مطالعهٔ پارامتری مهار بازویی و کمربند محیطی در سازهٔ ساختمانهای بلند

کمال میرطلائی* و نواب اسدی زیدآبادی**

دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۷/۹/۲۳ - دریافت نسخهٔ نهایی: ۷۸/۸/۱۷)

چکیده - *تدابیر مربوط به ساختارهای باربر ابداعی ساختمانهای بلند بیشتر به طرحهایی برمی‌گردد که تغییر مکان جانبی را محدود می‌سازند. این محدودیت تغییر مکان تا حد تغییر مکان مجاز، باید با استفاده از حداقل مقدار فولاد یا بتن مصرفی حاصل شود. این روند نیز تنها با استفاده از برخی روشهای ابداعی که موجب استفادهٔ کامل از ظرفیت تمامی عناصر سازه‌ای ساختمان بلند می‌شود، نتیجه می‌شود. شایان ذکر است که یکی از کارامدترین این سیستمها، ساختار مهار بازویی است.*

در این تحقیق یک مدل سازه‌ای ساده و سازگار برای تحلیل این نوع سیستمها ارائه شده است. این روش تحلیلی پیشنهادی قادر است با در نظرگرفتن مشخصات سازه‌ای ثابت یا متغیر در راستای ارتفاع و نیز با فرض وجود کمربند انعطاف پذیر، سازه را تحلیل کند. نتایج این تحقیق شامل شرایط مختلف هندسی از قبیل موقعیت و تعداد بهینه مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش سازه تحت اثر انواع بارهای جانبی است.

Parametric Study of Outrigger Braced and Belt System in Tall Building Structures

K. Mirtalaei and N. Asadi Zeidabadi

Department of Civil Engineering, Isfahan university of Technology

ABSTRACT- *Current innovative lateral load carrying systems for tall buildings are those in which the lateral drift is limited to an allowable value without considrable influence on economy. This aim is achieved by using special systems capable of using maximum stiffness and strength capacity of individual structural elements. An effective structural solution in this respect is the use of outrigger braced systems.*

In the present investigation, a simple compatible structural model is proposed to analyze these systems. Constant or variable stiffness can be considered for the core which is connected to a flexible belt structure via the outrigger braced system. Several conditions including the optimum number and positions for the outrigger braced systems to minimize the drift under differnt loads are examined.

*- استادیار   **- کارشناس ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]

فهرست علائم

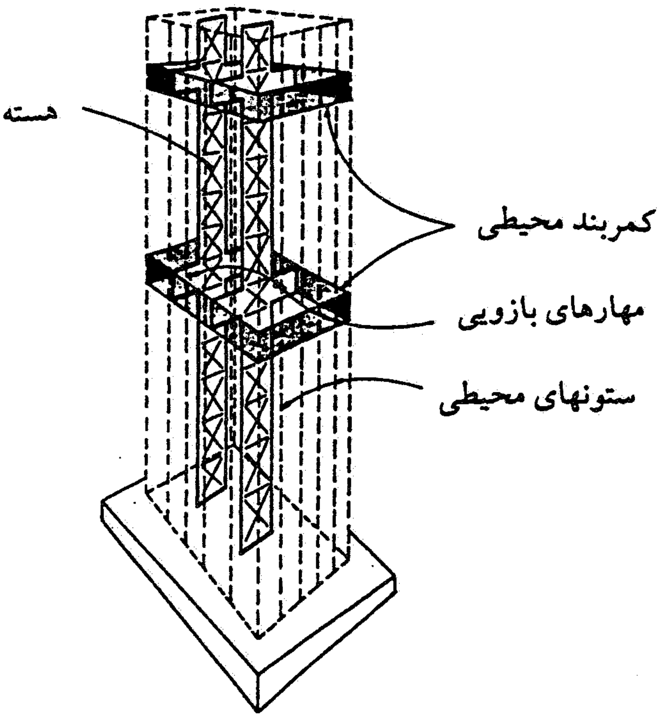
A	سطح مقطع مهار بازویی	I'_{01}	ممان اینرسی اصلاح شدهٔ مهار بازویی	n	تعداد مهار بازویی
A_{ci}	سطح مقطع ستونها			P	مقدار بار متمرکز در بالای سا
C	پارامتر بدون بعد انعطاف پذیری کمربند محیطی	k_i	پارامتر بدون بعد سختی نسبی محوری ستونها به سختی خمشی هسته	q	مقدار بار ثابت در ارتفاع سازه
E	مدول الاستیسته			U	مقدار بار سهمی بیشینه در بالای سازه
G	مدول برشی	l_i	طول اصلاح شدهٔ مهار بازویی	W	مقدار بار مثلثی بیشینه در بالای سازه
H	ارتفاع کل سازه	L_i	طول خالص مهار بازویی		
i	شمارهٔ تراز مهار بازویی	l_c	فاصلهٔ بین دو ستون	(α، β، ψ و ζ)	ضرایب بدون بعد بار
I_0	ممان اینرسی مهار بازویی	M_{ah}	لنگر در محل پایه هسته ناشی از بارهای خارجی	ξ	نسبت فاصله از بالای سازه بر کل ارتفاع سازه
I_B	ممان اینرسی کمربند محیطی	M_b	لنگر کلی در محل پایه هسته	ω_i	پارامتر بدون بعد نسبت سختی هسته به مهار بازویی تراز i
I_i	ممان اینرسی هسته بین تراز i و i+1	M_i	لنگر مقاوم مهار بازویی		

۱- مقدمه

سازهٔ بلند با مهار بازویی شامل یک هستهٔ مرکزی بتن مسلح یا قاب فولادی مهاربندی شده است که توسط طره‌های افقی به ستونهای خارجی در یک یا چند تراز متصل می‌شود. اضافه بر ستونهای انتهای مهار بازویی معمولاً بقیه ستونهای محیطی نیز به انتهای مهار بازویی متصل می‌شوند. این کار با افزودن یک کمربند محیطی[1] در اطراف سازه و در تراز مهار بازویی صورت می‌گیرد. به این ساختار هندسی، سازهٔ با مهار کمربندی[2] اطلاق می‌شود. شمای کلی این سیستم در شکل (۱) آورده شده است.

هنگامی که ساختمان تحت اثر بار افقی قرار می‌گیرد، مهارهای بازویی از چرخش هسته جلوگیری می‌کنند و باعث می‌شوند که تغییر مکانهای جانبی و لنگر هسته از حالتی که به تنهایی بارها را تحمل می‌کند، کمتر شود، شکل (۲). ویژگی آشکار این ساختار سازه‌ای بدین گونه است که سختی جانبی مؤثر سازه در هنگام خمش طره‌ای با ایجاد نیروهای محوری در ستونها افزایش می‌یابد.

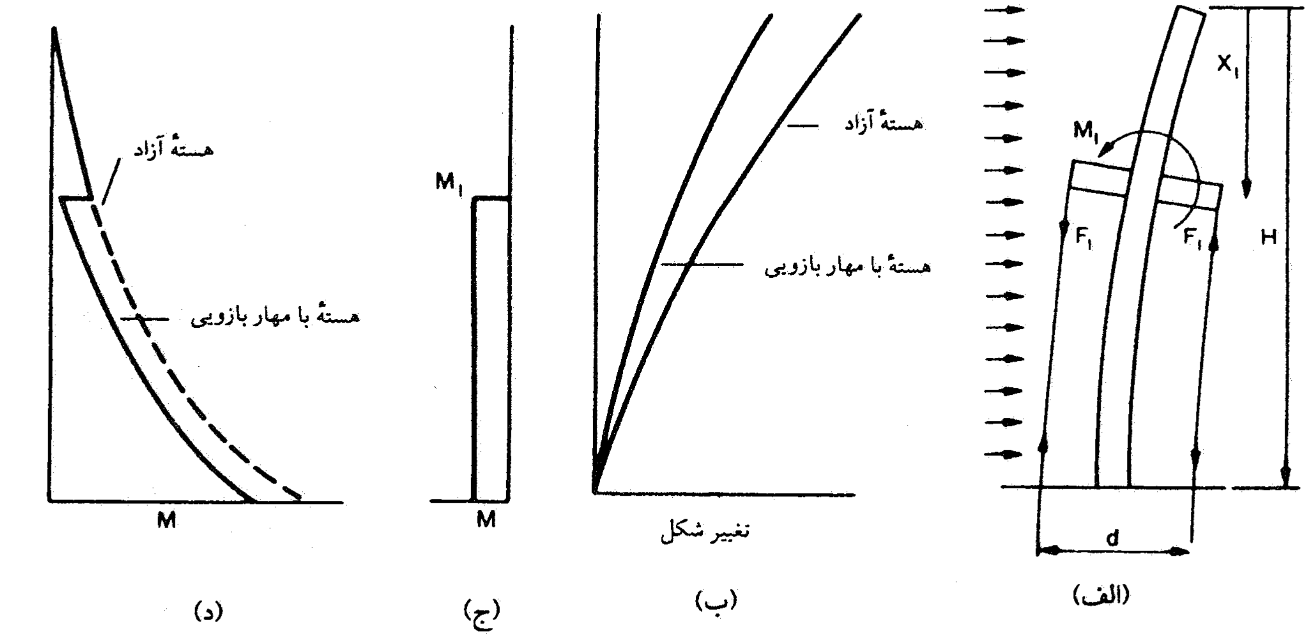
در طراحی ساختمانهای کوتاه و متوسط با حجم اطلاعات ورودی اندک و همچنین تعداد اعضای نه چندان زیاد، می‌توان برای تحلیل سازه از نخستین مراحل طراحی از برنامه‌های اجزای محدود استفاده کرد. باید دانست که در ساختمانهای بلند با تعداد اعضای زیاد، تغییر در مشخصات هندسی یک عضو اثر اندرکنشی با سایر اعضای سازه دارد. بنابراین آشکارا می‌توان چنین انگاشت که انتخاب مناسب ابعاد هندسی اعضا، روند طراحی سازهٔ ساختمان



