

## بهینه‌سازی ظرفیت برشی تیرهای ساخته‌شده از مقاطع دوبل ناودانی فولادی سردنوردشده با بازشو در جان

نسترن حسینجانی<sup>۱</sup>، حسین پرستش<sup>۲\*</sup>

۱- عضو هیئت علمی گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، parastech@usc.ac.ir

### چکیده

تمایل به استفاده از اعضای سرد نوردشده سبک با کاربردهای متعدد در حال افزایش است. اجرای بازشوها در جان برای عبور تأسیسات ساختمانی به‌ویژه در نواحی تکیه‌گاهی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش ارزیابی ظرفیت برشی نهایی تیرهای با فولاد سرد نوردشده با بازشدگی در جان است. تیرهایی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر به صورت مقاطع اشکل، متشکل از دوپل اشکل تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای در یک تحلیل غیرخطی با پارامترهای مختلف و رفتار غیرالاستیک مصالح با استفاده از نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی شد. صحت‌سنجی مدل المان محدود با تکیه بر نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع معتبر، انجام پذیرفت. پارامترهای مورد نظر در این مدل‌سازی و قیود طراحی در فرآیند بهینه‌سازی ابعاد و شکل سوراخ، ضخامت مقطع، حضور لبه و بدون لبه در مقاطع و فاصله بازشدگی‌ها از تکیه‌گاه است. در این تحقیق، از روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) که یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه است، برای بهینه‌سازی دو هدف بار ماکزیمم و جرم مینیمم به کار برده شده است. خروجی مدل‌های اجزای محدود (بار ماکزیمم) به عنوان ورودی در شبکه عصبی برای آموزش و طراحی و خروجی‌های شبکه عصبی به عنوان تابع هدف انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد اختلاف بار نهایی حاصل از آنالیز المان محدود و الگوریتم ژنتیک، حداکثر ۴/۱۸٪ است. در این تحقیق، چارچوب ترکیبی ارائه‌شده (FEM-ANN-GA)، امکان انتخاب بهینه‌ترین مشخصات سوراخ جان را از میان جواب‌های پارتو، با در نظرگیری هم‌زمان مقاومت و وزن، فراهم می‌کند. بررسی مقاومت برشی، نشان می‌دهد سوراخ مستطیل شکل حدود ۴٪ و سوراخ دایره‌ای حدود ۷٪ بهتر از سوراخ مربع عمل می‌کنند.

### واژگان کلیدی

فولاد سرد نوردشده، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، نمودار پارتو، شبکه عصبی مصنوعی

## Optimization of Shear Capacity in Cold-Formed Steel Double Channel Beams with Web Openings

N. Hosseini, H. Parastesh

### Abstract

The use of lightweight cold-formed steel members with versatile applications is increasing. Implementing web openings for building services passage, especially in support zones, is particularly important. This research aims to evaluate the ultimate shear capacity of cold-formed steel beams with web openings. I-shaped beams, 1000 mm in length, composed of back-to-back C-sections were modeled for nonlinear analysis under three-point loading using finite element software, considering various parameters and material non-elastic behavior. The finite element model was validated based on existing experimental results from reliable sources. Key parameters in this modeling and design constraints for optimizing hole dimensions and shape included section thickness, the presence or absence of lips on the sections, and the distance of the openings from the support. This study employed a hybrid Neural Network-Genetic Algorithm (NSGA-II), a multi-objective optimization algorithm, to optimize the two objectives of maximum load and minimum mass. The outputs from the finite element models (maximum load) served as input for neural network training and design, and the neural network outputs were selected as the objective function. Results show a maximum difference of 4.18% between the ultimate load from finite element analysis and the genetic algorithm. In this research presented hybrid framework (FEM-ANN-GA) enables the selection of the optimal web opening specifications from the Pareto solutions, while simultaneously considering both strength and weight. The shear resistance investigation reveals that rectangular openings perform approximately 4% better, and circular openings about 7% better than square openings.

### Keywords

Cold-Formed Steel, Optimization, Genetic Algorithm, Pareto Front, Artificial Neural Network

انجام دادند و معادلات ضریب کاهش مقاومت قابل اطمینان پیشنهاد شد [۱۸ و ۱۹].

فام<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از روش اجزای محدود و شبکه عصبی کماتش تیرهای فولادی در ابعاد و فواصل متفاوت سوراخ جان را مورد بررسی قرار دادند و یک معادله ساده برای تیرهای با سوراخ جان مرکزی به منظور تخمین ضرایب کماتش به دست آمد [۲۰].

کاتشگر<sup>۸</sup> و همکاران، مطالعه آزمایشگاهی و بهینه سازی مقاطع تیرهای لبه دار اعضای فولاد سرد نورد شده را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و روش عرض مؤثر به منظور بهینه کردن ظرفیت خمشی، برشی و لهیدگی جان انجام دادند که با روش المان محدود و قوانین آیین نامه مقایسه شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد [۲۱ و ۲۲].

دگتیارووا<sup>۹</sup> (۲۰۲۰)، برای محاسبه بارهای کماتش برشی الاستیک و مقاومت برشی نهایی مقاطع با جانهای شیاردار مقاطع سازه های CFS، از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرد [۲۳].

فام و همکاران (۲۰۲۰)، آزمایش های برشی و آنالیز اجزای محدود برای مقاطع C شکل با سوراخ های مرکزی جان در شکل های مختلف انجام دادند؛ بار تسلیم برشی و نیروی کماتش الاستیک برشی با استفاده از روش (DSM) تعیین و مقایسه شد [۲۴].

طاهری و همکاران (۱۳۹۹)، مقاطع فولاد سرد نورد شده تحت بارگذاری های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند و برای پیش بینی بار نهایی از روش شبکه عصبی و ترکیبی از روش های الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند [۲۵].

ژانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، برای تیرهای با مقطع C شکل فولاد سرد نورد شده با استفاده از روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی تک هدفه<sup>۱۱</sup> و دو هدفه<sup>۱۲</sup> انجام دادند [۲۶]. توابع هدف در بهینه سازی تک هدفه، افزایش ظرفیت خمشی و در بهینه سازی دو هدفه افزایش ظرفیت خمشی و کاهش شکل پذیری است.

نوس<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، بهینه سازی چند هدفه (افزایش مقاومت و کاهش هزینه ساخت) برای بهینه سازی اشکال مقاطع فولادی سرد نورد شده را با استفاده از سخت کننده ارائه دادند که

توسعه استفاده از فولاد سرد نورد شده در صنعت ساخت وساز موجب شد که اعضای تشکیل دهنده سازه های سرد نورد شده مورد بررسی قرار گیرند [۱-۳]. برای عبور تأسیسات مکانیکی در جان تیر این سازه ها، سوراخ هایی ایجاد می شود که موجب کاهش مقاومت این سازه ها می شود [۴-۶]. بر این اساس، بایستی تدابیری اندیشیده شود که با در نظر گرفتن سوراخ شدگی در جان و بهینه سازی این مقاطع، مقاومت سازه افزایش یابد [۷ و ۸]. این امر اهمیت استفاده از روش های بهینه سازی را برای افزایش مقاومت عناصر سازه های سرد نورد شده<sup>۱</sup> و توسعه راه حل های طراحی اقتصادی تر با نسبت استحکام به وزن بالاتر نشان می دهد [۹ و ۱۰]. در سال های اخیر، تحقیقات وسیعی انجام شده است که در ادامه به مرور تعدادی از تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می شود [۱۱-۱۴].

عادلی و همکاران (۱۹۹۷)، یک مدل شبکه عصبی قوی برای طراحی بهینه تیرهای فولادی سرد نورد شده به منظور مینیمم کردن وزن سازه ارائه نمودند [۱].

سونمز<sup>۲</sup> و کومور<sup>۳</sup> (۲۰۱۰)، یک فرمول مبنی بر شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند که در آن الگوهای بارگذاری های مختلف، محل سوراخ، اندازه و نسبت های مختلف ابعاد سوراخ را پوشش می دهند.

کرتن<sup>۴</sup> و ماهندران<sup>۵</sup> (۲۰۱۳)، با مطالعه آزمایشگاهی و عددی، مقاومت برشی تیرهای C شکل لبه دار سازه های سرد نورد شده را بدون سوراخ و با سوراخ شدگی های در جان، در شرایط بارگذاری سه نقطه ای بررسی کردند [۱۶]؛ نتایج نشان داد وجود سوراخ موجب رفتار پیچیده برشی و کاهش قابل توجه مقاومت برشی می شود.

لی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، طراحی بهینه ابعاد و شکل تیرهای فولاد سرد نورد شده را با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام جمعیت انجام دادند که با آنالیز اجزای محدود مقایسه شد و با استفاده از روش عرض مؤثر و روش مقاومت مستقیم ارزیابی شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد.

یوسفی و همکاران (۱۳۹۵)، آزمایش ها و تحلیل عددی شبه استاتیکی بر مقاطع ناودانی فولاد ضد زنگ سرد نورد شده را

<sup>7</sup> Pham

<sup>8</sup> Gatheeshgar

<sup>9</sup> Degtyareva

<sup>10</sup> Zhong

<sup>11</sup> Single-Objective Optimization

<sup>12</sup> Multi-Objective Optimization

<sup>13</sup> Neves

<sup>1</sup> Cold Formed Steel (CFS)

<sup>۲</sup> Sönmez

<sup>3</sup> Komur

<sup>4</sup> Keerthan

<sup>5</sup> Mahendran

<sup>6</sup> Li

هدف آن به حداکثر رساندن مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بود [27]. نتایج عددی به صورت جبهه پارتوی بهینه ارائه شد و اعتبارسنجی مقاطع بهینه شده به دست آمده با روش DSM انجام شد.

**قدیر و همکاران** (2024)، با استفاده از بررسی نتایج آزمایشگاهی، مدل سازی اجزای محدود و بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، طراحی و تحلیل شکل مقاطع فولاد سرد نورد شده را انجام دادند و با استفاده از منحنی پارتو، مقاطع بهینه را معرفی کردند تا طراح با توجه به احتیاج، مقطع مورد نظر را برای ساخت انتخاب نماید [28].

**پرستش و همکاران** (2025)، با استفاده از آنالیز المان محدود، ظرفیت برشی مقاطع دابل تیرهای فولادی سرد نورد شده دارای سوراخ جان با متغیرهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند [29]. نتایج نشان داد در سه شکل سوراخ مستطیل، دایره و مربع به ترتیب با افزایش عمق سوراخ، مقاومت برشی کاهش می یابد.

