

Determining the Optimal Cost of Concrete Ribbed Slabs Based on Load and Beam Span

Shima Bijari

*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand
shbijari@birjand.ac.ir*

Abstract

To optimize the cost of a reinforced concrete ribbed slab, the cross section area and the cost of concrete and steel used in it should be reduced. To calculate the cross section area of concrete and steel of concrete ribbed slab, six design variables are defined that are related to slab thickness, bar diameter and ribs dimensions. To solve this optimization problem in this paper, the colliding bodies optimization (CBO) algorithm is used. The CBO algorithm is a new metaheuristic algorithm that it does not require input parameters and their adjusting and requires less computational effort and time. In order to evaluate the effect of loading and beam span parameters on the optimal cost of concrete slabs, three different cases are defined. In each case, one loading state and four different beam spans are considered. In each state, due to the change of input parameters, the optimal design problem is executed independently and the value of the objective function and the corresponding value of the design variables are determined. In this way, the sensitivity of the optimal cost of concrete slabs to the loading and beam span parameters is analyzed. The results of this study Shows the effect of changes in beam span on the cost of ribbed concrete slab is much greater than the effect of load changes on the cost of slab. In other words, the least change in the objective function due to changes in the length of the beam span in a certain loading case, has resulted in an increase of about 100% in the objective function, but the effect of loading on changing the cost of ribbed slab is much less.

Keywords: *Metaheuristic Algorithm, Optimization, Reinforced Concrete, Structure Design, Concrete Ribbed Slab Cost.*

تعیین هزینه بهینه دال‌های بتنی دندان‌دار بر اساس بارگذاری و دهانه تیر

دریافت مقاله: ۱۹-۱۰-۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۲۵-۱۲-۱۳۹۹

شیمای بیجاری

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

shbijari@birjand.ac.ir

چکیده

برای بهینه‌یابی هزینه یک دال بتن مسلح دندان‌دار باید سطح مقطع و هزینه بتن و فولاد مصرف شده در آن را کاهش داد. برای محاسبه سطح مقطع بتن و فولاد دال بتنی دندان‌دار، شش متغیر طراحی تعریف می‌شود که با ضخامت دال، قطر میلگرد و ابعاد دندان‌ها مرتبط می‌باشد. برای حل این مسئله بهینه‌یابی در این مقاله از الگوریتم بهینه‌یابی اجسام برخوردکننده (CBO) استفاده می‌شود. الگوریتم CBO یک الگوریتم فراکاوشی جدید است که به پارامترهای ورودی و میزان سازی آن‌ها نیاز ندارد و تلاش محاسباتی و زمان کمتری را می‌خواهد. به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای بارگذاری و دهانه تیر بر هزینه بهینه دال‌های بتنی، سه وضعیت مختلف تعریف می‌شود. در هر وضعیت یک حالت بارگذاری و چهار دهانه تیر متفاوت در نظر گرفته می‌شود. در هر حالت با توجه به تغییر پارامترهای ورودی مسئله طراحی بهینه به طور مستقل اجرا می‌گردد و مقدار تابع هدف و مقدار متناظر متغیرهای طراحی تعیین می‌شود. به این ترتیب، حساسیت هزینه بهینه دال‌های بتنی نسبت به پارامترهای بارگذاری و دهانه تیر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد میزان تأثیر تغییرات دهانه تیر بر روی مقدار هزینه دال بتنی دندان‌دار بسیار بیشتر از میزان تأثیر تغییرات بارگذاری بر روی مقدار هزینه دال می‌باشد به عبارتی کمترین تغییر تابع هدف به خاطر تغییرات طول دهانه تیر در یک حالت بارگذاری مشخص، افزایش حدوداً ۱۰۰ درصدی مقدار تابع هدف را در پی داشته است اما میزان تأثیر بارگذاری در تغییر مقدار هزینه دال دندان‌دار بسیار کمتر می‌باشد.

کلید واژه: الگوریتم فراکاوشی، بهینه‌یابی، دال بتن مسلح، طراحی سازه، هزینه دال بتنی دندان‌دار.

دال یک عضو سازه‌ای می‌باشد که ضخامت آن در مقایسه با طول و عرض آن کم می‌باشد. دال‌ها معمولاً در ساخت کف و سقف استفاده می‌شود. وظیفه دال در یک سازه بتن مسلح، ایجاد یک سطح تخت قابل استفاده می‌باشد. دال بتن مسلح می‌تواند روی تیرهای بتن مسلح و فولادی، دیوار بتن مسلح و غیر مسلح و بنایی، ستون‌های بتن مسلح و فولادی و بالاخره بستر زمین تکیه داشته باشد. سیستم کف‌های سازه‌ای که از بتن مسلح ساخته شده است، نیاز به انتقال مؤثر بارهای کف به دستگاه‌های عمودی دارد که از طریق ظرفیت مقاومت در برابر برش، خمش و پیچش صورت می‌گیرد. علاوه بر نیاز به مقاومت، کف‌ها باید معیار تغییر شکل را ارضاء کنند که عرض ترک و افتادگی کم باشد. مجموعه عوامل فوق سبب می‌شود که مسئله طراحی بهینه دال‌های بتنی یک مسئله بهینه‌یابی غیرخطی و پیچیده باشد که برای حل آن نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد.

در زمینه طراحی بهینه دال‌های بتنی مطالعات متعددی صورت گرفته است [۱] و برای یافتن پاسخ‌های بهینه الگوریتم‌های فراکاوشی متنوعی به کار گرفته شده‌اند. بهینه‌یابی هزینه ساختمان‌های بتن مسلح با دال تخت توسط سحاب و همکاران [۲] انجام شده است. این طراحی مطابق با آیین‌نامه BS8110 [۳] می‌باشد. تابع هدف هزینه تمام ساختمان که شامل هزینه کف‌ها، ستون‌ها و پی‌ها می‌شود، می‌باشد. هزینه هر المان سازه‌ای شامل مصالح و نیروی انسانی برای آرماتور، بتن و قالب‌بندی می‌شود. سازه با روش قباب معادل مدل‌سازی و تحلیل می‌شود که طی چند مرحله بهینه‌یابی می‌شود و عبارتند از طرح کلی بهینه ستون‌ها، ابعاد مقطع و آرماتور المان‌های مختلف بتن مسلح. در طراحی بهینه از یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک [۴] استفاده می‌شود. در این مرجع سه مثال عددی در نظر گرفته می‌شود و شامل یک ساختمان یک طبقه، یک ساختمان چهار طبقه و یک مثال طراحی مقایسه‌ای می‌شود.

توسط Prasad و همکاران [۵] ابعاد بهینه دال دندان‌دار دو طرفه برای کف‌های با اندازه متوسط ارائه می‌شود. تعیین ابعاد بهینه دال برای دست‌یابی به توزیع بهتر بارها بدون نیاز به آرماتور برشی نیاز هست. هدف تعیین مقادیر بهینه تعداد دندان‌ها و ابعاد آن‌ها می‌باشد. در هر چهار طرف دال تیر نواری وجود دارد و فرض شده است که دال با تیرهای نواری به صورت یکپارچه متصل است. این طراحی برای یک کف مربع شکل با سه ابعاد مختلف و دو بار زنده با مقادیر متفاوت انجام می‌شود. برای تحلیل دال‌های دندان‌دار از نظریه صفحه، روش اجزاء محدود و تحلیل شبکه استفاده می‌شود.

