

محاسبه محل بهینه مهارهای بازویی در سازه با مینیمم کردن لنگر پای هسته تحت بار جانبی

سجاد بایگی*

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت جام، تربت جام، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

کلمات کلیدی:

خرپای کمربندی
محل بهینه
سازه بلند
مهاربازویی
لنگر پای هسته

خلاصه: یکی از مشکلات اساسی در سازه‌های بلند مقابله با نیروی جانبی و در نتیجه جابجایی زیاد ایجاد شده تحت اثر این نیروها به ویژه در طبقات بالای سازه و همچنین افزایش لنگر پای سازه می‌باشد. یکی از سیستم‌هایی که در سازه‌های بلند برای مقابله با این نیروها و جابجایی ایجاد شده به وسیله این نیروها مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از مهاربازویی است. در این سیستم هسته مرکزی به وسیله یک یا چند مهاربازویی به ستون‌های کناری متصل می‌شود. در این تحقیق به بررسی موقعیت بهینه مهارهای بازویی تحت بارگذاری همزمان مثلثی - متمرکز و بارگذاری باد با در نظر گرفتن چهار مهاربازویی در سازه و اثر تغییرات سختی المان‌های سازه بر روی کاهش لنگر پای سازه پرداخته شده است. همچنین بازدهی کاهش حداکثر لنگر ایجاد شده در سازه دارای مهارهای بازویی در مقایسه با سازه بدون مهاربازویی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که با افزایش سختی مهارهای بازویی محل بهینه مهارهای بازویی به سمت پایین سازه جابجا خواهد شد و همچنین فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر کاهش می‌یابد. محل بهینه مهارهای بازویی هنگامی که شدت بارگذاری باد افزایش یابد، به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد. همچنین فاصله مهارهای بازویی در این حالت از یکدیگر افزایش خواهد یافت.

۱- مقدمه

با افزایش ارتفاع سازه نیروهای جانبی ایجاد شده در سازه افزایش یافته که باعث ایجاد جابجایی زیاد در طبقات بالای سازه و افزایش لنگر ایجاد شده در پای هسته سازه‌های بلند می‌شود. ایجاد لنگر زیاد در پای هسته سازه‌های بلند باعث ایجاد دوران زیاد در هسته شده که این امر باعث ایجاد نیروی محوری زیادی در ستون‌های کناری سازه خواهد شد. یکی از راه‌های کاهش لنگر ایجاد شده در هسته سازه‌های بلند استفاده از مهارهای بازویی می‌باشد. استفاده از سیستم مهارهای بازویی برای کاهش جابجایی ایجاد شده در بالای سازه‌های بلند به چهار دهه قبل باز می‌گردد [۲]. 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 (شکل ۱). سیستم خرپای کمربندی ستون‌های خارجی را به هسته متصل می‌کند، در نتیجه ستون‌های خارجی و هسته داخلی در برابر چرخش هسته داخلی مقاومت می‌کنند که باعث کاهش جابجایی سازه و لنگر ایجاد شده در پای

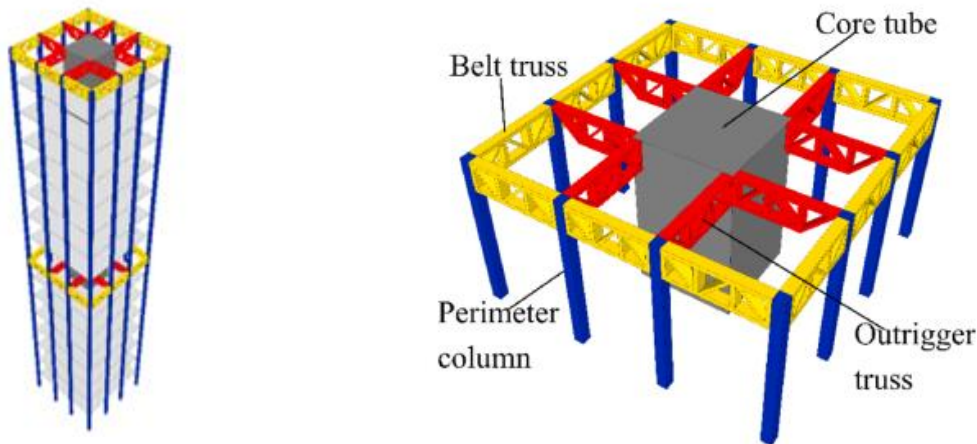
هسته داخلی می‌شود [۱۱-۳]. ژانگ^۱ و همکاران به بررسی موردی تاثیر جابجایی محل خرپای کمربندی بر روی کاهش جابجایی افقی و لنگر ایجاد شده در پای سازه پرداختند [۱۲]. رهگذر و شریفی به ارائه مدل ریاضی برای ترکیب سیستم قاب لوله، هسته برشی و خرپای کمربندی برای به دست آوردن نقطه بهینه قرارگیری کمربند به منظور به دست آوردن کمترین جابجایی بالای سازه پرداختند [۱۳]. یکی از راه‌های کاهش جابجایی سازه و بهینه کردن استفاده از خرپای کمربندی، بهینه کردن توپولوژی خرپای کمربندی در سازه‌ها می‌باشد [۱۶-۱۴].

شیواچران^۲ و همکاران به بررسی محل بهینه مهاربازویی برای سازه‌های دارای نامنظمی در ارتفاع با هدف مینیمم کردن حداکثر جابجایی سازه پرداختند [۱۷]. کمگار^۳ و رهگذر^۴ بر اساس روش انرژی به بررسی بهینه‌ترین محل مهاربازویی پرداختند. محل بهینه در این روش مکانی انتخاب شد که

- 1 Zhang
- 2 Shivacharan
- 3 Kamgar
- 4 Rahgozar

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sajjad.baygi@gmail.com





شکل ۱. سازه با مهاربازویی و خرپای کمربندی [۱]

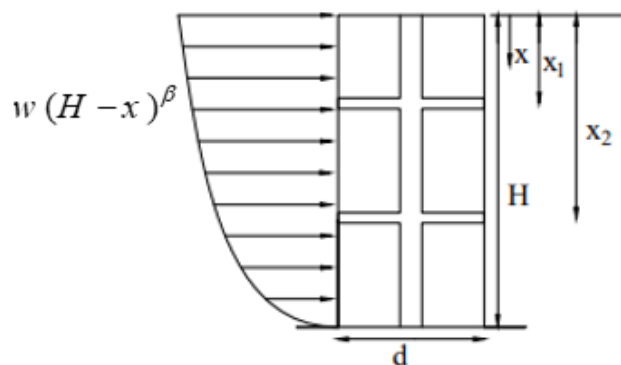
Fig. 1. Structure with outrigger system and belt trusses

قرارگیری انواع میراگر در مهاربازویی بر روی محل بهینه مهارهای بازویی پرداختند [۲۴]. فنگ^۸ و همکاران با تاثیر ارتعاش تصادفی بر سازه بهینه‌ترین مشخصات برای میراگرهای قرار گرفته بر روی مهارهای بازویی را تعیین کردند [۲۵]. صمدی^۹ و جهان^{۱۰} با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده بهترین تراز مهارهای بازویی برای جلوگیری از فروپاشی سازه را به دست آوردند [۲۶]. با افزایش ارتفاع سازه جابجایی بالای سازه افزایش می‌یابد، که باعث ایجاد حس ناامنی در ساکنان خواهد شد. برای کاهش جابجایی باید ابعاد هسته و ستون‌های سازه را افزایش داد. در تحقیقات انجام شده گذشته بیشتر هدف از تحقیق کاهش جابجایی بالای سازه با استفاده از خرپای کمربندی بوده است. در این تحقیق به بررسی محل بهینه خرپای کمربندی در سازه برای به دست آوردن کمترین لنگر پای هسته پرداخته شده است. با افزایش لنگر در هسته مرکزی سازه، دوران هسته افزایش یافته و باعث افزایش نیروی محوری در ستون‌ها به واسطه بارهای جانبی در سازه خواهد شد. بارهای جانبی در نظر گرفته شده در این تحقیق بار باد و بار همزمان مثلثی - متمرکز می‌باشد.