همان طور که در بالا بحث شد، می توان دریافت که با توجه به اهمیت باز شو در تیرهای فولادی سرد نورد شده برای عبور تأسیسات ساختمانی، تعیین مشخصات سطح مقطع باز شوی بهینه از اهمیت ویژه ای برخوردار است [30-33]. از نوآوری های خاص این تحقیق، استفاده از روش بهینه سازی ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی دوهدفه بار ماکزیمم و جرم مینیمم است [34 و 35]. در تحقیق حاضر مقاطع تیرهای I ساخته شده از دابل C شکل با سوراخ شدگی در جان با تکیه گاه دوسر مفصل تحت بارگذاری سه نقطه ای بررسی شده است.

## ۲- روش ترکیبی بهینه سازی شبکه عصبی الگوریتم ژنتیک

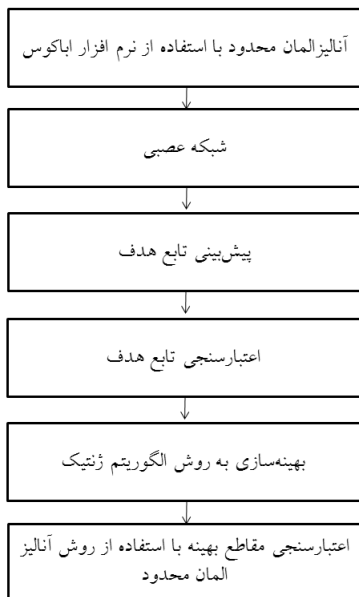
در این مقاله برای بهینه سازی تیرهای با سوراخ شدگی جان از روش مناسب بهینه سازی چندهدفه (NSGAI)<sup>1</sup> هوشمند و روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک، برای رسیدن به شکل مقطع بهینه سوراخ تیر با متغیرهای مختلف، استفاده شده است [36-38]. فلوجارت مراحل انجام شده در این تحقیق در شکل (1) آورده شده است.

روند کار به این ترتیب است: (1) تولید یک بانک اطلاعاتی از نتایج مقاومت برشی نهایی برای ترکیبات مختلف پارامترها با استفاده از تحلیل غیرخطی المان محدود؛ (2) آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از این داده ها به گونه ای که نقش یک

تابع جایگزین سریع و دقیق را ایفا نماید؛ (3) استفاده از خروجی این شبکه عصبی مصنوعی<sup>2</sup> به عنوان تابع هدف در الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای کشف کارآمد نقاط بهینه پارتو.

بدین ترتیب، مدل پرهزینه محاسباتی آنالیز المان محدود<sup>3</sup> تنها یک بار در مرحله تولید داده، اجرا شده و فرآیند بهینه سازی سنگین بر روی مدل سریع العمل شبکه عصبی انجام می گیرد.

همان طور که در شکل (1) مشخص شده است، ابتدا 270 نمونه تیر با مقاطع I ساخته شده از دابل C شکل با سوراخ شدگی در جان با تکیه گاه دوسر مفصل تحت بارگذاری سه نقطه ای با متغیرهای ابعاد و شکل سوراخ، ضخامت مقطع، حضور لبه و بدون لبه در مقاطع و فاصله باز شدگی ها از تکیه گاه با استفاده از نرم افزار اجزای محدود (آباکوس) مدل سازی شده و بار نهایی ماکزیمم محاسبه شده است [39 و 40].



شکل ۱- فلوجارت مراحل بهینه سازی

خروجی های به دست آمده از آباکوس به عنوان داده های لازم برای آموزش و طراحی شبکه عصبی به منظور پیش بینی تابع هدف استفاده شده است [41 و 42]. شبکه های عصبی مصنوعی روشی مناسب برای بررسی و پیش بینی پاسخ یک سیستم بر پایه تعداد زیادی داده، است [43]. نتایج حاصل از تحلیل برای آموزش، انتخاب و طراحی یک شبکه عصبی مناسب به منظور پیش بینی بار سازه (تابع هدف) به کار گرفته شده است [44 و 45]. روش کار به این صورت است که ابتدا به کمک خروجی های آباکوس، در

<sup>2</sup> Artificial Neural Networks (ANN)  
<sup>3</sup> Finite Element Analysis (FEM)

<sup>1</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

- غلبه پارتویی<sup>۴</sup>:

بردار  $U=[u_1, u_2, \dots, u_n]$  بر بردار  $V=[v_1, v_2, \dots, v_n]$  غلبه پارتویی می‌یابد ( $U < V$ ) اگر و فقط اگر

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists j \in \{1, 2, \dots, k\} : u_j < v_j \quad (2)$$

- بهینگی پارتویی<sup>۵</sup>:

یک نقطه  $X^* \in \Omega$  (ناحیه قابل قبول طراحی است) را نقطه بهینه پارتویی گویند اگر هیچ نقطه دیگری از  $\Omega$  بر آن غلبه پارتویی نیابد.

$$\forall X \in \Omega, X \neq X^*, \exists i \in \{1, 2, \dots, k\} : f_i(X^*) < f_i(X) \quad (3)$$

- مجموعه پارتو<sup>۶</sup>:

در مسائل بهینه‌سازی چندهدفی، یک مجموعه پارتو ( $P^*$ ) حاوی تمامی بردارهای بهینه پارتویی است.

$$P^* = \{X \in \Omega \mid \nexists X' \in \Omega : F(X') \prec F(X)\} \quad (4)$$

- جبهه پارتو:

در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی، جبهه پارتو  $PT^*$  مجموعه‌ای از بردارهای توابع هدف است که با استفاده از بردارهای متغیرهای طراحی از مجموعه پارتو  $P^*$  به دست آمده‌اند؛ به عبارت دیگر جبهه پارتو  $PT^*$  مجموعه‌ای از بردارهای توابع هدف است که از  $P^*$  نگاشت شده‌اند.

$$PT^* = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x) : x \in P^*\} \quad (5)$$

## ۲-۲ قیود مسئله بهینه‌سازی

در این تحقیق قیود مسئله بهینه‌سازی و محدودیت‌های هندسی در این مدل‌سازی، ابعاد و شکل سوراخ، ضخامت مقطع، حضور لبه و بدون لبه در مقاطع و فاصله بازشدگی‌ها از تکیه‌گاه (فاصله لبه سوراخ‌ها از تکیه‌گاه) است. دامنه تغییرات این پارامترها بر اساس ملاحظات کاربردی و ساخت‌پذیری تعریف شد.

## ۳- تحلیل به‌روش اجزای محدود

در این مقاله، تیرهای با مقطع I ساخته شده از دابل C شکل فولادی سرد نورد شده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری

نرم‌افزار متلب شبکه عصبی برای ارتباط ورودی و خروجی‌ها ساخته می‌شود. خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی ساخته شده به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند [۴۴ و ۴۵]. یکی از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون<sup>۱</sup> با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار خطا<sup>۲</sup> است [۴۵]. در صورت انتخاب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی مناسب برای پرسپترون‌های چندلایه، می‌توان یک نگاشت غیرخطی را با دقت مطلوب انجام داد [۴۶]. عملکرد شبکه عصبی بر اساس میانگین توان دوم خطاها<sup>۳</sup> اعتبارسنجی شد و نتایج قابل قبول به‌دست آمد [۴۱ و ۴۲].

از روش الگوریتم ژنتیک با بهینه‌سازی دوهدفه، برای بهینه‌سازی بار ماکزیمم و جرم مینیمم به‌منظور رسیدن به شکل مقطع بهینه سوراخ تیر استفاده شده است. با استفاده از تابع هدف به‌دست‌آمده از شبکه عصبی و به‌کارگیری روش الگوریتم ژنتیک، مقاطع بهینه با در نظر گرفتن قیود مسئله عنوان شده در نمودارهای پارتو به‌دست آمده است [۳۶]. این روش می‌تواند هم‌زمان همه متغیرها را بهینه‌سازی کند و به‌ازای مقادیر بهینه متغیرهای تعریف شده، مقطع تیر و بار ماکزیمم و جرم مینیمم آن به‌دست می‌آید [۴۷]. محاسبه نمودار پارتو در الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه برای یافتن پارامترهای بهینه تیر است و تمام نقاط بهینه با توجه به تابع هدف به طراح ارائه می‌شود تا بسته به نیاز خود، انتخاب نماید [۴۸].

## ۲-۱- مفاهیم بهینه‌سازی چندهدفه

صورت استاندارد مسائل بهینه‌سازی چندهدفی به‌صورت زیر است:

$$\text{Find } X = [x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_n]^T \in \mathfrak{R}^m$$

$$\text{To Optimize } f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)]^T \in \mathfrak{R}^n$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} g_i(X) \leq 0, (i = 1, 2, \dots, p) \\ h_j(X) = 0, (j = 1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (1)$$

که  $X$  بردار متغیرهای تصمیم‌گیری،  $F$  بردار توابع هدف،  $g$  قیود نامساوی و  $h$  قیود مساوی مسئله هستند. فرض می‌شود همه بردارهای هدف باید مینیمم شوند. این مسئله مینیمم‌سازی چندهدفی که تحت عنوان مسائل پارتو دسته‌بندی می‌شود، با تعاریف زیر شناخته می‌شود [۴۹].