توسط Alaa C. Galeb و همکاران [۶] طراحی بهینه دال‌های بتن مسلح دندان‌دار دو طرفه ارائه می‌شود. این طراحی با الگوریتم ژنتیک [۷] بهینه می‌شود. تابع هدف هزینه سازه می‌باشد و شامل هزینه بتن، فولاد و قالب‌بندی دال می‌شود. متغیرهای طراحی عمق مؤثر دال، عرض دندان‌ها، فاصله بین دندان‌ها، ضخامت دال بالا، سطح مقطع آرماتور خمشی در مقاطع بحرانی خمش، عرض تیرهای نواری و سطح مقطع آرماتور تیرها می‌باشد. طراحی با روش طراحی مقاومت نهایی و مطابق آیین‌نامه ACI 318-05 [۸] انجام می‌شود.

توسط کاوه و همکاران [۹] بهینه‌یابی هزینه دال بتن مسلح دندان‌دار یک طرفه ارائه می‌شود. این طراحی با الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) [۱۰] بهینه می‌شود و مطابق با آیین‌نامه ACI 318-05 [۸] می‌باشد. تابع هدف هزینه دال است که شامل هزینه بتن، فولاد، بتن‌ریزی و آرماتوربندی می‌شود. متغیرهای طراحی عبارتند از ضخامت دال بالا، فاصله دندان‌ها، عرض دندان‌ها در انتهای پایین، عرض دندان‌ها در انتهای بالا، ارتفاع دندان‌ها و قطر میلگرد.

توسط کاوه و بهنام [۱۱] طراحی بهینه دال دندان‌دار یک طرفه، دال کامپوزیت و قالب‌بندی یک دال ارائه می‌شود. این طراحی بر اساس آیین‌نامه ACI 318-05 [۸] و روش طراحی ضریب بار و مقاومت (LRFD) از AISC [۱۲] می‌باشد و با الگوریتم‌های جستجوی ذرات باردار (CSS) [۱۳]، جستجوی ذرات باردار پیشرفته (Enhanced

(CSS) [۱۴] و جستجوی هارمونی بهبود یافته (IHS) [۱۵] بهینه می‌شود. تابع هدف هزینه سازه می‌باشد. در مثال دال دندانه‌دار یک‌طرفه متغیرهای طراحی شامل ضخامت دال بالا، فاصله دندانه‌ها، عرض دندانه در انتهای پایین، عرض دندانه در انتهای بالا، ارتفاع دندانه و قطر میلگرد می‌شود. این بهینه‌یابی برای سه دهانه با اندازه مختلف انجام می‌شود.

در تحقیقات پیشین طراحی بهینه دال بتنی دندانه‌دار براساس آیین‌نامه‌های موجود و با استفاده از برخی از الگوریتم‌های فراکاوشی با یک طول دهانه تیر ثابت و بار مرده و زنده ثابت انجام شده است. علاوه بر این الگوریتم‌های فراکاوشی استفاده شده در آن‌ها، دارای پیچیدگی‌ها و محدودیت‌هایی است که ممکن است سبب فاصله گرفتن از پاسخ بهینه نهایی گردد. براین اساس مهم‌ترین ویژگی‌های مقاله به شرح زیر می‌باشد:

• در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌یابی اجسام برخوردکننده^۱ (CBO) استفاده شده است که یک الگوریتم فراکاوشی اخیراً توسعه یافته می‌باشد که در کارهای پیشین برای این سازه به کار برده نشده است. وجه تمایز اصلی آن با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی این است که به پارامترهای ورودی و میزان‌سازی آن‌ها نیاز ندارد و تلاش محاسباتی و زمان کمتری را می‌خواهد.

• به منظور اعتبارسنجی طراحی بهینه دال‌های بتنی دندانه‌دار با الگوریتم CBO، طراحی بهینه این دال با الگوریتم‌های بهینه‌یابی تجمع ذرات استاندارد (PSO) و تجمع ذرات دموکراتیک (DPSO) نیز انجام شده است و نتایج آن با یکدیگر و با مقاله [۹] که با الگوریتم HS انجام شده است، مقایسه صورت می‌گیرد.

• در این پژوهش فرآیند طراحی پیشنهادی برای ۱۲ حالت انجام می‌شود و ابعاد مختلف سازه و دیگر پارامترهای طراحی تعیین می‌گردد. سپس با مقایسه‌ی نتایج، حساسیت تابع هزینه دال نسبت به طول دهانه تیر و میزان بارگذاری سنجیده می‌شود که این تحلیل پارامتری، پیش از این با این الگوریتم فراکاوشی و این سازه انجام نشده است.

ادامه این مقاله به صورت زیر ساماندهی می‌شود. در بخش دوم مسئله بهینه‌یابی هزینه دال بتن مسلح دندانه‌دار یک طرفه مدل‌سازی می‌شود. تابع هدف مسئله هزینه بتن و فولاد می‌باشد. سپس متغیرهای مسئله و قیود طراحی آن ارائه می‌شود. در بخش سوم الگوریتم بهینه‌یابی اجسام برخوردکننده (CBO) که به تازگی توسعه یافته است [۱۶-۱۸] و در این مقاله برای یافتن پاسخ بهینه مسئله به کار گرفته شده است، مختصراً توضیح داده می‌شود. سپس در بخش چهارم نتایج مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار MATLAB ارائه می‌گردد. در این بخش برای بررسی اثرات دهانه تیر و بارگذاری بر روی بهینه‌یابی هزینه دال دندانه‌دار سه وضعیت مختلف مطالعه می‌گردد. در پایان نیز نتیجه‌گیری از مباحث ارائه شده بیان می‌شود.

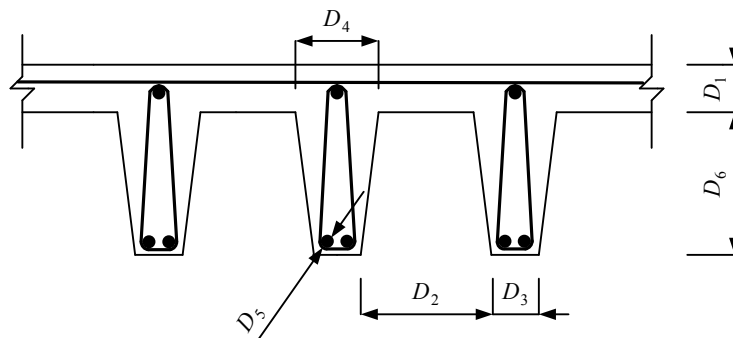
۲- مدل‌سازی مسئله طراحی دال‌های بتنی دندانه‌دار

