

کاربرد روش های بهبود الگوریتم بهینه سازی فراکاوشی برای طراحی پل های بتنی مسلح در

مقیاس واقعی: مطالعه موردی تقاطع انهر کمربندی ارومیه

سینا شیرگیر^{۱*}، پویا آقاییگی^۲

^۱ دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی عمران

^۲ مدیریت دانش موسسه عاشورا

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷)

چکیده

یادگیری مبتنی بر تضاد (OBL) یک رویکرد مؤثر برای بهبود عملکرد الگوریتم های بهینه سازی فراکاوشی است که معمولاً برای حل مسائل مهندسی پیچیده استفاده می شود. در این مقاله استراتژی یادگیری متضاد برای ترکیب با الگوریتم بهینه سازی ملخ (GOA) ارائه می شود. در این الگوریتم پیشنهادی، راه حل های تولید شده توسط الگوریتم GOA مرتب شده و به دو راه حل خوب و بد تقسیم می شوند، سپس راه حل های بد انتخاب می شوند تا با استفاده از آموزش بر مبنای تضاد، راه حل های جدید تولید شود. برای تأیید قابلیت الگوریتم پیشنهادی، برخی از توابع ریاضیاتی معیار آزمایش شدند. علاوه بر این، عملکرد الگوریتم OGOA با اجرای یک طراحی بهینه از یک پل بتنی مسلح با مقیاس واقعی ارزیابی شد. برای شناسایی پارامترهای مؤثر در طراحی اجزای سازه های پل های بتنی مسلح، تحلیل حساسیت انجام شده است. علاوه بر این، هزینه کل مصالح در ستون های پایه ها و عرشه پل به عنوان یک تابع هدف تعریف شد. همچنین ابعاد مقاطع و میلگردهای فولادی طولی به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می شوند. نتایج شبیه سازی ها پایداری و استحکام روش OGOA پیشنهادی را در مقایسه با GOA استاندارد نشان می دهد. همچنین الگوریتم پیشنهادی OGOA در طراحی بهینه ستون های و عرشه پل های بتنی مسلح یک روش کارآمد می باشد.

کلیدواژه ها: پل های بتنی مسلح، بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی ملخ، آموزش بر مبنای تضاد

۱. مقدمه

الگوریتم های فراابتکاری وجود دارند که از مفهوم ریاضیات الهام گرفته شده اند، مانند جایا [۱۱]، الگوریتم بهینه سازی حساب [۱۲] و الگوریتم کسینوس - سینوس [۱۳]. برخی دیگر از قوانین فیزیک برای یافتن نقطه جهانی بهینه الهام گرفته اند. الگوریتم های محبوب در این مفهوم عبارتند از: جستجوی هارمونی [۱۴]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۱۵]، جستجوی سیستم ذرات باردار [۱۶]، بهینه سازی برخورد ذرات [۱۷]. تاکنون الگوریتم های بهینه سازی برای حل مسائل مختلف مهندسی به کار رفته اند [۱۸]. برای روش های مختلفی برای اصلاح عملکرد الگوریتم های فراکاوشی معرفی شده اند. این الگوریتم ها با استفاده از یادگیری، تئوری آشوب، انتخاب، توابع ریاضی و فرآیندهای ترکیبی بهبود می یابند. در مفهوم یادگیری، از روش یادگیری مبتنی بر مخالفت برای تقویت الگوریتم های بهینه سازی مختلف استفاده می شود [۱۹]. در برخی موارد، عملکرد الگوریتم بهینه سازی بر اساس تغییرات در فرآیند انتخاب اصلاح می شود [۲۰]، تقسیم بندی [۲۱]، انتخاب باینری [۲۲].

روش های حل مسائل بهینه سازی عموماً شامل دو گروه اصلی مبتنی بر گرادبان و مبتنی بر جستجو است. با پیشرفت علم کامپیوتر و سهولت محاسبات، نسل جدیدی از روش های بهینه سازی معرفی شد. الگوریتم های فراکاوشی گروهی از این روش های بهینه سازی هستند که با الهام از طبیعت فرمول بندی شده اند، مانند الگوریتم ژنتیک [۱]، بهینه سازی ازدحام ذرات [۲]، الگوریتم بهینه سازی جنگل [۳] و الگوریتم رقابتی امپریالیستی [۴]. علاوه بر این، طیف گسترده ای از الگوریتم های فراکاوشی از زندگی حیوانات بر اساس تلاش آنها برای بقا، شکار و روابط اجتماعی آنها الهام گرفته شده است. برخی از الگوریتم های مورد استفاده در این زمینه عبارتند از: بهینه سازی کلونی مورچه ها [۵]، الگوریتم بهینه سازی نهنگ [۶]، کلونی زنبور های مصنوعی [۷]، الگوریتم بهینه سازی ملخ [۸]، بهینه سازی شاهین هریس [۹]، و الگوریتم ازدحام سالپ [۱۰]. همچنین،

تقویت کننده تعریف می شود. علاوه بر این، جزئیات ابعاد مقطع و میلگردهای طولی در هر دو پایه و عرشه به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شده است. علاوه بر این، محدودیت‌های طراحی و مقررات مانند تنش‌ها، تغییرشکل و لاغری ستون‌ها باید رعایت شود. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای طراحی، یک الگوریتم فراکاوشی با قابلیت جستجو و همگرایی مناسب مورد نیاز است. در این راستا، یک ایده نوآورانه برای بهبود عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده است. بنابراین، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA)^۳ با استفاده از مفهوم آموزش بر مبنای تضاد بهبود یافته و معرفی گردید.

۲. الگوریتم GOA بهبود یافته با OBL^۴

۱-۲. الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

بهینه‌سازی با روش‌های تحلیل ریاضی عمدتاً بر اساس اطلاعات حاصل از مشتق تابع هدف عمل می‌کند تا راه‌حل بهینه را پیدا کنند. این روش‌ها دارای معایبی از جمله افتادن در نقاط بهینه محلی و غیرقابل استفاده بودن برای مسائل با مشتق ناشناخته یا مشتق‌ناپذیر اشاره نمود. نوع دیگری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که این دو عیب را کاهش می‌دهد بهینه‌سازی‌های تصادفی از جمله روش‌های فراابتکاری یا تکاملی می‌باشند. در میان روش‌های بهینه‌سازی تصادفی، الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، الهام گرفته شده از طبیعت دارای بیشترین محبوبیت می‌باشند. این روش‌ها حل مسئله موجود در طبیعت را که اغلب توسط موجودات زنده استفاده می‌شود، تقلید می‌کنند. یکی از الگوریتم‌های تکاملی جدید، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ است که از زندگی ملخ الهام گرفته شده است [۸]. الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت بصورت منطقی فرآیند جستجو را به دو بخش اکتشاف و بهره‌برداری تقسیم می‌کنند. در اکتشاف، عامل‌های جستجو به سوی حرکت‌های تصادفی سوق داده می‌شوند در حالی که، در مرحله بهره‌برداری آنها تمایل به حرکت‌های محلی در اطراف مکان خود دارند. این دو عمل در جستجوی هدف، به طور طبیعی توسط ملخ انجام می‌گیرد.