<sup>1</sup> Multilayer Perceptron (MLP)

<sup>2</sup> Backpropagation (BP)

<sup>3</sup> Mean Squared Error (MSE)

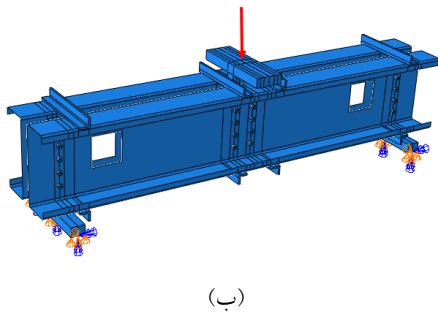
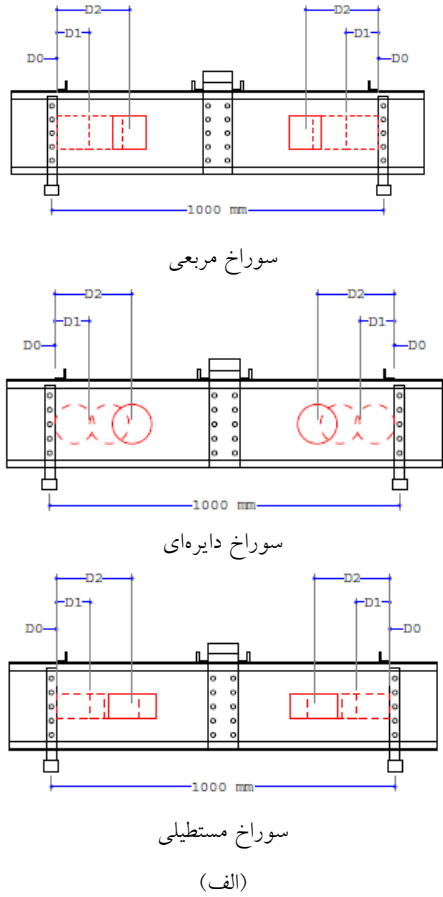
<sup>4</sup> Pareto Dominance

<sup>5</sup> Pareto Optimality

<sup>6</sup> Pareto Set



که به تدریج بر وسط دهانه تیر اعمال می‌شود، به روش کنترل تغییرمکان مدل‌های تحلیلی، تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی بارافزون قرار گرفته است. مقاطع تیرهای سردنوردشده مدل‌شده با فواصل و شکل‌های مختلف سوراخ جان و اعمال بارگذاری و همچنین شرایط تکیه‌گاهی مقطع مدل‌شده در آباکوس، در شکل (۳) آورده شده است.

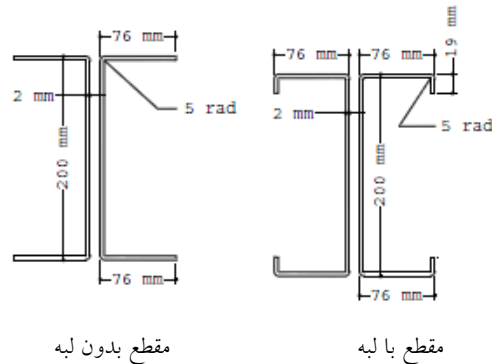


شکل ۳- الف) مقاطع تیرهای سردنوردشده مدل‌شده با فواصل و شکل‌های مختلف سوراخ جان (واحد به میلی‌متر) (ب) اعمال بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی مقطع مدل‌شده در آباکوس

سه‌نقطه‌ای مدل‌سازی شده است. به منظور مدل‌سازی نمونه‌های تحلیلی و ورق فولادی سردنوردشده از المان پوسته<sup>۱</sup> استفاده شده است [۵۰]. ویژگی‌های فولاد سردنوردشده و مشخصات مقطع مورد استفاده بر اساس تحقیق فام انتخاب شده است [۲۳].

### ۳-۱- معرفی مدل‌های تحلیلی

مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی فولاد، مطابق مطالعه آزمایشگاهی فام و همکاران تنش تسلیم فولاد برابر ۴۸۳/۰۳ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۱۸۸۶۵۲ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۷/۸۵ کیلوگرم بر میلی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است [۲۳]. شکل مقاطع تیرهای سردنوردشده مورد استفاده در تحقیق، در شکل (۲) آورده شده است.

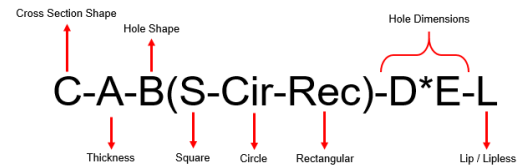


شکل ۲- مقطع تیرهای سردنوردشده مورد استفاده

طول تیر ۱۰۰۰ میلی‌متر و شرایط تکیه‌گاهی دوسر مفصل، به منظور ایجاد شرایط بحرانی برش خالص در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه و همچنین قابلیت مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین در نظر گرفته شده است [۲۳]. در این مطالعه، به دلیل بارگذاری متقارن و هدف بررسی ظرفیت برشی، اثرات کمانش پیچشی و برهم‌کنش خمش-پیچش مستقیماً در نظر گرفته نشد. پارامترهای متغیر در این مدل‌سازی، ابعاد و شکل سوراخ، ضخامت مقطع، حضور لبه و بدون لبه در مقاطع و فاصله بازشدگی‌ها از تکیه‌گاه هستند. دامنه تغییرات پارامترهای هندسی (ضخامت، ابعاد سوراخ، فواصل) بر اساس محدودیت‌های ساخت، الزامات آیین‌نامه<sup>۲</sup> سازه‌های سردنوردشده<sup>۲</sup> در مورد حداقل فاصله سوراخ از لبه مقطع و همچنین بازه‌های متداول در کاربردهای عملی تعیین شد. هدف از بررسی حضور یا عدم حضور لبه، ارزیابی تأثیر این عضو سخت‌کننده بر ظرفیت برشی و شناسایی شرایطی است که ممکن است حذف آن (به دلایل ساخت یا اقتصادی) با انتخاب بهینه‌ای از سایر پارامترها جبران‌پذیر باشد. تیر به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر بر اساس پارامترهای تعریف‌شده، دارای دو سوراخ در فواصل مختلف از تکیه‌گاه و با تکیه‌گاه مفصلی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل شده است. برای اعمال بارگذاری نمونه‌های تحلیلی، یک بار متمرکز وارد شده در مرکز تیر

<sup>1</sup> Shell  
<sup>2</sup> American Iron and Steel Institute (AISI)

مشخصات نمونه‌های مدل‌شده در جدول (۱) ارائه و بر اساس آن ۲۷۰ تیر مدل‌سازی شده است.



شکل ۴- نام‌گذاری نمونه‌ها

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های مدل‌شده

C-A-B(S-Cir-Rec)-D*E-L			
C	A	2	
		2.25	
		2.5	
		2.75	
		3	
	B	S	40*40
			80*80
			120*120
		D*E	45.2
			90.4
			135.6
			56.53*28.3
	113.12*56.57		
	169.70*84.85		
	L	Lip	
Lipless			

جدول ۲- نتایج مدل‌های آنالیزشده به روش المان محدود برای مقاطع با لبه

الف) سوراخ‌های مربع

نمونه مقطع مدل‌شده	D0	D1	D2
با سوراخ مربع با لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-S40×40-Lip	۱۶۴/۹۰	۱۶۲/۲۷	۱۵۴/۸۰
C2-S80×80-Lip	۱۳۷/۳۴	۱۲۸/۸۹	۱۲۴/۴۹
C2-S120×120-Lip	۷۰/۱۶	۶۸/۸۲	۶۸/۵۶
C2.25-S40×40-LiP	۲۰۳/۳۰	۲۰۰/۷۵	۱۹۱/۳۳
C2.25-S80×80-Lip	۱۶۸/۵۷	۱۶۵/۶۲	۱۶۰/۹۷
C2.25-S120×120-Lip	۸۵/۶۷	۸۴/۸۴	۸۰/۲۰
C2.5-S40×40-Lip	۲۴۰/۴۶	۲۴۶/۰۹	۲۳۹/۰۳
C2.5-S80×80-Lip	۲۱۹/۲۵	۱۹۵/۸۸	۱۹۲/۴۳
C2.5-S120×120-Lip	۱۰۵/۹۶	۱۰۳/۱۸	۱۰۱/۸۸
C2.75-S40×40-Lip	۲۷۷/۴۶	۲۷۶/۱۵	۲۷۱/۲۴
C2.75-S80×80-Lip	۲۴۳/۵۰	۲۳۹/۵۷	۲۲۹/۴۱
C2.75-S120×120-Lip	۱۲۹/۲۵	۱۲۵/۱۳	۱۱۹/۱۱
C3-S40×40-Lip	۲۹۹/۴۸	۲۹۹/۷۷	۲۹۸/۶۰
C3-S80×80-Lip	۲۸۶/۰۷	۲۵۳/۸۲	۲۴۸/۹۴
C3-S120×120-Lip	۱۳۸/۴۲	۱۳۶/۲۳	۱۳۱/۶۹

ب) سوراخ‌های مستطیل

نمونه مقطع مدل‌شده	D0	D1	D2
با سوراخ مستطیل با لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-Rec 56.53×28.3 - Lip	۱۷۱/۶۲	۱۶۶/۳۴	۱۶۶/۰۸
C2-Rec 113.12×56.57-Lip	۱۴۵/۹۶	۱۳۸/۱۹	۱۳۱/۷۶
C2-Rec 169.70×84.85-Lip	۸۵/۲۶	۸۶/۲۸	۸۵/۴۵
C2.25-Rec 56.53×28.3-Lip	۲۱۴/۹۳	۲۱۴/۱۹	۲۰۹/۳۵
C2.25-Rec 113.12×56.57-Lip	۱۸۹/۸۷	۱۸۲/۷۸	۱۷۸/۱۸
C2.25-Rec 169.70×84.85-Lip	۱۱۰/۰۶	۱۰۶/۵۸	۹۷/۱۳
C2.5-Rec 56.53×28.3-Lip	۲۵۶/۶۸	۲۵۲/۳۳	۲۵۱/۸۳
C2.5-Rec 113.12×56.57-Lip	۲۳۲/۶۲	۲۰۹/۶۹	۲۰۳/۹۴
C2.5-Rec 169.70×84.85-Lip	۱۲۳/۰۴	۱۲۲/۰۲	۱۱۴/۹۶
C2.75-Rec 56.53×28.3-Lip	۲۸۸/۸۴	۲۸۸/۶۴	۲۸۱/۷۳
C2.75-Rec 113.12×56.57-Lip	۲۵۸/۸۲	۲۵۰/۳۷	۲۴۰/۱۲
C2.75-Rec 169.70×84.85-Lip	۱۴۱/۵۹	۱۳۶/۱۶	۱۳۰/۶۵
C3-Rec 56.53×28.3-Lip	۳۲۰/۷۵	۳۱۶/۷۵	۳۱۳/۴۲
C3-Rec 113.12×56.57-Lip	۲۹۴/۸	۲۶۵/۸۵	۲۶۱/۱۸
C3-Rec 169.70×84.85-Lip	۱۵۵/۹	۱۹۱/۹۱	۱۴۸/۸۹