مهاربازویی بیشترین جذب انرژی را داشته باشد [۱۸]. پارک^۱ و همکاران با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بررسی تعداد بهینه مهاربازویی برای کاهش جابجایی بالای سازه پرداختند به طوری که کمترین وزن سازه به دست آید [۱۹]. چن^۲ و ژانگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند منظوره و با در نظر گرفتن دو پارامتر جابجایی بالای سازه و لنگر پای سازه به بررسی بهترین نقطه مهاربازویی پرداختند [۲۰]. ژینگ^۳ و همکاران به بررسی اثر ترکیب مهارهای بازویی و میراگر قرار گرفته در مهاربازویی بر روی عملکرد سازه‌های بلند و محل بهینه مهارهای بازویی با هدف مینیمم کردن جابجایی سازه پرداختند [۲۱]. بلتران^۴ و همکاران به مقایسه عملکرد سازه‌های بلند دارای مهارهای بازویی که در مهارهای بازویی یک یا دو میراگر استفاده شده باشد، پرداختند [۲۲]. گاندا^۵ و انتوگاری^۶ به بررسی تاثیر سختی مهارهای بازویی و هسته مرکزی بر روی محل بهینه مهارهای بازویی پرداختند. آن‌ها نسبت سختی مهارهای بازویی به هسته مرکزی برای به دست آوردن بهینه‌ترین حالت در نظر گرفتند [۲۳]. ژینگ^۷ و همکاران به بررسی تاثیر

-
- 1 Park
 - 2 Chen
 - 3 Zing
 - 4 Beltran
 - 5 Gunda
 - 6 Anthugari
 - 7 Xing

-
- 8 Fang
 - 9 Samadi
 - 10 Jahan



شکل ۲. سازه با دو مهاربازویی با توزیع بار باد

Fig. 2. Structure with two-outrigger system under wind loading

۲- آنالیز سازه

برای آنالیز سازه در این تحقیق فرضیات مورد استفاده به شرح زیر می‌باشند.

۱- رفتار سازه به صورت الاستیک می‌باشد.

۲- تنها نیروی محوری بر ستون‌ها اعمال می‌شود.

۳- مهاربازویی به صورت صلب به هسته و به صورت مفصلی به ستون متصل شده است.

۴- خواص هندسی هسته، ستون‌ها و مهارهای بازویی به صورت یکنواخت در ارتفاع سازه در نظر گرفته شده است.

در سازه‌های بلند دارای سیستم لوله‌ای به دلیل توزیع غیریکنواخت نیرو در ستون‌ها، منجر به ایجاد لنگی برشی می‌شود. در این تحقیق به دلیل در نظر گرفتن هسته مرکزی به جای سیستم لوله‌ای و همچنین استفاده از مهاربازویی می‌توان از لنگی برشی صرف‌نظر کرد.

نمای کلی از سازه با دو مهاربازویی و نحوه توزیع نیروی جانبی بار باد در شکل ۲ نشان داده شده است.

مهاربازویی باعث کاهش مقدار لنگر ایجاد شده در سازه خواهد شد. مقدار لنگری که به واسطه هر مهاربازویی کاهش می‌یابد، لنگر گیرداری آن مهاربازویی گفته می‌شود. برای به دست آوردن مقدار لنگر ایجاد شده به واسطه بار جانبی در هسته مرکزی سازه، برشی از بالای سازه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است.

$$M(x) = F \times \bar{x} = \frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} \times ((H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1}(x(\beta+2)-H)) \quad (1)$$

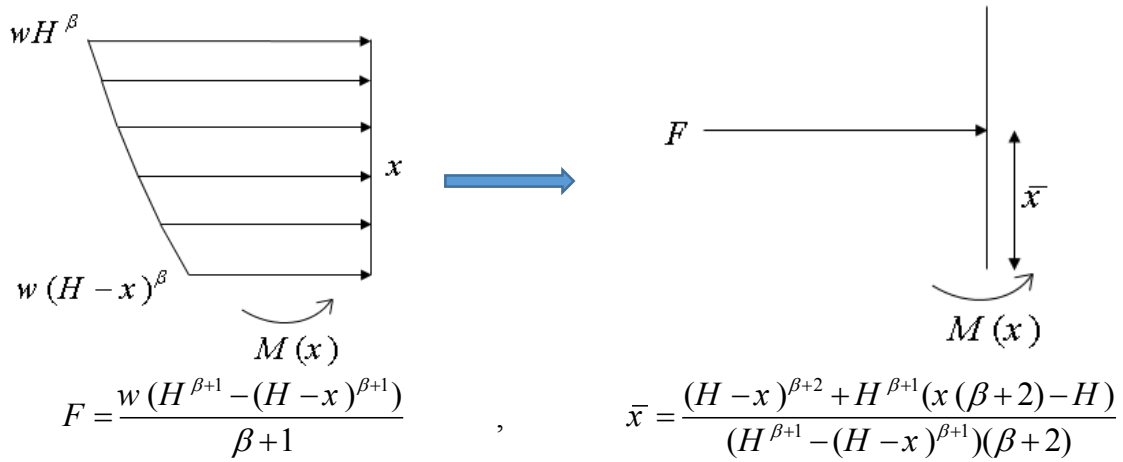
لنگر گیرداری مهاربازویی ۱ با M_1 و مهاربازویی ۲ با M_2 نشان داده شده است. مقدار برآیند لنگر ایجاد شده در هسته مرکزی سازه با دو مهاربازویی در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای محاسبه دوران در هر نقطه از هسته مرکزی می‌توان از روش لنگر سطح استفاده کرد. با توجه به اینکه دوران در پای هسته مرکزی صفر می‌باشد، دوران در هر نقطه از هسته مرکزی از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\theta(x) = \frac{1}{EI} \int_x^H M(x) dx \quad (2)$$