یک سیستم کف تیرچه یک طرفه عبارت است از دال‌های توخالی با یک عمق کلی که بیشتر از دال‌های صلب است. از آنجایی که مقاومت بتن در کشش در مقایسه با مقاومت آن در فشار بسیار کم می‌باشد، بتن در ناحیه کشش غیر مؤثر می‌باشد. بتن در ناحیه کشش می‌تواند در دندانه‌های با فاصله منظم متمرکز شود که با دال بالای خود به صورت یکپارچه ساخته می‌شود. بلوک‌های سوراخ‌دار که از بتن سبک یا مصالح دیگر ساخته می‌شوند، بین دندانه‌ها قرار می‌گیرند و یا فضای خالی بین دندانه‌ها بدون هیچ مصالح پرکننده‌ای باز می‌ماند. استفاده از این بلوک‌ها پوشش سقف را راحت می‌کند که اغلب برای تأسیسات معماری و بهداشتی مورد نیاز است و علاوه بر اینکه بار مرده دال را بسیار کاهش می‌دهد، عایق خوب حرارت و صدا نیز می‌باشد. کف‌های دال دندانه‌دار برای

¹ Colliding Bodies Optimization

ساختمان‌هایی از قبیل بیمارستان‌ها، مدارس، هتل‌ها و آپارتمان‌هایی که بارهای وارده بر آن‌ها کم و دهانه آن‌ها نسبتاً بزرگ هستند، اقتصادی‌ترین می‌باشد.

برای بهینه‌یابی هزینه‌یابی یک دال بتن مسلح دندانه‌دار یک طرفه دو سر ساده باید هزینه بتن و فولاد مصرف شده در آن را کاهش داد. به عبارت دیگر باید سطح مقطع بتن و فولاد سازه را کم کرد و برای محاسبه سطح مقطع بتن و فولاد دال بتنی دندانه‌دار، شش متغیر طراحی انتخاب می‌شود که در شکل ۱ نشان داده می‌شود و با این شش متغیر یک دال بتنی دندانه‌دار مدل‌سازی می‌شود. این متغیرها شامل ضخامت دال بالا (D_1)، فاصله دندانه‌ها (D_2)، عرض دندانه در انتهای پایین (D_3)، عرض دندانه در انتهای بالا (D_4)، قطر میلگرد (D_5) و عمق دندانه (D_6) می‌شود.



شکل ۱- یک دال دندانه‌دار و متغیرهای طراحی مورد نظر

۱.۲. تابع هدف مسئله

تابع هدف مسئله هزینه بتن و فولاد دال بتنی می‌باشد. با حداقل کردن یک تابع هزینه ساده و مناسب می‌توان به یک راه‌حل بهینه برای یک دال بتنی دندانه‌دار رسید. طراحی بهینه یک دال بتنی دندانه‌دار با حداقل کردن هزینه‌های بتن و آرماتور فولادی تعیین می‌شود. تابع هدف می‌تواند به صورت رابطه (۱) بیان شود:

$$Cost = V_{conc} \times (C_{cm} + C_c) + W_{steel} \times (C_{sm} + C_e) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن $\overline{Cost} = Cost / (C_{cm} + C_c)$ ، رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\overline{Cost} = (V_{conc} + W_{steel} \left(\frac{C_{sm} + C_e}{C_{cm} + C_c} \right)) / l \quad (2)$$

که V_{conc} و W_{steel} به ترتیب حجم بتن و وزن فولاد آرماتور در واحد طول می‌باشد (متر مکعب بر متر و کیلوگرم بر متر)، C_{cm} و C_{sm} هزینه بتن و فولاد (دلار بر متر مکعب برای بتن و دلار بر کیلوگرم برای فولاد)، C_c و C_e هزینه بتن‌ریزی و نصب آرماتور می‌باشد، l فاصله مرکز به مرکز دندانه‌ها (متر) می‌باشد. این پارامتر برای در نظر گرفتن تعداد دندانه‌ها در واحد طول مقطع دال دندانه‌دار می‌باشد. $Cost$ هزینه دال بتنی دندانه‌دار به واحد دلار بر متر و \overline{Cost} هزینه نرمالیزه شده دال بتنی دندانه‌دار بر حسب هزینه بتن و بتن‌ریزی می‌باشد. بر پایه مقالات و تخمین هزینه انجام شده مقدار 0.4 برای C ($C = \frac{C_{sm} + C_e}{C_{cm} + C_c}$) در نظر گرفته می‌شود [۹].

۲.۲. قیود طراحی

برای طراحی این مسئله مطابق با آیین‌نامه ACI 318-05 [۸] قیود زیر باید در نظر گرفته شود:

- قید خمشی
- قید برشی
- قیدهای تعمیر پذیری

- قیده‌های خیز
- سایر قیود

قید خمشی که به منظور کنترل نسبت ممان خمش طراحی نهایی به مقاومت خمشی اسمی کاهش یافته بتن هست، به صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود:

$$M_u / (\phi_b M_n) \leq 1 \quad (3)$$

که M_u و M_n به ترتیب ممان خمشی طراحی نهایی، ممان خمشی اسمی و ϕ_b ضریب کاهش مقاومت خمشی بتن هستند. دندانه‌ها در نواحی ممان مثبت بین تکیه‌گاه‌ها به صورت تیر T شکل طراحی می‌شود که با بتن دال بالا به صورت پیوسته می‌باشد. عرض مؤثر دندانه‌ها، b_e ، فاصله مرکز به مرکز دندانه‌ها گرفته می‌شود. قید برشی به منظور کنترل نسبت نیروی برشی نهایی به مقاومت برشی اسمی کاهش یافته بتن در نظر گرفته می‌شود و به صورت رابطه (۴) نشان داده می‌شود:

$$V_u / (\phi_v V_c) \leq 1 \quad (4)$$

که V_c و V_u به ترتیب نیروی برشی ضریب دار نهایی، مقاومت برشی اسمی بتن و ϕ_v ضریب کاهش مقاومت برشی بتن می‌باشد. به دلیل اینکه هیچ خاموتی در دال به کار نمی‌رود، بتن باید تمام نیروی برش را تحمل کند. مقاومت برشی V_c که توسط بتن برای دندانه‌ها تأمین می‌شود ممکن است ۱۰٪ بیشتر از مقاومتی باشد که بتن برای تیرها تأمین می‌کند. این امر اساساً به خاطر اندرکنش بین دال و دندانه‌های نزدیک به هم می‌باشد. قیده‌های تعمیر پذیری به صورت محدودیت روی نسبت آرماتور و فاصله میلگرد ارائه می‌شود. نسبت آرماتور باید شرط ارائه‌شده در رابطه (۵) را ارضا کند:

$$\rho \leq \rho_{bmax} \quad (5)$$

کمترین نسبت فولاد جمع شدگی در دال، ρ_{min} ، برای دال‌هایی که شماره میلگرد به کار رفته ۴۰ یا ۵۰ باشد، ۰/۰۰۲ و برای دال‌هایی که میلگردهای تغییر شکل یافته با شماره ۶۰ به کار رفته باشد، ۰/۰۰۱۸ می‌باشد. فاصله میلگرد باید دو شرط زیر را ارضا کند:

الف- کمترین فاصله آزاد بین میلگردهای موازی در یک لایه، d_b ، نباید کمتر از ۲۵ میلی متر باشد.

