

## Parametric Study of Shear Capacity of Double Sections of Cold Formed Steel with Hole

Nastaran Hosseinjani<sup>1</sup>, Hossein Parastesh<sup>2\*</sup>, Iman Haji Rasouliha<sup>3</sup>, Seyed Mohammad Mojtabaei<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

2- Associate Professor, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

3- Professor, dept. of Civil Engineering, University of Sheffield, Sheffield, England

4- Assistant Professor, dept. of Civil Engineering, University of Sheffield, Sheffield, England

### ABSTRACT

The purpose of current research is to evaluate the shear behavior of I-section beams made of double C-shaped of cold formed steel, considering the opening in web for the passage of mechanical and electrical infrastructure. Due to the weak shear resistance caused by hole in web, the shear capacity and bearing capacity of the beam section is greatly reduced. The size, shape and arrangement holes are effective in the bearing capacity and final strength of the beam section. using the finite element method, the steel beam with length of 1000 mm has been investigated under the effect of a concentrated load in the middle of the span. variable parameters are sheet thickness, dimensions hole, shape hole, hole distances from the support, and the presence of edge in the section wing, which has been subjected to nonlinear static analysis of an additional load concentrated in middle of the beam. For checking the accuracy, the analysis results, the shear strength of the analytical models compared with the shear strength calculated from direct strength method (DSM) of the AISI. The results showed that in sections with equivalent areas and different hole shapes, with increase of hole depth, the final capacity decreases in rectangular, circular and square holes, respectively; The section with rectangular hole has increase of about 4% compared to circular hole, and the section with circular hole has increase of 7% compared to square hole. by increasing the holes distance the performance of the beam is improved and the maximum shear strength of the sections obtained by the finite element method increases 4% and 6%, and with the increase in sheet thickness (despite the increase in depth and length hole), from 2 to 2.5 mm and 2.5 to 3 mm, the shear capacity increases about 25% to 30% and 20%, respectively.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 26 February 2024

**Revise Date:** 03 June 2024

**Accept Date:** 29 June 2024

### Keywords:

Cold Formed Steel

Shear Strength

Web Hole Shape

Finite Element Method

Direct Strength Method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437425.3338>

\*Corresponding author: **Hossein Parastesh**

Email address: [parastesh@usc.ac.ir](mailto:parastesh@usc.ac.ir)

## مطالعه پارامتری ظرفیت برشی مقاطع دابل تیرهای فولادی سرد نوردشده دارای

### سوراخ جان

نسترن حسینجانی<sup>۱</sup>، حسین پرستش<sup>۲\*</sup>، ایمان حاجی رسولیها<sup>۳</sup>، سید محمد مجتبابی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه شفیق، شفیق، انگلستان

۴- دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه شفیق، شفیق، انگلستان

#### چکیده

هدف از تحقیق حاضر ارزیابی مقاومت برشی تیرهای با مقطع I ساخته شده از دابل C شکل فولاد سرد نوردشده با در نظر گرفتن بازشدگی در جان برای عبور زیرساخت‌های مکانیکی و برقی است. به دلیل ضعف مقاومت برشی ناشی از سوراخ‌شدگی در جان، ظرفیت برشی مقطع تیر به شدت کاهش یافته و به دنبال آن ظرفیت باربری تیر نیز کاهش می‌یابد. اندازه، شکل و آرایش سوراخ‌های ایجادشده در جان تیر، در ظرفیت باربری و استحکام نهایی مقطع تیر مؤثر است. در این مقاله، با استفاده از روش اجزای محدود، تیر فولادی مذکور به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر تحت اثر بار متمرکز در وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای متغیر موردنظر در این تحقیق، ضخامت ورق، ابعاد سوراخ، شکل سوراخ، فواصل سوراخ از تکیه‌گاه و وجود لبه در بال مقطع است که تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون متمرکز در وسط تیر قرار گرفته است. جهت بررسی دقت نتایج آنالیز، مقاومت برشی مدل‌های تحلیلی با مقاومت برشی محاسبه شده از روش مقاومت مستقیم (DSM) آیین‌نامه AISI مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در مقاطع با مساحت‌های معادل و شکل‌های مختلف سوراخ در جان، با افزایش عمق سوراخ، ظرفیت نهایی در سوراخ‌های مستطیل، دایره و مربع به ترتیب کاهش می‌یابد؛ مقطع با سوراخ مستطیل افزایش حدود ۴٪ نسبت به مقطع با سوراخ دایره داشته و مقطع با سوراخ دایره افزایش ۷٪ نسبت به مقطع با سوراخ مربع دارد. همچنین با افزایش فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر، عملکرد تیر بهتر شده و مقاومت برشی ماکزیمم مقاطع حاصل از روش اجزای محدود، بین ۴٪ تا ۶٪ افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت ورق (علی‌رغم افزایش عمق و طول سوراخ)، از ۲ میلی‌متر به ۲/۵ میلی‌متر و از ۲/۵ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر، ظرفیت برشی به ترتیب حدود ۲۵٪ تا ۳۰٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فولاد سرد نورد شده، مقاومت برشی، شکل سوراخ جان، روش اجزای محدود، روش مقاومت مستقیم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437425.3338">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437425.3338</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437425.3338">10.22065/jsce.2024.437425.3338</a>	۱۴۰۳/۱۲/۳۰	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۱۴۰۳/۰۳/۱۴	۱۴۰۲/۱۲/۰۷
حسین پرستش <a href="mailto:parastesh@usc.ac.ir">parastesh@usc.ac.ir</a>				*نویسنده مسئول: بست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

استفاده از مقاطع فولاد سرد نورد شده<sup>۱</sup> در اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، یکی از راه‌حل‌های استفاده بهینه فولاد، جهت بهره‌گیری از اعضای با مقاومت بالا و وزن کم است [۲ و ۱]. برای عبور زیرساخت‌های برقی و مکانیکی در جان این مقاطع، سوراخ‌ها با شکل، ابعاد و فواصل مختلف ایجاد می‌شود که در رفتار برشی مقاطع سرد نورد شده تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین بررسی جامع این مقاطع، با جان سوراخ‌دار لازم به نظر می‌رسد [۳-۵]. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی انجام شده است که در ادامه به مرور تعدادی از تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

در سال ۲۰۰۱، شانموگام و همکاران<sup>۲</sup> [۶] به بررسی ستون‌های کوتاه دارای بازشدگی مربع و دایره در جان به روش اجزای محدود پرداخته و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی سایر محققان مقایسه کردند.

در سال ۲۰۱۰ فام و همکاران<sup>۳</sup> [۷] تحقیقی آزمایشگاهی در مورد رفتار مقاطع سازه‌های فولاد سرد نورد شده در سقف و دیوار، تحت خمش و ترکیب برش و خمش انجام دادند.

در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳، کرثان و همکاران<sup>۴</sup> [۸ و ۹] با مطالعه آزمایشگاهی، مقاومت برشی، کمناش اعوجاجی و استحکام اتصال‌های تیرهای C شکل لبه‌دار با بازشوه‌های جان مدور را در شرایط بارگذاری سه‌نقطه‌ای بررسی کردند و ضوابط طراحی برای این نوع مقاطع را ارائه دادند.

در سال ۲۰۱۷، یوسفی و همکاران [۱۰-۱۲] تأثیر فاصله سوراخ دایره‌ای جان از تکیه‌گاه و ابعاد مختلف سوراخ را برای یافتن مقاومت لهدگی مقاطع، مورد آزمایش قرار دادند.

در سال ۲۰۱۷، وانیراچی و همکاران<sup>۵</sup> [۱۳] با استفاده از نتایج عددی روش اجزای محدود و طبق آیین‌نامه AISI رفتار برشی، ظرفیت برشی، حالت‌های شکست و طراحی تیرهای C شکل لبه‌دار با سوراخ‌شدگی در جان با اشکال مختلف غیردایره‌ای (مربع، مستطیل) را بررسی نمودند.

در سال ۲۰۲۰، میتات و همکاران<sup>۶</sup> [۱۴] با استفاده از روش اجزای محدود، تحلیل کمناش الاستیک تیرهای فولادی ساخته شده از مقاطع سرد نورد شده، با شکل‌های مختلف سوراخ جان و در اندازه‌های مختلف را تحت خمش و فشار انجام دادند.

