

## تعیین موقعیت بهینه سیستم مهاربند بازویی در قاب‌های فولادی بلند با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی

کیوان فرزاد<sup>۱</sup> و سعید قلی‌زاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دوره دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۸/۲/۳۱، پذیرش: ۹۸/۸/۱۲، نشر آنلاین: ۹۸/۸/۱۲)

### چکیده

تأمین سختی مناسب و بخصوص سختی جانبی سازه، از پارامترهای اساسی طراحی ساختمان‌های بلند است. از جمله سیستم‌های مورد اقبال در سازه‌های بلند، سیستم سازه‌ای با مهار بازویی است. به واسطه اتصال هسته مرکزی به ستون‌های محیطی توسط مهارهای بازویی میزان مشارکت اعضا در تحمل نیروهای جانبی افزایش می‌یابد. سازه‌های با مهار بازویی در چند تراز نسبت به سازه‌های تک بازویی از مقاومت خمشی بیشتری برخوردارند در این راستا موقعیت سیستم‌های سخت‌کننده، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد و دستیابی به طرح‌های اقتصادی خواهد داشت. تعدد الزامات آئین‌نامه‌ای و اعضای سازه مستلزم بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاوشی در روند بهینه‌سازی است در این تحقیق با به‌کارگیری چهار الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی در دو سازه ۲۴ و ۳۶ طبقه کارایی هر الگوریتم در بهینه‌سازی سازه و موقعیت مهارهای بازویی مشخص و نتایج به‌دست آمده حاکی از تأثیر موقعیت مهار در دستیابی به سازه بهینه می‌باشد به طوری که با تخصیص یک مهار به ازای هر دوازده طبقه و تثبیت یکی از آن‌ها در طبقه آخر هر سازه، موقعیت بهینه مهار دوم سازه ۲۴ طبقه در طبقه دوازدهم و مهارهای سازه ۳۶ طبقه در طبقات یازدهم و بیست و سوم به‌دست می‌آید.

**کلیدواژه‌ها:** ساختمان بلند، الگوریتم فراکاوشی، بهینه‌یابی موقعیت.

### ۱- مقدمه

های خارجی متصل می‌شوند. تحت بارهای جانبی مهارها با ستون-های پیرامونی در برابر چرخش هسته مقاومت کرده و موجب کاهش تغییرشکل‌های جانبی و ممان‌ها می‌گردند (Wu و همکاران، ۲۰۰۳).

موقعیت مهار بازویی تأثیر بسزایی بر کارایی سازه دارد یک ساختمان می‌تواند تنها با افزودن مهار بازویی در طبقه فوقانی به طور مؤثری سخت گردد. با افزایش طبقات و تعداد مهارهای بازویی رفتار یکپارچه هسته و ستون‌های پیرامونی بهتر تأمین می‌گردد و سختی جانبی بهبود می‌یابد اما این بهبود نسبت ثابتی با افزایش تعداد مهارها در ترازهای مختلف ندارد و معمولاً در سازه‌های بسیار بلند حداکثر تا چهار مهار بازویی استفاده می‌شود (Smith و Coull، ۱۹۹۱). بنابراین تعیین موقعیت مهار بازویی از جمله قسمت‌های مهم طراحی بوده و عمدتاً به صورت تجربی صورت گرفته و با توجه به الزامات آئین‌نامه‌ای متنوع، نتایج اقتصادی خوبی به همراه ندارد. در خصوص تعیین موقعیت بهینه مهار بازویی مطالعات محدودی صورت گرفته که عمدتاً بر اساس یکسری فرضیات ساده

با افزایش ارتفاع ساختمان، ملاحظات مربوط به سختی و پایداری سازه‌ای اهمیت افزون‌تری نسبت به معیار مقاومت که در سازه‌های کوتاه عامل تعیین‌کننده و حاکم بر طراحی است می‌یابد امروزه با توجه به کمبود زمین در شهرهای بزرگ و افزایش روزافزون جمعیت ساختمان‌های بلند جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند (Taranath، ۱۹۹۸).

هر سازه بلندی اساساً رفتار شبیه به طره عمودی تحت بارهای جانبی از خود نشان می‌دهد که به‌یقین ارزیابی پاسخ آن و تلاش در جهت مقاوم‌سازی آن نیازمند ابداع ساختارهای سازه‌ای گوناگون است که به حداقل رساندن مقدار مصالح سازه‌ای مورد مصرف از اهداف اصلی آن می‌باشد.

از جمله سیستم‌های مورد اقبال در سازه‌های بلند، سیستم سازه‌ای با مهار بازویی است این نوع سازه دارای یک هسته مرکزی است که توسط خرپاهای بازو مانند یا شاه‌تیرهای قوی به ستون-

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۴۴۷۵۰۹۷

محاسبه می‌شود. در این مطالعه که هدف اصلی بهینه‌سازی، کاهش وزن سازه می‌باشد مسئله به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Minimize : } w(x) = \rho \sum_{i=1}^M A_i L_i \quad (1)$$

$$\text{subject to the constraints: } g_1 \leq 0, \quad g_2 \leq 0, \dots, g_n \leq 0 \quad (2)$$

که در آن  $A$  و  $L$  به ترتیب وزن واحد حجم فولاد، سطح مقطع عضو و طول عضو می‌باشند.  $g_1, g_2, \dots, g_n$  توابع قید هستند که با توجه به نوع المان و نوع مسئله محاسبه می‌شوند. در این مطالعه انواع قیدها مانند دریافت طبقات، تغییر مکان ماکزیمم تراز بام و ... برای طراحی سازه‌ها اعمال شده‌اند.

$$g_\delta = \left(\frac{\delta}{H}\right) - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$$g_k^d = \left(\frac{d_k}{R_l}\right) - 1 \leq 0 \quad k = 1, \dots, ns \quad (4)$$

که در آن  $\delta$  حداکثر تغییر مکان جانبی سازه،  $H$  ارتفاع سازه،  $R$  حداکثر دریافت نسبی مجاز بام،  $d_k$  دریافت طبقات،  $h_k$  ارتفاع طبقه  $k$  ام،  $ns$  تعداد طبقات و  $R_l$  حداکثر مقدار مجاز دریافت نسبی طبقات بوده و برابر  $0.2$  می‌باشد. همچنین قیود مربوط به تنش در اعضای سازه بر اساس آیین‌نامه AISC-360 (۲۰۱۰) به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 \quad g_l^\sigma = \left[ \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0, \quad l = 1, \dots, ne \quad (5)$$

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \quad g_l^\sigma = \left[ \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0, \quad l = 1, \dots, ne \quad (6)$$

که در آن  $P_u$  مقاومت محوری لازم،  $P_n$  مقاومت محوری مجاز،  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت،  $M_{ux}$  و  $M_{uy}$  مقاومت خمشی لازم،  $M_{nx}$  و  $M_{ny}$  مقاومت خمشی اسمی عضو،  $\phi_b$  فاکتور کاهش مقاومت خمشی ( $\phi_b = 0.9$ ) و  $ne$  تعداد اعضاء است. نکته مهم دیگر در طراحی قاب‌های فولادی در نظر گرفتن قید مربوط به اتصال تیر به ستون جهت ملاحظات اجرایی می‌باشد که با توجه به شکل (۱) به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$g_m^B = \frac{b_{fb}}{b_{fc}} - 1 \leq 0, \quad m = 1, \dots, nj \quad (7)$$

در این رابطه  $nj$  معادل تعداد اتصالات می‌باشد در نهایت فرمول‌بندی مسئله مقید بالا با استفاده از روش تابع پنالیتی به یک مسئله نامقید تبدیل شده است.

کننده بوده است. در سال‌های اخیر با ارائه الگوریتم‌های فراکاوشی، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی اتفاق افتاده که عملکرد خوبی در توابع هدف پیچیده داشته‌اند این روش‌ها برگرفته از طبیعت بوده و شباهت‌هایی با سیستم‌های اجتماعی و طبیعی دارند. از جمله روش‌های فراکاوشی می‌توان به بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها، اجتماع ذرات، انتشار امواج دلفین، تصادم اجسام و گرگ خاکستری اشاره نمود.

در رابطه با تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی در قاب‌های فولادی می‌توان به تحقیق Jagadheeswari و همکاران (۲۰۱۶). تحت عنوان موقعیت بهینه مهار بازویی در یک سازه ۴۰ طبقه در معرض نیروهای باد و زلزله اشاره کرد که ضمن تأکید بر عملکرد مناسب مهار بازویی در کنترل تغییر مکان کل سازه و دریافت طبقات موقعیت بهینه در تراز طبقه آخر و وسط ارتفاع پیشنهاد شده است.