ب- بیشترین فاصله بین میله‌ها بیشتر از پنج برابر ضخامت دندانه و ۴۵۰ میلی متر (۱۸ اینچ) نباشد.

قیده‌های خیز برای کنترل تغییر شکل استفاده می‌شود. به این منظور ضخامت دال بالا که با t نمایش خواهیم داد، نباید کمتر از یک دوازدهم دهانه آزاد بین دندانه‌ها یا ۵۰ میلی متر (۲ اینچ) باشد. مطابق آیین‌نامه ACI 318-05 مقدار ضخامت حداقل دال، \square_{min} ، مطابق جدول (۳-۱) و بسته به شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- مقادیر حداقل ضخامت [۸]

عضو	دهانه ساده	یک انتهای یکسره	دو انتهای یکسره	طره‌ای
دال‌های دندانه‌دار یک طرفه	L/16	L/18.5	L/21	L/8

علاوه بر در نظر گرفتن قیود فوق، عرض دندانه‌ها نباید کمتر از ۱۰۰ میلی متر باشد و عمق آن‌ها نباید بیشتر از ۳/۵ برابر کمترین عرض دندانه باشد. فاصله آزاد بین دندانه‌ها نباید از ۷۵۰ میلی متر تجاوز کند. به خاطر قوانین خاص که از مقاومت‌های برشی بالاتر جلوگیری می‌کند و به خاطر محافظت کمتر بتن از آرماتور که اعضای تکراری نسبتاً کوچک هستند، حداکثر فاصله دندانه باید محدود باشد.

۳- معرفی روش بهینه‌یابی مسئله

برای حل مسئله بهینه‌یابی معرفی شده در بخش ۲، در این مقاله از الگوریتم بهینه‌یابی اجسام برخوردکننده (CBO) استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر اهمیت ملاحظات اقتصادی در زمینه سازه‌ها سبب شده است که محققان بسیاری برای کمینه کردن وزن سازه‌ها، روش‌های جدید پیشنهاد بدهند. الگوریتم CBO یک روش

بهینه‌یابی ساده و جدید می‌باشد که برای بهینه‌یابی مسائل سازه‌ای توسط کاه و مهدوی [۱۶-۱۸] ارائه شده است. این روش بر پایه یک برخورد یک بعدی بین دو جسم می‌باشد. ایده اصلی این الگوریتم بر مبنای مشاهده یک برخورد بین دو شیء در یک بعد می‌باشد که در آن یک جسم به جسم دیگر برخورد می‌کند و آن‌ها به سمت کمترین سطح انرژی حرکت می‌کنند. الگوریتم CBO برای پیدا کردن کمینه توابع، روابط ریاضی ساده‌ای دارد و وابسته به هیچ پارامتر داخلی نیست. هم‌چنین این روش برای ذخیره کردن راه‌حلی که تاکنون بهترین می‌باشد، از حافظه استفاده نمی‌کند. وجه تمایز اصلی آن با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی این است که به پارامترهای ورودی و میزان‌سازی آن‌ها نیاز ندارد و تلاش محاسباتی و زمان کمتری را می‌خواهد.

در بهینه‌یابی اجسام برخورد کننده، هر کاندید راه‌حل X_i شامل تعدادی متغیر می‌شود (به عبارت دیگر $X_i = \{X_{i,j}\}$ که به عنوان یک جسم برخورد کننده^۱ (CB) در نظر گرفته می‌شود. اجسام جرم‌دار از دو گروه اصلی ساخته می‌شود؛ یعنی اجسام ثابت و اجسام متحرک، که اجسام متحرک به طرف اجسام ثابت حرکت می‌کنند و یک برخورد بین جفت‌های اجسام اتفاق می‌افتد. این حرکت برای دو هدف انجام می‌شود: بهبود موقعیت‌های اجسام متحرک و هل دادن اجسام ثابت به طرف موقعیت‌های بهتر. پس از برخورد موقعیت‌های جدید اجسام برخورد کننده مطابق با سرعت جدید با استفاده از قوانین برخورد به روز می‌شوند. روند الگوریتم به طور خلاصه به صورت زیر می‌تواند بیان شود [۱۶-۱۸]:

الف) موقعیت‌های اولیه اجسام برخورد کننده مطابق با رابطه (۶)، با مقداردهی اولیه تصادفی یک جمعیت منحصر به فرد در فضای جستجو تعیین می‌شود:

$$x_i^0 = x_{min} \max_{min} \quad (6)$$

که x_i^0 بردار مقدار اولیه جسم برخورد کننده i ام را تعیین می‌کند. x_{max} و x_{min} کمترین و بیشترین بردارهای مقادیر مجاز متغیرها می‌باشد؛ $rand$ یک مقدار تصادفی در بازه $[0, 1]$ است؛ و n تعداد اجسام برخورد کننده می‌باشد.

ب) بزرگی جرم جسم برای هر جسم برخورد کننده به صورت معادله (۷) تعریف می‌شود:

$$m_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{fit(i)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

که $fit(i)$ نماد مقدار تابع هدف عنصر i می‌باشد؛ n اندازه جمعیت است. بدیهی است که یک جسم برخورد کننده با مقادیر خوب یک جرم زیاد را نسبت به یک جسم برخورد کننده با مقادیر بد اعمال می‌کند. هم‌چنین برای پیشینه کردن تابع هدف عبارت $\frac{1}{fit(i)}$ با $fit(i)$ جایگزین می‌شود.

ج) ترتیب مقادیر تابع هدف اجسام برخورد کننده در یک ترتیب صعودی انجام می‌شود (شکل ۲ الف). اجسام برخورد کننده مرتب شده به طور مساوی به دو گروه تقسیم می‌شوند:

گروه اول: نیمه پایینی اجسام برخورد کننده (اجسام برخورد کننده ثابت)؛ این اجسام برخورد کننده عناصر ثابتی هستند و سرعت این اجسام قبل از برخورد صفر می‌باشد. بنابراین:

$$v_i = 0, i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (8)$$

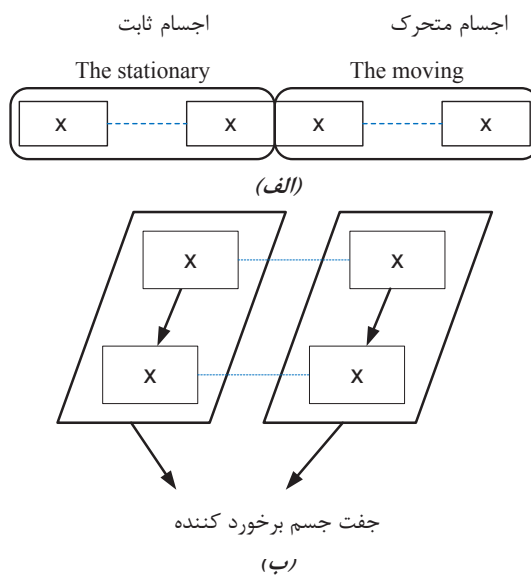
¹ Colliding Body

گروه دوم: نیمه فوقانی اجسام برخورد کننده (اجسام متحرک)؛ این اجسام برخورد کننده به طرف نیمه پایینی حرکت می کنند. سپس مطابق با شکل ۲ (ب)، اجسام برخورد کننده بهتر و بدتر، به عبارت دیگر عناصر با مقدار شایستگی بالاتر هر گروه، با یکدیگر برخورد می کنند.

