

الگوی نوین هموارشده‌ی توزیع برش پایه برای طرح لرزه‌ی قاب‌های خمشی مستوی

محسن شهروزی* (استادیار)

امیرعباس راحمی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۳، ص. ۳۳-۴۲

اعمال نیروهای روش ایستای معادل، توزیع خاصی از سختی و مقاومت به سازه تحمیل می‌کند که پاسخ‌های لرزه‌ی به آن وابسته‌اند. این نوشتار آشکار می‌سازد که با تغییر این الگو می‌توان طراحی قاب‌های فولادی تحت بارگذاری ایستای معادل را برای تغییر توزیع سختی جانبی و تغییر مکان یا گریز طبقات و حتی نقطه‌ی شروع خرابی هدایت کرد. بدین منظور الگوی توزیع برش پایه به‌عنوان بارهای معادل به‌صورت ترکیبی از چند الگوی جدید چنان معرفی می‌شود که با تغییر ضرایب ترکیب بتوان الگوی فعلی آیین‌نامه‌ی و یا سایر الگوهای کاربردی قابل پیشنهاد به طراحان را بسته به اینکه کدام‌یک از بهینه‌یابی نتیجه شود، ارائه کرد. سپس با کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله: جستجوی هماهنگی، اتفاق مورچگان و شیوه‌ی شاخه - کران در قالب یک بهینه‌یابی جامع، ضرایب مناسب ترکیب مذکور به‌طور خودکار به دست می‌آید. اجرای این مسئله‌ی پیچیده‌ی گسسته - پیوسته در مثال‌های قاب خمشی منجر به الگوهای جدید هموار ولی متفاوت از بار معادل آیین‌نامه‌ی شد که طراحی مقاطع قاب‌ها تحت آن علاوه بر توزیع یکنواخت تر گریز طبقات در تحلیل‌های خطی توانست محل بیشینه‌ی تنش ستون‌ها و شروع خرابی را به طبقات بالاتر و ایمن‌تر نسبت به طرح‌های آیین‌نامه‌ی فعلی منتقل کند.

واژگان کلیدی: طراحی لرزه‌ی، الگوی هموارشده‌ی بار جانبی، بهینه‌یابی فراابتکاری مختلط، قاب فولادی.

۱. مقدمه

طرح ایستای معادل با الگوی توزیع ارتفاعی نیروهای جانبی به‌صورت شبه مثالی در بسیاری از ضوابط لرزه‌ی از جمله آیین‌نامه‌ی طرح لرزه‌ی ایران،^[۱] ارائه و پذیرفته شده است. لیکن پژوهش‌های پیشین مؤید این واقعیت است که این نیروها معرف نیروهای واقعی تجربه‌شده در طی زلزله نیستند بلکه فقط روشی ساده‌شده برای اعمال توزیع سختی و مقاومت خواسته‌ی آیین‌نامه در اسکلت‌های ساختمانی به شمار می‌روند. در مطالعه‌ی با آزمون تعدادی از الگوهای بار جانبی نتیجه گرفته شد که برخلاف الگوی آیین‌نامه‌ی UBC برخی موارد دیگر می‌توانند به توزیع یکنواخت شکل‌پذیری و کاهش بیشینه‌ی آن منجر شوند.^[۲] پژوهشگرانی نیز با اعمال یک ضریب برای هر طبقه، اصلاح الگوی آیین‌نامه را پیشنهاد کردند.^[۳] همچنین در پژوهشی دیگر توزیع بارهای جانبی بر مبنای پاسخ‌های غیرخطی سازه ارائه شده است^[۴] در پژوهشی نیز برای مدل‌های برشی سازه‌های چندطبقه، تحلیل غیرخطی تحت گروهی از زلزله‌های شدید انجام و الگویی ارائه شد که تابعی از دوره تناوب سازه و شکل‌پذیری هدف است.^[۵] همچنین در مطالعه‌ی دیگر با کمینه‌سازی تفاوت بین نیروهای القایی زلزله و نیروهای مورد استفاده برای طرح لرزه‌ی، ضمن کاربرد

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۴/۳، اصلاحیه ۱۳۹۱/۹/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۵

روش محک بهینه‌یابی، نظریه‌ی گریز یکنواخت برای طراحی مناسب‌تر لرزه‌ی نسبت به روش آیین‌نامه ارائه شد.^[۶] پژوهشگرانی نیز ضمن بررسی ساختمان‌های کوتاه و میان‌مرتبه‌ی بتنی اذعان داشتند که توزیع طیفی برش پایه نسبت به توزیع آیین‌نامه‌ی می‌تواند به افزایش یکنواختی پاسخ‌ها و کاهش شاخص خرابی کل منجر شود.^[۸] آنان برای کاهش تمرکز خرابی و بهبود رفتار لرزه‌ی، اضافه‌کردن اهدافی نظیر یکنواختی پاسخ جایجایی را به مسائل کمینه‌سازی وزن توصیه کردند. پژوهشگران دیگری نیز با بررسی طرح‌های بهینه‌ی مقاطع قاب فولادی تحت چند الگوی بار جانبی با تحلیل ایستا نشان دادند که طرح حاصل از اعمال الگوی استاندارد ۲۸۰۰ حتی با مصرف مصالح بیشتر نسبت به طرح حاصل از برخی الگوهای دیگر، غالباً دارای نقطه‌ی شروع خرابی در طبقات پایین است.^[۹] ایشان کاربرد جستجوی هماهنگی را برای این‌گونه مسائل مطرح کردند و با فرمول‌بندی پیوسته‌ی ضرایب توزیع برش پایه، الگوهای بهینه‌ی متفاوت از الگوی آیین‌نامه‌ی به دست آوردند که در طبقات میانی کمابیش یکنواخت است.^[۱۰]

در این مطالعه، فرمول‌بندی جدیدی برای مسئله‌ی بهینه‌یابی ارائه شده است که الگوی نهایی به‌صورت هموارشده از ترکیب چند الگوی ساده و نیز طرح بهینه‌ی مقاطع سازه را همزمان با آن به دست آورد. برای هر یک از این دو بخش، بهینه‌یابی

از الگوریتم‌هایی در زمره‌ی روش‌های فراابتکاری با قابلیت جستجوی سراسری و همگرایی مناسب مسئله به صورت ترکیبی استفاده شده است. سپس طی چند مثال طرح بهینه‌ی اخیر با طرح بهینه‌ی ابعادی تحت توزیع برش پایه به شیوه‌ی استاندارد طراحی با برآورد پاسخ‌های تنش و تغییرمکان مقایسه و تفسیر شده است تا نهایتاً مزایای نسبی الگوهای جدید بر الگوی آیین‌نامه‌ی فعلی مشخص شود.

۲. روند توزیع بارگذاری جانبی در روش طیفی و استاتیکی معادل

در روش دینامیکی طیفی سازه با فرض رفتار کشسان خطی به کمک پاسخ بیشینه از تمام مدهای ارتعاشی تحلیل می‌شود. پاسخ بیشینه‌ی هر مد متناظر با دوره‌ی تناوبش از طیف استاندارد طراحی استخراج می‌شود. توزیع ارتفاعی نیروهای جانبی در روش تحلیل دینامیکی طیفی طبق رابطه ۱ است:

$$F_{ij} = \frac{m_i \varphi_{ij}}{\sum_{q=1}^N m_q \varphi_{qj}} V_j \quad (1)$$

که در آن، φ_{ij} دامنه‌ی زامین مؤلفه‌ی مدی ارتعاش در طبقه‌ی i ام، m_i جرم متمرکز لرزه‌یی در سطح طبقه‌ی i ام، F_{ij} نیروی افقی وارد بر آن طبقه، و V_j برش پایه در مد j ام هستند. در این شیوه نیروهای بیشینه‌ی طبقه و برش در هر مد به کمک یکی از روش‌های آماری روش ترکیب مربع کامل (CQC) یا روش جذر مجموع مربعات (SRSS) با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

روش استاتیکی بار جانبی آیین‌نامه‌یی: توزیع‌های نیروی لرزه‌یی جانبی در آیین‌نامه‌های ساختمانی مبنی بر فقط یک شکل فرضی ارتعاش دینامیکی سیستم کشسان جرم متمرکز چند درجه‌ی آزادی است: [۱۲]

$$F_{i1} = \frac{m_i \varphi_{i1}}{\sum_{q=1}^N m_q \varphi_{q1}} V_1 \quad (2)$$