مدل ریاضی بکارگرفته شده برای شبیه‌سازی رفتار ملخ‌ها در ابتدا به شکل رابطه (۱) بوده است [۸]:

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (1)$$

که در آن X_i موقعیت i امین ملخ را مشخص می‌کند، S_i تعامل اجتماعی و G_i نیروی گرانش اعمال شده به ملخ i ام

همچنین، نقشه آشوب برای بهبود فرمول‌بندی مراحل اکتشاف و بهره‌برداری استفاده می‌شود [۲۳]. در گروه دیگری از تحقیقات، ترکیب دو الگوریتم CSS-GW^۱ [۲۴] و CSS-CBO^۲ [۲۵]، برای بهبود عملکرد جستجوی الگوریتم استفاده شد. یکی از روش‌های بهبود عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، ترکیب توابع ریاضی با فرمول‌بندی حاکم بر الگوریتم است. در این راستا می‌توان به کارکردهایی مانند تابع شایستگی [۲۶] اشاره نمود.

ساخت پل یکی از قدیمی‌ترین فعالیت‌های بشر برای عبور از دره‌ها و رودخانه‌ها است. اهمیت و استفاده از پل‌ها برای دستیابی به اهداف ملی هر کشور به عنوان زیرساخت در امور سیاسی، نظامی، اقتصادی و اجتماعی بدیهی است. با توجه به اینکه ساخت پل یکی از پرهزینه‌ترین قسمت‌های یک پروژه راه یا راه‌آهن است، ارزیابی رفتار این سازه‌ها از دیدگاه‌های مختلف همواره ضروری است. در چندین نوع تحقیق، عملکرد پل‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف مانند بارهای لرزه‌ای، حرارتی و وسایل نقلیه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷-۲۹]. در گروه دیگری از مطالعات، روش‌های تحلیل لرزه‌ای [۳۰] و رفتار اجزای سازه‌ای پل‌ها [۳۱ و ۳۲] ارزیابی شده است. مطالعات مختلفی نیز پل‌ها را از منظر احتمالی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۳۳ و ۳۴]. همچنین پایش سلامت پل‌ها در حوزه زمان-فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵]. به منظور طراحی پل‌ها، مقررات متعددی تدوین شده است. برخی از محققان طراحی لرزه‌ای پل‌ها را با روش‌ها و مقررات مختلف ارزیابی کرده‌اند [۳۶ و ۳۷].

یکی از مهم‌ترین مسائل در انتخاب نوع پل، هزینه ساخت و میزان مصالح مصرفی است. واضح است که کاهش میزان مصالح مصرفی در ساخت‌وساز منجر به طراحی مقرون به صرفه می‌شود. با توجه به اینکه ساخت پل یکی از پرهزینه‌ترین قسمت‌های پروژه راه یا راه‌آهن می‌باشد، مطالعه و بهینه‌سازی این نوع سازه حائز اهمیت است. بهینه‌سازی پل‌ها از جنبه‌های مختلف قابل انجام است. گروهی از محققین طراحی پل‌ها را از نظر توپولوژی بهینه می‌کنند [۳۸-۴۰]. گروه دیگری از مطالعات سعی در کاهش هزینه‌ها با بهینه‌سازی طراحی پل‌ها دارند [۴۱ و ۴۲]. در این راستا، الگوریتم‌های فراکاوشی برای بهینه‌سازی پل‌ها در نظر گرفته شده‌اند [۴۳ و ۴۴].

در این مقاله، طراحی پل بتن آرمه با عرشه یکپارچه برای کاهش هزینه‌های مصالح مورد استفاده بهینه شده است. به عنوان مطالعه موردی، از یک پل بتنی مسلح پیوسته با دهانه‌های چندگانه و پایه‌های بلند استفاده شده است. تابع هدف برای مسئله بهینه‌سازی طراحی بر اساس هزینه‌های بتن و میلگردهای

^۱ Grasshopper Optimizatooin Algorithm

^۴ Oppositon Based Learning

^۱ Charged System Search-Grey Wolf

^۲ Charged System Search-Colliding Body Optimization

دفعات تکرار الگوریتم می‌باشد. در شبیه‌سازی‌ها مقدار C_{max} را ۱ و مقدار C_{min} را ۰,۰۰۰۰۱ در نظر گرفته است

۲-۲. روش آموزش مبتنی بر تضاد (OBL)

روش یادگیری OBL یک روش جدیدی می‌باشد که برای اولین بار توسط Tizhoosh [۴۵] ارائه گردید. این روش که به طور وسیعی در بهینه‌سازی کاربرد دارد و از اعداد متضاد، در جستجوی نقطه بهینه استفاده می‌کند. برای توضیح بیشتر فرض کنید که $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ یک نقطه جستجو در فضای N بعدی است و $x_i \in [a_i, b_i]$ باشد ($i = 1, 2, \dots, N$). متضاد X که آنرا با X' نمایش می‌دهیم بصورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$x'_i = a_i + b_i - x_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

اصل روش OBL در بهینه‌سازی بر اساس X و X' برای جستجو و پیدا کردن پاسخ‌های بهینه به این صورت می‌باشد که در هر تکرار بردار X' از X محاسبه می‌گردد و سپس با محاسبه توابع هدف برای هر یک از بردارها ($f(X)$ و $f(X')$)، در صورتی که $f(X) \geq f(X')$ باشد، X به عنوان بردار پاسخ در نظر گرفته می‌شود، در غیر اینصورت، $f(X') \geq f(X)$ به عنوان بردار پاسخ در نظر گرفته می‌شود. در واقع استفاده از روش OBL باعث تنوع در ایجاد بردارهای پاسخ می‌شود که این امر منجر به افزایش قدرت اکتشاف الگوریتم می‌شود.

۲-۳. توسعه الگوریتم پیشنهادی (OGO)A

در این قسمت الگوریتم OGO توضیح داده می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم ملخ نیز مشابه سایر الگوریتم‌های فراکاوشی از یک جمعیت اولیه تصادفی برای ساختن جواب‌های اولیه استفاده می‌کند، و توزیع جمعیت تاثیر زیادی در عملکرد الگوریتم و رسیدن به جواب بهینه را ایفا می‌کند، لذا در این مقاله، برای ارتقا قدرت اکتشاف الگوریتم GOA از روش OBL استفاده شده است. بدین صورت که بعد از تولید یکسری جواب‌های اولیه تصادفی توسط الگوریتم GOA، با استفاده از روش OBL مکمل‌های جواب‌های تصادفی ایجاد شده در مرحله قبل نیز ایجاد می‌شوند، سپس از بین جواب‌های اولیه، میزان تابع هدف محاسبه گردیده و این توابع بصورت صعودی یا نزولی مرتب می‌گردند و به اندازه تعداد ملخ‌ها، جواب‌های اولیه حفظ گردیده و الباقی حذف می‌گردند. با تکرار این کار، در واقع فضای جستجو دو برابر شده و میزان اکتشاف الگوریتم برای رهایی از نقاط اکسترمم محلی، بالا می‌رود. فلوچارت مربوط به الگوریتم OGO در شکل ۱ ارائه گردیده است.

