

طراحی بهینه‌ی دیوار برشی بتن‌آرمه‌ی ویژه با در نظر گرفتن اجزاء مرزی

سیدروح الله حسینی واعظ* (دانشیار)

حمیدرضا شاه‌مردادی قهی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (ص. ۸۵-۷۵)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۱، ص. ۸۵-۷۵

طراحی بهینه‌ی دیوار برشی بتن‌آرمه به همراه اجزاء مرزی و با احتساب شرایط لرزه‌یی مسئله‌یی است که در پژوهش حاضر صورت گرفته است. هزینه‌ی دیوار برشی به نحوه‌ی آرمان‌گرگداری (نمره‌ی آرمان‌تور مصرفی و نحوه‌ی چیدمان آن)، هزینه‌ی بتن‌ریزی (ناشی از ابعاد دیوار برشی) و هزینه‌ی قالب‌بندی بستگی دارد که به عنوان تابع هدف معرفی شده است. ضوابط طراحی و محدودیت‌های دیوار برشی بر مبنای آیین‌نامه‌ی ACI 318-11 برای شکل‌پذیری ویژه، به صورت قید پیاده‌سازی و فرمول‌نویسی شده است. بنابراین مجموعه‌ی تابع هدف و قیدها به نحوی با هم در ارتباط هستند تا کمترین هزینه بر مبنای تابع هدف با برقراری تمام قیود (طرحی قابل قبول)، در نقطه‌یی به نام بهینه‌ی مطلق حاصل شود. به علاوه تابع هدف به گونه‌یی نوشته شده است که مدل‌های دیوار برشی توسط برنامه ایجاد می‌شود و بهینه‌سازی به صورت پیوسته صورت می‌گیرد. در پژوهش حاضر، الگوریتم ترکیبی کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات (FA-PSO) ایجاد و بهینه‌سازی مسئله‌ی دیوار برشی به کمک آن در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته و ارزیابی شده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که در روش پیوسته، طرح‌هایی ارائه می‌شود که هزینه‌ی کمتری (حدود ۵/۵٪) نسبت به طرح‌های دیگر دارند.

واژگان کلیدی: الگوریتم بهبودیافته‌ی ترکیبی، ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات، دیوار بتن‌آرمه‌ی برشی، بهینه‌سازی سازه.

hoseini.vaez@qom.ac.ir
h.shahmoradi@stu.qom.ac.ir

۱. مقدمه

قدیمی‌ترین الگوریتم‌های معرفی شده است، بر اساس مکانیسم‌های الهام‌گرفته از تکامل بیولوژیکی، مانند: تولید مثل، جهش و انتخاب شکل گرفته است. همچنین الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) [۲]، و یا الگوریتم کلونی مورچگان [۳] با الهام از رفتار جمعی و هوشمند موجود بین حیوانات ایجاد شده‌اند. برخی دیگر از پرکاربردترین الگوریتم‌های معرفی شده در سال‌های اخیر شامل الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS) [۴]، کلونی زنبور [۵]، الگوریتم رقابت استعماری [۶]، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) [۷] و الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) [۸]، [۵] است.

استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به ویژه در سال‌های اخیر در شاخه‌های مختلف اعم از مهندسی عمران رشد چشم‌گیری داشته و نوشتارهای فراوانی در حل مسائل گوناگون مهندسی با استفاده از الگوریتم‌های مذکور ارائه شده است. به عنوان نمونه، بهینه‌سازی اندازه، شکل و توپولوژی سازه‌های خرپایی توسط الگوریتم کرم شب‌تاب [۹]، حل مسائل مهندسی با متغیرهای پیوسته و گسسته توسط الگوریتم کرم شب‌تاب [۱۰]، استفاده از الگوریتم بهبودیافته‌ی کلونی مورچگان برای حل مسائل بهینه‌سازی [۱۱] و نیز بهینه‌یابی تخصیص ریسک در پروژه‌های ساخت [۱۲] و بهینه‌سازی طراحی دیوارهای خاکی مسلح شده با تسمه به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات [۱۳] از جمله موارد استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است.

برخی از روش‌های بهینه‌سازی، قدمتی بیش از یک قرن دارند. در ابتدا برای یافتن بیشینه و کمینه‌ی یک تابع، از ریاضیات دیفرانسیلی استفاده می‌شد که در بسیاری از مسائل تجربی و تئوری کاربرد مناسبی نداشت. اما امروزه الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند روش مؤثری برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده باشند. الگوریتم‌های فراابتکاری یک روش محاسباتی است که بر پایه‌ی تکرارهای بهبودشونده، با یک سعی اولیه و بر طبق قوانینی استوار است تا به بهینه‌ی مطلق یک مسئله دست یابد. الگوریتم‌های فراابتکاری نیاز به پاسخ اولیه ندارند و فقط با سعی و خطای هدفمند در فضای مسئله به جست‌وجوی جواب بهینه‌ی مطلق می‌گردند. با این حال نمی‌توان به طور قطع تضمین کرد که پاسخ نهایی همان بهینه‌ی مطلق است. از این رو است که الگوریتم‌های فراابتکاری همواره ایجاد، بهبود و یا ترکیب می‌شوند تا الگوریتم مناسبی برای حل هر مسئله‌ی بهینه‌سازی مطرح شود.

بیشتر الگوریتم‌های تکاملی معرفی شده‌ی مذکور، از پدیده‌های طبیعی مبتنی بر جمعیت الهام گرفته شده‌اند. به عنوان نمونه الگوریتم ژنتیک (GA) [۱]، که یکی از

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۳/۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۶/۲۱، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۴.

DOI: 10.24200/J30.2018.1347

آرمتور و غیره) است. بنابراین هر چند که پیوسته بودن الگوریتم، ما را به طرح بهینه بسیار نزدیک می‌کند، اما برای رسیدن به طرحی معقول و مهندسی باید انتخاب متغیرها و قیود طراحی با هوشمندی کامل صورت پذیرد. زیرا که سازه‌های بتن آرمه برخلاف سازه‌های فولادی، به دلیل داشتن ماهیت غیرهمگن، پیچیدگی بیشتری در طراحی دارند.

به عبارت دیگر، یک طرح بتن آرمه می‌تواند هر ابعدادی را به خود اختصاص دهد و به تبع آن و برحسب نیاز، قطر میلگردها، تعداد آن‌ها و حتی نحوه چیدمان آن‌ها در نواحی گوناگون مقطع طراحی می‌شود. در ضمن بهینه‌سازی به روش پیوسته انجام شده است و باید تمام موارد ذکر شده توسط الگوریتم در نظر گرفته شود (برخلاف بهینه‌سازی گسسته که طرح‌ها آماده هستند).

۱.۲. تابع هدف

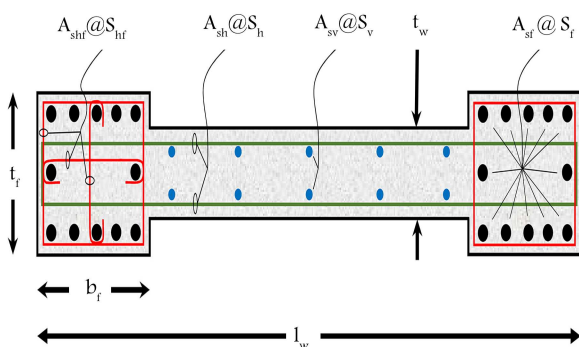
در حالت کلی، مسئله بهینه‌یابی دیوار برشی بتن آرمه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$\min Cost_{Shear Wall} \text{ subject to } g_i \leq 0 \quad (1)$$

در پژوهش حاضر، تابع هدف همان مقدار هزینه‌ی طرح در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، هزینه‌ی دیوار برشی بتن آرمه به‌ازای برقراری تمام قیدها به میزان کمینه می‌رسد. هزینه‌ی طرح شامل هزینه‌ی میلگردهاست. هزینه‌ی واحد وزن فولاد $kg/9\%$ است که با احتساب چگالی فولاد $kg/m^3 = 7850$ ، مقدار هزینه بر واحد حجم فولاد $\$/m^3 = 7065$ است. مجموعه‌ی روابط ۲، تابع هدف دیوار برشی بتن آرمه هستند:

$$\begin{aligned} Cost_{Shear Wall} &= Cost_{steel} + Cost_{concrete} + Cost_{formwork} \\ Cost_{steel} &= C_s \times (A_{sf} \times H_w + N_v \times A_{sv} \times H_w + N_h \times A_{sh} \times l_w) \\ Cost_{concrete} &= C_c \{ (t_w \times l_w + 2b_f \times (t_f - t_w)) H_w \} \\ Cost_{formwork} &= C_f \{ 2(b_f + t_f - 0.5t_w) + 2(l_w - 2b_f) \} H_w \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن‌ها (شکل ۱)، پارامتر H_w : ارتفاع کل دیوار برشی، پارامتر l_w : طول کل دیوار برشی، پارامتر t_w : ضخامت جان دیوار برشی، پارامتر b_f : طول بال دیوار برشی، پارامتر t_f : ضخامت بال دیوار برشی، پارامتر A_{sf} : سطح مقطع کل آرمتورهای قائم



شکل ۱. جزئیات دیوار برشی بتن آرمه.

