

استفاده از روش مؤلفه‌ای جهت بهینه‌سازی هزینه اتصال ورق انتهایی در قاب‌های فولادی دوبعدی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات

علی صادقی^۱، محمدرضا سهرابی^{۲*}، سید مرتضی کاظمی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کاشمر، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشمر، ایران

*زاهدان، صندوق پستی ۹۸۷-۹۸۱۵۵، Sohrabi@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون استفاده از اسکلت‌های فولادی در ساختمان‌های ساخته‌شده در ایران و افزایش قیمت پروفیل نسبت به ورق خام، استفاده از تیورق در ساخت اسکلت‌های فولادی رونق فراوان یافته است. اتصالات در تمامی سازه‌ها از جمله سازه‌های فولادی یکی از اجزای اساسی بوده و عامل اصلی یکپارچگی سیستم‌های سازه‌ای به‌شمار می‌آیند. هدف از این پژوهش تعیین ابعاد مطلوب برای اتصالات صفحه انتهایی جهت کاهش هزینه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است؛ به‌طوری‌که محدودیت‌های مکانیکی مربوط به لنگر خمشی و سختی آغازین حاصل و همچنین ایمنی و یکپارچگی اتصال به خطر نیفتد. در مدل بهینه‌سازی، شش متغیر طراحی از جمله ابعاد، ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل پیچ‌ها انتخاب شدند تا مقادیر به‌دست‌آمده با نتایج ادبیات گذشته مقایسه شوند. برای محاسبه ممان خمشی و سختی دورانی اتصال از "روش مؤلفه‌ای" موجود در یوروکد ۳ بخش ۸-۱ استفاده شده و همچنین تجزیه و تحلیل و طراحی بهینه اتصالات تیر به ستون برای قاب‌های فولادی دوبعدی در محیط محاسباتی MATLAB صورت پذیرفت. خروجی این برنامه نتایج کاملاً رضایت‌بخشی را در مقایسه با نتایج موجود در ادبیات گذشته نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی یادشده هزینه اتصالات A، B، C و D از قاب مورد بررسی به‌ترتیب ۴۶/۲۴ درصد، ۵/۲۹ درصد، ۵۵/۱۰ درصد و ۵۶/۴۴ درصد در مقایسه با پژوهش کابرو و بایو در سال ۲۰۰۵ و همچنین هزینه اتصالات A و C از قاب مورد بررسی به‌ترتیب ۸/۰۷ درصد و ۰/۲۲ درصد نسبت به پژوهش دیاز و همکاران در سال ۲۰۱۲ کاهش یافت.

واژگان کلیدی

روش مؤلفه‌ای، بهینه‌سازی سازه، اتصالات تیر به ستون فولادی، اتصالات صفحه انتهایی پیچی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

Using the component method to optimize the cost of end plate connection in 2D steel frames using particle swarm optimization

A. Sadeghi, M.R. Sohrabi, S.M. Kazemi

Abstract

Due to the increasing use of steel frames in buildings built in Iran and the increase in the price of profiles compared to raw sheets, the use of plate girders in the construction of steel frames has become significantly popular. Connections are one of the basic components in all structures, including steel structures, and are considered the main factor in the integrity of structural systems. The purpose of this research is to determine the optimal dimensions for the end plate connections to reduce the cost using particle swarm optimization algorithm, so that the mechanical limitations related to the bending moment and the resulting initial stiffness, as well as the safety and integrity of the connection, are not compromised. In the optimization model, six design variables including the dimensions and thickness of the end plate, the diameter and location of the bolts were selected to compare the obtained values with the results of the past literature. To calculate the bending moment and rotational stiffness of the connection, the "component method" found in Eurocode 3-part 1-8 was used, and the analysis and optimal design of beam-to-column connections for two-dimensional steel frames was done in the MATLAB computing environment. The output of this program shows completely satisfactory results compared to the results in the past literature, so that the results obtained by using the aforementioned optimization algorithm show the cost of connections A, B, C and D of the investigated frame, respectively cost reductions of 46.24%, 5.29%, 55.10% and 56.44% by compared to the research of Cabrero and Bayo in 2005. Also, the cost of connections A and C of the examined frame decreased by 8.07% and 0.22%, respectively, compared to Diaz et al.'s research in 2012.

Keywords

Component Method, Steel Moment Connection, Structural Optimization, Steel Beam-Column Connections, Bolted end-Plate Connections, Particle Swarm Optimization Algorithm

۱- مقدمه

یکی از اهدافی که در بهینه‌سازی سازه‌ها مدنظر است، به حداقل رساندن وزن یا حجم سازه است. در قاب‌های فولادی مشاهده می‌شود که اتصالات بین اجزا، به‌ویژه اتصالات تیر به ستون تنها نشان‌دهنده بخش کوچکی از وزن کل سازه است. با این حال، هزینه ساخت چنین اتصالاتی به‌علت این که از چندین قطعه مختلف با جزئیات خاص و روش‌های متفاوت ساخت تشکیل شده‌اند، قابل توجه است. مطالعات قبلی نشان داده است هزینه ساخت اتصالات به‌طور مستقیم به مقدار سختی چرخشی اتصال بستگی دارد [۱]. اتصالات ورق انتهایی بخش مهمی از سازه‌های فولادی را تشکیل می‌دهند و هزینه قابل توجهی از ساخت را به خود اختصاص می‌دهند. این اتصالات را می‌توان با استفاده از روش‌های کلاسیک طراحی که بر پایه روابط تحلیلی هستند، طراحی کرد؛ اما این روش‌ها معمولاً تمامی متغیرهای تأثیرگذار را به‌طور هم‌زمان در نظر نمی‌گیرند و منجر به طرح‌هایی می‌شوند که از لحاظ اقتصادی یا عملکردی بهینه نیستند. روش‌های بهینه‌سازی، مانند الگوریتم ازدحام ذرات، قادر هستند با بررسی ترکیبات مختلف متغیرهای طراحی (از جمله ابعاد و ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل پیچ‌ها)، طرح‌هایی ارائه دهند که باعث کاهش مصرف مصالح و هزینه‌های ساخت، بدون کاهش ایمنی و عملکرد اتصال شوند. حتی اگر تفاوت‌های حاصل از بهینه‌سازی کوچک باشند، در پروژه‌های بزرگ که شامل تعداد زیادی اتصال هستند، این کاهش هزینه‌ها و مصرف مصالح می‌تواند تأثیر چشمگیری داشته باشد. لذا هدف در این پژوهش محاسبه هزینه واقعی اتصال صفحه انتهایی و کاهش این هزینه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است.

در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای کاهش هزینه‌های اتصالات نیمه‌صلب به‌ویژه با هدف به حداقل رساندن وزن پروفیل‌های سازه‌ای ارائه شده است. عموماً ابعاد پروفیل‌ها، به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شدند نه اجزای اتصالات؛ لذا این مدل‌ها تضمینی بر بهینه‌شدن اتصال به‌وجودآمده نیستند.

مطالعات زیادی توسط پژوهشگران با هدف بهینه‌سازی اتصالات نیمه‌صلب انجام شده است.