در سال ۲۰۲۰، فام و همکاران [۱۵-۱۶] آزمایش‌های برشی و آنالیز اجزای محدود برای مقاطع C شکل با سوراخ‌های مرکزی جان با ضخامت و اندازه‌های مختلف و شکل‌های مختلف سوراخ (دایره، مربع، لوزی و مستطیل) انجام دادند و مقاومت برشی مقاطع به دست آمد. بار تسلیم برشی و نیروی کمناش الاستیک برشی با استفاده از روش (DSM) تعیین شد.

در سال ۲۰۲۰ فام و همکاران [۱۷] مقاطع فولادی سرد نورد شده با سوراخ‌های مستطیلی جان را مورد ارزیابی تحلیلی قرار دادند و ظرفیت برشی را محاسبه کردند و به دنبال آن استراتژی جدیدی برای محاسبه مقاومت تسلیم و کمناش الاستیک برشی ارائه کردند.

در سال ۲۰۲۱، یائو و همکاران<sup>۷</sup> [۱۸] ظرفیت مقاطع فولاد سرد نورد شده با سوراخ دایره و مستطیل در جان را با ابعاد مختلف سوراخ و مقطع عضو تحت فشار با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود بررسی کردند.

در سال ۲۰۲۱، یوآ و همکاران<sup>۸</sup> [۱۹] مطالعه عددی برای تعیین کمناش اعوجاجی مقاطع C شکل سرد نورد شده با سوراخ‌های دایره‌ای در جان تحت خمش خالص با استفاده از روش تقریبی انرژی را انجام دادند و با روش اجزای محدود مقایسه نمودند و به نتایج و تطابق منطقی رسیدند.

در سال ۲۰۲۲، مآلی و همکاران<sup>۹</sup> [۲۰] با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی، تأثیر ضخامت ورق بر ظرفیت خمشی مقاطع C شکل دوپل را بررسی کردند.

<sup>۱</sup> CFS

<sup>۲</sup> Shanmugam et al.

<sup>۳</sup> Pham et al.

<sup>۴</sup> Keerthan et al.

<sup>۵</sup> Wanniarachchi et al.

<sup>۶</sup> Mitat et al.

<sup>۷</sup> Yao et al.

<sup>۸</sup> Yua et al.

<sup>۹</sup> Maali et al.

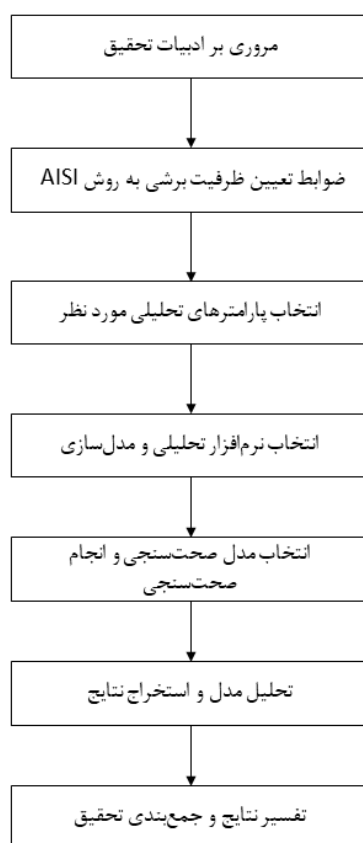
در سال ۲۰۲۲، شاکر و همکاران<sup>۱۰</sup> [۲۱] مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی ظرفیت خمشی مقاطع سخت‌شده فولاد سرد نوردشده سوراخ‌دار تحت پارامترهای متغیر همچون ارتفاع، ضخامت ورق و طول‌های مختلف سوراخ انجام دادند.

در سال ۲۰۲۲، زیوال جوینک و همکاران<sup>۱۱</sup> [۲۲] در مورد تأثیر سوراخ جان بر رفتار مقطع C شکل سرد نوردشده تحت خمش، فشار، برش و لهیدگی با استفاده از روش عددی و تجربی مطالعه نمودند و کماتش‌های کلی، موضعی و اعوجاجی را بررسی کردند.

در سال ۲۰۲۲، فانگ و همکاران<sup>۱۲</sup> [۲۳] مطالعه پارامتریک شبیه‌سازی‌شده با مدل آزمایشگاهی و آنالیزهای عددی را انجام دادند و با معادلات طراحی ساده‌شده برای مقاطع فولاد سرد نوردشده تحت بار فشاری مقایسه نمودند.

در سال ۲۰۲۲، ژاؤ و همکاران<sup>۱۳</sup> [۲۴] تحقیق در مورد تأثیر سوراخ جان در مقاطع سرد نوردشده براساس روش آزمایشگاهی و آنالیز المان محدود انجام دادند و با روش (DSM) مقایسه نمودند.

در سال ۲۰۲۳، فام و همکاران<sup>۱۴</sup> [۲۵] تأثیر سوراخ بر ظرفیت اعضای فولاد سرد نوردشده تحت فشار و بار متمرکز بر میان دهانه را مورد ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار داده‌اند. شکل و ابعاد سوراخ به‌عنوان پارامترهای متغیر تحلیل در نظر گرفته شده‌است. براساس تحقیقات پیشین می‌توان دریافت تأثیر سوراخ جان در مقاطع مختلف سازه‌های فولاد سرد نوردشده، بیشتر به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌است و روش‌های تحلیلی محدودی بر روی مقاطع اشکل ساخته‌شده از دابل C انجام شده‌است. تحقیق حاضر به مطالعه پارامتریک ظرفیت برشی مقاطع تیرهای مذکور با بازشو در جان می‌پردازد. بدین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS برای مدل‌سازی و تحلیل بار افزون استفاده شده‌است. برای بررسی دقت نتایج آنالیز، نتایج حاصل با ضوابط مقاومت برشی در آیین‌نامه AISI به روش (DSM) مقایسه شده‌است. جزئیات انجام تحقیق در نمودار شکل ۱ ارائه شده‌است.



شکل ۱: نمودار جزئیات انجام تحقیق

<sup>10</sup> Shaker et al.

<sup>11</sup> Živaljević et al.

<sup>12</sup> Fang et al.

<sup>13</sup> Zhao et al.

<sup>14</sup> Pham et al.

## ۲- ظرفیت برشی به روش DSM در آیین نامه AISI

در آیین نامه AISI نحوه محاسبه ظرفیت برشی به روش (DSM) برای مقاطع بدون لبه و با لبه C شکل با و بدون سوراخ در جان، ارائه شده است [۲۶].

۲-۱- مقاومت برشی اسمی ( $V_n$ ) برای تیرهای بدون لبه

مقاومت برشی اسمی  $V_n$  برای اعضای خمشی بدون سوراخ در جان با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می شود:

$$V_n = V_y \quad \text{اگر} \quad \lambda_v \leq 0.587 \quad (1)$$

$$V_n = \left[ 1 - 0.25 \left( \frac{V_{Cr}}{V_y} \right)^{0.65} \right] \left( \frac{V_{Cr}}{V_y} \right)^{0.65} V_y \quad \text{اگر} \quad \lambda_v > 0.587 \quad (2)$$

که در آن:

$$\lambda_v = \sqrt{\left( \frac{V_y}{V_{Cr}} \right)} \quad (3)$$

$$V_y = 0.6 A_W F_y \quad (4)$$

$$A_W = ht \quad (5)$$

و  $V_y$  نیروی برشی تسلیم مقطع،  $A_W$  مساحت جان مقطع،  $h$  عمق مسطح جان،  $t$  ضخامت جان،  $F_y$  تنش تسلیم و  $V_{Cr}$  نیروی کمانش برشی نهایی الاستیک جان برای مقاطع بدون سوراخ است.

## ۲-۲- نیروی کمانش برشی مقاطع C شکل بدون سوراخ در جان

در رابطه (۶)  $V_{Cr}$  نیروی کمانش برشی نهایی الاستیک جان برای مقاطع بدون سوراخ برابر است با:

$$V_{Cr} = A_W F_{Cr} \quad (6)$$

که  $F_{Cr}$  تنش کمانش برشی الاستیک است و از رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$F_{Cr} = \frac{\pi^2 E k_v}{12 (1 - \mu^2) (h/t)^2} \quad (7)$$

$E$  مدول الاستیسیته فولاد و  $k_v$  ضریب کمانش برشی محاسبه شده از رابطه (۸-۱۰) است:

برای جان های سخت نشده

$$k_v = 5 / 34 \quad (8)$$

برای جان های سخت شده

$$k_v = 4.00 + \frac{5.34}{(a/h)^2} \quad \text{اگر} \quad a/h \leq 1.0 \quad (9)$$

$$k_v = 5.34 + \frac{4.00}{(a/h)^2} \quad \text{اگر} \quad a/h > 1.0 \quad (10)$$

در روابط بالا  $a$  طول دهانه برشی المان جان سخت نشده و یا فاصله بین سخت کننده ها در سخت کننده های جان  $d_h$  عمق سوراخ جان و  $h$  عمق مسطح جان است.