برش پایه‌ی رابطه ۲ برای سازه‌ی منظم با استفاده از رابطه ۳ توزیع می‌شود که تا حدودی مشابه شکل مد اول یک سیستم با سختی و جرم منظم در ارتفاع است:

$$\varphi_{i1} = \frac{h_i^k}{H} \quad (3)$$

که در آن، H ارتفاع کل سازه و h_i ارتفاع سطح تراز طبقه‌ی i ام از تراز پایه است. تفاوت توزیع نیروهای حاصل از چنین الگوی بار استاتیکی معادل در آیین‌نامه‌های گوناگون در مقدار توان k می‌باشد. در استاندارد ۲۸۰۰ ایران، روند طراحی مبنی بر $k=1$ صورت می‌پذیرد که مشابه توزیع مثلثی برش پایه‌ی V به‌عنوان بارهای استاتیکی جانبی F_i طبق رابطه ۴ است:

$$F_i = \frac{m_i h_i}{\sum_{q=1}^N m_q h_q} V \quad (4)$$

البته کاربرد فقط یک شکل مدی به‌جای تحلیل با تمام مدها، تقریبی در روش مذکور وارد می‌کند که برای کاهش آن یک نیروی متمرکز اضافی در تراز بام طبق استاندارد ۲۸۰۰ پیش‌بینی شده است. [۱]

۳. فرمول‌بندی مسئله طرح و بهینه‌یابی الگوی توزیع

ارتفاعی برش پایه

آنچه که واقعاً در رفتار لرزه‌یی سازه تحت زلزله‌های قوی اثر می‌گذارد، نحوه‌ی توزیع سختی و مقاومت لرزه‌یی در سازه است. آیین‌نامه‌ها با توصیه‌ی یک الگوی بارگذاری خاص، در واقع توزیع سختی و مقاومت خاصی را بر سازه تحمیل می‌کنند که چنین توزیعی، چگونگی رفتار لرزه‌یی سازه را تعیین خواهد کرد. بنابراین، لازم است در عین بررسی الگوهای متفاوت بارگذاری به نحوه‌ی توزیع مقاومت و سختی که در اثر بارهای دینامیکی بر سازه وارد می‌شود نیز توجه کرد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از بهینه‌یابی دوجنشی، به‌طور هم‌زمان علاوه بر تولید الگوهای متفاوت بارگذاری، طرح بهینه‌ی سازه تحت تحلیل استاتیکی با چنین الگویی نیز تعیین می‌شود. بررسی عملکرد سازه با انجام تحلیل دینامیکی طیف استاندارد آیین‌نامه در روند بهینه‌یابی صورت می‌پذیرد. متغیرهای تعیین الگو با رابطه‌ی ۵ به نیروهای وارد بر طبقات تبدیل می‌شوند:

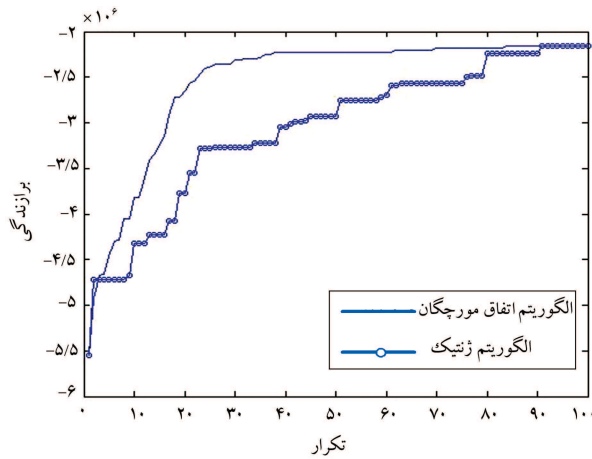
$$F_i = \frac{r_i}{\sum_{q=1}^N r_q} V \quad (5)$$

در این رابطه، r_i ضرایب برش پایه در بازه‌ی $(0, 1)$ و به عبارتی، متغیرهای تعیین الگو است. چنین روندی، توزیع‌های ممکن را پوشش می‌دهد و قابلیت تولید توزیع ارتفاعی نیروی جانبی معادل روش تحلیل استاتیکی آیین‌نامه و روش تحلیل دینامیکی طیفی را نیز دارد. در بخش دوم، بهینه‌یابی مقاطع متناسب با الگوی مورد آزمون بخش نخست مطرح می‌شود که متغیرهای طرح آن همان شماره‌ی مقاطع قاب هستند. قیود مسئله به بهینه‌یابی ضوابط و محدودیت‌های آیین‌نامه‌یی روی نتایج تغییرمکانی و تنش‌ی حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی را شامل می‌شوند. تابع هدف در غالب مسائل استاتیکی کمینه‌سازی وزن اعضای قاب یا هزینه‌ی فولاد مصرفی است، لیکن در این مسئله به تغییر طبقه‌ی دارای اعضای بحرانی برای هدایت خرابی قاب طی بارگذاری لرزه‌یی نیز توجه شده است. فرض می‌شود طبقه‌یی که ستون دارای بیشینه‌ی تنش در طراحی به روش تنش مجاز در آن واقع است، در اولویت خرابی تحت بارهای دینامیکی قرار دارد. مطلوب است که تا حد امکان بیشینه‌ی تنش‌های ستون‌ها در طبقات فوقانی واقع شوند تا فروریختگی کلی سازه به تعویق افتد.

بدین ترتیب فرمول‌بندی مسئله بهینه‌ی نامقید معادل با تعریف تابع برازندگی در رابطه‌ی ۶ معرفی می‌شود که اهمیت نسبی یک طرح (کیفیت جواب‌ها) را مشخص می‌کند. شایستگی یا برازندگی بالاتر دلالت بر طرح بهتر دارد. به‌عبارت دیگر، تابع برازندگی قرینه‌ی تابع هدف هزینه‌یی (f) است که با تابع جریمه‌ی رابطه‌ی ۶ ($\varphi(\underline{X})$) بر حسب بردار متغیرهای طرح، $\underline{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ ، بیان می‌شود:

$$\text{Max.Fitness}(\underline{X}) = -\varphi(\underline{X}) = -f(\underline{X})(1 + \sum_l K p_l C_l) \quad (6)$$

که در آن، C_l معرف عددی بدون بعد به‌عنوان میزان عدم ارضای قید l ام است، که شامل قیدهای تنش و جابجایی طیفی آیین‌نامه‌یی است [۱۱] و در صورت ارضاء آنها، مقدار صفر اختیار می‌کند. ضریب جریمه‌ی متناظر چنین قیودی ۱۰ انتخاب شده ضمن آنکه در این پژوهش اثر اولویت بروز خرابی در طبقه‌ی آخر با یک ضریب پاداش در تابع برازندگی رابطه‌ی ۶ به‌عنوان C_1 اعمال شده است.



شکل ۲. مقایسه‌ی نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک و اتفاق مورچگان در اجرای نمونه‌ی بهینه‌یابی مقاطع سازه‌یی.

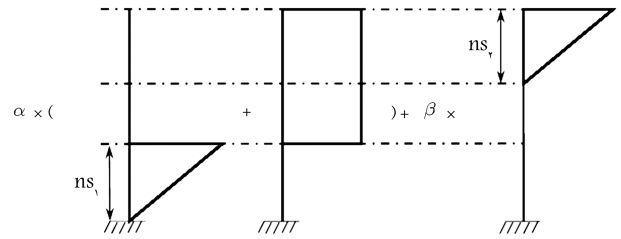
متغیرهای پیوسته و گسسته، الگوریتم جستجوی هماهنگی به دلیل سادگی و سرعت بالا در میان روش‌های فراابتکاری موجود در نظر گرفته شد.

بخش دوم، یعنی بهینه‌یابی ابعادی، اساساً با فهرست شماره‌های گسسته‌ی مقاطع کار می‌کند. در میان روش‌های فراابتکاری بهینه‌یابی، الگوریتم ژنتیک و اتفاق مورچگان که مناسب مسائل گسسته هستند، در نظر گرفته شدند. مقایسه‌ی صورت‌گرفته روی نمودار همگرایی این دو شیوه، که نمونه‌ی بی از آن در شکل ۲ آمده است، نشان داد که سرعت همگرایی در بهینه‌یابی به روش اتفاق مورچگان به نحو چشمگیری بالاتر از الگوریتم ژنتیک است و نظر به اهمیت این امر در مسئله‌ی زمان‌بر این پژوهش، الگوریتم اتفاق مورچگان برای بخش دوم بهینه‌یابی انتخاب شد. شکل ۳، روند بهینه‌یابی ترکیبی مسئله‌ی حاضر را در قالب گردش نما نشان می‌دهد.

