مهندسی عمران شریف (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۲۷-۱۳۴، (یادداشت فنی)

Research Note

بهینه‌سازی طراحی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه با استفاده از الگوریتم تقریب سازگار

علیرضا حبیبی * **(دانشیار)**
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
مبین شهریاری (کارشناس ارشد)
حسن رستمی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

هدف از پژوهش حاضر، توسعه‌ی یک الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای روش تقریب سازگار برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های خمشی بتن مسلح است. بدین منظور، طراحی قاب‌های خمشی بتن مسلح به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی فرموله شده است، که در آن متغیرهای طراحی عبارت از ابعاد مقاطع بتنی و مساحت آرماتورها هستند. تابع هدف، هزینه‌ی کل قاب شامل: هزینه‌ی بتن‌ریزی، قالب‌بندی، و آرماتوربندی برای تک‌تک اعضاء سازه است. قیود طراحی براساس آیین‌نامه‌ی طراحی تعریف شده‌اند. در مدل پیشنهادی جهت طراحی بهینه، تابع هدف و قیود طراحی بر مبنای مفهوم تقریب سازگار به طور صریح فرموله و مسئله‌ی اصلی بهینه‌سازی با چند مسئله‌ی بهینه‌سازی ساده جایگزین شده است. هر زیرمسئله ابتدا بر مبنای نتایج تحلیل سازه و تحلیل حساسیت تعریف و سپس با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی حل و نشان داده شده است که الگوریتم پیشنهادی طی فقط چند چرخه‌ی طراحی به همگرایی می‌رسد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی سازه‌یی، تقریب سازگار، تحلیل حساسیت، قاب بتن مسلح.

ar.habibi@uok.ac.ir
mobin_gk2001@yahoo.com
hasan_rostami264@yahoo.com

۱. مقدمه

بتن‌مسلح به‌عنوان پرکاربردترین مصالح سازه‌یی در جهان استفاده می‌شود، به همین دلیل هر نوع پیشرفتی در مقوله‌ی بهینه‌سازی آن می‌تواند منافع اقتصادی قابل توجهی را در سطح خرد و کلان به همراه داشته باشد. آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه بر مبنای روش‌های سنتی طراحی استوارند و مسائل بهینه‌سازی و اقتصاد مهندسی در آن‌ها به طور جدی مورد بحث قرار نگرفته است. به این دلیل ضروری است که روشی مناسب برای بهینه‌سازی فرایند طراحی قاب‌های بتن‌آرمه در آیین‌نامه‌ها گنجانده شود. اگرچه اولین استفاده‌ی عملی از بتن مسلح حدود ۱۴۰ سال پیش بوده است و ایده‌ی اصلی در بهینه‌سازی سازه‌یی به زمان گالیله (حدود ۳۷۰ سال پیش) مربوط می‌شود؛ اما قدمت پژوهش‌ها در مورد طرح بهینه‌ی سازه‌های بتن‌مسلح به ۶ دهه‌ی پیش بر می‌گردد. به همین دلیل بهینه‌سازی ساختمان‌های بتن‌مسلح، زمینه‌ی جدیدی از بهینه‌یابی سازه‌یی به شمار می‌رود. در این راستا در سال ۱۹۶۸، طرح بهینه‌ی قاب‌های بتنی به‌عنوان یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی ریاضی ارائه و از روش حدی برای طراحی اعضاء بتنی استفاده شده و هدف از بهینه‌سازی، کمینه‌کردن هزینه‌ی سازه با توجه به بازتوزیع نیروهای داخلی برای ارضاء شرایط تعادل و سازگاری تغییرشکل بوده است.[۱] در سال ۱۹۶۸، نیز مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن مسلح در قالب یک مجموعه‌ی قیود خطی و یک تابع هدف خطی فرموله شده و سپس، الگوریتم سیمپلکس برای برنامه‌ریزی خطی جهت یافتن طرح بهینه به‌کار رفته است.[۲] فرمول‌بندی قاب بتن مسلح دو بُعدی به‌عنوان یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی و حل آن با روش جهات امکان‌پذیر در سال ۱۹۷۴ ارائه و مشاهده شده است که روش بهینه‌سازی به‌کاررفته، نرخ همگرایی پایینی داشته است.[۳] همچنین در سال ۱۹۸۲، مطالعه‌ی اخیر با جزئیات طراحی بیشتری ادامه پیدا کرده و علاوه بر عرض، ارتفاع و مقدار آرماتورهای طولی مقاطع، آرماتورهای برشی و نقاط قطع آرماتورهای طولی نیز به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند.[۴] در سال ۱۹۸۴، نیز مسئله‌ی طراحی بهینه‌سازی سازه‌های بتن مسلح با استفاده از یک ایده‌ی دو مرحله‌یی و براساس آیین‌نامه‌های آلمانی مطالعه شده و ابتدا یک مسئله‌ی بهینه‌سازی در سطح المان برای به‌دست‌آوردن کمینه‌ی آرماتور موردنیاز برای خصوصیات مقاطع داده‌شده با استفاده از الگوریتم درجه دوم متوالی حل شده و سپس در سطح سازه، عرض و ارتفاع مقاطع اعضاء سازه به منظور کمینه‌سازی هزینه با استفاده از همان الگوریتم تعیین شده است.[۵] همچنین در سال ۱۹۸۷، انجام یک طراحی پر تنش برای سازه‌های بتن مسلح گزارش شده و هزینه‌ی سازه، شامل: هزینه‌های بتن‌ریزی و آرماتوربندی تحت اثر قیود رفتاری و محدودیت‌های آیین‌نامه‌یی و معماری به میزان کمینه رسیده است.[۶] مطالعه‌ی دیگری در مورد

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۷/۸، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۲۴.