در مطالعه Shivacharan و همکاران (۲۰۱۵) موقعیت بهینه مهار تکی در ۲/۳ ارتفاع سازه و در صورت تثبیت مهار اول، مناسب‌ترین موقعیت برای مهار دوم وسط ارتفاع تعیین شده است. در تحقیق Nanduri و همکاران (۲۰۱۳) تحت عنوان موقعیت بهینه مهار بازویی، ضمن تأکید بر عدم کارایی مناسب مهار تکی در بالاترین نقطه سازه، تعبیه مهار دوم در وسط ارتفاع توصیه شده است.

در رابطه با بهینه‌سازی قاب‌های فولادی می‌توان به کار Hasancebi و همکاران (۲۰۱۰) تحت عنوان مقایسه تکنیک‌های مختلف جهت طراحی بهینه سازه‌های فولادی اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از هفت الگوریتم متفاوت نسبت به طرح بهینه ضمن لحاظ قیود هندسی اقدام شده و نتایج عملکرد الگوریتم و رتبه‌بندی آن‌ها مشخص شده است.

مطالعات انجام شده در زمینه تعیین موقعیت بهینه مهار بازویی تاکنون بدون استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی صورت گرفته و صرفاً با فرض استقرار مهار بازویی در طبقات از پیش تعیین شده اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر از الگوریتم‌های اجتماع ذرات، انتشار امواج دلفین بهبود یافته، تصادم اجسام و گرگ خاکستری جهت تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی سازه‌های فولادی بلند استفاده شده است.

## ۲- فرمول‌بندی طراحی بهینه قاب‌های فولادی

جهت طراحی قاب‌های فولادی پس از اعمال بارهای ثقلی و جانبی تحت ترکیب بارهای آیین‌نامه انتخابی، آنالیز خطی سازه انجام شده و با استفاده از نتایج تحلیل، قیدهای مربوط به روش طراحی و همچنین قیدهای اجرایی کنترل شده و تابع هدف

- (۲) ارزیابی تابع هدف  $f(x_k^i)$  با توجه به موقعیت‌های مشخص شده در فضای طراحی
- (۳) تعیین وضعیت هر پرنده از بابت بهترین موقعیت آن تا تکرار جاری  $P_k^i$  و به‌روزرسانی آن
- (۴) تعیین وضعیت بهترین موقعیت پرنده در کل جامعه تا تکرار جاری  $P_k^g$  و به‌روزرسانی آن
- (۵) بهنگام نمودن سرعت هر پرنده:

$$v_{k+1}^i = \omega v_k^i + c_1 r_1 \frac{(P_k^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(P_k^g - x_k^i)}{\Delta t}, \Delta t = \frac{1}{k_{max}} \quad (10)$$

- (۶) به‌روزرسانی موقعیت هر پرنده:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \cdot \Delta t \quad (11)$$

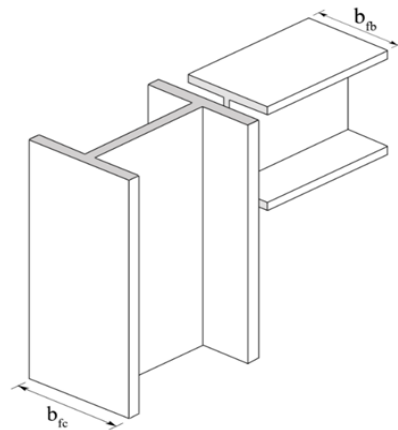
- (۷) تکرار مراحل (۲) تا (۶) تا برقراری معیار همگرایی یا تکمیل تعداد تکرارها در روابط فوق،  $x_{max}, x_{min}$  محدوده مجاز فضای طراحی را مشخص می‌نماید و  $k_{max}$  معادل با تعداد تکرار حداکثر می‌باشد  $c_1, c_2$  پارامترهای اعتماد بوده و در مراجع مختلف  $0 < c_1 + c_2 < 4$  توصیه شده است (Perez و همکاران، ۲۰۰۷).  $\omega$  پارامتر اینرسی است و در میزان بردار سرعت که در تکرارهای اولیه نیازمند گام‌های بزرگ‌تر و در تکرارهای نهایی گام‌های کوچک‌تری برای رسیدن به بهینه نیاز است تأثیرگذار خواهد بود و به جای یک مقدار ثابت، رابطه خطی کاهشی زیر توصیه شده است.

$$\omega_{k+1} = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{k_{max}} \cdot k \quad (12)$$

- مقادیر  $\omega_{max}, \omega_{min}$  به‌ترتیب برابر  $0.9$  و  $0.4$  توصیه شده و پارامترهای  $r_1, r_2, r$  اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  می‌باشند.

### ۳-۲- الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)

- گرگ‌های خاکستری در بالاترین ردیف چرخه شکار در طبیعت قرار می‌گیرند. این حیوانات اغلب به تعداد متوسط ۵ تا ۱۲، به‌صورت گروهی در طبیعت زیست می‌کنند (Mirjalili و همکاران، ۲۰۱۴). رهبران گروه شامل یک گرگ نر و یک گرگ ماده هستند که آلفا نامیده می‌شوند. به‌طور جالب‌توجه، گرگ آلفا بایستی دارای قدرت مدیریت بالا نسبت به سایر اعضای گروه باشد و ممکن است قوی‌ترین گرگ نباشد. دومین رتبه در سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری بتا می‌باشد. گرگ‌های بتا تحت امر آلفاها قرار داشته که آن‌ها را در اتخاذ تصمیمات و سایر فعالیت‌های گروه یاری می‌کنند. گرگ بتا بایستی تابع آلفا بوده اما به سایر اعضای گروه با رتبه پایین‌تر حکمرانی می‌کند. پایین‌ترین رتبه در گروه



شکل ۱- جزئیات ابعادی اتصال تیر به ستون

$$\varphi(x, r_p) = w(x) \{ 1 + r(\max\{0, g_\delta\})^2 + r \sum_{k=1}^{n_s} (\max\{0, g_k^d\})^2 + r \sum_{l=1}^{n_e} (\max\{0, g_l^e\})^2 + r \sum_{m=1}^{n_j} (\max\{0, g_m^B\})^2 \} \quad (8)$$

- $\varphi, r$  به‌ترتیب معادل با ضریب پنالتی و تابع شبه هدف می‌باشند.

### ۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

#### ۳-۱- الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

- این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط Kennedy و Eberhart معرفی شد که از نحوه زندگی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است. که به‌صورت گروهی زندگی کرده و بسیاری از احتیاجات خود، از جمله جستجوی غذا را به‌صورت دسته‌جمعی و با استفاده از خرد جمعی انجام می‌دهند و با به اشتراک گذاشتن اطلاعات خود موقعیت نزدیک‌ترین پرنده به غذا را می‌دانند و موقعیت خود در فضای جستجو را بر مبنای آن اصلاح می‌کنند (Kennedy و همکاران، ۱۹۹۵).

- در این الگوریتم هر جواب معادل یک پرنده در فضای جستجو است که ذره نام دارد و هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است بر این اساس هر پرنده‌ای که به منبع غذا نزدیک‌تر است شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر پرنده دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت و میزان سرعت را نشان می‌دهد و در فرآیند بهینه‌سازی هر پرنده جهت خود را براساس تجربه شخصی و تجربه جامعه اصلاح می‌کند.

- مدل ریاضی الگوریتم شامل این گام‌ها می‌باشد:

- (۱) تعیین سرعت و موقعیت اولیه پرندگان به صورت تصادفی با توجه به محدودیت‌های فضای طراحی:

$$x_0^i = x_{min} + r(x_{max} - x_{min}), \quad v_0^i = \frac{x_{min} + r(x_{max} - x_{min})}{\Delta t} \quad (9)$$

۳) شکار طعمه

گرگ‌های خاکستری در هنگام متوقف شدن طعمه، با حمله، شکار خود را به اتمام می‌رسانند. جهت مدل‌سازی ریاضی این عمل می‌توان مقدار  $a$  را کاهش داد. ملاحظه می‌گردد نوسان  $\vec{A}$  توسط  $a$  کاهش می‌یابد. به بیان دیگر  $\vec{A}$  یک مقدار تصادفی در بازه  $[-a, a]$  می‌باشد که  $a$  از مقدار ۲ تا ۰ در طی مراحل بهینه‌سازی کاهش می‌یابد. در واقع زمانی که مقدار  $\vec{A}$  در بازه  $[-1, 1]$  قرار دارد، موقعیت نقطه مرحله بعد می‌تواند هر نقطه مابین موقعیت فعلی و موقعیت طعمه باشد. با استفاده از روابط فوق، موقعیت مراحل بعدی را با توجه به موقعیت‌های آلفا، بتا و دلتا تولید و این روند تا آخرین مرحله تکرار یا همگرایی ادامه خواهد داشت.

۳-۳- الگوریتم برخورد اجسام پیشرفته (ECBO) ۲

مبنای اصلی این الگوریتم بر اساس قوانین حاکم بر برخورد اجسام شامل قانون مومنتم و انرژی بوده که بیانگر معادل بودن میزان اندازه حرکت قبل و بعد از برخورد می‌باشد (Kaveh و همکاران، ۲۰۱۴).

