سازه با چهار مهاربازویی.

Fig. 11. Efficiency of reducing the maximum structural displacement under varying wind intensities in a structure with four outriggers.

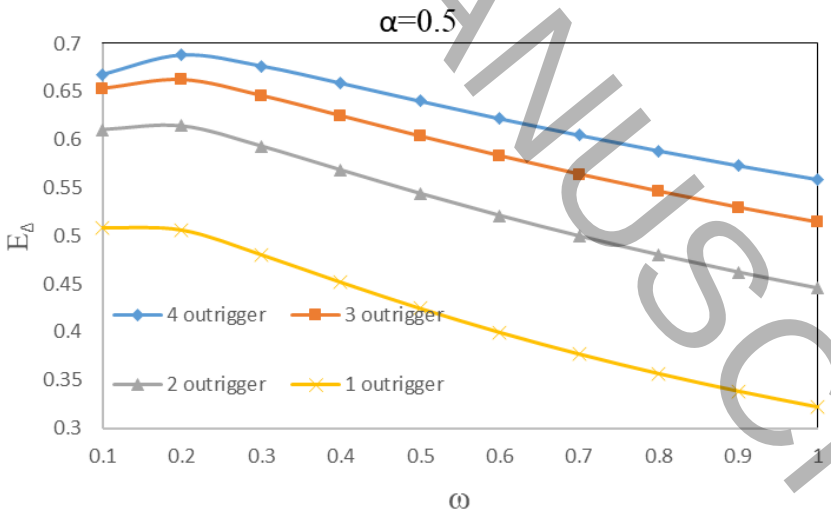
ACCEPTED MANUSCRIPT

با افزایش تعداد مهارهای بازویی از دو به سه عدد بازدهی کاهش لنگر پای سازه بین ۱۰٪ تا ۲۳٪ و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه بین ۷٪ تا ۱۶٪ با توجه به سختی خمشی مهارهای بازویی، سختی خمشی هسته مرکزی و سختی محوری ستون‌ها افزایش خواهد یافت. با افزایش تعداد مهارهای بازویی از سه به چهار عدد بازدهی کاهش لنگر پای سازه بین ۵٪ تا ۱۴٪ و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی بین ۲٪ تا ۹٪ درصد افزایش خواهد یافت. با توجه به نتایج افزایش تعداد مهارهای بازویی از مقداری بیشتر تاثیر زیادی بر روی بازدهی سازه ندارد به ویژه در سازه‌هایی که نسبت سختی خمشی مهارهای بازویی به سختی خمشی هسته مرکزی زیاد باشد. با افزایش شدت باد بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه افزایش خواهد یافت. این افزایش بازدهی در سازه‌های دارای مهاربازویی بیشتر، کمتر است. در شکل ۱۲ و ۱۳ تاثیر تعداد مهارهای بازویی بر روی بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه برای شدت بار مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۲ : بازدهی کاهش لنگر پای سازه با تعداد مهارهای بازویی مختلف.

Fig. 12. Efficiency of reducing the structure's base moment with varying numbers of outriggers.



شکل ۱۳ : بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه با تعداد مهارهای بازویی مختلف.

Fig. 13. Efficiency of reducing the maximum structural displacement with varying numbers of outriggers.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر مکان بهینه مهاربازویی، که بر اساس کمینه‌سازی لنگر پای سازه تعیین می‌شود، بر عملکرد ساختمان‌های بلند تحت اثر بار باد مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ساختمان‌های مجهز به ۱ تا ۴ مهاربازویی تحت دو شدت مختلف بار باد تحلیل شدند و اثر تعداد مهاربازویی‌ها، نسبت سختی خمشی مهاربازویی به هسته مرکزی و سختی محوری ستون‌های پیرامونی بر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و حداکثر جابجایی بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

