

## توزیع بهینه‌ی میراگر ویسکوز در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم سازه‌های کنترل شده

سولماز مرادپورا، مهدی دهستانی\*

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران  
 ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

## چکیده

در این مقاله جهت افزایش کارایی طراحی بر اساس جابجایی مستقیم سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز، روشی برای تعیین توزیع بهینه میراگر ویسکوز پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر تعریف یک مسئله بهینه‌سازی برای تامین میرایی ویسکوز معادل مورد نیاز با حداقل مجموع ضریب میرایی میراگرهای ویسکوز است و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک توزیع شده (DGA) استفاده شده است. برای آنالیز عددی و توضیح روش پیشنهادی، سه قاب فلزی ۲، ۵ و ۲۰ طبقه‌ی مجهز شده به میراگر ویسکوز خطی و طراحی شده بر اساس روش جابجایی مستقیم در نظر گرفته شده و به توزیع بهینه میراگر ویسکوز پرداخته شده است. سازه‌های کنترل شده در دو حالت توزیع بهینه و یکنواخت میراگرها تحت ده رکورد مصنوعی سازگار با طیف طراحی قرار گرفته و با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به ارزیابی پاسخ سازه‌ها پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تامین میرایی ویسکوز معادل یکسان در دو حالت توزیع بهینه و یکنواخت میراگرها، استفاده از توزیع بهینه باعث کاهش قابل توجهی در مجموع ضریب میرایی میراگرها (تا ۳۰ درصد) و مجموع حداکثر نیروی میراگرها (تا ۲۴ درصد) و در نتیجه هزینه‌ی تامین سیستم کنترل می‌شود. همچنین ارزیابی عملکرد سازه‌های کنترل شده تحت زلزله‌های مصنوعی نشان می‌دهد که استفاده از توزیع بهینه میراگر علیرغم کاهش در هزینه‌ی سیستم کنترل عملکرد مشابهی با حالت توزیع یکنواخت داشته است.

کلمات کلیدی: طراحی بر اساس عملکرد، طراحی بر اساس جابجایی مستقیم، میراگر ویسکوز، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک توزیع شده.

\*نویسنده مسئول: دکتر مهدی دهستانی

پست الکترونیکی: [dehestani@nit.ac.ir](mailto:dehestani@nit.ac.ir)

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با روش نیرویی مبتنی بر فرضیاتی چون رفتار خطی سازه و استفاده از ضریب کاهش نیرو در طراحی بوده و سازه‌ی طراحی شده با روش فوق ممکن هست اهداف عملکردی موردنظر در طراحی سازه را برآورده نکنند. از این رو، استفاده از روش طرح لرزه‌ای بر اساس عملکرد مورد انتظار از سازه، جهت طراحی سازه‌ای که حالات حدی مختلف را برآورده کند ضروری می‌باشد. برای این منظور، ابتدا طراحی بر اساس عملکرد در نشریه‌های بهسازی به‌منظور ارزیابی عملکرد و بهسازی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گرفت که استفاده از این نشریه‌ها برای طراحی عملکردی سازه‌ها نیاز به سعی و خطای زیادی دارد. در ادامه، روش‌های طراحی بر اساس عملکرد نظیر طراحی بر اساس جابجایی مستقیم<sup>۱</sup> (DDBD) توسط پریستلی و همکارانش [۱] و طراحی پلاستیک<sup>۲</sup> (PBPD) توسط لیلاتاویوات و همکارانش [۲] پیشنهاد شد. در روش طراحی بر اساس جابجایی مستقیم، ابتدا یک جابجایی نسبی ماکزیمم بر اساس سطح عملکرد مورد انتظار از سازه به‌عنوان حالت حدی در نظر گرفته شده و سپس برش پایه‌ی طراحی بر اساس این سطح عملکرد تعیین می‌شود. در نهایت با توزیع برش پایه در طبقات سازه، طراحی سازه بر اساس یک مکانیزم مطلوب خرابی انجام می‌شود. هدف عملکردی مورد نظر باید شامل حالت حدی مورد نظر در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای باشد. این روش طراحی برای کاربرد در سازه‌های مختلف نظیر طراحی سازه‌های قابی بتنی [۳]، سازه‌های با دیواربرشی بتنی [۴ و ۵]، پل‌ها [۶]، سازه‌های فولادی خمشی [۷]، سازه‌های فولادی بادبندی شده همگرا [۸ و ۹] و غیرهمگرا [۱۰] توسعه داده شده است.

سیستم‌های کنترل سازه‌ها به‌عنوان یک روش نوین برای افزایش ایمنی و راحتی ساکنین ساختمان‌ها و سازه‌های خاص پیشنهاد شده که این سیستم‌ها سطح ایمنی موردنیاز را در مقابل بارهای خارجی اعمال شده تامین می‌کنند. زمانی که سازه‌ها بخصوص سازه‌های با اهمیت بالا که انتظار سطح عملکرد بالاتری از آنها می‌رود نظیر بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های آتش نشانی و ... به روش طراحی متداول و بدون استفاده از سیستم کنترل طراحی می‌شوند، ممکن است تامین برخی از اهداف عملکردی به لحاظ عملی و اقتصادی مقدور نباشد. در حالیکه در صورت استفاده از سیستم‌های کنترل بخصوص سیستم‌های کنترل غیرفعال و طراحی آن بر اساس عملکرد، انتظار می‌رود که سازه بتواند با اطمینان بیشتری به اهداف عملکردی مورد نظر طراح برسد. در این راستا، روش‌های طراحی بر اساس عملکرد در طراحی سیستم‌های کنترل سازه برای بهسازی سازه‌های موجود و طراحی سازه-سیستم کنترل به‌طور همزمان برای دست‌یابی به عملکرد موردنظر مورد مطالعه قرار گرفته است. کیم و همکاران از روش طیف ظرفیت برای طراحی عملکردی میراگر ویسکوز و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود استفاده کردند [۱۱]. در این مطالعه بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی سازه‌های مورد بررسی، نشان داده شد که عملکرد سازه‌ی بهسازی شده متناظر با سطح عملکردی است که در طراحی سیستم‌های میراگر در نظر گرفته شده بود. در ادامه‌ی مطالعات در این زمینه، لین و همکاران برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود با استفاده از سیستم‌های مستهلک کننده‌ی انرژی نظیر میراگر ویسکوز<sup>۳</sup> (VD) [۱۲] و کردون و همکاران در طراحی سازه‌ها و پل‌های مجهز به سیستم‌های جدا ساز پایه<sup>۴</sup> [۱۳-۱۵] از روش طراحی بر اساس جابجایی مستقیم استفاده کردند.

لین و همکاران روش طراحی بر اساس جابجایی مستقیم برای طراحی سازه‌های مجهز شده به سیستم‌های مستهلک کننده‌ی انرژی نظیر میراگر ویسکوالاستیک و ویسکوز را ارائه کردند [۱۶]. در این روش مقداری درصد میرایی اضافه شده ناشی از میراگرها در نظر گرفته شده که به میرایی معادل سازه که مجموع میرایی الاستیک و میرایی هیستریزس سازه است، اضافه می‌شود. سپس سازه با استفاده از روش سازه جایگزین و با روند تکراری تا رسیدن به هدف عملکردی مورد نظر طراحی می‌شود. حسن این روش استفاده از روش آنالیز استاتیکی خطی در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر و ایراد عمده‌ی آن نیاز به سعی و خطا در مراحل طراحی است. در ادامه مطالعات مربوط به طراحی سازه‌های کنترل شده با میراگر ویسکوز، سالیوان و لگو با استفاده از پروفیل جابجایی غیرخطی برای سازه‌های بیش از چهار طبقه و ارائه روشی جهت محاسبه ضریب میرایی میراگرهای مورد استفاده بر اساس درصدی از برش طبقه، الگوریتم طراحی سازه‌ی مجهز به میراگر

1 Direct Displacement Based Design (DDBD)  
2 Performance Based Plastic Design (PBPD)  
3 Fluid Viscous Damper (VD)  
4 Base Isolation

ویسکوز را بدون نیاز به تکرار در مراحل طراحی ارائه کردند [۱۷]. از آنجایی که مطالعات انجام شده در این پژوهش بر روی قاب‌های طراحی شده به روش لین و همکاران [۱۶] انجام شده است، توضیحات کامل‌تر در مورد این روش طراحی در بخش ۳ ارائه می‌شود.

در سازه‌های کنترل شده با میراگر ویسکوز مطالعات مختلفی برای بررسی اثر نحوه‌ی توزیع میراگر ویسکوز در طبقات و تاثیر آن بر پاسخ دینامیکی سازه و کاهش هزینه صورت گرفته است که می‌توان به مقایسه تاثیر توزیع‌های مختلف ضریب میرایی میراگرها در طراحی سازه‌های فلزی و بهسازی سازه‌های منظم و نامنظم بتنی موجود مجهز شده به میراگر [۱۸ و ۱۹]، ارائه روشی برای تعیین مقدار ضریب میرایی و مکان‌یابی بهینه‌ی میراگر در سازه‌های نامنظم سه بعدی [۲۰] و بررسی روش‌های توزیع پیشرفته عددی و روش‌های ساده‌ی توزیع میراگر نظیر توزیع یکنواخت و توزیع متناسب با سختی و سپس مقایسه عملکرد آنها در بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه [۲۱] اشاره کرد. همچنین در بخشی از مطالعات مرتبط، به بررسی افزایش عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه با بهینه‌سازی میراگر ویسکوز [۲۲ و ۲۳]، توزیع بهینه میراگرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک در تمام یا تعدادی از طبقات سازه‌های منظم و نامنظم و مقایسه با سایر روش‌های توزیع به لحاظ تاثیر در عملکرد سازه و هزینه تامین آن‌ها در سازه [۲۴] و مطالعه اولیه در مقایسه‌ی توزیع بهینه میراگر ویسکوز بکمک دو روش پیشرفته عددی، با روش پیشنهاد شده توسط سالیوان و لگو [۲۵] پرداخته شده است. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که نحوه‌ی توزیع میراگر می‌تواند تاثیر قابل توجهی در عملکرد سازه کنترل شده و کاهش هزینه داشته باشد، بطوری‌که استفاده از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی در مقایسه با سایر روش‌های توزیع میراگر به لحاظ رسیدن به پاسخ کمتر به همراه کاهش هزینه موثرتر است.