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (20)$$

و همچنین بقای انرژی جنبشی نیز با رابطه زیر قابل بیان است:

$$1/2 m_1 v_1^2 + 1/2 m_2 v_2^2 = 1/2 m_1 v_1'^2 + 1/2 m_2 v_2'^2 + Q \quad (21)$$

$v_1, v_2$  سرعت اجسام قبل از برخورد و  $v'_1, v'_2$  سرعت اجسام بعد از برخورد،  $m_1, m_2$  جرم اجسام و  $Q$  معادل اتلاف انرژی در اثر برخورد می‌باشد که در سیستم‌های غیرالاستیک ایجاد می‌شود.

مدل ریاضی الگوریتم شامل این گام‌ها می‌باشد:

۱) موقعیت‌های اولیه اجسام با توجه به محدودیت‌های فضای طراحی به صورت تصادفی ایجاد می‌شوند.

$$x_i^0 = x_{min} + rand(x_{max} - x_{min}), i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$x_i^0$  مقدار اولیه از جسم  $i$  ام بوده و  $x_{max}, x_{min}$  محدوده مجاز فضای طراحی و  $rand$  نیز عدد تصادفی در محدوده  $[0, 1]$  و  $n$  تعداد اجسام می‌باشد.

۲) مقدار جرم هر جسم با رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$m_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{fit(i)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$fit(i)$  مقدار تابع هدف به ازای عامل  $i$  ام بوده و طبق رابطه، اجسامی با ارزش بالا، جرم بزرگ‌تری خواهند داشت.

گرگ‌های خاکستری امگا می‌باشد. امگا نقش قربانی را در گروه دارد. اگر گرگی در هیچ‌یک از رتبه‌های فوق قرار نگیرد عضو وابسته و فرمان‌بردار گرگ‌های آلفا و بتا بوده (دلتا) ولی بر روی گرگ‌های امگا حکمرانی می‌کنند. دیدبانی، نگهداری و شکار جزء وظایف این رده از گرگ‌ها است. سلسله‌مراتب شکار گرگ‌های خاکستری شامل جستجو، احاطه و حمله می‌باشد.

۳-۲-۱- مدل ریاضی الگوریتم

۱) احاطه کردن شکار

گرگ‌های خاکستری در زمان شکار، طعمه خود را احاطه می‌کنند که این رفتار توسط معادله زیر مدل‌سازی می‌شود.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (13)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (14)$$

که در آن  $t$  نشان‌دهنده تکرار فعلی،  $A$  و  $C$  بردارهای ضرایب  $\vec{X}_p$  بردار مکان طعمه، و  $X$  بردار مکان گرگ خاکستری می‌باشد.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (15)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (16)$$

که در آن مؤلفه  $\vec{a}$  به صورت خطی از ۲ تا ۰ با افزایش تکرارهای الگوریتم، کاهش می‌یابد. همچنین ضرایب  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  به صورت تصادفی در بازه  $[0, 1]$  انتخاب می‌شوند.

۲) شکار

گرگ‌های خاکستری قادر به شناخت محل طعمه و احاطه نمودن آن هستند. عملیات شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود در یک فضای جستجو هیچ تصویری از محل نقطه بهینه (شکار) وجود ندارد. در شبیه‌سازی ریاضی فرض می‌شود موقعیت‌های آلفا، بتا و دلتا دارای بهترین پتانسیل برای نقطه بهینه هستند. بنابراین در عملیات بهینه‌سازی موقعیت سه جواب بهینه، به عنوان بهترین راه حل ذخیره شده و موقعیت سایر نقاط با توجه به این سه جواب از طریق فرمول‌های ریاضی زیر ارتقاء می‌یابد.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (17)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (18)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (19)$$

(۶) به‌روزرسانی اجسام: موقعیت جدید اجسام بر اساس سرعت-های پس از برخورد برای اجسام گروه ثابت از این رابطه به‌دست می‌آید.

$$x_i^{new} = x_i + rand.v'_i \quad i = 1, \dots, n/2 \quad (29)$$

$v'_i, x_i, x_i^{new}$  به‌ترتیب برابر با موقعیت جدید، موقعیت قدیم و سرعت بعد از برخورد  $i$  امین جسم گروه ثابت می‌باشد برای هر جسم گروه متحرک نیز خواهیم داشت:

$$x_i^{new} = x_{i-n/2} + rand.v'_i \quad i = n/2 + 1, \dots, n \quad (30)$$

$v'_i, x_i^{new}$  به‌ترتیب برابر با موقعیت جدید و سرعت بعد از برخورد  $i$  امین جسم گروه متحرک بوده و  $x_{i-n/2}$  موقعیت قدیم جسم  $i$  ام جفت در گروه ثابت است  $rand$  نیز یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[-1, 1]$  می‌باشد.

(۷) گذر از بهینه محلی: الگوریتم‌های فراکاوشی بایستی قابلیت خروج از دام‌هایی از جمله قرار گرفتن در بهینه‌های محلی را داشته باشند در الگوریتم ECBO پارامتری به نام  $pro$  در بازه  $[0, 1]$  تعریف شده که تعیین‌کننده تغییر و یا عدم‌تغییر یک جزء از هر جسم دلخواه است بدین منظور مقدار  $pro$  با  $rn_i (i = 1, 2, \dots, n)$  که به صورت یکنواخت و به صورت تصادفی در بازه  $[0, 1]$  توزیع شده قیاس خواهد شد در صورتی که  $rn_i < pro$  باشد یک جزء از جسم  $i$  ام به صورت تصادفی انتخاب و مقدار آن طبق رابطه زیر احیاء خواهد شد.

$$x_{ij} = x_{j,min} + rand.(x_{j,max} - x_{j,min}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

$x_{ij}$  برابر متغیر  $j$  ام از جسم  $i$  ام و  $x_{j,min}, x_{j,max}$  نیز به‌ترتیب حد بالا و پایین متغیر  $j$  ام می‌باشند این مکانیسم باعث حرکت حداکثری در تمامی فضای جستجو و ایجاد تنوع بیشتری خواهد شد.

(۸) پروسه بهینه‌سازی: بعد از تعداد تکرار مشخص خاتمه یافته و تا زمان رسیدن به تکرار آخر مراحل ۲ تا ۷ تکرار خواهند شد.

### ۳-۴- الگوریتم انتشار امواج دلفین بهبودیافته (MDE)

یک دلفین قادر به تولید صداهایی به فرم کلیک می‌باشد که فرکانس این صدا بلندتر از صداهای استفاده شده برای ارتباط می‌باشد در صورت برخورد این اصوات با اجسام مقداری از انرژی صوتی به دلفین بازگشته و به محض دریافت، دلفین کلیک دیگری تولید می‌کند زمان مابین ارسال و دریافت دلفین را قادر به ارزیابی فاصله از جسم می‌کند و اختلاف شدت در سیگنال‌های در دو سمت سر دلفین آن را قادر به سنجش جهت هدف می‌نماید

(۳) با ذخیره تاریخچه‌ای از بهترین اجسام و مقادیر توابع هدف و اجرام مربوطه می‌توان عملکرد الگوریتم را بدون افزایش هزینه محاسباتی بهبود بخشید. بدین منظور حافظه برخورد (CM) جهت ذخیره‌سازی تعدادی از بهترین حل‌ها تا این مرحله به کار برده می‌شود بنابراین در این مرحله بردارهای حل ذخیره شده در CM به جمعیت موجود اضافه شده و به همان تعداد از حل‌های نامتعارف حذف و در نهایت اجسام بر اساس جرم آن‌ها به صورت نزولی مرتب می‌شوند.

(۴) ایجاد گروه‌ها و معیارهای قبل از برخورد با آرایش اجسام با توجه به مقدار تابع هدف به صورت صعودی صورت گرفته و نیمه اول از اجسام تنظیم‌شده به عنوان گروه اجسام ثابت با سرعت صفر طبقه‌بندی می‌شوند.

$$v_i = 0, i = 1, 2, \dots, n/2 \quad (24)$$

و نیمه دوم به عنوان گروه اجسام متحرک فرض شده که این اجسام به سمت نیمه اول حرکت کرده و اجسامی با تابع هدف بالا از هر گروه با هم برخورد می‌کنند تغییر موقعیت جسم بیانگر سرعت این اجسام قبل از برخورد است.

$$v_i = x_i - x_{i-n/2} \quad i = n/2 + 1, \dots, n \quad (25)$$

$x_i, v_i$  سرعت و موقعیت جسم  $i$  ام در نیمه دوم و  $x_{i-n/2}$  موقعیت جفت جسم در نیمه اول است.