- قرارگیری یک مهاربازویی در مکانی که منجر به کمینه‌شدن لنگر پای سازه می‌شود، می‌تواند بازدهی کاهش لنگر پای سازه را تا حدود ۵۷ درصد و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی سازه را تا حدود ۵۰ درصد افزایش دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که حتی استفاده از یک مهاربازویی، در صورت انتخاب مناسب محل قرارگیری، می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کنترل پاسخ جانبی ساختمان بلند داشته باشد.
- افزایش تعداد مهاربازویی‌ها از یک به دو عدد، بسته به سختی خمشی مهاربازویی‌ها، سختی خمشی هسته مرکزی و سختی محوری ستون‌ها، موجب افزایش بازدهی کاهش لنگر پای سازه در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد و افزایش بازدهی کاهش حداکثر جابجایی در حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد می‌شود.
- با افزایش تعداد مهاربازویی‌ها از یک به سه عدد، بازدهی کاهش لنگر پای سازه در محدوده ۴۰ تا ۹۰ درصد و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش تعداد مهاربازویی‌ها در این محدوده می‌تواند به بهبود قابل‌توجه عملکرد جانبی سازه منجر شود.
- بازده افزایشی مهاربازویی‌ها با افزایش تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که افزایش تعداد مهاربازویی‌ها از سه به چهار عدد، بازدهی کاهش لنگر پای سازه را تنها حدود ۵ تا ۱۴ درصد و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی را حدود ۲ تا ۹ درصد افزایش می‌دهد. مقایسه این مقادیر با افزایش‌های حاصل از افزودن مهاربازویی‌های اولیه نشان می‌دهد که افزایش تعداد مهاربازویی‌ها الزاماً به افزایش متناسب در عملکرد سازه منجر نمی‌شود. این موضوع از دیدگاه طراحی حائز اهمیت است و نشان می‌دهد که انتخاب تعداد مهاربازویی باید با توجه هم‌زمان به میزان بهبود عملکرد و هزینه و پیچیدگی ایجاد سیستم انجام شود.
- افزایش نسبت سختی خمشی مهاربازویی به سختی خمشی هسته مرکزی موجب افزایش بازدهی کاهش لنگر پای سازه می شود. با این حال، در مورد حداکثر جابجایی، افزایش این نسبت الزاماً به افزایش یکنواخت بازدهی منجر نمی‌شود و پس از رسیدن به یک مقدار مشخص، افزایش بیشتر نسبت سختی می‌تواند بازدهی کاهش حداکثر جابجایی را کاهش دهد. بنابراین، افزایش سختی مهاربازویی‌ها به‌تنهایی معیار مناسبی برای دستیابی به بیشترین کاهش جابجایی نیست و انتخاب سختی مناسب باید با توجه به سختی هسته مرکزی و سایر اعضای سیستم انجام شود.
- نتایج نشان می‌دهد که تغییر سختی محوری ستون‌ها، در کنار سختی خمشی هسته و مهاربازویی، بر میزان انتقال اثر مهاربازویی به ستون‌های پیرامونی و در نتیجه بر بازدهی کاهش لنگر پای سازه و حداکثر جابجایی اثرگذار است. بر این اساس، عملکرد سیستم مهاربازویی را نمی‌توان مستقل از سختی اعضای اصلی سازه ارزیابی کرد.
- با افزایش شدت بار باد، بازدهی کاهش لنگر پای سازه و بازدهی کاهش حداکثر جابجایی افزایش می‌یابد. با این حال، میزان افزایش بازدهی ناشی از افزایش شدت باد در سازه‌های دارای تعداد بیشتری مهاربازویی کمتر است. این رفتار نشان می‌دهد که در سازه‌هایی که از ابتدا دارای چند مهاربازویی هستند، افزایش شدت بار باد تأثیر کمتری بر افزایش نسبی بازدهی سیستم خواهد داشت.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که مکان بهینه مهاربازویی که بر مبنای کمینه‌سازی لنگر پای سازه تعیین شده است، علاوه بر کاهش لنگر پای سازه، موجب کاهش قابل‌توجه حداکثر جابجایی نیز می‌شود. با این حال، میزان تأثیرگذاری مهاربازویی بر این دو شاخص عملکردی یکسان نیست و به تعداد مهاربازویی‌ها، ویژگی‌های سختی هسته و مهاربازویی و سختی محوری ستون‌های پیرامونی وابسته است. بنابراین، تعیین مکان و تعداد مهاربازویی‌ها باید با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای مقاومت و تغییرشکل سازه انجام شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵- منابع