شکل ۱- شمای کلی سازه با مهار بازویی و کمربند محیطی [۱]

بلند را تا چه اندازه کوتاه می‌کند. علاوه بر این در این نوع تحلیل ساده می‌توان یک بررسی پارامتریک بر روی سیستم سازه‌ای انجام داد که در روشهای عددی به سادگی امکانپذیر نیست.

تاکنون در مورد سازه‌های مهار بازویی تحقیقات زیادی انجام شده است. در مطالعات انجام شده، رفتار این سازه‌ها تحت بارهای استاتیکی [۲-۷] و همچنین رفتار دینامیکی آنها [۸ و ۹] مورد



شکل ۲ الف - سازه با یک مهار بازویی، ب - منحنی تغییر شکل، ج - نمودار لنگرهای قیدی، د- نمودار لنگر نهایی هسته

بررسی قرار گرفته است. در تحقیق دیگری مطالعه پایداری این گونه سازه‌ها انجام شده است. [۱۰]. بررسی تأثیر خزش[۳] و آبرفتگی[۴] بر روی رفتار این سازه‌ها نیز توسط محققان دیگری مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱].

در تحقیق حاضر، تحلیل این گونه سازه‌ها با فرض مشخصات سازه‌ای متغیر در ارتفاع برای انواع بارها و ترکیب آنها گسترش داده شده است. علاوه بر این، تأثیر سختی خمشی کمربند محیطی بر رفتار سازه‌ای این‌گونه سیستمها (در مقایسه با فرض صلب بودن آن) مدنظر بوده است. در ادامه، تأثیر پارامترهای بدون بعد حاصل از تحلیل، بر روی رفتار و همچنین مکان بهینه مهار بازویی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحلیل

گسترش معادله‌های حاکم بر رفتار سیستم مهار بازویی براساس فرضیات سادهٔ زیر انجام شده است:

۱- رفتار سازه، الاستیک خطی است.

۲- ستونها فقط نیروی محوری تحمل می‌کنند.

۳- اتصال هسته به زمین به صورت گیردار است.

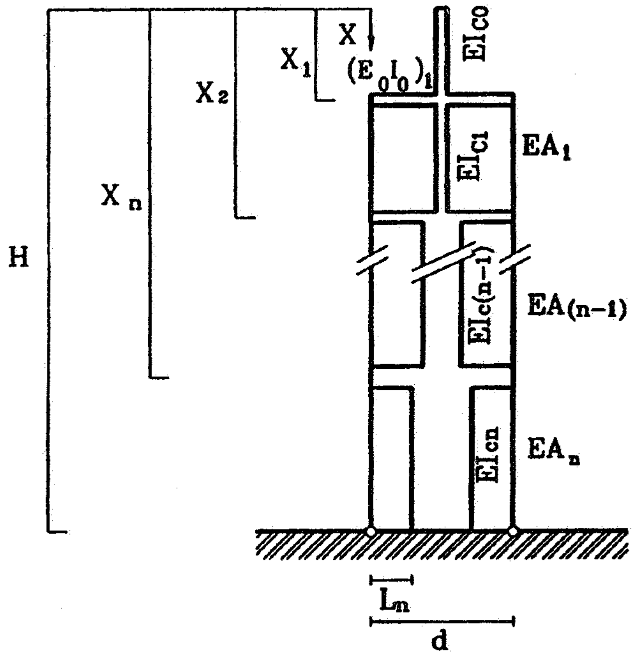
برای نشان دادن روش کلی تحلیل، یک سیستم سازه‌ای با سه مهار بازویی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سازهٔ مذکور تمامی مراحل تحلیل این گونه سازه‌ها را داراست و قابل تعمیم به حالتهای با تعداد مهار کمتر یا بیشتر است.

مدل تحلیلی مورد استفاده مطابق شکل (۳) است، به طوری که $n=3$ است. روابط سازگاری عبارت است از اینکه چرخش هسته و چرخش مهار بازویی در هر تراز مساوی‌اند. چرخش هسته برحسب تغییر شکل خمشی آن و چرخش مهار بازویی برحسب تغییر شکل محوری ستونها و خمش مهار بازویی تعریف می‌شود. چنانچه معادلهٔ سازگاری برای تراز ارتفاعی دوم نوشته شود، بر پایه اصل جمع آثار، معادلهٔ زیر حاصل خواهد شد [۱۳]:

$$\Delta\theta_2-\left[\frac{M_1(x_2-x_1)}{EIc_1}+\frac{(M_1+M_2)(x_3-x_2)}{EIc_2}+\frac{(M_1+M_2+M_3)(H-x_3)}{EIc_3}\right]=$$

$$\frac{2M_1(x_2-x_1)}{d^2EA_1}+\frac{2(M_1+M_2)(x_3-x_2)}{d^2EA_2}+\frac{2(M_1+M_2+M_3)(H-x_3)}{d^2EA_3}+\frac{M_2\cdot 21^3}{3d^2H(E_0I_0)_2} \quad (1)$$

شایان ذکر است که در طرح ریاضی کلی، معادلهٔ (۱)، $\Delta\theta_i$ چرخش هسته در تراز مهار بازویی در اثر بار خارجی است که تابعی از نوع بار است. توضیح بیشتر در ادامه خواهد آمد. با توجه به شکل (۳)، x_i فاصلهٔ مهار بازویی از تراز ارتفاع بام، H ارتفاع سازه، I_{ci} ممان اینرسی هسته بین ترازهای (i) و $(i+1)$، A_i سطح مقطع



شکل ۳- مدل تحلیلی سازه

ستونها در فاصلهٔ تراز (i) تا (i+1)، d پـهنای کـل سـازه، $(E_0I_0)_i$ سختی خمشی مهار بازویی تراز i، M_i لنگرهای قـیدی مـهارهای بازویی و L طول مهار بازویی هستند. معادلهٔ همسازی را می‌توان به این صورت تشریح کرد که چرخش هسته با چرخش مهار بازویی در تراز مهار مساوی‌اند. چرخش هسـته عـبارت است از: چـرخش ناشی از بارهای خارجی ($\Delta\theta$) منهای چرخش نـاشی از لنگـرهای قیدی مهارهای بازویی (جملهٔ دوم عبارت سمت راست معادلهٔ ۱). چرخش مهار بازویی عبارت است از: چرخش ناشی از تغییر شکل محوری ستونها و همچنین تغییر شکـل خـمشی مـهار تـحت بـار متمرکز (نیروی محوری ستونها) در انتهای آن. معادله‌های سازگاری برای ترازهای ۱ و ۳ به همین ترتیب قابل استخراج‌اند. شکل ساده شدهٔ معادله‌های سازگاری برای ساختار سه مهار بازویی به صورت زیر است.

$$\Delta\theta_1=\left[S_1(x_2-x_1)+S_2(x_3-x_2)+S_3(H-x_3)+T_1\right]M_1+\left[S_2(x_3-x_2)+S_3(H-x_3)\right]M_2+\left[S_3(H-x_3)\right]M_3 \quad (۲)$$

$$\Delta\theta_2=\left[S_2(x_3-x_2)+S_3(H-x_3)\right]M_1+\left[S_2(x_3-x_2)+S_3(H-x_3)+T_2\right]M_2+\left[S_3(H-x_3\right]M_3 \quad (۳)$$

$$\Delta\theta_3=\left[S_3(H-x_3)\right]M_1+S_3\left[(H-x_3)\right]M_2+\left[S_3(H-x_3)+T_3\right]M_3 \quad (۴)$$