(۵) معیارهای بعد از برخورد: بعد از برخورد، سرعت اجسام در هر گروه ارزیابی می‌گردد. سرعت هر جسم در گروه ثابت پس از برخورد برابر خواهد بود با:

$$v'_i = \frac{(m_i + n/2 + \epsilon m_i + n/2)v_{i+n/2}}{m_i + m_{i+n/2}}, i = 1, 2, \dots, n/2 \quad (26)$$

که  $v'_i, v_{i+n/2}$  به‌ترتیب معادل با سرعت قبل از برخورد جفت جسم  $i$  ام در گروه متحرک و سرعت بعد از برخورد جسم  $i$  ام در گروه ثابت هستند. همچنین سرعت هر جسم در گروه متحرک بعد از برخورد برابر خواهد بود با:

$$v'_i = \frac{(m_i - \epsilon m_i - n/2)v_i}{m_i + m_{i-n/2}} \quad i = n/2 + 1, \dots, n \quad (27)$$

که  $v'_i, v_i$  به‌ترتیب برابر با سرعت جسم  $i$  ام در گروه متحرک قبل و بعد از برخورد می‌باشند  $\epsilon$  ضریب بازگشت بوده و مقدار آن به صورت خطی از یک تا صفر تغییر می‌کند.

$$\epsilon = 1 - \frac{iter}{iter_{max}} \quad (28)$$

$iter$  شماره تکرار جاری و  $iter_{max}$  تعداد کل تکرارها در پروسه بهینه‌سازی است.

(۷) اختصاص مقدار احتمال برابر PP به تمامی گزینه‌های مربوط به متغیرهای The best location و اختصاص مقدار باقی-مانده احتمال به سایر گزینه‌های فضای طراحی:

$$P_{ij} = (1 - PP) * P_{ij} \quad (35)$$

(۸) محاسبه موقعیت گام بعدی با توجه به احتمالات محاسبه-شده

(۹) تکرار مراحل ۲ تا ۸ به تعداد حلقه انتخاب‌شده برای مسئله موردنظر در جهت بهبود الگوریتم دلفین برای محاسبه شایستگی تجمعی به جای تابع خطی استفاده‌شده در الگوریتم استاندارد (مرحله ۴) از رابطه درجه دو (ربع دایره) استفاده می‌شود که یک توزیع هموارتر و منطقی احتمال را در بر دارد و به‌وسیله آن می‌توان با انتخاب  $R_e$  بزرگ‌تر فضای بیشتری از فضای طراحی را تحت پوشش قرار داد (Gholizadeh و همکاران، ۲۰۱۵).

$$AF_{(A+K)j} = (R_e - \sqrt{R_e^2 - (|k| - R_e)^2}) * Fitness(i) + AF_{(A+K)j} \quad (36)$$

از طرفی انتخاب مقدار  $\varepsilon$  نحوه جستجو در فضای طراحی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و در رابطه ارائه‌شده برای AF حداکثر مقدار آن  $fitness * R_e$  در موقعیت مربوطه می‌باشد.

#### ۴- سازه‌های مورد بررسی و مدل‌سازی

سازه‌های مورد بررسی در این مطالعه قاب‌های ۵ دهانه ۲۴ طبقه (۳۲۸ عضو) و ۳۶ طبقه (۴۹۲ عضو) می‌باشند که در آن‌ها طول دهانه‌ها به‌صورت مساوی برابر ۱۵ft، ارتفاع طبقه همکف برابر ۱۵ft و باقی طبقات ۱۲ft می‌باشد. گروه‌بندی اعضای این سازه‌ها به این صورت انجام می‌شود که ستون‌های کناری و داخلی در دو گروه مختلف در سه طبقه متوالی قرار می‌گیرند. گروه‌بندی تیرها و بادبندها در دهانه‌های مختلف مانند ستون‌ها در سه طبقه متوالی انجام می‌گیرد. مقطع اعضا از لیست مقاطع استاندارد W section انتخاب می‌شوند (شکل (۲)). تنش تسلیم المان‌های سازه برابر  $F_y = 36 \text{ Ksi}$  و مدول الاستیسیته برای اعضا فولادی برابر  $E = 29000 \text{ Ksi}$  در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر بار مرده و زنده در طبقات به ترتیب  $100 \text{ lb/ft}^2$  و  $50 \text{ lb/ft}^2$  لحاظ شده و در پشت‌بام بار زنده  $25 \text{ lb/ft}^2$  فرض شده و فاصله قاب‌ها در جهت عرضی  $15 \text{ ft}$  در نظر گرفته شده است. بنابراین بار مرده وارد بر تیرهای طبقات  $1500 \text{ lb/ft}$  و بار زنده وارد بر تیرهای طبقات  $750 \text{ lb/ft}$  و در پشت‌بام  $375 \text{ lb/ft}$  خواهد بود. نیروی زلزله وارد بر قاب‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه ASCE/SEI-7 (۲۰۱۶) مطابق جدول (۱) محاسبه و اعمال شده‌اند.

بنابراین دلفین ابتدا تمام فضای اطراف خود را برای یافتن شکار جستجو می‌کند و به محض یافتن آن، دامنه جستجو را به طرف هدف محدود می‌کند که این دو مرحله مشخصه ذاتی هر الگوریتم فراکاوشی است (Kaveh و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل ریاضی الگوریتم شامل این گام‌ها می‌باشد:

(۱) ایجاد تعداد دلخواه موقعیت برای دلفین ( $NL$ ) که نهایتاً منجر به تشکیل ماتریس  $L_{NL+NV}$  خواهد شد که  $NV$  معادل تعداد متغیرها است.

(۲) محاسبه PP با توجه به حلقه موردنظر از رابطه:

$$PP(Loop_i) = PP_1 + (1 - PP_1) \frac{Loop_i^{power-1}}{(LoopsNumber)^{power}} \quad (37)$$

$PP(Loop_i)$  احتمال هر حلقه در نتیجه نهایی  $PP_1$ : عامل همگرایی حلقه اول در حالی که پاسخ‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند.

$Loop_i$ : شماره حلقه جاری  $power$ : درجه منحنی  $LoopsNumber$ : تعداد حلقه‌هایی که الگوریتم بایستی به همگرایی برسد.

(۳) محاسبه میزان شایستگی هر موقعیت تولیدشده در گام اول به صورتی که بهترین جواب دارای بیشترین مقدار باشد.

(۴) محاسبه شایستگی تجمعی با توجه به قانون دلفین برای موقعیت  $i$  ام، متغیر طراحی  $z$  ام و  $R_e$  تا  $k = -R_e$

$$AF_{(A+K)j} = \frac{1}{R_e} * (R_e - |k|) * Fitness(i) + AF_{(A+K)j} \quad (38)$$

که در آن  $AF_{(A+K)j}$  شایستگی تجمعی  $(A+K)$  امین عضو ماتریس فضای طراحی است که برای متغیر  $z$  ام انتخاب شده است،  $R_e$  مقدار شعاع تأثیری است که شایستگی تجمعی مربوط به یک موقعیت، فضای اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد پیشنهاد شده که مقدار این شعاع بیش از  $1/4$  اندازه فضای طراحی انتخاب نگردد.  $Fitness(i)$  نیز برابر مقدار شایستگی مربوط به موقعیت  $i$  می‌باشد. برای توزیع هموارتر احتمالات در فضای طراحی یک مقدار کوچک  $\varepsilon$  به تمامی احتمالات محاسبه‌شده در گام قبلی به فضای طراحی افزوده می‌شود ( $AF = AF + \varepsilon$ ) این مقدار کم‌تر از حداقل مقدار شایستگی محاسبه‌شده در اجتماع، انتخاب می‌شود.

(۵) یافتن بهترین جواب به‌دست آمده از بین تمام موقعیت‌ها و نام‌گذاری آن به عنوان The best location و یافتن موقعیت متغیرهای The best location در فضای طراحی و برابر صفر قرار دادن AF مربوط به آن‌ها.