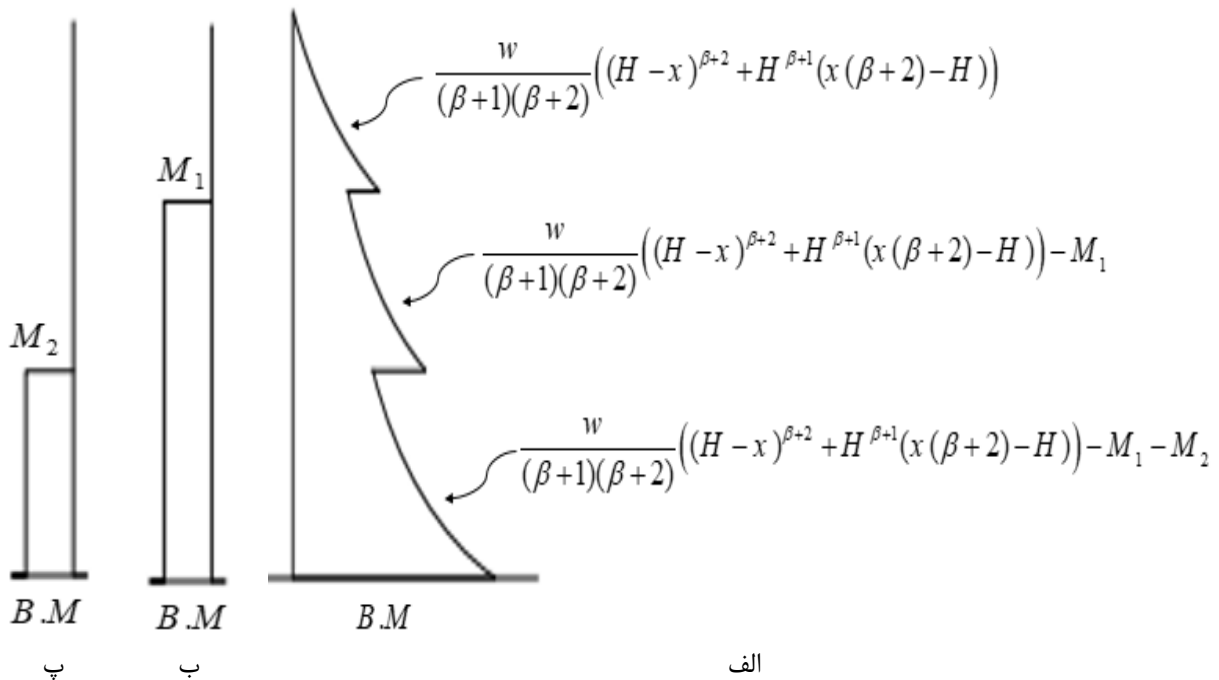
اگر دوران در تراز X_1 و X_2 به ترتیب با θ_1 و θ_2 نشان داده شود. این مقادیر را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) و (۴) نوشت.

$$\theta_1 = \frac{1}{EI} \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1}(x(\beta+2)-H) \right) - M_1 dx + \frac{1}{EI} \int_{x_2}^H \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1}(x(\beta+2)-H) \right) - M_1 - M_2 dx \quad (3)$$



شکل ۳. نحوه محاسبه لنگر ایجاد شده در سازه با بار جانبی باد

Fig. 3. Way to calculate moment in the structure under lateral wind load



شکل ۴. الف. لنگر ایجاد شده در هسته مرکزی تحت بارگذاری باد، ب. لنگر گیرداری مهار بازوی ۱، پ. لنگر گیرداری مهار بازوی ۲

Fig. 4. a) Moment created in the core under wind loading, b) Restraining moment in Outrigger 1, c) Restraining moment in Outrigger 2

$$\frac{1}{EI} \int_{x_2}^H \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1} (x(\beta+2)-H) - M_1 - M_2 \right) dx = \frac{2(M_1+M_2)(H-x_1)}{d^2(EA)_c} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (\lambda)$$

پس از انجام محاسبات و ساده‌سازی، روابط (۷) و (۸) به صورت روابط (۹) و (۱۰) تبدیل خواهد شد.

$$M_1 [S_1 + S(H-x_1)] + M_2 [S(H-x_2)] = \frac{w}{EIH} \left(\frac{H^{\beta+1} \beta (H^2 - x_1^2) + 2H^{\beta+1} x_1 (H-x_1)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_1 + x_1^2)(H-x_1)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \right) \quad (9)$$

$$M_1 [S(H-x_2)] + M_2 [S_1 + S(H-x_2)] = \frac{w}{EIH} \left(\frac{H^{\beta+1} \beta (H^2 - x_2^2) + 2H^{\beta+1} x_2 (H-x_2)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_2 + x_2^2)(H-x_2)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \right) \quad (10)$$

با نشان دادن رابطه (۹) و (۱۰) به صورت ماتریسی، رابطه (۱۱) به دست خواهد آمد.

$$\begin{bmatrix} S_1 + S(H-x_1) & S(H-x_2) \\ S(H-x_2) & S_1 + S(H-x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \frac{w}{EIH} \begin{bmatrix} \frac{H^{\beta+1} \beta (H^2 - x_1^2) + 2H^{\beta+1} x_1 (H-x_1)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_1 + x_1^2)(H-x_1)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \\ \frac{H^{\beta+1} \beta (H^2 - x_2^2) + 2H^{\beta+1} x_2 (H-x_2)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_2 + x_2^2)(H-x_2)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{EI} \int_{x_2}^H \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1} (x(\beta+2)-H) - M_1 - M_2 \right) dx \quad (4)$$

که EI صلبیت خمشی هسته مرکزی می‌باشد.

دوران ایجاد شده در نقاط اتصال مهارهای بازویی به هسته ناشی از تغییر شکل‌های محوری ایجاد شده در ستون‌ها و لنگر ایجاد شده در نقطه اتصال مهارهای بازویی به هسته می‌باشد. دوران مهارهای بازویی را می‌توان از روابط (۵) و (۶) به دست آورد.

دوران مهاربازویی در تراز X_1 عبارت است از [۶]:

$$\theta_1 = \frac{2M_1(H-x_1)}{d^2(EA)_c} + \frac{2M_2(H-x_2)}{d^2(EA)_c} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (5)$$

که $(EA)_c$ صلبیت محوری ستون و $(EI)_o$ صلبیت خمشی مهاربازویی است.

دوران مهاربازویی در تراز X_2 عبارت است از [۶]:

$$\theta_2 = \frac{2(M_1+M_2)(H-x_1)}{d^2(EA)_c} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (6)$$

با توجه به سازگاری دوران‌ها در هسته و نقاط اتصال مهارهای بازویی با هسته، دوران هسته و مهاربازویی در تراز X_1 و X_2 باید با هم برابر باشند، بنابراین برای تراز X_1 :

$$\frac{1}{EI} \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1} (x(\beta+2)-H) - M_1 \right) dx + \frac{1}{EI} \int_{x_2}^H \left(\frac{w}{(\beta+1)(\beta+2)} (H-x)^{\beta+2} + H^{\beta+1} (x(\beta+2)-H) - M_1 - M_2 \right) dx = \frac{2M_1(H-x_1)}{d^2(EA)_c} + \frac{2M_2(H-x_2)}{d^2(EA)_c} + \frac{M_1 d}{12(EI)_o} \quad (7)$$

برای تراز X_2 :

که [۶]

که Δ_o جابجایی بالای سازه می‌باشد.

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

۳- آنالیز سازه با چند مهاربازویی تحت بار باد

با توجه به روش گفته شده در بخش قبل که نحوه محاسبه لنگرهای گیرداری برای دو مهاربازویی توضیح داده شد. می‌توان با تعمیم این روابط، لنگرهای گیرداری مهارهای بازویی، لنگر ایجاد شده پای سازه و جابجایی بالای سازه را برای چند مهاربازویی تحت بارگذاری مربوطه به دست آورد. روابط ارائه شده در ادامه میزان لنگر گیرداری، لنگر پای سازه و جابجایی بالای سازه برای n مهاربازویی را تحت بارگذاری باد نشان می‌دهند.