سیمونز^۱ و همکاران در سال (۱۹۹۶) یک روش محاسباتی را برای بهینه‌سازی هزینه اتصالات نیمه‌صلب با استفاده از سختی و ابعاد پروفیل‌ها به‌عنوان متغیرهای طراحی ارائه دادند [۲]. فانلا^۲ و همکاران در سال (۲۰۰۰) حدود مجاز را برای سختی چرخشی اتصالات تیر به ستون تعیین کردند [۳]. لیما^۳ و همکاران در سال (۲۰۰۵) به کمک الگوریتم ژنتیک سختی پساحدی، اتصالات نیمه‌گیردار را مورد بررسی قرار دادند؛ مدل تحلیلی آن‌ها برگرفته از روش مؤلفه‌ای بود [۴]. هایالی اوغلو^۴ و دگرتکین^۵ در سال (۲۰۰۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی اتصالات نیمه‌صلب با هدف به حداقل رساندن هزینه اتصال پرداختند [۵]. کابرو^۶ و بایو^۷ در سال (۲۰۰۵) روشی را برای بهینه‌سازی اتصالات نیمه‌صلب جهت به‌دست آوردن مقادیر نظری لنگر خمشی و سختی دورانی ارائه نمودند [۶]. دگرتکین و هایالی اوغلو^۸ در سال (۲۰۱۰) الگوریتمی بر اساس جستجوی هارمونی جهت به حداقل رساندن هزینه اتصالات نیمه‌صلب ارائه کردند [۷]. دیاز^۹ و همکاران نیز در سال (۲۰۱۲) به بهینه‌سازی اتصالات نیمه‌صلب با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند، آن‌ها اجزای تشکیل‌دهنده اتصال یعنی ابعاد و ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل قرارگیری پیچ‌ها را به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفتند [۸].

یاسمی و اشتري^{۱۰} در سال (۲۰۱۵) از ترکیب بین الگوریتم ژنتیک و منطق فازی برای بهینه‌سازی وزن قاب‌های فولادی صلب و نیمه‌صلب استفاده کردند [۹]. فریدمهر و همکاران در سال (۲۰۲۱) به‌منظور بررسی اتصالات فولادی، هوش مصنوعی و روش مؤلفه‌ای را با هم در آمیختند [۱۰]. کوهه^۹ در سال (۲۰۲۱) جهت توسعه نمودارهای لنگر-دوران از شبکه عصبی مصنوعی در چهارچوب بحث روش مؤلفه‌ای استفاده کرد [۱۱]. عسکریان و همکاران در سال (۲۰۲۲) نوع جدیدی از اتصال خمشی تیر به ستون با ورق‌های میان‌گذر ارائه دادند که در آن بیش از چهار تیر

¹ Simões

² Faella

³ Lima

⁴ Hayalioglu

⁵ Degertekin

⁶ Cabrero

⁷ Bayo

⁸ Díaz

⁹ Kueh

می‌تواند به یک ستون با زاویه دلخواه متصل شود [۱۲]. این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام گرفت و بیانگر کارآمدی این نرم‌افزار در مدل‌سازی رفتار دقیق و نزدیک به واقعیت اتصالات فولادی بود.

در سال (۲۰۲۳) روش مؤلفه‌ای پیشرفته توسط **صادقی و همکاران** ارائه شد [۱۳]؛ در این پژوهش بخش پلاستیک نمودار لنگر-دوران فرای دستورالعمل یوروکد ۳ توسعه یافت و سپس برای دو اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه انتهایی اجرا و با نمودار لنگر-دوران محاسبه شده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس راستی آزمایی گردید. در سال (۲۰۲۴) **صادقی و همکاران** به بهینه‌سازی هزینه اتصال صفحه انتهایی که از پژوهش **کوئیلو^۲** و **بیجلارد^۳** در سال (۲۰۰۷) برداشت شده بود، پرداختند [۱۴]. آن‌ها توانستند بدون تأثیر بر محدودیت‌های مکانیکی، ایمنی و یکپارچگی اتصال با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی PSO، SO و TLBO هزینه اتصال صفحه انتهایی را تا ۶۰٪ کاهش دهند [۱۵-۱۷].

در پژوهشی دیگر **صادقی و همکاران** در سال (۲۰۲۴) به توسعه روش مؤلفه‌ای جهت محاسبه سختی اولیه اتصالات صفحه انتهایی اصطکاکی پرداختند. موضوعی که در یوروکد ۳ به آن اشاره نشده و باعث می‌شود نتایج به دست آمده دقت کافی را نداشته باشد، بحث پیش‌تندگی پیچ‌ها است. به این منظور نویسندگان توانستند رابطی جدید را جهت محاسبه سختی المان‌های فنی مدل‌کننده بال ستون در خمش، ورق انتهایی در خمش و پیچ‌ها در کشش که جهت پیش‌بینی سختی دورانی اتصالات با ورق انتهایی با پیچ‌های پیش‌تند شده لازم هستند، ارائه دهند.

در این پژوهش قاب دوبعدی دو طبقه سه دهانه که در گذشته توسط محققین مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است، بررسی می‌شود. این قاب در گذشته توسط **کابرو و بایو** بهینه‌سازی شده و پروفیل‌های تیر و ستون آن در نرم‌افزار انسیس^۴ طراحی شده‌اند [۶]. در این پژوهش بهینه‌سازی هزینه اتصال صفحه انتهایی بررسی می‌شود. متغیرهای طراحی ابعاد و ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل پیچ‌ها در نظر گرفته می‌شود. حداقل و حداکثر مقادیر پارامترهای هندسی مطابق مقررات موجود از آیین‌نامه‌های اتصالات اروپا است [۱۸]. تعیین ابعاد مطلوب برای اتصالات صفحه انتهایی جهت کاهش هزینه طوری است که محدودیت‌های

مکانیکی مربوط به لنگر خمشی و سختی آغازین حاصل و همچنین ایمنی و یکپارچگی اتصال به خطر نیافتد. از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی هزینه اتصال صفحه انتهایی استفاده می‌شود. جهت تجزیه و تحلیل و طراحی بهینه هزینه اتصالات، محدودیت‌های هندسی و مونتاژ و قیود لنگر خمشی و سختی دورانی اتصال در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه ممان خمشی و سختی دورانی اتصال از "روش مؤلفه‌ای" موجود در یوروکد ۳ بخش ۸-۱ استفاده شده است. از ابزار محاسباتی متلب^۵ جهت کدنویسی روش بهینه‌سازی و تلفیق آن با روش مؤلفه‌ای استفاده می‌شود.

بر اساس یوروکد ۳ مقاومت خمشی اتصال صفحه انتهایی پیچی طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$M_{j,Rd} = \sum_r F_{tr,Rd} \cdot h_r \quad (1)$$

($F_{tr,Rd}$) مقاومت کششی ردیف r ام است و (h_r) فاصله ردیف پیچ از مرکز بال فشاری تیر فرض می‌شود. مقاومت کششی مؤثر یک ردیف پیچ را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد.

$$F_{tr,Rd} = \min(F_{t,wc,Rd}, F_{t,fc,Rd}, F_{t,ep,Rd}, F_{t,wb,Rd}) \quad (2)$$

که ($F_{t,wb,Rd}$)، ($F_{t,ep,Rd}$)، ($F_{t,fc,Rd}$) و ($F_{t,wc,Rd}$) به ترتیب مقادیر طراحی مؤلفه‌های جان تیر در کشش، صفحه انتهایی در خمش، بال ستون در خمش و جان ستون در کشش هستند که به کمک روابط زیر طبق یوروکد ۳ محاسبه می‌شوند [۱۹]:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

($b_{eff,t,wb}$) عرض مؤثر جان تیر در کشش، (t_{wb}) و ($f_{y,wb}$) به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم جان تیر هستند. (γ_{M0}) ضریب ایمنی مربوط به مصالح فولادی است که معمولاً در طراحی سازه‌ها برای تأثیرگذاری ملاحظات ایمنی در نظر گرفته می‌شود.

$$F_{t,ep,Rd} = \frac{b_{eff,b,ep} t_{ep} f_{y,ep}}{\gamma_{M0}} \quad (4)$$

($b_{eff,b,ep}$) عرض مؤثر ورق انتهایی در خمش، (t_{ep}) و ($f_{y,ep}$) به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم ورق انتهایی هستند.

$$F_{t,fc,Rd} = \frac{b_{eff,b,fc} t_{fb} f_{y,fc}}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

($b_{eff,b,fc}$) عرض مؤثر بال ستون در خمش است و به صورت $b_{eff,b,fc} = t_{wc} + 2s + 7kt_{wc}$ برای ستون بدون تقویت محاسبه می‌شود. در این رابطه (s) برای مقاطع با سطح مقطع I یا