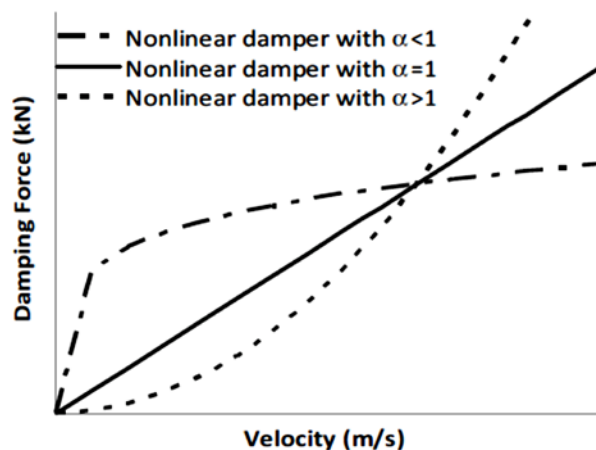
در روش‌های ارائه شده برای طراحی سازه‌های مجهز شده به میراگرهای ویسکوز با روش طراحی بر اساس جابجایی تاثیر توزیع میراگر مورد توجه نبوده است، بطوریکه در روش ارائه شده توسط لین و همکاران [۱۶] توزیع میراگر در ارتفاع سازه بصورت یکنواخت و در روش سالیوان و لگو [۱۷] نیروی میراگر بصورت ضریبی از برش طبقه در نظر گرفته شده است که این ضریب برای تمام طبقات یکسان است. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات مربوط به طراحی و توزیع بهینه‌ی میراگر ویسکوز در سازه‌های کنترل شده، جهت افزایش کارایی روش‌های طراحی سازه‌ی مجهز به میراگر ویسکوز در طراحی بر اساس عملکرد نظیر طراحی بر اساس جابجایی مستقیم، ضروری است که اثر توزیع میراگر ویسکوز در طبقات سازه و تعیین توزیع بهینه آن به صورت دقیق و با جزئیات کامل‌تر مورد بررسی قرار گیرد که در این پژوهش برای تکمیل مطالعات قبلی به این موضوع پرداخته می‌شود. برای این منظور، در سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز که با استفاده از روش لین و همکاران [۱۶] بر اساس روش جابجایی مستقیم و با توزیع یکنواخت میراگرها در طبقات طراحی شده‌اند، به تعیین توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز و تاثیر آن در کاهش مجموع ضریب میراگرها پرداخته می‌شود. برای تعیین توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز یک مسئله‌ی بهینه سازی تعریف شده که هدف رسیدن به درصد میرایی ویسکوز معادل مورد نیاز بر اساس عملکرد مورد انتظار از سازه، با حداقل مجموع ضریب میرایی میراگرها است. با توجه به غیرخطی بودن مسئله‌ی بهینه سازی و تعداد زیاد متغیرها بخصوص در سازه‌های بلند، از الگوریتم ژنتیک توزیع شده برای حل مسئله استفاده شده است.

## ۲- میراگر ویسکوز

به طور ساده، ساختمان یک میراگر ویسکوز شامل یک سیلندر فولادی پر شده از یک سیال ویسکوز است که با یک پیستون که آن هم از جنس فولاد ضد زنگ است به دو محفظه تقسیم می‌شود. این پیستون به یک کلاهک برنزی که حاوی منافذی به نام اریفیس بوده، متصل شده است. اساس کار این نوع از میراگرها، استهلاک انرژی توسط عبور سیال با فشار زیاد از درون روزنه‌ی تعبیه شده در کلاهک پیستون و جاری شدن آن از یک محفظه به محفظه‌ی دیگر است که سبب ایجاد اختلاف فشار در دو طرف کلاهک پیستون می‌شود. با محدود کردن سرعتی که سیال می‌تواند حرکت کند یک نیروی مقاوم وابسته به سرعت موسوم به نیروی میراگر ویسکوز بوجود می‌آید. حرکت سیال تا زمانی که فشار در هر دو طرف پیستون یکسان شود، ادامه می‌یابد. در صورتی‌که نیروی میراگر تنها وابسته به سرعت باشد، از رابطه (۱) بدست می‌آید [۲۶].

$$F_d = C|\dot{u}|^\alpha \text{sign}(\dot{u}) \quad (1)$$

که  $F_d$  نیروی میراگر،  $C$  ضریب میرایی،  $u$  سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر و  $\alpha$  تابع نمایی سرعت است. برای میراگر ویسکوز خطی  $\alpha = 1$  بوده که در آن نیروی میراگر متناسب با سرعت نسبی دو انتهای میراگر است. به میراگر با سایر مقادیر  $\alpha$ ، میراگر ویسکوز غیر خطی گفته می‌شود که البته میراگر با  $\alpha > 1$  برای کاربردهای عملی و سازه معمولاً استفاده نمی‌شود. منحنی نیرو-سرعت این نوع میراگر برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی نیرو-سرعت میراگر ویسکوز سیال برای مقادیر مختلف  $\alpha$  [۲۷]

این میراگر به دلیل سادگی در نحوه‌ی مدل‌سازی و همین‌طور عملکرد مناسب در کاهش پاسخ‌های سازه در مقابل تحریکات لرزه‌ای به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. به همین دلیل در این پژوهش نیز از میراگر ویسکوز خطی استفاده می‌شود.

### ۳- طراحی بر اساس عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز

لین و همکاران [۱۶] برای طراحی سازه‌ی کنترل شده توسط سیستم‌های مستهلک کننده انرژی از جمله میراگر ویسکوز یک روش طراحی براساس جابجایی مستقیم ارائه کردند که کلیات روش مشابه روش‌های ارائه شده برای سازه‌های کنترل نشده<sup>۱</sup> (Un Con.) بوده و اثر اضافه شدن میراگرهای ویسکوز به سازه بصورت درصد میرایی ویسکوز معادل به میرایی معادل سازه اضافه می‌شود. خلاصه‌ی مراحل طراحی سازه-میراگر ویسکوز ارائه شده توسط لین و همکاران [۱۶] به شرح زیر است:

$$1- \text{انتخاب تغییر مکان هدف بام } (\Delta_{II}), \text{ تخمین جابجایی تسلیم بام } (\Delta_{YI}) \text{ و سپس محاسبه ضریب شکل پذیری } (\mu = \frac{\Delta_{II}}{\Delta_{YI}})$$

۲- تخمین درصد میرایی ویسکوز معادل ( $\xi_d$ ) که میراگرها به سازه اضافه خواهند کرد که مقداری بین ۲۰٪-۱۰٪ پیشنهاد شده است.

۳- تعیین درصد میرایی ویسکوز معادل سازه‌ی کنترل شده که طبق رابطه (۲) برابر با مجموع میرایی الاستیک ( $\xi_{el}$ )، میرایی هیستریزیس ( $\xi_{hyst}$ ) و میرایی اضافه شده ناشی از میراگرهای ویسکوز ( $\xi_d$ ) است. در مقاله لین و همکاران [۱۶] برای میرایی الاستیک مقدار ۲٪ فرض شده و در محاسبه‌ی  $\xi_{hyst}$  از مدل هیستریزیس تاکادا مطابق رابطه (۳) استفاده شده است که  $\alpha$  در این رابطه نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه در مدل رفتاری دوخطی است.

$$\xi_{eq} = \xi_{el} + \xi_{hyst} + \xi_d \quad (2)$$

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{\pi} \left[ 1 - \left( \frac{1-\alpha}{\mu} + \alpha \right) \right] \quad (3)$$

<sup>1</sup> Un Controlled (Un Con.)

۴- تعیین تغییر مکان هدف سازه‌ی جایگزین  $(\Delta_u)_{eq}$  و جرم موثر آن

$$(\Delta_u)_{eq} = \Delta_u \frac{2N+1}{3N} \quad (4)$$

$$M_{eq} = (\sum_{i=1}^N m_i h_i) / h_N \quad (5)$$

که در روابط (۴) و (۵)،  $N$  تعداد طبقات،  $h_i$  ارتفاع از پایه تا طبقه‌ی  $i$ ام و  $m_i$  جرم طبقه‌ی  $i$ ام است.

۵- تعیین پریود موثر مورد نیاز  $(T_{eq})$  از طیف پاسخ جابجایی و سپس محاسبه سختی موثر مورد نیاز  $(K_{eq})$

$$K_{eq} = M_{eq} \left( \frac{2\pi}{T_{eq}} \right)^2 \quad (6)$$

۶- تعیین نیروی برش طراحی  $(V_u)$  و نیروی تسلیم طراحی  $(V_d)$

$$V_u = K_{eq} (\Delta_u)_{eq} \quad (7)$$

$$V_d = V_y = \frac{V_u}{1+\alpha(\mu-1)} \quad (8)$$

۷- تحلیل و طراحی سازه تحت مجموعه‌ای از نیروهای جانبی معادل که از توزیع  $V_d$  بکمک رابطه (۹) در ارتفاع سازه حاصل می‌شود

به گونه‌ای که تغییر مکان سازه  $(\Delta)$  با تغییر مکان تسلیم که در گام اول تخمین زده شد، برابر باشد  $(\Delta \approx \Delta_y)$ .

$$F_d = V_y = \frac{m_i h_i}{\sum_{i=1}^N m_i h_i} \quad (9)$$

۸- تعیین ضریب میرایی میراگرها

میرایی ویسکوز معادل درحالی‌که از میراگر ویسکوز خطی استفاده شود از رابطه‌ی (۱۰) تعیین می‌شود.

$$\xi_d = \frac{1}{2} \frac{\sum C_i \omega u_{0,i}^2}{\sum F_i u_i} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $C_i$  ضریب میرایی میراگر ویسکوز  $\lambda_{0,i}$ ، جابجایی محوری بین دو انتهای میراگر  $\lambda_{0,i}$ ،  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  پریود اصلی سازه‌ی

میراشده،  $F_i$  نیروی جانبی توزیع شده‌ی طبقه‌ی  $i$ ام و  $u_i$  جابجایی افقی طبقه‌ی  $i$ ام تحت نیروی جانبی توزیع شده است.

در این مرحله برای نسبت میرایی ویسکوز معادل  $(\xi_d)$  فرض شده در مرحله ۲، ضریب میرایی میراگر در طبقات مختلف را بر اساس

توزیع میراگر، از رابطه‌ی فوق می‌توان بدست آورد.