می‌باشد و A_i جهت باد را نمایش می‌دهد. مقدار S_i یعنی تعامل اجتماعی برای ملخ i ام با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^N S(d_{ij}) \bar{d}_{ij} \quad (2)$$

که در آن d_{ij} فاصله بین ملخ i ام با ملخ j ام را نشان می‌دهد و بصورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| \quad (3)$$

همچنین S یک تابع برای تعریف فشار نیروی اجتماعی می‌باشد. همانطور که در رابطه (۳) نشان داده شده است \bar{d}_{ij} یک بردار واحد از i امین ملخ به j امین ملخ می‌باشد. تابع S ، که نیروی اجتماعی را تعریف می‌کند همانند رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$S(r) = f e^{-\frac{r}{I}} - e^{-r} \quad (4)$$

که در آن f نشان دهنده شدت جاذبه و I نشان دهنده طول مقیاس جاذبه می‌باشد. پارامترهای I و f منطقه راحتی و جاذبه و دافعه را بطور قابل توجهی تغییر می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که از رابطه اولیه حرکت ملخ نمی‌توان در شبیه‌سازی ازدحام و الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کرد چرا که این رابطه مانع از کاوش و بهره‌برداری در فضای جستجوی اطراف یک راه حل می‌شود. در حقیقت، مدل برای ازدحام در فضای آزاد بکار گرفته شده است. بنابراین رابطه (۵) استفاده شده است و می‌تواند تعامل بین ملخ‌ها در ازدحام را شبیه‌سازی کند.

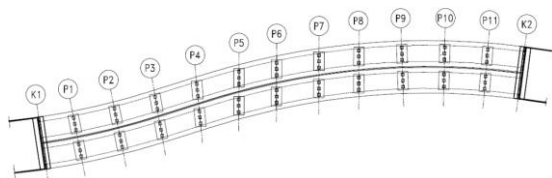
$$x_i^d = c \left(\sum_{j=1}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} S(|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \right) + \bar{T}_d \quad (5)$$

که در آن ub_d حد بالا در بعد d ام می‌باشد و lb_d حد پایین در بعد d ام می‌باشد و \bar{T}_d مقدار بعد d ام در هدف (بهترین جوابی که تاکنون دیده شده است) می‌باشد و c یک ثابت کاهشی برای کم کردن منطقه آسایش، دافعه و جاذبه می‌باشد. در این معادله S از رابطه (۲) بدست آمده و پارامتر گرانش (G) و جهت باد (A) در نظر گرفته نشده است. این معادله نشان می‌دهد که موقعیت بعدی یک ملخ بر اساس موقعیت فعلی آن، موقعیت هدف و موقعیت همه ملخ‌های دیگر تعریف می‌شود. به منظور حفظ تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری، پارامتر c نیاز است که با افزایش دفعات تکرار و در حین الگوریتم کاهش یابد. ضریب c منطقه آسایش متناسب با تعداد تکرارها را کاهش می‌دهد و بصورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

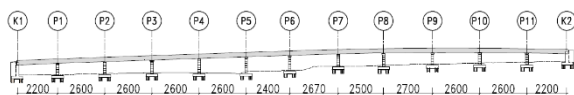
$$c = c_{max} - i \frac{c_{max} - c_{min}}{l} \quad (6)$$

که در آن c_{max} بیشترین مقدار، و c_{min} کمترین مقدار می‌باشد و i شماره تکرار فعلی را نشان می‌دهد و l حداکثر تعداد

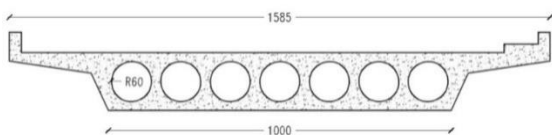
سازه پل از نوع پل‌های بتنی مسلح یکپارچه می‌باشد. مقطع عرشه پل به صورت جعبه‌ای توخالی با سوراخ‌های دایره‌ای می‌باشد. هر یک از پایه‌های پل برای هر مسیر متشکل از یک قاب شامل ۳ ستون می‌باشد. با توجه به این که این قاب‌ها فاقد تیرهای سرستون می‌باشند، از دیدگاه تحلیلی این قاب‌ها معین محسوب می‌شوند. شکل‌های ۴ و ۵ تصویری از مقطع مورد استفاده در عرشه، پایه‌ها و ستون‌ها را به همراه جزئیات هندسی نمایش می‌دهد. برای این پل که از نوع بتنی مسلح است مصالح مصرفی شامل بتن و میلگردهای فولادی می‌باشد. کلیه میلگردهای مصرفی از نوع AIII با حد جاری شدن حداقل ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. بتن مصرفی در تمام قسمت‌های کوله‌ها، پایه‌ها و عرشه از نوع C25 با مقاومت مشخصه حداقل ۲۵ نیوتن بر میلیمتر مربع بر روی نمونه استوانه‌ای استاندارد می‌باشد.