به طوری که:

$$S_i=\frac{1}{EI_{ci}}+\frac{2}{d^2(EA)_i} \quad (۵)$$

$$T_i=\frac{2l_i^3}{3d^2H\left(E_0I_0\right)_i} \quad (۶)$$

معادله‌های قبل را می‌توان به صورت ماتریسی تنظیم کرد که پس از به دست آمدن چند پارامتر بدون بـعد بـرای یک سـازه بـا n مـهار بازویی طرح ریاضی زیر حاصل می‌شود:

$$[M]=[F]^{-1}[\Delta\theta] \quad (۷)$$

به طوری که

$$[M]=[M_1M_2...M_n]^T \quad (۸)$$

و ماتریس ضریبها عبارت است از:

$$[F]=\mu_1\begin{bmatrix}\omega_1+\sum_{i=1}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \sum_{i=2}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \cdots & \sum_{i=n}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i)\\ \sum_{i=2}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \omega_2+\sum_{i=2}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \cdots & \sum_{i=n}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i)\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \sum_{i=n}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \sum_{i=n}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i) & \cdots & \omega_n+\sum_{i=n}^{n}r_i\gamma_i(\xi_{i+1}-\xi_i)\end{bmatrix}$$

(۹)

که در آن

$$r_i=\frac{EI_{cn}}{EI_{ci}} \quad (۱۰)$$

$$\gamma_i=EI_{ci}S_i \quad (۱۱)$$

$$\xi_i=\frac{x_i}{H} \quad (۱۲)$$

$$\omega_i=\frac{2l_i^3}{3d^2H}\frac{EI_{cn}}{(E_0I_0)_i} \quad (۱۳)$$

$$\mu_1=\frac{H}{EI_{cn}} \quad (۱۴)$$

ماتریس $[\Delta\theta]$ چرخش ناشی از بارهای خارجی در تـراز مـهارهای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]

بازویی است به طوری که

$$\Delta\theta = \left[\, \Delta\theta_1\ \Delta\theta_2 \ldots \Delta\theta_n \right]^T \qquad (۱۵)$$

و مقادیر $\Delta\theta_i$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta\theta_i = \sum_{j=i}^{n} \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{m(x)}{EI_{cj}} dx \qquad (۱۶)$$

به طوری که $m(x)$ لنگر هستهٔ ناشی از بار خارجی در نقطهٔ x است و وابسته به نوع بار است. بعد از بیرون آوردن ضریبهای مربوط به بار و بدون بعد کردن مقادیر x (x به ξ تبدیل می‌شود)، مقادیر $[\Delta\theta]$ را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$[\Delta\theta] = \mu_2\, [\delta\theta] \qquad (۱۷)$$

که در آن

$$[\,\delta\theta\,] = \left[\delta\theta_1\ \ \delta\theta_2\ \ldots\ \delta\theta_n\right]^T \qquad (۱۸)$$

$\delta\theta$ مقادیر بدون بعد $\Delta\theta$ هستند که در فاکتور μ_2 ضرب می‌شوند، مقادیر $\delta\theta$ و μ_2 به ازای بارهای مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

تغییر شکل سازه و لنگر پایه

دو عامل بسیار مهم که در طراحی سازه‌های بلند مورد توجه‌اند، رانش بالای سازه و لنگر پایه هستند. معمولاً در سازه‌های بلند، طرح باید به گونه‌ای باشد که رانش بالای سازه را به مقدار کمینه برساند. با توجه به فرمولبندی بالا پس از محاسبهٔ لنگرهای قیدی در مهارهای بازویی، رانش بالای سازه به صورت زیر قابل بیان است.

$$\Delta_T = \Delta_L - \Delta_S \qquad (۱۹)$$

به طوری که Δ_T رانش نهایی بالای سازه، Δ_L جابه‌جایی بالای سازه ناشی از بار خارجی و Δ_S رانش بالای سازه ناشی از لنگرهای قیدی مهارهای بازویی‌اند. با توجه به روشهای تحلیل سازه، اگر یک طرهٔ آزاد با مقطع متغیر پله‌ای را تحت بار جانبی در نظر بگیریم، Δ_L که تابعی از نوع بار است، به صورت کلی زیر قابل بیان است.

$$\Delta_L = \sum_{i=0}^{n} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{m(x)\,x\,dx}{EI_{ci}} \qquad (۲۰)$$

رابطهٔ بالا پس از بدون بعد کردن توسط فاکتورگیری به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$\Delta_L = \phi \sum_{i=0}^{n} r_i \left[F(\xi_i)\right] \qquad (۲۱)$$

که در آن ϕ تابعی از نوع بار بوده و مقادیر ϕ و $F(\xi_i)$ در جدول (۱) آورده شده است. اگر یک طرهٔ آزاد را تحت چند لنگر متمرکز در تراز مهارهای بازویی در نظر بگیریم، Δ_S که ناشی از لنگرهای قیدی مهارهای بازویی است به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta_S = \frac{H^2}{2EI_{cn}} \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{i} M_j \right) r_i \left(\xi_{i+1}^2 - \xi_i^2 \right) \right] \qquad (۲۲)$$

۳- تأثیر انعطاف پذیری کمربند

در بعضی موارد برای استفادهٔ بهینه از ستونها و به کارگیری کلیه ستونهای اطراف، از یک کمربند محیطی به ضخامت یک تا دو طبقه استفاده می‌شود. در مطالعات قبلی برای سازه‌های دارای کمربند، به دلیل ضخامت زیاد، کمربند را با سختی خمشی بی‌نهایت فرض کرده‌اند اما در این تحقیق کمربند به صورت انعطاف‌پذیر فرض شده است.

در اینجا یک سازه با پلان مطابق شکل (۴-الف) در نظر گرفته شده است. این سازه دارای یک هسته و دو مهار در پلان است. فرض شده که در دو طرف، شش ستون به فواصل l_c از یکدیگر قرار دارند و مهارها بر روی دو ستون میانی قرار گرفته‌اند. به دلیل اینکه ستونها تنها نیروی محوری تحمل می‌کنند می‌توان کمربند را به صورت یک تیر بر روی تعدادی فنر فرض کرد. نیروهای مهار بازویی نیز به صورت دو بار متمرکز F_1 مدل شده‌اند، شکل(۴-ب). با توجه به شکل (۳) در سیستمهای با بیش از یک مهار اگر کمربند مورد نظر درست در تراز مهار بازویی باشد، در معادله‌سازی تنها نیروی F_1 قرار می‌گیرد، اما در صورتی که کمربند مورد نظر غیر از کمربند مربوط به تراز مهار بازویی باشد (کمربندی که در تراز مهار بازویی دیگر باشد) نیروهای F_2 و F_3 (که عبارت‌اند از نیروهای p_2 و p_3 ستونهای بالای کمربند) نیز بر روی کمربند تأثیر می‌گذارند.

نیروهای p_1 تا p_3 با استفاده از روش انرژی و حل معادلهٔ کلی آن که به صورت زیر است، به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial U}{\partial P_i} = 0 \qquad i = 1, 3 \qquad (۲۳)$$

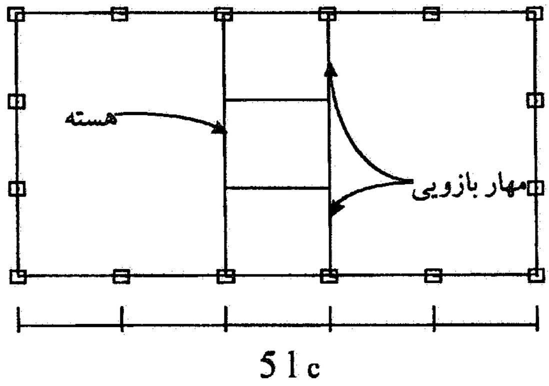
به طوری که U انرژی کل، شامل انرژی خمشی تیر و همچنین انرژی