⁵ Matlab

¹ Abaqus

² Coelho

³ Bijlaard

⁴ Ansys

$$S_{j,ini} = \frac{Ez_{eq}^2}{\frac{1}{k_{cws}} + \frac{1}{k_{cwc}} + \frac{1}{k_{eq}}} \quad (10)$$

(E) مدول الاستیسیته، (z_{eq}) بازوی لنگرگیری، (k_{cws}) و (k_{cwc}) به ترتیب سختی جان ستون در برش و فشار، (k_{eq}) سختی کلی معادل که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

سختی دورانی اتصال به صورت رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

$$S_j = \frac{Ez_{eq}^2}{\mu \left(\sum_i \frac{1}{k_i} \right)} \quad (11)$$

(k_i) ضریب سختی برای مؤلفه i است، (z_{eq}) بازوی لنگرگیری و (μ) نسبت سختی $\frac{S_{j,ini}}{S_j}$ است که بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱۹]:

$$\text{if } M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \quad \mu = 1 \quad (12)$$

$$\text{if } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} \quad \mu = \left(\frac{1.5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi$$

در این رابطه، ($M_{j,Ed}$) لنگر خمشی داخلی اعمالی است که می‌تواند کم‌تر از لنگر الاستیک ($\frac{2}{3} M_{j,Rd}$) یا در میان لنگر الاستیک و لنگر مقاوم طراحی ($M_{j,Rd}$) قرار گیرد. (ψ) به نوع اتصال وابسته بوده که برای اتصال صفحه انتهایی برابر با ۲/۷ است [۱۹].

۲- روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک فن بهینه‌سازی بر پایه قوانین احتمال و از نوع الگوریتم‌های تکاملی است. ایده اولیه آن توسط راسل ابهارت^۱، دانشمند علوم رایانه و جیمز کندی^۲، روانشناس مسئله‌های اجتماعی مطرح شد. این روش از رفتار اجتماعی دسته پرنده‌ها و ماهی‌ها، هنگامی که به دنبال غذا هستند و کوچ می‌کنند، برای هدایت مجموعه آن‌ها به منطقه امیدبخش در فضای جستجو، الهام گرفته شده است [۱۵].

هوش جمعی، خاصیتی نظام‌مند است که در این سیستم، ذره‌ها به‌طور محلی باهم همکاری می‌نمایند و رفتار جمعی تمام ذره‌ها، باعث یک همگرایی در نقطه‌ای نزدیک به جواب بهینه کلی می‌شود. در این روش، هر ذره خودمختاری نسبی دارد که می‌تواند در سراسر فضای جواب مسئله حرکت کند و با سایر ذره‌ها همکاری داشته باشد.

برای شبیه‌سازی روش گروه ذره‌ها، ابتدا یک گروه از جواب‌های تصادفی شروع به کار می‌کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله، با به‌هنگام کردن موقعیت و سرعت ذره‌ها

H شکل نورددشده برابر با $s = r_c$ و برای مقاطع با سطح مقطع I یا H شکل جوشی $s = \sqrt{2}a_c$ در نظر گرفته می‌شود. ضریب (k) در رابطه، عرض مؤثر بال ستون در خمش به صورت $k = \frac{t_{fc}}{t_{fb}} \cdot \frac{f_{y,fc}}{f_{y,fb}}$ به دست می‌آید که حداکثر مقدار آن برابر یک است، یعنی ($k \leq 1$) [۱۹].

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (6)$$

($b_{eff,t,wc}$) عرض مؤثر جان ستون در کشش، (t_{wc}) و ($f_{y,wc}$) به ترتیب ضخامت و تنش تسلیم جان ستون هستند. (ω) نیز ضریب کاهش مقاومت جان ستون است [۱۹].

مقاومت کششی مؤثر ردیف‌های پیچ باید به گونه‌ای که از مقاومت برشی چشمه اتصال ستون و مقاومت فشاری اتصال تجاوز نکند، کاهش یابد. علاوه بر این، ردیف‌های متوالی پیچ می‌توانند به صورت گروهی عمل کنند، بنابراین باید مقاومت طراحی پیچ‌ها به صورت گروهی جهت یافتن مقاومت کششی مؤثر را در نظر گرفت. درخصوص ارزیابی سختی اولیه گره از روش پیشنهادشده در یوروکد ۳ استفاده می‌شود.

سختی اولیه گره با ترکیب سختی کششی مؤلفه‌های منفرد به دست می‌آید. در مرحله نخست شکل‌پذیری کششی ($\frac{1}{k_{eff,r}}$) برای هر ردیف پیچ به صورت مجموع شکل‌پذیری‌های تمامی مؤلفه‌های درگیر در آن ردیف پیچ محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{k_{eff,r}} = \frac{1}{k_{cwt,i}} + \frac{1}{k_{cfb,i}} + \frac{1}{k_{ep,i}} + \frac{1}{k_{b,i}} \quad (7)$$

که در آن ($k_{cwt,i}$)، ($k_{cfb,i}$)، ($k_{ep,i}$) و ($k_{b,i}$) به ترتیب مقادیر سختی مؤلفه‌های جان ستون در کشش، بال ستون در خمش، ورق انتهایی در خمش، و پیچ‌ها در کشش در ردیف نام هستند؛ سختی کلی معادل (k_{eq}) ردیف‌های کششی پیچ با فرض دوران صلب جان تیر حول مرکز فشار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i}{z_{eq}} \quad (8)$$

در این رابطه، بازوی اهرم (z_{eq}) برابر است با:

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i} \quad (9)$$

در پایان، سختی دورانی آغازین اتصال می‌تواند با ترکیب مناسب سختی مؤلفه‌های مستقل ردیف‌های پیچ (یعنی جان ستون در برش و فشار) با سختی کلی ردیف‌های کششی پیچ معادل (k_{eq}) بر اساس رابطه زیر محاسبه شود:

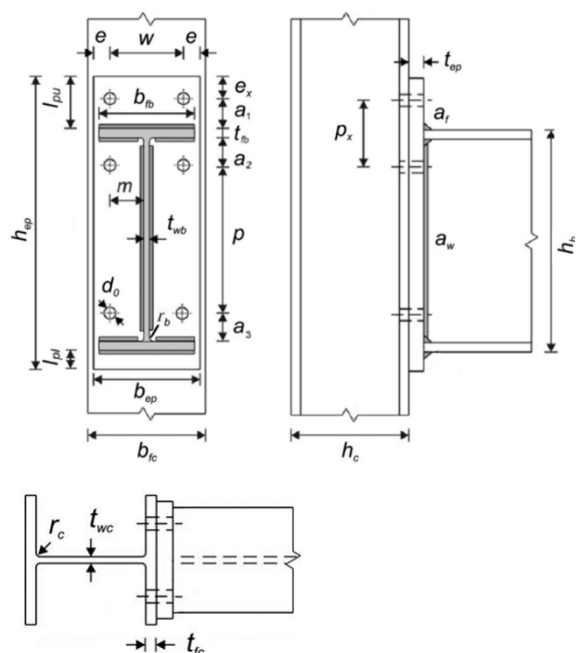
¹ Russel Ebbart

² James Kennedy



۳- تعریف اجزای اتصال صفحه انتهایی پیچی

پارامترهای هندسی اتصال نیمه‌گیردار صفحه انتهایی در شکل (۱) ارائه شده است [۸].



شکل ۱- اتصال صفحه انتهایی پیچی [۸]

الف- تیر: ضخامت بال (\$t_b\$)، عرض بال (\$b_b\$)، ارتفاع (\$h_b\$)، ریشه شعاع (\$r_b\$) و ضخامت جان (\$t_{wb}\$).

ب- ستون: ضخامت بال (\$t_{fc}\$)، عرض بال (\$b_{fc}\$)، ارتفاع (\$h_c\$)، ریشه شعاع (\$r_c\$) و ضخامت جان (\$t_{wc}\$).