(۶) محاسبه احتمال انتخاب گزینه  $i$  برای متغیر  $z$  طبق رابطه:

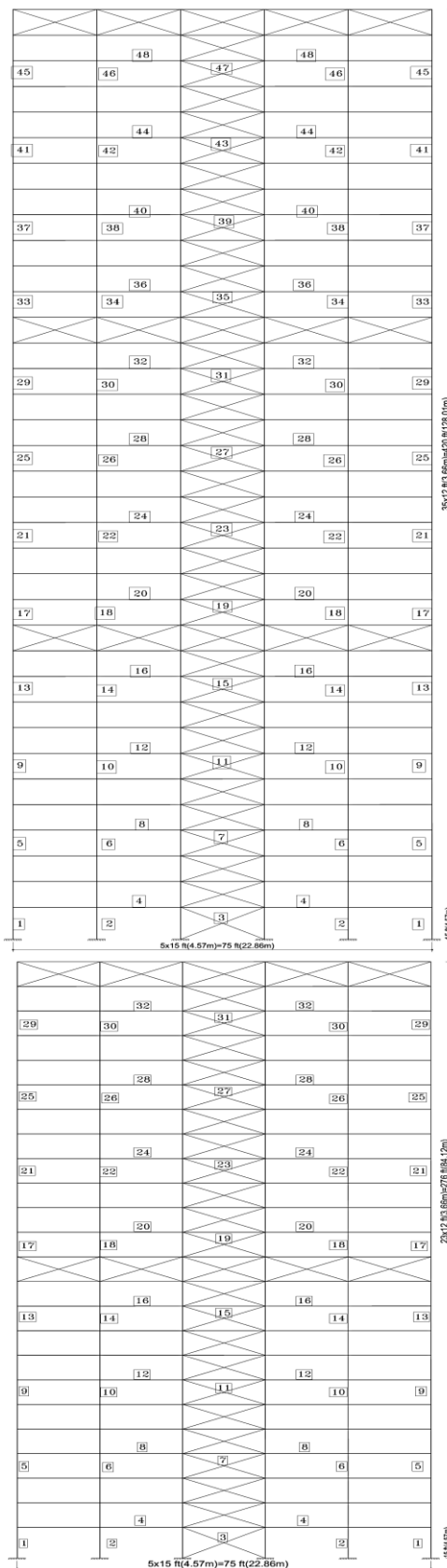
$$P_{ij} = \frac{AF_{ij}}{\sum_{i=1}^{LAJ} AF_{ij}} \quad (39)$$

در این مطالعه برای مدل‌سازی اجزای محدود سازه‌ها از نرم-افزار کدباز Open Sees (۲۰۱۶) و برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین سایر محاسبات لازمه از نرم‌افزار Matlab (۲۰۱۵) استفاده می‌شود. در مدل‌سازی خطی المان‌های تیر و ستون از المان الاستیک Column Beam Elastic استفاده شده است.

جدول ۱- نیروهای زلزله در تراز طبقات

نیروی زلزله		
طبقه	قاب ۲۴ طبقه (کیلوپوند)	قاب ۳۶ طبقه (کیلوپوند)
۱	۰/۰۸۴۱	۰/۰۳۳۶
۲	۰/۲۷۲۷	۰/۱۰۹۱
۳	۰/۵۶۹۰	۰/۲۲۷۸
۴	۰/۹۷۳۱	۰/۳۸۹۵
۵	۱/۴۸۵۰	۰/۵۹۴۴
۶	۲/۱۰۴۶	۰/۸۴۲۴
۷	۲/۸۳۲۰	۱/۱۳۳۶
۸	۳/۶۶۷۱	۱/۴۶۷۹
۹	۴/۶۱۰	۱/۸۴۵۳
۱۰	۵/۶۶۰۶	۲/۲۶۵۹
۱۱	۶/۸۱۹۰	۲/۷۲۹۷
۱۲	۸/۰۸۵۲	۳/۲۳۶۵
۱۳	۹/۴۵۹۱	۳/۷۸۶۴
۱۴	۱۰/۹۴۰	۴/۳۷۹۶
۱۵	۱۲/۵۳۰	۵/۰۱۵۸
۱۶	۱۴/۲۲۷	۵/۵۹۵۲
۱۷	۱۶/۰۳۲	۶/۴۱۷۸
۱۸	۱۷/۹۴۵	۷/۱۸۳۲
۱۹	۱۹/۹۶۵	۷/۹۹۲
۲۰	۲۲/۰۹۳۸	۸/۸۴۴۲
۲۱	۲۴/۳۲۹۷	۹/۷۳۹۲
۲۲	۲۶/۶۷۳۵	۱۰/۶۷۷
۲۳	۲۹/۱۲۵۰	۱۱/۶۵۸۶
۲۴	۲۹/۹۲۴۰	۱۲/۶۸۳۳
۲۵	-	۱۳/۷۵۰۸
۲۶	-	۱۴/۸۶۱۴
۲۷	-	۱۶/۰۱۵۲
۲۸	-	۱۷/۲۱۲۲
۲۹	-	۱۸/۴۵۲۴
۳۰	-	۱۹/۷۳۵۸
۳۱	-	۲۱/۰۶۲۴
۳۲	-	۲۲/۴۳۱۶
۳۳	-	۲۳/۸۴۴۶
۳۴	-	۲۵/۳۰۰۲
۳۵	-	۲۶/۷۹۹۶
۳۶	-	۲۶/۷۶۷۲

طبقه‌بندی زمین منطقه: (D)  
 سطح خطر: ۱۰٪ در ۵۰ سال  
 ضریب رفتار: R=7  
 ضریب بزرگنمایی تغییر شکل: Cd=5.5

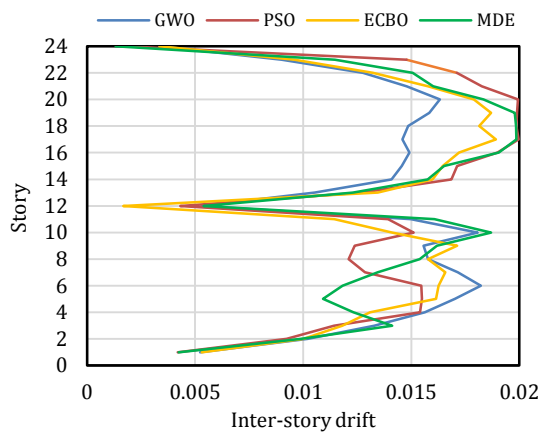


شکل ۲- مشخصات و گروه‌بندی اعضای سازه‌های مورد بررسی

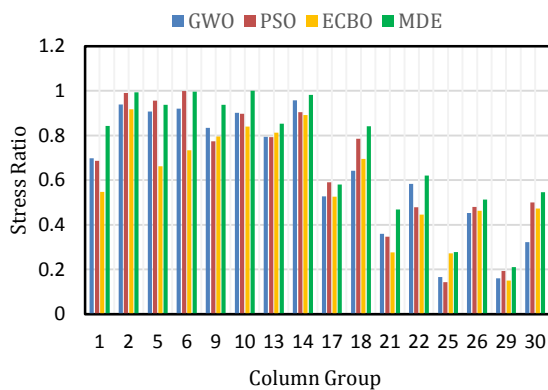
۵- بررسی سازه‌ها

۵-۱- متغیرهای طراحی

علاوه بر متغیر بودن مقاطع مورد استفاده در جهت دستیابی به سازه بهینه، موقعیت استقرار مهار بازویی نیز قابل تغییر می‌باشد. در هر دو سازه یکی از مهارهای بازویی در طبقه آخر ثابت بوده و در سازه ۲۴ طبقه، مهار دوم مابین طبقات بالا و پایین طبقه دوازدهم قابلیت جابه‌جایی دارد در سازه ۳۶ طبقه نیز مهارهای دوم و سوم به ترتیب در بالا و پایین طبقه دوازدهم و بیست و چهارم امکان جابه‌جایی جهت دستیابی به جواب بهینه را دارند.



شکل ۴- تغییرات دررفت در سازه ۲۴ طبقه



شکل ۵- نسبت تنش ماکزیمم در هر گروه از ستون‌ها در سازه ۲۴ طبقه

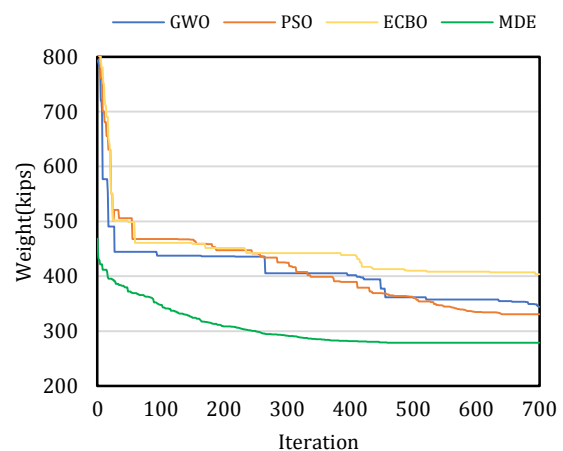
جدول ۲- وزن سازه و موقعیت بهینه مهار بازویی تحت

تکرارهای متفاوت با الگوریتم‌های چهارگانه در سازه ۲۴ طبقه

موقعیت مهار بازویی	طبقه دهم	طبقه یازدهم	طبقه دوازدهم	طبقه سیزدهم	طبقه چهاردهم
وزن سازه (کیلوپوند)					
PSO	۳۳۹/۲۸	۳۵۳/۳۱	۳۲۸/۳۴	۳۳۷/۴۷	۳۳۹/۲۸
	۳۸۸/۸۵	۳۶۸/۰۱	۳۷۱/۷۲	---	۴۴۲/۹۶
	۳۳۹/۲۸	۴۱۲/۲	۳۴۶/۱۶	---	۳۳۷/۴۷
GWO	۳۳۸/۷۸	۳۸۴/۶۲	۳۴۲/۳۶	۳۴۵/۱۵	۳۳۸/۹۱
	---	---	۳۴۰/۶۱	۳۴۵/۳۱	۳۶۷/۳۷
	---	---	۳۳۷/۶۹	۳۳۱/۹۶	---
	---	---	۲۷۸/۳۶	۲۹۳/۰۴	---
MDE	۲۹۱/۴۲	۲۸۹/۴۵	۲۸۵/۳۶	۲۹۸/۱۶	۲۹۸/۱۶
	۲۹۳/۱۴	۳۱۰/۲۵	۲۸۰/۷۸	۳۰۶/۶۷	۳۱۰/۹۵
	---	---	۲۹۲/۸۷	---	---
ECBO	---	۴۰۵/۶۳	---	---	---