با توجه به رابطه (۱۰)، در توزیع یکنواخت<sup>۱</sup> (UD) که ضریب میرایی  $(C_i)$  در طبقات یکسان است، مقدار ضریب میرایی از رابطه

(۱۱) بدست می‌آید. در صورتی‌که توزیع میراگر در طبقات غیریکنواخت باشد در این حالت رابطه‌ی بین  $C_i$ ها و  $(\xi_d)$  بصورت یک معادله با

چند متغیر  $C_i$  بوده که بدست آوردن  $C_i$  برای هر طبقه نیاز به سعی و خطا دارد.

$$C = \frac{2\xi_d \sum F_i u_i}{\omega \sum u_{0,i}^2} \quad (11)$$

۸- مقایسه‌ی لنگر خمشی هر عضو  $(M)$  با لنگر تسلیم طراحی  $(M_y)$  که در صورت برابر بودن فرایند طراحی به اتمام می‌رسد. در

غیر این صورت تغییر مکان تسلیم در مرحله اول طراحی طبق رابطه (۱۲) بروزرسانی و طراحی از گام اول تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌شود.

$$\Delta_{y+1} = \Delta_y \frac{M_y}{M} \quad (12)$$

1 Uniform Distribution (UD)

## ۴- توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز

همانطوری که در بخش (۳) توضیح داده شد در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم یک مقدار مشخص برای میرایی اضافه شده ناشی از میراگرهای ویسکوز ( $\xi_d$ ) فرض می‌شود که برای توزیع یکنواخت میراگرها و با استفاده از رابطه (۱۱) مقدار ضریب میرایی میراگر ویسکوز (C) در هر طبقه تعیین می‌گردد. در صورتی که در طبقات ضریب میرایی یکسان نباشد، رابطه (۱۰) را می‌توان به صورت رابطه (۱۳) بازنویسی نمود.

$$C_1 u_{0,1}^2 + C_2 u_{0,2}^2 + \dots + C_n u_{0,n}^2 = \frac{1}{\omega} 2\xi_d \sum_{i=1}^N F_i u_i \quad (13)$$

در رابطه‌ی فوق n تعداد میراگرها است. با توجه به رابطه‌ی (۱۳) آرایش‌های مختلفی برای توزیع میراگر در طبقات می‌توان در نظر گرفت تا بتوان به  $\xi_d$  هدف دست پیدا کرد که هر کدام از آرایش میراگرها به مقادیر مختلف مجموع ضریب میرایی ( $\sum C_i$ ) و در نتیجه هزینه تامین تجهیزات کنترل منجر می‌شود. در این پژوهش روش پیشنهادی برای توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز در ارتفاع سازه، مبتنی بر تعریف یک مسئله بهینه‌سازی است که کمینه کردن مجموع ضریب میرایی میراگرها به عنوان تابع هدف و ضریب میرایی هر یک از میراگرها به عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته می‌شوند. ضریب میرایی هر یک از میراگرها باید به گونه‌ای تعیین شود که میرایی اضافه شده ناشی از میراگر ویسکوز ( $\xi_d$ ) در نهایت برابر با درصد میرایی معادل فرض شده ( $\xi_0$ ) باشد. همچنین ضریب میرایی میراگرها دامنه‌ی مشخصی از تغییرات دارد که این دامنه بر اساس نظر طراح و برخی از محدودیت‌های عملی تعریف می‌شود. در این حالت مسئله بهینه‌سازی برای تعیین ضریب میرایی هر یک از میراگرها به شرط رسیدن به درصد میرایی معادل ( $\xi_0$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Find: } C_1, C_2, \dots, C_n \quad (14)$$

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^n C_i \quad (15)$$

$$\text{Subject to: } \xi_d = \xi_0 \quad (16)$$

برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده در روابط (۱۴) تا (۱۶) می‌توان با اعمال محدودیت به صورت تابع جریمه با ضریب پنالیتی  $\beta$  در تابع هدف به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون محدودیت به صورت زیر رسید:

$$\text{Find: } C_1, C_2, \dots, C_n \quad (17)$$

$$\text{Minimize: } F(C) = \sum_{i=1}^n C_i + \beta \max[0, g_1] \quad (18)$$

$$g_1 = 1 - \frac{\xi_d}{\xi_0} \quad (19)$$

با توجه به اینکه تامین میرایی بزرگتر از  $\xi_0$  نیازمند انتخاب مقادیر بزرگ برای  $C_i$ ها است و از طرف دیگر تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی در این پژوهش کمینه کردن مجموع  $C_i$ ها هست، بنابراین جهت رسیدن به جواب بهینه در حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، انتخاب مقادیر  $C_i$ ها بطوری که  $\xi_d > \xi_0$  باشد اتفاق نمی‌افتد. بنابراین ضریب میرایی میراگرها باید طوری انتخاب شود تا میرایی معادل ویسکوز ( $\xi_d = \xi_0$ ) اتفاق افتد که این مسئله به عنوان محدودیت  $g$  در مسئله‌ی بهینه‌سازی لحاظ شده است.

## ۵- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک جز روش‌های الهام گرفته از طبیعت بوده که از نقش وراثت در تکامل موجودات زنده جهت حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است. در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یک بردار طراحی به صورت یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که ژن‌های آن متغیرهای

مسئله هستند بعنوان مثال در مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده در این مقاله، بردار طراحی  $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$  بصورت یک کروموزوم و  $C_i$ ها همان ژن‌ها هستند. مقدار تابع هدف برای هر بردار طراحی یا کروموزوم نشانگر شایستگی آن کروموزوم است، بطوری که در یک مسئله‌ی کمینه‌سازی، شایسته‌ترین کروموزوم دارای کمترین مقدار تابع هدف خواهد بود. الگوریتم ژنتیک با تولید تصادفی تعدادی بردار طراحی به عنوان جمعیت اولیه شروع می‌شود و با تولید جمعیت نسل‌های بعدی تحت عملگرهای مشخصی ادامه می‌یابد. این الگوریتم برای تولید نسل جدید در هر مرحله از سه عملگر اصلی انتخاب، تولید مثل و جهش استفاده می‌کند [۲۸]. جمعیت اولیه‌ی کاملاً تصادفی با اندازه‌ی دلخواه تولید شده، سپس به کمک عملگر انتخاب شایسته‌ترین کروموزوم‌ها برای تولید نسل بعد مشخص می‌شود. روش‌های مختلفی برای عملگر انتخاب نظیر روش چرخ رولت<sup>۱</sup>، روش مسابقه<sup>۲</sup>، روش رتبه بندی<sup>۳</sup> و روش نمونه برداری تصادفی تک مرحله ای<sup>۴</sup> وجود دارد که در این پژوهش از روش نمونه برداری تصادفی تک مرحله‌ای (SUS) برای انتخاب، استفاده شده است. در این روش احتمال انتخاب هر کروموزوم برابر است با:

$$P_{ind}(y_i) = \frac{F_{ind}(y_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} F_{ind}(y_i)} \quad i=1, 2, \dots, N_{ind} \quad (20)$$

که در آن  $P_{ind}(y_i)$  احتمال انتخاب کروموزوم  $i$ ام،  $F_{ind}(y_i)$  شایستگی کروموزوم  $i$ ام و  $N_{ind}$  تعداد کروموزوم در هر جمعیت است. در الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش برای حفظ بهترین جمعیت، از فرایند نخبه گرایی استفاده شده است که درصد کوچکی از جمعیت نسل بعد مستقیماً از جمعیت نسل قبل که همان نخبه‌ها هستند منتقل می‌شود. برای تولید کروموزوم‌های جدید موسوم به نوزاد از عملگر تولید مثل استفاده می‌شود. برای تولید مثل می‌توان از روش‌های مختلف نظیر روش تولید مثل داخلی<sup>۵</sup>، تولید مثل خطی<sup>۶</sup>، و تولید مثل گسسته استفاده کرد که مکانیزم تولید مثل استفاده شده در این پژوهش روش تولید مثل داخلی است. در این روش هر نوزاد بر اساس ترکیب خطی دو کروموزوم والد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$O_{1,2} = P_1 + \alpha(P_2 - P_1) \quad (21)$$

$P_1$  و  $P_2$  متغیرهای کروموزوم‌های والد،  $O_{1,2}$  ژن‌های کروموزوم نوزاد و  $\alpha$  ضریب مقیاس است که بطور تصادفی و معمولاً در فاصله‌ی  $[-0.25, 1.25]$  برای تعیین هر متغیر (ژن) کروموزوم نوزاد انتخاب می‌شود [۲۹].

عملگر جهش جهت تضمین تنوع در جمعیت و برای رهایی از نقطه‌ی کمینه‌ی محلی بکار می‌رود. درصد ژن‌هایی که جهش در آنها رخ می‌دهد عدد پایینی است. اگر  $m_r$  درصد جهش ژن‌ها و  $N_{var}$  و  $N_{new}$  بترتیب تعداد متغیرها و کروموزوم‌های تولید شده باشد در این حالت تعداد ژن‌هایی که دچار جهش می‌شوند از رابطه (۲۲) بدست می‌آید:

$$N_{mutated} = m_r \times N_{var} \times N_{new} \quad (22)$$

وقتی الگوریتم ژنتیک معمولی برای بهینه‌سازی مسائل با تعداد زیاد متغیر، نظیر پیدا کردن ضریب میرایی میراگرها در سازه‌های بلند مورد مطالعه در این پژوهش، استفاده شود سرعت همگرایی کاهش می‌یابد. از این رو برای رسیدن به جواب نهایی تعداد نسل‌های زیادی مورد نیاز است در این حالت از الگوریتم ژنتیک توزیع شده<sup>۷</sup> (DGA) استفاده می‌شود. در این الگوریتم، یک جمعیت بزرگ به تعدادی زیر جمعیت‌های کوچک ( $N_{sub}$ ) تقسیم شده و GA معمولی بر روی هر یک از زیر جمعیت‌ها بطور جداگانه اعمال می‌شود. در این روش تعدادی از جمعیت هر زیر جمعیت به زیر جمعیت‌های دیگر مهاجرت می‌کنند. انتخاب افراد برای مهاجرت به دو روش یکنواخت و انتخاب بر مبنای شایستگی انجام می‌شود. در روش یکنواخت، تعدادی از افراد بصورت تصادفی از یک زیر جمعیت انتخاب و جایگزین افرادی از زیر جمعیت دیگر می‌شود. در روش دوم که روش مورد استفاده در این مقاله است انتخاب بر مبنای شایستگی افراد بوده و تعداد مشخصی از افراد با شایستگی بالا از یک زیر جمعیت انتخاب و جایگزین افراد با شایستگی پایین در زیر جمعیت مقصد می‌شود. همچنین در فرایند مهاجرت دو

1 Roulette Wheel  
2 Tournament  
3 Rank  
4 Stochastic Universal Sampling (SUS)  
5 Intermediate Recombination  
6 Linear Recombination  
7 Distributed Genetic Algorithm (DGA)

پارامتر مهم فاصله مهاجرت<sup>۱</sup> ( $m_{interval}$ ) و نرخ مهاجرت<sup>۲</sup> ( $m_{rate}$ ) وجود دارد که پارامتر اول نشان می‌دهد که پس از چند نسل مهاجرت انجام می‌شود و پارامتر دوم نشان دهنده درصدی از کروموزوم‌های هر زیر جمعیت بوده که در هر بار مهاجرت، بایستی مهاجرت کنند. از آنجایی که در الگوریتم ژنتیک توزیع شده یک جمعیت به زیر جمعیت‌های متعددی تقسیم می‌شود تعداد افراد هر زیر جمعیت کوچک شده و منجر به همگرایی سریعتر و قابلیت بالای جستجو در مقایسه با الگوریتم ژنتیک معمولی می‌شود [۳۰]. در این پژوهش هم جهت افزایش کارایی از GA استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در استفاده از GA برای حل مسائل بهینه‌سازی با پارامترهای پیوسته، استفاده از روش کدگذاری حقیقی برای بیان متغیرها به لحاظ سادگی در برنامه نویسی، نیاز به حافظه‌ی کمتر و امکان استفاده از عملگرهای مختلف ژنتیک [۳۱] مناسب‌تر از روش کدگذاری دودویی است، بنابراین در این پژوهش برای بیان متغیرها از روش کدگذاری حقیقی استفاده می‌شود.