ج- پیچ: فاصله بین ردیف‌های کششی (\$p_x\$)، فاصله بین ردیف کششی پایین و ردیف فشار (\$p\$)، فاصله ردیف کششی بالا تا بالای صفحه انتهایی (\$e_x\$)، فاصله تا لبه (\$e\$)، فاصله بین ردیف اول و بالای بال بالای تیر (\$a_1\$)، فاصله بین ردیف دوم و پایین بال بالای تیر (\$a_2\$)، فاصله بین ردیف سوم و بالای بال پایین تیر (\$a_3\$)، فاصله افقی بین پیچ و جان تیر (\$m\$)، فاصله افقی بین پیچ‌ها (\$w\$)، قطر سوراخ (\$d_o\$) و قطر اسمی پیچ (\$d_b\$). توجه داشته باشید که مقدار \$d_o\$ طبق معادله (۱۶) به مقدار \$d_b\$ وابسته است.

د- صفحه انتهایی: فاصله لبه بالایی تا بال بالایی تیر (\$l_{pu}\$)، فاصله لبه پایینی تا زیر بال پایینی تیر (\$l_{pl}\$)، ارتفاع (\$h_{ep}\$)، ضخامت (\$t_{ep}\$) و عرض (\$b_{ep}\$).

ه- بار: ضخامت سخت‌کننده (\$t_s\$) که برابر با \$t_b\$ در نظر گرفته می‌شود.

و- ضخامت گلوگاه جوش: بال تیر و صفحه انتهایی (\$a_f\$)، جان تیر و صفحه انتهایی (\$a_w\$).

به جستجو می‌پردازد. هر ذره با دو مقدار \$x\$ و \$v\$ که به ترتیب معرف موقعیت و سرعت هستند، مشخص می‌گردد. در هر مرحله از حرکت مجموعه، هر ذره از طریق دو مقدار بهترین، به‌هنگام می‌شود. اولین مقدار، موقعیت بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر ذره به‌طور جداگانه به‌دست آمده است. این مقدار که بیانگر بهترین تجربه شخصی آن ذره از ابتدای روند بهینه‌سازی تاکنون می‌باشد، \$best\$ نامیده می‌شود. دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تاکنون در بین همه ذره‌ها به‌دست آمده است، این مقدار که بیانگر بهترین تجربه کل گروه ذره‌ها می‌باشد، با \$G_{best}\$ نشان داده می‌شود. موقعیت جدید همه ذره‌ها در یک مرحله \$x_i^k\$ بر اساس موقعیت فعلی آن‌ها \$x_i^{k-1}\$ و بردار سرعت \$v_i^k\$ به‌صورت رابطه (۱۳) تعیین می‌شود [۱۵].

$$x_i^k = x_i^{k-1} + v_i^k \quad (13)$$

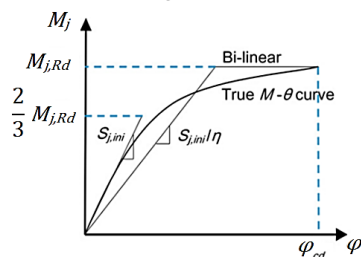
بردار سرعت (\$v_i^k\$) بر اساس ترکیبی از بهترین تجربه شخصی ذره (\$P_{best}\$) و بهترین تجربه شخصی گروه ذره‌ها (\$G_{best}\$) مطابق رابطه (۱۴) تولید می‌شود.

$$v_i^k = wv_i^{k-1} + c_1 \text{rand}_1 (P_{best_i} - x_i^{k-1}) + c_2 \text{rand}_2 (P_{best_g} - x_i^{k-1}) \quad (14)$$

در این رابطه، (\$w\$) ضریب تأثیر بردار سرعت ذره در مرحله قبلی \$v_i^{k-1}\$ است که در بازه \$0/4\$ تا \$0/9\$ به‌صورت خطی در طی روند تکامل ذره‌ها کاهش می‌یابد. این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و جستجوی کلی در روش می‌شود. انتخاب مناسب \$w\$، باعث تکرار کم‌تر فرآیند برای رسیدن به نقطه بهینه می‌شود. (\$c_1\$) پارامتر شناخت فردی است که باعث می‌شود ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که خود و نقاط نزدیک آن پیدا کرده‌اند، حرکت کند. این ضریب، به‌عنوان ضریب تحریک به‌کار می‌رود. (\$c_2\$) پارامتر شناخت اجتماعی بوده و به‌عنوان ضریب تحریک نیز به‌کار می‌رود. این ضریب باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که ذره‌ها تا به حال کسب کرده‌اند، حرکت کند. تنظیم ضرایب \$c_1\$ و \$c_2\$ در روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات مهم هستند. هر مقدار که ضریب \$c_1\$ بیش‌تر گردد، به این مفهوم است که ذره‌ها به تجربه شخصی خود اهمیت بیش‌تری می‌دهند. اگر ضریب \$c_2\$ افزایش یابد، ذره‌ها به تجربه گروه ذره‌ها اهمیت بیش‌تری می‌دهند. مقدار این دو ضریب عددی بین \$1/5\$ تا \$2\$ می‌باشد که بر اساس نوع مسئله می‌تواند تغییر کند. پیشنهاد شده است که مجموع این دو ضریب \$4\$ باشد و همچنین در حالت کلی مقدار این ضریب‌ها \$2\$ در نظر گرفته شود. علاوه بر این، \$\text{rand}\$ تولیدکننده یک مقدار تصادفی بین صفر و یک است [۱۵].

۳-۱- تجزیه و تحلیل اتصال نیمه صلب

قاب‌های فولادی در گذشته با این فرض طراحی می‌شدند که اتصالات تیر به ستون به‌طور ایده‌آل پین شده یا کاملاً صلب هستند، یعنی سختی دورانی آن به‌صورت صفر یا بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شد. درحالی‌که این فرضیات رفتار واقعی اتصال را منعکس نمی‌کرد؛ اتصالات واقعی همیشه دارای درجه خاصی از سختی چرخشی و مقاومت خمشی هستند و رفتاری بین دو فرض ذکر شده دارند که اتصالات نیمه صلب نامیده می‌شوند. در حال حاضر طیف وسیعی از مطالعات در مورد قاب‌های فولادی با اتصالات نیمه صلب وجود دارد [۲۰-۲۳]. این مطالعات تأکید دارند که هنگام تجزیه و تحلیل یک قاب، رفتار چرخشی اتصالات باید در نظر گرفته شود. رفتار واقعی یک اتصال را می‌توان با استفاده از منحنی لنگر-دوران ($M_j-\phi$) مورد ارزیابی قرار داد (شکل (۲)).



شکل ۲- نمودار لنگر-دوران اتصال ایده‌آل شده [۲۰]

۴- تعریف مسئله بهینه‌سازی اتصال

فرمول استاندارد یک مسئله بهینه‌سازی با قیود مساوی و نامساوی طبق معادله (۱۵) ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} f(x) \\ h_j(x) &= 0 & j &= 1, 2, \dots, ne \\ g_k(x) &\geq 0 & k &= 1, 2, \dots, ni \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U & i &= 1, 2, \dots, nv \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن: x بردار متغیرهای طراحی، $f(x)$ تابع هدف، $h_j(x)$ ژامین قید مساوی، $g_k(x)$ ژامین قید نامساوی، ne تعداد قیود مساوی، ni تعداد محدودیت‌های نامساوی، x_i^L کران پایین متغیر طراحی، x_i^U کران بالای متغیر طراحی و nv تعداد کل متغیرهای طراحی است.

۴-۱- متغیرهای طراحی

شش متغیر طراحی مورد استفاده در بهینه‌سازی عبارتند از:

- (۱) فاصله بین ردیف‌های کششی (p_x)
- (۲) فاصله از ردیف کشش بالایی تا بالای صفحه انتهایی (e_x)
- (۳) فاصله تا لبه (e)
- (۴) قطر اسمی پیچ (d_b)
- (۵) ضخامت صفحه انتهایی (t_{ep})
- (۶) عرض صفحه انتهایی (b_{ep})

۴-۲- متغیرهای وابسته

از ۲۸ پارامتر هندسی که اتصال صفحه انتهایی توسعه یافته شکل (۱) را تعریف می‌کنند، تنها شش پارامتر آن مستقل هستند و به‌عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شدند. ۲۲ پارامتر باقی‌مانده به روش زیر تعیین می‌شوند:

۱- ۱۰ پارامتر شامل ابعاد تیر و ستون (t_{fb} , d_{fb} , d_b , d_{tb} , d_{wb} , t_{wb}) که از نتایج بهینه‌سازی قاب فولادی در نرم‌افزار انسیس مشخص می‌شوند.