۲-۳ - مقاومت برشی اسمی ( $V_n$ ) برای تیرها با لبه

مقاومت برشی اسمی  $V_n$  برای تیرها با سخت کننده جان از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می شود:

$$V_n = V_y \quad \text{اگر } \lambda_v \leq 0.776 \quad (11)$$

$$V_n = \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{V_{Cr}}{V_y} \right)^{0.4} \right] \left( \frac{V_{Cr}}{V_y} \right)^{0.4} V_y \quad \text{اگر } \lambda_v > 0.776 \quad (12)$$

## ۲-۴ - مقاومت برشی تسلیم مقاطع C شکل با سوراخ در جان

در مقاطع C شکل با سوراخ های جان مربع، مستطیل و دایره مقاومت برشی طبق بخش G3 آیین نامه AISI، با جای گذاری

$V_{yh} = V_y$  و  $V_{crh} = V_{cr}$  از روابط زیر محاسبه می شود [۲۶]:

$$V_{yh} = V_y \quad \text{اگر } 0 < d_h / h \leq 0.10 \quad (13)$$

$$V_{yh} = V_y \left[ 1 + a_0 \left( \frac{d_h}{h} - 0.1 \right) + a_1 \left( \frac{d_h}{h} - 0.1 \right)^2 + a_2 \left( \frac{d_h}{h} - 0.1 \right)^3 \right] \quad \text{اگر } 0.10 < d_h / h \leq 0.8 \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)

$$a_0 = -0.173 - 0.925 \left( \frac{L_h}{d_h} \right) + 0.0524 \left( \frac{L_h}{d_h} \right)^2 \quad (15)$$

$$a_1 = 3.41 + 1.99 \left( \frac{L_h}{d_h} \right) - 0.0995 \left( \frac{L_h}{d_h} \right)^2 \quad (16)$$

$$a_2 = 2.68 - 1.08 \left( \frac{L_h}{d_h} \right) + 0.0466 \left( \frac{L_h}{d_h} \right)^2 \quad (17)$$

که  $d_h$  عمق کلی سوراخ جان،  $L_h$  طول کلی سوراخ جان در طول عضو است. برای محاسبه بار تسلیم برشی  $V_y = V_{ynet}$  جاگذاری می شود که

$$V_{ynet} = 0.6 A_{Wnet} F_y \quad (18)$$

$$A_{Wnet} = (h - d) * t \quad (19)$$

است.

## ۲-۵ - نیروی کمانش برشی مقاطع C شکل با سوراخ در جان

نیروی کمانش برشی  $V_{cr}$  طبق فرمول بخش G2 آیین نامه AISI و مقدار  $K_v$  در سوراخ های مربع و مستطیل از بخش G3 آیین نامه

محاسبه می شود [۲۶]. برای مقاطع با سوراخ های دایره شکل، سوراخ های دایره به مربع با استفاده از رابطه  $d = 0.825D$  که  $d$

اندازه سوراخ مربع و  $D$  اندازه قطر مربع است، در نظر گرفته می شود. طبق روابط (۲۰) و (۲۱) نیروی کمانش برشی برابر است با:

$$V_{Crh} = a_{vh} V_{cr} \quad (20)$$

$$a_{vh} = \left[ 1 - 0.4 \left( \frac{L_h - d_h}{h} \right) \right]^2 \quad (21)$$

$$k_v = 4.86 + 6.15 \left( \frac{h}{a} \right) - 3.63 \left( \frac{d_h}{h} \right) - 19.6 \left( \frac{d_h}{h} \right) + 13.9 \left( \frac{d_h^2}{ah} \right) + 0.57 \left( \frac{b_f}{h} \right) \quad (22)$$

در رابطه بالا،  $b_f$  عرض کلی بال است. برای سوراخ‌های دایره  $L_h$  و  $d_h$  به ترتیب از روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شود که  $A_h$  مساحت سوراخ دایره است.

$$d_{h-eq} = \left[ 0.003 (L_h / d_h) + 0.822 \right] d_h \quad (23)$$

$$l_{h-eq} = 0.865 A_h / d_{h-eq} \quad (24)$$

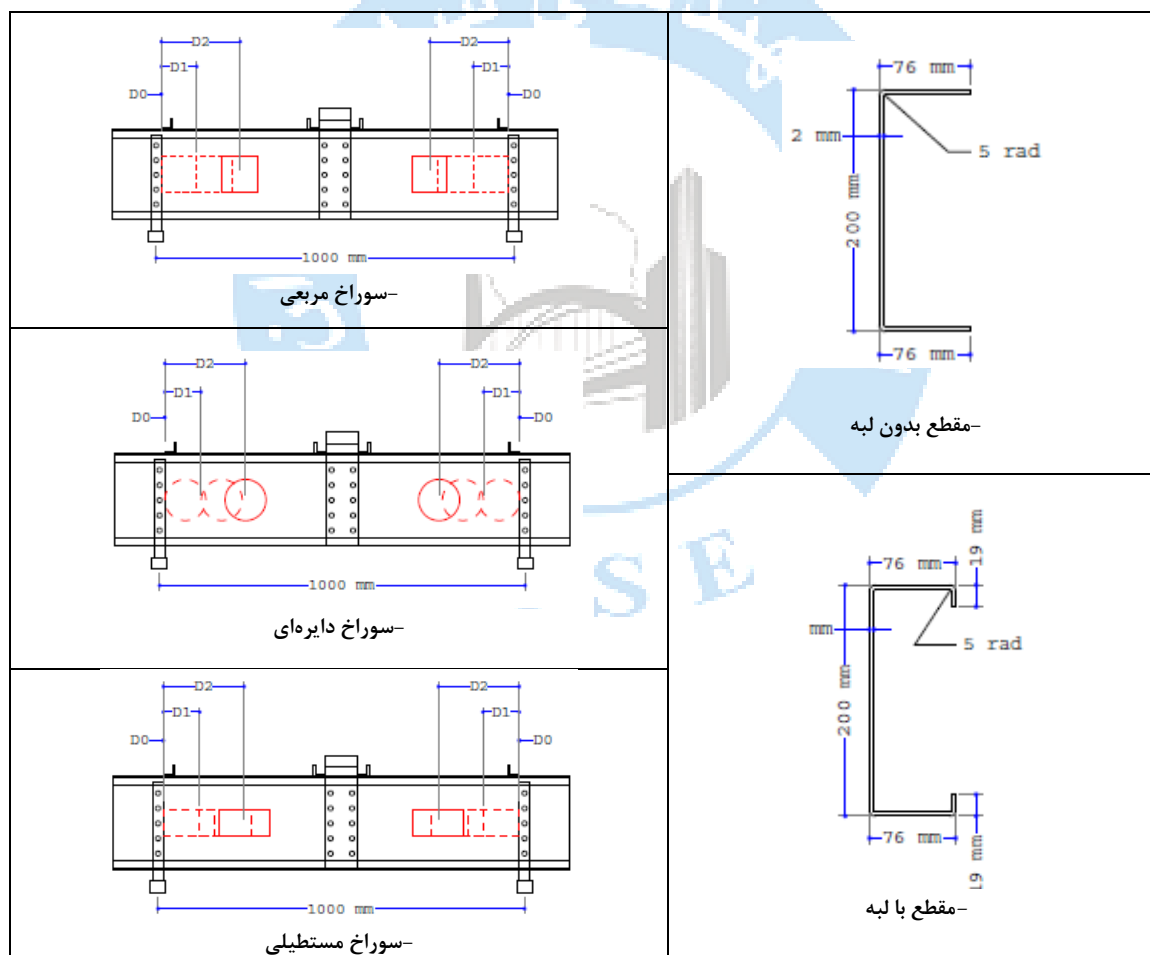
### ۳- معرفی مدل‌های تحلیلی

در این تحقیق، ۱۶۲ مدل تیر مقطع اشکل ساخته شده از دو بل C شکل فولادی سرد نورد شده به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر دارای دو سوراخ در فواصل مختلف و با تکیه‌گاه مفصلی با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی شد که شماتیک هندسی مطابق شکل ۲ است. شکل سوراخ (مربع، مستطیل، دایره با مساحت معادل)، ضخامت ورق (۲، ۲/۵، ۳ میلی‌متر)، ابعاد سوراخ، فواصل سوراخ از تکیه‌گاه (D1، D0، D2) و حضور لبه در بال مقطع به‌عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده‌است. بر این اساس، مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده‌است. با توجه به اینکه سه فاصله D1، D0 و D2، مطابق شکل ۲ وجود دارد لذا نمونه‌های تحلیلی جدول یک، سه برابر شده و تعداد مدل‌ها به ۱۶۲ مدل می‌رسد.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های تیرهای تحلیلی تشکیل شده از فولاد سرد نورد شده