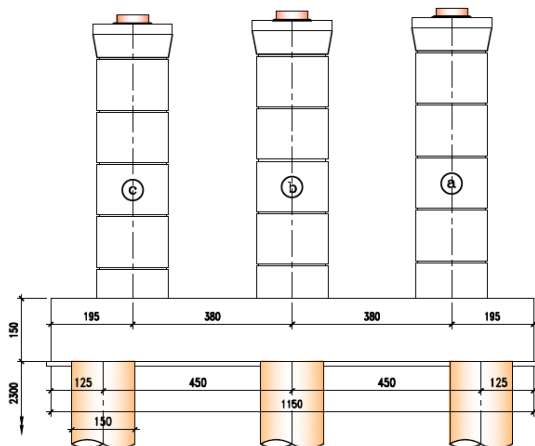
شکل (۲) تصویری از پل در پلان



شکل (۳) تصویری از پل در ارتفاع

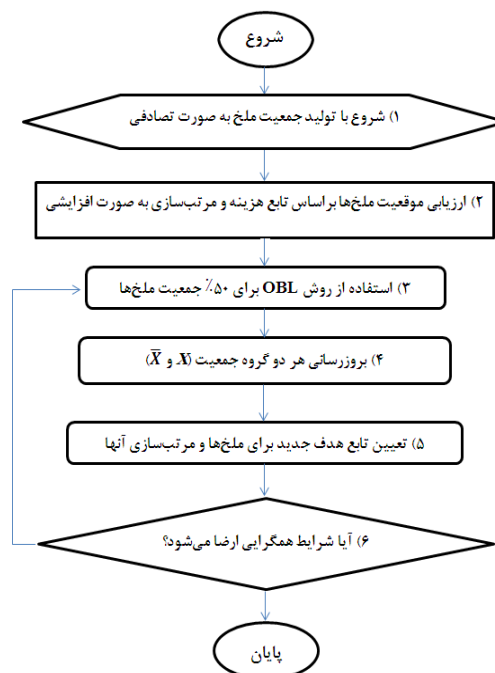


شکل (۴) جزئیات هندسی مقطع عرشه پل



شکل (۵) جزئیات هندسی مقطع پایه‌های پل

به منظور اطمینان از صحت فرمول‌بندی الگوریتم‌های فراکاوشی و کدهای دستوری پیاده‌سازی شده در فازهای اکتشاف و استخراج، مجموعه‌ای از توابع ریاضیاتی مبنا در حالات مختلف تک‌گانه^۱ و چندگانه^۲ استفاده گردید. برای مقایسه نتایج عملکرد الگوریتم‌ها، از آزمون آماری بهترین نتیجه، میانگین و انحراف معیار پاسخ‌ها بر اساس ۳۰ تحلیل مجزا استفاده شد.



شکل (۱). شبه کد الگوریتم NM-CSS پیشنهادی

۳. مطالعه موردی پل بتنی مسلح

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی معرفی شده در طراحی پل‌های بتنی مسلح، نیاز به استفاده از یک مطالعه موردی از یک پل در مقیاس واقعی می‌باشد. در همین راستا از پل تقاطع انهر در کمربندی اورمیه به عنوان مطالعه موردی استفاده گردید. این پل دارای دو محور عبوری جداگانه برای مسیرهای رفت و برگشت می‌باشد. این دو محور دارای جزئیات هندسی مانند تعداد دهانه‌ها، طول دهانه‌ها، انحنا در پلان و ارتفاع، جهت قرارگیری پایه‌ها، مقاطع پایه‌ها، مقطع عرشه و کوله‌ها کاملاً مشابه می‌باشند. مسیر پل دارای انحنا در پلان و ارتفاع می‌باشد. طول کلی پل برابر با ۳۰۲٫۷ متر می‌باشد. برای این پل ۱۲ دهانه تعریف شده است که دارای ۲ کوله و ۱۱ پایه بوده و دهانه‌ها دارای طول متفاوت هستند. شکل‌های ۲ و ۳ تصویری از این پل را در پلان و ارتفاع نشان می‌دهد.

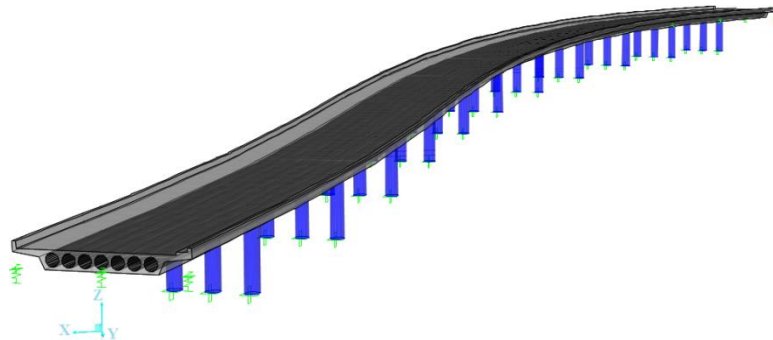
^۱ unimodal

^۲ multimodal

پایه‌ها و کوله‌ها و وزن اجزای غیرسازه‌ای مانند روکش آسفالت و جان پناه می‌باشد. بارهای بهره‌برداری نیز شامل سه نوع بار فرضی هستند:

۱. بار نوع اول (بار عادی): معرف اثر کامیون‌ها و وسایل نقلیه معمولی است که در سطح راه‌های کشور تردد می‌نمایند.
۲. بار نوع دوم: یک بار معادل ۸۰ کیلونیوتنی که سطح اثر آن مربعی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر بوده و موقعیت آن متغیر است.
۳. بار نوع سوم (بار غیرعادی): اثر بارهای غیرعادی شامل دو نوع بار نظامی ناشی از تانک و تریلی تانک‌بر می‌باشد.

تمام مراحل مدلسازی هندسی، بارگذاری و تحلیل این پل در محیط نرم‌افزار CSI Bridge انجام می‌شود تا بتوان نیروهای داخلی اجزای سازه‌ای پل را تحت بارهای وارده محاسبه نمود و برای طراحی اجزای سازه مورد استفاده قرار داد. شکل ۶ تصویری از مدل شبیه‌سازی شده از پل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۶). مدل اجزا محدود پل مورد مطالعه در محیط CSI Bridge

مشخص می‌شوند:

$$C_c = L_n A_c c'_c \quad (9)$$

$$C_{sl} = \gamma_s A_s L_n c'_s \quad (10)$$

که در این روابط L_n طول تیر، A_c سطح مقطع بتن، γ_s وزن واحد فولاد، A_s سطح مقطع میلگردها فولادی، c'_c هزینه بتن در واحد حجم مشتمل بر هزینه جابجایی و c'_s هزینه میلگرد فولادی در واحد وزن مشتمل بر هزینه خم‌کاری و اجرای آن است. هزینه کارهای وابسته دیگر، شامل هزینه قالب‌ها، مراقبت و عمل‌آوری و موارد دیگر می‌باشد. این هزینه‌های وابسته، به هر حال اغلب تابعی از مشخصات و حجم پروژه است که در شروع هر طراحی داده شده و ثابت است.

ب) محدودیت‌ها طراحی و قیود مسئله بهینه‌سازی

محدودیت‌های موجود در مسئله بهینه‌سازی طراحی اجزای بتنی مسلح به دو گروه قیود مقاومتی یا مکانیکی و قیود هندسی

برای بارگذاری پل از ضوابط در آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه ۱۳۹) استفاده می‌شود. مطابق با توجه به ضوابط این آیین‌نامه، بارهای مؤثر بر این پل شامل بارهای مرده، بارهای زنده بهره‌برداری بارهای حرارتی و بارهای لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه می‌باشد. در آیین‌نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه ۱۳۹) احتمال همزمانی و ترکیبات بارگذاری برای حالات مختلف در قالب گروه‌های پنج‌گانه ارائه شده است. در مورد پل مورد مطالعه، احتمال همزمانی و ترکیبات بارگذاری قابل استفاده شامل گروه‌های زیر می‌باشد [۴۶].

۱. گروه یک: مجموعه‌ای از بارهای دائمی شامل بارهای مرده
۲. گروه دو: شامل گروه یک + بارهای بهره‌برداری
۳. گروه چهار (الف): شامل گروه یک + اثر تغییر دما
۴. گروه چهار (ب): شامل گروه دو + اثر تغییر دما
۵. گروه پنج: شامل گروه یک + اثر زمین‌لرزه

بارهای دائمی شامل وزن اجزای باربر و غیرباربر می‌باشد. برای پل مورد نظر این بارها شامل وزن اجزای سازه‌ای مانند عرشه پل،

۴. مسئله بهینه‌سازی طراحی تیرهای بتنی مسلح

اجزای یک مسئله بهینه‌سازی طراحی تیرهای بتنی مسلح شامل سه بخش اصلی می‌باشد.