۵-۲- قاب ۲۴ طبقه

نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های چهارگانه در جدول (۲) درج شده است که پس از انجام تکرارهای کافی بر اساس شرایط و قیود تعریف شده، موقعیت بهینه مهار بازویی طبقه دوازدهم تعیین و الگوریتم MDE کم‌ترین وزن سازه را به دست می‌دهد در شکل (۳) نحوه همگرایی الگوریتم‌ها و در شکل (۴) میزان دررفت طبقات ارائه شده است سرعت همگرایی الگوریتم MDE بیشتر از بقیه الگوریتم‌ها بوده و قید دررفت از جمله قیدهای فعال علی‌الخصوص در طبقات فوقانی در روند بهینه‌سازی است و تعبیه مهار بازویی در میانه سازه موجب کاهش سریع دررفت و ایجاد بازه کافی جهت توسعه مجدد آن شده است. بررسی نسبت تنش‌های المان‌های سازه‌ای حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم MDE در روند بهینه‌سازی با توجه به نزدیک بودن مقادیر این نسبت‌ها به نسبت‌های مرزی و ماکزیمم علی‌الخصوص در ستون‌های طبقات پایین‌تر می‌باشد (شکل (۵)). در جدول (۳) مقاطع مربوط به سازه بهینه حاصل از الگوریتم‌های چهارگانه درج شده است.



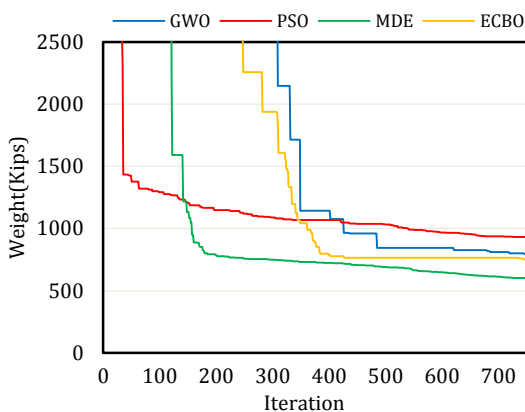
شکل ۳- روند همگرایی الگوریتم‌ها در سازه ۲۴ طبقه



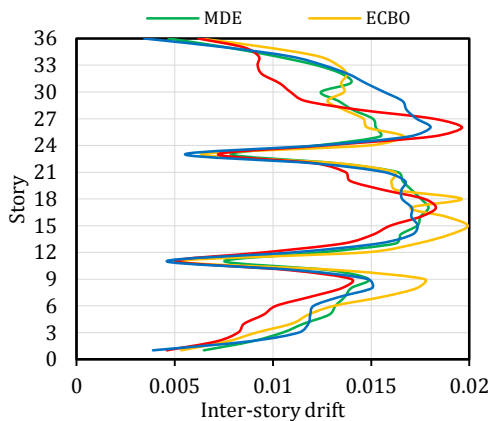
مقادیر این نسبت به نسبت‌های مرزی در اکثر گروه‌ها می‌باشد. در جدول (۵) مقاطع مربوط به سازه بهینه حاصل از الگوریتم‌های چهارگانه درج شده است.

جدول ۴- وزن سازه و موقعیت بهینه مهار بازویی تحت تکرارهای متفاوت با الگوریتم‌های چهارگانه در سازه ۳۶ طبقه

موقعیت مهارهای بازویی	طبقه ۲۲ و ۱۰	طبقه ۲۲ و ۱۱	طبقه ۲۳ و ۱۱	طبقه ۲۴ و ۱۲	طبقه ۲۲ و ۱۲	طبقه ۲۴ و ۱۴
وزن سازه (کیلوپوند)						
PSO	۱۱۷۱/۱	----	۹۰۰/۰۶	۹۶۰/۲۶	۹۱۴/۹۴	۹۸۰/۷۸
GWO	----	۸۲۷/۵۳	۸۲۰/۴۱	۸۰۴/۴۷	۸۰۰/۴۷	۸۰۴/۴۷
	----	۸۳۳/۳	۸۱۷/۶۴	۸۹۷/۴۵	۸۱۷/۶۴	۸۱۷/۶۴
	----	۸۰۷/۳۲	۸۸۱/۲۶	۸۰۲/۸۶	۸۰۲/۸۶	۸۰۲/۸۶
MDE	۶۰۴/۱۱	۵۹۴/۳۴	۵۸۷/۲۷	۶۱۰/۰۶	۶۰۳/۷۸	۶۳۱/۱
ECBO	----	----	۷۷۲/۶۲	۷۸۰/۰۲	----	----



شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم‌ها در سازه ۳۶ طبقه



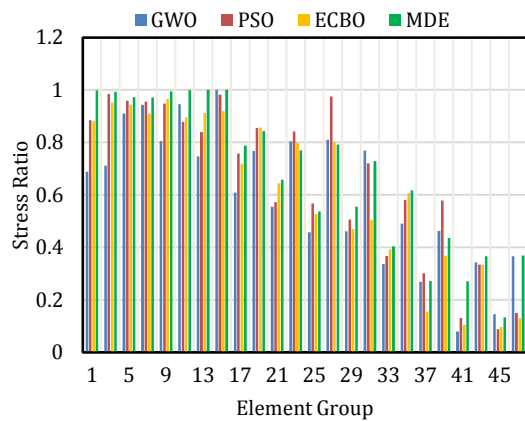
شکل ۷- تغییرات دررفت در سازه ۳۶ طبقه

جدول ۳- طراحی بهینه سازه ۲۴ طبقه به‌دست آمده با الگوریتم‌های چهارگانه

الگوریتم	PSO	GWO	ECBO	MDE
موقعیت مهار بازویی	طبقه دوازدهم	طبقه دوازدهم	طبقه دوازدهم	طبقه دوازدهم
مقاطع W				
۱	W1۲X۶۵	W1۰X۱۱۲	W1۲X۱۲۰	W1۲X۶۵
۲	W۲۷X۸۴	W۲۷X۹۴	W1۴X۱۰۹	W۲۴X۷۶
۳	W1۲X۱۰۶	W1۴X۷۴	W۸X۶۷	W1۰X۴۵
۴	W1۴X۲۶	W1۰X۴۵	W1۴X۳۸	W1۶X۲۶
۵	W۳۶X۲۸۲	W۲۴X۳۰۶	W۲۴X۳۰۶	W۴۴X۲۶۲
۶	W۲۷X۱۴۶	W۴۰X۱۶۷	W1۲X۱۹۰	W۳۶X۱۵۰
۷	W1۲X۳۵۰	W1۲X۵۳	W۲۷X۸۴	W1۰X۳۹
۸	W1۸X۳۵	W1۶X۴۰	W1۴X۴۸	W۲۴X۷۶
۹	W۳۰X۹۰	W1۶X۱۰۰	W۲۴X۹۴	W1۲X۵۸
۱۰	W۲۷X۸۴	W1۴X۷۴	W1۴X۱۳۲	W1۴X۷۴
۱۱	W1۲X۱۰۶	W1۰X۶۰	W۲۷X۶۲	W1۰X۵۴
۱۲	W۲۴X۸۴	W۲۴X۵۵	W1۸X۵۵	W۲۱X۴۸
۱۳	W۴۰X۱۹۹	W۴۴X۲۳۰	W۴۴X۲۹۰	W۳۰X۱۹۱
۱۴	W۳۶X۱۳۵	W۳۳X۱۴۱	W۲۷X۲۱۷	W۳۰X۱۴۹
۱۵	W۸X۳۱	W۸X۲۸	W1۸X۶۰	W۸X۲۴
۱۶	W1۶X۳۱	W1۶X۳۱	W1۴X۶۸	W1۴X۲۶
۱۷	W۲۴X۶۸	W1۰X۷۷	W1۴X۲۸۳	W1۲X۵۸
۱۸	W۲۷X۸۴	W1۸X۸۶	W1۸X۱۱۹	W۲۷X۸۴
۱۹	W1۲X۱۰۶	W1۲X۱۰۶	W1۰X۱۰۰	W۸X۴۰
۲۰	W1۶X۵۰	W1۲X۴۸	W1۶X۴۵	W1۲X۴۸
۲۱	W۴۰X۱۹۹	W۳۰X۱۹۱	W۳۶X۲۴۷	W1۴X۱۵۹
۲۲	W۴۰X۱۸۳	W۳۳X۱۵۲	W۳۳X۱۵۲	W۳۶X۱۳۵
۲۳	W1۴X۴۳	W1۰X۳۳	W۲۷X۹۴	W۵X۱۹
۲۴	W1۶X۳۶	W1۲X۴۸	W1۰X۵۴	W1۶X۳۱
۲۵	W۲۴X۶۸	W۲۴X۱۰۳	W1۴X۱۵۹	W1۲X۶۵
۲۶	W۳۰X۱۳۲	W1۲X۷۲	W1۰X۱۰۰	W۳۰X۹۰
۲۷	W1۰X۲۲	W۴X۱۳	W1۲X۲۲	W۶X۸۵
۲۸	W1۶X۲۶	W1۴X۳۸	W1۶X۳۱	W1۸X۳۵
۲۹	W1۲X۱۵۲	W۴۰X۲۱۱	W۳۰X۲۶۱	W۲۴X۱۴۶
۳۱	W۲۷X۱۴۶	W۳۳X۱۵۲	W۳۰X۱۷۳	W۳۰X۱۲۴
۳۱	W۶X۸۵	W۶X۸۵	W1۰X۱۲	W۶X۸۵
۳۲	W1۴X۲۶	W1۴X۴۳	W1۶X۳۶	W1۸X۳۵
وزن سازه (کیلوپوند)	۳۲۸/۳۴	۳۲۹/۴۶	۴۰۰/۵۶	۲۷۸/۳۶