تغییر موقعیت جسم، سرعت این اجسام را قبل از تصادف به صورت معادله (۹) نشان می دهد:

$$v_i = x_i - x_{i-\frac{n}{2}} = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \quad (9)$$

که v_i و x_i به ترتیب بردار سرعت و موقعیت جسم برخورد کننده نام در این گروه می باشند؛ $x_{i-\frac{n}{2}}$ موقعیت جفت جسم برخورد کننده نام، x_i در گروه قبلی می باشد.



شکل ۲- (الف) اجسام برخورد کننده مرتب شده به صورت صعودی. (ب) جفت های اجسام برای برخورد [۱۶].

(د) سرعت هر جسم برخورد کننده متحرک بعد از برخورد به صورت معادله (۱۰) می باشد:

$$v'_i = \frac{(m_i - \varepsilon m_{i-\frac{n}{2}})v_i}{m_i + m_{i-\frac{n}{2}}}, i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \quad (10)$$

که v_i و v'_i به ترتیب سرعت جسم برخورد کننده متحرک نام قبل و بعد از برخورد می باشد؛ m_i جرم جسم برخورد کننده نام می باشد؛ $m_{i-\frac{n}{2}}$ جرم جفت جسم برخورد کننده نام می باشد. هم چنین سرعت هر جسم برخورد کننده ثابت بعد از برخورد به صورت معادله (۱۱) می باشد:

$$v'_i = \frac{(m_{i+\frac{n}{2}} + \varepsilon m_{i+\frac{n}{2}})v_{i+\frac{n}{2}}}{m_i + m_{i+\frac{n}{2}}}, i = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (11)$$

که $v_{i+\frac{n}{2}}$ و v'_i به ترتیب سرعت جفت جسم برخورد کننده متحرک نام قبل و جسم برخورد کننده ثابت نام بعد از برخورد می باشد، m_i جرم جسم برخورد کننده نام می باشد، $m_{i+\frac{n}{2}}$ جرم جفت جسم برخورد کننده متحرک نام می باشد. همان طور که قبلاً ذکر شد، ε ضریب جبران (COR) و برای اغلب اجسام واقعی مقدار آن بین صفر و یک می باشد. این ضریب به عنوان نسبت سرعت جدایی دو عنصر بعد از برخورد به سرعت نزدیک شدن دو عنصر قبل از برخورد می باشد. در این الگوریتم این شاخص برای کنترل نرخ اکتشاف و استخراج استفاده می شود. برای این هدف COR به صورت خطی از یک به صفر کاهش می یابد. COR برابر با یک و صفر به ترتیب جستجوی کلی و محلی را نشان می دهد [۱۶].

ه) موقعیت‌های جدید اجسام برخورد کننده با استفاده از سرعت‌های تولید شده بعد از برخورد، در موقعیت اجسام برخورد کننده ثابت به دست می‌آید. موقعیت‌های جدید هر جسم برخورد کننده به صورت معادله (۱۲) می‌باشد:

$$x_i^{new} = x_{i-\frac{n}{2}} + rand \circ v'_i, i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \quad (12)$$

که x_i^{new} و v'_i به ترتیب موقعیت جدید و سرعت بعد از برخورد جسم برخورد کننده متحرک نام می‌باشد؛ $x_{i-\frac{n}{2}}$ موقعیت قبلی جفت جسم برخورد کننده ثابت نام می‌باشد. هم‌چنین موقعیت‌های جدید اجسام برخورد کننده ثابت از معادله (۱۳) به دست می‌آید:

$$x_i^{new} = x_i + rand \circ v'_i, i = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (13)$$

که x_i^{new} و x_i به ترتیب موقعیت جدید، موقعیت قبلی و سرعت بعد از برخورد جسم برخورد کننده ثابت نام می‌باشد. $rand$ یک بردار تصادفی است که به صورت یکنواخت در بازه (۱, -۱) توزیع شده است و علامت «۰» به ضرب درایه به درایه اشاره دارد.

و) بهینه‌یابی از گام ب تا زمانی که یک معیار پایانی به خصوص مانند بیشترین تعداد تکرار ارضا شود، تکرار می‌شود. باید ذکر شود که وضعیت یک جسم (جسم ثابت یا متحرک) و شماره گذاری آن در دو تکرار متوالی تغییر می‌کند.

جدا از کارایی بالای الگوریتم CBO، این روش پارامترهای داخلی را به جزء ضریب جبران (COR) در بر نمی‌گیرد. قانون تغییر خطی که برای COR اختیار شده است، این الگوریتم را مستقل از پارامتر کرده است. این امر یک قدرت قطعی و روشن الگوریتم CBO می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش یک دال بتن مسلح دنداندار یک طرفه و دو سر ساده به عنوان نمونه پایه مطالعه انتخاب شده است. در ابتدا طراحی بهینه این دال با سه الگوریتم بهینه‌یابی PSO، DPSO و CBO برای یک طول دهانه تیر مشخص و بارگذاری معین انجام می‌شود و با کار انجام شده [9] که با الگوریتم بهینه‌یابی HS طراحی بهینه انجام شده است، مقایسه می‌شود. سپس در بخش دوم با انتخاب مقادیر مختلف برای طول دهانه تیر و مقادیر متفاوت بارهای مرده و بارهای زنده به بررسی اثرات بارگذاری و طول دهانه تیر بر روی هزینه دال بتنی دنداندار یک طرفه پرداخته می‌شود. در این مقاله برای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و یافتن پاسخ بهینه از نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود.

۴-۱- طراحی بهینه دال مجوف

به منظور صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی (CBO)، طراحی بهینه دال بتنی مجوف یک طرفه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی تجمع ذرات استاندارد PSO، تجمع ذرات دموکراتیک DPSO و اجسام برخورد کننده CBO انجام می‌شود و با الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی هارمونی HS [9] مقایسه می‌شود. طرح کلی شماتیک از دال بتنی دنداندار در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن متغیرهای طراحی شامل ضخامت دال بالا، فاصله دندانها، عرض دندان در انتهای پایین، عرض دندان در انتهای بالا، قطر میلگرد و عمق دندان به ترتیب با نمادهای D_1 تا D_6 مشخص شده‌اند. برای هر متغیر طراحی یک مجموعه گسسته از اعداد صحیح که مقادیر مجاز طراحی می‌باشند، در نظر گرفته شده است و در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات مصالح و داده‌های به کار رفته در این مسئله در جدول ۳ ارائه شده است و در ادامه مقایسه نتایج این روش‌ها در جدول ۴ بیان می‌شود. این جدول نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده توسط الگوریتم CBO به مقادیر به دست آمده از الگوریتم‌های HS، PSO و DPSO خیلی نزدیک می‌باشد و مقدار هزینه بهینه به دست آمده توسط روش پیشنهادی اندکی کاهش یافته است و مقدار بهتری را به دست آورده است. مقدار هزینه بهینه شده دال با الگوریتم CBO نسبت به روش

HS، ۵ درصد کم شده است، نسبت به الگوریتم PSO، ۲ درصد هزینه دال کاهش یافته است و با نتایج الگوریتم DPSO یکسان بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت روند بهینه‌یابی و طراحی مسئله و شبیه‌سازی آن و عملیات کدنویسی در نرم افزار متلب درست می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر مجاز متغیرهای طراحی.