- تابع هدف
- محدودیت‌های طراحی و قیود
- متغیرهای طراحی

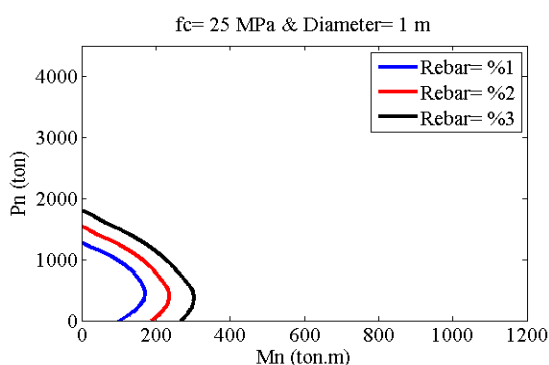
الف) تابع هزینه

برای یک قطعه بتنی مسلح، تابع هزینه کلی به شکل زیر معرفی می‌شود [۴۱]:

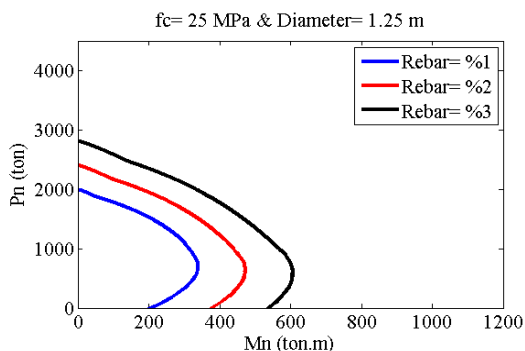
$$C_T = C_c + C_s + C_0 \quad (8)$$

که C_c ، C_s و C_0 ، به ترتیب هزینه‌های بتن، فولاد میلگردها و کارهای وابسته دیگر است. دو عبارت اول به صورت روابط زیر

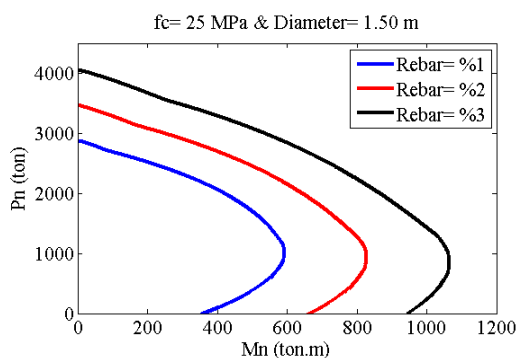
مستقیم می‌گذارد. این پارامتر به ابعاد هندسی ستون مانند قطر مقطع، ارتفاع ستون و نیروی محوری ستون بستگی دارد. بنابراین در این قسمت حساسیت ضریب بزرگنمایی به قطر مقطع، ارتفاع ستون و نیروی محوری ستون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۸ حساسیت ضریب بزرگنمایی برای ستون‌هایی با ارتفاع ۴ تا ۹ متر و قطر ۱ تا ۲ متر در هر نیروی محوری ۳۰۰ و ۴۰۰ تن نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این ضریب با افزایش ارتفاع و بار محوری ستون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما مشاهده می‌شود که با افزایش قطر مقطع، اثرات این پارامترها قابل چشم پوشی است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷). حساسیت اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی به درصد میلگرد برای ستون با قطر (الف) ۱ متر، (ب) ۱٫۲۵ متر و (ج) ۱٫۵ متر

تقسیم می‌شوند. این قیود شامل محدودیت های زیر می‌باشد.

- محدودیت‌های مقاومت خمشی و محوری
- محدودیت ابعاد هندسی مقطع
- محدودیت درصد ملیگردهای فولادی
- محدودیت تعداد و فاصله میلگردها
- محدودیت ظرفیت برشی
- محدودیت تغییرشکل

ج) متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی شامل مجموعه‌ای از پارامترهایی است که جزئیات طراحی و نتایج طراحی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. متغیرهای طراحی به دو گروه عمده متغیرهای پیوسته و متغیرهای گسسته تقسیم‌بندی می‌گردند. پارامترهایی مانند قطر میلگرد فولادی و تعداد میلگردها در وجه کششی و فشاری متغیرهای طراحی برای عرشه خواهند بود. همچنین برای طراحی ستون های پایه، پارامترهای ابعاد مقطع بتنی، تعداد میلگردها و قطر میلگردها در وجه کششی و فشاری به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند.

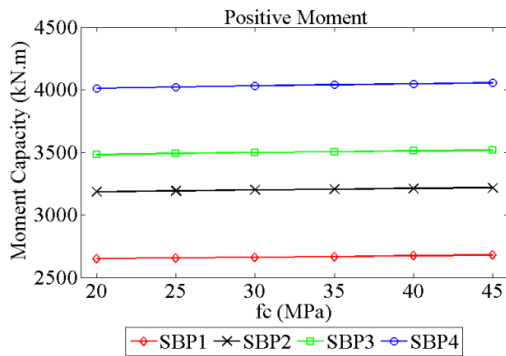
۵. بحث و بررسی نتایج

۵-۱. تحلیل حساسیت

عملکرد پل‌ها تحت بارهای اعمال شده به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. بنابراین تحلیل حساسیت می‌تواند به شناخت پارامترهای مهم در طراحی اجزای پل منجر شود. عوامل مختلفی مانند جزئیات هندسی و ویژگی های مکانیکی بر طراحی هر یک از اجزای سازه ای پل‌های بتن مسلح تأثیر می‌گذارد. در این بخش، نتایج تحلیل حساسیت ظرفیت لنگر خمشی - نیروی محوری ستون ها و ظرفیت خمشی عرشه بر اساس تغییرات پارامترهای طراحی ارائه شده است. ظرفیت ستون بر اساس منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی تحت تأثیر ۳ پارامتر مقاومت فشاری بتن، قطر مقطع ستون و درصد میلگرد فولادی ارزیابی می‌شود. شکل ۷ حساسیت منحنی برهمکنش نیرو محوری - لنگر خمشی را برای نسبت میلگرد ۱، ۲ و ۳ درصد برای مقطعی با قطرهای ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ متر و مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که ظرفیت یک ستون حساسیت قابل توجهی به نسبت میلگرد فولادی دارد. این حساسیت در مقادیر خمش خالص و نیروی محوری خالص به وضوح مشهود است.