۲-۳- نتایج تحلیل به روش آنالیز المان محدود

در این بخش، بار نهایی حاصل از نتایج تحلیل روش المان محدود حاصل در جدول (۲) و (۳) آورده شده است. خروجی اصلی مدل‌های آنالیز المان محدود که مبنای آموزش شبکه عصبی و در نهایت بهینه‌سازی قرار گرفت، مقدار بار نهایی P در لحظه گسیختگی مقطع تحت مکانیزم برشی بود. واحد بار نهایی به کیلونیوتن است. نتایج حاصل از روش المان محدود با استفاده از آیین‌نامه سازه‌های فولادی سرد نوردشده [۵۱ و ۵۲] صحت‌سنجی شده است و نتایج قابل قبول به دست آمده است [۲۹]. نتایج به‌عنوان داده‌های لازم برای آموزش و طراحی شبکه عصبی به‌منظور پیش‌بینی تابع هدف استفاده شده است. خروجی‌های به‌دست آمده از شبکه عصبی ساخته‌شده به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

ب) سوراخ‌های مستطیل

نمونه مقطع مدل شده	D0	D1	D2
با سوراخ مستطیل بدون لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-Rec 56.53×28.3	114/08	109/47	102/32
C2-Rec 113.12×56.57	112/81	109/01	100/59
C2-Rec 169.70×84.85	78/56	77/75	74/06
C2.25-Rec 56.53×28.3	153/08	151/98	147/36
C2.25-Rec 113.12×56.57	147/09	142/59	130/11
C2.25-Rec 169.70×84.85	99/65	96/56	91/66
C2.5-Rec 56.53×28.3	189/65	187/26	180/46
C2.5-Rec 113.12×56.57	172/11	169/18	164/5
C2.5-Rec 169.70×84.85	117/22	109/87	107/49
C2.75-Rec 56.53×28.3	216/05	213/96	204/88
C2.75-Rec 113.12×56.57	201/31	197/22	192/77
C2.75-Rec 169.70×84.85	131/89	127/57	117/18
C3-Rec 56.53×28.3	246/85	242/07	225/57
C3-Rec 113.12×56.57	230/15	225/56	209/68
C3-Rec 169.70×84.85	143/84	141/76	128/89

ج) سوراخ‌های دایره

نمونه مقطع مدل شده	D0	D1	D2
با سوراخ دایره بدون لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-Cir 45.2	119/17	119	112/68
C2-Cir 90.4	115/98	110/43	96/36
C2-Cir 135.6	76/94	73/88	73/51
C2.25-Cir 45.2	148/7	147/92	143/24
C2.25-Cir 90.4	136/41	135/74	135/24
C2.25-Cir 135.6	95/57	97/87	89/12
C2.5-Cir 45.2	188/44	186/09	181/55
C2.5-Cir 90.4	173/11	167/28	159/22
C2.5-Cir 135.6	110/27	107/49	106/72
C2.75-Cir 45.2	212/37	211/8	204/12
C2.75-Cir 90.4	198/34	196/34	190/53
C2.75-Cir 135.6	125/25	120/8	112/33
C3-Cir 45.2	242/03	238/2	229/03
C3-Cir 90.4	227/29	215/76	209/68
C3-Cir 135.6	139/73	137/21	130/71

بررسی داده‌های جدول‌های (2) و (3) حاکی از آن است که به‌طور کلی افزایش ضخامت ورق و کاهش ابعاد سوراخ و وجود لبه به افزایش قابل توجه ظرفیت برشی منجر می‌شود. با افزایش فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر، عملکرد بازشو بهتر است و بار

ج) سوراخ‌های دایره

نمونه مقطع مدل شده	D0	D1	D2
با سوراخ دایره با لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-Cir 45.2-Lip	169/17	166/32	158/37
C2-Cir 90.4-Lip	155/54	140/07	133/52
C2-Cir 135.6-Lip	82/07	79/16	81/95
C2.25-Cir 45.2-Lip	216/15	214/36	207/55
C2.25-Cir 90.4-Lip	196/16	187/48	178/12
C2.25-Cir 135.6-Lip	104/21	102/06	95/68
C2.5-Cir 45.2-Lip	258/91	248/12	244/05
C2.5-Cir 90.4-Lip	232/61	208/21	201/18
C2.5-Cir 135.6-Lip	120/54	119/57	115/85
C2.75-Cir 45.2-Lip	289/27	287/13	279/91
C2.75-Cir 90.4-Lip	256	249/11	241/77
C2.75-Cir 135.6-Lip	133/42	133/27	128/44
C3-Cir 45.2-Lip	313/42	306/96	303/82
C3-Cir 90.4-Lip	291/91	263/49	256/68
C3-Cir 135.6-Lip	151/14	148/13	145/95

جدول 3- نتایج مدل‌های آنالیز شده به روش آنالیز المان محدود برای مقاطع بدون لبه

الف) سوراخ‌های مربع

نمونه مقطع مدل شده	D0	D1	D2
با سوراخ مربع بدون لبه	P (kN)	P (kN)	P (kN)
C2-S40×40	138/8	193/09	105/15
C2-S80×80	111/01	108/55	101/40
C2-S120×120	64/39	63/13	58/61
C2.25-S40×40	149/23	146/84	141/67
C2.25-S80×80	133/62	129/41	122/63
C2.25-S120×120	77/96	76/14	71/11
C2.5-S40×40	183/62	181/83	179/24
C2.5-S80×80	170/70	157/00	154/87
C2.5-S120×120	97/36	96/06	92/68
C2.75-S40×40	211/15	210/47	200/45
C2.75-S80×80	197/08	194/74	185/78
C2.75-S120×120	118/25	114/73	109/88
C3-S40×40	231/38	229/83	226/61
C3-S80×80	220/20	214/92	210/82
C3-S120×120	127/97	125/21	119/54

ماکزیم حاصل از آنالیز اجزای محدود، حدود ۴٪ تا ۶٪ افزایش می‌یابد. ظرفیت برشی مستطیل با توجه به کاهش عمق سوراخ حدود ۴٪ بیش‌تر از دایره و دایره ۷٪ بیش‌تر از مربع است.

#### ۴- انتخاب شبکه عصبی مناسب

شبکه عصبی از سه نوع لایه نورونی (لایه ورودی، لایه خروجی و پردازش) تشکیل شده است. هر لایه شامل گروهی از سلول‌های عصبی (نورون) است و با کلیه نورون‌های لایه‌های دیگر در ارتباط است مگر آنکه ارتباط آن‌ها محدود شود. تعداد لایه‌های پردازش (پنهان) در شبکه عصبی و تعداد نورون‌های داخلی هر لایه پارامترهایی هستند که دقت شبکه را تعیین می‌کنند [۵۳].

به منظور امکان مقایسه مستقیم نتایج بین حالات مختلف، چارچوب معماری شبکه عصبی (شامل تعداد لایه‌های پنهان و نورون‌ها) برای تمامی شش مسئله بهینه‌سازی یکسان در نظر گرفته شد. باین حال فرآیند آموزش و وزن‌های نهایی هر شبکه به‌طور مستقل و بر اساس داده‌های مربوط به همان حالت (شکل سوراخ و لبه) انجام پذیرفت. شبکه عصبی طراحی شده، دولا لایه بوده که دارای یک لایه مخفی با تعداد شش نورون و یک لایه خروجی با سه نورون است. نحوه انتخاب آن به وسیله طراحی شبکه‌های عصبی مختلف با تعداد نورون‌های متفاوت با استفاده از روش سعی و خطا طراحی شده است. بیش‌تر کردن لایه‌های مخفی تفاوت زیادی در جواب ایجاد نمی‌کند [۵۴]. شبکه سه‌لایه، اندکی جواب را بهبود می‌بخشد که با توجه به حجم زیاد، بهتر است از شبکه دولا لایه استفاده شود. برای آموزش ورودی‌ها و خروجی‌ها، حداکثر و حداقل مقادیر پارامترها در بازه مدل‌های ساخته شده در آباکوس تعریف شده که در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- حدود تغییرات متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در شبکه عصبی

متغیرها	حدود تغییرات متغیرها در مقاطع با و بدون لبه
ضخامت	$2 < t < 3$
فاصله لبه سوراخ تا تکیه‌گاه	$0 < D < 250$
ابعاد شکل سوراخ مربع	$53/56 < a < 169/70$
ابعاد شکل سوراخ مستطیل	$28/3 < b < 84/85$
ابعاد دایره	$40 < a < 120$
	$45/2 < r < 135/6$

#### ۴-۱- آموزش و طراحی شبکه‌های عصبی

به‌طور کلی تعداد ۲۷۰ نمونه برای ساخت شبکه عصبی استفاده شده است که توسط نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی شده‌اند. تعداد ۲۷۰ نمونه تحلیل عددی، با هدف پوشش کافی فضای طراحی و تأمین حداقل داده لازم برای آموزش مطمئن یک شبکه عصبی با چند پارامتر ورودی (معمولاً ۱۰ برابر تعداد پارامترها) تعیین شد. ۱۳۵ نمونه برای مقاطع با لبه و ۱۳۵ نمونه برای مقاطع بدون لبه استفاده شده است و از ۱۳۵ نمونه، ۴۵ نمونه برای هر کدام از سه شکل سوراخ (مربع، مستطیل و دایره) در نظر گرفته شده است و شش حالت بهینه‌سازی انجام گرفته است. پس از مرتب‌سازی متغیرها، به‌منظور کنترل صحت آموزش شبکه عصبی و جلوگیری از بیش‌بردازش<sup>۱</sup> مجموعه الگوها به‌صورت تصادفی به سه دسته تقسیم شده‌اند، ۷۰ درصد از الگوها برای آموزش<sup>۲</sup> ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی<sup>۳</sup> و ۱۵ درصد از آن‌ها برای آزمایش شبکه عصبی<sup>۴</sup> انتخاب شده‌اند [۵۵ و ۵۶]. پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرها (ابعاد سوراخ، ضخامت مقطع، فاصله سوراخ از تکیه‌گاه) در مقاطع با و بدون لبه و برای هر سه شکل سوراخ به‌صورت ماتریس‌های عددی به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی (سه ورودی) و بر اساس تحلیل مدل‌ها نتایج حاصل از روش المان محدود (بار ماکزیمم) به‌صورت یک خروجی به شبکه عصبی معرفی شده است و خروجی شبکه عصبی بر اساس تحلیل مدل‌ها به‌عنوان تابع هدف انتخاب شدند. معیار میانگین توان دوم خطاها (MSE) و مقدار رگرسیون<sup>۵</sup> به‌عنوان شاخص‌های انتخاب شبکه نهایی هستند. همچنین در بهینه‌سازی به‌روش الگوریتم ژنتیک، معادله جرم تیر تعریف شد و در نهایت با استفاده از بررسی‌های پارامتری، ابعاد متغیرهای مقاطع بهینه، مقاومت نهایی تیرها و جرم مقاطع مورد نظر ارائه شده است.