جدول ۱ - مقادیر پارامترهای وابسته به نوع بار

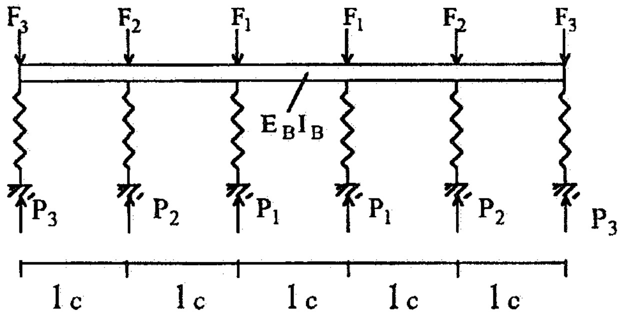
نوع بار	μ_2	$\delta\theta$	ϕ	$F(\xi)$
بارگستردهٔ ثابت q	$\frac{qH^3}{EI_{cn}}$	$\sum_{j=i}^{n}\frac{r_j}{6}\left[\xi^3\right]_{\xi_j}^{\xi_{j+1}}$	$\frac{qH^4}{2EI_{cn}}$	$\frac{r_i}{4}\left[\xi^4\right]_{\xi_i}^{\xi_{i+1}}$
بارگستردهٔ مثلثی به معادلهٔ $W(1-\frac{x}{H})$	$\frac{WH^3}{EI_{cn}}$	$\sum_{j=i}^{n}\frac{r_j}{6}\left[\xi^3\left(1-\frac{\xi}{4}\right)\right]_{\xi_j}^{\xi_{j+1}}$	$\frac{WH^4}{2EI_{cn}}$	$\frac{r_i}{3}\left[\xi^4\left(\frac{3}{4}-\frac{\xi}{5}\right)\right]_{\xi_i}^{\xi_{i+1}}$
بار سهمی به معادلهٔ $U\left(1-\frac{2x}{H}+\frac{x^2}{H^2}\right)$	$\frac{UH^3}{EI_{cn}}$	$\sum_{j=i}^{n}\frac{r_j}{6}\left[\xi^3\left(1-\frac{1}{2}\xi+\frac{1}{10}\xi^2\right)\right]_{\xi_j}^{\xi_{j+1}}$	$\frac{UH^4}{2EI_{cn}}$	$r_i\left[\xi^4\left(\frac{1}{4}-\frac{2}{15}\xi+\frac{1}{36}\xi^2\right)\right]_{\xi_i}^{\xi_{i+1}}$
بار متمرکز در بالای سازه P	$\frac{PH^2}{EI_{cn}}$	$\sum_{j=i}^{n}\frac{r_j}{2}\left[\xi^2\right]_{\xi_j}^{\xi_{j+1}}$	$\frac{PH^3}{2EI_{cn}}$	$\frac{2r_i}{3}\left[\xi^3\right]_{\xi_i}^{\xi_{i+1}}$

$$\xi_i=\frac{x_i}{H}\ ,\quad \xi=\frac{x}{H}\ ,\quad \xi_{n+1}=1\ ,\quad \xi_0=0$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]



شکل ۴-الف پلان ساختمان مورد نظر



شکل ۴-ب مدل تحلیلی کمربند

محوری فنرها (ستونها)ست. لازم به ذکر است که در فرمولهای مورد نظر به دلیل تغییر شکل محوری ستونها فاصلهٔ بین دو ستون، طول دهانهٔ کمربند نبوده بلکه کل طول تیر به عنوان طول کمربند محسوب می‌شود.

با حل معادلهٔ (۲۳) نتایج به صورت زیر قابل بیان است.

$$P_1=\frac{-\left[(11+2C_i)/(17+C_i)\right]\alpha+\beta}{\left\{(17+C_i)-\left[(11+2C_i)/(17+C_i)\right](2C_i+28)\right\}} \tag{۲۴}$$

$$P_2=\frac{\alpha-(2C_i+28)P_1}{(17+C_i)} \tag{۲۵}$$

$$P_3=(F_1+F_2+F_3)-(P_1+P_2) \tag{۲۶}$$

به طوری که

$$\alpha=(28+C_i)F_1+(17+C_i)F_2+F_3C_i \tag{۲۷}$$

$$\beta=(17+C_i)F_1+(11+C_i)F_2+F_3C_i \tag{۲۸}$$

$$C_i=\frac{6E_B I_B}{Kl_c^3} \tag{۲۹}$$

$$\frac{1}{k}=\sum_{j=i}^{n}\frac{1}{K_i} \quad ; \quad K_j=\frac{(E_0A_0)_j}{H(\xi_{j+1}-\xi_j)} \tag{۳۰}$$

که در آن A_0 سطح مقطع هر ستون، E_BI_B سختی خمشی کمربند و I_c فاصله بین ستونهاست.

اگر کمربند دارای سختی بی‌نهایت باشد، با توجه به شکل(۴-ب) مشاهده می‌شود که نیروی محوری ستونهای زیرمهار $\frac{1}{3}F_1$ است. اگر F_1 مساوی واحد در نظر گرفته شود، نیروی محوری ستونها $\frac{1}{3}$ می‌شود. اگر کمربند انعطاف‌پذیر باشد، نیروی محوری و تغییر شکل ستونهای زیرمهار بیش از سایر ستونهاست و در نتیجه، سازه تغییر شکل بیشتری نسبت به حالت با کمربند صلب می‌دهد. با یک ضریب کاهشی در سطح مقطع کلی ستونها (Cof_i) می‌توان از فرمول بندی قبل استفاده کرد، به طوری که این ضریب تغییر شکل محوری ستونها را با تغییر شکل ستونهای زیرمهار در حالت کمربند انعطاف‌پذیر، مساوی کند. این ضریب به صورت زیر قابل بیان است.

$$Cof_i=\frac{\left(\frac{1}{3}\right)}{P_1} \tag{۳۱}$$

به طوری که $\frac{1}{3}$ نیروی محوری ستونها در حالت کمربند صلب و P_1 نیروی محوری ستونهای زیرمهارها در حالت کمربند انعطاف‌پذیرند. با توجه به اینکه اگر کمربند دارای سختی بی‌نهایت باشد $P_1=\frac{1}{3}$ می‌شود، در نتیجه می‌توان گفت $0<Cof_i<1$ است. تأثیر COf_i به صورت زیر قابل بیان است

$$(EA)'_i=(EA)_i\,.\,Cof_i \tag{۳۲}$$

که در آن $(EA)'_i$ سختی محوری اصلاح شده در فاصلهٔ i تا i+1 است. لازم به ذکر است که در صورتی که تعداد مهارها بیش از یک باشد، سختی محوری تمامی ستونهای زیر یک مهار در فرمولبندی آن مهار تأثیر دارند (قسمت روش تحلیل). از این رو برای اصلاح سختی محوری این ستونها باید از کمربند سایر مهارها نیز استفاده شود. برای در نظر گرفتن کمربندهای غیر از تراز مهار بازویی مورد نظر، نیروهای به دست آمده از کمربند زیرمهار (P_1 تا P_3) برای

کمربند بعدی به عنوان نیروهای F_1 تا F_3 باید در نظر گرفته شوند. نیروی P_1 جدید برای اصلاح سختی محوری ستونها در فاصله بین i+1 تا i+2 به کار می‌رود. این عمل باید تا زمانی که سختی تمامی ستونها اصلاح شوند ادامه یابد. این کار برای سایر مهارها نیز باید انجام گیرد.

۴- اصلاحات لازم بر روی مدل ارائه شده و مقایسهٔ جوابها

در مطالعات قبلی که بر روی این سیستم انجام شده است، تغییر شکلهای برشی ناچیز فرض شده است. لیکن بایستی توجه کرد که در بعضی موارد تغییر شکلهای برشی تأثیر قابل توجهی دارند و به همین دلیل در بررسی فعلی به منظور در نظر گرفتن تغییر شکلهای برشی، یک اصلاح بر روی سختی خمشی مهارها انجام شد. سختی خمشی اصلاح شده به این صورت تعریف می‌شود که جابه جایی انتهای مهار با سختی اصلاح شده به ازای بار متمرکز در انتها، مساوی جابه‌جایی سختی خمشی واقعی با در نظر گرفتن تغییر شکلهای برشی باشد، یعنی:

$$(E_0I'_0)_i = \frac{(E_0I_0)_i}{\left[\left(1+3(E_0I_0)_i/L_i^2G_0A\right)\lambda\right]} \qquad (۳۳)$$

به طوری که $(E_0I'_0)_i$ مقدار سختی اصلاح شده مهار بازویی، G_0 مدول برشی مهار بازویی، λ ضریب برشی که در مقاطع مستطیلی ۱/۲ است و A سطح مقطع مهار بازویی است.