شماره مدل	ضخامت تیر (mm)	ابعاد / قطر سوراخ (mm)	با لبه / بدون لبه	شکل سوراخ	
C2-S40×40- Lip	2	40×40	با لبه	مربع	
C2-S80×80 - Lip	2	80×80			
C2-S120×120- Lip	2	120×120			
C2.5-S40×40- Lip	2.5	40×40			
C2.5-S80×80 - Lip	2.5	80×80			
C2.5-S120×120- Lip	2.5	120×120			
C3-S40×40- Lip	3	40×40	بدون لبه		
C3-S80×80 - Lip	3	80×80			
C3-S120×120- Lip	3	120×120			
C2-S40×40	2	40×40			
C2-S80×80	2	80×80			
C2-S120×120	2	120×120			
C2.5-S40×40	2.5	40×40	با لبه	مستطیل	
C2.5-S80×80	2.5	80×80			
C2.5-S120×120	2.5	120×120			
C3-S40×40	3	40×40			
C3-S80×80	3	80×80			
C3-S120×120	3	120×120			
C2-Rec 56.53×28.3 - Lip	2	56.53×28.3	بدون لبه		مستطیل
C2-Rec 113.12×56.57 - Lip	2	113.12×56.57			
C2-Rec 169.70×84.85- Lip	2	169.70×84.85			
C2.5-Rec 56.53×28.3 - Lip	2.5	56.53×28.3			
C2.5-Rec 113.12×56.57 - Lip	2.5	113.12×56.57			
C2.5-Rec 169.70×84.85- Lip	2.5	169.70×84.85			
C3-Rec 56.53×28.3 - Lip	3	56.53×28.3	بدون لبه	مستطیل	
C3-Rec 113.12×56.57 - Lip	3	113.12×56.57			
C3-Rec 169.70×84.85- Lip	3	169.70×84.85			
C2-Rec 56.53×28.3	2	56.53×28.3			
C2--Rec 113.12×56.57	2	113.12×56.57			
C2--Rec 169.70×84.85	2	169.70×84.85			
C2.5--Rec 56.53×28.3	2.5	56.53×28.3	بدون لبه		مستطیل
C2.5--Rec 113.12×56.57	2.5	113.12×56.57			
C2.5--Rec 169.70×84.85	2.5	169.70×84.85			

C3--Rec 56.53×28.3	3	56.53×28.3	با لبه	دایره		
C3--Rec 113.12×56.57	3	113.12×56.57				
C3--Rec 169.70×84.85	3	169.70×84.85				
C2-Cir 45.2- Lip	2	45.2				
C2- Cir 90.4 - Lip	2	90.4				
C2- Cir 135.6- Lip	2	135.6				
C2.5- Cir 45.2 - Lip	2.5	45.2				
C2.5- Cir 90.4 - Lip	2.5	90.4				
C2.5- Cir 135.6- Lip	2.5	135.6				
C3- Cir 45.2- Lip	3	45.2				
C3- Cir 90.4- Lip	3	90.4				
C3- Cir 135.6- Lip	3	135.6				
C2-Cir 45.2	2	45.2			بدون لبه	
C2- Cir 90.4	2	90.4				
C2- Cir 135.6	2	135.6				
C2.5- Cir 45.2	2.5	45.2				
C2.5- Cir 90.4	2.5	90.4				
C2.5- Cir 135.6	2.5	135.6				
C3- Cir 45.2	3	45.2				
C3- Cir 90.4	3	90.4				
C3- Cir 135.6	3	135.6				



شکل ۲: شماتیک هندسی مقاطع تیر سرد نوردشده با سوراخ مدل شده در جان  
( $D_0=0$  mm,  $D_1=40$  mm,  $D_2=250$  mm)

## ۴- مدل سازی نمونه های تحلیلی

به منظور مدل سازی نمونه های تحلیلی نیاز به مدل کردن ورق فولادی سرد نورد شده به روش اجزای محدود است. با توجه به استفاده از نرم افزار ABAQUS و توانمندی این نرم افزار در تأمین المان های مورد نیاز، بدین منظور از المان پوسته "Shell" استفاده شده است که هندسه این المان در شکل ۳ نشان داده شده است.



shell elements

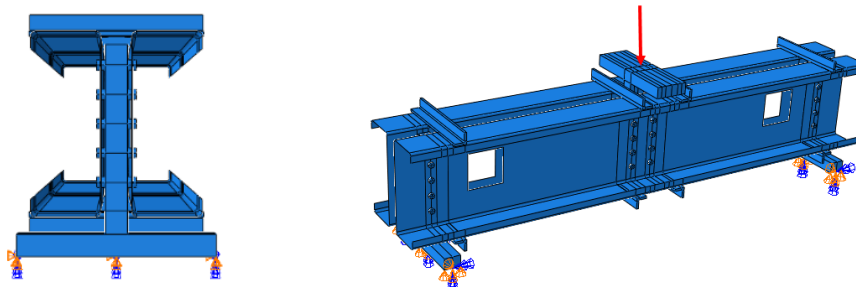
شکل ۲: المان پوسته "Shell" (S4R) در آباکوس

پس از معرفی المان مورد نظر جهت ساخت هندسه مدل تحلیلی ضرورت دارد تا مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی فولاد معرفی شود. مشخصات فولاد مورد استفاده مطابق مطالعه آزمایشگاهی آقای فام و همکاران در نظر گرفته شده که در جدول ۲ آورده شده است [۱۶]. (MPa)

جدول ۲: ویژگی های فولاد سرد نورد شده مورد استفاده در آنالیز المان محدود

مصرفی	تنش (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/mm <sup>3</sup> )
فولاد سرد نورد شده	۴۸۳/۰۳	۱۸۸۶۵۲	۰/۳	۷/۸۵

به منظور مش بندی مناسب لازم است حالت های مختلف را مورد بررسی قرار داده و بر حسب نیاز از مش بندی بهینه استفاده شود. استفاده از مش بندی ریز منجر به طولانی شدن مدت زمان تحلیل می شود. در نتیجه انتخاب مناسب ترین مش در مدت زمان تحلیل مدل ها تأثیر بسیار تعیین کننده ای می گذارد. مش بندی قطعه های فولاد سرد نورد شده به وسیله "shell" المان چهار گرهی با انتگرال کاهش یافته S4R انجام شده است. برای مطمئن شدن از درستی و صحت مقادیر خروجی ها، اندازه بزرگ ترین بعد المان ۱۰ میلی متر در نظر گرفته می شود. در این مدل، شرایط تکیه گاه مفصلی در دو انتهای تیر تعریف شده است. برای اعمال بارگذاری نمونه های تحلیلی از یک بار متمرکز وارد شده در مرکز تیر که به تدریج بر وسط دهانه تیر وارد می شود، به روش کنترل تغییر مکان مدل های تحلیلی، تحت آنالیز استاتیکی غیر خطی بار افزون قرار گرفته است. با توجه به ماهیت مقاطع فولاد سرد نورد شده (یعنی نسبت ضخامت مقطع به سایر ابعاد بسیار کوچک)، برای اتصال دو مقطع C شکل به یکدیگر از نبشی های رابط و المان پرکننده در جان مقطع مطابق شکل ۳ کمک گرفته شده و در سطح تماس المان های رابط و پرکننده از المان تماسی contact استفاده شده است.