#### ۴-۲- پیش‌بینی تابع هدف با استفاده از شبکه عصبی

تابع هدف بار ماکزیمم در رابطه‌های (۶) الی (۸) آورده شده است.

$$\text{Max}(V1) = F(t_i, r_i, d_i) \quad (6)$$

$$\text{Max}(V2) = F(t_j, a_j, d_j) \quad (7)$$

$$\text{Max}(V3) = F(t_k, a_k, b_k, d_k) \quad (8)$$

<sup>1</sup> Overfitting

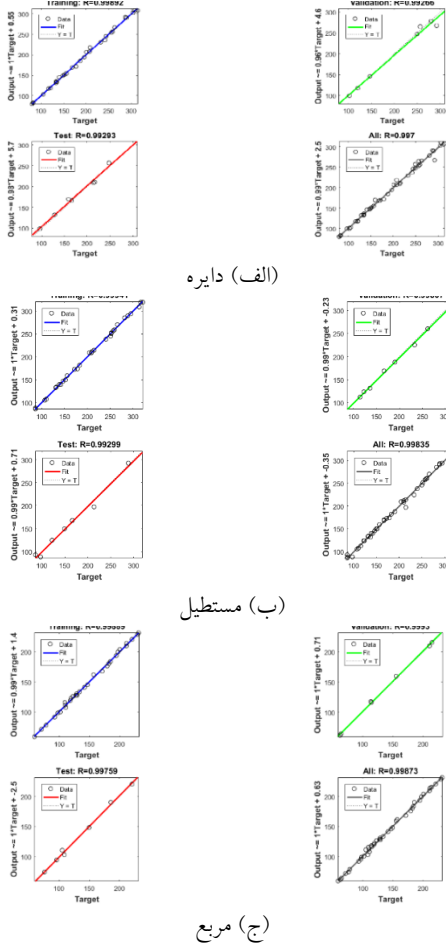
<sup>2</sup> train

<sup>3</sup> validation

<sup>4</sup> test

<sup>5</sup> Regression (R)



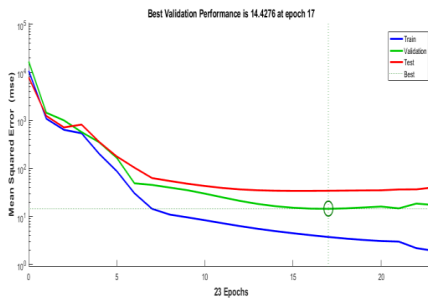


الف) دایره

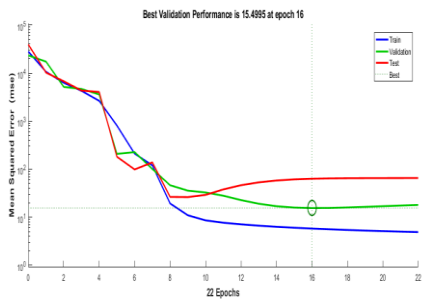
ب) مستطیل

ج) مربع

شکل ۵- رگرسیون مربوط به اعتبارسنجی، آموزش و آزمون شبکه عصبی منتخب برای مقاطع با لبه با شکل سوراخ‌های دایره، مستطیل و مربع



الف) دایره



ب) مستطیل

هرکدام از توابع دارای سه متغیر هستند. در رابطه (۶) برای دایره متغیرهای تابع هدف، ضخامت ورق مقطع،  $(t_i)$  شعاع دایره و  $(d_i)$  فاصله لبه سوراخ از تکیه‌گاه است. در رابطه (۷) برای مربع متغیرهای تابع هدف، ضخامت مقطع،  $(a_i)$  ضلع مربع و  $(d_i)$  فاصله لبه سوراخ از تکیه‌گاه است. در رابطه (۸) برای مستطیل متغیرهای تابع هدف، ضخامت مقطع،  $(a_k b_k)$  طول و عرض مستطیل و  $(d_k)$  فاصله لبه سوراخ از تکیه‌گاه است (برحسب میلی‌متر). تابع هدف جرم در رابطه (۹) آورده شده است که دارای چهار متغیر ارتفاع جان  $(h)$ ، طول بال  $(l)$ ، ضخامت  $(t)$  و در مقاطع لبه‌دار،  $(b)$  طول لبه است (برحسب میلی‌متر) که از معادله‌های (۱۰) الی (۱۲) محاسبه شده است. چگالی فولاد  $(\rho)$  ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.  $(A_j)$  مساحت ورق فولاد بر حسب میلی‌مترمربع و  $(l_j)$  طول تیر بر حسب میلی‌متر است.

$$\text{Min}(\text{mass}) = G(h, l, t, b) \quad (9)$$

$$W = \sum_{j=1}^m \rho A_j l_j \quad (10)$$

$$V = [(((h \times t + 2 \times l \times t + (2 \times 19 \times t \times b)) \times 1000) \times 2) - (\text{hole\_area} \times 4 \times t) / 1e9 \quad (11)$$

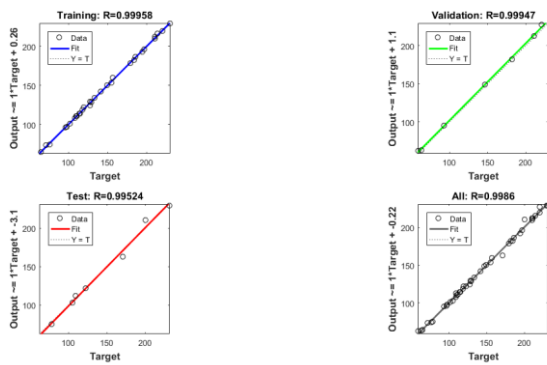
$$\text{mass} = v \times 7850 \quad (12)$$

در روابط بالا  $(V)$  حجم تیر فولادی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر بدون نظرگرفتن سوراخ است که واحدش بر حسب میلی‌مترمربع است.

### ۳-۴- اعتبارسنجی تابع هدف با استفاده از شبکه عصبی و

#### نتایج نمودارهای شبکه عصبی منتخب

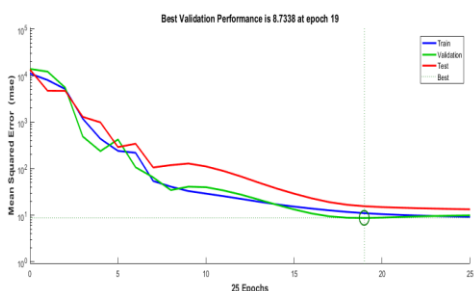
رگرسیون و نتایج خطای شبکه عصبی منتخب با روش میانگین توان دوم خطاها مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش برای شکل‌های با سوراخ‌های مربع، مستطیل و دایره برای مقاطع با و بدون لبه در شکل‌های (۵) و (۷) نشان داده شده است [۵۷]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای نمودارهای منتخب شبکه عصبی، برای مقاطع با سوراخ با لبه برای شکل سوراخ دایره، مستطیل و مربع، بهترین نتیجه شبکه عصبی به ترتیب در تکرار ۱۷، ۱۶ و ۱۱ اتفاق افتاد و برای مقاطع بدون لبه بهترین نتیجه شبکه عصبی به ترتیب در تکرار ۱۷، ۱۹ و ۱۰ اتفاق افتاد. اگرچه بعد از آن خطای آموزش کمتر شده ولی چون اعتبارسنجی به خطای بیش‌تری رسیده، پدیده بیش‌برازش اتفاق افتاده است.



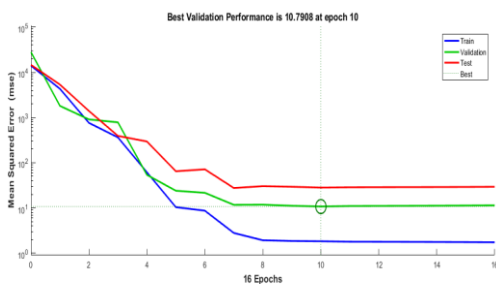
(ج) مربع

شکل ۷- رگرسیون مربوط به اعتبارسنجی، آموزش و آزمون شبکه عصبی منتخب برای مقاطع بدون لبه با شکل سوراخ‌های دایره،

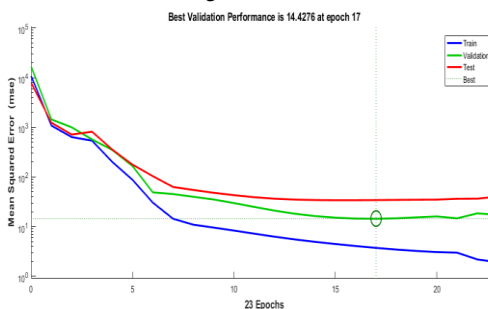
مستطیل و مربع



(الف) دایره



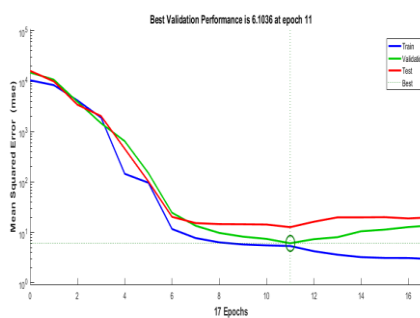
(ب) مستطیل



(ج) مربع

شکل ۸- میانگین مربع خطاها برای اعتبارسنجی، آموزش و آزمون شبکه عصبی منتخب مقاطع بدون لبه با شکل سوراخ‌های دایره،

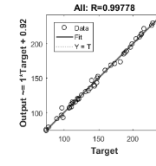
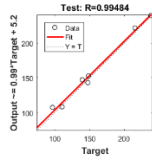
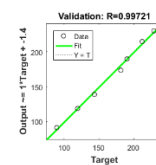
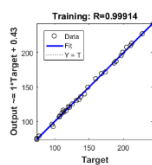
مستطیل و مربع



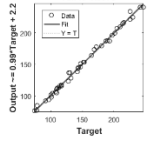
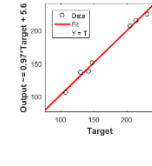
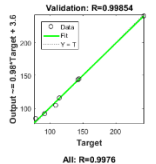
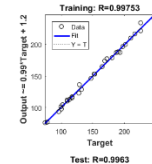
(ج) مربع

شکل ۶- میانگین مربع خطاها برای اعتبارسنجی، آموزش و آزمون شبکه عصبی منتخب مقاطع با لبه با شکل سوراخ‌های دایره، مستطیل و مربع

شبکه عصبی نهایی بر مبنای دو معیار اصلی دستیابی به کم‌ترین مقدار خطای میانگین مربعات در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی<sup>۱</sup> برای جلوگیری از بیش‌برازش و حصول ضریب همبستگی R بسیار نزدیک به یک (بیش از ۰٫۹۹) در هر سه مجموعه آموزش، اعتبارسنجی و آزمون انتخاب شد؛ همچنین در شکل‌های (۶) و (۸)، عدد رگرسیون با عدد تقریبی بزرگ‌تر از ۰٫۹۹ مربوط به اعتبارسنجی، آموزش و آزمون شبکه عصبی منتخب برای نمودار بار و جرم تخمین زده و با بار و جرم واقعی مقایسه شده‌اند. این نمودار با تقریب بسیار خوب و خطای کم‌تر از ۰٫۰۱ درصد و با توجه به اعداد رگرسیون نشان‌داده‌شده در شکل به‌دست آمده است و موفقیت شبکه عصبی در این مدل‌سازی را خط  $Y=T$  تأیید می‌کند.