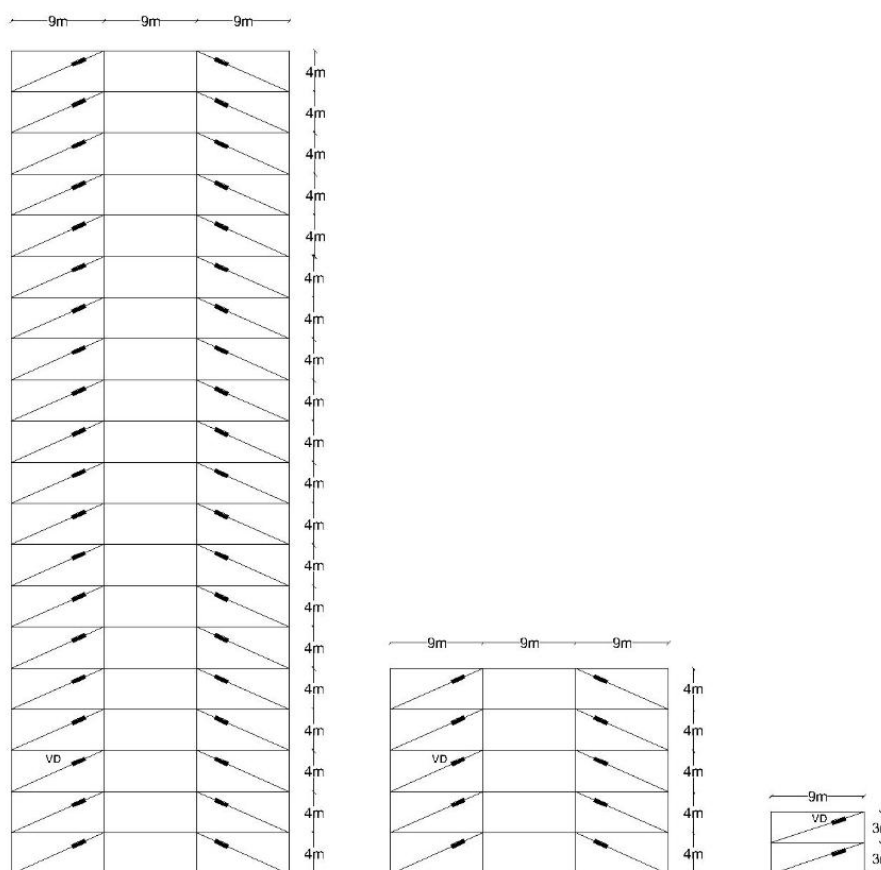
## ۶- مثال عددی

در این مطالعه برای آنالیز عددی و توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز در سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم از سه مدل قاب خمشی ۲، ۵ و ۲۰ طبقه که با استفاده از روش پیشنهادی لین و همکاران [۱۶] با فرض درصد میرایی اضافه شده ناشی از میراگرها برابر ۱۵٪ طراحی شده است، استفاده می‌شود. قاب دو طبقه دارای یک دهانه به طول ۹ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر بوده و قاب‌های ۵ و ۲۰ طبقه دارای سه دهانه به طول ۹ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر می‌باشند. مشخصات مقاطع، بارگذاری و مصالح مورد استفاده در جدول (۱) و مشخصات هندسی قاب‌های مورد بررسی در شکل (۲) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مقاطع، مصالح و بارگذاری [۱۶]

قاب	تیر	ستون	مصالح و بارگذاری	
2F	(mm×mm, thickness=22mm)		F=247000(kN/m <sup>2</sup> ) E=2.08E8(kN/m <sup>2</sup> ) DL=7.8(kN/m <sup>2</sup> ) LL=2.9(kN/m <sup>2</sup> )	
	1F-2F	H234×117		1F-2F Box 186×186
5F	(mm×mm, thickness=20mm)			
	1F-2F	H468×234		1F-5F Box 538×538
	3F-5F	H386×193		
20F	(mm×mm, thickness=25mm)			
	1F-6F	H922×461	1F-6F Box 972×972	
	7F-12F	H822×411	7F-20F Box 869×869	
	13F-20F	H622×311		





شکل ۲: مشخصات هندسی قاب‌های مورد بررسی [۱۶].

### ۱-۶- صحت سنجی

برای صحت‌سنجی، نتایج حاصل از آنالیز سازه تحت بارگذاری جانبی استاتیکی با نتایج مطالعه‌ی لین و همکاران [۱۶] برای سازه‌های مختلف در جدول (۲) مقایسه شده است. برای مدل‌سازی و آنالیز سازه از نرم افزار Opensees [۳۲] استفاده شده است. مصالح فولادی با مدل رفتاری دو خطی با  $\alpha=0/05$  بکار برده شده و اعضای سازه‌ای با استفاده از المان فیبری با مدل پلاستیسته‌ی گسترده مدل‌سازی شده است. برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی نیز از روش عددی بتا-نیومارک استفاده شده است.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از آنالیز استاتیکی

مطالعه حاضر			لین و همکاران [۱۶]			قاب
T(s)	$\Delta_y$ (m)	C(kN.s/m)	T(s)	$\Delta_y$ (m)	C(kN.s/m)	
۰/۹۳۸	۰/۰۶۳	۱۶۸/۶۸	۰/۹۵۶	۰/۰۶۶	۱۶۵	۲ طبقه
۱/۶۸۹	۰/۱۲۲	۱۲۶۸/۵۰	۱/۷	۰/۱۱۵	۱۲۷۳	۵ طبقه
۲/۶۵۲	۰/۳۰۰	۱۰۶۴۹/۴۰	۲/۷۰۲	۰/۲۹	۱۰۷۱۲	۲۰ طبقه

در جدول فوق T دوره‌ی تناوب،  $\Delta_y$  تغییرمکان تسلیم و C مقدار ضریب میرایی میراگر ویسکوز برای توزیع یکنواخت میراگرها جهت رسیدن به میرایی معادل هدف ( $\xi_d = 15\%$ ) می‌باشد که بکمک رابطه (۱۰) و دریافت حاصل از بارهای جانبی معادل بدست آمده از گام ۷ روش طراحی لین و همکاران [۱۶] که در جدول (۳) ارائه شده، محاسبه می‌شود. بررسی نتایج، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نسبت دریفت قاب‌های ۲، ۵ و ۲۰ طبقه تحت بارهای جانبی معادل

طبقه	Drift (%)		
	۲ طبقه	۵ طبقه	۲۰ طبقه
۱	۲/۷۵	۱/۳۶	۰/۶۳
۲	۳/۵۹	۲/۶۱	۱/۱۸
۳		۳/۰۳	۱/۳۵
۴		۲/۸۹	۱/۴۲
۵		۲/۲۷	۱/۴۴
۶			۱/۴۸
۷			۱/۶۵
۸			۱/۷۷
۹			۱/۷۷
۱۰			۱/۷۲
۱۱			۱/۶۹
۱۲			۱/۶۹
۱۳			۱/۹۲
۱۴			۲/۱۱
۱۵			۲/۰۶
۱۶			۱/۸۷
۱۷			۱/۶۴
۱۸			۱/۳۵
۱۹			۱/۰۸
۲۰			۰/۸۶

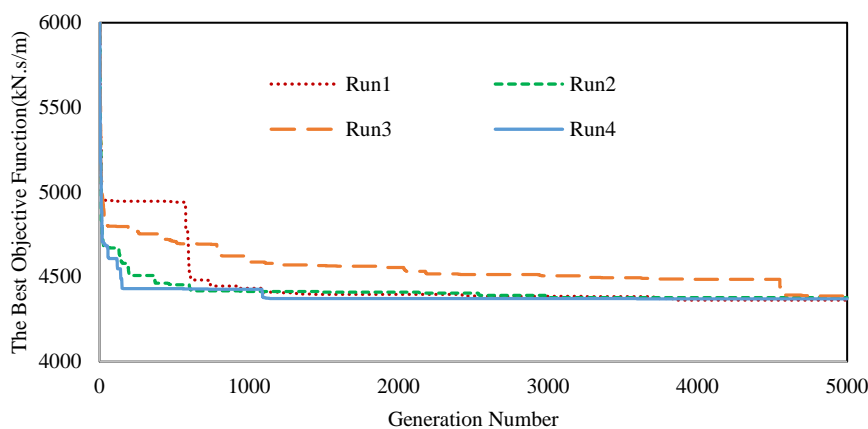
### ۶-۲- توزیع بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز

برای توضیح روش پیشنهادی جهت توزیع بهینه‌ی میراگرها در سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم، به عنوان مثال سازه‌ی ۵ طبقه با مشخصاتی که در جدول (۱) و شکل (۲) ارائه شده در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده در معادلات (۱۷) تا (۱۹) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک توزیع شده با هدف رسیدن به کمترین مجموع ضریب میرایی میراگرها به شرطی که میرایی ویسکوز معادل موردنیاز ۱۵ درصد باشد برای دو حالت حداکثر ضریب میرایی  $C_{max}=2000kN.s/m$  و  $C_{max}=4000kN.s/m$  حل شده است. پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک توزیع شده برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی مطابق جدول (۴) انتخاب شده است.