طراحی با کمینه‌ی هزینه‌ی سازه‌های بتن مسلح با درنظرگرفتن عرض، ارتفاع، و آرماتورهای طولی مقاطع اعضا به‌عنوان متغیرهای طراحی و براساس آیین‌نامه‌های طراحی استرالیا در سال ۱۹۹۰ انجام شده است.[۷] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، به طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتنی بلندمرتبه پرداخته شده و برای تحلیل قاب سه بعدی از یک قاب دو بعدی معادل استفاده و ابعاد مقاطع و سطح مقطع آرماتورهای تیرها و ستون‌ها به عنوان متغیرهای طراحی در نظرگرفته شده و هزینه‌ی سازه شامل هزینه‌های بتن‌ریزی، آرماتوربندی و قالب‌بندی بوده است.[۸] طراحی بهینه‌ی سازه‌های بتن مسلح چندطبقه با دیوار برشی نیز در سال ۱۹۹۲ مورد مطالعه قرارگرفته و از یک بهینه‌سازی دو مرحله‌یی برای کمینه‌ساختن هزینه‌ی سازه شامل هزینه‌های بتن‌ریزی، آرماتوربندی و قالب‌بندی استفاده شده است.[۹] همچنین در سال ۱۹۹۳، یک روش رایانه‌یی برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های قابی بتن مسلح با روش معیار بهینگی توسعه داده شده[۱۰] و عرض، ارتفاع، و آرماتورهای طولی در تیرها و ستون‌ها به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظرگرفته شده‌و قیود طراحی شامل محدودیت‌های اعمالی روی مقاومت اعضا، تغییرشکل تیر، تغییرشکل جانبی، ابعاد مقاطع، و مقدار آرماتورها طبق استاندارد AC-۳۱۸-۸۹ بوده‌اند. بهینه‌سازی طراحی قاب‌های بتن مسلح سه بعدی نیز در سال ۱۹۹۶ انجام شده[۱۱] و یک روش رایانه‌یی برای طراحی بهینه‌ی سازه‌های اسکلتی بتن مسلح سه بعدی، که اعضایی تحت خمش دو محوره، برش دو محوره، و بارهای محوری داشته‌اند، ارائه شده است. همچنین در سال ۱۹۹۸، الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی قاب‌های بتن مسلح مسطح استفاده شده و روش مذکور توانسته است توزیع گسسته‌یی را برای مقادیر بهینه‌ی آرماتور و اندازه‌ی مقاطع فراهم آورد.[۱۲] در سال ۲۰۰۲ نیز ایده‌ی بهینه‌سازی هیبرید[۱] برای طراحی قاب‌های بتن‌آرمه استفاده و بهینه‌سازی گسسته‌ی سازه‌های بتن‌آرمه براساس ترکیبی مؤثر از روش‌های بهینه‌سازی قطعی[۲] و اتفاقی[۳] انجام و الگوریتم بهینه‌سازی قطعی برای تعیین جزئیات یک مقطع بتن مسلح در حالت ترکیب نیروهای داخلی استفاده شده و الگوریتم بهینه‌سازی اتفاقی برای بهینه‌سازی کل سازه شامل: مصالح، ابعاد المان‌ها، و آرماتورها به‌کار رفته است.[۱۳] همچنین طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن‌آرمه با کنترل خسارت در سال ۲۰۰۴ انجام و یک روش طراحی با استفاده از مفهوم کنترل خسارت اعضا و نگه‌داشتن آن‌ها در محدوده‌ی مجاز ارائه و برای المان‌های سازه‌یی تحت تأثیر زلزله‌های خفیف، رفتار خطی و تحت اثر زلزله‌های قوی، رفتار غیرکشسان فرض و جابه‌جایی بیشینه‌ی سازه و انرژی خمیری تلف‌شده در سازه به‌عنوان پارامترهای کنترلی در نظرگرفته شده‌اند.[۱۴] یک الگوریتم ژنتیک پیوسته‌ی تکمیل‌شده با جست‌وجوی مستقیم برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن‌آرمه در سال ۲۰۰۸ و یک روش طراحی بهینه‌ی توسعه‌یافته برای قاب‌های بتن مسلح براساس یک الگوریتم ژنتیک پیوسته با یک روش جست‌وجوی مستقیم ارائه شده است.[۱۵] یک مطالعه‌ی قیاسی نیز بین دو روش مکاشفه‌یی طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن‌آرمه در سال ۲۰۱۱ ارائه و به‌کارگیری دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و روش جست‌وجوی الگوریتم مورچگان برای بهینه‌سازی قاب‌های بتن‌آرمه مورد بررسی قرارگرفته و توانایی دو روش ذکرشده برای طراحی بهینه‌ی قاب بتن‌آرمه با طراحی ۳ سازه‌ی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه نشان داده شده است.[۱۶]

در پژوهش حاضر، یک الگوریتم بهینه‌سازی براساس روش تقریب سازگار، که یکی از روش‌های نوین در بهینه‌سازی سازه‌هاست، که اخیراً توسعه یافته است، جهت طراحی قاب‌های خمشی بتن‌مسلح ارائه شده است. لذا، ابتدا نحوه‌ی مدل‌سازی مسئله‌ی طراحی بیان و به فرمول‌بندی آن براساس روش تقریب سازگار پرداخته شده است. سپس با ارائه‌ی الگوریتم طراحی بهینه، کارآیی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش تقریب سازگار[۴]

با علم به این موضوع که با دخالت‌دادن مناسب حساسیت‌های طراحی می‌توان نتایج بهینه‌سازی سازه‌یی را بهبود بخشید و کیفیت تقریب‌سازی را کنترل کرد، روشی بر مبنای حساسیت معروف به روش تقریب سازگار در سال ۲۰۱۲ توسعه یافته است.[۱۷] در روش مذکور، با فرض‌کردن مقدار α_l برای کمترین مقدار حساسیت هر تابع دلخواه مانند: تغییرمکان، مقاومت، و غیره (S_l) و مقدار α_u برای بیشترین مقدار حساسیت تابع موردنظر (S_u)، پارامتر α_i مطابق رابطه‌ی ۱ برای درنظرگرفتن تأثیر حساسیت‌ها استفاده می‌شود:[۱۷]

$$\alpha_i = \frac{S_i}{S_l}\alpha_l = \frac{S_i}{S_u}\alpha_u \qquad (۱)$$

که در آن، S_i مقدار حساسیت تابع موردنظر نسبت به متغیر طراحی x_i است. رابطه‌ی ۱ نشان می‌دهد که پارامتر توان متغیر طراحی (α_i) علاوه بر اینکه تابعی از حدود بالا و پایین پارامتر است، تابعی از جهت و مقدار حساسیت تابع نسبت به متغیر موردنظر است. مقادیری برای حد پایین و بالای پارامتر توان فرض می‌شود و با انتخاب کاربر می‌تواند مقادیر مختلفی را به خود اختصاص دهند. شایان ذکر است که مقادیر حد پایین و بالا می‌توانند در مسائل طراحی مختلف، متفاوت انتخاب شوند. زیرا انتخاب مقادیر مناسب، نرخ همگرایی را افزایش و تعداد چرخه‌های طراحی را کاهش می‌دهد.[۱۷] براساس پارامتر مذکور، می‌توان هر تابع دلخواه را با استفاده از بسط مرتبه‌ی اول تیلور به‌صورت رابطه‌ی ۲ تقریب زد:[۱۷]

$$f(x) = f\left(x^{\circ}\right) + \sum_i \frac{l}{\alpha_i}\left(x_i^{\circ}\right)^{1-\alpha_i} f_i^{\circ}\left[(x_i)^{\alpha_i} - \left(x_i^{\circ}\right)^{\alpha_i}\right] \qquad (۲)$$