با استفاده از رابطه (۱۲) لنگر گیرداری در تراز X_1 و X_2 به صورت رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \frac{w}{EIH} A_1^{-1} B_1 \quad (13)$$

که

$$A_1 = \begin{bmatrix} S_1 + S(H - x_1) & S(H - x_2) \\ S(H - x_2) & S_1 + S(H - x_2) \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_1^2) + 2H^{\beta+1}x_1(H - x_1)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_1 + x_1^2)(H - x_1)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \\ \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_2^2) + 2H^{\beta+1}x_2(H - x_2)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_2 + x_2^2)(H - x_2)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_i & \dots & M_n \end{bmatrix}^T = \frac{w}{EIH} A_2^{-1} B_2$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} S_1 + S(H - x_1) & S(H - x_2) & \dots & S(H - x_n) \\ S(H - x_2) & S_1 + S(H - x_2) & \dots & S(H - x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(H - x_n) & S(H - x_n) & \dots & S_1 + S(H - x_n) \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_1^2) + 2H^{\beta+1}x_1(H - x_1)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_1 + x_1^2)(H - x_1)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \\ \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_2^2) + 2H^{\beta+1}x_2(H - x_2)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_2 + x_2^2)(H - x_2)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \\ \vdots \\ \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_i^2) + 2H^{\beta+1}x_i(H - x_i)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_i + x_i^2)(H - x_i)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \\ \vdots \\ \frac{H^{\beta+1}\beta(H^2 - x_n^2) + 2H^{\beta+1}x_n(H - x_n)}{2(\beta+2)(\beta+3)} + \frac{(H^2 - 2Hx_n + x_n^2)(H - x_n)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

مقدار لنگر پای سازه با توجه به بار باد وارد شده به سازه از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$M_e = \frac{wH^{\beta+1}}{\beta+2} - M_1 - M_2 \quad (15)$$

که M_e مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه می‌باشد.

جابجایی بالای سازه با استفاده از روش لنگر سطح به صورت رابطه (۱۶)

محاسبه می‌گردد.

$$\Delta_o = \frac{w(2\beta+9)H^{3+\beta}}{6(\beta+3)(\beta+4)EI} - \frac{1}{2EI}(M_1(H^2 - x_1^2) + M_2(H^2 - x_2^2)) \quad (16)$$

مقدار لنگر ایجاد شده در پای سازه و جابجایی ایجاد شده در بالای سازه

توسط بار باد از روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آید.

در نظر گرفته شده است. در این حالت سختی خمشی کل سازه بدون در نظر گرفتن مهارهای بازویی به صورت رابطه (۲۱) بیان می‌شود [۶].

$$(EI)_i = \frac{(EA)_c d^2}{2} + EI \quad (21)$$

فرض شده است نیروی جانبی اعمالی بر سازه به میزان سختی خمشی بین هسته مرکزی و ستون‌های سازه تقسیم خواهد شد. بیشترین لنگری که می‌تواند در سازه به واسطه استفاده از مهاربازویی کاهش یابد، لنگر اعمالی به هسته مرکزی سازه می‌باشد. بنابراین کمترین لنگری که می‌تواند در سازه ایجاد شود، از رابطه (۲۲) به دست خواهد آمد.

$$M_i = \frac{wH^{\beta+1}}{\beta+2} - \frac{EIwH^{\beta+1}}{(\beta+2)(EI)_i} = \frac{wH^{\beta+1}}{(\beta+2)EIS} \quad (22)$$

مقدار کاهش لنگر پای سازه که به واسطه استفاده از مهاربازویی اتفاق می‌افتد از عبارت سمت راست رابطه (۱۸) به دست می‌آید. 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 (۲۳) تعریف می‌شود.

$$E_M = \frac{\frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T}{\frac{wH^{\beta+1}}{(\beta+2)EIS}} = \frac{S(\beta+2)}{H^{\beta+2}} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \quad (23)$$

بازدهی کاهش جابجایی بالای سازه دارای مهارهای بازویی از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$M_e = \frac{wH^{\beta+1}}{\beta+2} - \sum_{i=1}^n M_i = \frac{wH^{\beta+1}}{\beta+2} - \frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \quad (18)$$

$$\Delta_o = \frac{w(2\beta+9)H^{3+\beta}}{6(\beta+3)(\beta+4)EI} - \frac{1}{2EI} \sum_{i=1}^n M_i (H^2 - x_i^2) = \frac{w(2\beta+9)H^{3+\beta}}{6(\beta+3)(\beta+4)EI} - \frac{1}{2EI} \frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T C e = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \quad , \quad C^T = [H^2 - x_1^2 \ H^2 - x_2^2 \ \dots \ H^2 - x_n^2] \quad (19)$$

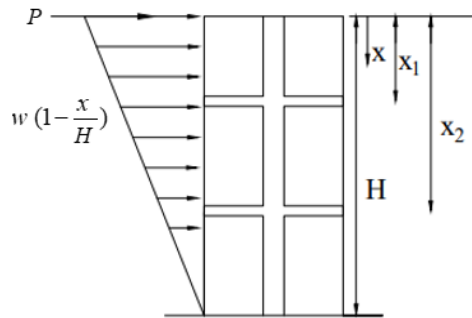
۳-۱- موقعیت بهینه مهارهای بازویی برای بار باد

هدف این پژوهش به دست آوردن موقعیت مهارهای بازویی به صورتی است که مقدار لنگر پای هسته مرکزی سازه مینیمم شود. رابطه (۱۸) مقدار لنگر پای هسته سازه را تحت بار باد نشان می‌دهد. برای مینیمم کردن مقدار لنگر، باید ترم دوم رابطه (۱۸) ماکزیمم شود. بدین منظور باید از ترم دوم رابطه (۱۸) نسبت به X_1, X_2, \dots, X_n مشتق گرفته و Π رابطه به دست آمده را برابر صفر قرار داد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\frac{w}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

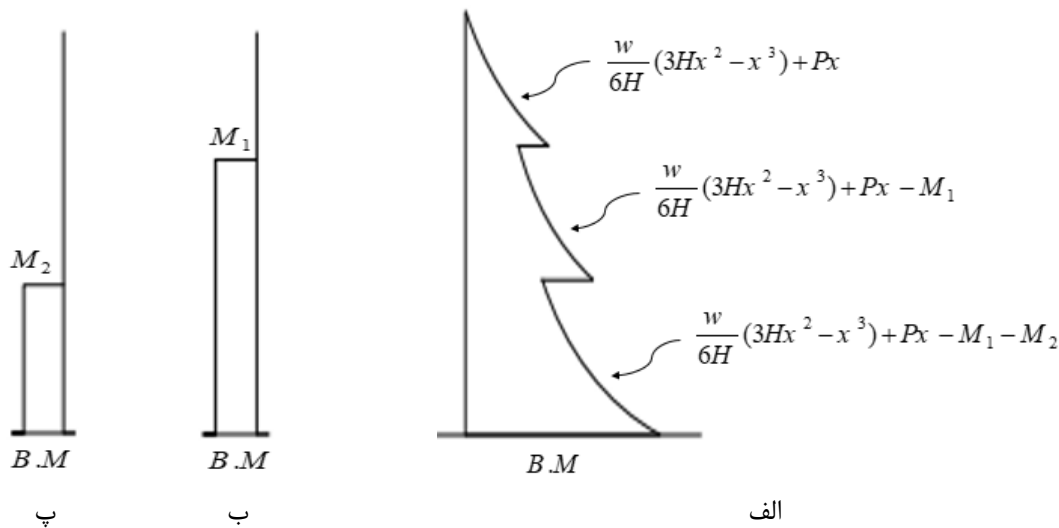
۳-۲- بازدهی کاهش لنگر پای هسته مرکزی

برای بررسی اثرگذاری مهارهای بازویی بر کاهش لنگر ایجاد شده در پای هسته مرکزی، رفتار هسته مرکزی و ستون‌های اطراف به صورت مرکب