(الف) دایره



(ب) مستطیل

<sup>1</sup> Validation



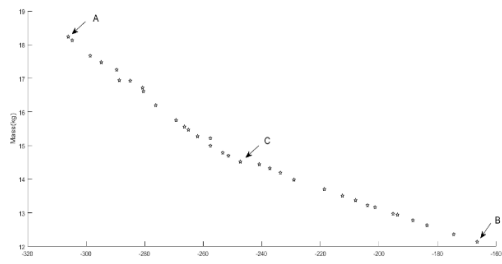
## ۵- بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

در این مقاله برای بهینه‌سازی تیرهای با سوراخ‌شدگی جان از روش مناسب بهینه‌سازی چندهدفه هوشمند و روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به شکل مقطع بهینه سوراخ تیر با متغیرهای مختلف، استفاده شده است [۵۸-۶۱]. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، داده‌های لازم برای آموزش شبکه عصبی با استفاده از روش المان محدود محاسبه شده و از شبکه عصبی برای پیش‌بینی تابع هدف استفاده شده است؛ سپس با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مقاطع بهینه با در نظر گرفتن قیود مسئله عنوان شده، به دست آمده است [۶۲]. شبکه عصبی آموزش دیده به عنوان یک تابع جایگزین دقیق و کم‌هزینه، جایگزین فراخوانی‌های مکرر و زمان‌بر تحلیل المان محدود می‌شود و به جای اجرای تحلیل کامل المان محدود، تنها با ارسال این پارامترها به ورودی شبکه عصبی، مقدار تابع هدف (بار نهایی) را در کسری از ثانیه دریافت می‌کند. این امر، فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه را به‌طور چشمگیری تسریع می‌نماید. این روش می‌تواند برای هر سه شکل سوراخ در مقاطع با و بدون لبه هم‌زمان همه متغیرها (ضخامت مقطع، ابعاد سوراخ، فاصله سوراخ از تکیه‌گاه، شکل سوراخ و مقاطع با و بدون لبه) را بهینه‌سازی کند و به‌ازای مقادیر بهینه، بار ماکزیمم و جرم مینیمم مقطع تیر به دست آید. به همین دلیل با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل، بهینه‌سازی دوهدفه در این خصوص به‌کار گرفته شده است. محاسبه نمودار پارتو در الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه برای یافتن پارامترهای بهینه تیر است و تمام نقاط بهینه با توجه به تابع هدف به طراح ارائه می‌شود تا بسته به نیاز خود انتخاب نماید [۶۲].

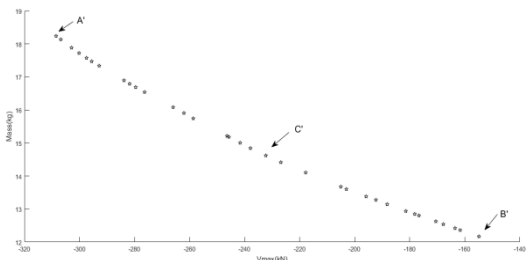
### ۵-۱- نتایج بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

در این بخش تابع هدف به دست آمده، درون الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. تیرهای مورد مطالعه تحت بهینه‌سازی دوهدفه برای دست‌یابی هم‌زمان به بیش‌ترین مقدار بار ماکزیمم و کم‌ترین مقدار وزن قرار گرفته‌اند. در واقع با برقراری ارتباط میان کد نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> و الگوریتم ژنتیک، تحلیل صورت گرفته است و این روند تا زمان رسیدن به انتهای بهینه‌سازی ادامه خواهد یافت. در پایان بهینه‌سازی، نتایج نمودار پارتویی حاصل از بهینه‌سازی برای مقاطع با و بدون لبه برای سه شکل مختلف سوراخ در شکل‌های (۹) و (۱۰) قابل مشاهده است. تمامی نقاط نمودار پارتویی به دست آمده، نقاط طراحی بهینه هستند که کاربر بنا بر

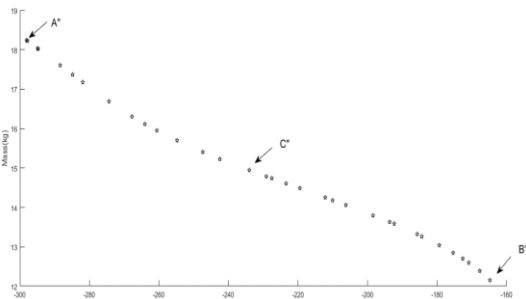
میزان هدف مورد نظر می‌تواند از هر کدام از مقادیر در نمودار استفاده نماید [۶۲]. در میان نقاط پارتو، نقاط ابتدا، انتها و وسط نمودار به دلیل اهمیت مقدار هدف، مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد و مقادیر بهینه هر کدام از سه نقطه مورد نظر در جدول (۶) ارائه شده است. قابل ذکر است بهینه‌سازی در چند مرحله انجام شده و نمودار مقادیر بهینه برای ابعاد سوراخ با بُعد کوچک‌تر در این مقاله آورده شده است. در انتها برای تأیید نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک، مدل تیر مورد نظر با ابعاد بهینه به دست آمده با روش المان محدود مدل شده است و نتایج قابل قبولی به دست آمده است.



شکل ۹- نمودار پارتو تیر با لبه دارای شکل سوراخ الف) دایره



شکل ۹- نمودار پارتو تیر با لبه دارای شکل سوراخ ب) مستطیل



شکل ۹- نمودار پارتو تیر با لبه دارای شکل سوراخ ج) مربع

شکل ۹- نمودار پارتو تیر با لبه دارای شکل سوراخ الف) دایره، ب) مستطیل، ج) مربع

نقاط A'A'A در مقاطع با لبه و D'D'D در مقاطع بدون لبه از دید تابع هدف اول یا همان مقدار بار، بیش‌ترین مقدار را دارد؛ ولی از دید تابع هدف دوم نسبت به نقاط دیگر مطلوب نیست. نقاط B'B'B در مقاطع با لبه و نقاط E'E', E'' در مقاطع بدون لبه از دید تابع هدف دوم یعنی جرم مینیمم بهترین نقطه طراحی

<sup>1</sup> MATLAB Software

و "D"، "E" و "F" برای شکل سوراخ بهینه مربع، به دلیل اهمیت مقدار هدف یعنی جرم مینیمم و بار ماکزیمم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از دید مهندسی، شیب تند ابتدای منحنی‌های پارتو، حاکی از آن است که با افزایش جرم در محدوده مقاطع سبک، مقاومت به سرعت افزایش می‌یابد. در مقابل، بخش میانی کم‌شیب منحنی نشان‌دهنده منطقه‌ای است که افزایش وزن، سود چندانی در افزایش مقاومت ندارد، بنابراین نقطه بهینه توأم مانند نقطه C در این ناحیه قرار می‌گیرد. این نکته در طراحی اقتصادی سازه‌های سبک از اهمیت بالایی برخوردار است.

#### ۶- اعتبارسنجی مقادیر بار نهایی مقاطع بهینه با استفاده از

##### روش آنالیز المان محدود

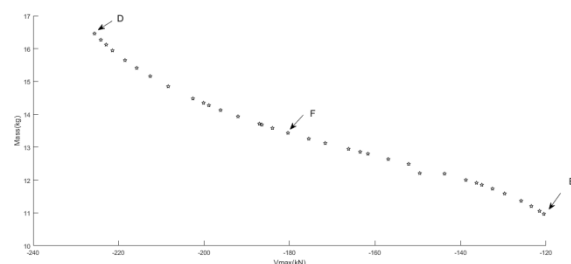
در این بخش اعتبارسنجی مقادیر بار نهایی مقاطع بهینه محاسبه شده با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و به‌کارگیری روش آنالیز المان محدود انجام شده است و نتایج در جدول (۵) آورده شده است.

#### جدول ۵- مقادیر بهینه‌سازی برای نقاط مشخص شده و مقایسه ظرفیت

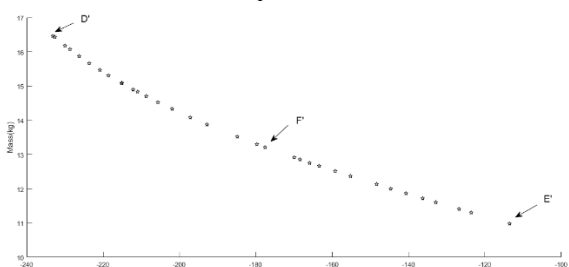
ماکزیمم مقطع بهینه با آنالیز المان محدود