جوابهای فرمولبندی ارائه شده با نتایج مقالات قبلی در حالتی که سازه دارای مشخصات ثابت در ارتفاع باشد، کاملاً یکسان بود. در اینجا مبنای جواب صحیح در حالت کلی، جوابهای حاصل از روش اجزای محدود است.

در مراجعی که مهار را انعطاف‌پذیر در نظر گرفته‌اند طول مهار معادل طول خالص مهار بازویی (L در شکل ۱) فرض شده، به این معنا که اتصال مهار و هسته کاملاً صلب است. اما با این فرض، مسئله خطای نسبتاً زیادی خواهد داشت. در مبحث دیوارهای برشی کوپل نیز در معادله‌های همسازی به چنین مسئلهٔ مشابهی برمی‌خوریم و طبق تحقیقاتی که براساس نظریه الاستیسیته و اجزای محدود انجام شده، بهتر است طول تیرهای رابط به اندازهٔ یک چهارم عمق آنها از هر طرف به طور فرضی در داخل دیوارهای برشی نفوذ یابد [۱۲]. در این تحقیق چنین کار مشابهی برای مهار بازویی انجام گرفت و به این منظور با استفاده از فرمولبندی قبل یک برنامهٔ رایانه‌ای نوشته شد [۱۳]. نتایج حاصل که در جدول (۲) آمده است مبین کاهش قابل توجه در خطای مسئله است پس:

$$l_i = L_i + \frac{h_i}{4} \qquad (۳۴)$$

به طوری که l_i طول اصلاح شدهٔ مهار بازویی، L_i طول خالص مهار بازویی و h_i ارتفاع مقطع مهار بازویی است. با توجه به جدول (۲) باید گفت که فرمول (۳۴) برای سیستمهایی پیشنهاد می‌شود که ضخامت مهار بازویی کمتر از ضخامت هسته باشد. لازم به ذکر است که اگر عمق مهار بازویی مساوی و یا بیش از عمق هسته باشد بهتر است از همان طول اولیه (طول خالص) استفاده شود. با این اصلاحات می‌توان خطای مسئله را تا زیر ۵ درصد کاهش داد.

در ادامه، فرمولبندی ارائه شده در قسمت کمربند انعطاف‌پذیر، به برنامهٔ قبل اضافه و با روش اجزای محدود مقایسه شد که مبین دقت قابل قبول مسئله است. این مقایسه در جدول (۳) آمده است.

۵- بهینه‌یابی محل مهارهای بازویی

روش تحلیلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، نه فقط برای تخمین لنگرها و تغییر مکانهای هسته مفید است بلکه امکان تعیین تراز بهینهٔ مهارهای بازویی، برای کمینه کردن تغییر مکان بالای سازه و یا لنگر پایه را نیز فراهم می‌سازد. این کار توسط مشتقگیری از معادلهٔ (۱۹) انجام می‌گیرد.

$$\frac{\partial \Delta_T}{\partial \xi_i} = 0 \qquad i = 1, n \qquad (۳۵)$$

برای حالت با سه مهار بازویی دستگاه معادله‌های غیرخطی زیر به دست می‌آید:

$$G(\xi_1)(r_0 - r_1) - \left[M_{11} r_1(\xi_2^2 - \xi_1^2) + (M_{11} + M_{21}) r_2(\xi_3^2 - \xi_2^2) + (M_{11} + M_{21} + M_{31})(1 - \xi_3^2)\right]$$
$$-2r_1 M_1 \xi_1 = 0$$

$$G(\xi_2)(r_1 - r_2) - \left[M_{12} r_1(\xi_2^2 - \xi_1^2) + (M_{12} + M_{22}) r_2(\xi_3^2 - \xi_2^2) + (M_{12} + M_{22} + M_{32})(1 - \xi_3^2)\right]$$
$$-2r_1 M_1 \xi_2 - 2r_2(M_1 + M_2)\xi_2 = 0$$

$$G(\xi_3)(r_2 - r_3) - \left[M_{13} r_1(\xi_2^2 - \xi_1^2) + (M_{13} + M_{23}) r_2(\xi_3^2 - \xi_2^2) + (M_{13} + M_{23} + M_{33})(1 - \xi_3^2)\right]$$
$$-2r_2 (M_1 + M_2)\xi_3 - 2r_3(M_1 + M_2 + M_3)\xi_3 = 0$$

(۳۶)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]

جدول ۲- مقایسهٔ جوابها با روش اجزای محدود

تعداد مهار	r_0	r_1	r_2	ارتفاع مقطع مهار (m)	رانش با اجزای محدود	روش ارائه شده با اضافهٔ طول مهار		روش ارائه شده بدون اضافهٔ طول مهار		روش ارائه شده بدون اضافهٔ طول و تغییر شکل برشی مهار		توضیحات
						خطا ٪	رانش	خطا ٪	رانش	خطا ٪	رانش	
۱	۱	-	-	۸	۰/۲۳۸	۲/۱	۰/۲۳۳	۱۰/۰	۰/۲۱۴	۱۲/۶	۰/۲۰۸	
۱	۱	-	-	۶	۰/۴۰۴	۰/۴۹	۰/۴۰۲	۷/۱	۰/۳۷۵	۹/۴	۰/۳۶۶	
۱	۱	-	-	۵	۰/۵۸	۰/۸۶	۰/۵۸۵	۴/۶	۰/۵۵۳	۶/۵۵	۰/۵۴۲	
۱	۱	-	-	۴	۰/۹۴۳	۲/۷۵	۰/۹۶۹	۱/۲۷	۰/۹۳۱	۲/۵۴	۰/۹۱۹	
۱	۸	-	-	۸	۰/۵۵۷	۰/۷۱۸	۰/۵۵۳	۳/۹۴	۰/۵۳۵	۵/۰	۰/۵۲۹	
۲	۱	۱	-	۶	۰/۲۵۸	۱/۹۳	۰/۲۵۳	۷/۳۶	۰/۲۳۹			
۲	۸	۸	-	۸	۰/۲۱۷	۰/۰۹۲	۰/۲۱۷۲	۵/۳۹	۰/۲۰۵۳			
۳	۸	۸	۱	۸	۰/۱۸۹	۲/۶۴	۰/۱۸۴	۸/۴۶	۰/۱۷۳			
۳	۸	۸	۱	۸	۰/۲۴۴	۲/۰۴	۰/۲۳۹	۹/۰۱	۰/۲۲۲			ضخامت مهار
۳	۱	۱	۱	۶	۰/۱۷۵۹	۰/۱۷	۰/۱۷۶۲	۷/۳۳	۰/۱۶۳			۵ متر
۳	۱	۱	۱	۴	۰/۳۱	۴/۵	۰/۳۲۴	۱/۰۳۲	۰/۳۰۶۸			

ضخامت مهارها چهار، طول مهارها ده، ضخامت دیوار و مهار ۰/۲ و ارتفاع سازه ۱۰۰ متر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]

جدول ۳- مقایسهٔ جوابها در حالت کمربند انعطاف‌پذیر با روش اجزای محدود

تعداد مهار	r_0	r_1	r_2	I_n	رانش با روش اجزای محدود*	رانش با روش ارائه شده	توضیحات
۱	۸	۱	-	۸/۵۳۳	۰/۵۳۹	۰/۵۳	طول مهار ۶ متر
۱	۱	۱	-	۸/۵۳۳	۰/۲۱۹۷	۰/۲۰۹	
۱	۱	۱	-	۲/۰۸	۰/۵۴۵	۰/۵۴۵	
۲	۸	۸	-	۸/۵۳۳	۰/۱۹۱	۰/۱۹۲۶	
۲	۱	۱	-	۲/۰۸	۰/۳۱۷	۰/۳۲۴	
۳	۸	۱	-	۸/۵۳۳	۰/۱۵۶۶	۰/۱۵۹۸	
۳	۱	۱	-	۸/۵۳۳	۰/۰۹۹۳۲	۰/۰۹۶۹	
۳	۱	۱	-	۳/۶	۰/۱۴۳۹	۰/۱۴۳۴	
۳	۱	۱	-	۱/۰۶۶۷	۰/۲۶۸۵	۰/۲۷۶	
۳	۱	۱	-	۱/۵۱۸	۰/۲۱۹۸	۰/۲۲۱	

ضخامت مهارها و کمربند چهار متر، طول مهارها ده متر، فاصلهٔ ستونها پنج متر و ارتفاع سازه صدمتر

$$M_{ij} = \frac{\partial M_i}{\partial \xi_j} \qquad (۳۷)$$

معادلهٔ عمومی دستگاه غیرخطی (۳۷) در حالت کلی برای "n" مهار بازویی به صورت زیر قابل بیان است.