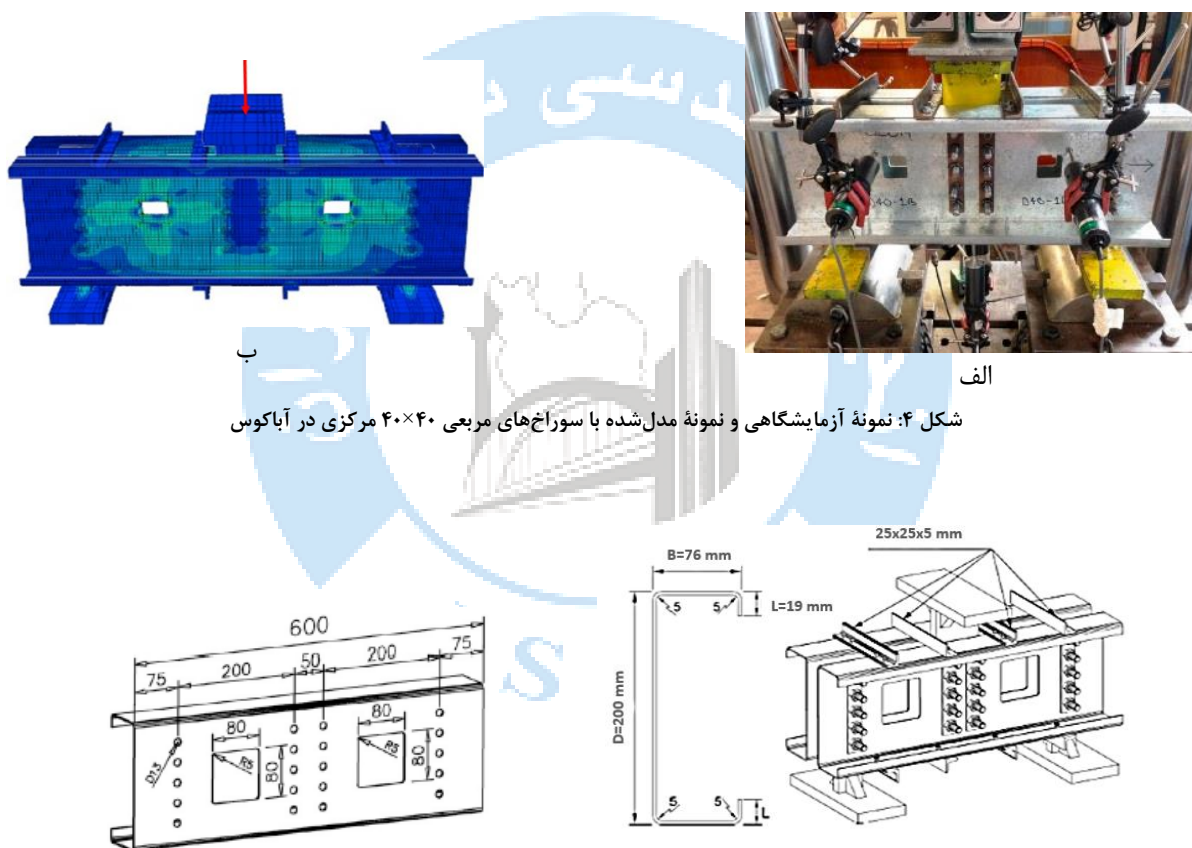


شکل ۳: اعمال بارگذاری، شرایط تکیه گاهی و مقطع مدل

## ۵- صحت‌سنجی مدل تحلیلی

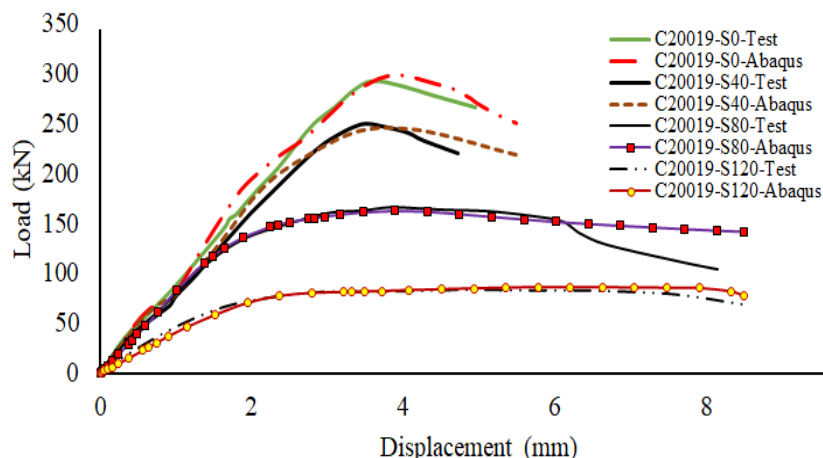
شرط پذیرش نتایج تحلیل عددی و قابلیت استناد به نتایج حاصل از آن، براساس صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با نتایج حاصل از تحقیق‌های آزمایشگاهی است. اگر نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی منطبق باشد می‌توان نمونه‌های مشابه را توسط تحلیل عددی مدل‌سازی نمود و به نتایج نمونه‌ها با تقریب قابل‌قبول استناد کرد [۱۵].

جهت صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی از نمونه آزمایشگاهی تحقیق آقای فام و همکاران استفاده شده‌است [۱۶]. در این تحقیق چهار نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته که پارامترهای متغیر نمونه‌های آزمایش، تیر بدون سوراخ و ابعاد سوراخ مربع‌شکل بوده‌است که در شکل ۴، یک نمونه از مدل آزمایشگاهی و نمونه مدل‌شده در آباکوس نشان داده شده‌است. تیرهای موردنظر با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود و مشابه شرایط آزمایشگاهی، مدل‌سازی شده‌اند و جزئیات هندسه مدل در شکل ۵ ارائه شده‌است. نمودار نیرو تغییر مکان مدل‌های تحلیلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۶ ارائه شده‌است. مطابق نتیجه به‌دست‌آمده، ملاحظه می‌شود که رفتار تحلیلی از دقت قابل‌قبولی در مقایسه با نتایج آزمایش برخوردار است.



شکل ۴: نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل‌شده با سوراخ‌های مربعی ۴۰×۴۰ مرکزی در آباکوس

شکل ۵: جزئیات هندسه مدل صحت‌سنجی



شکل ۶: مقایسه نمودارهای نیرو- تغییر مکان مدل صحت‌سنجی شده در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری [۱۶].

## ۶- استخراج نتایج تحقیق

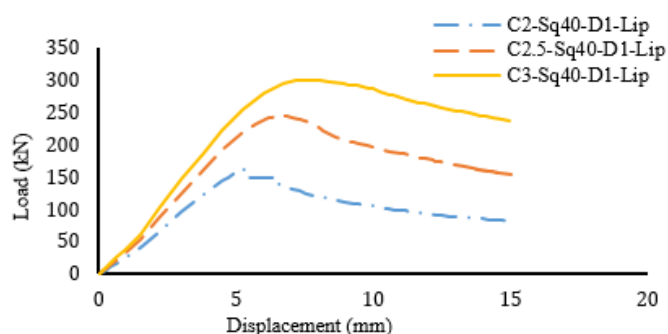
در این بخش از تحقیق، نتایج حاصل از آنالیز غیرخطی مدل‌های تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ارائه شده است. منحنی‌های بار-تغییر مکان و توزیع تنش و مکانیسم خرابی نمونه‌ها با توجه به پارامترهای متغیر به‌طور جداگانه ارائه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج با روش آیین‌نامه DSM مقایسه گردیده است.

### ۶-۱- نمودار بار-تغییر مکان

نمودارهای بار-تغییر مکان نقطه وسط تیرهای مدل‌سازی شده براساس پارامترهای متغیر تحلیل به‌صورت جداگانه در ذیل آورده شده و نسبت به تفسیر آن‌ها اقدام گردیده است. این نمودارها براساس خروجی نرم‌افزار ABAQUS تهیه شده و جزئیات تفسیری آن در هر بخش ذکر شده است.