۱.۴. روش جستجوی هماهنگی

این روش با الهام از طریقه‌ی ساخت موسیقی پیشنهاد شده است که نوازنده جهت ایجاد هماهنگی بهتر موسیقی از آن استفاده می‌کند.^[۱۲] ابتکار نواختن موسیقی جهت یافتن هماهنگی خوشایند مشابه فرایند جستجوی جواب بهینه در مسائل طراحی است.^[۱۳]

هر آهنگ شامل تعداد یکسانی نغمه‌ی موسیقی فرض می‌شود. آهنگ‌ساز حافظه‌ی محدودی از آخرین آهنگ‌های ساخته‌ی خود را دارد و فرایند جستجوی آهنگ بهتر را با شروع از یک چنین دسته‌ی آهنگ اولیه آغاز می‌کند. ابتدا هر نغمه از آزمون جدید آهنگ را با احتمال P_{hmer} از میان نغمه‌های متناظر در حافظه‌ی آخرین آهنگ‌ها انتخاب و در غیر این صورت به‌طور تصادفی ایجاد می‌کند. سپس وی با احتمال P_{par} کوک آن نغمه را جهت یافتن هماهنگی خوش‌آیندتر در بازه‌ی محدودتر bw تنظیم می‌کند. هر آزمون جدید آهنگ که بدین ترتیب تکمیل شود، در صورتی‌که از بدترین آهنگ دسته‌ی موجود شایسته‌تر باشد جایگزین آن خواهد شد. پس از آخرین تکرار این روند با اندازه‌ی ثابت دسته‌ی آهنگ، بهترین عضو مجاز آن به‌عنوان نتیجه‌ی جستجوی هماهنگی ثبت می‌شود.^[۱۴] مطابق گردش نمای شکل ۳، در این پژوهش روندی پیش‌گرفته شده است تا دست کم یک گزینه‌ی که تمام قیود مسئله را ارضاء می‌کند تا انتهای بهینه‌یابی حفظ شود و بهترین عضو مجاز حافظه از میان چنین بردارهایی انتخاب شود. بدین ترتیب در حل نهایی تمام قیدهای آیین‌نامه‌ی طراحی رعایت خواهد شد.



شکل ۱. ترکیب الگوهای پایه برای تعیین الگوی بهینه‌ی توزیع برش پایه.

۱.۳. متغیرهای طرح پیشنهادی برای تولید الگوهای هموارشده‌ی

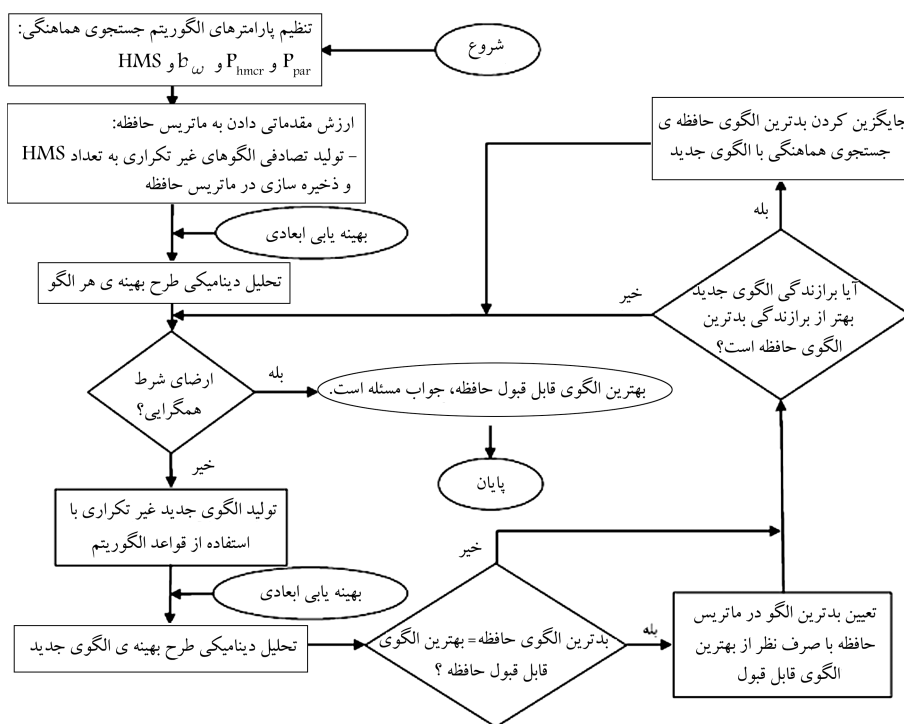
بارگذاری معادل جانبی

توزیع مرسوم برش پایه در استاندارد طراحی ۲۸۰۰ منجر به الگوی بالامثلثی در غالب سازه‌های منظم می‌شود. علاوه بر این، در برخی آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های عملکردی توزیع یکنواخت برش پایه در ارتفاع قاب پیشنهاد شده است که منجر به تأمین سختی بیشتر در طبقات پایین خواهد شد.^[۱] برای تعیین بردار الگوی بارگذاری بهینه، اولین گزینه کاربرد ضرایب جداگانه‌ی توزیع برش پایه در هر طبقه است. این نوع فرمول‌بندی بردار متغیرهای طرح می‌تواند منجر به فضای جستجوی وسیع و الگوهای بار جانبی با تغییرات ناهموار در ارتفاع شود که تفسیر آن برای توصیه به طراحان چندان ساده نیست اگرچه به‌عنوان راهنمایی برای استخراج توزیع هموار مناسب تلقی شود. از جمله در پژوهش‌های اخیر روی قاب‌های خمشی آشکار شد که توزیع بهینه‌ی برش پایه شامل یک بخش یکنواخت در طبقات میانی است که به پیشینه‌ی خود در بام و مقدار صفر در تراز پایه‌ی ساختمان می‌رسد.^[۱۵] در اینجا برای دستیابی به چنین الگوهای هموارشده‌ی بار معادل جانبی، از شیوه‌ی نوین استفاده می‌شود. در این روش ۳ الگوی پایه: بالامثلثی، یکنواخت و پایین‌مثلثی مطابق شکل ۱ با ضرایب α و β با یکدیگر ترکیب می‌شوند. بسته به مقدار این دو ضریب پیوسته و نیز اعداد گسسته‌ی ns_1 و ns_2 الگوی نهایی همواری با ترکیب الگوهای پایه حاصل خواهد شد که در میان حالت‌های گوناگون آن، می‌تواند الگوی بالامثلثی مشابه آیین‌نامه و الگوی کاملاً یکنواخت را نیز ایجاد کند. لیکن انتخاب و تعیین الگوی مناسب در این پژوهش به عهده‌ی الگوریتم بهینه‌یابی توسعه‌یافته خواهد بود، با این ویژگی که کاربرد ضرایب اخیر بخش تعیین الگو در بردار متغیرهای طرح و ابعاد فضای جستجو را بسیار کوچک‌تر و حصول به همگرایی در این مسئله‌ی پیوسته - گسسته را سریع‌تر می‌سازد. بدین ترتیب توصیه‌ی الگوی نهایی به طراح به سادگی معرفی ضرایب اخیر خواهد بود.

۴. الگوریتم ترکیبی برای بهینه‌یابی جامع الگوی بار

معادل جانبی و ابعاد مقاطع سازه به‌طور همزمان

طبق فرمول‌بندی ذکرشده، مسئله‌ی بهینه‌یابی حاضر شامل دو بخش انتخاب الگوی توزیع برش پایه و انتخاب بهینه‌ی مقاطع اعضای سازه برای ارضاء ضوابط آیین‌نامه تحت الگوی بار تعیین‌شده در بخش نخست است. ترکیب این دو بخش عملاً بهینه‌یابی مسئله‌ی حاضر را زمان‌بر و پیچیده‌تر از بهینه‌یابی مقاطع در سایر مسائل می‌سازد و نیازمند انتخاب روش‌های با سرعت همگرایی بالاتر است. ضمناً این روش‌ها باید در عین حال قابلیت جستجوی بهینه‌ی فراگیر را داشته باشند که خاصیت غالب روش‌های فراابتکاری^۱ است. لذا برای جستجو در فضای بخش نخست شامل



شکل ۳. گردش نمای الگوریتم بهینه‌یابی ترکیبی.