شکل ۵. سازه با دو مهاربازویی با بارگذاری مثلثی و متمرکز

Fig. 5. Structure with two-outrigger system under concentrated and triangular loading



شکل ۶. الف. لنگر ایجاد شده در هسته مرکزی تحت بارگذاری مثلثی و متمرکز، ب- لنگر گیرداری مهاربازوی ۱، پ- لنگر گیرداری مهاربازوی ۲.

Fig. 6. a) Moment created in the core under concentrated and triangular loading, b) Restraining moment in Outrigger 1, c) Restraining moment in Outrigger 2

در شکل ۶ نمودار برآیند لنگر هسته مرکزی و نمودار لنگر گیرداری بازوی ۱ (M_1) و لنگر گیرداری بازوی ۲ (M_2) برای بارگذاری همزمان مثلثی - متمرکز نشان داده شده است.

نیروی متمرکز وارد شده بر بالای سازه (P) به صورت ضریبی از مجموع نیروی جانبی مثلثی وارد شده بر سازه در نظر گرفته شده است، که مطابق رابطه (۲۵) می‌باشد.

$$P = \frac{\alpha w H}{2} \quad (25)$$

$$E_{\Delta} = \frac{\frac{1}{2EI} \frac{W}{EIH} B_2^T (A_2^{-1})^T C}{\frac{w(2\beta+9)H^{\beta+3}}{6(\beta+3)(\beta+4)EI} \frac{1}{EIS}} = \frac{3(\beta+3)(\beta+4)S}{(2\beta+9)H^{\beta+3}} B_2^T (A_2^{-1})^T C \quad (24)$$

۴- آنالیز سازه با چند مهاربازویی تحت بار همزمان مثلثی و متمرکز

نحوه توزیع بارگذاری مثلثی - متمرکز به طور همزمان به سازه در شکل

۵ نشان داده شده است.

با توجه به تعریف بازدهی کاهش لنگر پای هسته مرکزی که در بخش قبل معرفی شد. تحت بارگذاری همزمان مثلثی - متمرکز این مقدار از رابطه (۲۹) به دست می‌آید.

$$E_M = \frac{\frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T}{\frac{wH^2(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2})}{EIS}} = \frac{S}{24(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2})H^3} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \quad (29)$$

بازدهی کاهش جابجایی بالای سازه دارای مهارهای بازویی از رابطه (۳۰) به دست می‌آید.

$$E_\Delta = \frac{\frac{1}{2EI} \frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T C}{\frac{wH^4(11+20\alpha)}{EI} \frac{1}{EIS}} = \frac{5S}{2(11+20\alpha)H^5} B_3^T (A_2^{-1})^T C \quad (30)$$

۵- محل بهینه مهارهای بازویی تحت بار باد

در این تحقیق تعداد مهاربازویی در سازه ۴ عدد فرض شده است و بر اساس آن محل بهینه این مهارهای بازویی به دست آمده است. برای در نظر گرفتن تمام اعضای تشکیل دهنده سازه، پارامترهای بدون بعد رابطه (۳۱) تعریف شده است [۶].

$$\lambda = \frac{EI}{(EA)_c \left(\frac{d^2}{2}\right)}, \quad \gamma = \frac{EId}{(EI)_o H} \quad (31)$$

پارامتر λ نشان دهنده نسبت صلبیت هسته مرکزی به صلبیت ستون و پارامتر γ نشان دهنده صلبیت هسته مرکزی به صلبیت مهاربازویی می‌باشد. برای در نظر گرفتن تاثیر تمام اعضای تشکیل دهنده سازه بر محل بهینه مهارهای بازویی پارامتر بدون بعد ω به صورت رابطه (۳۲) در نظر گرفته شده است [۶].

با استفاده از روش گفته شده در بخش قبل، بعد از انجام محاسبات و ساده‌سازی لنگر مقاوم در هر مهاربازویی برای سازه دارای n مهاربازویی به صورت رابطه (۲۶) به دست می‌آید.

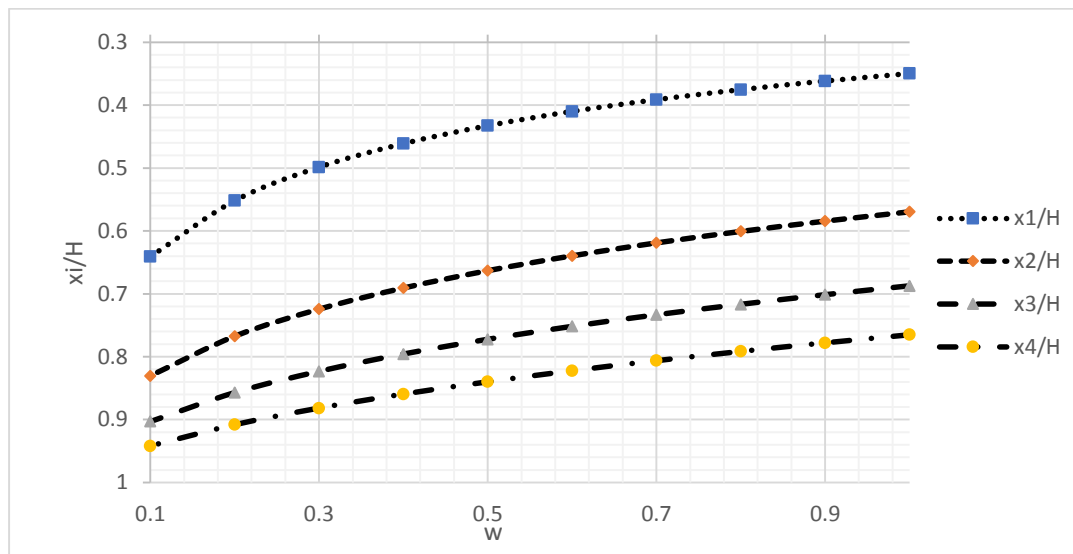
$$[M_1 \ M_2 \ \dots \ M_i \ \dots \ M_n]^T = \frac{w}{24EIH} A_2^{-1} B_3 \begin{bmatrix} 3H^4(1+2\alpha) + x_1^4 - 4Hx_1^3 - H^2x_1^2 \\ 3H^4(1+2\alpha) + x_2^4 - 4Hx_2^3 - H^2x_2^2 \\ \vdots \\ 3H^4(1+2\alpha) + x_i^4 - 4Hx_i^3 - H^2x_i^2 \\ \vdots \\ 3H^4(1+2\alpha) + x_n^4 - 4Hx_n^3 - H^2x_n^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