### ۱- اثر ضخامت ورق

در این بخش تغییرات نمودارهای بار جابجایی به‌ازای تغییر در ضخامت ورق مورد بررسی قرار گرفت. باید توجه داشت که اثر ضخامت در مقایسه با عمق و طول سوراخ در این قسمت اهمیت دارد. بر این اساس، به‌عنوان نمونه، نمودارهای بار جابجایی مقطع سرد نورد شده دارای سوراخ مربعی به ضلع ۴۰ میلی‌متر و فاصله D1 از تکیه‌گاه با ضخامت‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه تأثیر ضخامت با عمق و طول سوراخ، جدول شماره ۵ ارائه شده است که ملاحظه می‌گردد با افزایش ضخامت علی‌رغم افزایش عمق و طول سوراخ، ظرفیت برشی مقطع نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵: نمودار بار-تغییر مکان تیر با سوراخ مربعی ۴۰×۴۰ میلی‌متر به فاصله D1 از تکیه‌گاه با ضخامت مقطع ۲، ۲/۵ و ۳ میلی‌متر

در مقایسه ضخامت‌های مختلف، ناحیه انتقال از حالت خطی به غیرخطی کاملاً مشهود است. در ضخامت بالا، انتقال این حالت در بار بیشتر و با شیب بیشتر نسبت به ضخامت کم صورت می‌پذیرد و باعث افزایش سختی اولیه می‌گردد و به دنبال آن در بار بیشتری

وارد ناحیه پلاستیک می شوند. افزایش ضخامت، سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان را که مبین قابلیت جذب انرژی است، افزایش می دهد. همچنین باعث افزایش مقاومت نهایی و مقاومت تسلیم بیشتر تیر می گردد.

جدول ۳: لاغری جان در مقاطع تیر

۳	۲/۵	۲	t
۶۴/۳۶	۷۷/۲۴	۹۶/۵۵	h/t (لاغری جان)

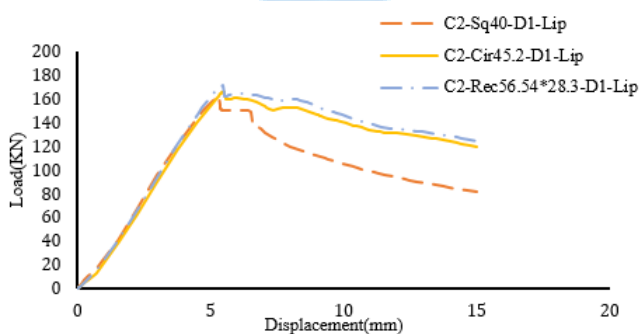
با توجه به جدول ۳ که نسبت لاغری جان (h/t) را در مقاطع تیر نشان می دهد هرچقدر لاغری جان افزایش یابد، مقاومت برشی کاهش یافته و مقطع زودتر دچار کمانش می شود. در حقیقت سوراخ های با ضخامت کمتر ظرفیت برشی کمتری دارند.

### - اثر شکل سوراخ

مقاومت ماکزیمم تیرهای مدل شده در سه شکل متفاوت از سوراخ مربع، دایره و مستطیل در این قسمت بررسی شده است که مساحت هر کدام از ابعاد مربع با مساحت دایره و مستطیل متناظر برابر است. در سوراخ های مستطیلی نسبت طول به عرض برابر دو در نظر گرفته شده است. همچنین سوراخ دایره ای با سوراخ مربعی با ابعاد متناظر معادل سازی شده است. مساحت معادل شکل های متفاوت سوراخ جان و نسبت عمق سوراخ به عمق مسطح جان (d<sub>h</sub>/h) در جدول ۴ آورده شده است و این نسبت در مقاومت تیر تأثیر می گذارد. شکل ۶ نمونه ای از نمودار بار-تغییر مکان مدل های تحلیلی را در سه شکل مختلف سوراخ با مساحت معادل مستطیل، دایره و مربع نشان می دهد که به ترتیب از بیشترین ظرفیت باربری به کمترین ظرفیت حرکت می کند و با افزایش نسبت (d<sub>h</sub>/h) به ترتیب در مربع، دایره و مستطیل کاهش مقاومت را توجیه می کند.

جدول ۴: شکل های متفاوت سوراخ در جان با مساحت معادل

مساحت بازو	قطر بازوی		بعد بازوی			
	d <sub>h</sub> /h	دایره	d <sub>h</sub> /h	مستطیل	مربع	
۱۶۰۰	۰/۱۹	۴۵/۲	۰/۱۴	۵۶/۵۴×۲۸/۳	۰/۲۱	۴۰×۴۰
۶۴۰۰	۰/۳۹	۹۰/۲	۰/۲۹	۱۱۳/۱۳×۵۶/۵۷	۰/۴۱	۸۰×۸۰
۱۴۴۰۰	۰/۵۸	۱۳۵/۶	۰/۴۳	۱۶۹/۷۱×۸۴/۸۵	۰/۶۲	۱۲۰×۱۲۰

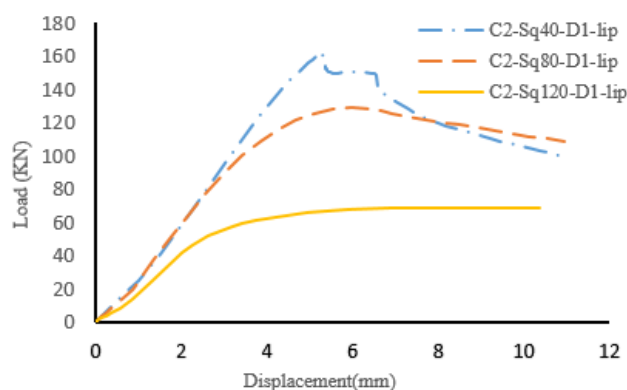


شکل ۶: تأثیر شکل سوراخ (مربع، مستطیل و دایره) با مساحت معادل مربع ۴۰×۴۰ میلی متر به فاصله D1 از تکیه گاه

### - اثر ابعاد سوراخ

تأثیر قطر سوراخ بر نمودار بار-تغییر مکان نمونه های تحلیلی در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، نمودار سوراخ مربع شکل به ضخامت مقطع ۲ میلی متر برای سه اندازه مختلف به اضلاع ۸۰، ۴۰ و ۱۲۰ میلی متر در شکل ۷ آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش ابعاد سوراخ، انتظار کاهش مقاومت ماکزیمم مقطع وجود داشته ولیکن همان طور که ملاحظه

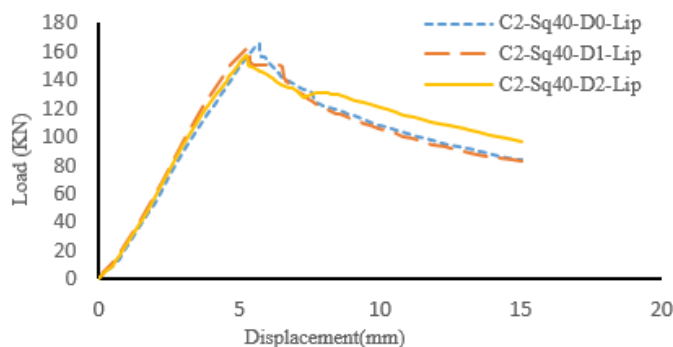
می‌گردد این کاهش برای سوراخ مربع ۱۲۰ میلی‌متر به مراتب بیشتر از سوراخ ۸۰ میلی‌متر است که این موضوع نشان می‌دهد اثر بُعد سوراخ در بازشدگی‌های بزرگ اهمیت زیادتری داشته و سختی اولیه سازه نیز کاهش می‌یابد. در نمودارهای به‌دست‌آمده، در نمونه با سوراخ کوچک مربع ۴۰ میلی‌متر، بارها به صورت خطی قبل از رسیدن به بارهای نهایی افزایش می‌یابند و سپس در هنگام عبور از مقادیر نهایی، به دلیل حالت شکست کماتش برشی کاهش می‌یابند.



شکل ۷: نمودار نیرو و تغییر مکان سوراخ دایره به ضخامت مقطع ۲ میلی‌متر برای سه اندازه مختلف سوراخ مربع

### - اثر موقعیت سوراخ

موقعیت طولی سوراخ جان در ظرفیت تیر تأثیر می‌گذارد. با تغییر فاصله سوراخ‌ها از لبه تکیه‌گاه به وسط تیر، کاهش را در بار ماکزیمم خواهیم داشت. در حقیقت هرچه فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر کمتر باشد به دلیل کاهش سختی خمشی بین سوراخ‌ها، ظرفیت مقطع کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است تغییر فاصله سوراخ تأثیر کمی در مقاومت نهایی تیر دارد. برای نمونه، نمودار نیرو- تغییر مکان حاصل از تحلیل سوراخ مربع شکل به ضلع ۴۰ میلی‌متر به فاصله‌های D0، D1 و D2 در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فواصل D0، D1 و D2 به ترتیب بیشترین بار ماکزیمم با توجه به فاصله از سوراخ مشاهده می‌شود.