الگوریتم مورچگان به‌کار می‌رود تا با تکمیل هر سفر از این مسیرها مدل‌سازیهی با مقاطع متناظر تولید شود و طی الگوریتم کم هزینه‌ترین آنها به ازاء هر دسته متغیرهای الگوی بار تعیین شود. اگر به تعداد ۱۵ تکرار حل بهینه تغییر و بهبود نیابد، کل جمعیت فعلی سفرها مجدداً با مقادیر تصادفی بازسازی می‌شود تا توانایی الگوریتم در عبور از بهینه‌های موضعی افزایش یابد. عدم بهبود تا ۳۰ تکرار موجب خروج از زیر روال بهینه‌یابی خواهد شد.

۲.۴. شبیه‌سازی اتفاق مورچگان برای بهینه‌یابی ابعادی

الگوریتم اتفاق مورچگان بر مبنای رفتار طبیعی و کاوشگرانه‌ی مورچه‌های واقعی، اولین بار در سال ۱۹۹۱ پیشنهاد شد.^[۱۵] اصل بنیادی مورد استفاده در بهینه‌یابی اتفاق مورچگان، استفاده از خاصیت اثر ردپا (ماده‌ی فرومون^۳) باقیمانده است. اثر ردپای به‌جای‌مانده نوعی ارتباط غیرمستقیم به‌واسطه‌ی تغییرات محیط را بیان می‌کند. مورچه‌ها توسط چنین ارتباطی تصمیم بر انتخاب موقعیت بعدی برای حرکت می‌گیرند. سیستم اثر ردپای به‌جای‌مانده (τ) مبنی بر بازخورد مثبت (تقویت ردپا در مسیر توسط مورچه‌های گذرنده) و منفی (تبخیر و کاهش مداوم ردپا به نسبت تبخیر ρ) است. در بسیاری از الگوریتم‌های مورچگان، پارامتری به نام جذابیت ظاهری (η) برای هدایت کاوش هر مورچه به هنگام انتخاب ایستگاه بعدی حین تکمیل سفرش استفاده می‌شود. یک سفر، معادل یک طرح برای سازه است. در این الگوریتم قانون انتخاب بر اساس احتمال p_{ij} طبق رابطه‌های ۷ و ۸ به‌کار گرفته می‌شود:

$$p_{ij} = \begin{cases} \arg \cdot \max(\tau_{ij} \eta_{ij}^\gamma) & , q > q_0 \\ \frac{\tau_{ij} \eta_{ij}^\gamma}{\sum \tau_{ii} \eta_{ii}^\gamma} & , q \leq q_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau \quad (8)$$

که در این روابط، τ_{ij} اثر ردپای به‌جای‌مانده و $\Delta\tau$ میزان افزایش آن در هر گام t, ρ نسبت تبخیر ردپا و η_{ij} جذابیت ظاهری مسیر قابل انتخاب توسط یک مورچه‌ی مجازی است. q یک عدد تصادفی است که بین ۰ و ۱ تولید می‌شود و q_0 آستانه‌ی بین انتخاب قطعی - تصادفی در رابطه‌ی ۷ است.

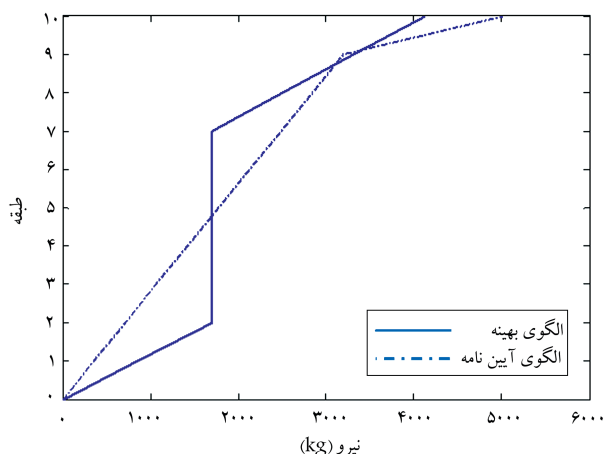
در این پژوهش، فهرست مقاطع قابل اختصاص براساس سطح مقطع مرتب و شماره‌گذاری می‌شوند. سپس این متغیرها به‌عنوان مسیرهای قابل انتخاب توسط

۳.۴. تدقیق بهینه‌یابی ابعادی با جستجوی محلی به روش شاخه و کران

شیوه‌ی اتفاق مورچگان، قادر به یافتن نقاط نزدیک بهینه در کل فضای جستجو است، ولی ممکن است با توجه به شدت زیاد فرومون روی مسیرها نتواند همسایگی جواب‌های بهینه‌ی یافته‌شده را به خوبی بررسی کند. لذا انجام یک عملیات جستجوی محلی با روش شاخه و کران حول بهینه‌ی فعلی، به الگوریتم اتفاق مورچگان در پژوهش حاضر اضافه شده است.

روش شاخه و کران نوعی روش شمارش ارتقاء یافته است که در آن بیشتر نقاط غیرقابل قبول رد می‌شوند. این روش فقط برای بهینه‌یابی محلی و کاوش در محدوده‌ی کوچکی از فضای جستجو و به عبارت دیگر در یافتن بهترین جواب حول جواب فعلی کارآمد بوده و جوابی که توسط الگوریتم مورچگان به‌دست می‌آید، برای بررسی بیشتر همسایگی‌هایش به داخل حلقه‌ی بهینه‌یابی شاخه و کران ارسال و طرح بهینه مطلق در فضای محدود حول بهینه‌ی فعلی جستجو و تعیین می‌شود.

در مسائل طراحی سازه، وقتی که هدف به‌کمینه‌رساندن تابع هزینه و ضرایب متغیرها در تابع هزینه مثبت باشد، مقدار اولیه‌ی تمامی متغیرها برابر کم‌ترین مقدار از مقادیر موجود خواهد بود. به عبارت دیگر، روش شاخه - کران با جوابی که کم‌ترین



شکل ۴. مقایسه‌ی الگوی الگویی بهینه و الگوی آیین نامه (مدل ۱۰st).

جدول ۴. نتایج بهینه‌ی متغیرهای تعیین الگو (مدل ۱۰st).

α	β	ns_1	ns_2
۰٫۶۵	۰٫۹۲	۲	۳

دوم، دو قاب ۱۲ طبقه با تعداد دهانه‌های ۱ و ۳ در نظر گرفته شده‌اند (مدل‌های ۱۰st، ۱۵st، ۱۲st-۱ و ۱۲st-۳). برای هر مثال فهرست مقاطع قابل انتخاب اعضای قاب خمشی فولادی از نوع IPB هستند. ساختمان‌ها با کاربری مسکونی طبق مقررات ملی و استاندارد ۲۸۰۰، در منطقه با لرزه‌خیزی بالا و خاک نوع III قرار دارند. به منظور مقایسه‌ی بهتر، ارتفاع طبقات در قاب‌ها یکسان و برابر ۳ متر و ابعاد دهانه‌ی طولی ۵ متر فرض شده‌اند.

مشاهده‌ی نتایج شکل ۴ در مثال ۱۰ طبقه، تفاوت آشکاری بین الگوی توزیع برش پایه‌ی حاصل از بهینه‌یابی حاضر با الگوی استاندارد ۲۸۰۰ را نشان می‌دهد. اگرچه امکان تولید الگوی آیین‌نامه‌ی با تغییر این ضرایب وجود داشت، ولی طی بهینه‌یابی حاصل نشد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که توزیع آیین‌نامه‌ی بهینه نیست. طبق جدول ۴، الگوی بهینه‌ی طرح D۱ در ۲ طبقه پایین و ۳ طبقه بالای قاب شامل افزایش مثلثی در طبقات میانی آنها یکنواخت است.