تفاوت عمده‌ی الگوریتم‌ها با هم در مقدار خطای پاسخ تقریبی یا همان دقت الگوریتم و سرعت رسیدن به جواب بهینه است. در واقع عوامل ذکر شده، منشأ تولید الگوریتم‌های جدید نیز هستند. به عبارت دیگر، الگوریتم جدیدی که تولید می‌شود سعی در بهبود دقت یا سرعت و یا هر دو عامل را دارد. ترکیب الگوریتم‌ها، یکی از راه‌حل‌های افزایش دقت یا همان عبور از پاسخ‌های بهینه‌ی محلی است، زیرا که جست‌وجو در فضای چندبعدی متغیرهای مسئله توسط هر دو الگوریتم صورت می‌گیرد. ایده‌ی ذکر شده در سال‌های اخیر مورد استقبال پژوهشگران زیادی قرار گرفته است، که برای نمونه می‌توان به نوشتارهایی از جمله ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب و شبکه‌ی عصبی برای حل عملکرد بهینه‌ی طراحی لرزه‌ی سازه‌های فلزی،^[۱۴] ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی در شاخه‌ی فیزیک اتمی،^[۱۵] و نیز حمل و نقل،^[۱۶] ترکیب الگوریتم کلونی زنبور عسل و کلونی مورچه به منظور بهینه‌سازی منابع انرژی،^[۱۷] ترکیب الگوریتم جهش قورباغه و ازدحام ذرات جهت تعمیر و نگهداری از ژن‌تورها،^[۱۸] ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب و ژنتیک برای بهینه‌سازی محل تأسیسات،^[۱۹] و ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و کلونی مورچه به منظور حل مسئله‌ی مرجع فروشنده‌ی دوره‌گرد،^[۲۰] اشاره کرد. در نوشتار حاضر، دو الگوریتم کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات که زیرمجموعه‌ی هوش ازدحامی به‌شمار می‌روند با هم ترکیب و به منظور بهینه‌یابی مسئله‌ی دیوار برشی استفاده شده‌اند.

۲. مسئله‌ی دیوار برشی بتن آرمه

بهینه‌سازی دیوار برشی بتن آرمه به این معناست که هزینه‌ی اجرای یک دیوار (که شامل هزینه‌ی مصالح از جمله فولاد و بتن و هزینه‌ی قالب‌بندی است) به میزان کمینه برسد. توجه به این نکته ضروری است که رسیدن به یک طرح اقتصادی، فقط با رعایت ضوابط طراحی مفهوم پیدا می‌کند. این ضوابط را می‌توان به ۲ دسته تقسیم‌بندی کرد: دسته‌ی اول، همان روابط طراحی است که منجر به ایجاد ظرفیت لازم به‌ازای بارهای وارده به سازه می‌شود؛ و دسته‌ی دوم، رعایت محدودیت‌های آیین‌نامه‌ی (بایدها و نبایدها) است که بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، ضوابط اجزاء مرزی ویژه نیز برای طراحی دیوار برشی بتن آرمه در نظر گرفته شده است.

بهینه‌سازی در حالت کلی برای مسائل گوناگون به دو روش گسسته و پیوسته می‌تواند صورت گیرد. بهینه‌سازی دیوار برشی بتن آرمه هم از این قاعده مستثنی نیست، اما تاکنون پژوهشگران از روش گسسته برای بهینه‌سازی دیوار برشی استفاده کرده‌اند.^[۲۱،۲۲] در بهینه‌یابی گسسته، هزاران طرح فرضی از قبل به الگوریتم معرفی می‌شود و الگوریتم در مسیر بهینه‌یابی هر بار یکی از آن‌ها را انتخاب و ارزیابی می‌کند تا یک طرح که پاسخگوی قیدها باشد و نیز هزینه‌ی کمتری در قیاس با بقیه طرح‌ها دارد، به عنوان طرح بهینه انتخاب شود.

این کار دو ضعف عمده دارد: ۱. ساختن هزاران طرح برای یک دیوار برشی، امری زمان‌بر است و ۲. طرح‌ها باید نسبت به نیروهای وارده معقول باشند (که این مهم نیازمند تجربه است) و یا طرح‌ها آنقدر تنوع داشته باشند که دامنه‌ی وسیعی را پوشش دهند تا به‌ازای نیروهای کم یا زیاد، الگوریتم پاسخ مناسبی برای طراحی داشته باشد. در غیر این صورت هر برنامه فقط برای یک بارگذاری خاص کاربرد دارد و قابل تعمیم نیست. در پژوهش حاضر، بهینه‌یابی دیوار برشی به صورت پیوسته به کمک نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. بهینه‌یابی پیوسته به این معناست که الگوریتم قادر به انتخاب هر مقدار منطقی برای پارامترهای طراحی (طول، چگالی

که در آن، هرگاه که $h_w/l_w \leq 2$ باشد برای دیوارهای برشی ویژه، باید نسبت آرماتورهای قائم جان بیش از نسبت آرماتورهای افقی جان دیوار در نظر گرفته شود. به علاوه اگر $h_w/l_w \geq 2/5$ باشد، باید نسبت آرماتورهای قائم برابر مقدار کمیته‌ی ۰.۲۵ محاسبه شود. بنابراین این آرماتورها طبق رابطه‌ی ۱۳ محدود می‌شوند:

$$0.1 \leq \rho_v \leq 0.25 \quad (13)$$

۲.۲. قیود مسئله

محدودیت‌های طراحی دیوار برشی بتن‌آرمه به این صورت تعریف می‌شوند: هرکدام از المان‌های مرزی همانند یک ستون کوتاه عمل می‌کنند و می‌توان طبق نیروی محوری (P_u) که شامل تمام آثار ثقلی دیوار برشی است، لنگر خمشی (M_u) را به نیروی محوری کششی خالص و فشاری خالص تجزیه کرد (شکل ۲). به این ترتیب آرماتورهای طولی دیوار برشی (اجزاء مرزی) براساس آثار بحرانی‌تر نیروهای مذکور طرح می‌شوند. [۲۴، ۲۵، ۲۶]

نیروی محوری کششی از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{M_u}{l_w - b_f} \quad (\text{نیروی کششی}) \quad (14)$$

$$T_a = \varphi_t A_s f_y \quad (\text{ظرفیت کششی}) \quad (15)$$

که در آن‌ها، φ_t ضریب کاهش مقاومت کششی است و برابر ۰.۹ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، قید اول به صورت رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:

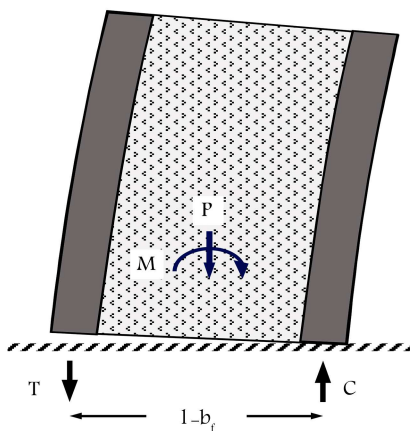
$$g_1 = \frac{T}{T_a} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

نیروی محوری فشاری نیز به صورت روابط ۱۷ و ۱۸ تعریف می‌شود:

$$C = P_u + \frac{M_u}{l_w - b_f} \quad (17)$$

$$C_a = \varphi_c \{0.85 f'_c (A_g - A_{sf}) + A_{sf} f_y\} \quad (18)$$

که در آن‌ها، φ_c ضریب کاهش مقاومت فشاری و برابر ۰.۶۵ و نیز پارامتر $A_g = t_f \times b_f$ ، سطح مقطع کل ناخالص اجزاء مرزی هستند. در نتیجه قید دوم



شکل ۲. تجزیه‌ی نیروهای دیوار برشی به نیروی کششی و فشاری خالص.

بال دیوار برشی، پارامتر A_{sv} : سطح مقطع دو ساق آرماتور قائم جان دیوار برشی، پارامتر A_{sh} : سطح مقطع دو ساق آرماتور افقی جان دیوار برشی.