که در آن، f_i به مشتقات اول تابع $f(x)$ نسبت به متغیرهای x_i اشاره دارد. این مشتقات در مسائل مهندسی سازه به‌دلیل اینکه اغلب توابع صریحی از قیود طراحی و یا تابع هدف وجود ندارد، قابل تعیین نیست و به این منظور باید از تئوری تحلیل حساسیت استفاده شود. علامت $\sum$، نشان‌گر جمع روی تمام متغیرهای طراحی است.[۱۷] با نرمالیزه‌سازی متغیرهای طراحی x_i نسبت به متغیرهای طراحی فعلی x° و تعاریف $x_i' = \frac{x_i}{x_i^{\circ}}$ و $f_i'' = \frac{f_i' x_i^{\circ}}{\alpha_i}$ با استفاده از رابطه‌ی ۲، رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت:[۱۷]

$$f(x'') = f\left(x^{\circ}\right) + \sum_i f_i''\left[(x_i'')^{\alpha_i} - 1\right] + f_{\circ} = \sum_i f_i''\left(x_i''\right)^{\alpha_i} + f_{\circ} - \sum_i f_i'' \qquad (۳)$$

که در آن، $f_{\circ}$ مقدار تابع در نقطه‌ی طراحی اولیه است. رابطه‌ی ۳، اساس راهبرد تقریب سازگار را برای تشکیل مسئله‌ی بهینه‌سازی برای طراحی یک سازه‌ی مهندسی بیان می‌کند. در پژوهش حاضر، از این راهبرد برای تشکیل زیربرنامه‌ی بهینه‌سازی قاب‌های بتن‌مسلح در هر چرخه‌ی طراحی استفاده می‌شود. باید توجه کرد که در خطی‌سازی تیلر، دامنه‌ی جست‌وجو در هرگام بهینه‌سازی محدود می‌شود؛ ولی در روش تقریب سازگار، با توجه به اینکه خطی‌سازی تیلر بر روی متغیرهای مصنوعی انجام می‌شود نه متغیرهای اصلی، تابع بر حسب متغیرهای اصلی خطی نیست و یک تابع غیرخطی با کیفیت بالا بر حسب متغیرهای اصلی تقریب زده می‌شود، که این موضوع موجب کاهش نقض‌شدگی در قیود اصلی و افزایش همگرایی می‌شود.[۱۷]

۳. مدل بهینه‌سازی

حل مسئله‌ی بهینه‌سازی طراحی قاب‌های بتن‌آرمه‌ی دو بعدی مانند هر مسئله‌ی بهینه‌سازی دیگر نیازمند بازتعریف مسئله در ساختار خاص بهینه‌سازی است. این ساختار، ۳ بخش اصلی: متغیرهای طراحی، قیود طراحی، و تابع هدف دارد. هر کدام از ۳ بخش مذکور، در ادامه به تفکیک مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۱.۳. متغیرهای طراحی

پارامترهایی که برای تشریح طراحی یک سازه انتخاب می‌شوند، متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند. خاصیت بارز متغیرهای طراحی این است که با داشتن مقدار آن‌ها، می‌توان طرح منحصر به فردی از سازه را ارائه کرد. در واقع، هدف نهایی هر طراحی اعم از طراحی بهینه و یا کلاسیک، ارائه‌ی متغیرهای ذکرشده است. این متغیرها باید به گونه‌یی انتخاب شوند که مقادیر تابع هدف و قیود طراحی را متأثر سازند. با توجه به اینکه در قاب‌های بتن‌مسلح، هزینه‌ی سازه و پاسخ‌های آن با تغییر ابعاد مقاطع بتنی و مقدار آرماتورهای به‌کار رفته در آنها دچار تغییر می‌شوند، لذا در پژوهش حاضر، عرض و ارتفاع مقاطع تیرها و ستون‌ها و آرماتورهای کششی و فشاری، در تیرها و آرماتورهای طولی در ستون‌ها، به‌عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند.

مقادیر متغیرهای طراحی می‌توانند هر مقدار دلخواه در محدوده‌ی اختیارشده را به خود اختصاص دهند. می‌توان برای متغیرهای طراحی، حد بالا و پایین تعریف کرد و هر متغیر می‌تواند در هر مرحله‌ی بهینه‌سازی مقداری را در این بازه به خود اختصاص دهد. متغیرهای طراحی می‌توانند به‌صورت یک بردار مانند رابطه‌ی ۴ در نظر گرفته شوند:

$$x = (x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n) \qquad (۴)$$

که در آن، x_i می‌تواند عرض یا ارتفاع مقطع یک المان یا سطح مقطع آرماتور باشد. مقدار n نیز بستگی به ابعاد سازه و تیپ‌بندی انجام‌شده دارد.

۲.۳. قیود طراحی

در مهندسی سازه، متغیرهای طراحی باید به گونه‌یی انتخاب شوند که نیازهای خاصی را برآورده کنند، که قیود طراحی نامیده می‌شوند. قیودی که محدودیت‌های رفتار یا عملکرد سیستم سازه‌یی، از قبیل محدودیت‌های اعمالی روی مقاومت، جابه‌جایی و سختی را بیان می‌کنند، قیود رفتاری[5] نامیده می‌شوند. قیودی که بستگی به امکان دسترسی، ساخت، و یا محدودیت‌های فیزیکی دیگر دارند، به محدودیت‌های جانبی[6] معروف هستند. قیود طراحی، محدودیت‌های طراحی هستند که در قالب عبارت‌های منطقی ریاضی بیان شده‌اند. قیدها عموماً خود به ۲ دسته قیدهای مساوی و قیدهای نامساوی تقسیم می‌شوند. در نهایت، طرح ارائه‌شده باید به گونه‌یی باشد که همه‌ی قیدهای طراحی را ارضا کند. قیود طراحی می‌توانند شامل قیود آیین‌نامه‌یی و در مسائل مهندسی، نیز قیود اجرایی باشند و اغلب از نوع قیدهای نامساوی هستند.