[1] O. Hasançebi, T. Bahçecio, O. Kurç, M.P. Saka, Optimum design of high-rise steel buildings using an evolution strategy integrated parallel algorithm, Comput Struct, 89 (2011), 2037–2051.
[2] Z.H. Zhang, Q.S. Li , Seismic responses of super high-rise buildings under longperiod ground motions, Eng. Struct, 294 (2023).
[3] Z. Wen, B. Kaiming, H. Hong, 2023. Development of locally resonant metabasement for seismic induced vibration control of high-rise buildings, Eng. Struct, 275 (2023).
[4] K. Wijesooriya, D. Mohotti, A. Amin, K. Chauhan, Wind loads on a super-tall slender structure: a validation of an uncoupled fluid-structure interaction (FSI) analysis, J. Build. Eng., 35 (2021).
[5] D.P.P. Meddage, K. Wijesooriya, K. Chauhan, C. K. Lee, D. Mohotti, Surrogate modelling of unsteady wind pressure on tall buildings with varying slenderness and side ratios using attention-based neural networks, Journal of Building Engineering, 120 (2026).
[6] F. Hou, M. Jafari, Investigation approaches to quantify wind-induced load and response of tall buildings: A review, Sustainable Cities and Society, 62 (2020).
[7] K. Kayvani, Performance-based Design of Tall and Longspan Structures, IABSE-IASS Symposium, September, London, UK, (2011), 20-23.
[8] S. Baygi, A. Khazaee, The Optimal Number of Outriggers in a Structure Under Different Lateral Loadings, J. Inst. Eng. India Ser. A, 100 (2019).
[9] W. Alhaddad, Y. Halabi, H. Xu, H. Lei, A comprehensive introduction to outrigger and belt-truss system in skyscrapers, Structures, 27 (2020), 989-998.
[10] M. Bhandari, S.D. Bharti, M.K. Shrimali, T.K. Datta, Applicability of capacity spectrum method for base-isolated building frames at different performance points, J Earthq Eng, 25 (2021), 270–299.
[11] Y. Zhou, C.Q. Zhang, X.L. Lu, An inter-story drift-based parameter analysis of the optimal location of outriggers in tall buildings, Struct. Des. Tall Special Build, 25 (5) (2016), 215–231.
[12] Y. Chen, Z.Y. Zhang, Analysis of outrigger numbers and locations in outrigger braced structures using a multi-objective genetic algorithm, Struct. Des. Tall Special Build. 27 (1) (2016).
[13] B.S. Taranath, Optimum belt truss location for high-rise structures. Structural Engineer, Structural Engineer, 53 (1975), 18-21.
[14] M. Wang, S. Nagarajaiah, F. Sun, Optimal design of supplemental negative stiffness damped outrigger system for high-rise buildings resisting multi-hazard of winds and earthquakes, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 218 (2021).
[15] J.C.D. Hoenderkamp, Second outrigger at optimum location on high-rise shear wall, Struct Des Tall Spec, 17 (3) (2008), 619–634.
[16] I.G. Buckle, R.L. Mayes, Seismic isolation: history, application, and performance-a world view, Earthq Spectra, 6 (1990).
[17] J.C.D. Hoenderkamp, M.C.M. Bakker, Analysis of high-rise braced frames with outriggers, Struct. Des. Tall Special Build, 12 (4) (2003), 335–350.
[18] J.C.D. Hoenderkamp, Shear wall with outrigger trusses on wall and column foundations, Struct. Des. Tall Special Build, 13 (1) (2004). 73–87.
[19] R. Hulea, B. Parv, M. Nicoreac, B. Petrina, Optimum design of outrigger and belt truss systems using genetic algorithm, J. Civ. Eng. Archit, 8 (6) (2014).
[20] H.S. Park, E. Lee, S.W. Choi, B.K. Oh, T. Cho, Y. Kim, Genetic-algorithm-based minimum weight design of an outrigger system for high-rise buildings, Eng. Struct, 117 (2016), 496–505.
[21] X. Yijiang, H. Wei, Extracting nonlinear aerodynamic damping of crosswind-excited tall buildings based on probability density function of displacement amplitude, Journal of Building Engineering, 72 (2023).
[22] L. Xing , P. Gardoni, Y. Zhou, P. Zhang, Optimal models of outrigger locations and damping parameter for combined energy dissipation outrigger systems subject to seismic and wind loads, Journal of Building Engineering, 76 (2023).
[23] L. Xing, Y. Zhou, M. Aguaguiña, Optimal outrigger locations of double-pure-outrigger systems and combined energy-dissipating outrigger systems under seismic loads, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 153 (2022).
[24] B.S Smith, A. Coull, Tall building structures: Analysis and design. John Willey, New York, 1991.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[25] H. Kim, Y.J. Lim, H.L. Lee, Optimum location of outrigger in tall buildings using finite element analysis and gradient-based optimization method, Journal of Building Engineering, 31 (2020).
[26] Y. Chen, Z. Zhang, Analysis of outrigger numbers and locations in outrigger braced structures using a multi-objective genetic algorithm, Struct Des Tall Spec, 27 (1) (2018).
[27] S.B. Lee, A. Tovar, Outrigger placement in tall buildings using topology optimization, Eng. Struct, 74 (2014), 122–129.
[28] R. Kamgar, R. Rahgozar, Determination of optimum location for flexible outrigger systems in tall buildings with constant cross section consisting of framed tube, shear core, belt truss and outrigger system using energy method, Int J Steel Struct, 17 (1) (2017).
[29] S.Baygi, Optimal position of outriggers for minimizing the base moment under lateral load, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 613-616.
[30] B.S. Taranath, Steel, concrete, and composite design of tall buildings, McGraw-Hill, New York, (1998).
[31] B.S. Smith, A. Coull, Tall building structures: Analysis and design, John Willey, New York, (1991).

ACCEPTED MANUSCRIPT