لنگر ایجاد شده در پای هسته مرکزی از رابطه (۲۷) به دست می‌آید.

$$M_e = wH^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2}\right) - \sum_{i=1}^n M_i = wH^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \quad (27)$$

۴-۱- موقعیت بهینه مهارهای بازویی برای بار همزمان مثلثی - متمرکز
موقعیت بهینه مهارهای بازویی تراز است که سبب ایجاد کمترین لنگر پای سازه شوند. برای مینیمم کردن لنگر پای سازه برای بار همزمان مثلثی - متمرکز باید ترم دوم رابطه (۲۷) ماکزیمم شود، بنابراین باید از ترم دوم رابطه (۲۷) نسبت به X_1, X_2, \dots, X_n مشتق گرفته و n رابطه به دست آمده را برابر صفر قرار داد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\frac{w}{24EIH} B_3^T (A_2^{-1})^T e^T \right) &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$



شکل ۷. محل بهینه مهارهای بازویی سازه با چهار مهاربازویی تحت بارگذاری باد ($\beta=0.14$).

Fig. 7. Optimum locations of the outriggers in a four-outrigger system under wind loading ($\beta=0.14$)

فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر افزایش یافته و همچنین محل قرارگیری بهینه این مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد. با افزایش سختی مهارهای بازویی روند تغییرات در فاصله و محل قرارگیری بهینه مهارهای بازویی بر خلاف سختی هسته مرکزی است به عبارتی با افزایش سختی مهارهای بازویی فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر کاهش یافته و محل قرارگیری بهینه مهارهای بازویی به سمت پایین سازه جابجا خواهد شد. با افزایش سختی محوری ستون‌ها فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر افزایش یافته و محل بهینه قرارگیری مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهند شد. به طور کلی هنگام تغییر سختی اعضا برای کاهش نیافتن لنگر برداری مهارهای بازویی در بین سه پارامتر سختی محوری ستون‌ها، سختی خمشی هسته مرکزی و سختی مهارهای بازویی، سختی مهارهای بازویی تاثیر بیشتری بر روی محل بهینه مهارهای بازویی دارد.

با افزایش شدت باد محل بهینه قرارگیری مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد. همچنین فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر با افزایش شدت باد بیشتر خواهد شد. در شکل ۹ بازدهی کاهش لنگر پای هسته سازه هنگامی که سازه تحت اثر بار باد قرار دارد، نشان داده شده است. با افزایش سختی هسته مرکزی و افزایش سختی محوری ستون‌ها بازدهی کاهش لنگر پای هسته کاهش می‌یابد. اما با افزایش سختی

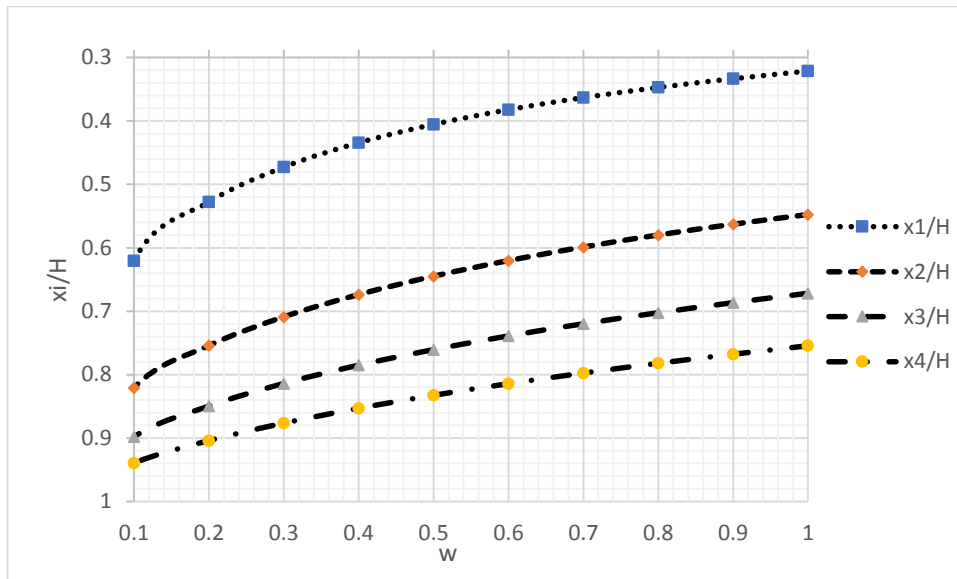
$$\omega = \frac{\gamma}{12(1+\lambda)} \quad (32)$$

با استفاده از پارامتر ω می‌توان رفتار سازه با مهاربازویی را به صورت ساده‌تر بیان کرد. با افزایش سختی خمشی مهارهای بازویی در صورت ثابت بودن پارامترهای دیگر سازه، ω کاهش می‌یابد و با افزایش سختی محوری ستون‌ها ω افزایش می‌یابد.

می‌توان با حل معادلات ارائه شده برحسب ω نقطه بهینه مهاربازویی که منجر به مینیمم کردن لنگر پای سازه می‌شود را به دست آورد. برای در نظر گرفتن بار باد بر اساس شدت باد مقدار β بین ۰/۱۴ تا ۰/۵ تغییر می‌کند [۹].

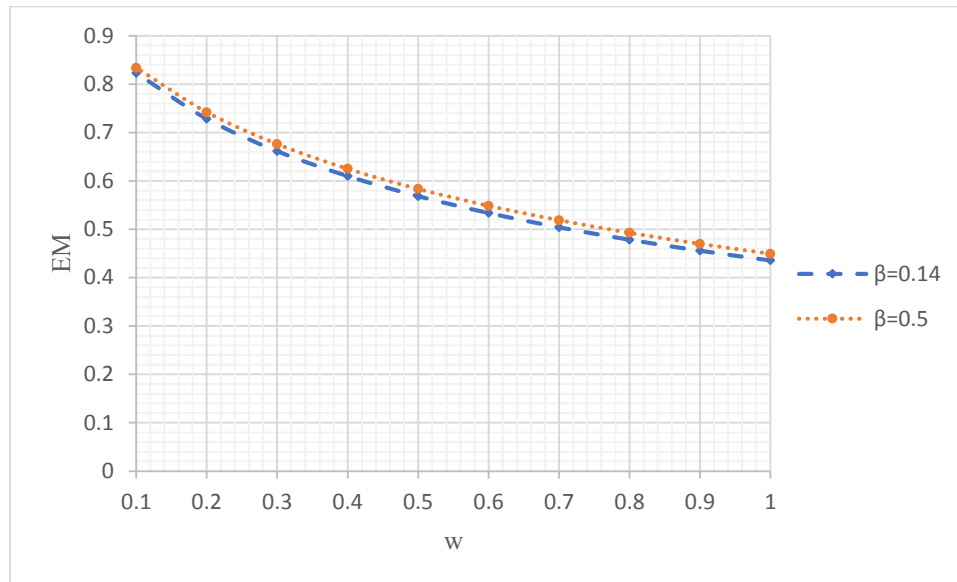
در شکل ۷ و ۸ نقطه بهینه مهارهای بازویی از بالای سازه نسبت به ارتفاع سازه در مقابل ω هنگامی که سازه تحت اثر بار باد قرار می‌گیرد، نشان داده شده است.