در پژوهش حاضر، قیدهایی برای طراحی مقطع تیرها در نظرگرفته شده است. مهم‌ترین این قیود، قید مربوط به مقاومت خمشی تیرهاست. قید مربوط به مقاومت خمشی مطابق رابطه‌ی ۵ کنترل می‌شود:

$$g^i_{mb}(x) = M^i_{ub} - M^i_{rb} \le 0 \qquad (۵)$$

که در آن، i شماره‌ی تیر موردنظر، M^i_{rb} مقاومت خمشی نهایی مقطع تیر، M^i_{ub} لنگر خمشی بیشینه‌ی ایجادشده در طول تیر تحت اثر ترکیب بارگذاری آیین‌نامه و $g^i_{mb}(x)$ مقدار قید مربوط به مقاومت خمشی تیر است. قید دیگر، محدودیت مربوط به بیشینه و کمینه‌ی مقدار آرماتورکششی در تیرهاست، که مطابق دو رابطه‌ی ۶ و ۷ کنترل می‌شود:

$$g^i_{\rho b\,\max}(x) = \left(\frac{A^i_s}{b^i d^i}\right) - \rho_{\max} \le 0 \qquad (۶)$$

$$g^i_{\rho b\,\min}(x) = \rho_{\min} - \frac{A^i_s}{b^i d^i} \le 0 \qquad (۷)$$

که در آن‌ها، i شماره‌ی تیر موردنظر، $\frac{A^i_s}{b^i d^i}$ نسبت مقدار آرماتورکششی موجود در مقطع تیر، $\rho_{\max}$ و $\rho_{\min}$ به‌ترتیب مقدار نسبت بیشینه و کمینه‌ی آرماتور کششی تیر هستند. $g^i_{\rho b\,\max}(x)$ و $g^i_{\rho b\,\min}(x)$ نیز مقدار قیود مربوط به بیشینه و کمینه‌ی مقدار آرماتورکششی در تیرها هستند.

ازمهم‌ترین قیدهای مربوط به طراحی مقطع ستون‌ها، قیدکنترل مقاومت محوری و خمشی هستند، که مطابق روابط ۸ و ۹ به‌دست می‌آیند:

$$g^i_n(x) = N^i_u - N^i_r \le 0 \qquad (۸)$$

$$g^i_{mc}(x) = M^i_{uc} - M^i_{rc} \le 0 \qquad (۹)$$

که در آن‌ها، i شماره‌ی ستون موردنظر، M^i_{rc} و N^i_r به‌ترتیب مقاومت خمشی و محوری نهایی مقطع ستون، M^i_{uc} و N^i_u لنگر خمشی و نیروی محوری بیشینه‌ی ایجادشده در طول ستون تحت اثر ترکیب بارگذاری آیین‌نامه و $g^i_{mc}(x)$ و $g^i_n(x)$ مقدار قیدهای مربوط به مقاومت خمشی و محوری ستون‌ها هستند. از قیود دیگری که برای ستون‌ها در نظرگرفته شده است، قیدهای مربوط به مقدار بیشینه و کمینه‌ی آرماتور طولی مجاز در مقطع ستون است، که در قالب روابط ۱۰ و ۱۱ می‌شوند:

$$g^i_{\rho c\,\max}(x) = \frac{A^i_s}{b^i h^i} - \rho_{c\,\max} \le 0 \qquad (۱۰)$$

$$g^i_{\rho c\,\min}(x) = \rho_{c\,\min} - \frac{A^i_s}{b^i h^i} \le 0 \qquad (۱۱)$$

که در آن، i شماره‌ی ستون موردنظر، $\frac{A^i_s}{b^i h^i}$ نسبت مقدار آرماتورکششی موجود در مقطع ستون، $\rho_{c\,\max}$ و $\rho_{c\,\min}$ مقدار بیشینه و کمینه‌ی نسبت آرماتور مجاز طولی در مقطع ستون، و $g^i_{\rho_{c\,\max}}(x)$ و $g^i_{\rho_{c\,\min}}(x)$ مقدار قیدهای مربوط به بیشینه و کمینه‌ی مقدار آرماتور طولی مجاز در مقطع ستون است.

در پژوهش حاضر، محدودیت‌های دیگری نیز در قالب قید برای طراحی مقاطع تیرها و ستون‌ها در نظرگرفته شده است. مثلاً محدودیت کمینه‌ی تعداد میلگرد در مقطع تیر یا ستون که ۴ عدد در گوشه‌ها هستند و یا کمینه‌ی فاصله بین میلگردهای طولی که برابر ۴۰ میلی‌متر در نظرگرفته می‌شود.

آخرین قید در نظرگرفته‌شده، مربوط به محدودیت تغییرجانبی نسبی طبقات است، که براساس رابطه‌ی ۱۲ کنترل می‌شود:

$$\Delta - \Delta_M \le 0 \qquad (۱۲)$$

که در آن، Δ تغییرمکان نسبی طبقه و Δ_M تغییرمکان نسبی مجاز طبقه است.

۳.۳. تابع هدف

یک تابع هدف، اغلب به‌عنوان یک هزینه یا معیار عملکرد شناخته و بر حسب متغیرهای طراحی بیان می‌شود. طراحی بهینه، بهترین مقدار تابع هدف را در حالی

که همه‌ی قیود طراحی را ارضا می‌کند، فراهم می‌سازد. بنابراین، انتخاب یک تابع هدف مناسب در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی، بیش از اندازه مهم است. در سازه‌ی بتن مسلح به دلیل اینکه مصالح سازه از یک جنس نیست، نمی‌توان تابع هدف را براساس وزن یا حجم تعریف کرد. در پژوهش حاضر، تابع هدف بر مبنای هزینه‌ی ساخت سازه تعریف می‌شود، که شامل هزینه‌ی بتن‌ریزی، آرماتوربندی، و قالب‌بندی است.

تابع هدف برابر مجموع دو تابع جزئی در نظرگرفته شده است، که هزینه‌ی المان ستون و تیر را به‌صورت مجزا مشخص می‌کند. هزینه‌ی هر المان شامل هزینه‌ی بتن‌ریزی، آرماتوربندی، و قالب‌بندی است. همان‌گونه که در کارهای عملی ۳ وجه المان تیر و ۴ وجه المان ستون قالب‌بندی می‌شود، در توابع ۱۳ و ۱۴ نیز این نکته رعایت شده است. ضرایب هزینه برای واحد حجم بتن‌ریزی، واحد جرم فولاد و واحد سطح قالب‌بندی در تابع هدف موردنظر اعمال شده است. براساس فرضیات انجام‌شده، هزینه‌ی مربوط به تیرها را می‌توان از رابطه‌ی ۱۳ تعیین کرد:

$$F_b = \sum \left(C_c.b_i.h_i.L_i + C_s.A_{st_i}.L_i.\gamma_s + ...C_f.L_i.\left(b_i + ۲h_i\right)\right) \quad i = ۱, ۲, ..., n_b \qquad (۱۳)$$