پارامتر N_v تعداد آرماتورهای قائم جان دیوار برشی است که طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$N_v = 2 \times \left(\frac{l_w - 2b_f}{S_v} \right) \quad (3)$$

که در آن، S_v فاصله‌ی آرماتورهای عمودی جان است، که طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318-11 [۲۳] محاسبه می‌شود. برای پیشینه‌ی فاصله‌ی مذکور، برقراری این سه شرط الزامی است (رابطه‌ی ۴):

$$S_v \leq \min(3t_w, l_w/3, 450) \quad (4)$$

پارامتر N_h تعداد آرماتورهای افقی جان دیوار برشی است که طبق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$N_h = 2 \times \left(\frac{h_w}{S_h} \right) \quad (5)$$

که در آن، S_h فاصله‌ی آرماتورهای افقی جان دیوار است که طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318-11 محاسبه می‌شود. برای پیشینه‌ی فاصله‌ی مذکور، برقراری این سه شرط الزامی است (رابطه‌ی ۶):

$$S_h \leq \min(3t_w, l_w/5, 450) \quad (6)$$

به منظور شرایط ساخت و ساز و بهبود عملکرد دیوار برشی، بهتر است که کمیته‌ی ضخامت جان دیوار ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. [۲۴] بنابراین رابطه‌ی ۷ را خواهیم داشت:

$$t_w \geq 200 \text{ (mm)} \quad (7)$$

طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318-11 در اجزاء مرزی، عرض مؤثر بال تحت فشار (اجزاء مرزی) باید بیش از ۳۰۰ میلی‌متر باشد (رابطه‌ی ۸):

$$t_f \geq 300 \text{ (mm)} \quad (8)$$

محدودیت آرماتورگذاری جان دیوار برشی طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318-11 به این شرح است، [۲۳] محدودی مجاز نسبت مساحت آرماتورهای طولی اجزاء مرزی به سطح مقطع بتن اجزاء مرزی (ρ_f)، به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$0.1 \leq \rho_f \leq 0.06 \quad (9)$$

کمیته‌ی نسبت آرماتورهای برشی قائم و افقی در جان دیوار برشی (ρ_h و ρ_v) به شرط برقراری رابطه‌ی ۱۰، به مقدار ۰.۲۵ محدود می‌شود. به علاوه اینکه فولادهای برشی باید پیوسته باشند و در تمام صفحه‌ی برش توزیع شوند:

$$V_n \geq 0.83 \sqrt{f'_c} A_{cv}, \quad A_{cv} = t_w \times l_w \quad (10)$$

پس برای آرماتورهای برشی افقی، رابطه‌ی ۱۱ برقرار است:

$$0.25 \leq \rho_h \leq 0.1 \quad (11)$$

همچنین نسبت آرماتورهای برشی قائم از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آیند:

$$\rho_v = 0.25 + 0.5 \left(2/5 - \frac{H_w}{l_w} \right) (\rho_h - 0.25) \quad (12)$$

به صورت رابطه‌ی ۱۹ تعریف می‌شود:

$$g_r = \frac{C}{C_a} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

همچنین مقاومت اسمی برشی کل دیوار و یا ستون‌هایی که در تحمل نیروی جانبی سهم هستند، نباید بیش از زیر در نظر گرفته شود: [۲۳]

$$V_{na} = 0.66 \sqrt{f'_c} t_w l_w \quad (20)$$

پس به عنوان قید سوم داریم:

$$g_r = \frac{V_n}{V_{na}} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

از طرفی دیوارهای برشی باید در تمام مرزهایی که تنش فشاری بیشینه در دورترین تار فشاری مقطع از $0.2f'_c$ بیشتر باشد، اجزاء مرزی ویژه داشته باشند (شکل ۳). [۲۳]

بنابراین محاسبات تنش در دورترین تار فشاری مقطع براساس نیروهای ضریب‌دار حاصل از بار زلزله و با استفاده از یک مدل کشسان خطی و خصوصیات ناخالص مقطع از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید:

$$\sigma = \frac{P_u}{A_g} + \frac{M_u}{s_g} \quad (22)$$

$$A_g = t_w \times l_w, \quad s_g = \frac{t_w \times l_w^2}{6}$$

که در آن، A_g سطح مقطع ناخالص و s_g اساس مقطع ناخالص دیوار برشی است. در نتیجه قید چهارم به گونه‌ی تعریف می‌شود که دیوار برشی قطعاً به اجزاء مرزی نیاز داشته باشد. در این صورت رابطه‌ی ۲۳ برقرار است:

$$g_r = \frac{0.2f'_c}{\sigma} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

در دیوارهای برشی بتن آرمه ویژه، باید مقاومت برشی اسمی دیوار از رابطه‌ی ۲۴ کمتر باشد: [۲۳]

$$V_{max} = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} \rho_h F_{yv}) \quad (24)$$

که در آن، رابطه‌ی $A_{cv} = l_w \times t_w$ سطح مقطع ناخالص دیوار برشی و ρ_h درصد فولادهای عرضی نسبت به سطح مقطع ناخالص دیوار برشی است. بنابراین قید پنجم به صورت رابطه‌ی ۲۵ تعریف می‌شود:

$$g_5 = \frac{V_n}{V_{max}} - 1 \leq 0 \quad (25)$$

طول اجزاء مرزی به صورت افقی (b_f) از دورترین تار فشاری باید بیش از مقادیر رابطه‌ی ۲۶ باشد: [۲۳]

$$b_{f_{min}} = \max\left(\frac{c}{\gamma}, c - 0.1l_w\right) \quad (26)$$

که در آن، c ارتفاع ناحیه‌ی فشاری بتن است که طبق رابطه‌ی تقریبی ۲۷ (صرف نظر از آرماتورهای قائم جان) به دست می‌آید: [۲۵]

$$c = \frac{A_{sf} \times F_y + P_u}{f'_c \times t_f} \quad (27)$$

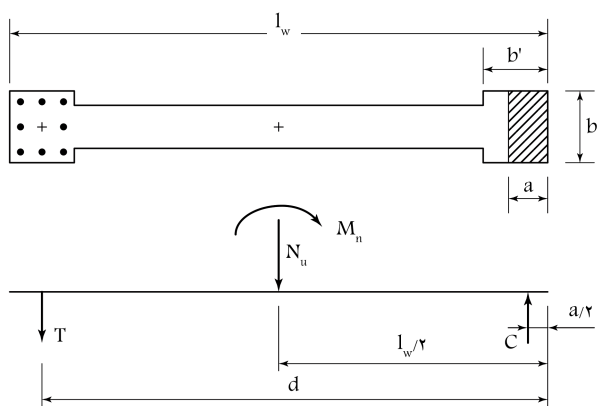
که پارامترهای آن به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. به این ترتیب قید ششم به صورت رابطه‌ی ۲۸ تعریف می‌شود:

$$g_6 = \frac{b_{f_{min}}}{b_f} - 1 \leq 0 \quad (28)$$

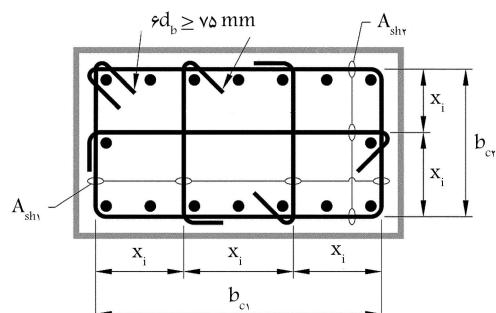
از طرفی، المان‌های مرزی می‌توانند ضخامت بزرگ‌تر یا حتی مساوی ضخامت جان دیوار برشی داشته باشند، اما هیچ‌گاه نباید ضخامت کمتر از ضخامت جان دیوار برای آن‌ها در نظر گرفته شود. [۲۳] پس قید هفتم، به صورت رابطه‌ی ۲۹ است:

$$g_7 = \frac{t_w}{t_f} - 1 \leq 0 \quad (29)$$

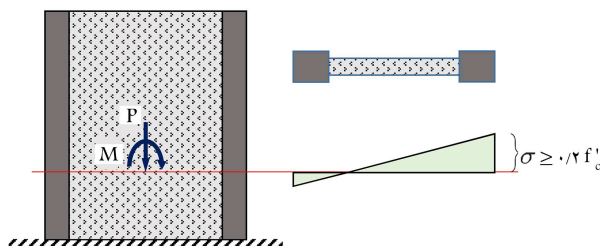
اجزاء مرزی باید یک ناحیه‌ی محصورشده جهت عملکرد مناسب لرزه‌ی باشد، لذا ناحیه‌ی مذکور به خاموت‌گذاری ویژه نیاز دارد (شکل ۵). فولادگذاری عرضی ویژه‌ی اجزاء مرزی (A_{shf}) به نحوی انجام می‌شود که سطح مقطع کل خاموت‌ها



شکل ۴. دیاگرام نیروهای دیوار برشی جهت محاسبه‌ی ارتفاع بلوک فشاری بتن. [۲۵]



شکل ۵. خاموت‌گذاری ویژه در اجزاء مرزی. [۲۳]



شکل ۳. بررسی لزوم اجزاء مرزی با کنترل تنش.