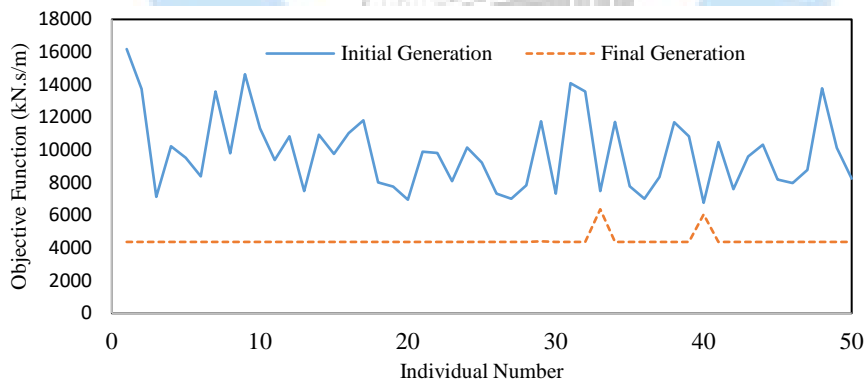
جدول ۴: پارامترهای الگوریتم ژنتیک توزیع شده

پارامتر	مقدار
$N_{sub}$ (تعداد زیر جمعیت)	۲
$N_{ind}$ (تعداد جمعیت در هر نسل)	۲۵
$N_{elite}$ (تعداد برگزیده‌ها)	۵
$m_{rate}$ (نرخ مهاجرت)	۰/۲
$m_{interval}$ (فاصله مهاجرت)	۲۰
$m_r$ (درصد جهش)	۰/۰۴

در این حالت مساله‌ی بهینه‌سازی ۵ متغیر دارد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک توزیع شده با پارامترهای جدول (۴) و تعداد کل نسل‌ها برابر ۵۰۰۰ چندین بار حل شده تا از درستی جواب نهایی اطمینان حاصل شود. شکل (۳) نحوه‌ی همگرایی الگوریتم ژنتیک در رسیدن به جواب نهایی برای چهار بار حل مسئله را نشان می‌دهد و همچنین در شکل (۴) مقدار تابع هدف برای جمعیت نسل‌های اول و آخر با هم مقایسه شده است. با توجه به شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تابع هدف با افزایش تعداد نسل، کاهش یافته یا اینکه در مقطعی ثابت بوده است که به خاطر استفاده از استراتژی نخبه‌گرایی در GA است. مشاهده می‌شود که هر چهار بار حل (Run)، جواب بهینه‌ی نهایی با اختلاف ناچیز نسبت به هم دارند که این موضوع دقت روش را نشان می‌دهد. همچنین علیرغم اینکه تعداد نسل‌ها تا ۵۰۰۰ ادامه داده شده است اما در اکثر موارد مشاهده شده که DGA در حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در تعداد نسل پایین‌تر (به عنوان مثال نسل ۱۱۰۰ در شکل ۳) به جواب بهینه با دقت قابل قبول رسیده است. شکل (۴) نیز نشان می‌دهد که در نسل آخر بیشتر اعضا شایستگی یکسان دارند. که این موضوع هم نشان دهنده‌ی همگرایی اکثر اعضا به جواب بهینه و در نتیجه دقت الگوریتم DGA است.



شکل ۳: تغییرات تابع هدف در نسل‌های مختلف برای ۴ بار حل مسئله‌ی بهینه‌سازی برای سازه ۵ طبقه



شکل ۴: مقدار تابع هدف (F(C)) برای جمعیت نسل اول و آخر

در جدول (۵) مقادیر ضریب میرایی میراگرها در حالت توزیع بهینه<sup>۱</sup> (OD) نشان داده شده است. همچنین ضریب میرایی در حالت توزیع یکنواخت (UD) که در مطالعه لین و همکاران [۱۶] استفاده شده، آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت  $(OD_1)C_{max}=2000\text{kN.s/m}$  مجموع ضریب میرایی میراگرها ۲۶/۴۳ درصد و در حالت  $(OD_2)C_{max}=4000\text{kN.s/m}$ ، ۳۱/۲۵ درصد نسبت به توزیع یکنواخت میراگرها در طبقات کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در توزیع بهینه در برخی از طبقات ضریب میرایی صفر و در برخی دیگر میراگر با حداکثر ضریب میرایی استفاده شده است.

1 Optimal Distribution (OD)

جدول ۵: توزیع بهینه میراگر در قاب ۵ طبقه

C <sub>i</sub> (kN.s/m) 5F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
۰	۰	۱۲۷۳	۱
۰	۶۶۸	۱۲۷۳	۲
۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۲۷۳	۳
۳۶۲/۴	۲۰۰۰	۱۲۷۳	۴
۰	۰	۱۲۷۳	۵
۴۳۶۲/۴	۴۶۶۸	۶۳۶۵	مجموع
۳۱/۴۶	۲۶/۶۶	-	کاهش (%)

درصد میرایی ویسکوز معادل بر اساس مقادیر بدست آمده برای ضریب میرایی میراگرها در حالت بهینه مطابق رابطه (۲) برابر ۱۵٪ است که در مسئله بهینه‌سازی نیز به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده بود. بنابراین در روش پیشنهادی برای توزیع بهینه‌ی میراگرها علیرغم کاهش قابل توجه در مقدار  $\sum C_i$  و در نتیجه کاهش هزینه در مقایسه با توزیع یکنواخت، مقدار میرایی معادل ( $\xi_d$ ) مورد نیاز نیز تامین شده است.

مشابه روش توضیح داده شده برای قاب ۵ طبقه، برای قاب‌های ۲ و ۲۰ طبقه نیز توزیع بهینه انجام شده که نتایج در جدول (۶) و (۷) برای دو حالت حداکثر ضریب میرایی  $(OD_1)C_{max} = 220 \text{ kN.s/m}$  و  $(OD_2)C_{max} = 300 \text{ kN.s/m}$  برای قاب ۲ طبقه و  $(OD_1)C_{max} = 12000 \text{ kN.s/m}$  و  $(OD_2)C_{max} = 15000 \text{ kN.s/m}$  برای قاب ۲۰ طبقه ارائه شده است. همچنین در شکل (۵) مجموع ضریب میرایی میراگرها برای توزیع‌های مختلف بصورت درصدی از مجموع ضریب میراگرها در حالت یکنواخت نشان داده شده است.

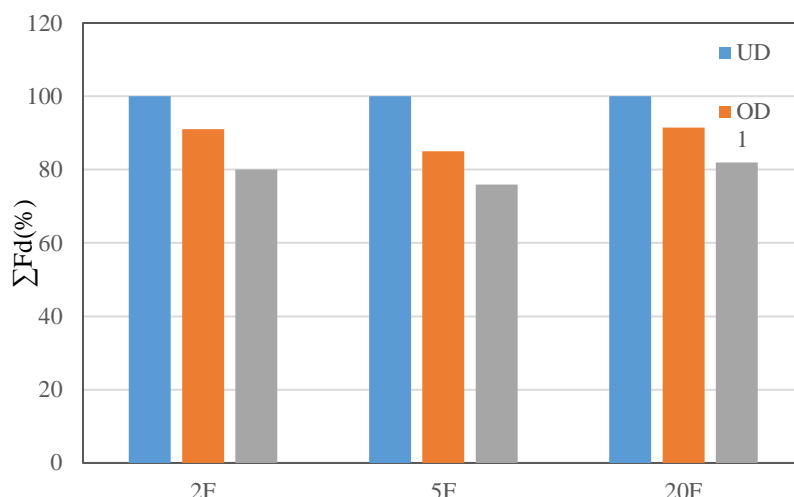
جدول ۶: توزیع بهینه میراگر در قاب ۲ طبقه

C <sub>i</sub> (kN.s/m) 2F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
۰	۸۰/۳۱	۱۶۵	۱
۲۶۶/۶۴	۲۲۰	۱۶۵	۲
۲۶۶/۶۴	۳۰۰/۳۱	۳۳۰	مجموع
۱۹/۲۰	۹/۰۰	-	کاهش (%)

جدول ۷: توزیع بهینه میراگر در قاب ۲۰ طبقه

C <sub>i</sub> (kN.s/m) 20F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
۰	۰	۱۰۷۱۲	۱
۰	۰	۱۰۷۱۲	۲
۰	۲۶۴۶/۰۵	۱۰۷۱۲	۳
۰	۱۱۴۹۶/۶۳	۱۰۷۱۲	۴
۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۵
۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۶
۱۱۳۰۵/۲۳	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۷
۱۴۹۹۷/۲۱	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۸
۱۴۹۹۸/۸۷	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۹
۱۴۹۹۹/۹۶	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۰
۱۴۹۹۸/۷۹	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۱
۱۴۹۶۴/۵۹	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۲
۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۳
۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۴
۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۵
۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۶
۱۴۹۹۸/۶۹	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۷
	۱۲۰۰۰	۱۰۷۱۲	۱۸
	۰	۱۰۷۱۲	۱۹
	۰	۱۰۷۱۲	۲۰
۱۵۶۶۸۱/۳۴	۱۷۸۰۱۲/۴۴	۲۱۴۲۴۰	مجموع
۲۶/۸۷	۱۶/۹۱	-	کاهش (%)

با بررسی نتایج بدست آمده برای توزیع بهینه میراگرها در جداول ارائه شده‌ی فوق و همچنین شکل (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب میرایی ماکزیمم ( $C_{max}$ ) مجموع ضریب میرایی میراگرها کاهش بیشتری پیدا کرده و میراگرها در طبقات محدودتری متمرکز می‌شوند. به‌عنوان مثال برای حالت OD<sub>2</sub> در سازه‌ی ۲۰ طبقه که  $C_{max}$  بیشتری دارد، میراگرها در ۱۱ طبقه و در حالت OD<sub>1</sub> در ۱۶ طبقه توزیع شده‌اند که در حالت OD<sub>2</sub> اکثر میراگرهای استفاده شده دارای ضریب میرایی برابر  $C_{max}$  می‌باشند. دلیل این مسئله این است که با توجه به رابطه‌ی (۱۳) و مسئله‌ی بهینه‌سازی ارائه شده در روابط (۱۷) تا (۱۹) می‌توان گفت که اولویت قرارگیری میراگرها با حداکثر ظرفیت در طبقاتی است که ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات را دارند و در طبقاتی که مقدار جابجایی نسبی در مقایسه با دیگر طبقات کمتر است به‌لحاظ رسیدن به جواب بهینه که همان حداقل مجموع ضریب میرایی می‌باشد نیاز به نصب میراگر نیست. بنابراین در صورتی که به‌لحاظ اجرایی و ساخت، تامین  $C_{max}$  بیشتری میسر باشد مجموع ضریب میرایی میراگرها را می‌توان بیشتر کاهش داد که در این حالت میراگرها با ظرفیت  $C_{max}$ ، در طبقاتی که جابجایی نسبی بیشتری دارند قرار می‌گیرد. با کاهش  $C_{max}$ ، توزیع میراگرها در طبقات به حالت توزیع یکنواخت (UD) نزدیکتر می‌شود. این موضوع در سازه‌ی ۲۰ طبقه در حالت OD<sub>1</sub> که  $C_{max}$  نزدیک به مقدار C در UD می‌باشد قابل مشاهده است. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده و با توجه به جدول (۳) می‌توان گفت که در حالت توزیع بهینه، میراگرها در طبقاتی که دررفت بیشتری دارند قرار می‌گیرند که در این صورت باعث استهلاک بیشتر انرژی می‌گردد. این طبقات را می‌توان به‌عنوان طبقات موثر برای نصب میراگرها در نظر گرفت. در طبقات با دررفت کمتر، ضریب میرایی کاهش و حتی در برخی طبقات نیاز به نصب میراگر نیست.