با افزایش سختی هسته مرکزی سازه، در صورت ثابت بودن محل مهارهای بازویی و همچنین ثابت بودن فاصله بین مهارهای بازویی، لنگر برداری مهارهای بازویی کاهش خواهد یافت. بنابراین هنگام افزایش سختی هسته مرکزی سازه برای کاهش نیافتن مقدار لنگر برداری مهارهای بازویی



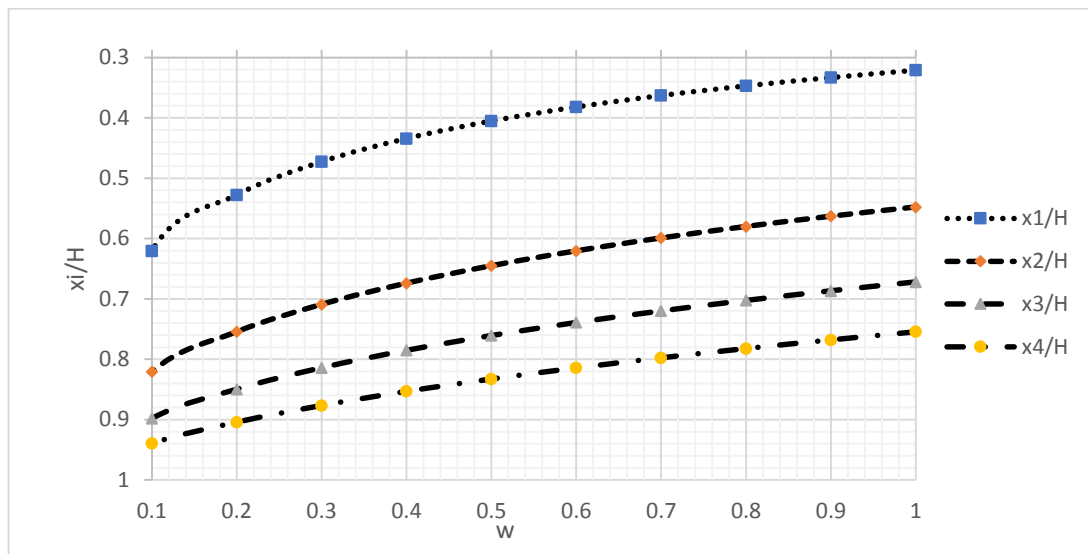
شکل ۸. محل بهینه مهارهای بازویی سازه با چهار مهاربازویی تحت بارگذاری باد ($\beta=0.5$).

Fig. 8. Optimum locations of the outriggers in a four-outrigger system under wind loading ($\beta=0.5$).



شکل ۹. بازدهی کاهش لنگر پای هسته در برابر w تحت ترکیب بارگذاری باد.

Fig. 9. Moment reduction ratio in a four-outrigger system under wind loading



شکل ۱۰. محل بهینه مهارهای بازویی سازه با چهار مهاربازویی تحت بارگذاری مثلثی و متمرکز ($\alpha=0.05$).

Fig. 10. Optimum locations of the outriggers in a four-outrigger system under concentrated and triangular loading ($\alpha=0.05$)

مهارهای بازویی از یکدیگر افزایش یافته و محل بهینه قرارگیری مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهند شد. با افزایش مقدار بار متمرکز جانبی محل قرارگیری بهینه مهارهای بازوهای به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد. با افزایش شدت بار متمرکز جانبی فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ بازدهی کاهش لنگر پای هسته سازه هنگامی که سازه تحت اثر همزمان بار مثلثی- متمرکز قرار دارد، نشان داده شده است.

با افزایش شدت بار متمرکز، بازدهی کاهش لنگر پای هسته مرکزی مقداری افزایش خواهد یافت. با افزایش سختی خمشی مهارهای بازویی بازدهی کاهش لنگر پای هسته افزایش یافته و تا مقدار ۸۵ درصد افزایش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

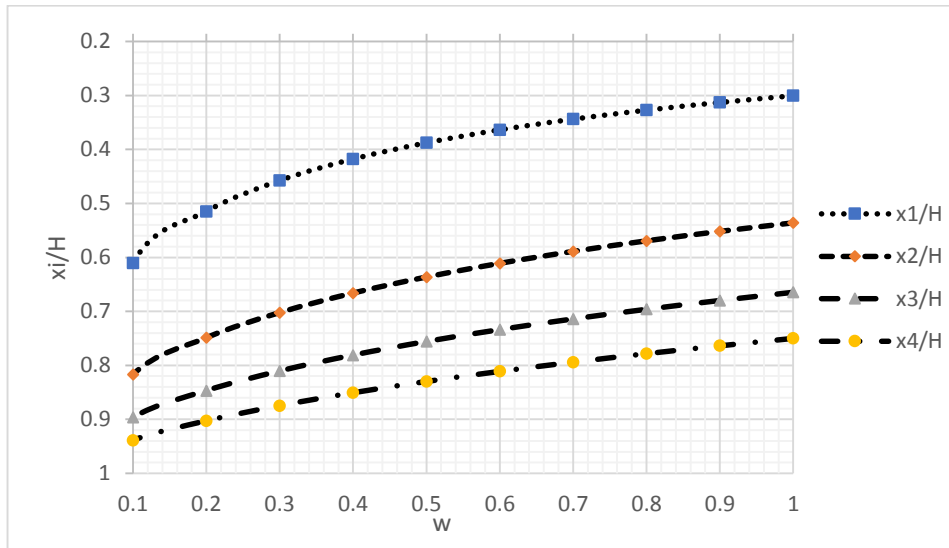
در این تحقیق به بررسی محل بهینه مهارهای بازویی برای به دست آوردن کمترین لنگر پای هسته سازه در سازه‌ای با ۴ مهاربازویی تحت بارگذاری باد، بارگذاری همزمان مثلثی- متمرکز پرداخته شد. در این تحقیق رفتار سازه به صورت الاستیک در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان داد، با افزایش سختی مهارهای بازویی محل بهینه مهارهای بازویی به سمت پایین سازه جابجا خواهد شد. همچنین با افزایش سختی مهارهای بازویی

مهارهای بازویی بازدهی کاهش لنگر پای هسته افزایش یافته که مقدار بازدهی تا بیش از ۸۰ درصد هم می‌رسد. با افزایش شدت باد تاثیر مهارهای بازویی بر بازدهی کاهش لنگر پای هسته مقداری بیشتر از هنگامی است که شدت باد کم باشد. این مقدار هر چقدر سختی هسته مرکزی افزایش یابد بیشتر خواهد شد.