۲- قطر سوراخ پیچ (d_0) با استفاده از معادله (۱۶) محاسبه می‌شود. این رابطه از کد طراحی EN 1090-2:2008 گرفته شده است و ابعاد آن بر حسب میلی‌متر است [۲۴].

$$d_0 = d_b + 1 \quad \text{for} \quad d_b \leq 14 \quad (16)$$

$$d_0 = d_b + 2 \quad \text{for} \quad 14 \leq d_b < 27$$

$$d_0 = d_b + 3 \quad \text{for} \quad d_b \geq 27$$

۳- ضخامت گلوگاه جوش (a_f , a_w) که با استفاده از روش ساده‌شده برای مقاومت طراحی یک مقطع پر شده از جوش طبق یوروکد ۳ بخش ۱-۸ محاسبه می‌شود [۱۹].

۴- پارامترهای باقی‌مانده به متغیرهای تعریف‌شده در بالا بستگی دارند و با استفاده از معادلات (۱۷) الی (۲۳) تعیین می‌شوند. توجه داشته باشید که ابعاد معادله (۱۹) بر حسب میلی‌متر است [۳ و ۲۵-۲۶].

$$a_1 = a_2 = a_3 = \frac{1}{2}(P_x - t_{fb}) \quad (17)$$

$$h_{ep} = e_x + a_1 + h_p + l_{pl} \quad (18)$$

$$l_{pl} = \sqrt{2}a_f + 2 \quad (19)$$

$$l_{pu} = e_x + a_1 \quad (20)$$

$$m = \frac{1}{2}(w - t_{wb}) \quad (21)$$

$$h_p = h_b - 2t_{fb} - a_2 - a_3 \quad (22)$$

$$w = b_{ep} - 2e \quad (23)$$

۵- تابع هدف

تابع هدف مورد استفاده در این بخش، هزینه کل اتصال تیر-ستون را در نظر می‌گیرد. کل هزینه شامل هزینه مواد، کار و تجهیزات مورد استفاده می‌باشد. طبق معادله (۲۴) مشاهده می‌شود که هر جزء اتصال هزینه متفاوتی دارد. این فرمول اولین بار توسط

پاولوویچ^۱ و همکاران در سال (۲۰۰۴) ارائه شد [۲۷]. دیاز و همکاران نیز از آن در سال (۲۰۱۲) استفاده کردند [۸].

$$C_j = C_b + C_{c,t} + C_{c,opt} + C_h + C_p + C_s + C_{w,mf} + C_{w,mc} \quad (24)$$

(C_b) هزینه مواد برای مونتاژ پیچ (پیچ، مهره و دو واشر)، ($C_{c,t}$) هزینه مربوط به زمان صرف شده برای برش صفحه انتهایی، ($C_{c,opt}$) هزینه مخلوط اکسیژن و پروپان مورد استفاده برای برش صفحه انتهایی، (C_h) هزینه ایجاد سوراخ، (C_p) هزینه رنگ آمیزی ورق انتهایی، (C_s) هزینه فولاد صفحه انتهایی، ($C_{w,mf}$) هزینه ساخت و جوشکاری صفحه انتهایی (شامل تمام موارد مرتبط با زمان) و در نهایت ($C_{w,mc}$) هزینه مواد مصرفی جهت جوشکاری (الکتروود، سیم و ...) است. معادلات مورد استفاده برای محاسبه این تابع هدف در پیوست (آ) آورده شده است؛ همچنین خلاصه ضرایب هزینه مورد استفاده در تابع هدف در جدول (آ) آمده است.

۵-۱- قیود

برای طراحی اتصالات صفحه انتهایی، یوروکد ۳ تصریح می کند که محدودیت های هندسی، همچنین قید سختی و قید مقاومت باید در نظر گرفته شود [۱۹]. این محدودیت ها به شرح زیر است:

۱- محدودیت های هندسی: این محدودیت ها به قطر سوراخ پیچ، ضخامت بال ستون، فاصله بین ردیف پیچ های کششی پایین و پیچ های ردیف فشاری، فاصله بین ردیف پیچ های کششی، فاصله از پیچ کششی ردیف بالا تا بالای صفحه انتهایی، فاصله تا لبه، ضخامت صفحه انتهایی و فاصله افقی پیچ ها مربوط می شود که از طریق معادله (۲۵) به دست می آید، توجه شود که ابعاد آن بر حسب میلی متر است [۱۸].

$$1.2d_0 \leq e, e_x \quad (25)$$

$$2.2d_0 \leq P, P_x \leq \min\{200, 14 \times (\min(t_{ep}, t_{fc}))\}$$

$$2.4d_0 \leq w \leq \min\{200, 14 \times (\min(t_{ep}, t_{fc}))\}$$

۲- محدودیت مونتاژ: برای سهولت مونتاژ فاصله افقی بین پیچ ها و جان تیر توسط محدودیت موجود معادله (۲۶) تعریف می شود [۱۸]:

$$m \geq 2d_b \quad (26)$$

۳- قید سختی:

$$S_j \geq S_{j,min} \quad (27)$$

که ($S_{j,min}$) حداقل مقدار مجاز سختی دورانی که از قاب فولادی بهینه شده توسط نرم افزار انسیس به دست آمده است.

۴- قید مقاومت:

$$M_{j,Rd} \geq M_{j,min} \quad (28)$$

($M_{j,min}$) حداقل مقدار مجاز مقاومت لنگر که از قاب فولادی بهینه شده توسط نرم افزار انسیس به دست آمده است.

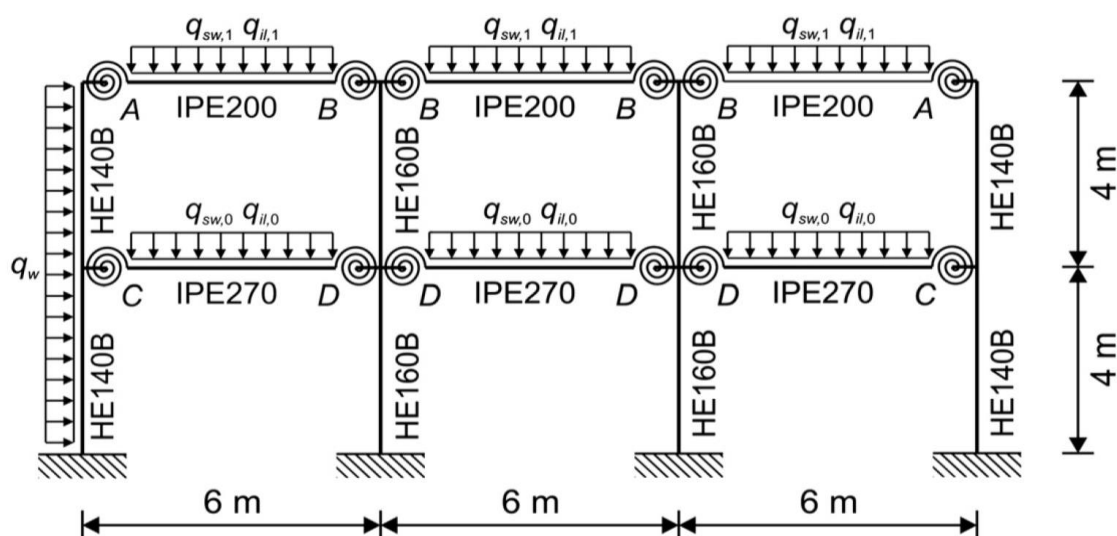
۶- مثال: قاب مسطح دو طبقه سه دهانه

برای اعتبارسنجی روش بهینه سازی ازدحام ذرات، چهار اتصال A, B, C و D از قاب دو طبقه سه دهانه که در گذشته توسط کابرو و بایو مورد مطالعه قرار گرفت، بهینه شدند. پیکربندی قاب در شکل (۳) و جزئیات بار در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- بارهای اعمال شده بر حسب (kN/m)

q_w	۳/۸
$q_{sw,1}$	۶/۵
$q_{sw,0}$	۷/۸
$q_{il,0}$	۱۱/۲
$q_{il,1}$	۳/۲

¹ Pavlovčič



شکل ۳- ابعاد و بارگذاری برای قاب نیمه‌صلب فولادی بهینه‌شده توسط کابرو و بایو [۶]