در طراحی این مثال به هر دو روش D۱ (الگو و ابعاد) و D۲ (ابعاد بهینه‌ی تحت الگوی استاندارد) نتایج نرمال‌شده‌ی جابجایی طبقات در شکل ۵ با تحلیل‌های مختلف استخراج شده است. شکل ۶، نتایج متناظر را برای پاسخ جابجایی نسبی (گریز) میان‌طبقه‌ی نشان می‌دهد، که معیار مؤثری در تخمین استعداد خرابی قاب تلقی شده است. [۸] ملاحظه می‌شود که نتایج تحلیل A۱ تحت الگوی بهینه به طور مشابه با تحلیل طیفی A۳ طراحی D۱ را برای ارضاء قید جابجایی با گریز تأیید می‌کنند، ولی تحلیل استاتیکی A۲ تحت الگوی بالامثلثی مقادیر بیشتری برای پاسخ‌های متناظر نتیجه داده است. به عبارت دیگر، در حالی که الگوی بهینه‌ی حاصل از این پژوهش با تحلیل طیفی و برش پایه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ همخوان است طراحی با تحلیل استاتیکی تحت الگوی بار آیین‌نامه منجر به طرحی دست‌بالا

مقدار تابع هزینه را از بین تمام جواب‌ها می‌دهد، شروع شده و در هر گام، عملکرد طرح را بهتر می‌کند.

۵. مدل‌سازی و بررسی نتایج

در مسئله‌ی بهینه‌یابی حاضر، بخش نخست یعنی تعیین الگوی بار، شامل متغیرهای پیوسته است و در آن از الگوریتم جستجوی هماهنگی که برای مسائل پیوسته کارایی مناسبی دارد، برای تعیین متغیرهای الگو با پارامترهای کنترلی طبق جدول ۱ استفاده شده است.

متغیرهای طراحی در بخش دوم، یعنی جستجوی محلی بهینه‌یابی ابعادی با اتفاق مورچگان، گروه‌های اعضای سازه است. تابع هدف (کاهش وزن سازه تحت قیدهای تعادل)، تنش و جابجایی براساس مقررات ملی ساختمان، [۱۱] و ضوابط آیین‌نامه‌ی طرح لرزه‌ی ایران، [۱۲] و نیز قید ترتیب محل بیشینه‌ی تنش در طبقات برای قاب‌های خمشی فولادی در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای کنترلی این بخش بهینه‌یابی مقاطع طبق جدول ۲ انتخاب شده‌اند. در این پژوهش، دو نوع طراحی روی هر مدل سازه صورت گرفته است: بهینه‌یابی همزمان الگوی بار و ابعاد مقاطع (طرح D۱) و دیگری فقط بهینه‌یابی ابعاد مقاطع تحت الگوی ثابت بارگذاری آیین‌نامه (طراحی D۲) است. هر کدام از مدل‌های حاصل سپس با این تحلیل‌ها بررسی و مقایسه شده‌اند: تحلیل استاتیکی با اعمال الگوی توزیع برش پایه‌ی بهینه (تحلیل A۱)، تحلیل استاتیکی با اعمال الگوی توزیع برش پایه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ (A۲)، تحلیل دینامیکی مدل تحت طیف استاندارد ۲۸۰۰ (A۳) و نهایتاً تحلیل تاریخچه‌ی زمانی تحت زلزله‌های جدول ۳ [۱۶] که با طیف آیین‌نامه مقیاس شده باشند (A۴). در نتیجه، ترکیبات مختلف تحلیل روی مدل‌های طراحی شده به دست آمده است که به عنوان نمونه طبق این نمادگذاری، D۱-A۳ به معنی انجام تحلیل طیفی استاندارد برای قاب طرح‌شده با الگوی بهینه‌ی بارگذاری (توزیع جانبی برش پایه در تراز طبقات) است.

در ادامه، چند مثال با عرض و ارتفاع مختلف از قاب‌های خمشی با اتصالات گیردار انتخاب شده‌اند. گروه‌بندی اعضای هر قاب متقارن است. در سری اول، قاب ۱۰ طبقه‌ی ۲ دهانه و قاب ۱۵ طبقه‌ی ۲ دهانه با ارتفاع متفاوت و سپس در سری

جدول ۱. پارامترهای کنترلی روش جستجوی هماهنگی.

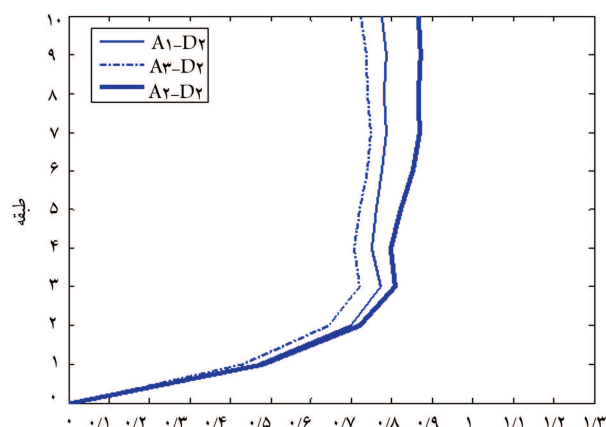
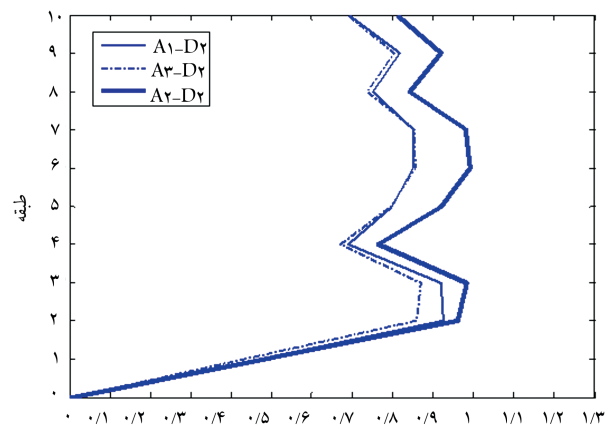
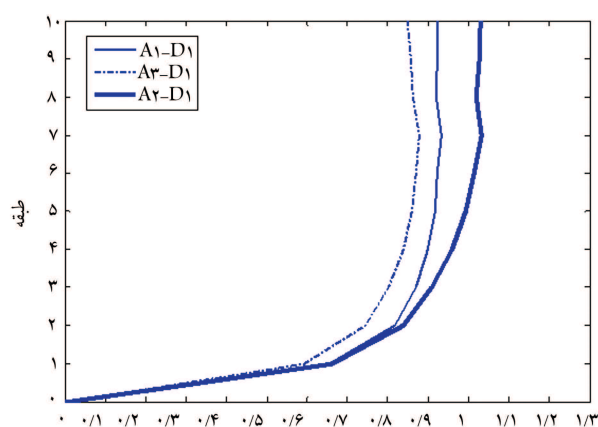
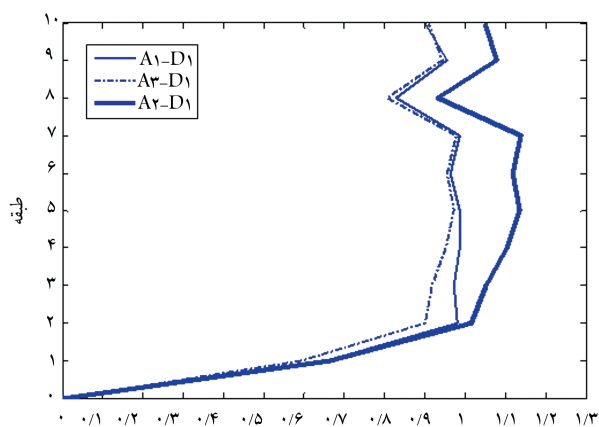
احتمال انتخاب از حافظه	احتمال تنظیم کوک نغمه	پهنای باند
(P_{hmem})	(P_{par})	(bw)
۰٫۹	۰٫۱۵	۰٫۵

جدول ۲. پارامترهای کنترلی الگوریتم اتفاق مورچگان.