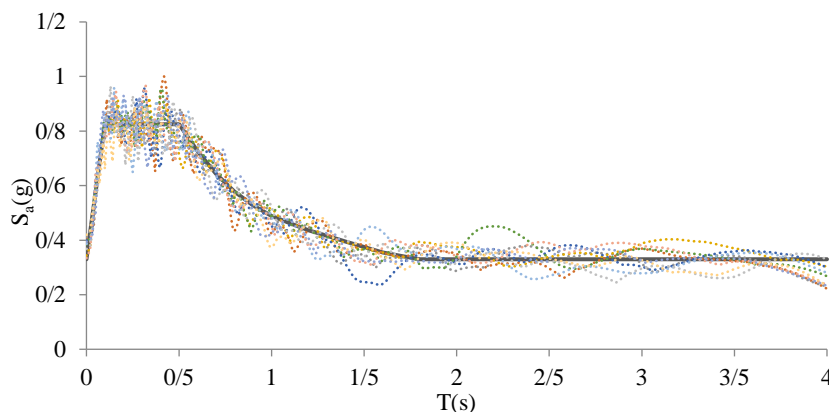


شکل ۵: مقایسه مجموع ضرایب میرایی توزیع یکنواخت و بهینه

### ۳-۶- بررسی عملکرد سازه‌های طراحی شده

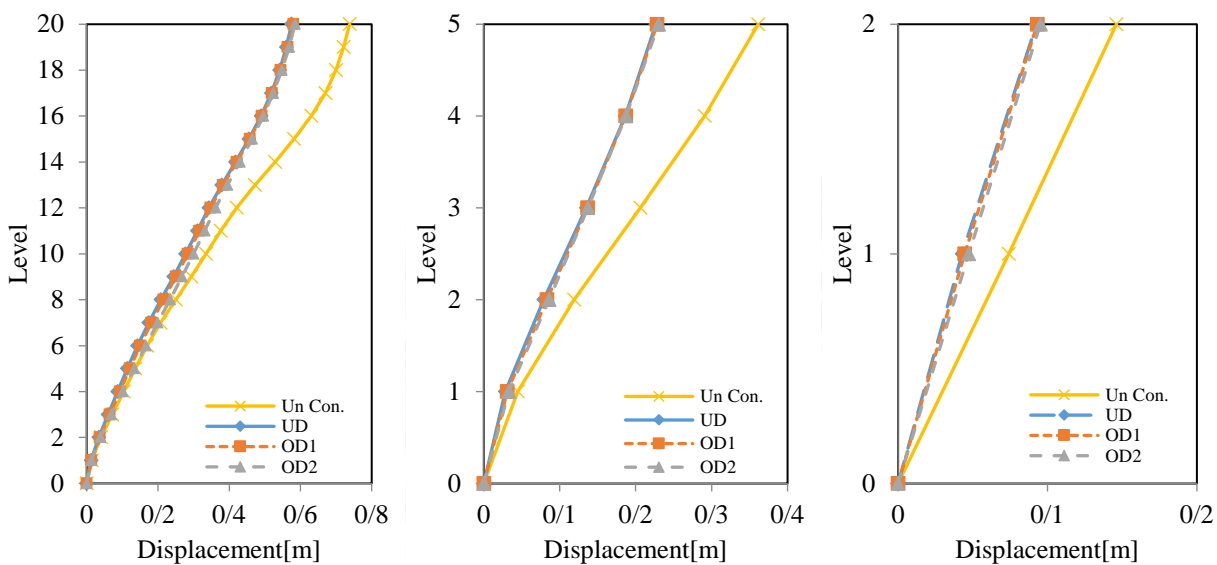
برای بررسی عملکرد قاب‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز با توزیع مختلف میراگرها به تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه‌ها تحت شتابنگاشت‌های زلزله پرداخته شده است. در مطالعه لین و همکاران [۱۶] طراحی سیستم سازه-میراگر بر اساس طیف طرح تایوان برای خاک نوع ۲ و حداکثر شتاب  $0.33g$  صورت گرفته است. از آنجاکه زلزله‌های واقعی منطبق بر طیف طراحی تایوان به تعداد لازم در دسترس نبود به همین دلیل در این مطالعه برای آنالیز دینامیکی، ده رکورد سازگار با طیف طراحی تولید شده است. در شکل (۶) طیف شتاب رکوردهای تولید شده و همچنین طیف شتاب تایوان نشان داده شده است. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی روی هر یک از قاب‌های مورد بررسی با سه حالت توزیع میراگر در ارتفاع ( $UD, OD_1, OD_2$ )، تحت ده رکورد مصنوعی انجام شده است.

برای سه توزیع مختلف میانگین حداکثر جابجایی نسبی، شتاب، دررفت و همچنین حداکثر نیروی میراگر در هر طبقه تحت رکوردهای مصنوعی بر روی سازه‌های کنترل شده و کنترل نشده، در شکل‌های (۷) تا (۱۱) ارائه شده است. نتایج نشان دهنده‌ی کارایی سیستم میراگر در کاهش پاسخ سازه است. با توجه به این که در توزیع بهینه‌ی میراگرها هدف رسیدن به همان عملکرد سازه با توزیع یکنواخت میراگرها ولی با هزینه کمتر بوده است بنابراین تحت زلزله‌های مورد استفاده در صورتیکه این هدف محقق شود نشان دهنده‌ی موفقیت روش پیشنهادی برای توزیع بهینه‌ی میراگرها در طراحی بر اساس روش جابجایی مستقیم است. در شکل (۷) انطباق خوبی در پروفیل‌های جابجایی هر سه قاب در توزیع بهینه و یکنواخت مشاهده می‌شود. در پروفیل‌های میانگین حداکثر شتاب طبقات که در شکل (۸) ارائه شده نیز اختلاف قابل توجهی بجز در طبقات ۲ و ۳ سازه‌ی ۵ طبقه که افزایشی در حدود ۲۹ و ۱۵ درصد در توزیع  $OD_2$  داشته است، مشاهده نمی‌شود.

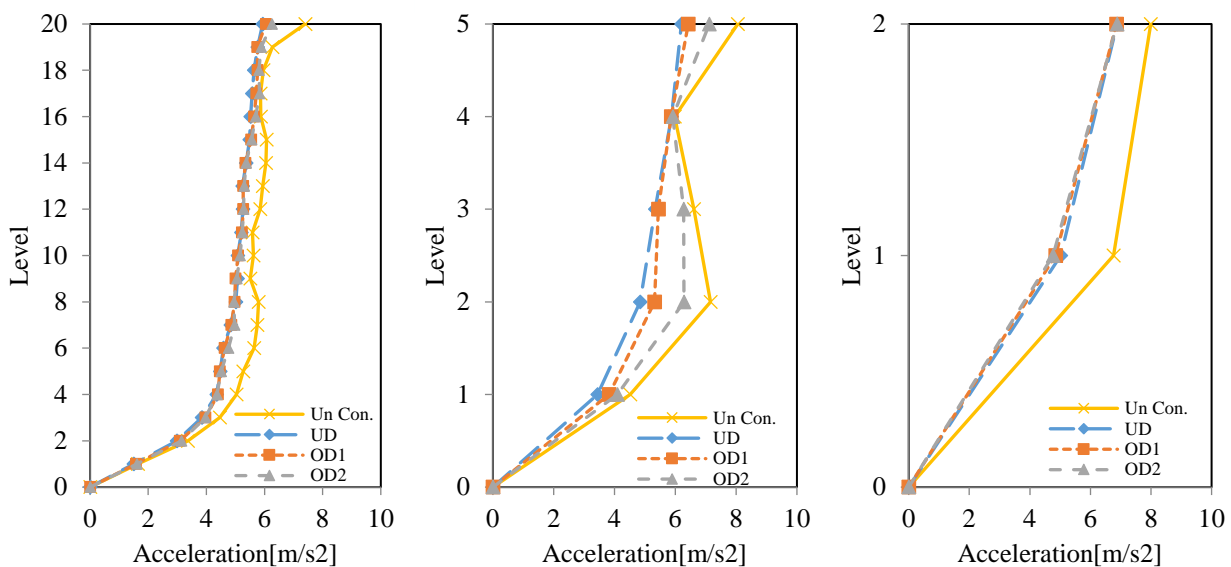


شکل ۶: طیف شتاب رکوردهای مصنوعی سازگار با طیف طراحی تایوان برای خاک نوع ۲ و  $PGA=0.33g$

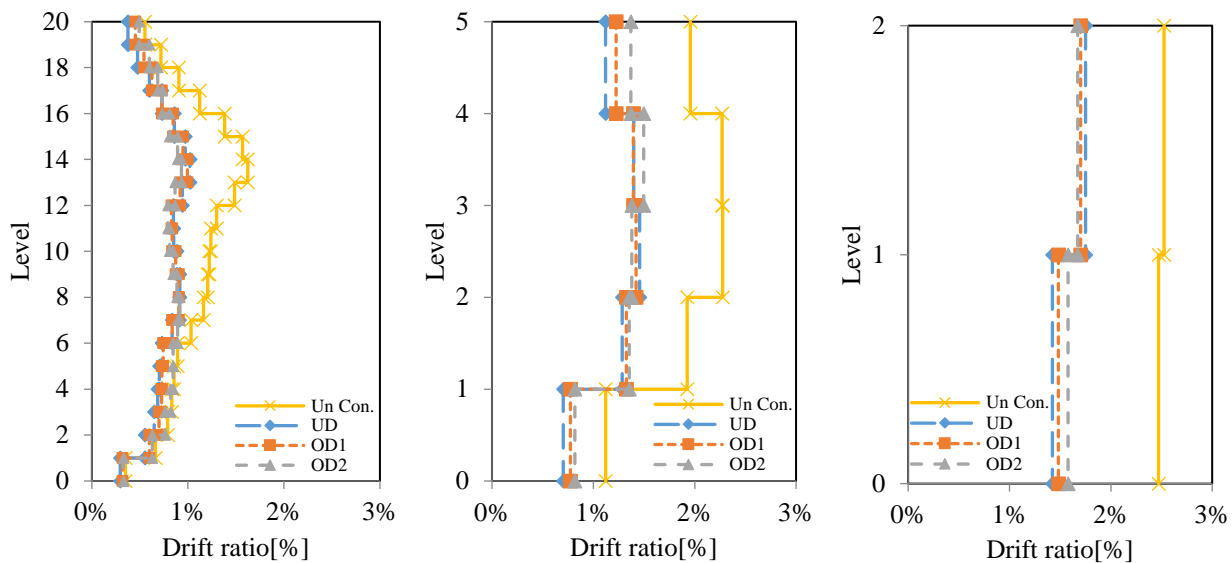
مطابق شکل (۹) حداکثر مقدار دریفت در پروفیل میانگین دریفت طبقات در دو حالت OD و UD تفاوت قابل توجهی نداشته و حتی در مواردی استفاده از OD تاثیر کاهنده هم داشته است. به عنوان نمونه در مثال عددی مورد بررسی در قاب ۵ طبقه حداکثر دریفت OD در حدود ۱/۵ و ۸ درصد بیشتر از UD بوده در حالی که در سازه‌ی ۲ و ۲۰ طبقه حداکثر دریفت ۴ تا ۸ درصد نسبت به UD کاهش داشته است. تطابق قابل قبول بین OD و UD در طبقات با حداکثر جابجایی می‌تواند به این دلیل باشد که در توزیع بهینه در طبقاتی که دریفت بیشتری دارند تمرکز میراگرها بیشتر بوده و استهلاک انرژی بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که علیرغم تطابق قابل قبول در پروفیل دریفت OD و UD در حداکثر مقدار دریفت در برخی طبقات نظیر طبقات ۱ و ۵ در قاب ۵ طبقه و طبقات ۱ تا ۶ در قاب ۲۰ طبقه در حالت OD میانگین حداکثر دریفت از UD بیشتر می‌باشد. دلیل افزایش دریفت OD در مقایسه با UD بدلیل عدم قرارگیری میراگر در طبقات با دریفت کمتر (طبقات غیرموثر) در OD است.