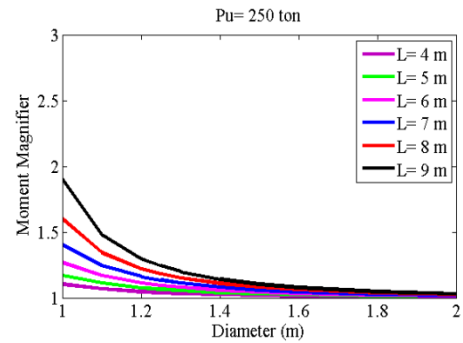
ضریب بزرگنمایی لنگر خمشی یکی از پارامترهایی است که با تأثیر بر لنگر خمشی طراحی، بر طراحی ستون ها تأثیر

برای این اجزا تحت ترکیب بار ارائه شده است. عرشه پل به طور کلی تحت نیروی برشی و لنگر خمشی قرار می‌گیرد. شرایطی مانند عدم تقارن در مقطع عرشه یا منحنی افقی در خط پل با شعاع انحنای کم می‌تواند باعث ایجاد گشتاور پیچشی در سطح مقطع عرشه شود. طراحی میلگردهای طولی در مقطع عرشه تحت لنگر خمشی انجام می‌شود. در این راستا، توزیع لنگر خمشی در امتداد پل تحت بار ترکیبی ارزیابی می‌شود. برای سادگی طراحی و رعایت اصول ساخت و ساز، قسمت عرشه برای لنگرهای مثبت در میانه دهانه‌ها و برای لنگرهای منفی در محل پایه‌ها تیپ‌بندی می‌شود. در این راستا ۴ نوع مقطع برای لنگرهای مثبت و ۵ نوع مقطع برای لنگرهای منفی تعریف شده است. توزیع لنگر خمشی طراحی روی عرشه در جهت طولی پل در شکل ۱۰ ارائه شده است.

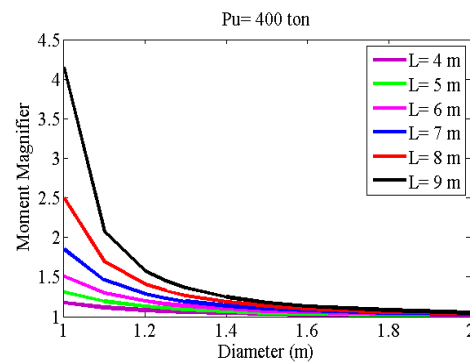


شکل (۹). حساسیت ظرفیت لنگر خمشی عرشه به مقاومت فشاری بتن برای لنگر مثبت

ستون‌ها در پایه‌ها تحت تأثیر نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی قرار می‌گیرند. استفاده از بالشتک نئوپرن در محل اتصال عرشه پل روی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها از انتقال برخی نیروها به ستون‌ها جلوگیری می‌کند. یکی از پیامدهای آن حذف گشتاورهای پیچشی در ستون‌ها است. همچنین ستون‌ها تحت بارهای عمودی مانند بارهای دائمی، بارهای زنده و اثرات دما دچار خمش نمی‌شوند و نیروها به صورت نیروهای محوری به ستون منتقل می‌شوند. در این راستا، ستون‌ها الزاماً به دلیل نیروی جانبی ناشی از زلزله، در معرض لنگرهای خمشی قرار می‌گیرند. توزیع این لنگر خمشی به صورت خطی از صفر در سرستون شروع می‌شود و در پای ستون به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بنابراین، طراحی ستون‌ها را می‌توان در پایه ستون انجام داد. ترکیب بار طراحی شامل نیروی محوری و لنگر خمشی ناشی از بارهای عمودی بارهای مرده و جانبی اثرات زلزله است. جدول ۱ حداکثر نیروی محوری و لنگر خمشی ستون‌ها را برای هر پایه گزارش می‌کند. بر اساس پیکربندی مقاطع دایره‌ای، خمش دو محوری ستون‌ها را می‌توان به صورت تک محوری



(الف)



(ب)

شکل (۸). حساسیت ضریب بزرگنمایی لنگر خمشی به هندسه ستون تحت بار محوری الف) ۳۰۰ و ب) ۴۰۰ تن.

طراحی خمشی عرشه در پل‌های بتنی بر اساس پارامترهایی مانند مقاومت فشاری بتن، میلگردهای کششی و فشاری و هندسه مقطع انجام می‌شود. با انجام تحلیل حساسیت، تأثیر این پارامترها بر ظرفیت خمشی مقاطع عرشه آشکار می‌شود. بخش عرشه برای لنگرهای خمشی مثبت در وسط دهانه با ۴ نوع مقطع شامل SDP1، SDP2، SDP3 و SD4 انجام شده است. شکل ۹ تغییرات ظرفیت لنگر خمشی مقاطع عرشه مورد استفاده در این مطالعه موردی (شکل ۴) را برای مقاومت فشاری مشخص شده بتن در حالت لنگر مثبت نشان می‌دهد. طبق این نمودار افزایش مقاومت فشاری مشخص شده بتن تأثیری بر ظرفیت خمشی مقطع ندارد. در مقاطع انتخاب شده برای عرشه پل، به دلیل عرض زیاد ناحیه بلوک فشاری بتنی، استفاده از مقاومت فشاری بالاتر بتن توجیه نمی‌شود و ظرفیت خمشی مقطع عرشه نسبت به مقاومت فشاری بتن حساسیت نشان نمی‌دهد. این شرایط برای ظرفیت ممان مثبت و منفی عرشه یکسان است.

۲-۵. بهینه‌سازی طراحی اجزای سازه ای پل

اجزای سازه‌ای که با روش بهینه‌سازی طراحی می‌شوند شامل عرشه پل و ستون‌های پایه است. در ادامه، نیروهای طراحی

بیان کرد. با توجه به ارتفاع ستون‌های پایه‌ها، کنترل لاغری

ستون‌ها در مرحله طراحی ضروری است. در این مقاله، لنگر طراحی با استفاده از ضریب بزرگ‌نمایی برای ستون‌های لاغر بزرگ‌نمایی می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی OGOA برای طراحی بهینه اجزای سازه در یک پل بتن مسلح یکپارچه تحت شرایط واقعی استفاده می‌شود. مقادیر به دست آمده برای متغیرهای طراحی و نتیجه معیار هزینه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فوق در جدول ۲ به

تفصیل هر پایه نشان داده شده است. به منظور طراحی عرشه در نمونه پل انتخابی، با فرض ثابت بودن سطح مقطع، میلگردهای فولادی در لایه‌های بالا و پایین تحت لنگرهای مثبت و منفی طراحی می‌شوند. بنابراین، تابع هزینه بر اساس هزینه تمام میلگردهای طولی عرشه در دهانه میانی و تکیه‌گاه‌های امتداد پل است. مقادیر طرح بهینه بر اساس نوع مقطع با تفکیک ممان خمشی مثبت و منفی در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول (۱). نیروهای داخلی در ستون‌های پایه‌ها