مقدار (cm)	متغیرهای طراحی	
2.5, 5, 7.5, 10	D ₁	ضخامت دال بالا
40, 42.5, 45, ..., 72.5, 75	D ₂	فاصله دندانه‌ها
10, 12.5, ..., 22.5, 25	D ₃	عرض دندانه در انتهای پایین
10, 12.5, ..., 27.5, 30	D ₄	عرض دندانه در انتهای بالا
1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2	D ₅	قطر میلگرد
15, 17.5, ..., 72.5, 75	D ₆	عمق دندانه

جدول ۳- داده‌های معمول و مشخصات مصالح مسئله.

f_y	420 MPa
f_c'	28 MPa
DL	0.78 kN/m ²
LL	4 kN/m ²
L	6 m
Cover	20 mm
w_s	78.5 kN/m ³
w_c	24 kN/m ³

جدول ۴- نتایج به دست آمده برای دال بتنی دندانه دار با الگوریتم‌های PSO، DPSO، CBO و HS

متغیرهای طراحی (برحسب سانتی متر)		الگوریتم بهینه‌یابی			
		[9] HS	PSO	DPSO	CBO
ضخامت دال بالا	D ₁	5	5	7.5	7.5
فاصله دندانه‌ها	D ₂	60	60	67.5	67.5
عرض دندانه در پایین	D ₃	10	17.5	10	10
عرض دندانه در بالا	D ₄	10	17.5	10	10
قطر میلگرد	D ₅	1.4	1.4	1.4	1.4
عمق دندانه	D ₆	35	32.5	30	30
مقدار تابع هدف		1.3626	1.3184	1.2927	1.2927
تعداد تحلیل		10000	6000	6000	6000

۲-۴. بررسی اثرات بارگذاری و طول دهانه تیر

و با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی اجسام برخوردار کننده (CBO) هزینه بهینه طراحی آن محاسبه می‌شود. علت انتخاب این الگوریتم، نتایج ارائه شده در بخش قبل می‌باشد که در آنجا عملکرد الگوریتم CBO در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌یابی مقایسه شده است و برتری آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها جهت حل مسئله طراحی بهینه دال‌های بتنی دندانه دار نشان داده شده است. سپس با در نظر گرفتن سه وضعیت مختلف، اثرات میزان بارگذاری و بزرگی دهانه تیر بر روی بهینه‌یابی هزینه دال‌های بتنی دندانه دار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر وضعیت یک حالت بارگذاری و چهار دهانه تیر متفاوت ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. در هر حالت با توجه به

تغییر پارامترهای ورودی لازم است مسئله طراحی بهینه به طور مستقل اجرا شود و مقدار تابع هدف و مقدار متناظر متغیرهای طراحی تعیین گردد.

حال با توجه به این اعتبارسنجی، طراحی مسئله دال بتنی دنداندار با در نظر گرفتن چهار مقدار مختلف برای دهانه تیر و سه مقدار متفاوت برای مقادیر بارهای مرده و زنده انجام می‌شود که در ادامه شرح داده می‌شود. داده‌های معمول و مشخصات مصالح مسئله نیز در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- داده‌های معمول و مشخصات مصالح مسئله.

420 MPa	f_y	تنش تسلیم فولاد
28 MPa	f'_c	تنش بتن
20 mm	Cover	پوشش بتن آزاد
78.5 kN/m ³	w_s	جرم حجمی فولاد
24 kN/m ³	w_c	جرم حجمی بتن

برای بررسی اثرات دهانه تیر و بارگذاری بر روی هزینه بهینه یک دال بتنی دنداندار مطالعه زیر انجام شده است. این مطالعه با الگوریتم بهینه‌یابی CBO صورت می‌گیرد. به این منظور سه وضعیت مختلف با توجه به دهانه‌های تیر و بارگذاری‌ها در نظر گرفته شده است که جزئیات آن در جدول ۶ ارائه شده است. به این ترتیب، سه حالت بارگذاری مختلف در نظر گرفته می‌شود. هر حالت بارگذاری شامل بار زنده و بار مرده متفاوتی می‌شود و هر حالت بارگذاری، چهار دهانه تیر متفاوت ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر را در بر می‌گیرد. همان طور که دیده می‌شود وضعیت اول بیشترین مقدار ترکیب بار و وضعیت سوم کمترین مقدار ترکیب بار را دارد.

جدول ۶- مشخصات سه وضعیت مورد مطالعه

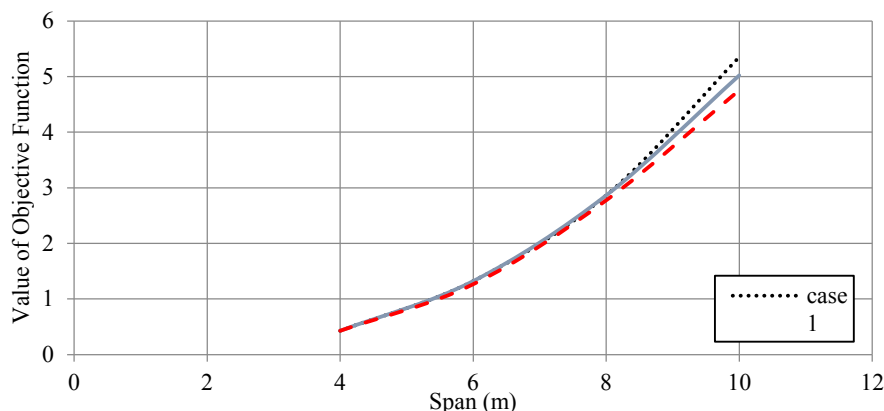
دهانه تیر (m)				W_u (kN/m ²)	LL (kN/m ²)	DL (kN/m ²)	
4	6	8	10	73.36	40	7.8	وضعیت ۱
4	6	8	10	68	35	10	وضعیت ۲
4	6	8	10	46.4	20	12	وضعیت ۳

جدول ۷ نتایج طراحی به دست آمده برای هر حالت مطالعه را با استفاده از دال مورد نظر نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود در هر حالت بارگذاری با افزایش دهانه تیر، پنج متغیر ضخامت دال بالا، عرض دندان در انتهای پایین، عرض دندان در انتهای بالا، قطر میلگرد و عمق دندان و در نتیجه مقدار تابع هدف دال بتنی دنداندار افزایش می‌یابد. در هر مقدار ثابت دهانه تیر با کاهش بارگذاری سه متغیر قطر میلگرد، عرض دندان در انتهای پایین و عرض دندان در انتهای بالا بدون تغییر باقی می‌مانند. فاصله دندانها تنها در حالت دهانه تیر ۱۰ متر با کاهش بارگذاری افزایش می‌یابد. در نهایت با توجه به جدول ۷ می‌توان گفت در هر مقدار ثابت دهانه تیر مقدار تابع هدف، که هزینه دال بتنی دنداندار است، با کاهش بارگذاری تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند یا به بیان دقیق‌تر در برخی موارد به میزان اندکی کاهش می‌یابد.