هزینه‌ی مربوط به ستون‌ها از رابطه‌ی ۱۴ به‌دست می‌آید:

$$F_c = \sum \left(C_c.b_i.h_i.L_i + C_s.A_{st_i}.L_i.\gamma_s + C_f.L_i/۲\left(b_i + h_i\right)\right) \quad i = ۱, ۲, ..., n_c \qquad (۱۴)$$

هزینه‌ی کل، حاصل جمع هزینه‌ی تیرها و ستون‌هاست، که از رابطه‌ی ۱۵ تعیین می‌شود:

$$F = F_b + F_c \qquad (۱۵)$$

که در آن‌ها، C_c هزینه‌ی واحد حجم بتن، C_s هزینه‌ی واحد جرم فولاد، C_f هزینه‌ی واحد سطح قالب‌بندی، b عرض مقطع المان، h ارتفاع مقطع المان، L طول المان، γ_s جرم واحد حجم فولاد، A_{st} سطح مقطع فولاد و F تابع هدف است.

۴.۳. فرمول‌بندی طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن مسلح براساس الگوریتم CONAP

در پژوهش حاضر، هدف از طراحی یک قاب بتن مسلح، کمینه‌ساختن هزینه‌ی آن تحت اثر شرایط طراحی شامل: محدودیت‌های مقاومت اعضا، تغییرشکل اعضا، تغییرشکل جانبی سازه، محدودیت‌های جانبی و محدودیت‌های اجرایی است. براساس تعریف متغیرهای طراحی مطابق بخش ۱.۳.، فرمول‌بندی قیود طراحی مطابق بخش ۲.۳.، و فرمول‌بندی تابع هزینه به‌عنوان تابع هدف، مطابق بخش ۳.۳.، مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن مسلح را می‌توان به این صورت فرمول‌بندی کرد:

$$\text{Minimize} \quad F = f\left(x_۱, x_۲, ..., x_{n-۱}, x_n\right)$$

Subjected to :

$$g_n^i\left(x\right) = N_u^i - N_r^i \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_c$$

$$g_{mc}^i\left(x\right) = M_{uc}^i - M_{rc}^i \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_c$$

$$g_{mb}^i\left(x\right) = M_{ub}^i - M_{rb}^i \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., ۳n_b$$

$$g_{db}^i\left(x\right) = h^i - h_{all}^i \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_b$$

$$g_d^i\left(x\right) = Dr^i - Dr_{all} \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_s$$

$$g_{\rho b\,\max}^i\left(x\right) = \frac{A_s^t}{b^i d^i} - \rho_{\max} \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., ۲n_b$$

$$g_{\rho\,\min}^i\left(x\right) = \rho_{\min} - \frac{A_s^i}{b^i d^i} \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., ۲n_b$$

$$g_{\rho c\,\max}^i\left(x\right) = \frac{A_s^i}{b^i h^i} - \rho_{c\,\max} \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_c$$

$$g_{\rho c\,\min}^i\left(x\right) = \rho_{c\,\min} - \frac{A_s^t}{b^i h^i} \le ۰, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_c$$

$$b_i^l \le b_i \le b_i^u, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_b + n_c$$

$$h_i^l \le h_i \le h_i^u, \qquad i = ۱, ۲, ..., n_b + n_c$$

در فرمول‌بندی ارائه‌شده، x بردار متغیرهای طراحی، F تابع هدف (هزینه)، g_n^i قیود کنترل نیروی محوری ستون‌ها، g_{mc}^i قیود کنترل ممان خمشی ستون‌ها، g_{mb}^i قیود کنترل ممان خمشی تیرها، g_{db}^i قیود کنترل خیز تیرها، g_d^i قیود کنترل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، $g_{\rho b\,\max}^i$ قیود کنترل بیشینه‌ی مقدار آرماتور کششی تیرها، $g_{\rho b\,\min}^i$ قیود کنترل کمینه‌ی مقدار آرماتور کششی تیرها، $g_{\rho c\,\max}^i$ قیود کنترل بیشینه‌ی مقدار آرماتور طولی ستون‌ها، $g_{\rho c\,\min}^i$ قیود کنترل کمینه‌ی مقدار آرماتور طولی ستون‌هاست. همچنین حد بالا و پایین ابعاد تیرها و ستون‌ها نیز بیان شده است. n_b، n_c و n_s به ترتیب تعداد تیرها، ستون‌ها، و طبقات سازه است.

۴. الگوریتم پیشنهادی برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتنی

در پژوهش حاضر، برای اولین بار روش بهینه‌سازی تقریب سازگار،[۱۷] برای بهینه‌سازی قاب بتن‌آرمه استفاده شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی قاب بتن‌آرمه به دلیل تعداد زیاد قیود طراحی و پیچیدگی آن‌ها و همچنین بالابودن درجه‌ی غیرخطی آن‌ها، یکی از مسائل بهینه‌سازی پیچیده و مشکل بوده و حل آن نیازمند تمهیدات خاصی به منظور سازگارکردن الگوریتم‌های موجود با مسئله است. روش بهینه‌سازی تقریب سازگار نیز از این قاعده‌ی کلی مستثنی نیست. اولین مسئله‌یی که در برنامه‌نویسی مسئله با آن برخورد می‌شود، مسئله‌ی غیر صریح‌بودن قیود طراحی تعریف‌شده برحسب متغیرهای طراحی است، که با به کارگیری تقریب سازگار، مشکل مذکور حل شده است. لذا روش عددی تفاوت محدود مرکزی جهت محاسبه‌ی حساسیت‌های طراحی، که در روش تقریب سازگار مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌کار می‌رود. مسئله‌ی دیگری که به دلیل تحلیل سازه در محدوده‌ی رفتار ارتجاعی و خطی با آن برخورد می‌شود، صفربودن حساسیت برخی از قیود طراحی نسبت به تعدادی از متغیرهای طراحی است. در این راستا، یک راه حل موثر و عملی پیشنهاد شده و مورد استفاده قرارگرفته است که براساس آن، متغیرهای طراحی که حساسیت‌های مربوط به آنها صفر هستند، از فرایند بهینه‌سازی در چرخه‌ی طراحی موردنظر خارج می‌شوند.

براساس مطالب بیان‌شده، الگوریتم پیشنهادی پژوهش حاضر برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن‌مسلح را به طور خلاصه می‌توان در این گام‌ها بیان کرد:

۱. حدس اولیه‌ی متغیرهای طراحی و قراردادن شمارنده‌ی برابر صفر ($K = ۰$).