۳-۵- قاب ۳۶ طبقه

نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های چهارگانه در جدول (۴) درج شده است که پس از انجام تکرارهای کافی بر اساس شرایط و قیود تعریف شده، موقعیت بهینه مهار بازویی در طبقات یازدهم و بیست و سوم تعیین و الگوریتم MDE کم‌ترین وزن سازه را به‌دست می‌دهد در شکل (۶) نحوه همگرایی الگوریتم‌ها و در شکل (۷) میزان دررفت طبقات ارائه شده است سرعت همگرایی الگوریتم MDE بیشتر از بقیه الگوریتم‌ها بوده و با مقایسه توزیع دررفت و نسبت تنش در ستون‌ها (شکل (۸))، ملاحظه می‌گردد که در طبقات پایین دررفت با مقادیر مجاز فاصله داشته و قید نسبت تنش در المان‌ها علی‌الخصوص ستون‌ها حاکم بوده و مهاربند بازویی اول به پایین‌تر از طبقه دوازدهم سوق یافته است. بررسی نسبت تنش‌های المان‌های سازه‌ای حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم MDE در روند بهینه‌سازی با توجه به نزدیک بودن



شکل ۸- نسبت تنش ماکزیمم در هر گروه از ستون‌ها در سازه ۳۶ طبقه

۶- نتایج

در این مطالعه از الگوریتم‌های اجتماع ذرات، انتشار امواج دلفین بهبودیافته، تصادم اجسام و گرگ خاکستری جهت تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی سازه‌های فولادی بلند استفاده گردید که نتایج حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم امواج دلفین در مقایسه با سه الگوریتم دیگر بوده و همچنین اهمیت محل استقرار مهار بازویی بر روند دستیابی به سازه بهینه روشن گردید. به نحوی- که در صورت تثبیت یک مهار در طبقه آخر در سازه ۲۴ طبقه، موقعیت بهینه در میانه سازه و در سازه ۳۶ طبقه مهارهای بازویی در طبقات پایین‌تر از ثلث سازه قرار می‌گیرند که می‌تواند ناشی از تعدد مهارها و افزایش نسبت تنش در المان‌های طبقات پایین‌تر سازه ۳۶ طبقه باشد. می‌توان اظهار داشت در طبقات پایین، تنش المان‌ها و در طبقات فوقانی دریافت طبقات عوامل کنترل‌کننده طرح می‌باشند. در جهت تکمیل مطالعات، بهینه‌سازی بر اساس عملکرد و لحاظ رفتار غیرخطی سازه در جهت بهبود رفتار لرزه‌ای، استفاده از مقاطع فشرده لرزه‌ای و تکمیل قیود اجرایی ضروری به نظر می‌رسند.

۷- مراجع

ANSI/AISC 360-10, "Specification for structural steel buildings", Chicago, Illinois 60601-1802: American Institute of Steel Construction, June 22, 2010.  
 ASCE/SEI 7-16, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, 2016.  
 Gholizadeh S, Poorhoseini H, "Optimum design of frame structures by a modified dolphin echolocation algorithm", Structural Engineering and Mechanics, 2015, 55, 535-554.  
 Hasancebi O, Carbas S, Dogan E, Erdal F, Saka MP, "Copparsion of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel

جدول ۵- طراحی بهینه سازه ۳۶ طبقه به دست آمده با الگوریتم‌های چهارگانه

الگوریتم	PSO	GWO	ECBO	MDE
موقعیت مهارهای بازویی	طبقه ۲۳ و ۱۱	طبقه ۲۳ و ۱۱	طبقه ۲۳ و ۱۱	طبقه ۲۳ و ۱۱
گروه‌بندی اعضا	مقاطع W			
۱	W14X25.7	W3-X17.3	W21X14.7	W16X7.7
۲	W27X84	W18X10.6	W10-X7.7	W18X7.6
۳	W14X74	W12X7.2	W14X9.9	W12X7.2
۴	W14X21.1	W14X5.3	W21X9.3	W14X6.8
۵	W27X33.6	W36X52.9	W14X31.1	W14X31.1
۶	W44X230	W33X32.4	W3-X29.2	W4-X23.5
۷	W14X74	W12X7.2	W3-X9	W21X6.2
۸	W24X84	W24X44	W21X10.1	W24X7.6
۹	W18X10.6	W27X28.1	W21X16.6	W14X6.8
۱۰	W24X31	W21X9.3	W24X10.3	W3-X9
۱۱	W14X74	W10-X6.8	W21X8.3	W24X6.8
۱۲	W21X48	W18X50	W14X5.3	W24X6.8
۱۳	W36X44.1	W4-X37.2	W36X30.2	W44X26.2
۱۴	W4-X27.8	W27X25.8	W4-X29.4	W4-X21.5
۱۵	W14X74	W14X7.4	W10-X6.8	W12X5.3
۱۶	W24X84	W18X7.1	W24X8.4	W16X2.6
۱۷	W14X61	W21X11.1	W16X7.7	W24X7.6
۱۸	W24X10.4	W3-X11.6	W14X12	W12X7.9
۱۹	W14X74	W24X6.2	W12X7.2	W8X40
۲۰	W24X6.8	W18X6.5	W14X7.4	W24X7.6
۲۱	W14X66.5	W3-X39.1	W33X29.1	W36X27.7
۲۲	W4-X21.5	W33X24.1	W3-X21.1	W3-X21.1
۲۳	W14X74	W8X48	W12X50	W12X2.6
۲۴	W18X55	W24X6.8	W24X8.4	W24X6.8
۲۵	W4-X39.7	W14X13.2	W33X14.1	W24X7.6
۲۶	W4-X23.5	W24X16.2	W24X14.6	W27X8.4
۲۷	W14X74	W10-X6.8	W14X8.2	W16X6.7
۲۸	W14X21.1	W16X6.7	W24X6.8	W21X6.8
۲۹	W36X28.2	W27X52.9	W27X25.8	W44X26.2
۳۰	W27X33.6	W33X31.8	W27X30.7	W4-X23.5
۳۱	W14X74	W12X7.2	W12X8.7	W8X6.7
۳۲	W16X3.6	W14X6.8	W12X5.3	W14X2.2
۳۳	W24X6.8	W14X7.4	W33X14.1	W27X8.4
۳۴	W21X8.2	W24X14.6	W12X15.2	W27X9.4
۳۵	W12X14	W14X16	W8X28	W12X19
۳۶	W16X3.6	W14X8.2	W24X7.6	W24X6.8
۳۷	W14X66.5	W4-X29.4	W4-X29.4	W33X24.1
۳۸	W44X26.2	W27X30.7	W36X28.2	W4-X21.5
۳۹	W14X74	W1-X30	W27X8.4	W8X10
۴۰	W14X21.1	W14X6.8	W21X9.3	W24X7.6
۴۱	W4-X33.2	W14X10.9	W21X20.1	W14X6.8
۴۲	W24X8.4	W16X7.7	W24X10.3	W27X8.4
۴۳	W14X74	W12X16	W10-X6.8	W6X25
۴۴	W14X21.1	W16X50	W10-X6.8	W16X2.6
۴۵	W44X230	W4-X33.1	W36X28.2	W44X26.2
۴۶	W44X230	W4-X27.8	W14X23.3	W44X230
۴۷	W6X8.5	W10-X23	W8X21	W8X28
۴۸	W12X22	W10-X5.4	W12X50	W24X5.5
وزن سازه (کیلوپوند)	۹۰۰/۰۶	۷۹۲/۷۲	۷۷۲/۶۴	۵۸۷/۲۷