تغییرات مقدار تابع هدف دال نسبت به دهانه تیر برای سه حالت بارگذاری مختلف در شکل ۳ نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در این شکل نشان داده می‌شود، با افزایش دهانه تیر، مقدار تابع هدف سازه افزایش می‌یابد و هرچه بارگذاری بیشتر باشد سازه با ابعاد بزرگ‌تر و در نتیجه با هزینه بیشتری مورد نیاز است. تغییرات بین دهانه تیر و مقدار تابع هدف به دست آمده برای سازه در هر حالت بارگذاری به صورت خطی نمی‌باشد و این منحنی‌ها روند غیر خطی دارند.

جدول ۷- نتایج طراحی بهینه در وضعیت‌های مختلف

مقدار تابع هدف	متغیرهای طراحی						پارامترهای ورودی		
	D ₆ (cm)	D ₅ (cm)	D ₄ (cm)	D ₃ (cm)	D ₂ (cm)	D ₁ (cm)	دهانه تیر (m)	بارگذاری (kN/m ²)	
0.4281	17.5	1	10	10	50	7.5	4	73.36	وضعیت ۱
1.3215	27.5	1.4	10	10	67.5	10	6		
2.8634	40	1.6	12.5	12.5	62.5	10	8		
5.3509	60	2	17.5	17.5	65	10	10		
0.4281	17.5	1	10	10	50	7.5	4	68	وضعیت ۲
1.3215	27.5	1.4	10	10	67.5	10	6		
2.8634	40	1.6	12.5	12.5	62.5	10	8		
5.0208	55	2	17.5	17.5	70	10	10		
0.4281	17.5	1	10	10	50	7.5	4	46.4	وضعیت ۳
1.2651	30	1.4	10	10	67.5	7.5	6		
2.7746	42.5	1.6	12.5	12.5	62.5	7.5	8		
4.7533	52.5	2	17.5	17.5	75	10	10		



شکل ۳- نمودار مقدار تابع هدف سازه نسبت به طول دهانه تیر

برای دهانه ۴ متری هر سه حالت مطالعه منجر به طراحی بهینه یکسانی می‌شود و هر یک از متغیرها کمترین مقدار ممکن را دارد و فاصله دندانه‌ها در هر سه حالت ۵۰ سانتی متر می‌باشد. برای دهانه تیر ۱۰ متر، فاصله دندانه‌ها با کاهش بارگذاری زیاد می‌شود و در حالت سوم ۷۵ سانتی متر به دست می‌آید، زیرا مطابق با آیین‌نامه ACI 318-05 [۸] فاصله آزاد بین دندانه‌ها نباید از ۷۵۰ میلی متر تجاوز کند و در حالت سوم بارگذاری و دهانه ۱۰ متر، این قید، طراحی بهینه را محدود می‌کند. با توجه به جدول ۷ می‌توان گفت تاثیر دهانه تیر بر روی مقدار هزینه دال بسیار بیشتر از میزان تاثیر بارگذاری بر روی مقدار هزینه دال می‌باشد. به عنوان نمونه با افزایش ۵۰ درصدی دهانه تیر از حالت ۶ متر نسبت به حالت دهانه ۴ متر مقدار هزینه دال بیشتر از دو برابر می‌شود. به عبارتی کمترین تغییر تابع هدف به خاطر تغییرات طول دهانه تیر در یک حالت بارگذاری مشخص، افزایش حدوداً ۱۰۰ درصدی تابع هدف را در پی داشته است. اما میزان تاثیر بارگذاری در تغییر مقدار هزینه دال دندانه‌دار بسیار کمتر می‌باشد به طور مثال بیشترین میزان تاثیر بارگذاری در حالت دهانه تیر ۱۰ متر بوده است که با افزایش بارگذاری از ۴/۴۶ به ۳۶/۷۳ کیلونیوتن بر متر مربع (حدود ۵۸ درصد افزایش بار) مقدار تابع هدف حدود ۱۳ درصد تغییر پیدا کرده است.

در جدول ۸ معادلات چند جمله‌ای درجه سه متناسب با منحنی‌های مقدار تابع هدف سازه در هر حالت بارگذاری نسبت به طول دهانه تیر بیان می‌شود. این چندجمله‌ای‌ها می‌تواند در تخمین اولیه هزینه کلی دال بسته به طول دهانه تیر یا ترکیب بار مورد نظر استفاده شود. در جدول ۸ منظور از L طول دهانه تیر می‌باشد.

جدول ۸- معادلات چندجمله‌ای متناسب با نمودار مقدار تابع هدف نسبت به دهانه تیر.

معادله متناسب با منحنی تابع هدف	
$0.0062L^3 - 0.0303L^2 + 0.2798L - 0.6016$	وضعیت ۱
$-0.00069L^3 + 0.0934L^2 - 0.4354L + 0.7188$	وضعیت ۲
$-0.0042L^3 + 0.1603L^2 - 0.8626L + 1.5848$	وضعیت ۳

در طراحی سنتی و تجربی با توجه به عواملی مانند ابعاد قالب‌های موجود در بازار و هزینه قالب، سهولت اجرا و نوع ساختمان ابعاد متداول این نوع دال‌ها انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی و آیین‌نامه‌های موجود و مسائل اجرایی و قالب‌های موجود برخی از این ابعاد دال مجوف مانند عمق دندانه، فاصله دندانه‌ها، عرض دندانه در پایین و عرض دندانه در بالا از میان چند حالت محدود و موجود مقداری در نظر گرفته می‌شود و برخی دیگر از این ابعاد مانند قطر میلگرد و ضخامت دال بالا در روند طراحی با توجه به ضوابط آیین‌نامه تعیین می‌شود. این امر باعث می‌شود لزوماً دال طراحی شده و انتخاب شده برای اجرا از لحاظ هزینه بهینه‌ترین نباشد و اگر در روند طراحی، ابعاد انتخاب شده، ضوابط آیین‌نامه را برآورده نکنند، این فرآیند طراحی با مقادیر جدید دوباره تکرار می‌شود تا ضوابط آیین‌نامه ارضا شود.