به پژوهش کابرو و بایو کاهش دهند. در پژوهش حاضر بهینه‌سازی هر چهار اتصال A, B, C و D به کمک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و به‌کارگیری روش مؤلفه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۸]. جدول (۳) هزینه اتصالات قاب مورد بررسی (به یورو)، همچنین لنگرهای خمشی و سختی دورانی به‌دست‌آمده توسط کابرو و بایو، دیاز و همکاران و مقادیر بهینه‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. هزینه اتصالات به کمک رابطه (۲۴) که توسط پاولوویچ ارائه شده بود، محاسبه شد؛ همچنین جهت یافتن مقادیر سختی دورانی و لنگر خمشی از برنامه آماده‌شده در نرم‌افزار متلب که شامل کدنویسی روش مؤلفه‌ای بود، استفاده شد. جدول (۳) جهت مقایسه و اعتبارسنجی نتایج حاصل از این پژوهش و کارهای گذشتگان ارائه شده است. شکل (۴) نمودار همگرایی حداقل هزینه اتصالات A, B, C و D به کمک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات از قاب مورد بررسی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) نمودار میله‌ای مقایسه حداقل هزینه اتصالات قاب فولادی مورد بررسی به‌دست‌آمده توسط کابرو و بایو، دیاز و همکاران و پژوهش کنونی ارائه شده است.

خواص مواد برای اتصالات این قاب عبارتند از: گرید فولاد S275 (تنش تسلیم $\sigma_y = 275$ مگاپاسکال و تنش نهایی $\sigma_u = 430$ مگاپاسکال)، مدول یانگ $E = 210$ گیگاپاسکال، نسبت پواسون $\nu = 0.3$ ، چگالی جرمی $\rho = 7800$ کیلوگرم بر مترمکعب با پیچ و مهره‌های فولادی گرید ۸/۸ ($\sigma_y = 640$ مگاپاسکال و $\sigma_u = 800$ مگاپاسکال) [۶].

در سال (۲۰۰۵) کابرو و بایو به کمک نرم‌افزار انسیس پروفیل‌های بهینه تیرها، ستون‌ها و مقادیر لنگرهای خمشی و سختی دورانی حداقل برای اتصالات این قاب را ارائه دادند. در جدول (۲) پیکربندی بهینه‌شده به‌دست‌آمده برای اتصالات قاب مورد نظر توسط آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۲- اندازه بهینه تیرها و ستون‌ها و مقادیر سختی و مقاومت

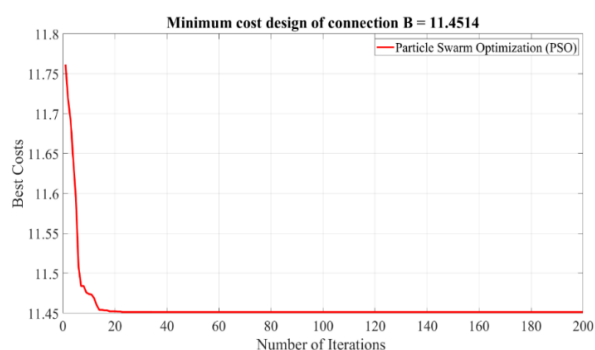
خمشی حداقل [۶]

اتصال	تیر	ستون	$S_{j,min}$ (kNm/rad)	$M_{j,min}$ (kNm)
A	IPE200	HE140B	۹۰۰۰	۲۲
B	IPE200	HE160B	۹۰۰۰	۳۵
C	IPE270	HE140B	۱۶۰۰۰	۴۰
D	IPE270	HE160B	۱۶۰۰۰	۶۰

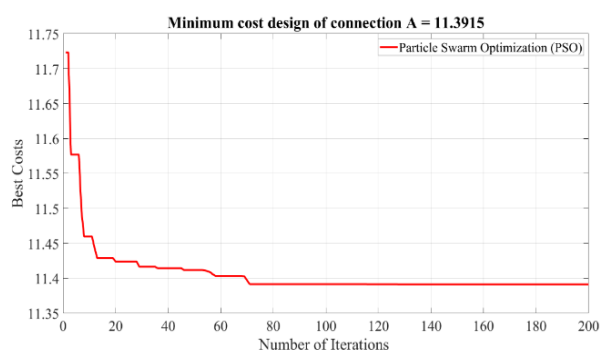
در سال (۲۰۱۲) دیاز و همکاران هزینه اتصالات A و B از این قاب را به کمک یک الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی کردند و توانستند هزینه این دو اتصال را به ترتیب ۴۱ و ۵۵ درصد نسبت

جدول ۳- مقایسه هزینه، مقاومت خمشی و سختی آغازین

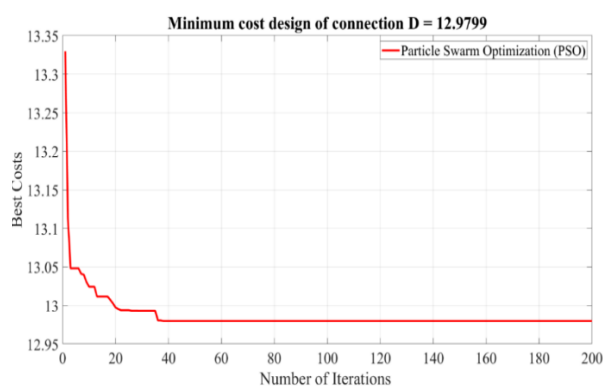
پارامتر	کابرو و بایو (۲۰۰۵)			دیز و همکاران (۲۰۱۲)			پژوهش کنونی (PSO)		
	اتصال A	اتصال B	اتصال C	اتصال D	اتصال A	اتصال C	اتصال A	اتصال B	اتصال C
$d_b(mm)$	۲۰	۱۶	۲۲	۲۲	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
$t_{ep}(mm)$	۱۰	۱۲	۱۵	۱۴	۱۲	۱۱	۹	۹	۱۵
$b_{ep}(mm)$	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۱۵	۱۳۶	۱۲۰	۱۲۰	۱۴۰
$e(mm)$	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۲	۳۲	۲۵	۲۵	۳۴
$e_x(mm)$	-	-	-	-	۲۲	۳۱	۲۲	۲۲	۲۴
$p_x(mm)$	۹۰	۱۱۰	۷۰	۷۰	۶۱	۶۱	۶۷	۶۰	۹۲
$S_{j,ini}(\frac{kNm}{rad})$	۸۰۴۲/۵	۱۲۹۶۶	۱۷۰۵۸/۷	۴۷۴۱۸	۹۴۳۷/۹	۱۶۰۴۰/۹	۹۰۷۱/۸	۱۱۸۷۲	۱۶۰۲۵/۸
$M_{j,Rd}(kNm)$	۴۱/۲۳	۳۸/۶۰	۵۵/۸۸	۱۰۲/۲۰	۴۱/۲۸	۵۴/۲۹	۳۰/۷۲۱	۳۶/۶۶	۵۹/۳۹
$C_j(€)$	۲۱/۱۹	۱۲/۰۹	۳۰	۲۹/۸۰	۱۲/۳۹	۱۳/۵	۱۱/۳۹	۱۱/۴۵	۱۳/۴۷