- frames", *Computer and Structures*, 2010, 88, 1033-1048.
- Jagadheeswari AS, Christy CF, "Optimum position of multi outrigger belt truss in tall buildings 105 subjected to earthquake and wind load", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2016, 9, 373-377.
- Kaveh A, Ghazaan M, "Enhanced colliding bodies optimization for design problems with continuous and discrete variables", *Advances in Engineering Software*, 2014, 77, 66-75.
- Kaveh A, Farhoudi N, "A New optimization method: dolphin echolocation", *Advances in Engineering Software*, 2013, 59, 53-70.
- Kennedy J, Eberhart R, "Particle swarm optimization", *IEEE Int Conf Neural Networks* 1995, 4, 1942-1948.
- MATLAB, "The language of technical computing", Math Works Incorporated, 2015.
- Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, 2014, 69, 46-61.
- Nanduri RK, Suresh B, Hussain I, "Optimum position of outrigger system for high-rise reinforced concrete buildings under wind and earthquake loadings", *American Journal of Engineering Research*, 2013, 2, 76-89.
- OpenSees, "Open system for earthquake engineering simulation", Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2016.
- Perez RE, Behdinin K, "Particle swarm approach for structural design optimization", *Computers & Structures* 2007, 1579-1588.
- Shivacharan K, Chandrakala S, Karthik NM, "Optimum position of outrigger system for tall vertical irregularity structures", *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, 12, 54-63.
- Smith BS, Coull A, "Tall building structures: analysis and design", John Wiley & Sons, 1991
- Taranath BS, "Structural analysis & design of tall buildings", McGraw-Hill (1998), USA
- Wu JR, LI QS, "Structural performance of multi-outrigger-braced tall buildings", *Struct Design Tall Spec Build* 2003, 12, 155-176.

## EXTENDED ABSTRACT

# Layout Optimization of Outrigger Braced System in Steel Tall Structures Using Meta- Heuristic Algorithms

Keyvan Farzad, Saeed Gholizadeh \*

*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran*

**Received:** 22 May 2019; **Accepted:** 04 November 2019

---

### Keywords:

Tall building, Meta-heuristic algorithm, Layout optimization.

---

## 1. Introduction

As the height of building increases, requirements of structural stiffness and stability become more important than the strength criterion. Each tall structure basically behaves like a vertical cantilever under lateral loads and the outrigger-braced system is a favorable system in tall structures (Taranath, 1998). This type of structure has a central core connected to outer columns by outrigger trusses or strong girders. The position of outrigger-braced system has a significant impact on the structural efficiency. Therefore, determining the position of outrigger braces is an important part of design process; it is mainly done experimentally and does not lead to good economic results. In this study, the particle swarm optimization (PSO), modified dolphin echolocation (MDE), Enhanced colliding bodies optimization (ECBO) and grey wolf optimization (GWO) algorithms are utilized to determine the optimum position of outrigger-braced systems in tall steel structures.

## 2. Methodology

In this study that the optimization is mainly aimed to reduce the structural weight and the constraint functions calculated in accordance with the type of element and problem, including stress, max displacement, drift and construction constraints. The investigated structures are 5-bay 24-story (328-member) and 36-story (492-member) frames in which the bays are 15ft in length, the ground floor is 15ft in height and floors are 12ft in height. The seismic load on the frames is calculated and applied according to the ASCE/SEI-7 (2016).

OpenSees (2016) open-source software is employed for finite element modeling of the structures and Matlab (2015) software is used to implement optimization algorithms and other necessary computations.

In the both structures, an outrigger brace is fixed on the top floor. In the 24-story structure, the second brace can be moved between the upper and lower stories of the 12th floor. In the 36-story structure, the second and third braces can be moved between the upper and lower stories of the 12th floor and 24th floor, respectively, to achieve the optimum solution.

## 3. Results and discussion

The optimization results obtained by the algorithms for 24-story frame indicate that the optimum position of outrigger-braced system is determined on the 12th floor and the best structural weight is obtained by MDE algorithm. Fig. 1. shows the convergence curves of the algorithms and the inter-story drift profiles of the optimum structures found by the algorithms. It is clear that the convergence rate for the MDE algorithm is better than that of the other algorithms and the drift constraint is an active constraint in the optimization process, especially at the top stories.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: k.farzad@iaurmia.ac.ir (Keyvan Farzad), s.gholizadeh@urmia.ac.ir (Saeed Gholizadeh).

In the case of 36-story frame, the results of optimization demonstrate that the optimum position of outrigger-braced system is on the 11th and 23th floors and the best design is obtained by the MDE algorithm. The convergence rate of algorithms and the inter-story drift profiles of the optimum structures found by the algorithms are depicted in Fig. 2. It can be observed that the MDE has the best convergence rate among all the algorithms. In addition, the comparison of the inter-story drifts and the stress ratios of columns indicate that for the best design obtained by MDE the stress ratio constraints of columns dominate the optimal design.

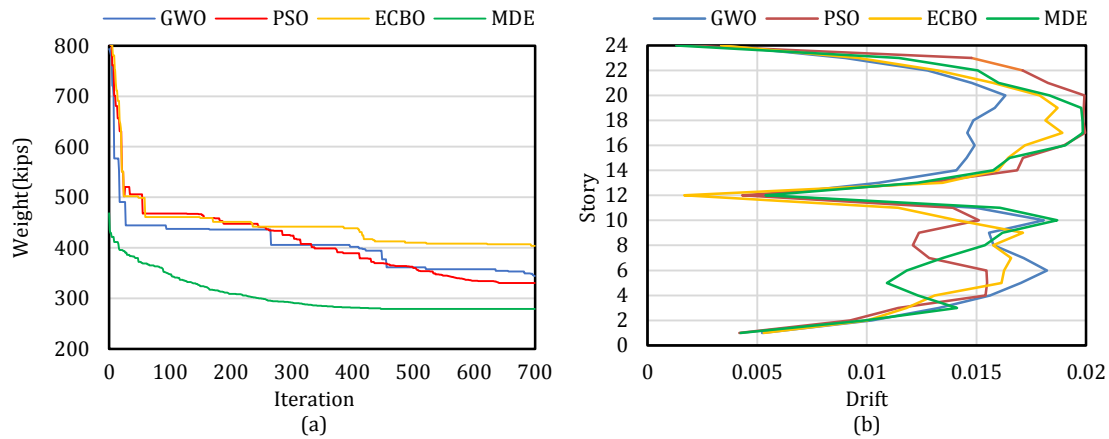


Fig. 1. 24-story frame: a) Convergence histories, b) Inter-story drift profiles

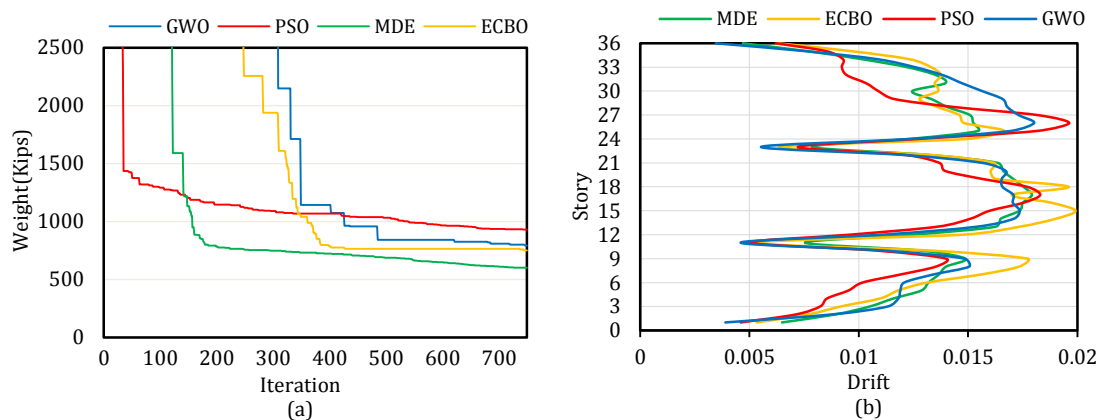


Fig. 2. 36-story frame: a) Convergence histories, b) Inter-story drift profiles

#### 4. Conclusions

Results of this study demonstrate the proper performance of MDE algorithm in comparison with the other three metaheuristics and reveal the importance of position of outrigger-braced system in achieving the optimum structures. It is necessary to conduct an optimization process based on the seismic performance and considering nonlinear behavior of structures to obtain more realistic designs.

#### 5. References

- ASCE/SEI 7-16, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, 2016.
- MATLAB, "The language of technical computing", Math Works Incorporated, 2015.
- Open Sees, "Open system for earthquake engineering simulation", Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2016.
- Taranath BS, "Structural analysis & design of tall buildings", McGraw-Hill, 1998, USA.