۲. تحلیل سازه و تعیین ظرفیت باربری برای تک تک اعضاء آن.

۳. تشکیل قیود طراحی.

۴. تحلیل حساسیت قیود طراحی.

۵. فرمول‌بندی تابع هدف و قیود طراحی براساس روش تقریب سازگار.

۶. حل زیرمسئله‌ی بهینه‌سازی و اصلاح متغیرهای طراحی.

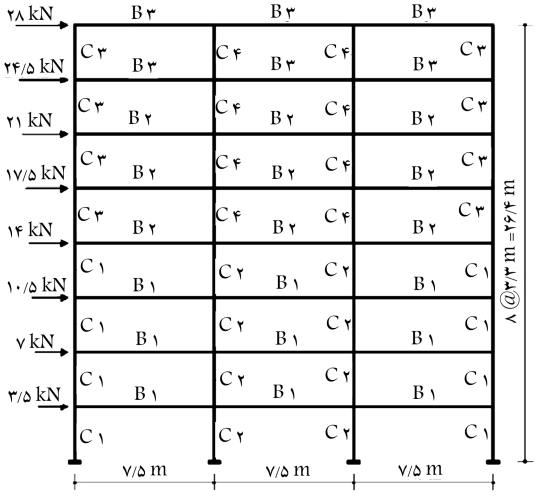
۷. کنترل معیار بهینگی، که در صورت برآورده‌شدن معیار بهینگی فرایند طراحی به پایان می‌رسد، در غیر این‌صورت به شمارنده، ۱ واحد اضافه شده $(K = K + 1)$ و مقدار اولیه‌ی متغیرهای طراحی با مقادیر اصلاح‌شده در گام ششم جایگزین و فرایند طراحی از مرحله‌ی دوم تکرار می‌شود.

شایان ذکر است که متغیرهای طراحی موردنظر در پژوهش حاضر از نوع متغیرهای پیوسته است و الگوریتم مورد استفاده، مقادیر بهینه‌ی آنها را تعیین می‌کند. با توجه به محدودیت‌های اجرایی روی ابعاد مقاطع، پس از انجام فرایند بهینه‌سازی طراحی، ابعاد به‌صورت مضربی از ۵۰ میلی‌متر و نزدیک به مقادیر متغیرهای پیوسته‌ی بهینه انتخاب می‌شوند. البته این موضوع موجب افزایش مقدار اندکی در تابع هدف (هزینه) خواهد شد.

۵. مطالعه‌ی موردی

در این بخش، یک سازه با استفاده از روش الگوریتم تقریب سازگار طراحی و نتایج حاصل با نتایج به‌دست‌آمده از دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و الگوریتم مورچگان،[۱۶] مقایسه شده است. سازه‌ی موردنظر، یک قاب بتن مسلح خمشی ۸ طبقه مطابق شکل ۱ است.

در پژوهش انجام‌شده از روش طراحی مقاومت نهایی[۷] به‌عنوان روش کلاسیک طراحی استفاده شده است. روش طراحی مقاومت که به نام روش طراحی مقاومت نهایی نیز خوانده شده است، ایجاب می‌کند که مقاومت طراحی یک عضو در هر مقطع، مساوی یا بیشتر از مقاومت لازم که تحت ترکیبات بار با ضریب محاسبه می‌شود، باشد.[۱۸] بدین منظور از این ترکیبات بارگذاری از آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا



شکل ۱. هندسه، تیپ‌بندی و بارگذاری جانبی قاب ۸ طبقه.

ACI-۳۱۸-۰۸، برای طراحی قاب استفاده شده است:

$$U = ۱/۲D + ۱/۶L$$

$$U = ۱/۲D + ۱/۰L \pm ۱/۴E$$

$$U = ۰/۹D \pm ۱/۴E$$

شایان ذکر است که نیروی زلزله در تراز طبقات به‌صورت بارهای متمرکز اعمال شده است. مشخصات هندسی و تیپ‌بندی و بارگذاری جانبی قاب مطابق شکل ۱ نشان داده شده است.

بار مرده و زنده، که به‌صورت بارگسترده‌ی یکنواخت بر روی تیرهای سازه اعمال می‌شود، به ترتیب برابر ۲۲/۳ و ۱۰/۷ کیلونیوتن بر متر است. مقاومت بتن و فولاد به‌کاررفته در قاب به‌ترتیب برابر ۲۳/۵ و ۳۹۲ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

هزینه‌ی واحد حجم بتن‌ریزی برابر ۱۰۵ دلار بر متر مکعب، هزینه‌ی واحد وزن فولاد برابر ۰/۹ دلار برکیلوگرم، و هزینه‌ی واحد سطح قالب‌بندی برابر ۹۲ دلار بر متر مربع فرض می‌شود. پس از به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی تقریب سازگار و برنامه‌ی طراحی بهینه‌ی توسعه‌یافته در پژوهش حاضر، که در بخش‌های قبلی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است، نتایج طراحی بهینه به طور خلاصه مطابق جدول ۱ به‌دست آمده است.

بهینه‌سازی طراحی این سازه با شرایط و خصوصیات یکسان با پژوهش حاضر، در سال ۲۰۱۱ با دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و روش جست‌وجوی الگوریتم مورچگان انجام شده است.[۱۶] در پژوهش انجام‌شده‌ی مذکور از یک پایگاه داده، که شامل مشخصات مقاطع از پیش تعیین‌شده بوده است، استفاده شده است. ضرایب هزینه‌ی موجود در تابع هدف نیز همان ضرایب در نظر گرفته‌شده در پژوهش حاضر است.

جدول‌های ۲ و ۳، نتایج طرح بهینه‌ی حاصل از دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و روش الگوریتم کولونی مورچگان را برای قاب موردنظر نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی نتایج بهینه‌سازی حاصل از روش پیشنهادی پژوهش حاضر با نتایج دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و الگوریتم کولونی مورچگان نشان می‌دهد که طرح به‌دست‌آمده از روش الگوریتم تقریب سازگار به ترتیب، ۱/۳۸٪ و ۱/۸۹٪ نسبت به طرح به‌دست‌آمده از دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و الگوریتم کولونی مورچگان اقتصادی‌تر است.

جدول ۱. نتایج حاصل از روش CONAP برای طراحی بهینه‌ی قاب.