$$G(\xi_i)(r_{i-1}-r_i) - \left[\sum_{j=1}^{1} M_{j1} r_1(\xi_2^2-\xi_1^2) + \sum_{j=1}^{2} M_{j2} r_2(\xi_3^2-\xi_2^2) + \dots + \sum_{j=1}^{1} M_{jn} r_n(\xi_{n+1}^2-\xi_n^2)\right] + \left(2r_{i-1}\sum_{j=1}^{i-1} M_j + 2r_i\sum_{j=1}^{i} M_j\right)\xi_i = 0$$

$$i = 1,n \qquad (۳۸)$$

که در آن

$$G(\xi_i) = \psi(\xi_i^3) + \beta(\xi_i^3 - \frac{\xi_i^3}{4}) + \zeta(\xi_i^3 - \frac{2\xi_i}{3} + \frac{1}{6}\xi_i^3) + \alpha(2\xi_i) \qquad (۳۹)$$

ضریبهای α، β، ζ و ψ، ضریبهایی هستند که برای ترکیب بارها به کار برده می‌شوند و در حالت وجود یک بار به صورت تنها، یکی از آنها واحد و بقیه صفرند. توضیحات بیشتر در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

برای حل این دستگاه معادله‌ها از روش نیوتن استفاده شده است. لازم به ذکر است که توابع داخل دستگاه به صورت مستقیم در دست نبوده و باید از روشهای عددی مقدار آنها را محاسبه کرد. برای حل این دستگاه با استفاده از فرمولبندی ارائه شده و روش نیوتن یک برنامهٔ رایانه‌ای نوشته شده است که در مرجع [۱۳] موجود است. در صورتی که حدس اولیه مناسبی به کار رود دستگاه واگرا نخواهد شد. محل بهینه با روش سعی و خطا نیز محاسبه شد که با جوابهای دستگاه یکسان بود. در مورد جوابهای دستگاه در قسمت بعد به تفصیل بحث خواهد شد.

۴- مطالعه پارامتری

براساس روش تحلیل ارائه شده می‌توان یک مطالعهٔ پارامتری بر روی جوابها انجام داد. شکل (۵) رانش بالای سازه برحسب موقعیتهای مختلف مهار (ξ)، به ازای مقادیر مختلف نسبت سختی ستونها به هسته برای سازه با یک مهار بازویی را نشان می‌دهد، به طوری که:

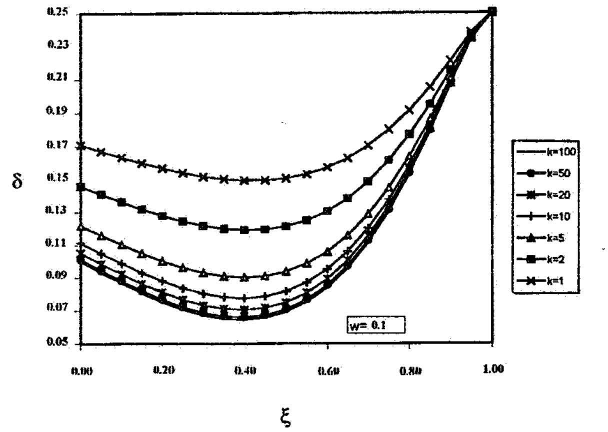
$$k_i = \frac{EA_{ci}d^2}{2EI_{ci}} \qquad (۴۰)$$

یا

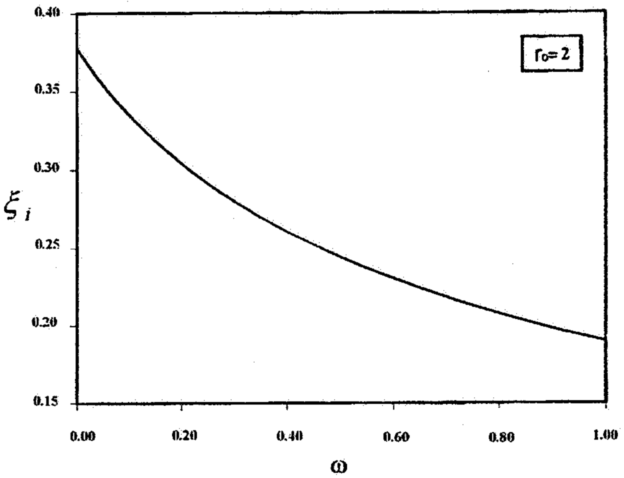
$$\gamma_i = \left(1 + \frac{1}{k_i}\right) \qquad (۴۱)$$

همان گونه که در شکل (۵) مشخص است در صورتی که مهار در تراز بهینه قرار گیرد رانش جانبی سازه نسبت به حالتی که مهار

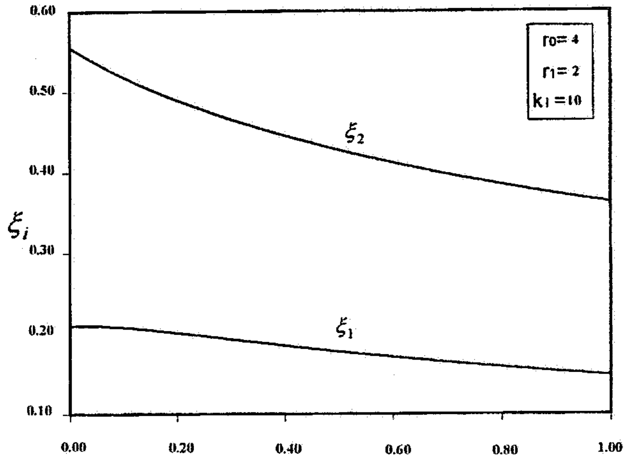
[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]



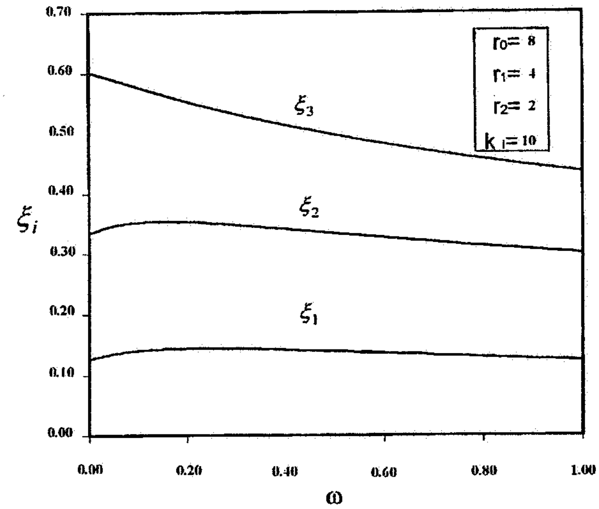
شکل ۵- رانش بالای سازه در سیستم با یک مهار بازویی، برای بار گستردهٔ یکنواخت، به ازای مقادیر مختلف k و موقعیت مهار به طوری که $\Delta_t=\delta(qH^4/2EI_1)$



شکل ۶- موقعیت بهینهٔ مهار بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ یکنواخت در سازه با یک مهار



شکل ۷- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ یکنواخت، در سازهٔ با دو مهار

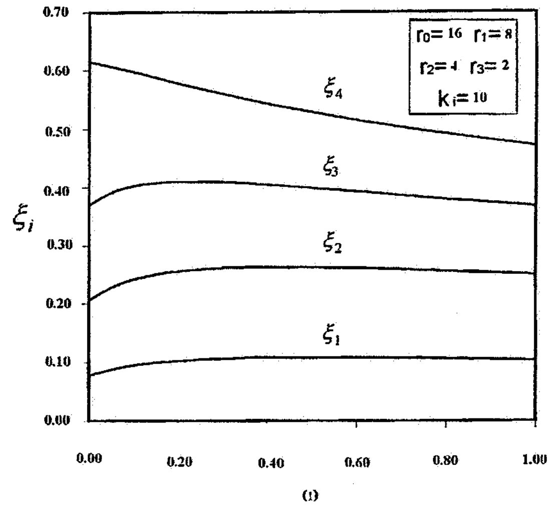


شکل ۸- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ یکنواخت، در سازه با سه مهار

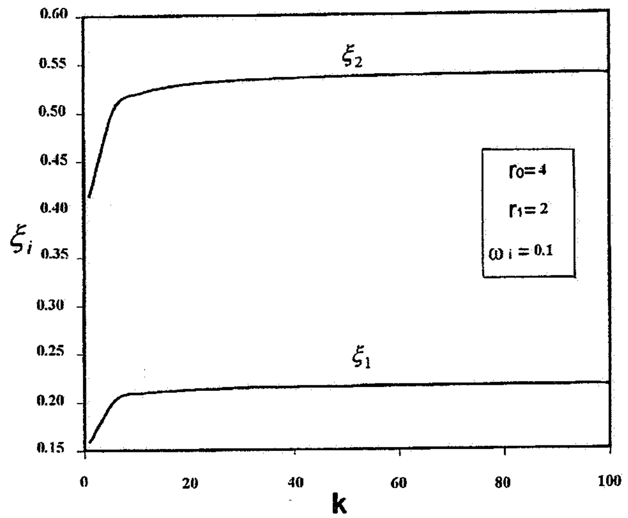
بازویی در تراز سقف قرار گیرد بسیار کمتر ا ست. با افزایش مقدار k، از رانش سازه کاسته می‌شود اما این کاهش خطی نیست، به طوری که مقدار آن برای k=100 تقریباً برابر مقدار نظیر k=50 است. علاوه بر این در صورتی که مقطع هسته و ستونها در ارتفاع یکنواخت باشد، افزایش k تأثیری در محل بهینه مهار بازویی ندارد.