پایه	ارتفاع (m)	نیروی محوری (تن)	لنگر خمشی (تن.متر)
P1	۶,۴۴	۳۲۴	۲۳۵
P2	۶,۷۹۵	۳۱۹	۲۴۱
P3	۷,۲۵۵	۳۲۸	۲۷۱
P4	۸,۱۳۵	۳۶۶	۳۰۷
P5	۸,۸۲	۳۵۶	۳۴۸
P6	۸,۲۸	۳۶۹	۳۴۵
P7	۶,۹۱۵	۳۷۳	۳۱۰
P8	۶,۴۱۵	۳۶۹	۲۹۳
P9	۶,۷۶۵	۳۸۲	۲۸۸
P10	۶,۵۶۵	۳۶۴	۲۷۹
P11	۶,۱۸	۳۶۴	۲۶۶

جدول (۲). نتایج طراحی میلگرد طولی با استفاده از روش بهینه‌سازی

پایه	ارتفاع (m)	تعداد ستون	قطر مقطع (mm)	قطر میلگرد (mm)	تعداد میلگرد
P1	۶,۴۴	۶	۱۳۰۰	۳۲	۴۰
P2	۶,۷۹۵	۶	۱۳۰۰	۳۲	۴۰
P3	۷,۲۵۵	۶	۱۴۰۰	۳۲	۴۸
P4	۸,۱۳۵	۶	۱۴۰۰	۳۲	۴۸
P5	۸,۸۲	۶	۱۵۰۰	۳۲	۵۴
P6	۸,۲۸	۶	۱۵۰۰	۳۲	۵۴
P7	۶,۹۱۵	۶	۱۵۰۰	۳۲	۵۴
P8	۶,۴۱۵	۶	۱۴۰۰	۳۲	۴۸
P9	۶,۷۶۵	۶	۱۴۰۰	۳۲	۴۸
P10	۶,۵۶۵	۶	۱۳۰۰	۳۲	۴۰
P11	۶,۱۸	۶	۱۳۰۰	۳۲	۴۰

منظور ابتدا پارامترهای موثری که در فرآیند طراحی پل‌های بتن مسلح نقش مهمی ایفا می‌کنند، با استفاده از تحلیل حساسیت شناسایی شدند. نتایج نشان می‌دهد که قطر مقطع و نسبت میلگرد تاثیر زیادی بر ظرفیت ستون در مقایسه با مقاومت فشاری مشخصه بتن دارد. از سوی دیگر، بررسی ضریب بزرگنمایی لنگر خمشی برای طراحی ستون‌های لاغر با در نظر گرفتن قطر مقطع، ارتفاع ستون و نیروی محوری اعمالی نشان می‌دهد که افزایش قطر مقطع باعث کاهش چشمگیر ضریب بزرگنمایی لنگر خمشی می‌شود و اثر سایر پارامترها مانند ارتفاع ستون و نیروی محوری اعمال شده به شدت کاهش می‌یابد. همچنین ظرفیت خمشی عرشه پل بتنی با مقطع توخالی دایره ای به صورت لنگر خمشی مثبت و منفی تحت تاثیر نسبت کشش و فشار میلگردها ارزیابی می‌شود. به دلیل عرض زیاد ناحیه بلوک فشاری بتنی، استفاده از میلگرد فشاری موجه نبوده و ظرفیت خمشی مقطع عرشه نسبت به نسبت فشاری میلگرد حساسیت نشان نمی‌دهد. ضمناً تحت ممان منفی، عرض ناحیه بلوک فشاری بتنی کمتر است و ظرفیت خمشی سطح مقطع حساسیت نسبت به میلگردهای فشاری را برای مقادیر بالاتر نسبت میلگردهای کششی نشان می‌دهد.

برای طراحی بهینه پل بتنی یکپارچه سه بعدی واقع گرایانه چند دهانه با تعداد زیادی متغیر طراحی و قیود طراحی، یک ابزار کامپیوتری ایجاد شده است که پیوندی بین CSI-Bridge و نرم‌افزار Matlab ایجاد می‌کند. برای بهینه‌سازی طراحی در پل، هزینه کل مصالح در پایه‌ها و عرشه به عنوان یک تابع هدف تعریف شد. علاوه بر این، ابعاد مقاطع و جزئیات میلگردهای فولادی طولی به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شدند. در مورد مطالعه طراحی بهینه ستون‌های پایه‌ها، الگوریتم OGOA عملکرد کارآمدی را نشان می‌دهد علاوه بر این، در مورد طراحی عرشه بهینه، الگوریتم OGOA پیشنهادی منجر به طراحی اقتصادی می‌شود.

۷. مراجع

- [1] Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. Scientific american, 267(1), 66-73.
- [2] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- [3] Ghaemi, M., & Feizi-Derakhshi, M. R. (2014). Forest optimization algorithm. Expert Systems with Applications, 41(15), 6676-6687.
- [4] Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007, September). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In 2007 IEEE congress on evolutionary computation (pp. 4661-4667). Ieee.

جدول (۳). بهینه‌سازی طراحی برای مقطع عرشه تحت لنگر مثبت در وسط دهانه‌ها

تیپ مقطع	میلگردهای فوقانی (فشاری)	میلگردهای تحتانی (کششی)
SBP1	45 Φ 25	106 Φ 25
SBP2	45 Φ 25	121 Φ 25
SBP3	45 Φ 25	133 Φ 25
SBP4	45 Φ 25	154 Φ 25

جدول (۴). بهینه‌سازی طراحی برای مقطع عرشه تحت لنگر منفی در تکیه‌گاه‌ها

تیپ مقطع	میلگردهای فوقانی (کششی)	میلگردهای تحتانی (فشاری)
SBN1	83 Φ 25	30 Φ 25
SBN2	134 Φ 25	30 Φ 25
SBN3	148 Φ 25	30 Φ 25
SBN4	68 Φ 32 45 Φ 25	30 Φ 25
SBN5	86 Φ 32 45 Φ 25	30 Φ 25

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش بهبود کارآمد برای بهبود الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) ارائه شد. برای این منظور، آموزش مبتنی بر تضاد (OBL) برای آموزش نحوه حرکت ملخ‌ها در الگوریتم استاندارد GOA ترکیب شده و الگوریتم OGOA معرفی گردید. برای داشتن یک قضاوت روشن در مورد عملکرد الگوریتم پیشنهادی، انواع مختلفی از توابع ریاضیاتی مبنا و همچنین یک مسئله بهینه‌سازی مهندسی در مقیاس واقعی انتخاب و مطالعه شدند. نتایج بررسی بر اساس بهترین، میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های بدست آمده برای راه‌حل‌های توابع ریاضیاتی آزمون، پایداری و استحکام روش OGOA پیشنهادی را در مقایسه با GOA استاندارد نشان می‌دهد.