به صورت تنگ مستطیلی در هر سمت، کمتر از دو مقدار به دست آمده از رابطه‌ی ۳۰ نباشد:

$$A_{shf} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.7 \times 9sb_c \frac{f'_c}{F_{yv}} \\ 0.7sb_c \frac{f'_c}{F_{yv}} \left[\left(\frac{A_g}{A_c} \right) - 1 \right] \end{array} \right. \quad (30)$$

که در آن، b_c بعد هسته‌ی اجزاء مرزی در هر سمت است که به اندازه‌ی محور تا محور آرماتور محصورکننده است. پارامتر A_c سطح مقطع هسته‌ی اجزاء مرزی و پارامتر $A_g = b_f \times t_f$ سطح مقطع کل المان است. پارامتر s فاصله‌ی مجاز بین خاموت‌هاست که به صورت رابطه‌ی ۳۱ تعریف می‌شود:

$$s \leq \min \left(\frac{h_{\min}}{4}, 6\Phi_f, S_c = 100 + \frac{350 - h_x}{3} \right) \quad (31)$$

که در آن، h_{\min} کوچک‌ترین بعد اجزاء مرزی، Φ_f قطر آرماتورهای طولی اجزاء مرزی و h_x بیشترین فاصله بین قلاب‌های خاموت (x_i) است. پارامتر S_c نیز به کمینه‌ی ۱۰۰ میلی‌متر و بیشینه‌ی ۱۵۰ میلی‌متر $(100 \leq S_c \leq 150)$ محدود می‌شود.

کمینه‌ی فاصله‌ی میلگردهای قائم المان مرزی (اعضاء تحت فشار که با خاموت محصور شده‌اند)، باید بیش از این دو شرط باشد: [۳۳] الف) برابر بزرگ‌ترین قطر میلگرد قائم $(1.5d_b)$ ، ب) بیش از ۴۰ میلی‌متر. با در نظر گرفتن قطر میلگرد ۳۲ و با احتساب فضای خالص، کمینه‌ی فاصله ۸۰ میلی‌متر فرض و بیشینه‌ی آن نیز به ۲۰۰ میلی‌متر محدود شده است (رابطه‌ی ۳۲):

$$80 \leq S_f \leq 200 (mm) \quad (32)$$

بنابراین برای رعایت محدوده‌ی مجاز ذکر شده، قید هشتم به صورت رابطه‌ی ۳۳ تعریف می‌شود:

$$g_8 = \frac{S_f}{S_{fa}} - 1 \leq 0 \quad (33)$$

همانطور که اشاره شد، مقدار مساحت مورد نیاز برای میلگردهای قائم المان مرزی (A_{sc}) است که برای تبدیل آن به یک طرح مهندسی $(N_f \varphi D_f @ S_f)$ ، قطر میلگرد (D_f) توسط کاربر انتخاب می‌شود و تعداد آن در قید نهم مطابق رابطه‌ی ۳۴ به دست می‌آید:

$$g_9 = \frac{A_{sc}}{N_f \times \pi D_f^2 / 4} - 1 \leq 0 \quad (34)$$

که در آن، A_{sc} مقدار مساحت محاسباتی میلگردهای قائم توسط برنامه و پارامتر N_f تعداد میلگردهای قائم اجزاء مرزی است که در نرم‌افزار به دو دسته میلگرد در راستای طول و عرض اجزاء مرزی تفکیک شده است تا قابلیت جای‌گذاری آن‌ها در ابعاد اجزاء مرزی سنجیده شود و به علاوه یک طرح دقیق به دست آید.

در پژوهش حاضر، آثار قیدها در تابع هدف به صورت یک تابع پنهانی جمع‌شونده تعریف شده است. به این معنی که تابع پنهانی با تابع هدف جمع می‌شود و تابع حاصل از آن‌ها (F) در الگوریتم کمینه می‌شود (رابطه‌ی ۳۵):

$$\begin{aligned} \min F &= Cost_{ShearWall} + f_{penalty} \\ f_{penalty} &= \omega \times V \\ V &= \sum_{i=1}^n (\max[0, g_i]) \end{aligned} \quad (35)$$

تابع پنهانی شامل دو پارامتر است. اول ضریب جریمه $(\omega = 5 \times 10^5)$ که عددی ثابت و بزرگ‌تر از صفر است و دوم (V) مقدار تخطی از قید است.

۳. الگوریتم بهینه‌سازی

در پژوهش حاضر، ترکیب مؤثر دو الگوریتم کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات (FA-PSO) ایجاد شده است. نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۹ [۲۷] نشان می‌دهد که الگوریتم کرم شب‌تاب در پیدا کردن بهینه‌ی مطلق، دقت بسیار بالایی دارد و از آن در زمینه‌های گوناگونی از جمله پردازش تصویر، [۲۸] بهینه‌سازی مسائل غیرخطی، [۲۹] اقتصاد، [۳۰] مدیریت زمان، [۳۱] بهینه‌سازی چندهدفه، [۳۲] استفاده شده است. در پژوهش حاضر، نحوه‌ی تولید الگوریتم پیشنهادی (FA-PSO) به همراه شبه‌کد و توضیح عملکرد آن شرح داده شده است.

۱.۳. الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)

الگوریتم کرم شب‌تاب یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که از طبیعت الهام گرفته شده است. در واقع ایده‌ی اصلی آن از ارتباط نوری میان کرم‌های شب‌تاب است. الگوریتم کرم شب‌تاب در سال ۲۰۰۹ میلادی با این فرضیات معرفی شد: [۸]

۱. کرم‌های شب‌تاب از یک گونه هستند، بنابراین هر کرم شب‌تاب به کرم‌های شب‌تاب دیگر، صرف‌نظر از جنس آن شب‌تاب، جذب می‌شود. رابطه‌ی ۳۶ نشان‌دهنده‌ی شدت جذب (I) است:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r} \quad (36)$$

که در آن، I_0 شدت نور اولیه، γ ضریب ثابت جذب نور و r فاصله‌ی کرم شب‌تاب‌ها از یکدیگر است. از آنجایی که قابلیت جذب‌کنندگی یک کرم شب‌تاب متناسب با شدت نور دیده‌شده توسط کرم‌های شب‌تاب دیگر است، بنابراین رابطه‌ی قابلیت جذب‌کنندگی $\beta(r)$ به صورت رابطه‌ی ۳۷ تعریف می‌شود:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r} \quad (37)$$

که در آن، β_0 قابلیت جذب‌کنندگی در $r = 0$ است.

۲. قدرت جذب‌کنندگی هر کرم شب‌تاب متناسب با میزان درخشندگی آن است، بنابراین برای دو شب‌تاب درخشان، آنکه درخشندگی کمتری دارد، به سوی شب‌تاب درخشان‌تر حرکت می‌کند. درخشندگی و جذب‌کنندگی متناسب با فاصله هستند. به عبارتی دیگر، با افزایش فاصله، درخشندگی کاهش می‌یابد و در نهایت جذابیت هم کم می‌شود. برای محاسبه‌ی فاصله بین دو کرم شب‌تاب i و j که در مکان‌های x_i و x_j هستند، از رابطه‌ی ۳۸ استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = |x_i - x_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (38)$$

که در آن $x_{i,k}$ ، k امین مختصات فضایی شب‌تاب i ام و d تعداد متغیرهای مسئله است.

۳. درخشندگی هر کرم شب‌تاب، متأثر از دورنمای تابع هدفی است که کرم شب‌تاب برای خود ترسیم کرده است. در نهایت حرکت کرم شب‌تاب i به سمت شب‌تاب درخشان‌تر j ، با استفاده از رابطه‌ی ۳۹ محاسبه می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_i e^{-\gamma r_{i,j}^t} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \varepsilon_i^t \quad (39)$$

که در آن، عبارت دوم، مکان حاصل از جذب‌شدگی کرم شب‌تاب و عبارت سوم، پارامتر تصادفی حرکت شب‌تاب را در نظر می‌گیرد. ضریب α ، پارامتر

Objective function $f(x)$, $x = (x_1 \dots x_d)^T$.
 Generate an initial population of n fireflies x_i ,
 ($i = 1, 2 \dots n$).
 Light intensity I_i at x_i is determined by $f(x_i)$.
 Define light absorption coefficient γ .
 Generate an initial population of N particle X_i ,
 ($i = 1, 2 \dots n$).
 Calculate velocity every particle.