نقطه بهینه	ظرفیت بهینه	آنالیز المان محدود برای مقطع بهینه (kN)	درصد اختلاف بار نهایی حاصل از نتایج الگوریتم ژنتیک و آنالیز المان محدود	ظرفیت حاصل از آنالیز المان محدود	A	B	C	A'	B'	C'	A''	B''	C''	D	E	F	D'	E'	F'	D''	E''	F''																			
	۳۰۶/۰۵	۳۰۲/۵۵	۱/۲۶	۳۰۲/۵۵	A	۱۶۶/۵۴	۱۶۴/۲۳	٪۱/۴	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۳۱۵/۴	۳۰۸/۲۲	۲/۳۳	۳۰۸/۲۲	A'	۱۶۶/۵۴	۱۶۴/۲۳	٪۱/۴	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۳۱۵/۴	۳۰۸/۲۲	۲/۳۳	۳۰۸/۲۲	A'	۱۶۶/۵۴	۱۶۴/۲۳	٪۱/۴	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۲۹۸/۱	۲۹۵/۰۳	۱/۰۴	۲۹۵/۰۳	A''	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۳۰/۲	C''	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۲۳۴/۴۳	D	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۱۱۷/۱۳	E	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۱۷۷/۱۸	F	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۲۲۵/۵۴	D'	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۸۶/۵۰	۸۱/۱۷	۱/۳۴	۸۱/۱۷	E'	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۶۷/۶۶	۱۶۰/۵۳	۴/۱۸	۱۶۰/۵۳	F'	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۹۴/۱۴	۱۹۰/۲۲	۲/۰۶	۱۹۰/۲۲	D''	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۳۱/۱	۱۲۷/۷۶	۲/۶۱	۱۲۷/۷۶	E''	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹
	۱۶۳/۰۹	۱۵۹/۱۱	۲/۵۰	۱۵۹/۱۱	F''	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۵۶/۹	۱۵۳/۰۲	۲/۵	۱۶۴/۸	۱۶۲/۱۱	۱/۶۵	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹	۲۲۵/۶	۲۳۴/۴۳	۳/۹۱	۱۲۰/۶	۱۱۷/۱۳	۲/۹۶	۲۴۲/۹۶	۲۲۵/۵۴	۲/۰۴	۱۸۰/۳۸	۱۷۷/۱۸	۱/۸۰	۲۳۴/۱	۲۳۰/۲	۱/۶۹

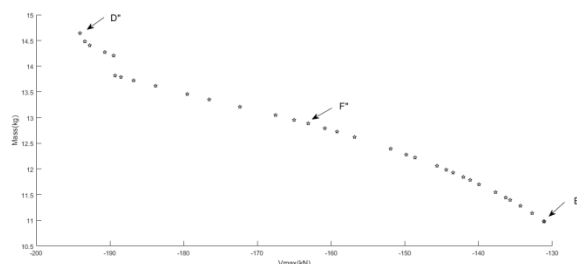
محسوب می‌شود اما از طرف دیگر میزان بار بسیار کمی را به خود اختصاص داده است. هرکدام از این نقاط را می‌توان به‌عنوان جواب تک‌هدفه به‌ترتیب برای تابع هدف بار ماکزیمم و تابع هدف وزن مینیمم در نظر گرفت.



دایره (الف)



مستطیل (ب)



مربع (ج)

#### شکل ۱۰- نمودار پارتو برای تیرهای بدون لبه دارای شکل سوراخ

(الف) دایره، (ب) مستطیل، (ج) مربع

مشخصات توابع دوهدفه که در تضاد با یکدیگرند باید هم‌زمان توسط طراح، بهینه شوند. کاهش یک تابع هدف منجر به افزایش تابع هدف دیگر می‌شود و بالعکس [۶۲ و ۶۳]. در این تحقیق، نقطه طراحی C' C' C' و F' F' F' که در ناحیه وسط منحنی قرار دارد را می‌توان نقطه طراحی بهینه دوهدفه با کم‌ترین وزن و بیش‌ترین بار در نظر گرفت. الگوریتم‌های بهینه‌ساز به‌سوی مینیمم‌ساختن پیش می‌روند، اما در این تحقیق، در تابع هدف اول، هدف ماکزیمم‌شدن بار است. به همین علت، تابع هدف اول در منفی ضرب شده است [۶۳]. در میان نقاط پارتو برای مقاطع با لبه، نقاط A و B و C برای شکل سوراخ بهینه دایره، A' و B' و C' برای شکل سوراخ بهینه مستطیل و A'' و B'' و C'' برای شکل سوراخ بهینه مربع و برای مقاطع بدون لبه D و E و F برای شکل سوراخ بهینه دایره، D' و E' و F' برای شکل سوراخ بهینه مستطیل

نتایج نشان می‌دهد درصد اختلاف بار نهایی حاصل از آنالیز المان محدود و الگوریتم ژنتیک حداکثر ۴/۱۸ است که قابل قبول است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

هدف مطالعه اخیر، روش بهینه‌سازی دوهدفه بار ماکزیمم و جرم مینیمم تیر با مقطع I ساخته‌شده از دوپل C شکل فولاد سرد نوردشده با متغیرهای ضخامت مقطع تیر، شکل و ابعاد سوراخ تیر، فاصله سوراخ از تکیه‌گاه در مقاطع با و بدون لبه تحت بارگذاری متمرکز است که در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی صورت گرفت. فرایندهای آموزشی و آزمایشی بین خروجی‌های مدل از طریق شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. شبکه حاصل به‌عنوان تابع هدف برای یافتن مقادیر بهینه در نظر گرفته شد و با استفاده از روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انجام شد و در انتها مقادیر بهینه به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار آباکوس مقایسه و تطابق خوبی ایجاد شد. نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه و اجرای یک چارچوب ترکیبی کامل متشکل از تحلیل المان محدود غیرخطی (برای تولید داده معتبر)، شبکه عصبی مصنوعی (به‌عنوان مدل جایگزین سریع) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای ایجاد مجموعه جواب‌های بهینه پارتو برای بهینه‌سازی هم‌زمان مقاومت برشی و وزن تیرهای سرد نوردشده با بازشوهای جان است. این چارچوب، مشکل زمان‌بر بودن بهینه‌سازی مستقیم با آنالیز المان محدود را مرتفع ساخته و مجموعه‌ای از طرح‌های بهینه را به‌جای یک طرح واحد ارائه می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی به‌صورت زیر است:

- در این مقاله، شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی بارهای نهایی ارائه شده است. شبکه‌های عصبی منتخب برای محاسبه تابع هدف تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند و از دقت معادلات طراحی موجود فراتر رفتند.

- نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی به‌روش ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی از کارایی بالایی در ارائه طرح‌های بهینه برخوردار است. مقاطع بهینه به‌دست‌آمده از تابع دوهدفه در مورد شکل سوراخ در مقاطع با و بدون لبه در ضخامت، ابعاد و فاصله سوراخ از تکیه‌گاه به‌گونه‌ای است که کاهش بار موجب افزایش جرم و افزایش جرم، کاهش بار را به‌دنبال دارد. کاربرد عملی نتایج این تحقیق، ارائه یک ابزار تصمیم‌گیری به مهندسان طراح است. در نهایت طراح می‌تواند بسته به الزامات طراحی و نیاز، نقطه‌ای را از نمودار پارتو انتخاب کند که به‌طور هم‌زمان بهترین موقعیت را فراهم و به تصمیم‌گیری‌های سازنده در رسیدن به هدف کمک نماید.

درحقیقت با استفاده از نمودارهای پارتوی تولیدشده و جدول مقادیر بهینه، مهندس می‌تواند بسته به اولویت پروژه (حداکثر مقاومت، حداقل وزن، یا توازن بین آن دو)، مشخصات بهینه سوراخ (شکل، ابعاد، محل) و ضخامت ورق را برای تیرهای CFS با بازشوی جان به‌سرعت تعیین نماید.

- نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان می‌دهد در جان‌های سوراخ‌دار، در همه شکل‌های سوراخ و در مقاطع با و بدون لبه، سوراخ‌های کوچک‌تر با افزایش ضخامت می‌توانند مقاطع بهینه‌ای برای تیرهای موردنظر باشند.

- مقایسه نتایج بار ماکزیمم مقاطع بهینه با متغیرهای مشخص‌شده حاصل از روش بهینه‌سازی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک با روش اجزای محدود نشان می‌دهد که درصد اختلاف حداکثر برابر ۴/۱۸ درصد است و از تطابق خوبی برخوردار است.

#### ۸- محدودیت‌ها و تحقیقات آینده

این مطالعه بر رفتار برشی متمرکز بود و برهم‌کنش با خمش یا پیچش بررسی نشد. شرایط تکیه‌گاهی ساده‌شده‌ای در نظر گرفته شد. اثرات خستگی و رفتار در برابر آتش مورد مطالعه قرار نگرفت. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این محدودیت‌ها مورد توجه قرار گیرد.