شکل ۷: میانگین حداکثر جابجایی طبقات تحت زلزله‌های مصنوعی در قاب‌های بت‌تیب از راست ۲، ۵ و ۲۰ طبقه



شکل ۸: میانگین حداکثر شتاب طبقات تحت زلزله‌های مصنوعی در قاب‌های بت‌تیب از راست ۲، ۵ و ۲۰ طبقه



شکل ۹: میانگین حداکثر دریفت طبقات تحت زلزله‌های مصنوعی در قاب‌های بت‌تیب از راست ۲، ۵، و ۲۰ طبقه

در جدول (۸) میانگین حداکثر برش پایه سازه‌ها تحت اثر رکوردهای مصنوعی آورده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده معلوم می‌شود که برش پایه در سازه‌ی ۲ و ۲۰ طبقه در حالت توزیع بهینه کاهش یافته و در سازه‌ی ۵ طبقه حدود ۱/۵٪ و ۰/۸٪ افزایش یافته است.

جدول ۸: مقایسه میانگین حداکثر برش پایه در سه حالت مورد بررسی

$V_{b,Max}$ (kN)			
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	قاب
۲۳۰	۲۲۸	۲۳۰	۲ طبقه
۲۴۵۶	۲۳۰۷	۲۲۷۱	۵ طبقه
۶۸۵۸	۶۸۴۱	۶۹۲۹	۲۰ طبقه

علاوه بر ضریب میرایی، دیگر پارامتر مهم طراحی مربوط به هزینه، حداکثر نیروی میراگر است. با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی هر سه قاب برای توزیع‌های بهینه و یکنواخت تحت ده رکورد مورد استفاده، مقادیر بدست آمده در جداول (۹) تا (۱۱) برای طبقات مختلف آورده شده است و همچنین در شکل (۱۰) مجموع حداکثر نیروی میراگرها برای توزیع‌های مختلف بصورت درصدی از مجموع حداکثر نیروی میراگر در حالت UD نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که استفاده از توزیع بهینه باعث کاهش مجموع حداکثر نیروی میراگرها در مقایسه با توزیع یکنواخت و در نتیجه کاهش هزینه تامین میراگر ویسکوز می‌شود بطوریکه در قاب‌های مورد مطالعه دامنه کاهش از ۸/۵ تا ۲۴ درصد بوده است. در شکل (۱۱) نیز نسبت حداکثر نیروی میراگر به ضریب میرایی در طبقات قاب‌های مورد بررسی و در توزیع‌های مختلف نشان داده شده است. در توزیع یکنواخت ضرایب میرایی در ارتفاع سازه ثابت است در حالی که حداکثر نیروی میرایی تمایل به کاهش در طبقات بالاتر و افزایش در طبقات میانی سازه دارند بنابراین با توجه به شکل (۱۱) در روش بهینه توزیع حداکثر نیروی میراگر با توزیع ضریب میرایی بخصوص در قاب‌های ۵ و ۲۰ طبقه سازگارتر است.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه‌های مختلف مجهز شده به میراگر ویسکوز در حالت توزیع بهینه و یکنواخت می‌توان گفت که روش پیشنهادی برای توزیع بهینه‌ی میراگرها در اکثر حالات عملکرد مشابهی با توزیع یکنواخت داشته در حالی که مجموع ضریب میرایی و حداکثر نیروی میراگرها کاهش قابل توجهی داشته است. در نتیجه هزینه تامین میراگرها در توزیع بهینه می‌تواند کاهش قابل توجهی در مقایسه با توزیع یکنواخت داشته باشد. بنابراین روش پیشنهادی برای توزیع میراگرها را می‌توان در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز برای بهینه ساختن طراحی سیستم سازه-میراگر بکار برد.



جدول ۹: میانگین حداکثر نیروی میراگرها در قاب ۲ طبقه

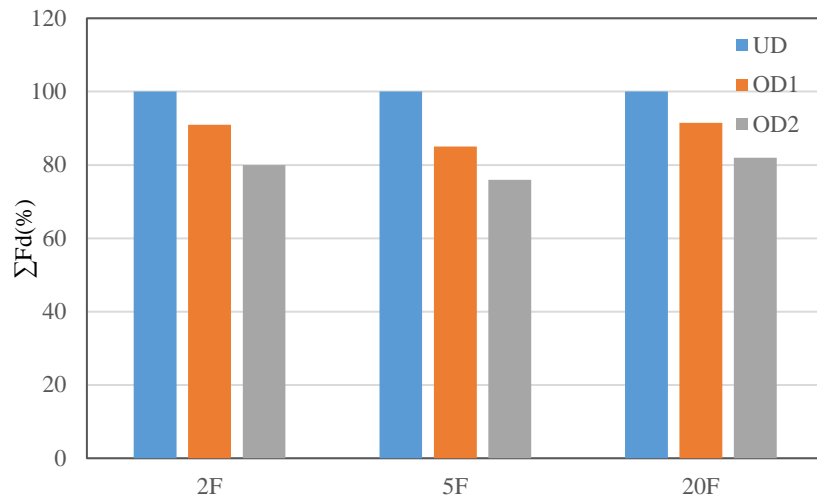
F <sub>d,Max</sub> (kN) 2F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
.	۱۶۹۱۰	۳۳۷۷۰	۱
۶۸۸۳۷	۵۷۴۹۱	۴۴۱۷۸	۲
۶۸۸۳۷	۷۴۴۰۱	۷۷۹۴۸	مجموع
۱۱/۷	۹/۶	-	کاهش (%)

جدول ۱۰: میانگین حداکثر نیروی میراگرها در قاب ۵ طبقه

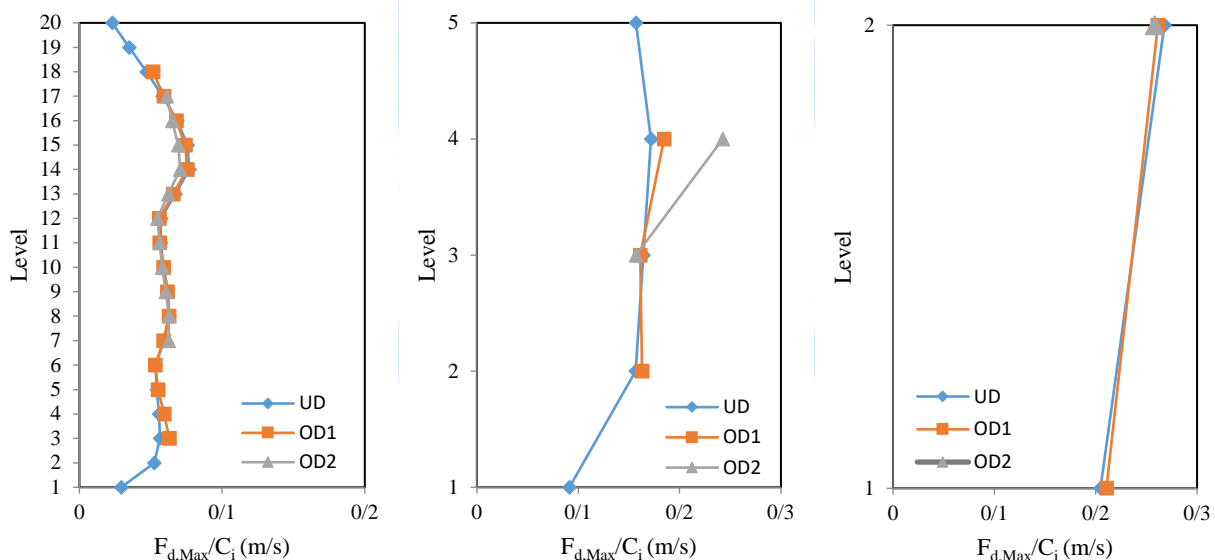
F <sub>d,Max</sub> (kN) 5F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
.	.	۱۱۶۱۹۷	۱
.	۱۰۸۸۵۵	۱۹۹۳۳۹	۲
۶۲۸۴۲۱	۳۶۹۴۹۴	۲۰۹۲۰۸	۳
۸۸۰۵۲	۸۷۰	۲۱۸۶۱۴	۴
.	.	۱۹۹۸۱۲	۵
۷۱۶۴۷۳	۸۰۱۵۲۴	۹۴۳۱۷۰	مجموع
۲۴	۱۵	-	کاهش (%)

جدول ۱۱: میانگین حداکثر نیروی میراگرها در قاب ۲۰ طبقه

F <sub>d,Max</sub> (kN) 20F			طبقه
OD <sub>2</sub>	OD <sub>1</sub>	UD	
.	.	۳۱۴۴۰۴	۱
.	.	۵۶۰۳۷۴	۲
.	۱۶۶۷۴۱	۶۰۴۲۵۳	۳
.	۴۶۶۶۹۰	۵۹۷۱۱۴	۴
.	۶۳۲۴۵۲	۵۸۱۰۶۷	۵
.	۶۳۸۱۲۲	۵۷۰۸۵۴	۶
۷۰۵۷۳۲	۷۰۷۹۹۸	۶۳۶۵۸۰	۷
۹۴۱۱۲۴	۷۵۱۹۸۰	۶۷۴۹۷۶	۸
۹۰۶۶۲۸	۷۳۸۷۸۹	۶۶۳۵۴۳	۹
۸۷۱۶۳۵	۷۰۷۰۹۵	۶۳۴۲۴۳	۱۰
۵۸۶۷۷۹	۶۷۴۳۱۷	۶۰۸۷۳۶	۱۱
۸۱۷۲۵۲	۶۷۱۱۹۰	۶۱۱۸۸۲	۱۲
۹۳۳۵۹۳	۷۸۷۸۸۸	۷۱۹۰۷۶	۱۳
۱۰۵۹۵۶۳	۹۰۵۰۲۰	۸۲۴۷۶۶	۱۴
۱۰۳۹۵۵۹	۸۹۰۱۰۴	۸۱۲۲۸۱	۱۵
۹۷۳۸۲۸	۸۱۵۶۲۰	۷۳۵۱۶۲	۱۶
۹۱۸۴۳۸	۷۱۰۸۱۳	۶۲۳۵۷۸	۱۷
.	۶۱۷۳۱۵	۵۰۴۹۰۰	۱۸
.	.	۳۷۳۰۳۵	۱۹
.	.	۲۴۵۵۱۶	۲۰
۹۷۵۴۱۳۰	۱۰۸۸۲۱۳۱	۱۱۸۹۶۳۴۰	مجموع
۱۸	۸/۵۰	-	کاهش (%)