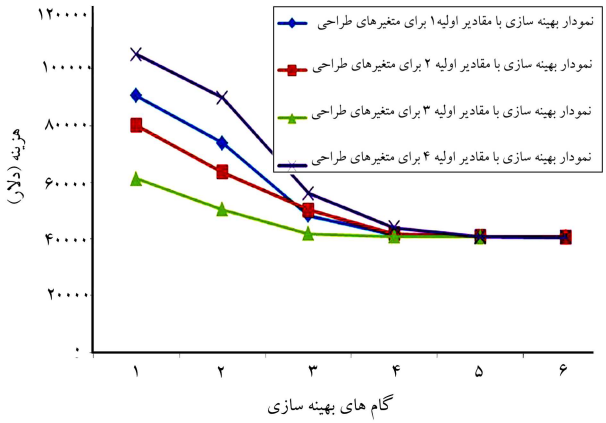
نوع المان	شماره‌ی تیپ	عرض (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	آرماتور کششی	آرماتور فشاری
تیر	B۱	۳۰۰	۴۵۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۲	۳۰۰	۴۵۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۳	۳۵۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۵Φ۲۲
ستون	C۱	۴۵۰	۴۵۰	۸Φ۲۵	
	C۲	۵۰۰	۵۰۰	۱۰Φ۲۵	
	C۳	۳۵۰	۳۵۰	۱۰Φ۲۵	
	C۴	۳۰۰	۳۰۰	۸Φ۲۵	
هزینه‌ی قاب برحسب دلار			۴۷۵۹۴		

جدول ۲. نتایج حاصل از روش HBB-BC برای طراحی بهینه‌ی قاب.

نوع المان	شماره‌ی تیپ	عرض (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	آرماتور کششی	آرماتور فشاری
تیر	B۱	۳۰۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۲	۳۰۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۳	۳۵۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۵Φ۲۲
ستون	C۱	۴۰۰	۴۰۰	۸Φ۲۵	
	C۲	۴۵۰	۴۵۰	۱۲Φ۲۵	
	C۳	۳۵۰	۳۵۰	۸Φ۲۵	
	C۴	۳۵۰	۳۵۰	۸Φ۲۵	
هزینه‌ی قاب برحسب دلار			۴۸۲۶۳		

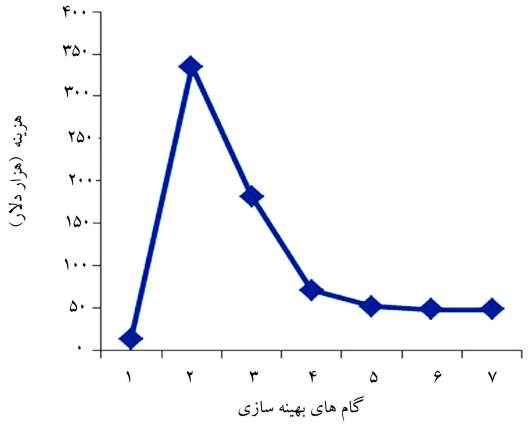
جدول ۳. نتایج حاصل از روش HPSACO برای طراحی بهینه‌ی قاب.

نوع المان	شماره‌ی تیپ	عرض (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	آرماتور کششی	آرماتور فشاری
تیر	B۱	۳۰۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۲	۳۰۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۶Φ۲۲
	B۳	۳۰۰	۵۰۰	۳Φ۱۹	۵Φ۲۲
ستون	C۱	۴۰۰	۴۰۰	۸Φ۲۵	
	C۲	۵۰۰	۵۰۰	۸Φ۲۵	
	C۳	۳۵۰	۳۵۰	۸Φ۲۵	
	C۴	۳۵۰	۳۵۰	۸Φ۲۵	
هزینه‌ی قاب برحسب دلار			۴۸۵۱۴		

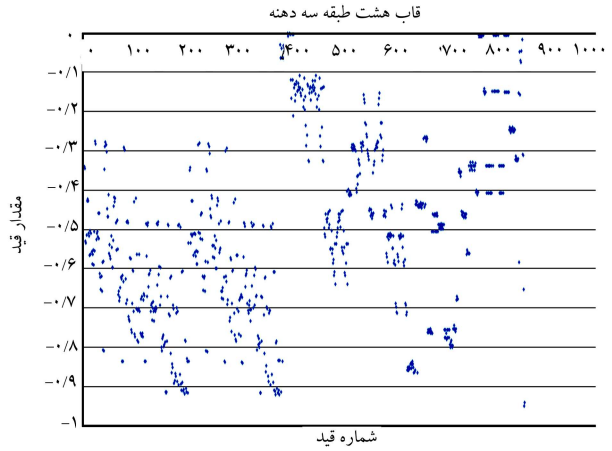


شکل ۲. تاریخچه‌ی همگرایی هزینه‌ی قاب ۸ طبقه با روش CONAP با طرح‌های اولیه‌ی متفاوت.

شکل ۲، روند همگرایی طراحی را برای قاب ۸ طبقه، با ۴ طرح اولیه‌ی مختلف نشان می‌دهد، که مطابق آن، تعداد چرخه‌های طراحی موردنیاز برای همگرایی تابع هدف، به نقطه‌ی شروع یا همان طرح اولیه بستگی بسیار کمی دارد. ولی به‌طور کلی می‌توان گفت که به هر اندازه، تفاوت طرح اولیه با طرح بهینه بیشتر باشد، تعداد چرخه‌ی لازم برای همگرایی نیز بیشتر است. با دقت در شکل ۲، می‌توان مشاهده کرد که ممکن است تغییرات مقدار تابع هدف در چرخه‌های اولیه‌ی طراحی، به دلیل تفاوت زیاد طرح اولیه با طرح بهینه بسیار شدید باشد؛ اما فقط پس از چند



شکل ۳. تاریخچه‌ی همگرایی هزینه‌ی قاب ۸ طبقه با روش CONAP با طرح اولیه‌ی نامناسب.



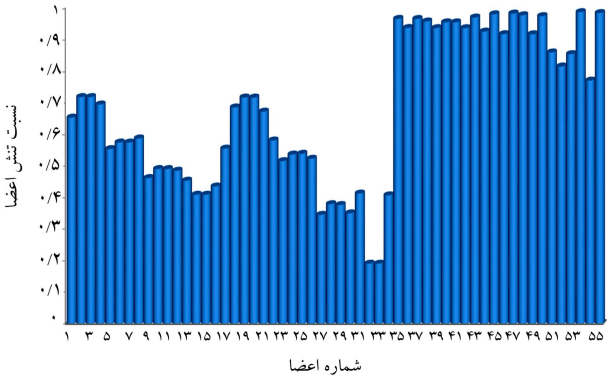
شکل ۴. نمودار نقض قیود طراحی برای قاب ۸ طبقه در طرح بهینه.