تعداد مورچگان	احتمال فرومون	نسبت تبخیر	توان جذابیت ظاهری
مجازی	آستانه q	(ρ)	(γ)
۱۵	۰٫۹	۰٫۱۰	۰٫۲

جدول ۳. زلزله‌های به‌کاررفته جهت راستی‌آزمایی نتایج الگوی بهینه با تحلیل A۴ و شتاب اوج زمین در آنها. [۱۶]

زلزله	Duzce	Imperial	Kobe	Loma Prieta	Mexico	Northridge	Tabas
رخداد	۱۹۹۹	۱۹۷۹	۱۹۹۵	۱۹۸۹	۱۹۸۰	۱۹۹۴	۱۹۹۸
PGA (g)	۰٫۸۲	۰٫۶۰	۰٫۸۲	۰٫۵۱	۰٫۶۲	۰٫۸۳	۰٫۸۵



گريز طبقه نسبت به گريز مجاز

جابجایی طبقه نسبت به جابجایی مجاز

شکل ۶. گریز (جابجایی نسبی) طبقه در تحلیل‌های گوناگون مدل ۱۰st با طراحی D۱ و D۲.

شکل ۵. جابجایی طبقه در تحلیل‌های گوناگون مدل ۱۰st با طراحی D۱ و D۲.

جدول ۵. نتایج نسبت وزنی بهینه‌ی مدل ۱۰st.

جدول ۶. ترتیب طبقه‌ی بیشینه‌ی تنش مدل ۱۰st با تحلیل A۳.

نوع طراحی	ترتیب وقوع									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
D۱	۱۰	۱	۹	۲	۸	۷	۳	۴	۵	۶
D۲	۲	۱	۳	۴	۵	۷	۶	۸	۹	۱۰

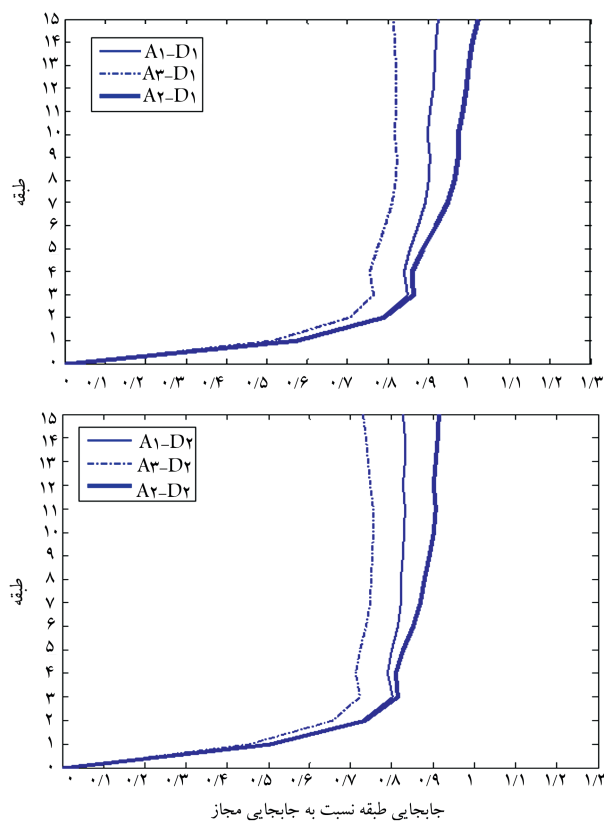
نوع طراحی	معیار وزنی		
	(۱) وزن کل اعضای سازه (ton)	(۲) وزن سازه‌ی مبنا (ton)	نسبت (۱) به (۲) (%)
D۱	۱۸,۶۲	۴۳,۵۲	۴۲,۸
D۲	۲۱,۳۴	۴۳,۵۲	۴۹,۰

طبقه‌ی ۱۰ و در طرح D۲ از طبقه‌ی ۱ شروع می‌شود، که بحرانی‌تر از طبقات بالا برای حفظ پایداری کل سازه به شمار می‌آید. این نتیجه علاوه بر تحلیل طیفی با تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی A۴ هم تأیید شده است (شکل ۷).

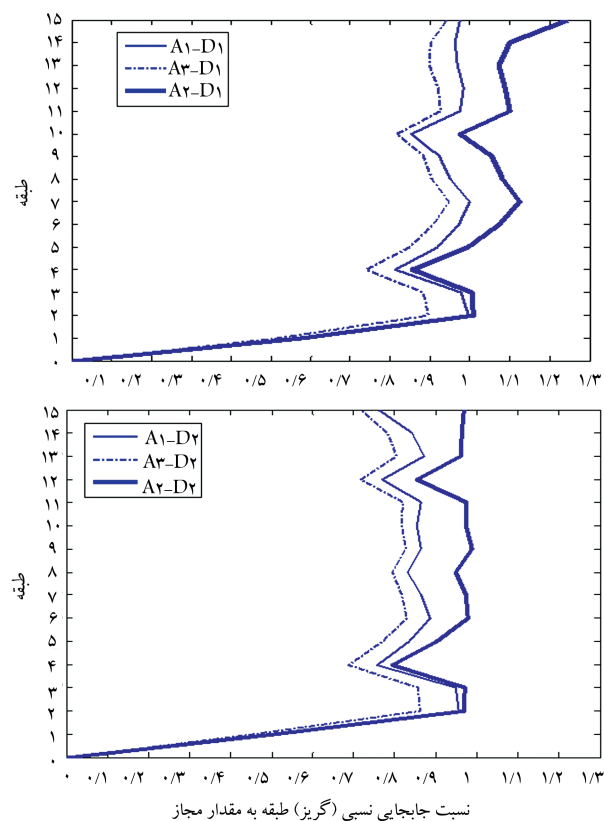
شکل ۸، طرح الگوی بهینه‌ی مثال ۱۵ طبقه را در مقایسه با توزیع آیین‌نامه‌ی برش پایه نشان می‌دهد. این الگو نیز مشابه مثال ۱۰ طبقه در طبقات میانی یکنواخت است و افزایشی در ۴ طبقه‌ی نزدیک بام دارد و به‌طور خطی در ۴ طبقه‌ی پایین تا مقدار صفر در تراز پی کاهش می‌یابد. نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ در این مثال نیز حاکی از برتری طرح D۱ (الگو و ابعاد) نسبت به D۲ (ابعاد بهینه تحت الگوی استاندارد) از لحاظ نزدیکی به قیود بهینه و در عین حال پراکندگی کم‌تر گریز طبقات است. با وجود افزایش تعداد طبقات در این مثال تفاوت نیروهای جانبی معادل با الگوی آیین‌نامه‌ی در طبقات میانی و پایینی شاخص‌تر شده و شکل الگوی بهینه کاملاً در طبقات وسط میان ۴ طبقه‌ی بالا و ۴ طبقه‌ی پایین به‌طور یکنواخت آشکار شده است.

می‌شود. مقایسه‌ی نسبت وزنی حاصل از طراحی‌های D۱ با D۲ و نیز نزدیک‌تر بودن پاسخ‌های طیفی به مقادیر مجازشان در طرح D۱ نسبت به D۲ مؤید این نتیجه است. اعداد ذکر شده در جدول ۵ حاصل تقسیم وزن‌های بهینه‌ی هر طرح بر یک وزن مبناست. این وزن مبنا برابر وزن کل اعضای قاب در زمانی است که برای هر عضو آن سنگین‌ترین مقطع فهرست موجود انتخاب شود.

با دقت در شکل ۶ می‌توان دریافت که پراکندگی گریز طبقات در طراحی این مثال به روش طراحی D۱ تحت الگوی بهینه‌ی حاضر کم‌تر از مقدار متناظر در طرح D۲ است. از آنجا که یکنواخت‌تر بودن گریز طبقات ممکن است منجر به مشارکت یکنواخت‌تر همه‌ی اعضای سازه در تحمل اثرات بارگذاری جانبی و لرزه‌یی شود، [۱۸] لذا طرح D۱ تحت الگوی بهینه‌ی حاضر مطلوب‌تر از D۲ تحت الگوی استاندارد تلقی می‌شود. جدول ۶، این برتری را از دیدگاه دیگری مطرح می‌کند. شروع خرابی و مفاصل خمیری در محل بیشینه‌ی تنش ستون‌ها خواهد بود که در طرح D۱ از



شکل ۹. جابجایی طبقه در تحلیل‌های گوناگون مدل ۱۵st با طراحی D۱ و D۲.