شکل ۱۰: مقایسه مجموع حداکثر نیروی میراگر در توزیع یکنواخت و بهینه



شکل ۱۱: نسبت میانگین حداکثر نیروی میراگر به ضریب میرایی طبقه در قاب‌های بت‌ریب از راست ۲، ۵ و ۲۰ طبقه

## ۷- نتایج

در سازه‌های کنترل شده با سیستم‌های کنترل غیرفعال نظیر میراگر ویسکوز، توزیع میراگرها در طبقات مورد اهمیت بوده و نیاز است که در روش طراحی بر اساس عملکرد هم مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله به توزیع بهینه‌ی میراگر ویسکوز در طبقات سازه طراحی شده بر اساس روش جابجایی مستقیم پرداخته شده است بر اساس نتایج حاصله از تحلیل‌های عددی بر روی سازه‌های مختلف با توزیع بهینه و یکنواخت میراگرهای ویسکوز می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- روش پیشنهادی برای تعیین توزیع بهینه‌ی میراگرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک توزیع شده، روشی موفق برای تعیین ضریب میرایی بهینه در هر طبقه است که دقت و سرعت همگرایی بالایی دارد. با استفاده از این روش به راحتی می‌توان برای هر تعداد دلخواه میراگرها که همان تعداد متغیرهای مسئله‌ی بهینه‌سازی هستند، مسئله را حل کرد.

۲- مقایسه‌ی مجموع ضریب میرایی بدست آمده در توزیع بهینه با توزیع یکنواخت میراگر ویسکوز که در مطالعات قبلی مورد استفاده قرار گرفته است، نشان می‌دهد که استفاده از روش بهینه‌سازی منجر به کاهش مجموع ضریب میرایی و در نتیجه هزینه‌ی تامین میراگر ویسکوز می‌شود، بطوریکه در مثال عددی موردنظر، مقدار کاهش برای سازه‌های مختلف در محدوده‌ی ۹ تا ۳۱ درصد است.

۳- نتایج حاصل از توزیع بهینه میراگرها برای دو مقدار حداکثر ضریب میرایی میراگرها نشان می‌دهد که با افزایش ضریب میرایی ماکزیمم ( $C_{max}$ ) مجموع ضریب میرایی کاهش پیدا کرده و میراگرها در طبقات محدودتری متمرکز می‌شوند و با کاهش  $C_{max}$ ، توزیع میراگرها در طبقات به حالت توزیع یکنواخت نزدیکتر می‌شود. همچنین می‌توان گفت که اولویت قرارگیری میراگرها، طبقات دارای ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات بوده که در این حالت حداکثر استهلاك انرژی اتفاق می‌افتد و در طبقاتی که مقدار جابجایی نسبی در مقایسه با دیگر طبقات کمتر است نیاز به نصب میراگر نیست.

۴- بررسی عملکرد سیستم سازه-میراگر با توزیع بهینه و یکنواخت میراگرها تحت رکوردهای مصنوعی سازگار با طیف طراحی نشان می‌دهد که علیرغم کاهش قابل توجه در مجموع ضریب میرایی میراگرها عملکرد سازه با توزیع بهینه تحت زلزله‌های مورد استفاده با توزیع یکنواخت تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته است. بنابراین استفاده از روش پیشنهادی با حفظ عملکرد مورد نظر منجر به کاهش هزینه می‌شود. بطوریکه در قاب‌های مورد بررسی، پروفیل‌های جابجایی و شتاب بغیر از پروفیل شتاب سازه‌ی ۵ طبقه که در طبقات ۲ و ۳ افزایش در حدود ۲۹ و ۱۵ درصد شتاب مشاهده می‌شود تقریباً منطبق بر پروفیل‌های توزیع یکنواخت است. حداکثر دررفت نیز در توزیع بهینه بغیر از سازه ۵ طبقه با ۲/۷ درصد افزایش، در قاب‌های ۲ و ۲۰ طبقه در حدود ۴ تا ۸ درصد نسبت به توزیع یکنواخت کاهش نشان می‌دهد.

۵- مقایسه‌ی مجموع حداکثر نیروی میراگر بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی در توزیع بهینه با توزیع یکنواخت میراگر ویسکوز نشان می‌دهد که استفاده از روش بهینه‌سازی منجر به کاهش مجموع حداکثر نیروی میراگر و در نتیجه هزینه‌ی تامین میراگر ویسکوز می‌شود، بطوریکه در مثال عددی موردنظر، مقدار کاهش برای سازه‌های مختلف در محدوده‌ی ۸/۵ تا ۲۴ درصد است.

۶- با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که روش پیشنهادی برای توزیع بهینه‌ی میراگرها در طراحی بر اساس جابجایی مستقیم سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز، روشی موثر در کاهش هزینه‌ی تامین سیستم کنترل با حفظ عملکرد سازه است و در طراحی کاربردی سازه‌های کنترل شده می‌تواند به‌طور موثرتری برای انتخاب بهینه‌ی میراگرها مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Priestley, MJN. (1993). *Myths and fallacies in earthquake engineering- Conflicts between design and reality*. Bulletin of NZSEE, 26(3): 329-341.
- [2] Leelataviwat, S. Goel, SC and Stojadinovic, B. (1999). *Toward performance-based seismic design of structures*. Earthquake Spectra, 15(3): 435-461.
- [3] Pettinga, JD. and Priestley, MN. (2005). *Dynamic behaviour of reinforced concrete frames designed with direct displacement-based design*. Journal of Earthquake Engineering, 9(2): 309-330.
- [4] Sullivan, TJ. Priestley, MJN. and Calvi, GM. (2005). *Development of an innovative seismic design procedure for frame-wall structures*. Journal of Earthquake Engineering, 9: 279-307.
- [5] Sullivan, TJ. Priestley, MJN and Calvi, GM. (2006). *Direct displacement based design of frame-wall structures*. Journal of Earthquake Engineering, 10:91-124
- [6] Kowalsky, MJ. (2002). *A displacement-based approach for the seismic design of continuous concrete bridges*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31:719-747.
- [7] Macedo, L. and Castro, J. (2012). *Direct displacement-based seismic design of steel moment frames*. In *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal: 59-66.
- [8] Della Corte, G and Mazzolani FM. (2008). *Theoretical developments and numerical verification of a displacement based design procedure for steel braced structures*. In *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [9] Della Corte, G. Landolfo, R and Mazzolani, F. (2010). *Displacement-based seismic design of braced steel structures*, *Steel Construction*. Steel Construction, 3(3):134-139.
- [10] Sullivan, TJ. (2013). *Direct displacement-based seismic design of steel eccentrically braced frame structures*. Bulletin of Earthquake Engineering, 11(6): 2197-2231.

- [11] Kim, J. and Choi, H. (2006). *Displacement-based design of supplemental dampers for seismic retrofit of a framed structure*. Journal of Structural Engineering, 132(6): 873-883.
- [12] Lin, YY. Chang KC. and Chen CY. (2008). *Direct displacement-based design for seismic retrofit of existing buildings using nonlinear viscous dampers*. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(3):535-552.
- [13] Cardone, D. Dolce, M. and Palermo, G. (2008). Force-based vs. direct displacement-based design of buildings with seismic isolation. *In 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China: 12-17.
- [14] Cardone, D. Palermo, G. and Dolce, M. (2010). *Direct displacement-based design of buildings with different seismic isolation systems*. Journal of Earthquake Engineering, 14(2): 163-191.
- [15] Cardone, D. Dolce, M. and Palermo, G. (2009). *Direct displacement-based design of seismically isolated bridges*. Bulletin of Earthquake Engineering, 7(2): 391-410.
- [16] Lin, YY. Tsai, MH. Hwang, JS. and Chang, KC. (2003). *Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems*. Engineering Structures, 25(1): 25-37.
- [17] Sullivan, TJ. and Lago, A. (2012). *Toward a simplified direct DBD procedure for the seismic design of moment resisting frames with viscous dampers*. Engineering Structures, 35:140-148.
- [18] Hwang, J. S. Lin, W. C. and Wu, N. J. (2010). *Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings*. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 9(1): 28-41
- [19] Landi, L. Conti, F. and Diotallevi, P. P. (2015). *Comparison of different methods for viscous damper placement in existing frame buildings*. Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management.
- [20] Lavan, O. and Amir, O. (2014). *Simultaneous topology and sizing optimization of viscous dampers in seismic retrofitting of 3D irregular frame structures*. Earthquakes Engineering Structures, 1325-1342
- [21] Whittle, J. K. Williams, M. S. Karavasilis, T. L. and Blakeborough, A. (2012). *A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design*. Journal of Earthquake Engineering, 16(4): 540-560.
- [22] Shanshan, W. (2017). Enhancing seismic performance of tall building by optimal design of supplemental energy-dissipation devices. Degree of doctor of philosophy. University of California, Berkeley.
- [23] Felipe, S. (2017). Viscous damper optimization in multi storey building structures. Degree of Master of Science in engineering. University of Santiago de Chile
- [24] Lin, T.K. Hwang, J. S. and Chen, K.H. (2017). *Optimal distribution of damping coefficients for viscous dampers in buildings*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 17(4): 1750054.
- [25] Puthanpurayil, A.M. Edmonds, A.J. Jury, R.D. and Sharpe, R.D. (2017). Simplified vs. optimal techniques for viscous damper design: some preliminary observations. *In NZSEE Conference*. Wellington
- [26] Seleemah, A.A and Constantinou, M.C. (1997). *Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers*. Buffalo, NCEER-97-0004, 302 Pages. <<http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/>>.
- [27] Ras, A. and Boumechra, N. (2016). *Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design*. Alexandria Engineering Journal, 55: 2821-2832.
- [28] Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing CO., Inc. Reading, Mass.
- [29] Baker, J.E. (1987). Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. *In proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms*, 2:14-21
- [30] Starkweather, T. Whitley, D. and Mathias. K. (1990). *Optimization using distributed genetic algorithms*. Springer-Verlag Notes in Computer Science, 496: 85-176
- [31] Jenkins, W.M. (2002). *A decimal-coded evolutionary algorithm for constrained optimization*. Computer and Structure, 79:1625-1634.
- [32] *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation*. Version 2.4.5. (2013). Berkeley: Pacific earthquake engineering centre, University of California. <http://opensees.berkeley.edu/>.