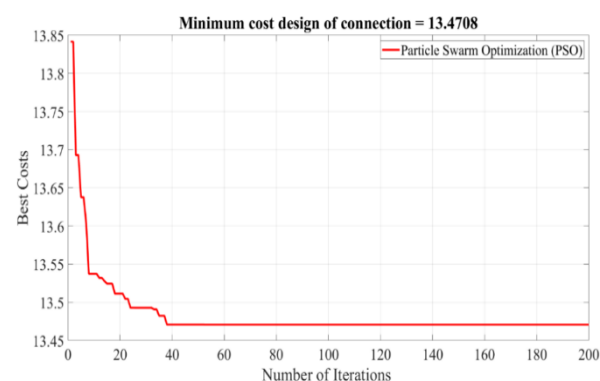
(ب)



(الف)

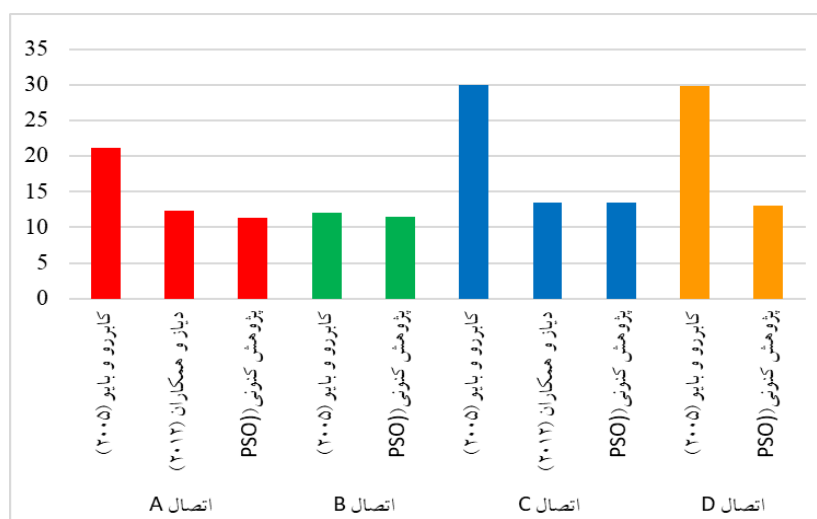


(د)



(ج)

شکل ۴- نمودار همگرایی حداقل هزینه اتصالات از قاب مورد بررسی: الف) اتصال A، ب) اتصال B، ج) اتصال C و د) اتصال D



شکل ۵- نمودار میله‌ای مقایسه حداقل هزینه اتصالات قاب فولادی

۷- نتیجه‌گیری

هنگام ساخت سازه‌های کارآمد و پایدار، یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسان سازه، دستیابی به بهینه‌سازی سازه است. به‌طور خلاصه، فرایند بهینه‌سازی سازه شامل روش‌هایی برای اطمینان از ایمنی، دوام و پایداری سازه بوده، به‌طوری‌که تمامی استانداردها با هزینه مناسبی صورت گیرد. بنابراین طراحی مناسب و بدون ایراد اتصالات سازه‌های فولادی که بحرانی‌ترین بخش یک قاب فولادی را تشکیل می‌دهد، امری ضروری است. در این پژوهش فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شامل تجزیه و تحلیل و طراحی بهینه اتصالات تیر به ستون با تغییراتی در ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل قرارگیری پیچ‌ها برای دستیابی به بهترین عملکرد ممکن در عین رعایت استانداردهای ایمنی است. با انجام درست و اصولی بهینه‌سازی طراحی اتصالات، سازندگان می‌توانند ضایعات مواد خود را کاهش داده و در نهایت باعث کاهش هزینه‌های ساخت سازه شوند. تابع هدف هزینه اتصال صفحه انتهایی از فرمول ارائه‌شده توسط **پاولوویچ** و **همکاران** بهره گرفته شد. متغیرهای طراحی شامل ابعاد و ضخامت صفحه انتهایی، قطر و محل قرارگیری پیچ‌ها است که این متغیرها به‌صورت گسسته و پیوسته در نظر گرفته شدند. به‌منظور ساده‌سازی روند محاسبات، یک کدنویسی همه‌جانبه در نرم‌افزار متلب نوشته شده و به کمک آن هزینه اتصالات قاب مورد بررسی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و به‌کارگیری روش مؤلفه‌ای بدون به خطر انداختن کارایی و ایمنی سازه، محاسبه شد. هزینه اتصالات

A، B، C و D از قاب مورد بررسی به‌ترتیب ۴۶/۲۴ درصد، ۵/۲۹ درصد، ۵۵/۱۰ درصد و ۵۶/۴۴ درصد نسبت به پژوهش **کابرو** و **بایو** و همچنین هزینه اتصالات A و C از قاب مورد بررسی به‌ترتیب ۸/۰۷ درصد و ۰/۲۲ درصد نسبت به پژوهش **دیاز** و **همکاران** کاهش یافت.

تعریف	واحد	مقدار	ضرایب
چگالی جرم فولاد	kg/m^3	۷۸۲۰	ρ_s
عامل برشکاری که نیروی کار را افزایش می دهد	-	۱/۰۳	f_c
عامل جوشکاری که نیروی کار را افزایش می دهد	-	۱/۴	f_w
هزینه یک واحد پیچ	$€/bolt$	-	$k_{b,mt}$
هزینه برش یک واحد پیچ	$€/min$	۰/۳۰۷	k_c
هزینه واحد اکسیژن	$€/l$	۰/۰۰۱۶	$k_{c,m,o}$
هزینه واحد پروپان	$€/l$	۰/۰۰۲۰	$k_{c,m,p}$
هزینه واحد برای شکل دهی سوراخ	$€/min$	۰/۳۲۳	k_h
هزینه واحد برای نقاشی	$€/min$	۰/۴۳	k_p
هزینه واحد رنگ	$€/l$	۳/۸	$k_{p,mt}$
هزینه واحد فولاد	$€/kg$	۰/۴	k_s
هزینه واحد برای جوشکاری	$€/min$	۰/۱۲۳	k_w
هزینه واحد جوش	$€/kg$	۱/۴	$k_{w,mt}$
طول برش	m	-	L_c
طول جوش بین بال تیر و صفحه انتهایی به ضخامت a_f	m	-	L_f
طول جوش بین جان تیر و صفحه انتهایی به ضخامت a_w	m	-	L_w
مصرف مواد اکسیژن	$1/m$	-	$M_{c,o}$
مصرف مواد پروپان	$1/m$	-	$M_{c,p}$
مصرف رنگ	$1/m^2$	۰/۱۵	M_p
مصرف مواد برای جوشکاری به طول L_f و ضخامت a_f	kg/m	-	$m_{w,mc,af}$
مصرف مواد برای جوشکاری به طول L_w و ضخامت a_w	kg/m	-	$m_{w,mc,aw}$
تعداد پیچ ها	$bolt$	۶	n_b
تعداد سوراخ ها	$bolt$	۶	n_h
زمان برشکاری	min/m	-	T_c
زمان برش اضافی	min	۲	$T_{c,ex}$
مسیر دریل کاری اضافی	cm	۱/۴	t_{ex}
زمان تشکیل سوراخ اضافی	min	۱۱/۹	$T_{h,ex}$
ضخامت صفحه سوراخ شده	cm	-	t_p
زمان مصرفی برای نقاشی	min/m^2	۷	T_p
زمان عملیات جوشکاری به طول L_f و ضخامت a_f	min/m	-	$T_{w,af}$
زمان عملیات جوشکاری به طول L_w و ضخامت a_w	min/m	-	$T_{w,aw}$
زمان اضافی جوش	min	۰/۳	$T_{w,ex}$
سرعت پیشرفت حفاری	cm/min	-	V_d
حجم صفحه انتهایی	m^3	-	V_{ep}