While ($t < \text{Max Generation}$),
 For $i = 1: n$ (number of fireflies)
 For $j = 1: n$ (all n fireflies) (inner loop)
 If ($I_i < I_j$)
 Move firefly i towards j .
 End if
 Vary attractiveness with distance r via
 $\exp[-\gamma r^2]$.
 Evaluate new solutions and update light
 intensity.
 End for j
 End for i

For $i = 1: N$ (number of particle)
 Update velocity
 New position = new velocity +
 old position
 Evaluate new solutions

End
 Rank the fireflies and particle.
 Find the current global best.
 End while
 Post process results and visualization.

شکل ۶. شبه کد پیشنهادی ترکیب الگوریتم FA-PSO.

۴. صحت تحلیل مثال عددی

به منظور بررسی نتایج تحلیل برنامه، مثال فولادگذاری دیوار برشی بتن‌آرمه از کتاب سازه‌های بتن‌آرمه‌ی دکتر مستوفی‌نژاد ارائه شده است،^[۲۶] که در مورد یک دیوار برشی بتن‌آرمه به ضخامت ۴۰۰ میلی‌متر است که بین دو محور در پلان ساختمان با فاصله‌ی ۶ متر قرار گرفته است، به طوری که دیوار مذکور با ستون‌های مربعی دو طرف به ابعاد 700×700 میلی‌متر، به صورت یک پارچه اجرا می‌شود. این دیوار در یک ساختمان ۱۲ طبقه واقع شده است؛ به طوری که ارتفاع طبقه‌ی اول ۵ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳ متر است (شکل ۷). دیوار برشی مذکور در پایه‌ی خود تحت نیروی برشی $V_u = 4500 \text{ kN}$ ، نیروی محوری $P_u = 5000 \text{ kN}$ و لنگر خمشی $M_u = 60000 \text{ kN.m}$ (شامل آثار زلزله)، $f_c = 30 \text{ MPa}$ و $f_y = 400 \text{ MPa}$ قرار گرفته است.

تصادفی‌سازی حرکت و ε_i یک بردار اتفاقی با توزیع نرمال است که در بازه‌ی $[0, 1]$ قرار دارد. در بیشتر مسائل بهینه‌سازی، $\alpha \in [0, 1]$ و $\beta_i = 1$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامتر γ برای تعیین سرعت هم‌گرایی الگوریتم و رفتار آن نقش مهمی دارد. بنابراین هر چند از لحاظ تئوری $\gamma \in [0, \infty]$ است، اما در عمل مقدار آن بین ۰٫۱ تا ۱۰ متغیر است.

۲.۳ الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات، یک الگوریتم الهام‌گرفته از طبیعت است که در سال ۱۹۹۵،^[۲۱] توسعه یافته است. الگوریتم مذکور از رفتار جمعی دسته‌ی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است و در آن، جمعیت برای یافتن غذا، فضا را جست‌وجو می‌کنند و به بهترین راه حل دست می‌یابند. هر ذره، سرعت و جابه‌جایی دارد که موقعیت جدید آن به صورت رابطه‌ی ۴۰ تعریف می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (40)$$

که در آن، x_i^{t+1} موقعیت جدید ذره، x_i^t موقعیت فعلی و v_i^{t+1} سرعت حرکت ذره است. هر ذره به تنهایی به دنبال بهترین راه حل می‌گردد و در نهایت، بهترین آن‌ها از میان تمام ذرات به عنوان بهینه‌ی مطلق انتخاب می‌شود. سرعت ذره‌ی i ام از طریق رابطه‌ی ۴۱ محاسبه می‌شود:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i - v_i^t) + c_2 r_2 (p_g - v_i^t) \quad (41)$$

که در آن، v_i^{t+1} و v_i^t سرعت جدید و قدیم ذره‌ی i ام، p_i بهترین پاسخ هر ذره، p_g بهترین پاسخ در میان تمام ذرات، c ضریب وزنی تصادفی بین $[0, 2]$ ، r یک عدد تصادفی بین $[0, 1]$ و ω وزن اینرسی بین $[0, 1/2]$ هستند.

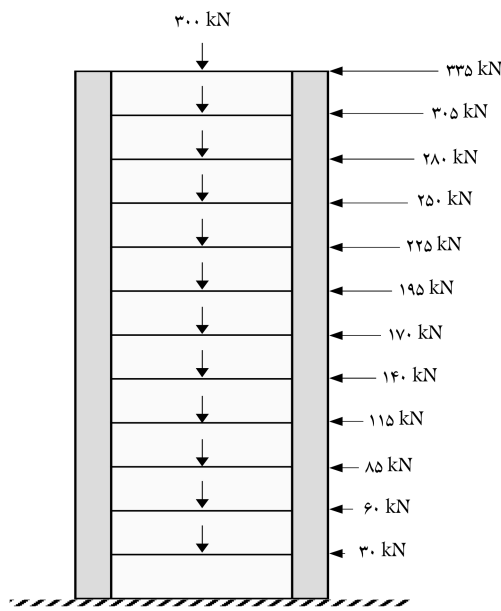
۳.۳ الگوریتم ترکیبی (FA)

از مزایای مهم الگوریتم کرم شب‌تاب می‌توان به دقت بالای آن در حل مسائل بهینه‌سازی اشاره کرد. اما الگوریتم کرم شب‌تاب با افزایش جمعیت، سرعت کمی از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر، الگوریتم ازدحام ذرات، که از رفتار جمعی پرندگان اقتباس شده است، سرعت بالایی در حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی دارد. در پژوهش حاضر، کارایی ترکیب دو الگوریتم کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات برای مسئله‌ی بهینه‌سازی دیوار برشی ارزیابی شده است.

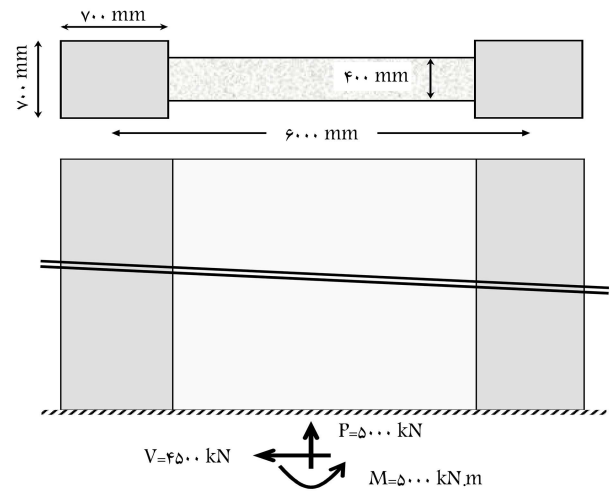
عملکرد الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که ابتدا با الگوریتم کرم شب‌تاب شروع می‌شود و مراحل ذکرشده‌ی اخیر را با تعداد تکرار تعیین شده برای الگوریتم کرم شب‌تاب سپری می‌کند تا بهترین پاسخ را از میان همه‌ی تکرارها به دست آورد. سپس بهترین پاسخ به دست آمده از الگوریتم کرم شب‌تاب وارد چرخه‌ی الگوریتم ازدحام ذرات می‌شود تا از طریق پاسخ مذکور، سرعت هر ذره محاسبه شود و با توجه به سرعت جدید، موقعیت جدید ذره به دست آید و مجدداً پاسخ تابع در موقعیت جدید ذره ارزیابی و با بهترین پاسخ، مقایسه شود (عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات). در صورتی که پاسخ هر چرخه از بهترین پاسخ، بهینه‌تر باشد، جایگزین آن می‌شود. این حلقه تا پایان تعداد تکرار تعیین شده برای الگوریتم ازدحام ذرات ادامه می‌یابد. در نهایت، کل مراحل ذکرشده به تعداد تکرار تعیین شده برای الگوریتم ترکیبی تکرار می‌شود. بنابراین، الگوریتم ترکیبی به‌گونه‌ی نوشته شده است که می‌توان نسبت ترکیب دو الگوریتم و نیز تعداد جمعیت الگوریتم را تنظیم کرد. در شکل ۶، شبه کد تولیدشده‌ی ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات نشان شده است.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج تحلیل نرم‌افزار.