در شکلهای (۶) تا (۹) موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برحسب ω با فرض ثابت بودن پارامترهای سازه‌ای دیگر نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود در پایینترین مهار بازویی، شیب تغییرات بیشتر است. در ضمن مشاهده می‌شود که با افزایش ω فاصلهٔ بین مهارهای بالا تقریباً ثابت می‌ماند. در سازه‌های با سه و چهار مهار، برای مهارهای بالاتر معمولاً مکان بهینه نسبت به ω تغییر چندانی نمی‌کند.

در شکل (۱۰) تأثیر پارامتر k بر روی یک سازه با دو مهار بازویی مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که در این نمودار مشخص است با افزایش k تراز بهینه به سمت پایین هدایت شده و از مقدار مشخصی به بعد تقریباً ثابت می‌ماند. اگر به شکل (۵) توجه شود، می‌توان دید که منحنیها به ازای مقادیر ۱۰ و بزرگتر برای k به یکدیگر نزدیک شده و همگرا می‌شوند. همین مسئله در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، به طوری که در آن محل بهینه برای مقادیر بزرگتر از ۱۰ برای k تغییر نمی‌کند. این مسئله به این معناست که با افزایش k از مقدار معینی به بعد نه تنها رانش بالای سازه بلکه محل بهینه مهارها نیز تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

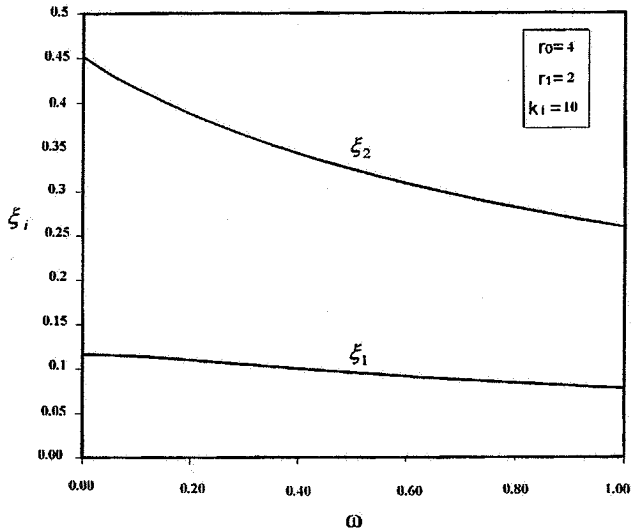


شکل ۹- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ یکنواخت، در سازهٔ با چهار مهار

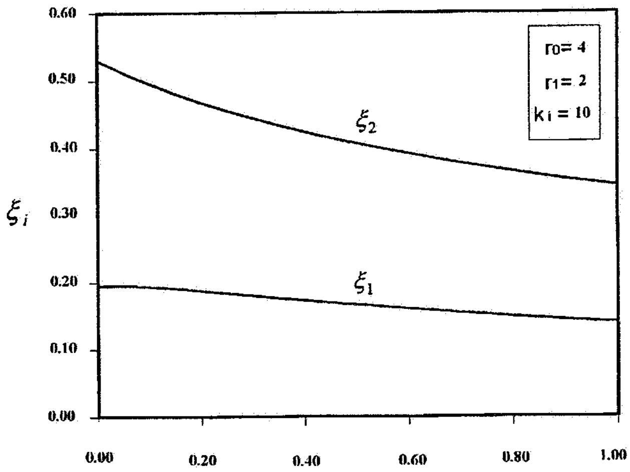


شکل ۱۰- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ یکنواخت برای مقادیر مختلف "k"، در سازهٔ با دو مهار

در شکل (۱۱) موقعیتهای بهینه در یک سازه با دو مهار بازویی و بار متمرکز در تراز بام دیده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود موقعیت بهینه مهارها نسبت به حالت بار گستردهٔ یکنواخت، در سطح بالاتری قرار می‌گیرند. همچنین در شکل (۱۲) محل بهینهٔ مهارها برای همان سازه تحت بار مثلثی آورده شده و با توجه به آن دیده می‌شود که موقعیت بهینهٔ مهارها کمی بالاتر از موقعیت نظیر مربوط به حالت بار گسترده یکنواخت قرار دارد. موقعیت بهینه در حالت ترکیب بارهای مثلثی و متمرکز در تراز بام



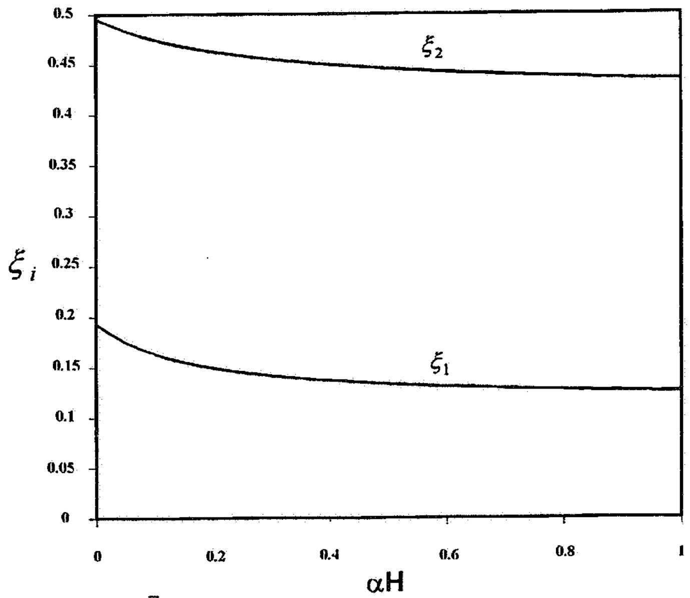
شکل ۱۱- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار متمرکز بالای سازه، در سازهٔ با دو مهار



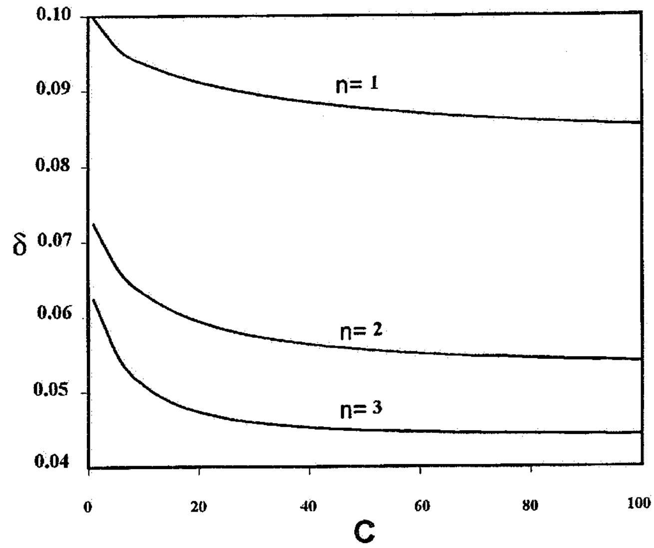
شکل ۱۲- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای بار گستردهٔ مثلثی، در سازهٔ با دو مهار

که ممکن است در مدلسازی بار زلزله استفاده شود در شکل (۱۳) دیده می‌شود.