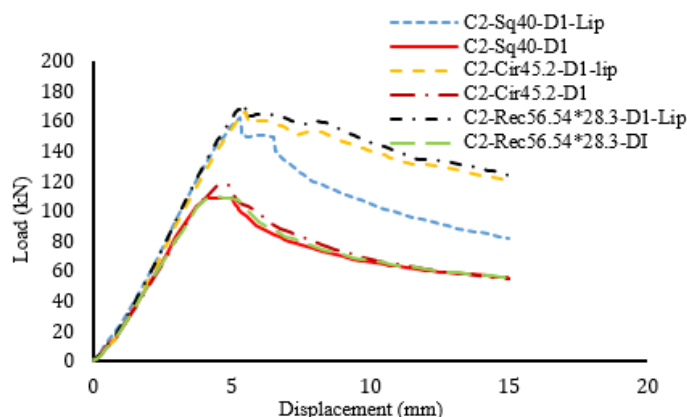


شکل ۸: تأثیر موقعیت سوراخ با مساحت معادل ۴۰ میلی‌متر در فاصله D0، D1 و D2 از تکیه‌گاه

### - اثر لبه در سوراخ

در این قسمت رفتار مقاطع با لبه در بال مقطع و بدون لبه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال، نمودار سه شکل سوراخ جان در مقاطع با لبه و سه شکل سوراخ جان در مقاطع بدون لبه، هم‌مساحت و متناظر با ضخامت ۲ میلی‌متر در شکل ۹ نشان داده شده است. وجود لبه در مقاطع، بدون تغییر در مساحت سوراخ جان به طور قابل توجهی باعث افزایش قدرت باربری نمونه‌ها و استحکام نهایی مقاطع تیر

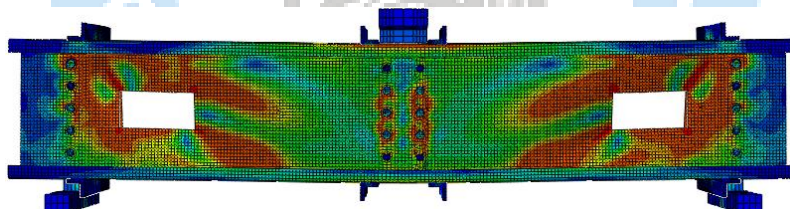
شده و مانع کمانش موضعی در سوراخ می‌شوند. تیر با سوراخ‌های بزرگ‌تر با و بدون لبه با اختلاف زیاد، کمترین ظرفیت برشی را نسبت به اندازه‌های کوچک‌تر سوراخ دارند.



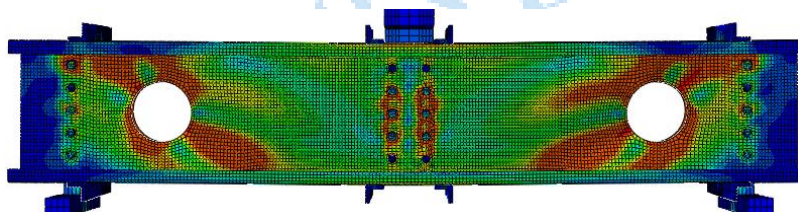
شکل ۹: نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای سوراخ مربعی  $40 \times 40$ ، سوراخ دایره‌ای و مستطیلی با مساحت معادل مربع در مقاطع با و بدون لبه

## ۲-۶- توزیع تنش و مکانیسم خرابی

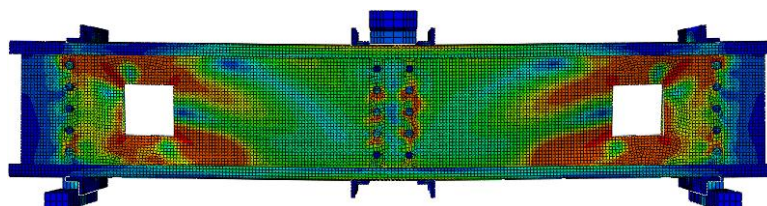
مقایسه توزیع تنش نمونه‌های تحلیلی برای سه نوع سوراخ با شکل‌های مختلف در این قسمت انجام شده‌است. بر این اساس، شکل ۱۰ حالت‌های شکست برشی و توزیع تنش برای مدل‌های ساخته‌شده از سه شکل سوراخ به فاصله D1 از بر تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. حالت شکست برشی برای جان صفحه‌های سوراخ‌دار، همواره برای هر سه شکل در اطراف سوراخ به صورت متقارن مشاهده می‌شود. وجود سوراخ، توزیع تنش اطراف خود را به شدت دچار تغییر می‌کند و در گوشه‌های سوراخ‌ها تمرکز تنش و تسلیم‌شدگی ایجاد می‌شود. نقاط پلاستیک به‌طور موضعی در اطراف گوشه‌های سوراخ تشکیل شده و به سمت بال‌ها و لبه‌ها گسترش یافته‌است.



الف: حالت شکست برشی برای شکل سوراخ مستطیلی جان



ب: حالت شکست برشی برای شکل سوراخ دایره‌ای جان



ج: حالت شکست برشی برای شکل سوراخ مربعی جان

شکل ۱۰: حالت‌های شکست برشی برای سه شکل مختلف سوراخ به فاصله D1 از بر تکیه‌گاه

### ۳-۶- نتایج تحلیل به روش DSM و مقایسه با FEM (روش اجزای محدود)

وجود سوراخ در اعضای مقاطع CFS باعث کاهش و افت ظرفیت می‌شود که به شرایط بارگذاری عضو وابسته است. در این بخش، جهت بررسی و دقت نتایج آنالیز، از روابط تحلیلی براساس آیین‌نامه AISI و روش (DSM) استفاده شد. نتایج در جدول ۵ و جدول ۶ مقایسه شده و انطباق مناسب را نشان می‌دهد. با استفاده از روش (DSM) نیروی مقاومت برشی تسلیم ( $V_{yh}$ ) و مقاومت برشی اسمی ( $V_n$ ) برای مقاطع با لبه و فقط مقاومت برشی اسمی برای مقاطع بدون لبه محاسبه شده و مقاومت برشی تسلیم مقاطع بدون لبه دارای ضابطه مشخص در آیین‌نامه نیست. سپس نیروی مقاومت تسلیم حاصل از آنالیز اجزای مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش ضخامت، باعث افزایش نیروی برشی تسلیم شده و افزایش ابعاد سوراخ باعث کاهش مقاومت برشی مقطع می‌گردد و همچنین وجود لبه در مقطع به‌طور قابل توجهی باعث افزایش مقاومت برشی مقطع می‌شود.

همچنین برای ارزیابی بهینه طراحی، نسبت ظرفیت ماکزیمم مقطع مرجع نسبت به ظرفیت ماکزیمم تیرهای مدل شده به روش اجزای محدود ( $P_{ref}/P$ ) محاسبه شده است و در جدول ۵ و جدول ۶ آورده شده است. ظرفیت مرجع تیر تعریف شده، همان ظرفیت ماکزیمم تیر صحت‌سنجی به طول ۶۰۰ میلی‌متر و بدون سوراخ است و برابر با ۲۹۷/۷۵ کیلو نیوتن است [۱۶].