یکی از چالش برانگیزترین مسائل در بهینه‌سازی، طراحی سازه‌های در مقیاس بزرگ با تعداد زیادی متغیر است. در این مقاله، الگوریتم OGOA برای طراحی ستون‌ها و عرشه‌ها در پل بتنی مسلح یکپارچه در مقیاس واقعی اعمال گردید. برای این

- [23] Li, M. W., Wang, Y. T., Geng, J., & Hong, W. C. (2021). Chaos cloud quantum bat hybrid optimization algorithm. *Nonlinear Dynamics*, 103, 1167-1193.
- [24] Raeesi, F., Veladi, H., Azar, B. F., & Talatahari, S. (2020). A hybrid CSS-GW algorithm for finding optimum location of multi semi-active MR dampers in buildings. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 35(3), 191-202.
- [25] Shirgir, S., Azar, B. F., & Hadidi, A. (2020, October). Reliability-based simplification of Bouc-Wen model and parameter identification using a new hybrid algorithm. In *Structures* (Vol. 27, pp. 297-308). Elsevier.
- [26] Raeesi, F., Shirgir, S., Azar, B. F., Veladi, H., & Ghaffarzadeh, H. (2020). Enhanced salp swarm algorithm based on opposition learning and merit function methods for optimum design of MTMD. *Earthquakes and Structures*, 18(6), 719-730.
- [27] Tsinidis, G., Papantou, M., & Mitoulis, S. (2019). Response of integral abutment bridges under a sequence of thermal loading and seismic shaking. *Earthquakes and Structures*, 16(1), 11-28.
- [28] Zhang, J., Wu, D., Li, Q., & Zhang, Y. (2019). Experimental and numerical investigation of track-bridge interaction for a long-span bridge. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 70(6), 723-735.
- [29] Erdogan, Y. S., & Catbas, N. F. (2020). Seismic response of a highway bridge in case of vehicle-bridge dynamic interaction. *Earthquakes and Structures*, 18(1), 1-14.
- [30] Nanclares, G., Ambrosini, D., Curadelli, O., & Domizio, M. (2020). Nonlinear dynamic analysis of a RC bridge subjected to seismic loading. *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 26(6), 765-779.
- [31] Lee, D. H., & Elnashai, A. S. (2002). Inelastic seismic analysis of RC bridge piers including flexure-shear-axial interaction. *Structural Engineering and Mechanics*, 13(3), 241-260.
- [32] Chiou, J. S., Jheng, Y. W., & Hung, H. H. (2019). Numerical simulation of bridge piers with spread footings under earthquake excitation. *Earthquakes and Structures*, 16(6), 691-704.
- [33] Song, S., Wu, Y. H., Wang, S., & Lei, H. G. (2022). Important measure analysis of uncertainty parameters in bridge probabilistic seismic demands. *Earthquakes and Structures*, 22(2), 157-168.
- [34] Liu, X., Jiang, L., Xiang, P., Lai, Z., Zhang, Y., & Liu, L. (2022). A stochastic finite element method for dynamic analysis of bridge structures under moving loads. *Structural Engineering and Mechanics*, 82(1), 31-40.
- [35] Mousavi, S. A., & Heydari, S. (2023). Health monitoring of jinnah bridge in tehran using the time-frequency domain approach. *Construction science and technology*, 3(3), 49-58. (In Persian).
- [36] Gkatzogias, K. I., & Kappos, A. J. (2015). Deformation-based seismic design of concrete bridges. *Earthquakes and Structures*, 9(5), 1045-1067.
- [37] Kehila, F., Kibboua, A., Bechtoula, H., & Remki, M. (2018). Seismic performance assessment of RC bridge piers designed with the Algerian seismic bridges regulation. *Earthquakes and Structures*, 15(6), 701-713.
- [38] Kutylowski, R., & Rasiak, B. (2014). Application of topology optimization to bridge girder design. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 51(1), 39-66.
- [39] Resmy, V. R., & Rajasekaran, C. (2020). Topology Optimization of Concrete Dapped Beams Under Multiple Constraints. In *Numerical Optimization in Engineering and Sciences: Select Proceedings of NOIEAS 2019* (pp. 43-51). Springer Singapore.
- [5] Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), 28-39.
- [6] Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- [7] Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Vol. 200, pp. 1-10). Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.
- [8] Saremi, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2017). Grasshopper optimisation algorithm: theory and application. *Advances in engineering software*, 105, 30-47.
- [9] Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872.
- [10] Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., & Mirjalili, S. M. (2017). Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems. *Advances in engineering software*, 114, 163-191.
- [11] Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.
- [12] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The arithmetic optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 376, 113609.
- [13] Mirjalili, S. (2016). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-based systems*, 96, 120-133.
- [14] Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 76(2), 60-68.
- [15] Rashedi, E., Nezamabadi-Pour, H., & Saryazdi, S. (2009). GSA: a gravitational search algorithm. *Information sciences*, 179(13), 2232-2248.
- [16] Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta mechanica*, 213(3-4), 267-289.
- [17] Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2014). Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, 139, 18-27.
- [18] Rostami, S. (2021). Optimizing well placement via metaheuristic algorithms (case study: Shadegan fields). *Construction science and technology*, 2(1), 55-69. (In Persian)
- [19] Shirgir, S., Azar, B. F., & Hadidi, A. (2020). Opposition based charged system search for parameter identification problem in a simplified Bouc-Wen model. *Earthquakes and Structures*, 18(4), 493-506.
- [20] Azar, B. F., Veladi, H., Raeesi, F., & Talatahari, S. (2020). Control of the nonlinear building using an optimum inverse TSK model of MR damper based on modified grey wolf optimizer. *Engineering Structures*, 214, 110657.
- [21] Raeesi, F., Azar, B. F., Veladi, H., & Talatahari, S. (2020, August). An inverse TSK model of MR damper for vibration control of nonlinear structures using an improved grasshopper optimization algorithm. In *Structures* (Vol. 26, pp. 406-416). Elsevier.
- [22] Gölcük, İ., & Özsoydan, F. B. (2020). Evolutionary and adaptive inheritance enhanced Grey Wolf Optimization algorithm for binary domains. *Knowledge-Based Systems*, 194, 105586.

- [40] Mohammadzadeh, S., & Nouri, M. (2013). An improved algorithm in railway truss bridge optimization under stress, displacement and buckling constraints imposed on moving load. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 46(4), 571-594.
- [41] Hassanain, M. A., & Loov, R. E. (2003). Cost optimization of concrete bridge infrastructure. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(5), 841-849.
- [42] Liu, S., Huang, B., & Xie, Y. M. (2021). Effects of longitudinal and transverse curvatures on optimal design of shell footbridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 80(1), 27-36.
- [43] Artar, M., Catar, R., & Daloglu, A. T. (2017). Optimum design of steel bridges including corrosion effect using TLBO. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 63(5), 607-615.
- [44] Ghiamat, R., Madhkhan, M., & Bakhshpoori, T. (2019). Cost optimization of segmental precast concrete bridges superstructure using genetic algorithm. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 72(4), 503-512.
- [45] Tizhoosh, H. R. (2005, November). Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence. In *International conference on computational intelligence for modelling, control and automation and international conference on intelligent agents, web technologies and internet commerce (CIMCA-IAWTIC'06)* (Vol. 1, pp. 695-701). IEEE.
- [46] Standard, AASHTO. 2002. 'Standard specifications for highway bridges', American Association of Highway and Transportation Officials, Washington, DC.