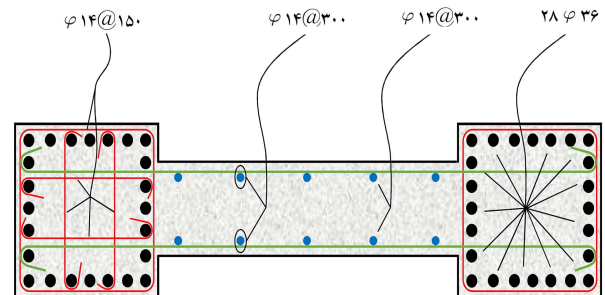
نام پارامتر	علامت اختصاری	نتایج کتاب مستوفی نژاد ^[۲۶]	نتایج برنامه
ضریب ثابت برش	α_e	۱ ÷ ۶	۱ ÷ ۶
فولاد افقی جان	ρ_h	۰٫۰۰۳۳۵	۰٫۰۰۳۲۷
فولاد قائم جان	ρ_v	۰٫۰۰۲۵۷	۰٫۰۰۲۵
فولادهای قائم	ρ_f	۰٫۰۵۷۶۶	۰٫۰۵۷۶۶
اجزای مرزی		۲۸φ۳۶	۲۸φ۳۶



شکل ۹. دیوار برشی ۱۲ طبقه.



شکل ۷. مثال دیوار برشی کتاب سازه‌های بتن‌آرمه.



شکل ۸. پلان دیوار برشی.

۵. بهینه‌یابی مثال عددی

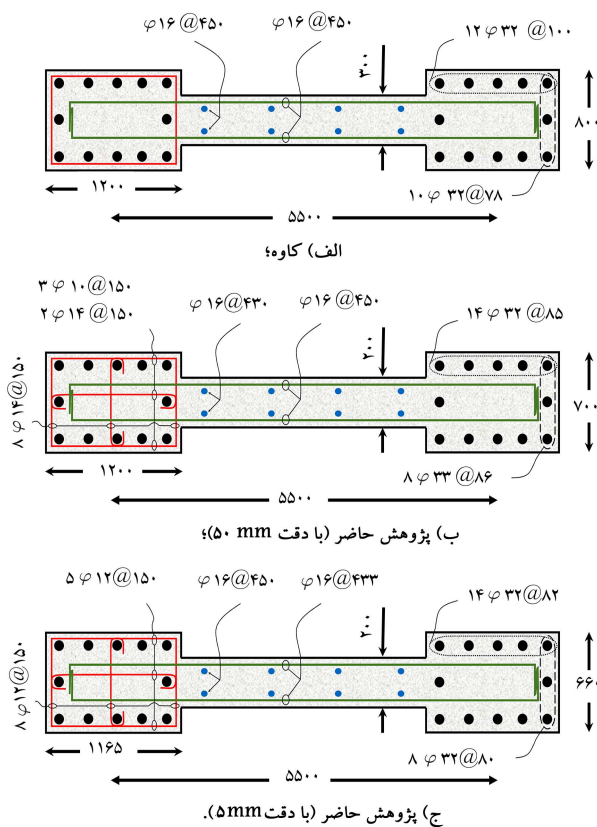
دیوار برشی بتن‌آرمه به ارتفاع ۴۲ متر و طول کلی دیوار از محور تا محور اجزاء مرزی، ۵٫۵ متر است و ۱۲ طبقه دارد و ارتفاع هر طبقه ۳٫۵ متر در نظر گرفته شده است.^[۲۱] دیوار برشی به همراه نیروهای وارد بر هر طبقه در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

در مثال مذکور، تنش تسلیم فولاد 400 N/mm^2 و مقاومت فشاری بیشینه‌ی ۲۸ روزه بتن، 25 N/mm^2 در نظر گرفته شده است. این مسئله به کمک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ارائه‌شده (FA-PSO)، بهینه‌یابی شده است. همچنین ۲۰۰ تکرار برای الگوریتم ترکیبی، ۳۰ تکرار برای الگوریتم ازدحام ذرات، ۳ تکرار برای الگوریتم کرم شب‌تاب، و تعداد ۳۰ عضو به عنوان جمعیت الگوریتم ترکیبی تنظیم شده است. نمودار بهینه‌سازی هزینه دیوار برشی بر حسب تعداد تکرار الگوریتم، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

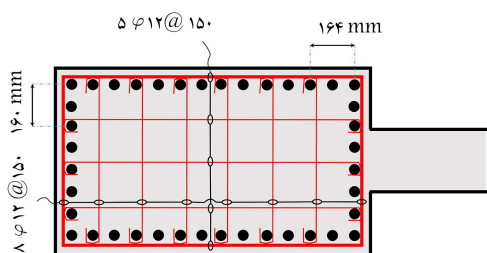
نتایج حاصل از بهینه‌سازی دیوار برشی در جدول ۲ مقایسه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که کمترین هزینه به روش طراحی پیوسته (د) تعلق دارد. زیرا در

در الگوریتم ترکیبی FA-PSO، تمام قيود ابعادی فعال شده‌اند و مقادیر ابعاد مثال مذکور به آن‌ها اختصاص داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل الگوریتم و کتاب مستوفی‌نژاد، در جدول ۱ مقایسه شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، طرح آرماتورگذاری نرم‌افزار با کتاب سازه‌های بتن‌آرمه،^[۲۶] یکسان به‌دست آمده است. بنابراین از دیگر مزایای نرم‌افزار مذکور، قدرت تحلیل و آرماتورگذاری دیوار برشی بتن‌آرمه است. به عبارت دیگر، کاربر می‌تواند با فرض ابعاد مقطع دیوار برشی، طرح صحیح آرماتورگذاری را از نرم‌افزار خروجی بگیرد. جزئیات بیشتر طرح مذکور در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱. جزئیات طرح دیوار برشی.

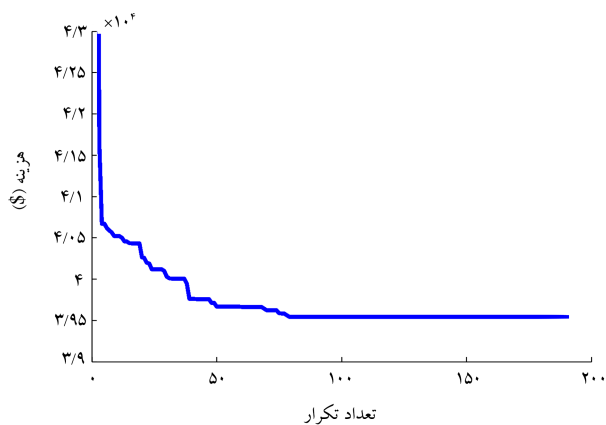


شکل ۱۲. خاموت‌گذاری ویژه‌ی اجزاء مرزی.

دقیق قیود مذکور در جدول ۳ ارائه شده است و مشاهده می‌شود که مقدار همگی آن‌ها، کوچک‌تر یا مساوی صفر است.

۶. دیاگرام تداخلی دیوار برشی

پس از طراحی دیوار برشی بتن‌آرمه ذکرشده، دیاگرام تداخلی (اندرکشش نیروی محوری و لنگر خمشی) به روش پیشنهادی رسم می‌شود. با توجه به اینکه بیشینه‌ی نیروی محوری فشاری دیوار برشی بتن‌آرمه به AP_0 محدود می‌شود، شکل ۱۳ دیاگرام تداخلی اصلاح‌شده‌ی دیوار برشی طراحی شده را نشان می‌دهد (P_0 بیشینه‌ی ظرفیت محوری فشاری خالص دیوار برشی بتن‌آرمه است). دیوار برشی مذکور در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی^[۳۱] و با دیاگرام تداخلی برنامه‌ی نوشته‌شده مقایسه شده است (شکل ۱۴). نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌ی دیوار برشی مذکور، دقت خوبی دارد.



شکل ۱۰. نمودار هزینه - تکرار دیوار برشی.

روش مذکور، تمام پاسخ‌های ممکن قابل انتخاب است و الگوریتم به بهینه‌ی مطلق می‌رسد. اما در عوض نتایج حاصل از آن برای شرایط اجرایی مفهوم مناسبی ندارد. بنابراین روش پیوسته با در نظر گرفتن متغیرهای ابعادی گسسته (ب) فرمول‌نویسی شد، که با انکلی اختلاف هزینه (حدود ۵۱۹ دلارگران‌تر) نسبت به روش اخیر پیوسته (د) شرایط اجرایی را به خوبی برآورده کرده است. در روش ترکیبی پیوسته - گسسته (ج)، دقت ساخت به ۵ mm افزایش یافته و هزینه به طرح پیوسته (د) بسیار نزدیک شده است. با مقایسه‌ی نتایج می‌توان دریافت که تعداد میلگردهای قائم هر جزء مرزی، میلگردهای قائم و افقی جان دیوار برشی در ۳ روش ذکرشده، یکسان به‌دست آمده است.