در این پژوهش با توجه به مقادیر مجاز طراحی که براساس ضوابط آیین‌نامه ACI 318-05 برای متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است، ابعادی برای دال انتخاب می‌شود که هزینه آن کمترین مقدار ممکن شود و منجر به طرح بهینه‌تر و اقتصادی‌تر شود و تمام ضوابط آیین‌نامه نیز برآورده شده باشد. با استفاد از نتایج این پژوهش می‌توان در انتخاب قالب و تعیین دیگر اندازه‌های منطقی بهره برد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم فراکاوشی جدید که بهینه‌یابی اجسام برخورد کننده (CBO) نام دارد برای طراحی بهینه دال‌های دندانه‌دار بتنی استفاده گردید. الگوریتم CBO برای پیدا کردن کمینه توابع، روابط ریاضی ساده‌ای دارد و وابسته به هیچ پارامتر داخلی نیست. هم‌چنین این روش برای ذخیره کردن راه‌حلی که تاکنون بهترین می‌باشد، از حافظه استفاده نمی‌کند. با تعریف ضریب جبران (COR) یک تعادل خوب بین جستجوی کلی و محلی به دست می‌آید. با بررسی الگوریتم‌های فراکاوشی جدید می‌توان گفت که وجه تمایز الگوریتم CBO در این است که به پارامترهای ورودی و میزان‌سازی آن‌ها نیاز ندارد و تلاش محاسباتی و زمان کمتری را می‌خواهد.

یک مسئله حداقل سازی هزینه دال بتن مسلح دندانه‌دار یک طرفه دو سر ساده برای مطالعه در نظر گرفته شد. در بخش اول به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی CBO، طراحی بهینه دال بتنی دندانه‌دار با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌یابی PSO، DPSO و CBO انجام شد و مقایسه آن با نتایج طراحی بهینه به دست آمده از پژوهش [9] که با استفاده از الگوریتم HS صورت گرفته است، مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که این الگوریتم پیشنهادی از دقت کافی برخوردار بوده و می‌تواند در مسئله طراحی بهینه دال بتنی مجوف جواب بهتری را نسبت به الگوریتم‌های شناخته شده HS و PSO به دست آورد. در بخش بعدی به منظور اینکه اثرات دهانه تیر و بارگذاری بر روی مقدار تابع هدف دال دندانه‌دار بتنی بررسی شود، سه وضعیت مختلف شامل سه حالت بارگذاری و چهار مقدار مختلف دهانه تیر در نظر گرفته شد و برای هر یک از ۱۲ حالت ایجاد شده، مسئله بهینه‌یابی هزینه دال بتن مسلح دندانه‌دار با استفاده از الگوریتم CBO حل گردید. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که در هر حالت بارگذاری با افزایش دهانه تیر، مقدار تابع هدف دال مورد نظر بیشتر می‌شود که منحنی آن با یک معادله درجه ۳ قابل برازش است. اما در هر دهانه تیر ثابت، با کاهش بارگذاری مقدار تابع هدف تقریباً بدون تغییر

باقی می‌ماند یا به بیان دقیق‌تر در برخی موارد به میزان اندکی کاهش می‌یابد. در واقع میزان تاثیر تغییرات دهانه تیر بر روی مقدار هزینه دال بتنی دندانه‌دار بسیار بیشتر از میزان تاثیر تغییرات بارگذاری بر روی مقدار هزینه دال می‌باشد. با افزایش ۵۰ درصدی دهانه تیر مقدار هزینه دال بیشتر از دو برابر می‌شود. به عبارتی کمترین تغییر تابع هدف به خاطر تغییرات طول دهانه تیر در یک حالت بارگذاری مشخص، افزایش حدوداً ۱۰۰ درصدی تابع هدف را در پی داشته است اما میزان تاثیر بارگذاری در تغییر مقدار هزینه دال دندانه‌دار بسیار کمتر می‌باشد. بیشترین تاثیر میزان بارگذاری، تغییر مقدار تابع هدف به میزان حدود ۱۳ درصد بوده است.

۶-مراجع

- [1]. Afzal M., Liu Y., Cheng J. C., Gan V. J. (2020). "Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*". Vol. 260(120623), pp 1-22.
- [2]. Sahaba M.G, Ashour A.F, Toropovc V.V. (2005). "Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings". *Engineering Structures*, Vol. 27, pp 313-322.
- [3]. BS 8110 (1997). "Structural use of concrete, part 1, code of practice for design and construction". London: British Standards Institution.
- [4]. Bhoskar M. T., Kulkarni M. O. K., Kulkarni M. N. K., Patekar M. S. L., Kakandikar G. M., Nandedkar V. M. (2015). "Genetic algorithm and its applications to mechanical engineering: A review". *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2624-2630.
- [5]. Prasad J, Chander S, Ahuja A.K. (2005). "Optimum dimensions of waffle slab for medium size floors". *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol.6 (3), pp 183-197.
- [6]. Alaa C. Galeb, Zainab F. Atiyah. (2011). "Optimum design of reinforced concrete waffle slabs". *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 1(4), pp 862-80.
- [7]. Zainuddin F. A., Abd Samad M. F., Tunggal D. (2020). "A Review of Crossover Methods and Problem Representation of Genetic Algorithm in Recent Engineering Applications". *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29(6), pp 759-769.
- [8]. ACI Committee 318 (2005). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [9]. Kaveh A, Shakouri Mahmud Abadi A. (2011). "Cost Optimization of Reinforced Concrete One-Way Ribbed Slabs Using Harmony Search Algorithm". *Arab J Sci Eng*, Vol. 36, pp 1179-87.
- [10]. Zhang T., Geem Z. W. (2019). "Review of harmony search with respect to algorithm structure". *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 48, pp 31-43.
- [11]. Kaveh A, Behnam A.F. (2012). "Cost optimization of a composite floor system, one-way waffle slab, and concrete slab formwork using a charged system search algorithm". *Scientia Iranica*, Vol. 19(3), pp 410-416.
- [12]. AISC (2005). "LRFD specification for structural steel buildings". Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
- [13]. Kaveh A., Khodadadi N., Azar B. F., Talatahari S. (2020). "Optimal design of large-scale frames with an advanced charged system search algorithm using box-shaped sections". *Engineering with Computers*, pp 1-21.
- [14]. Kaveh A, Talatahari S. (2011). "An enhanced charged system search for configuration optimization using the concept of fields of forces". *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 43(3), pp 339-351.
- [15]. Ala'a A., Alsewari A. A., Alamri H. S., Zamli K. Z. (2019). "Comprehensive review of the development of the harmony search algorithm and its applications". *IEEE Access*, Vol. 7, pp 14233-14245.
- [16]. Kaveh A, Mahdavi V.R. (2014). "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method". *Computers and Structures*, Vol. 139, pp 18-27.
- [17]. Kaveh A., Mahdavi V. R. (2019). "Multi-objective colliding bodies optimization algorithm for design of trusses". *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 6(1), pp 49-59.
- [18]. Kaveh A., Ghazaan, M. I. (2018). "Meta-heuristic algorithms for optimal design of real-size structures". Switzerland: Springer International Publishing.
- [19]. Kaveh A., Bijari Sh. (2014). "Optimum cost design of reinforced concrete one-way ribbed slabs using CBO, PSO and democratic PSO algorithms". *Asian J Civil Eng*, Vol. 15(6), pp 788-802.