با توجه به شکل (۱۴) با افزایش C (پارامتر سختی نسبی ستونها و هسته) از تأثیر منفی انعطاف پذیری کمربند کاسته می‌شود و برای مقادیر کوچک C تأثیر این پارامتر در رانش بالای سازه زیاد می‌باشد. همان گونه که در شکل مشهود است در صورتی که کمربند دارای سختی زیاد باشد مقدار افزایش رانش زیاد نیست. چنانچه که در شکل (۱۵) دیده می‌شود، انعطاف پذیری کمربند (C) به غیر از



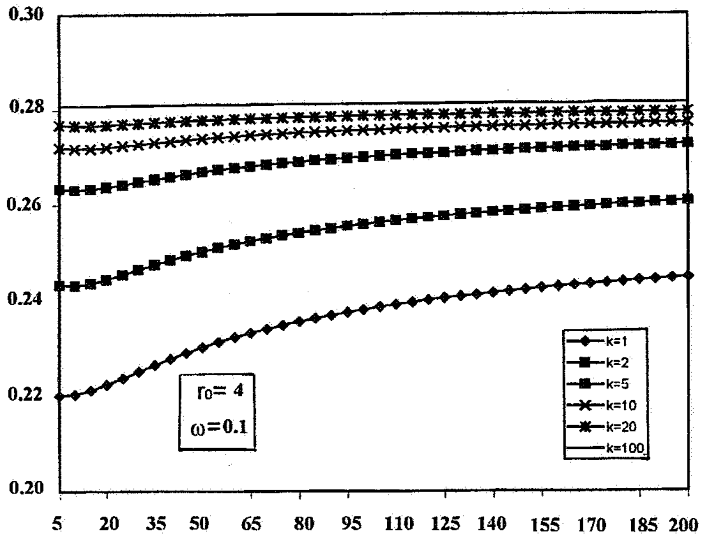
شکل ۱۳- موقعیت بهینهٔ مهارهای بازویی برای کمینه کردن رانش بالای سازه به ازای ترکیب بار گستردهٔ مثلثی و بار متمرکز، در سازهٔ با دو مهار به طوری که $P/W=\alpha H$، P: مقدار بار متمرکز و W: حداکثر بار گستردهٔ مثلثی که در بالای سازه است



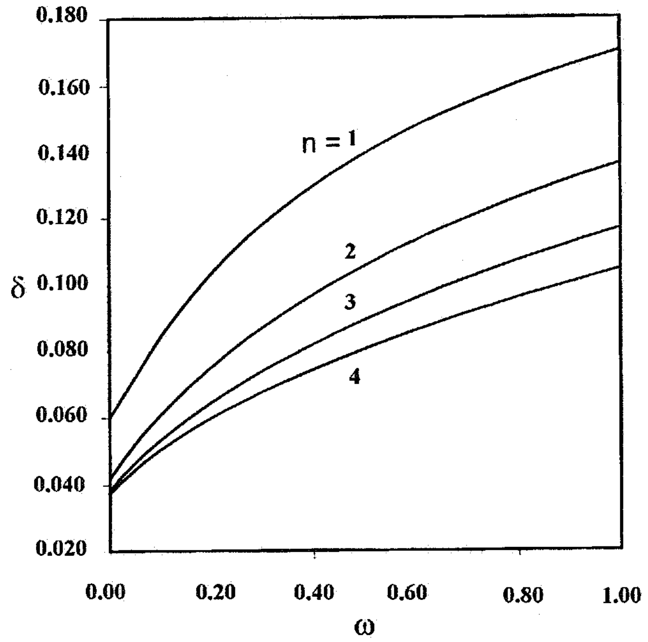
شکل ۱۴- تغییرات رانش بالای سازه برحسب پارامتر نسبی سختی کمربند و ستونها برای سازه‌های با دو و سه مهار

مقادیر کوچک k تأثیر زیادی در موقعیت بهینهٔ مهار بازویی ندارد.

در شکل (۱۶) رانش بالای سازه به صورت تابعی از ω برای تعداد مختلف مهار بازویی رسم شده است. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که کاهش رانش با افزایش تعداد مهارهای بازویی رابطهٔ خطی نداشته و از این رو به نظر می‌رسد که انتخاب بیش از چهار مهار بازویی در یک سازه اقتصادی نیست.



شکل ۱۵- موقعیت بهینهٔ سازه با یک مهار بازویی براساس پارامتر سختی کمربند



شکل ۱۶- مقایسهٔ تاثیر تعداد مهار بازویی بر روی رانش بالای سازه

لازم به ذکر است که موقعیت بهینه مهارها برای کمینه کردن رانش بالای سازه با موقعیت بهینه برای کمینه کردن لنگر پایه یکسان نیست و برای کمینه کردن لنگر پایه، مهارهای بازویی به طرف پایین سازه هدایت می‌شوند [۱۳]. بنابراین شناخت عمومی طراح از عوامل مختلف مؤثر بر کارایی یک سازه با مهار بازویی، امکان انتخاب بهترین شکل سازه‌ای را به وی خواهد داد.

۵- نتیجه گیری

به طور کلی، نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

۱- با استفاده از مهار بازویی می‌توان به طور مؤثر از سختی محوری ستونها برای کاهش جابه جایی بام و لنگر هسته بهره برد.

۲- در صورتی که مشخصات سازه در ارتفاع متغیر باشد پارامتر k در موقعیت بهینهٔ مهار مؤثر است. در غیر این صورت بر روی موقعیت بهینهٔ مهار تأثیری ندارد.

۳- با افزایش C یعنی پارامتر انعطاف پذیری کمربند، از تأثیر آن بر رفتار سازه کاسته می‌شود.

۴- انعطاف پذیری کمربند به غیر از مقادیر کوچک k تأثیر زیادی بر محل بهینهٔ مهار بازویی ندارد.

۵- تعداد بیشتر مهار بازویی در یک سازه اگر سایر پارامترها ثابت باشند، باعث کاهش بیشتر رانش بالای سازه می‌شود ولی تأثیر هر مهار نسبت به مهار قبل کمتر است.

۶- در صورتی که رانش بالای سازه بحرانی نباشد، می‌توان لنگر پایه هسته را با پایینتر بردن مهارها بیشتر کاهش داد.

واژه‌نامه

1. belt
2. belt braced structures
3. creep
4. shrinkage

مراجع

1. Taranath, B. S., *Structural Analysis and Design of Tall Buildings,* McGraw-Hill, 1988.
2. Stafford Smith, B., and Salim, I., "Parameter Study of Outrigger Braced Tall Building Structures," *Journal of Structural Division, ASCE,* Vol. 107, No. 10, pp. 2001-2014, 1981.
3. Stafford Smith, B., and Salim, I., "Formulate for Optimum Drift Resistance of Outrigger Braced Tall Building Structures," *Computers and Structures,* Vol. 17, No. 1, pp. 45-50, 1983.
4. Moudares, F. R., and Coul, A., "Stiffening of Linked Shear Walls," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE,* Vol. 112, No. 3, pp. 223-237, 1986.
5. Coul, A., and Lao, W. H. O., "Outrigger Braced Structures Subjected to Equivalent Static Seismic Loading," *Proceeding of 4th Int. Conference on Tall Buildings,* Hong Kong, pp. 53-67, 1988.
6. Coul, A., and Lao, W. H. O., "Analysis of Multi Outrigger-Brace Tall Building Structures," *Journal of Structral Engineering, ASCE,* Vol. 115, No. 7, pp. 1811-1816, 1989.
7. Moudaress, F. A., and Coul, A., "Free Vibration of Outrigger-Braced Structures," *Proceeding Institution of Civil Engineers,* Vol. 79, part. 2, pp. 105-117, 1986.
8. He, R., Tu, Y. and Zhang, Y., "Static and Dynamic Behavior of Belted High-Rise Structures," *International Conference on Tall Building*-Reach for the Sky, Kula Lampur, Malaysia, pp. 65-70, 1992.
9. Rutenberg, A., and Tal, D., "Lateral Loud Response of Belted Tall Building Structures," *Engineering Structures,* Vol. 9, pp. 53-67, 1987.
10. Rutenberg, A., and Eisenberg, M., "Stability of Outrigger Braced Tall Buildings," *Proceeding of 5th International Conference on Tall Buildings,* Hong Kong, pp. 881-892, 1990.
11. Straman, J., and Goldaf, E., "Outrigger Braced Structures in Concrete," *Seventh International Conference on Computing in Civil Engineering,* Seol, Korea, pp. 933-938, 1997.

۱۲. حاجی کاظمی، ح.، مترجم، *آنالیز و طراحی سازه‌های بلند*، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شمارهٔ ۲۰۶، زمستان ۱۳۷۵.

۱۳. اسدی زیدآبادی، ن.، کاربرد بهینه سیستمهای مهار بازویی در سازه ساختمانهای بلند، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان‌نامه، ۱۳۷۸.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.6.4]