از سویی ابعاد اجزاء مرزی در ۳ طرح ارائه‌شده (ب، ج و د) نسبت به روش گسسته (الف) کاهش یافته است، که این مهم یکی از دلایل عمده‌ی کاهش هزینه‌ی طرح بوده است؛ زیرا که روش پیوسته می‌تواند هر بُعدی که جواب‌گوی مسئله باشد را انتخاب کند (البته نه به طور کاملاً پیوسته، بلکه قسمت‌هایی از ابعاد به دلیل عدم برقراری قیود حذف می‌شوند) و برخلاف روش گسسته، طرح خاصی به آن تحمیل نمی‌شود. در واقع در روش گسسته (الف)، دیوار برشی با آرما‌تورگذاری و جزئیات کامل فرض و در اختیار الگوریتم قرار گرفته است و الگوریتم از میان طرح‌های ذکرشده با توجه به نیروها و هزینه، یک طرح را انتخاب می‌کند.

از سوی دیگر، در روش پیوسته، بی‌نهایت طرح با آرما‌تورگذاری و ابعاد گوناگون توسط خود الگوریتم بر مبنای رسیدن به هزینه‌ی کمیته ایجاد و ارزیابی می‌شود، تا نهایتاً یک طرح به‌عنوان اقتصادی‌ترین حالت به‌دست آید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در روش مذکور محدودیت طرح وجود ندارد و به‌علاوه‌ی اینکه ابعاد مختلف اجزاء مرزی با انواع چیدمان آرما‌تورگذاری‌ها ایجاد می‌شود که در روش پیوسته این کار بسیار دشوار است. در نتیجه با توجه به موارد ذکرشده، روش مذکور به یک طرح اقتصادی‌تری نسبت به روش گسسته دست می‌یابد. جزئیات بیشتر ۳ طرح مورد بحث در شکل ۱۱ به‌صورت شماتیک ارائه شده است. یکی دیگر از ویژگی‌های برنامه‌ی مذکور، طراحی خاموت‌گذاری ویژه برای اجزاء مرزی است. به نحوی که خاموت‌ها، یک در میان آرما‌تورهای طولی را در برگیرند و فاصله‌ی آن‌ها از ۳۵۰ میلی‌متر بیشتر نشود (جزئیات در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود).

به‌دلیل اینکه تمام قیود طراحی در پژوهش حاضر به‌صورت کوچک‌تر از صفر تعریف شده‌اند، بنابراین قیودی که مقدار آن‌ها منفی باشد، برآورده شده‌اند. مقادیر

جدول ۲. نتایج حل مثال عددی.

روش طراحی بهینه	پیوسته - گسسته		گسسته [۲۱]	نام گذاری روش
	(دقت ۵ mm)	(دقت ۵°)		
د	ج	ب	الف	نام گذاری روش
FA-PSO	FA-PSO	FA-PSO	CSS	الگوریتم بهینه سازی
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	ضخامت جان t_w (mm)
۶۵۹	۶۶۰	۷۰۰	۸۰۰	عرض اجزای مرزی t_f (mm)
۱۱۶۳	۱۱۶۵	۱۲۰۰	۱۲۰۰	طول اجزای مرزی b_f (mm)
۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	قطر میلگرد اجزای مرزی (mm)
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	تعداد میلگردهای اصلی (قائم) هر اجزای مرزی
۳۹۵۲۵	۳۹۵۴۴	۴۰۰۴۴	۴۱۸۳۱	هزینه (\$)

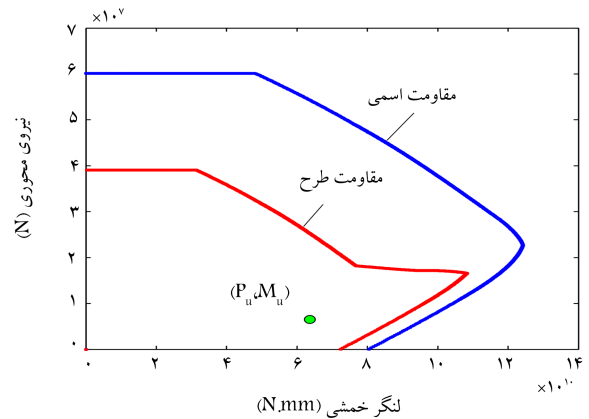
جدول ۳. مقادیر قیدهای طراحی دیوار برشی.

مقدار	قیدها
$-۰٫۰۰۱۳$	$g_1 = \frac{T}{T_a} - 1 \leq 0$
$-۰٫۰۲۵۶$	$g_2 = \frac{C}{C_a} - 1 \leq 0$
صفر	$g_3 = \frac{V_n}{V_a} - 1 \leq 0$
$-۰٫۸۹۵۵$	$g_4 = \frac{v^2 f_c'}{\sigma} - 1 \leq 0$
$-۰٫۳۴۲۸$	$g_5 = \frac{V_n}{V_{max}} - 1 \leq 0$
$-۰٫۴۹۶۲$	$g_6 = \frac{b f_{min}}{T_f} - 1 \leq 0$
$-۰٫۶۹۷۰$	$g_7 = \frac{t_f}{t_w} - 1 \leq 0$
$-۰٫۵۹۵۰$	$g_8 = \frac{S_f}{T_{fa}} - 1 \leq 0$
صفر	$g_9 = \frac{A_{ss}}{A_{sd}} - 1 \leq 0$

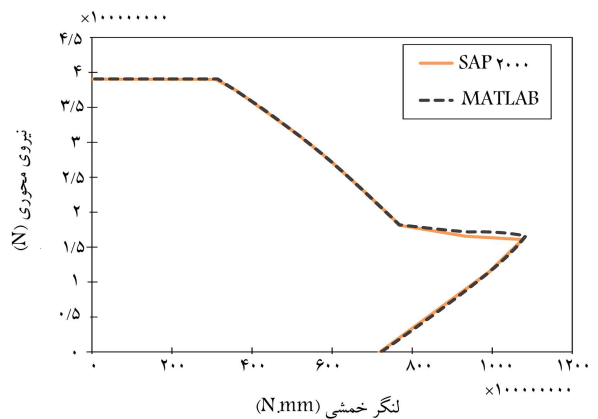
جدول ۴. تنظیمات الگوریتم‌ها برای مقایسه‌ی بهینه‌یابی دیوار برشی.

نام الگوریتم	ترکیبی (FA-PSO)	ازدحام ذرات (PSO)	کرم شب‌تاب (FA)
جمعیت کل	۳۰	۵۰۰	۵۰۰
تعداد تکرار	۲۰۰	۶۵۰	۶۵۰
نسبت ترکیب	۳(FA)/۳۰(PSO)	-	-
هزینه (\$)	۳۹۵۴۴	۳۹۵۴۴	۴۰۳۴۴

دو الگوریتم دیگر به نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق رسیده است. این در حالی است که الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با جمعیت معادل ۵۰۰، در تعداد تکرار ۶۱۷ به نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق رسیده و الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) با همین تعداد جمعیت در بهینه‌ی محلی به کار خود پایان داده است. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر آن است که با توجه به اینکه هر تکرار الگوریتم ترکیبی، شامل چندین تکرار از هر الگوریتم است؛ بنابراین هزینه‌ی تکرار اول در الگوریتم ترکیبی نسبت به دیگر الگوریتم‌ها به جواب بهینه‌ی مطلق نزدیک‌تر است. به علاوه اینکه شیب نمودار الگوریتم ترکیبی در جهت حرکت به سمت بهینه بسیار تندتر از دیگر الگوریتم‌هاست. به عبارت دیگر، هم‌گرایی الگوریتم ترکیبی (FA-PSO) به جواب بهینه‌ی مطلق سریع‌تر است. نتایج حاصل از روند هزینه - تکرار هر الگوریتم به صورت مقایسه‌ی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. دیاگرام تداخلی اصلاح‌شده دیوار برشی.

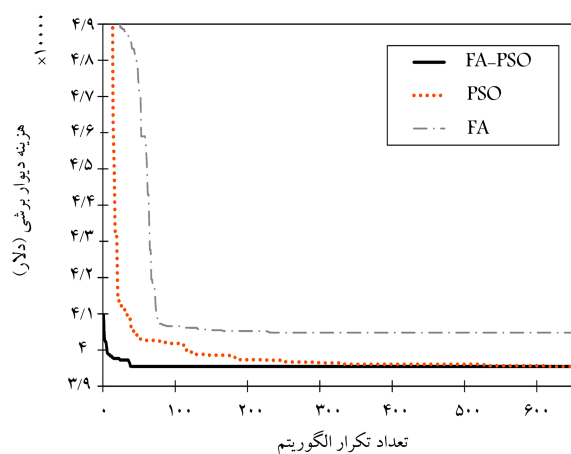


شکل ۱۴. مقایسه‌ی دیاگرام تداخلی با نرم‌افزار SAP.