- sections", *Journal of Constructional Steel Research*, 197, pp.107460.
- [14] Chen, B., Roy, K., Fang, Z., Uzzaman, A., Pham, C.H., Raftery, G.M., and Lim, J.B.P. (2022), "Shear capacity of cold-formed steel channels with edge-stiffened web holes, unstiffened web holes, and plain webs", *Journal of Structural Engineering*, 148(9), pp.04022129.
- [15] Sönmez, M., and Komur, M.A. (2010), "Using FEM and artificial networks to predict elastic buckling load of perforated rectangular plates under linearly varying in-plane normal load", *Structural Engineering and Mechanics*, 34(2), pp.159-174.
- [16] Keerthan, P., and Mahendran, M. (2011), "Shear behavior and strength of Lite steel beams with web openings", *Advances in Structural Engineering*, 14(2), pp.171-184.
- [17] Li, Z., Leng, J., Guest, J.K., and Schafer, B.W. (2016), "Two-level optimization for a new family of cold-formed steel lipped channel sections against local and distortional buckling", *Thin-Walled Structures*, 108, pp.64-74.
- [18] Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., and Clifton, G.C. (2017), "Cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition-Part I: Tests and finite element model validation", *Thin-Walled Structures*, 116, pp.333-341.
- [19] Yousefi, A.M., Lim, J.B.P., Uzzaman, A., Lian, Y., Clifton, G.C., and Young, B. (2017), Design of cold-formed stainless steel lipped channel sections with web openings subjected to web crippling under end-one-flange loading condition", *Advances in Structural Engineering*, 20(7), pp.1024-1045.
- [20] Pham, S.H., Pham, C.H., and Hancock, G.J. (2017), "On the design of cold-formed steel beams with holes in shear using the direct strength method", In *EUROSTEEL*, pp.1590-1599.
- [21] Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Shyha, I., Tsavdaridis, K.D., and Corradi, M. (2020), "Optimal design of cold-formed steel lipped channel beams: Combined bending, shear, and web crippling", *Structures*, 28, pp.825-836.
- [22] Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Tsavdaridis, K.D., Degtyareva, N., and Nagaratnam, B. (2019), "Optimised and slotted cold-formed steel channels: A solution for modular building systems", 10th International Conference on Structural Engineering and Construction Management.
- [23] Degtyareva, N., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Shyha, I., and McIntosh, A. (2020), "Local buckling strength and design of cold-formed steel beams with slotted perforations", *Thin-Walled Structures*, 156, pp.106951.
- [24] Pham, C.H., and Hancock, G.J. (2020), "Shear tests and design of cold-formed steel channels with central square holes", *Journal of Structural Engineering*, 146(4), pp.04019173.
- [25] Taheri, E., Fard, S.E., Zandi, Y., and Samali, B. (2021), "Experimental and numerical investigation
- [1] Adeli, H., and Karim, A. (1997), "Neural network model for optimization of cold-formed steel beams", *Journal of Structural Engineering*, 123(11), pp.1535-1543.
- [2] Wanniarachchi, K.S., Mahendran, M., and Keerthan, P. (2017), "Shear behavior and design of lipped channel beams with non-circular web openings", *Thin-Walled Structures*, 119, pp.83-102.
- [3] Pham, S.H., Pham, C.H., and Hancock, G.J. (2017), "Review of direct strength method of design for cold-formed steel structures with holes with a focus on shear", *Congrès International de Géotechnique-Ouvrages-Structures*, pp.954-963.
- [4] Mojtabaei, S.M., Kabir, M.Z., Hajirasouliha, I., and Kargar, M. (2018), "Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 143, pp.18-31.
- [5] Zhao, J., Sun, K., Yu, C., and Wang, J. (2019), "Tests and direct strength design on cold-formed steel channel beams with web holes", *Engineering Structures*, 184, pp.434-446.
- [6] Chen, B., Roy, K., Uzzaman, A., Raftery, G., Nash, D., Clifton, G., Pouladi, P., and Lim, J. (2019), "Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold-formed steel channel sections under compression", *Thin-Walled Structures*, 144, pp.106307.
- [7] Yu, N., Kim, B., Yuan, W., Li, L., and Yu, F. (2019), "An analytical solution of distortional buckling resistance of cold-formed steel channel-section beams with web openings", *Thin-Walled Structures*, 135, pp.446-452.
- [8] Horacek, M., Melcher, J., Balazs, I., and Pesek, O. (2019), "On problem of torsional characteristics of thin-walled steel beams with web openings", *Materials Science and Engineering*, 471, pp.052040.
- [9] Yu, N., Kim, B., Huang, X., Yuan, W., Ye, R., Wu, L., and Lea, J. (2021), "Analytical solution for flange/web distortional buckling of cold-formed steel beams with circular web perforations", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(6), pp.3463-3473.
- [10] Shaker, F.M.F., Mamdooh, Z., Deifalla, A., and Yehia, M.M. (2022), "Experimental investigations of the behavior of stiffened perforated cold-formed steel sections subjected to axial compression", *Buildings*, 12(6), pp.812.
- [11] Živaljević, V., Jovanović, Đ., Kovačević, D., and Džolev, I. (2022), "The influence of web holes on the behavior of cold-formed steel members: A review", *Buildings*, 12(8), pp.1091.
- [12] Zhao, J., Liu, J., Yu, C., and Zhang, W. (2022), "Test investigation and direct strength method on cold-formed steel compression members with web holes of different widths", *Engineering Structures*, 272, pp.114979.
- [13] Zhong, Y., Liu, Y., and Feng, R. (2022), "A two-level optimization framework for new family of CFS

- [39] Gao, H., Pan, Z., Zhu, W., Li, X., Chen, Y., and Wang, Q. (2025), "Seismic performance of cold-formed thin-walled steel-composite shear wall with double-layer inclined slots and stiffeners", *International Journal of Civil Engineering*, 23(8), pp.1075-1094.
- [40] El-Taly, B., and El-Shami, M. (2021), "Structural performance of cold-formed steel face-to-face and back-to-back beams", *International Journal of Civil Engineering*, 19(12), pp.1427-1444.
- [41] Yadav, N., Yadav, A., and Kumar, M. (2015), "History of neural networks", In *An Introduction to Neural Network Methods for Differential Equations*, pp.13-15.
- [42] Schmidhuber, J. (2015), "Deep learning in neural networks: An overview", *Neural Networks*, 61, pp.85-117.
- [43] El-Kassas, E.M.A., Mackie, R.I., and El-Sheikh, A.I. (2001), "Using neural networks in cold-formed steel design", *Computers and Structures*, 79(18), pp.1687-1696.
- [44] Tashakori, A., and Adeli, H. (2002), "Optimum design of cold-formed steel space structures using neural dynamics model", *Journal of Constructional Steel Research*, 58(12), pp.1545-1566.
- [45] Guzelbey, I.H., Cevik, A., and Erklig, A. (2006), "Prediction of web crippling strength of cold-formed steel sheetings using neural networks", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(10), pp.962-973.
- [46] Pala, M., and Caglar, N. (2007), "A parametric study for distortional buckling stress on cold-formed steel using a neural network", *Journal of Constructional Steel Research*, 63(5), pp.686-691.
- [47] Moradi, M.S.S., Azadi, M., and Jahanian, H. (2022), "Multi-objective optimization of tunnel parameters inside a liquefied sand lens under seismic loads", *Geotechnical Research*, 9(4), pp.196-211.
- [48] Toffolo, A., and Benini, E. (2003), "Genetic diversity as an objective in multi-objective evolutionary algorithms", *Evolutionary Computation*, 11(2), pp.151-167.
- [49] Pareto, V. (1964), "Cours d'économie politique", 1, Librairie Droz.
- [50] Singh, R., and Samanta, A. (2022), "Numerical finite element simulation and structural behaviour of cold-formed steel members", *Materials Today: Proceedings*, 65(8), pp.3300-3305.
- [51] Yu, W.W., LaBoube, R.A., and Chen, H. (2019), "Cold-formed steel design", John Wiley and Sons.
- [52] American Iron and Steel Institute (AISI). (2022), North American specification for the design of cold-formed steel structural members (AISI S100-16).
- [53] Gurney, K. (2018), "An introduction to neural networks", CRC Press.
- [54] Demuth, H.B., Beale, M.H., De Jess, O., and Hagan, M.T. (2014), "Neural network design", Martin Hagan.
- of an innovative method for strengthening cold-formed steel profiles in bending", *Applied Sciences*, 11(11), pp.5242.
- [26] Zhong, Y., Liu, Y., and Feng, R. (2022), "A two-level optimization framework for new family of CFS sections", *Journal of Constructional Steel Research*, 197, pp.107460.
- [27] Neves, M., Basaglia, C., and Camotim, D. (2022), "Stiffening optimization of conventional cold-formed steel cross sections based on a multi-objective genetic algorithm and using generalized beam theory", *Thin-Walled Structures*, 179, pp.109713.
- [28] Qadir, S.J., Nguyen, V.B., and Hajirasouliha, I. (2024), "Design optimisation for CFS beam sections with web and flange stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, 213, pp.108375.
- [29] Hosseini, N., Parastesh, H., Haji Rasouliha, I., and Mojtabaei, S.M., (2024), "Parametric Study of Shear Capacity of Double Sections of Cold Formed Steel with Hole", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(12), pp.108-126.
- [30] Pham, N.H., (2023), "Investigation of Web Hole Effects on Capacities of Cold-Formed Steel Channel Members", *Shuren Wang Jingan Li Kui Hu*, pp.161.
- [31] Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Gunalan, S., Shyha, I., Tsavdaridis, K.D., and Corradi, M. (2020), "Optimal design of cold-formed steel lipped channel beams: Combined bending, shear, and web crippling", *Structures*, 28, pp.825-836.
- [32] Yu, C. (2012), "Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: Behavior, optimization, and design", *Journal of Constructional Steel Research*, 71, pp.210-218.
- [33] Dai, Y., Fang, Z., Roy, K., Raftery, G.M., and Lim, J.B.P. (2023), "Optimal design of cold-formed steel face-to-face built-up columns through deep belief network and genetic algorithm", *Structures*, 56, pp.104906.
- [34] Yin, H., Xiao, Y., Wen, G., Qing, Q., and Deng, Y. (2015), "Multiobjective optimization for foam-filled multi-cell thin-walled structures under lateral impact", *Thin-Walled Structures*, 94, pp.1-12.
- [35] Madeira, J.F.A., Dias, J., and Silvestre, N. (2015), "Multiobjective optimization of cold-formed steel columns", *Thin-Walled Structures*, 96, pp.29-38.
- [36] Srinivas, N., and Deb, K. (1994), "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, 2(3), pp.221-248.
- [37] Atashkari, K., Nariman-Zadeh, N., Jamali, A., and Pilechi, A. (2005), "Thermodynamic Pareto optimization of turbojet using multi-objective genetic algorithm", *International Journal of Thermal Sciences*, 44(11), pp.1061-1071.
- [38] Qazani, M.R.C., Bidabadi, B.S., Asadi, H., Nahavandi, S., and Bidabadi, F.S. (2023), "Multiobjective optimization of roll-forming procedure using NSGA-II and type-2 fuzzy neural network", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 21(3), pp.3842-3851.



- [55] Kaveh, A., and Khavaninzadeh, N. (2023), "Hybrid ECBO-ANN algorithm for shear strength of partially grouted masonry walls", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(4), pp.1176-1187.
- [56] Lagaros, N.D. (2023), "Artificial neural networks applied in civil engineering", *Applied Sciences*, 13(3), pp.1131.
- [57] Waszczyszyn, Z. (2011), "Artificial neural networks in civil engineering: Another five years of research in Poland", *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 18, pp.131-146.
- [58] Guenin, B., Könemann, J., and Tuncel, L. (2022), "Practical optimization: A gentle introduction", Cambridge University Press.
- [59] Leng, J. (2024), "Optimization techniques for structural design of cold-formed steel structures", In *Recent Trends in Cold-formed Steel Construction*, pp.215-238.
- [60] André, J., Siarry, P., and Dognon, T. (2001), "An improvement of the standard genetic algorithm fighting premature convergence in continuous optimization", *Advances in Engineering Software*, 32, pp.49-60.
- [61] Nariman-Zadeh, N., Atashkari, K., Jamali, A., Pilechi, A., and Yao, X. (2005), "Inverse modeling of multi-objective thermodynamically optimized turbojet engine using GMDH-type neural networks and evolutionary algorithms", *Engineering Optimization*, 37(2), pp.437-462.
- [62] Liu, B., Yu, M., Liu, Y., Chen, W., Fang, Z., and Lim, J.B.P. (2024), "Fire resistance time prediction and optimization of cold-formed steel walls based on machine learning", *Thin-Walled Structures*, 203, pp.112207.
- [63] Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., and Li, W. (2009), "Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures", *Materials and Design*, 30(6), pp.2024-2032.