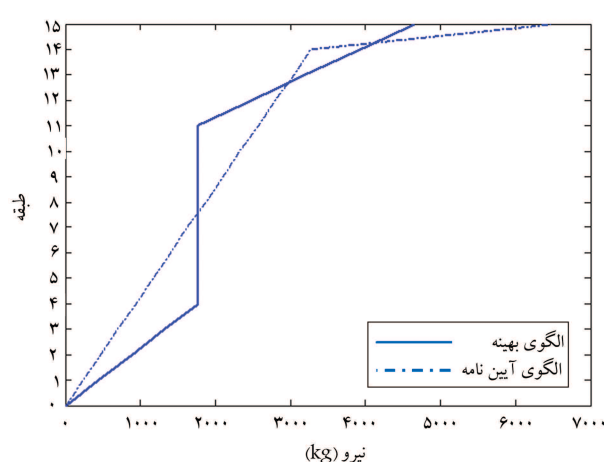
شکل ۱۰. گریز (جابجایی نسبی) طبقه در تحلیل‌های گوناگون مدل ۱۵st با طراحی D۱ و D۲.

۰/۷۶۹	۰/۷۶۹	۰/۹۵۳	۰/۹۵۳
۰/۶۴۶	۰/۴۱۳	۰/۷۶۹	۰/۷۶۹
۰/۸۱۰	۰/۶۶۹	۰/۸۱۰	۰/۸۱۰
۰/۶۱۵	۰/۶۱۵	۰/۵۴۸	۰/۵۴۸
۰/۸۹۳	۰/۵۱۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳
۰/۸۰۰	۰/۵۶۷	۰/۸۰۰	۰/۸۰۰
۰/۸۱۷	۰/۶۲۵	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶
۰/۸۱۷	۰/۶۰۵	۰/۶۴۶	۰/۶۴۶
۰/۸۴۴	۰/۶۴۷	۰/۶۴۱	۰/۶۴۱
۰/۴۶۷	۰/۵۰۸	۰/۵۹۶	۰/۵۹۶
۰/۵۳۰	۰/۵۸۹	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵
۰/۴۰۹	۰/۷۹۱	۰/۵۲۴	۰/۵۲۴
۰/۵۰۸	۰/۶۳۷	۰/۴۸۵	۰/۴۸۵
۰/۹۹۶	۰/۶۳۷	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴
۰/۵۰۸	۰/۹۳۰	۰/۹۳۰	۰/۹۳۰

(ب) طراحی D۲

(الف) طراحی D۱

شکل ۷. محل بیشینه‌ی تنش طبق تحلیل تاریخچه‌ی زمانی A۴ در مدل ۱۰st.



شکل ۸. مقایسه‌ی الگوی بهینه و الگوی آیین‌نامه (مدل ۱۵st).

مطابق شکل ۱۱ و ۱۲، الگوی بهینه برای مثال‌های ۱۲ طبقه با تعداد متفاوت دهانه‌های ۱ و ۳ نیز استخراج شده است، که مشابه قبل در بخش میانی قاب یکنواخت است. جدول ۷، طبقه‌ی شروع مفاصل خمیری براساس تحلیل طیفی را نشان می‌دهد که در طرح D۱ همواره در طبقات بالاتر و در D۲ در طبقات پایینی قاب رخ داده است. نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی مشابه تحلیل طیفی است، جز آنکه در طرح D۲ قاب ۱۲ طبقه‌ی ۱ دهانه بیشینه‌ی تنش را در طبقه‌ی ۳ نشان

جدول ۸. مقایسه‌ی انحراف معیار گریز طبقات در مثال‌های مختلف تحت الگوی بار بهینه و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰.

نوع طراحی	سازه			
	۱۰ طبقه‌ی ۲ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۱ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۳ دهانه	۱۵ طبقه‌ی ۲ دهانه
D۱	۰٫۱۰۶	۰٫۰۸۵	۰٫۱۱۸	۰٫۱۱۰
D۲	۰٫۱۵۶	۰٫۱۱۹	۰٫۱۱۹	۰٫۱۲۶

جدول ۹. درصد وزنی بهینه در مثال‌های مختلف تحت الگوی بار بهینه و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰.

نوع طراحی	سازه			
	۱۰ طبقه‌ی ۲ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۱ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۳ دهانه	۱۵ طبقه‌ی ۲ دهانه
D۱	۴۲٫۸	۴۴٫۶	۴۷٫۲	۵۵٫۴
D۲	۴۹٫۰	۵۱٫۱	۵۰٫۱	۵۷٫۹
وزن مبنا (تن)	۴۳٫۵۲	۳۱٫۷۱	۷۲٫۷۴	۶۵٫۲۸

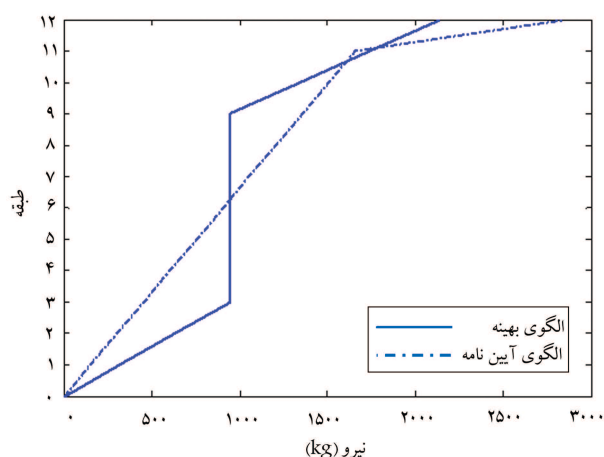
است. طی چندین مثال از قاب‌های خمشی فولادی آشکار شد که با تغییر الگوی فوق، طراحی به سمت توزیع جدیدی از سختی و مقاومت سوق می‌کند که متعاقباً منجر به هدایت پاسخ‌های مؤثر در نحوه‌ی خرابی سازه خواهد شد.

از آنجا که تغییر بار طرح در توزیع مقاطع سازه و این توزیع هم از طریق طراحی طیفی بر بارهای معادل تأثیر می‌گذارد، مسئله‌ی جستجوی الگوی مناسب توزیع برش پایه در قالب بهینه‌یابی دو بخشی و گسسته - پیوسته فرمول‌بندی شد. در این نوشتار فرمول‌بندی خاصی براساس ترکیب چند الگوی اولیه برای ایجاد توزیع هموارشده‌ی ارائه شد که به سادگی معرفی چند ضریب قابل توصیه به طراحان، به عنوان جایگزین الگوی فعلی استاندارد ۲۸۰۰ است. در بخش اول بهینه‌یابی با ویژه‌سازی الگوریتم جستجوی هماهنگی متغیرهای طرح الگوی بار تعیین و بلافاصله بهینه‌یابی مقاطع متناظر این بارگذاری در بخش دوم بهینه‌یابی با کاربرد الگوریتم اتفاق مورچگان و شیوه‌ی شاخه - کران برای مسئله‌ی سازگی حاضر در قالب بهینه‌یابی ترکیبی جامع صورت گرفت. در این پژوهش برخلاف برخی پژوهش‌های پیشین به جای کاربرد مدل ساده‌شده‌ی جرم متمرکز، کل سازه با تمامی اعضای آن در بهینه‌یابی مدل شد تا اثرات توزیع سختی و مقاطع بهتر ارزیابی شود.

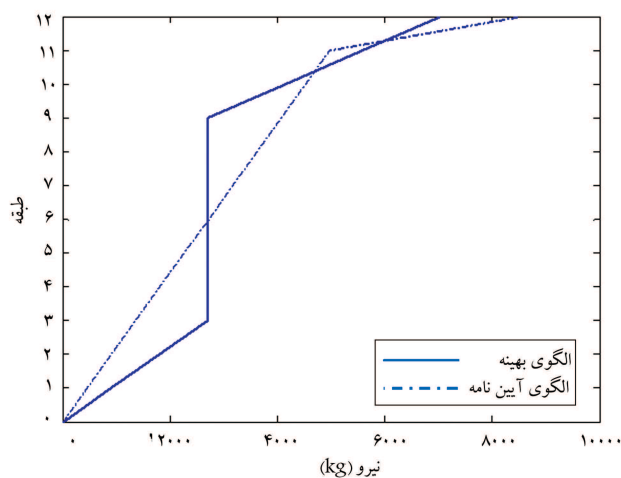
به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر علاوه بر کاربرد الگوریتم اخیر برای بهینه‌یابی همزمان الگوی بار و مقاطع، طرح بهینه‌ی مقاطع تحت الگوی استاندارد ۲۸۰۰ نیز به عنوان طراحی دوم انجام شد. در این راستا چند قاب خمشی فولادی با ارتفاع متفاوت و نیز نسبت عرض به ارتفاع مختلف انتخاب و دو نوع طراحی برای هر مثال اجرا شد. سپس طرح‌های حاصل با کاربرد تحلیل‌های استاتیکی، طیفی و تاریخچه‌ی زمانی مورد ارزیابی قرار گرفت که اهم نتایج آن به این شرح خلاصه می‌شود:

۱. در تمامی مثال‌ها، الگوی بهینه‌ی حاصل شامل یک بخش میانی یکنواخت علاوه بر دو بخش مثلثی شکل در بالا و پایین ارتفاع قاب بود. تفاوت این الگوهای بهینه بر پایه‌ی تحلیل به کمک طیف ۲۸۰۰ با الگوی توزیع برش پایه‌ی استاتیکی معادل این آیین‌نامه قابل ملاحظه است.