۷. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

به منظور بررسی کارایی الگوریتم ترکیبی کرم شب‌تاب و ازدحام ذرات در بهینه‌سازی دیوار برشی بتن آرمه، مسئله‌ی مذکور با ۳ الگوریتم ترکیبی FA-PSO، ازدحام ذرات (PSO) و کرم شب‌تاب (FA) به طور جداگانه بهینه‌یابی شده است. تنظیمات مربوط به هر الگوریتم در جدول ۴ ارائه شده است. بنابراین از نمودار فوق می‌توان دریافت که الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی FA-PSO با جمعیت کمتر (۳۰ عدد) و در تعداد تکرار کمتری (۸۵ تکرار) نسبت به

۱۱-۳۱۸ ACI صورت گرفته است. این امر نیازمند برنامه‌نویسی با حساسیت بالایی است؛ زیرا که یک دیوار برشی بتن‌آرمه با شرایط لرزه‌ی طرح می‌شود، که در عین حال هزینه‌ی اقتصادی کمینه نیز دارد. یکی از مزایای دیگر برنامه‌ی مذکور، پیوسته بودن الگوریتم است، که اولاً نیاز به طرح‌های از پیش آماده (پایگاه داده) ندارد (که این امر خود مستلزم برنامه‌نویسی و صرف زمان زیادی است) و دوم اینکه با تغییر نیروها، احتیاج به تغییر در کد برنامه نیست. به عبارت دیگر، برنامه برای دیوار خاصی نوشته نشده است و قابلیت تعمیم برای هر نوع بارگذاری را دارد؛ و از سوی دیگر طراحی گسسته الزاماً ممکن است به نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق نرسد، زیرا که طرح‌های از پیش آماده به الگوریتم دیکته شده است. بنابراین در طراحی پیوسته، مشکل مذکور وجود ندارد، اما در عوض کدنویسی دشوارتری مطرح می‌شود. زیرا که برنامه باید تمام موارد لازم در طراحی دیوار برشی (نحوه‌ی چیدمان میلگردها، فواصل میلگردها، و غیره) را در حین بهینه‌یابی در نظر بگیرد. مقایسه‌ی روش گسسته با روش پیشنهادی (پیوسته) نشان می‌دهد که حتی با در نظر گرفتن شرایط ساخت در روش مذکور (پیوسته - گسسته)، باز هم الگوریتم طرحی با هزینه‌ی کمتر پیشنهاد داده است. همچنین عملکرد الگوریتم ترکیبی FA-PSO بر روی مسئله‌ی بهینه‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه سنجیده شده است و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی در تعداد تکرار کمتری می‌تواند به جواب بهینه‌ی مطلق برسد و دقت بسیار مناسبی دارد.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه‌ی ۳ الگوریتم FA-PSO، PSO و FA در بهینه‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه.

۸. نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی دیوار برشی بتن‌آرمه با احتساب شرایط لرزه‌ی به‌کمک ضوابط آیین‌نامه‌ی

پانویس‌ها

1. genetic algorithm
2. particle swarm optimization (PSO)
3. harmony search
4. simulated annealing
5. firefly algorithm

منابع (References)

1. Golberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley (1989).
2. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimization, 1942-1948", In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks (1995).
3. Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colnari, A. "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. systems, man, and cybernetics, part B: Cybernetics", *IEEE Transactions*, **26**(1), pp. 29-41 (1996).
4. Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G. "New heuristic optimization algorithm: Harmony search", *Simulation*, **76**(2), pp. 60-68 (2001).
5. Karaboga, D. "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department (2005).
6. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (2007).
7. Kirkpatrick, S. and Vecchi, M. "Optimization by simulated annealing", *Science*, **220**(4598), pp. 671-680 (1983).
8. Yang, X.-S. "Firefly algorithms for multimodal optimization, in Stochastic algorithms: Foundations and applications", Springer, pp. 169-178 (2009).
9. Miguel, L.F.F., Lopez, R.H. and Miguel, L.F.F. "Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm", *Advances in Engineering Software*, **56**, pp. 23-37 (2013).
10. Gandomi, A.H., Yang, X.-S. and Alavi, A.H. "Mixed variable structural optimization using firefly algorithm", *Computers & Structures*, **89**(23-24), pp. 2325-2336 (2011).
11. Liao, T.W., Kuo, R.J. and Hu, J.T.L. "Hybrid ant colony optimization algorithms for mixed discrete-continuous optimization problems", *Applied Mathematics and Computation*, **219**(6), pp. 3241-3252 (2012).
12. Khazaeni, G., Khanzadi, M. and Afshar, A. "Risk allocation optimization in a construction project using the ant colony algorithm", *Scientific Journal Management System*, **29-2**(3), pp. 61-69 (2013).
13. Ghiassian, H. and Aladini, K.K. "Optimum design of reinforced earth structures; particle swarm optimization approach", *Scientific Journal Management System*, **27-2**(2), pp. 15-21 (2011).

14. Gholizadeh, S. "Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network", *Advances in Engineering Software*, **81**, pp. 50-65 (2015).
15. Wang, J., Yuan, W. and Cheng, D. "Hybrid genetic-particle swarm algorithm: An efficient method for fast optimization of atomic clusters", *Computational and Theoretical Chemistry*, **1059**(0), pp. 12-17 (2015).
16. Wang, Y. and et al. "Two-echelon logistics distribution region partitioning problem based on a hybrid particle swarm optimization-genetic algorithm", *Expert Systems with Applications*, **42**(12), pp. 5019-5031 (2015).
17. Kefayat, M., Lashkar Ara, A. and Nabavi Niaki, S.A. "A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources", *Energy Conversion and Management*, **92**(0), pp. 149-161 (2015).
18. Giftson Samuel, G. and Christofer Asir Rajan, C. "Hybrid: Particle swarm optimization-genetic algorithm and particle swarm optimization-shuffled frog leaping algorithm for long-term generator maintenance scheduling", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **65**(0), pp. 432-442 (2015).
19. Rahmani, A. and MirHassani, S.A. "A hybrid firefly-genetic algorithm for the capacitated facility location problem", *Information Sciences*, **283**(0), pp. 70-78 (2014).
20. Mahi, M., Baykan, O.K. and Kodaz, H. "A new hybrid method based on particle swarm optimization, ant colony optimization and 3-opt algorithms for traveling salesman problem", *Applied Soft Computing*, **30**, pp. 484-490 (2015).
21. Kaveh, A. and Zakian, P. "Performance based optimal seismic design of RC shear walls incorporating soil-structure interaction using CSS algorithm", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, **2**(3), pp. 383-405 (2012).
22. Atabay, S. "Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm", *Expert Systems with Applications*, **36**(2), pp. 3555-3561 (2009).
23. ACI 318-11 "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary (318R-11)", (2011).
24. Moehle, J.P., Ghodsi, T., Hooper, J.D., Fields D.C. and Gedhada, R. "Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams", NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 6 (2011).
25. MacGregor, J.G. and Wight, J.K. "Reinforced concrete: Mechanics and design", 6th Prentice Hall Upper Saddle River, NJ (2012).
26. Mostofinejad, D., *Reinforced Concrete Structures*, 2, Esfahan, Arkan Danesh (2009).
27. Yang, X.-S. "Firefly algorithms for multimodal optimization", *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, Springer, pp. 169-178 (2009).
28. Zhang, Y. and Wu, L. "A novel method for rigid image registration based on firefly algorithm", *International Journal of Research and Reviews in Soft and Intelligent Computing (IJRRSIC)*, **2**, pp.141-146 (2012)
29. Chai-Ead, N., Aungkulanon, P. and Luangpaiboon, P. "Bees and firefly algorithms for noisy non-linear optimization problems", *Proceedings of the International Multi Conference of Engineering and Computer Scientists*, **2**, (16-18 March, 2011).
30. Sulaiman, M.H., Daniyal, H. and Mustafa, M.W. "Modified firefly algorithm in solving economic dispatch problems with practical constraints", *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, pp. 157-161 (2012).
31. Rahmani, A. and MirHassani, S. "A hybrid firefly-genetic algorithm for the capacitated facility location problem", *Information Sciences*, **283**, pp. 70-78 (2014).
32. SAP2000, "C.S.I: Analysis reference manual", Computers and Structures Incorporation, Berkeley, California, USA (2000).