این پیوست معادلات توسعه یافته توسط پاولوویچ و همکاران (۲۰۰۴) برای به دست آوردن هزینه کل یک اتصال تیر-ستون را ارائه می دهد. محاسبه هزینه ها بر حسب یورو (€) و متغیرهای مورد استفاده در معادله (۲۴) به صورت زیر به دست آمده است:

- هزینه مواد برای مونتاژ پیچ (پیچ، مهره و دو واشر)

$$C_b = n_b k_{b,mt} \quad (1-آ)$$

$$k_{b,mt} = 3.076d_b^2 - 7.373d_b + 4.62 \quad (2-آ)$$

- هزینه مربوط به زمان برش صفحه انتهایی

$$C_{c,t} = k_c (f_c T_c L_c + T_{c,ex}) \quad (3-آ)$$

$$L_c = 2(b_{ep} + h_{ep}) \quad (4-آ)$$

$$T_c = -0.015t_{ep} + 0.42t_{ep} + 1.43 \quad (5-آ)$$

- هزینه مخلوط اکسیژن-پروپان مورد استفاده برای برش صفحه انتهایی

$$C_{c,opt} = L_c (k_{c,m,o} M_{c,o} + k_{c,m,p} M_{c,p}) \quad (6-آ)$$

$$M_{c,o} = 1.645t_{ep}^2 + 56.644t_{ep} - 6.73 \quad (7-آ)$$

$$M_{c,p} = 2.171t_{ep} + 7.87 \quad (8-آ)$$

- هزینه تشکیل سوراخ

$$C_h = k_h (n_h (t_p + t_{ex}) / V_d + T_{h,ex}) \quad (9-آ)$$

$$t_p = t_{ep} + t_{fc} \quad (10-آ)$$

$$V_d = 0.763d^2 - 5.720d + 20.96 \quad (11-آ)$$

- هزینه نقاشی صفحه انتهایی

$$C_p = 2(b_{ep} + h_{ep})(k_p T_p + k_{p,mt} M_p) \quad (12-آ)$$

- هزینه فولاد مصرفی ورق انتهایی

$$C_s = k_s V_{ep} \rho_s \quad (13-آ)$$

$$V_{ep} = b_{ep} h_{ep} t_{ep} \quad (14-آ)$$

- هزینه جوشکاری ورق انتهایی

$$C_{w,mf} = k_w (f_w (T_{w,af} L_f + T_{w,aw} L_w) + T_{w,ex}) \quad (15-آ)$$

$$L_f = 2b_{fb} + 2(b_{fb} - 2r_b - t_{wb}) \quad (16-آ)$$

$$L_w = 2(h_b - 2r_b - t_{fb}) \quad (17-آ)$$

$$T_{w,af} = 9.03a_f^2 + 4.68a_f - 0.82 \quad (18-آ)$$

$$T_{w,aw} = 9.03a_w^2 + 4.68a_w - 0.82 \quad (19-آ)$$

- هزینه مواد مصرفی (الکترو، سیم و ...)

$$C_{w,mc} = k_{w,mt} (m_{w,mc,af} L_f + m_{w,mc,aw} L_w) \quad (20-آ)$$

$$m_{w,mc,af} = 0.66a_f^2 + 0.18a_f - 0.10 \quad (21-آ)$$

$$m_{w,mc,aw} = 0.66a_w^2 + 0.18a_w - 0.10 \quad (22-آ)$$

[۱۳] صادقی، ع.، سهرابی، م.ر.، و کاظمی، س.م. (۱۴۰۲)، "بررسی رفتار اتصالات خمشی فولادی به روش مؤلفه‌ای پیشرفته"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، شماره ۱۷، ص ۳۴-۴۵.

[14] Sadeghi, A., Sohrabi, M.R., and Kazemi, S.M. (2024), "Presenting an advanced component-based method to investigate flexural behavior and optimize the end-plate connection cost", *Steel and Composite Structures*, 52(1), pp.31-43.

[15] Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995), "November. Particle swarm optimization", In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942-1948

[16] Rao, R.V., Savsani, V.J., and Vakharia, D.P. (2011), "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems", *Computer-Aided Design*, 43(3), pp.303-315.

[17] Hashim, F.A., and Hussien, A.G. (2022), "Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm", *Knowledge-Based Systems*, 242, p.108320.

[18] Fomento, D.E., (2011), *Instrucción de Acero Estructural*.

[19] Cen, E., (2005), 3: Design of steel structures. Comité Européen de Normalisation.

[20] Ali, N.B.H., Sellami, M., Cutting-Decelle, A.F., and Mangin, J.C. (2009), "Multi-stage production cost optimization of semi-rigid steel frames using genetic algorithms", *Engineering Structures*, 31(11), pp.2766-2778.

[21] Ashraf, M., Nethercot, D.A., and Ahmed, B. (2004), "Sway of semi-rigid steel frames: Part 1: Regular frames", *Engineering Structures*, 26(12), pp.1809-1819.

[22] Daniūnas, A., and Urbonas, K. (2008), "Analysis of the steel frames with the semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces", *Engineering Structures*, 30(11), pp.3114-3118.

[23] Chen, W.F. (2000), "Practical analysis for semi-rigid frame design", *World Scientific*.

[24] En, B. (2008), 1090-2 : Execution of Steel Structures and Aluminium Structures—Part 2: 2. Technical Requirements for Steel Structures. British Standards Institution, London.

[25] Coelho, A.M.G., Bijlaard, F.S., and da Silva, L.S. (2004), "Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections", *Engineering Structures*, 26(9), pp.1185-1206.

[26] Coelho, A.M.G., and Bijlaard, F.S. (2007), "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), pp.1228-1240.

[27] Pavlovčič, L., Krajnc, A., and Beg, D. (2004), "Cost function analysis in the structural optimization of steel frames", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28, pp.286-295.

[1] Hortencio, R.D.S., and Falcón, G.A.S. (2018), "Optimal design of beam-column connections of plane steel frames using the component method", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(11), p.e68.

[2] Simoes, L.M.C. (1996), "Optimization of frames with semi-rigid connections", *Computers and Structures*, 60(4), pp.531-539.

[3] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (1999), "Structural steel semirigid connections: Theory, Design, and Software (Vol. 21). CRC press.

[4] de Lima, L.R.O., Vellasco, P.D.S., da Silva, J.G.S., Borges, L.A.C., and da Silva, L.A.P.S. (2005), "POST-LIMIT STIFFNESS PREDICTION OF SEMI-RIGID JOINTS USING GENETIC ALGORITHMS", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2(4), pp.305-320.

[5] Hayalioglu, M.S., and Degertekin, S.O. (2005), "Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization", *Computers and Structures*, 83(21-22), pp.1849-1863.

[6] Cabrero, J.M., and Bayo, E. (2005), "Development of practical design methods for steel structures with semi-rigid connections", *Engineering Structures*, 27(8), pp.1125-1137.

[7] Degertekin, S.O., and Hayalioglu, M.S. (2010), "Harmony search algorithm for minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(5), pp.755-768.

[8] Díaz, C., Victoria, M., Querin, O.M., and Martí, P. (2012), "Optimum design of semi-rigid connections using metamodels", *Journal of Constructional Steel Research*, 78, pp.97-106.

[9] Yassami, M., and Ashtari, P. (2015), "Using fuzzy genetic, Artificial Bee Colony (ABC) and simple genetic algorithm for the stiffness optimization of steel frames with semi-rigid connections", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, pp.1366-1374.

[10] Faridmehr, I., Nikoo, M., Pucinotti, R., and Bedon, C. (2021), "Application of component-based mechanical models and artificial intelligence to bolted beam-to-column connections", *Applied Sciences*, 11(5), p.2297.

[11] Kueh, A.B.H. (2021), "Artificial neural network and regressed beam-column connection explicit mathematical moment-rotation expressions", *Journal of Building Engineering*, 43, p.103195.

[12] Askarian, H., Sohrabi, M.R., and Kazemi, S.M. (2021), "Investigating the behavior of a modular prefabricated steel moment connection with the through-plate panel zone system", *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 80(4), pp.433-442.