۲. با مشاهده‌ی شکل توزیع پاسخ جابجایی در ارتفاع سازه می‌توان دریافت که



شکل ۱۱. مقایسه‌ی الگوی الگوی بهینه و الگوی آیین‌نامه (مدل st-1).



شکل ۱۲. مقایسه‌ی الگوی الگوی بهینه و الگوی آیین‌نامه (مدل st-3).

جدول ۷. محل بیشینه‌ی تنش و تشکیل اولین مفصل خمیری تحت تحلیل A۳.

نوع طراحی	سازه			
	۱۰ طبقه‌ی ۲ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۱ دهانه	۱۲ طبقه‌ی ۳ دهانه	۱۵ طبقه‌ی ۲ دهانه
D۱	۱۰	۱۲	۱۲	۱۵
D۲	۲	۱	۱	۱

می‌دهد. میزان انحراف معیار پراکنندگی گریز طبقات نیز در مثال‌های این نوشتار مطابق جدول ۸ در طراحی D۱ کم‌تر از D۲ به دست آمده که حاکی از برتری الگوی بهینه‌ی حاضر از این دیدگاه است. جدول ۹، وزن بهینه‌ی حاصل در هر مثال را برای این دو روش طراحی مقایسه می‌کند که تحت الگوهای پیشنهادی حاضر در تمامی مثال‌ها اندکی کم‌تر بوده است.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی و اصلاح الگوی توزیع برش پایه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ در ارتفاع به عنوان بارهای معادل تراز طبقات برای طرح لرزه‌ی قاب‌های ساختمانی پرداخته

زلزله‌های با محتوای بسامدی مختلف و مقیاس‌شده با طیف طرح استاندارد مورد تأیید قرار گرفت.

بنابراین اگرچه مقادیر گریز در طراحی با الگوی بهینه در ازای وزن کم‌تر مصالح، اندکی بیشتر از طراحی با الگوی آیین‌نامه‌ی فعلی است در عوض طرح تحت الگوی بهینه اولویت بروز مفاصل خمیری و یکنواختی مشارکت اعضا در تحمل گریز طبقات را بهتر توزیع می‌کند و در پیشگیری از انهدام پیشرونده‌ی کل سازه ناشی از خرابی ستون‌های طبقات پایین مؤثر تلقی می‌شود.

در مجموع، بررسی انجام‌شده الگوی بار معادل آیین‌نامه را برای طرح لرزه‌یی قاب‌های خمشی چندان مناسب نمی‌داند و الگوی جدید حاصل از بهینه‌یابی همزمان الگو و مقاطع برای توزیع ارتفاعی برش پایه را برای طراحی پیشنهاد می‌کند که در طبقات میانی توزیع یکنواختی دارد. همچنین این پژوهش با هدایت محل شروع مفاصل خمیری قاب‌های ساختمانی مستوی به طبقات کم اهمیت‌تر، افزایش ایمنی را از طریق اصلاح بارگذاری معادل ایستا در مراحل طراحی، معرفی و توصیه می‌کند. طبعاً بررسی ادامه‌ی روند خرابی تا انهدام سازه و نیز مطالعه‌ی سازه‌های سه بعدی/نامنظم، نیازمند تحلیل‌های غیرخطی و ترکیب آن با بهینه‌یابی زمان‌بر مسئله‌ی پیچیده متناظر به عنوان زمینه‌ی برای پژوهش‌های آتی خواهد بود.

در طراحی تحت الگوی بهینه، جابجایی‌ها به مقادیر مجاز آن نزدیک‌تر (کم‌تر از مجاز) و وزن سازه‌ی بهینه نیز کم‌تر به دست آمده است لذا از لحاظ اقتصادی نسبت به طراحی با الگوی آیین‌نامه‌ی برتری دارد.

۳. ارزیابی انحراف معیار گریز طبقات و مشاهده‌ی توزیع ارتفاعی آن، غالباً یکنواختی بیشتر این پاسخ را در طرح تحت الگوی بهینه نسبت به الگوی بار استاندارد ۲۸۰۰ نشان می‌دهد که مطابق ادبیات فنی موجود با مشارکت بهتر و همزمان اعضا در تحمل گریز با خرابی، حالتی مطلوب‌تر به شمار می‌آید.

۴. روند توزیع گریز در طرح تحت الگوی آیین‌نامه به گریز بیشتری در طبقات پایینی سازه نسبت به طبقات فوقانی منجر شد در حالی که طبقات پایینی در پایداری کلی سازه اهمیت و تأثیر به‌سزایی دارند.

۵. الگوهای بهینه‌ی حاصل در این پژوهش توانست با اعمال نوعی از توزیع سختی در سازه، محل بروز اولین خرابی یا مفاصل خمیری در ناحیه‌ی بیشینه نسبت تنش ترکیبی ستون‌ها را از طبقات پایینی و بحرانی به طبقات بالایی و بام قاب‌های خمشی انتقال دهد و این نوع هدایت خرابی در سازه را با طراحی مناسب‌تر نتیجه دهد. مورد اخیر هم با تحلیل‌های طیفی و هم تاریخچه‌ی زمانی تحت

پانویس‌ها

1. meta-heuristics
2. harmony search
3. Pheromone
4. branch and bound method

منابع (References)

1. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800, Building and Housing Research Center, 3rd Ed. (2005).
2. *International Conference of Building Officials*, Uniform Building Code, UBC (1997).
3. Moghaddam, H. and Esmailzadeh Hakimi, B. "On the optimum design of multistory structures", *3rd International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran (1999).
4. Hosseini, M., Yazdinejad, M.M. and Sarvghad Moghadam, A. "Introducing a story-dependent response modification factor for steel buildings with concentrically braced frames", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada (1-6 August 2004).
5. Chao, S.H., Goel, S.C. and Lee, S.S. "A seismic design lateral force distribution based on inelastic response", *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California (2006).
6. Karami Mohammadi, R., El Naggar, M.H. and Moghaddam, H. "Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings", *International Journal of Solids and Structures*, **41**(22-23), pp. 6597-6612 (2004).
7. Moghaddam, H. and Hajirasouliha, I. "A new approach for optimum design of structures under dynamic excitation", *Asian Journal of Civil Engineering*, **5**(1-2), pp. 69-84 (2004).
8. Ganjavi, B., Vaseghi Amiri, J., Ghodrati Amiri, G. and Razavian Ameri, S.A. "Effect of seismic loading patterns on height-wise distribution of drift, hysteretic energy and damping in reinforced concrete buildings", *Journal of Applied Sciences*, **7**(22), pp. 3431-3441 (2007).
9. Shahrouzi, M. and Rahemi, A.-A. "Effect of lateral loading patterns on seismic design of building frames", *4th Congress on Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No.2800, Tehran (Nov. 2009).
10. Shahrouzi, M. and Rahemi, A.-A. "Redistribution of story failure sequence in steel moment frames", *6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran (2011).
11. AISC-ASD89, *Allowable Stress Design and Plastic Design Specifications for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL (1989).

12. Geem, Z.W., Kim, J.-H. and Loganathan, G.V. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", *Simulation*, **76**(2), pp. 60-68 (2001).
13. Saka, M.P. "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(1), pp. 36-43 (2009).
14. Shahrouzi, M. and Rahemi, A.-A. "Utilizing harmony search for optimization in civil engineering", *5th National Congress on Civil Engineering*, Standard No.2800, Mashhad (May. 2010).
15. Dorigo, M., Colorni, A. and Maniezzo, V. "The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, **26**(1), pp. 29-41 (1996).
16. Pacific Earthquake Engineering Research Center database <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.