چرخه‌ی طراحی، نتایج طرح‌های مختلف به یکدیگر همگرا می‌شوند. این موضوع توانایی الگوریتم بهینه‌سازی به‌کاررفته را در بهینه‌سازی قاب‌های بتنی به خوبی نمایان می‌سازد.

نکته‌ی دیگری که در رابطه با الگوریتم تقریب سازگار می‌توان بیان کرد، این است که الگوریتم تقریب سازگار، مقدار تابع هدف را در حالتی که طرح اولیه، تعداد زیادی از قیود طراحی را نقض کند (مقدار تابع هدف طرح اولیه در این حالت معمولاً کمتر از تابع هدف بهینه است)، به‌صورت چشم‌گیری در چرخه‌ی اول طراحی افزایش می‌دهد. این نکته در شکل ۳، به‌صورت واضح‌تری نشان داده شده است، که در آن نقطه‌ی شروع پروسه‌ی بهینه‌سازی، نقطه‌یی است که مقدار تابع هدف را کمتر از مقدار تابع هدف نقطه‌ی بهینه به‌دست می‌دهد. این موضوع، نتیجه‌ی حاصل از تحقیقات پیشین [۸] را نیز تأیید می‌کند.

مزیت دیگر روش تقریب سازگار در بهینه‌سازی قاب‌های بتن‌آرمه نسبت به دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و روش جست‌وجوی الگوریتم مورچگان، بی‌نیازی به پایگاه داده شامل مقاطع مختلف سازه‌یی است. این مسئله خود باعث پایین‌آمدن هزینه‌ی بهینه‌سازی می‌شود.

نمودار نقض قیود طراحی برای قاب ۸ طبقه در شکل ۴ ارائه شده است، که مطابق آن، هیچ قیدی در طرح بهینه نقض نشده و مقادیر همه‌ی قیود کمتر از صفر یا برابر صفر است. در شکل مذکور، قیدهای فعال نقاطی هستند که نزدیک به خط



شکل ۵. نمودار نسبت تنش بیشینه اعضا به‌دست‌آمده از روش الگوریتم تقریب سازگار.

صفر یا روی آن واقع شده‌اند. نسبت تنش بیشینه‌ی حاصل از ترکیبات بارگذاری در نظر گرفته‌شده برای همه‌ی اعضاء سازه در طرح بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است، که مطابق آن، الگوریتم تقریب سازگار به طرح پر تنش‌تر تیرها نسبت به ستون‌ها منجر شده است. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده باعث قوی بودن نسبی ستون‌ها می‌شود، که یک امر مطلوب در طراحی است. همچنین به نظر می‌رسد که نامناسب بودن تیپ‌بندی در نظر گرفته‌شده[۱۶] باعث شدت این مسئله شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید براساس روش تقریب سازگار برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های بتن‌مسلح توسعه یافته است. برای نشان‌دادن کارایی روش توسعه‌یافته در پژوهش حاضر، طراحی یک قاب بتن مسلح ۸ طبقه مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که روش پیشنهادی توانایی طراحی بهینه و خودکار قاب‌های بتن مسلح را دارد. نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی تقریب سازگار نسبت به دو روش بیگ بنگ ـ بیگ کرانچ و الگوریتم کولونی مورچگان برای بهینه‌ساختن قاب بتن‌آرمه تواناتر است و به طرح‌های اقتصادی‌تری ضمن برآورده‌ساختن کلیه‌ی قیود طراحی منتهی می‌شود. نشان داده شده است که الگوریتم پیشنهادی پس از طی چند چرخه طراحی معدود، به طرح بهینه همگرا می‌شود، که این خاصیت را می‌توان به دخیل‌ساختن مقدار حساسیت‌های طراحی در چرخه‌های طراحی مرتبط دانست.

پانوشت‌ها

1. Hybrid
2. deterministic
3. stochastic
4. consistent approximation algorithm
5. behavioral constraints
6. side constraints
7. strength based design method (SDM)

منابع (References)

1. Cohn, M.Z. "Limit design of reinforced concrete frames", *Journal of Struc. Div., ASCE*, **94**(10), pp. 2467-2483 (1968).
2. Grierson, D.E. "Optimal design of reinforced concrete frames", Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Canada (1968).
3. Shunmagavel, P. "Optimization of two-dimensional reinforced concrete building frames", Ph.D Thesis, University of Illinois at Urbana, Champaign (1974).
4. Yang, M.F. "Optimization of reinforced concrete structures", Ph.D Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign (1982).
5. Booz, W., Legewie, G. and Thierauf, G. "Optimization of reinforced concrete structures according to germa design regulations", *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, Yugoslavia, pp. 761-773 (1984).
6. Sikiotis, E.S. and Saoma, V.E. "Optimum design of reinforced concrete frames using interactive computer graphics", *Engineering with Computers*, **3**(2), pp. 101-110 (1987).
7. Kanagasundaram, S. and Karihaloo, B.L. "Minimum cost design of reinforced concrete structures", *Structural Optimization*, **2**(3), pp. 173-184 (1990).
8. Spires, D. and Arora, J.S. "Optimal design of tall RC-framed tube buildings", *ASCE Proceedings, J. of Struct. Eng.*, **116**(4), pp. 877-897 (1990).
9. Saka, M.P. "Optimum design of multistory structures with shear walls", *Computers and Structures*, **44**(4), pp. 925-936 (1992).
10. Moharrami, H. "Design optimization of reinforced concrete building frameworks", PhD Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada (1993).
11. Fadaee, M.J. "Design optimization of three dimensional reinforced concrete structures", PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada (1996).
12. Rajeev, S. and krishnamoorthy, C.S. "Genetic algorithm -based methodology for design optimization of reinforced concrete frames", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **13**(1), pp. 63-74 (1998).
13. Leps, M., Zeman, J. and Bittnar, Z. "Hybrid optimization approach to design of reinforced concrete frames", *Proccedings of The 3ed International Conference on Engineering Computational Technology*, pp. 177-178 (2002).
14. Lopez, A. and Cruz, F. "Design of reinforced concrete frames wit damage control", *Engineering Structures*, **26**(14), pp. 2037-2045 (2004).

15. Kwak, H.G. and Kim, J. "An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames", *Computer-Aided Design*, **41**(7), pp. 490-500 (2009).

16. Kaveh, A. and Sabzi, O. "A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames", *International Journal of Civil Engineering*, **9**(3), pp. 193-206 (2011).

17. Habibi, A.R. "New approximation method for structural optimization", *Journal of Computing in Civil Engineering (ASCE)*, **26**(2), pp. 236-247 (2012).

18. ACI 318-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary-ACI 318R-08*, American concrete Institute, Framing Hills, MI, USA (2008).