۶- محل بهینه مهاربازویی تحت بار مثلثی و متمرکز

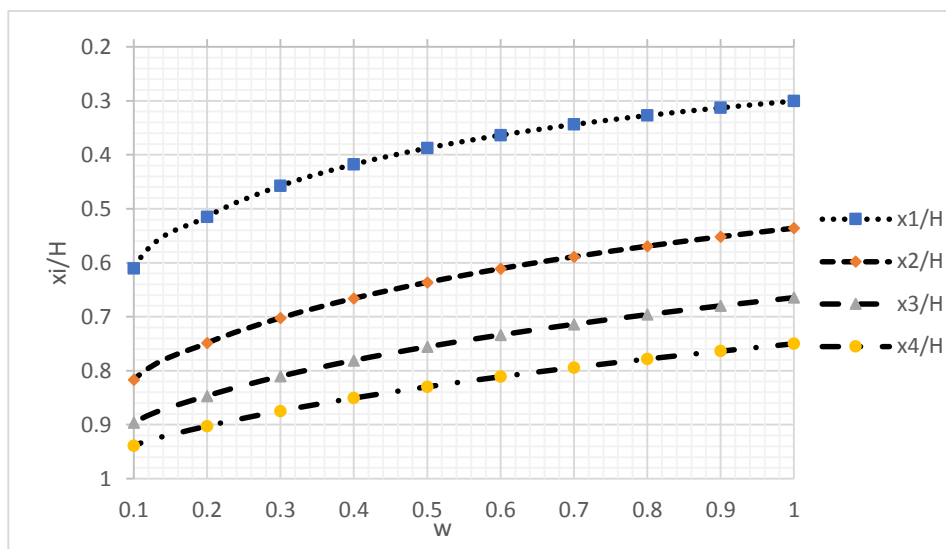
در این تحقیق بار متمرکز به صورت نسبتی از مجموع بار مثلثی اعمالی به سازه مطابق رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است. مقدار α در این تحقیق ۰/۰۵ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ و ۱۱ موقعیت بهینه مهاربازویی برای سازه‌ای با چهار مهاربازویی نسبت به ارتفاع کل سازه نشان داده شده است.

با افزایش سختی هسته مرکزی سازه فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر افزایش یافته و محل قرارگیری بهینه این مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد. با افزایش سختی مهارهای بازویی روند تغییرات در فاصله و محل قرارگیری بهینه مهارهای بازویی بر خلاف سختی هسته مرکزی است به عبارتی با افزایش سختی مهارهای بازویی فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر کاهش یافته و محل قرارگیری بهینه مهارهای بازویی به سمت پایین سازه جابجا خواهد شد. با افزایش سختی محوری ستون‌ها فاصله



شکل ۱۱. محل بهینه مهارهای بازویی سازه با چهار مهاربازویی تحت بارگذاری مثلثی و متمرکز ($\alpha=0.15$).

Fig. 11. Optimum locations of the outriggers in a four-outrigger system under concentrated and triangular loading ($\alpha=0.15$)



شکل ۱۲. بازدهی کاهش لنگر پای هسته در برابر w تحت ترکیب بارگذاری مثلثی و متمرکز.

Fig. 12. Moment reduction ratio in a four-outrigger system under concentrated and triangular loading

- of tall buildings with outrigger-belt truss system, *Earthquake and Structures*, 2 (2011) 89-107.
- [12] J. Zhang, X. Zhao, H. Zhu, C. Zhou, Safety analysis of optimal outriggers location in high-rise building structures, *Journal of Zhejiang University Science A*, 8 (2007) 264-269.
- [13] R. Rahgozar, Y. Sharifi, An approximate analysis of combined system of framed tube, shear core and belt truss in high-rise buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18 (2009) 607-624.
- [14] Q.Q. Liang, Y.M. Xie, G.P. Steven, Optimal topology design of bracing systems for multi-story steel frames, *J Struct Eng*, 126 (2000) 823-839.
- [15] C.M. Chan, K.M. Wong, Structural topology and element sizing design optimization of tall steel frameworks using a hybrid OC-GA method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35 (2008) 473-488.
- [16] L. Stromberg, A. Beghini, W.F. Baker, G.H. Paulino, Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2010) 1-16.
- [17] K. Shivacharan, S. Chandrakala, N.M. Karthik, Optimum Position of Outrigger System for Tall Vertical Irregularity Structures, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12 (2015) 54-63.
- [18] 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, *International Journal of Steel Structures*, (2017) 1-8.
- [19] H.S. Park, E. Lee, S. Choi, B.K. Oh, Genetic-algorithm-based minimum weight design of an outrigger system for high-rise buildings, *Engineering Structures*, 117 (2016) 496-505.
- [20] Y. Chen, Z. Zhang, Analysis of outrigger numbers and locations in outrigger braced structures using a multiobjective genetic algorithm, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27 (2017).
- فاصله مهارهای بازویی از یکدیگر کاهش خواهد یافت. با افزایش سختی مهارهای بازویی بازدهی کاهش لنگر پای هسته مرکزی نسبت به حالتی که مهاربازویی در سازه وجود ندارد افزایش قابل توجهی دارد که می‌تواند این افزایش بازدهی تا ۸۵ درصد برسد. با افزایش شدت بار باد محل بهینه مهارهای بازویی به سمت بالای سازه جابجا خواهد شد، همچنین با افزایش شدت بار اعمالی فاصله بین مهارهای بازویی افزایش خواهد داشت.
- ### منابع
- [1] 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).
- [2] B.S. Taranath, Optimum belt truss location for high-rise structures. *Structural Engineer*, *Structural Engineer*, 53 (1975) 18-21.
- [3] B.S. Smith, I. Salim, Parameter study of outrigger-braced tall building structures, *Journal of the Structural Division*, 107 (1981) 2001-2014.
- [4] B.S. Taranath, *Structural analysis and design of tall buildings*, CRC Press Llc, (2011).
- [5] Y. Zhu, Inner force analysis of frame-core structure with horizontal outrigger belts, *Journal of Building Structures*, 10 (1995) 10-15.
- [6] B.S. Smith, A. Coull, *Tall building structures: Analysis and design*, John Willey, New York, 1991.
- [7] A. Mijar, C. Swan, J. Arora, I. Kosaka, Continuum topology optimization for concept design of frame bracing systems, *J Struct Eng*, (1998) 124-141.
- [8] Z. Zhang, X. Fu, J. Wang, Y. Wei, Studies on structural performance of ultra-high rise building with outrigger belts, *Journal of Building Structures*, 17 (1996) 2-9.
- [9] B.S. Taranath, *Steel, concrete, and composite design of tall buildings*, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [10] J. Wu, Q. Li, Structural performance of multi-outrigger braced tall buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12 (2003) 155-176.
- [11] M. Malekinejad, R. Rahgozar, Free vibration analysis

- [24] L. Xing, P. Gardon, Y. Zhou, Optimal outrigger locations and damping parameters for single-outrigger systems considering earthquake and wind excitations, *Engineering Structures*, 245 (2021).
- [25] C. Fang, B. Spencer, J.xu, P. Tang, Optimization of damped outrigger systems subject to stochastic excitation, *Engineering Structures*, 191 (2019) 280-291.
- [26] M. Samadi, N. Jahan, Comparative study on the effect of outrigger on seismic response of tall buildings with braced and Wall Core. II: Determining seismic design parameters, *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 30(9) (2021).
- [21] L. Xing, Y. Zhou, M. Aguaguana, Optimal vertical configuration of combined energy dissipation Outriggers, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (2018).
- [22] M. Beltran, G. Turan, O. Dursun, R. Nijse, Energy dissipation and performance assessment of double damped outriggers in tall buildings under strong earthquakes, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (2019).
- [23] P. Gunda, V. Anthugari, Optimization of location of outrigger system in tall buildings of different aspect ratios, *Materials Today*, (2021).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Baygi, *Optimal position of outriggers for minimizing the base moment under lateral load*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 3009-3024.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20827.7537](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20827.7537)