جدول ۵: نتایج و مقایسه مدل‌های آنالیز شده به روش FEM و DSM برای مقاطع با لبه

الف: سوراخ‌های مربع

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ مربع با لبه	D0				D1				D2			
	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-S40×40- Lip	125.6	120.85	79.48	1.81	125.6	119.29	73.28	1.83	125.6	119.11	72.48	1.92
C2-S80×80 - Lip	92.790	89.55	48.35	2.17	92.79	89.67	46.66	2.31	92.79	85.43	46.38	2.39
C2-S120×120- Lip	59.97	55.41	25.75	4.24	53.97	53.24	25.02	4.33	59.97	50.39	24.97	4.34
C2.5-S40×40- Lip	157.01	151.15	116.02	1.24	157.01	150.85	107.21	1.21	157.01	148.23	106.06	1.25
C2.5-S80×80 - Lip	115.98	102.35	70.93	1.36	115.98	102.11	68.51	1.52	115.98	99.57	68.11	1.55
C2.5-S120×120- Lip	74.96	70.32	37.93	2.81	74.96	69.55	36.86	2.89	74.96	66.57	36.8	2.92
C3-S40×40- Lip	188.41	178.25	157.41	0.99	188.41	179.51	145.79	0.99	188.41	175.22	144.27	1.00
C3-S80×80 - Lip	139.18	135.11	96.73	1.04	139.18	134.23	93.5	1.17	139.18	132.45	92.96	1.20
C3-S120×120- Lip	89.96	88.34	51.91	2.15	89.96	87.25	50.48	2.19	89.96	83.22	50.39	2.26

ب: سوراخ‌های مستطیل

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ مستطیل با لبه	D0				D1				D2			
	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_y(FEM)$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-Rec 56.53×28.3 - Lip	165.28	160.25	80.65	1.73	165.28	161.55	70.69	1.79	165.28	156.96	68.77	1.79
C2-Rec 113.12×56.57 - Lip	82.01	80.23	31.96	2.04	82.01	81.11	31.38	2.15	82.01	77.14	31.29	2.26
C2-Rec 169.70×84.85- Lip	34.6	30.26	11.54	3.49	34.6	29.37	11.52	3.45	34.6	26.74	11.5	3.48
C2.5-Rec 56.53×28.3 - Lip	206.6	200.64	150.74	1.16	206.6	198.3	132.83	1.18	206.6	190.45	129.35	1.18
C2.5-Rec 113.12×56.57 - Lip	102.51	99.47	60.25	1.28	102.51	99.66	59.19	1.42	102.51	95.34	59.03	1.46
C2.5-Rec 169.70×84.85- Lip	43.26	40.55	21.86	2.42	43.26	41.38	21.83	2.44	43.26	35.42	21.8	2.59
C3-Rec 56.53×28.3 - Lip	247.92	246.42	247.26	0.93	247.92	247.53	219.29	0.94	247.92	245.5	213.82	0.95
C3-Rec 113.12×56.57 - Lip	123.01	120.25	99.87	1.01	123.01	122.32	98.18	1.12	123.01	115.95	97.94	1.14
C3-Rec 169.70×84.85- Lip	51.91	50.44	36.45	1.91	51.91	50.36	36.41	1.96	51.91	43.68	36.4	2.00

ج: سوراخ‌های دایره

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ دایره با لبه	D0				D1				D2			
	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{yh(DSM)}$ (kN)	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-Cir 45.2- Lip	150.49	148.33	100.52	1.76	150.49	150.23	93.85	1.79	150.49	144.65	92.84	1.88
C2- Cir 90.4 - Lip	70.29	70.2	62.47	1.91	70.29	68.54	62.14	2.13	70.29	67.34	62.1	2.23
C2- Cir 135.6- Lip	23.36	23.01	36.55	3.63	23.36	20.5	36.65	3.76	23.36	18.76	36.66	3.63
C2.5- Cir 45.2 - Lip	188.12	180.78	147.23	1.15	188.12	180.52	137.7	1.20	188.12	179.66	136.25	1.22
C2.5- Cir 90.4 - Lip	87.86	85.31	91.90	1.28	87.86	85.45	91.42	1.43	87.86	79.64	91.37	1.48
C2.5- Cir 135.6- Lip	29.2	25.77	53.93	2.47	29.2	20.64	54.06	2.49	29.2	19.52	54.07	2.57
C3- Cir 45.2- Lip	225.74	219.69	200.46	0.95	225.74	215.8	187.78	0.97	225.74	213.33	185.85	0.98
C3- Cir 90.4- Lip	105.44	103.2	125.66	1.02	105.44	102.5	125.02	1.13	105.44	97.42	124.95	1.16
C3- Cir 135.6- Lip	35.04	34.37	73.86	1.97	35.04	34.1	74.04	2.01	35.04	30.65	74.05	2.04

جدول ۶: نتایج و مقایسه مدل‌های آنالیز شده به روش FEM و DSM برای مقاطع بدون لبه

الف: سوراخ‌های مربع

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ مربع بدون لبه	D0			D1			D2		
	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-S40×40	90.84	61.45	2.62	89.32	54.17	2.73	86.11	53.23	2.83
C2-S80×80	60.78	31.47	2.68	60.51	31.3	2.74	54.94	31.27	2.94
C2-S120×120	34.54	14.95	4.62	32.67	15.02	4.72	29.65	15.02	5.08
C2.5-S40×40	110.44	96.91	1.62	108.66	86.22	1.64	108.04	84.71	1.66
C2.5-S80×80	79.23	50.76	1.74	76.67	50.48	1.90	75.8	50.44	1.92
C2.5-S120×120	44.45	24.38	3.06	40.25	24.49	3.10	39.67	24.49	3.21
C3-S40×40	145.2	138.11	1.29	136.9	124.24	1.30	130.75	122.42	1.35
C3-S80×80	100.53	74.25	1.35	101.45	73.87	1.39	95.43	73.81	1.41
C3-S120×120	63.8	36.11	2.33	61.65	36.26	2.34	55.8	36.27	2.49

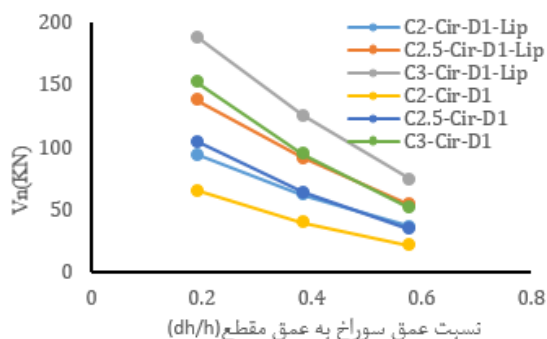
ب: سوراخ‌های مستطیل

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ مستطیل بدون لبه	D0			D1			D2		
	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-Rec 56.53×28.3	112.66	78.86	2.61	99.51	69.83	2.72	96.54	68.06	2.91
C2--Rec 113.12×56.57	57.3	31.75	2.64	55.54	31.2	2.73	55.99	31.12	2.96
C2--Rec 169.70×84.85	21.95	11.54	3.79	19.16	11.53	3.83	18.48	11.53	4.02
C2.5--Rec 56.53×28.3	158.04	138.84	1.57	146.12	125.46	1.59	139.26	122.71	1.65
C2.5--Rec 113.12×56.57	80.59	57.69	1.73	76.97	56.81	1.76	74.12	56.69	1.81
C2.5--Rec 169.70×84.85	30.67	21.3	2.54	30.5	21.28	2.71	28.96	21.28	2.77
C3--Rec 56.53×28.3	175.11	203.77	1.21	171.12	190.75	1.23	167.28	187.71	1.32
C3--Rec 113.12×56.57	99.64	89.42	1.29	95.63	88.36	1.32	93.5	88.2	1.42
C3--Rec 169.70×84.85	37.86	33.86	2.07	35.77	33.82	2.10	34.9	33.82	2.31

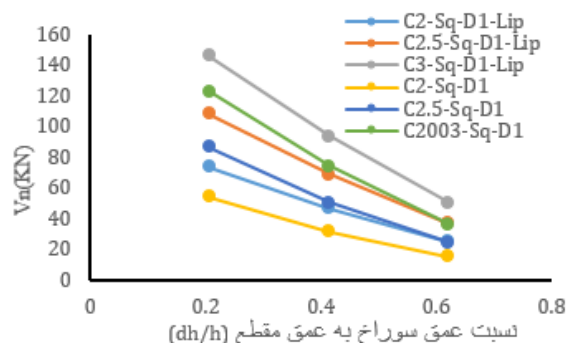
ج: سوراخ‌های دایره

نمونه مقطع مدل شده با سوراخ دایره بدون لبه	D0			D1			D2		
	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$	$V_{y(FEM)}$ (kN)	$V_n$ (kN)	$P_{ref}/P$
C2-Cir 45.2	107.37	72.35	2.50	99.56	64.88	2.50	96.2	63.77	2.64
C2- Cir 90.4	46.78	39.85	2.57	42.77	39.51	2.70	42.3	39.48	3.09
C2- Cir 135.6	19.5	21.12	3.87	19.01	21.21	4.03	18.51	21.21	4.05
C2.5- Cir 45.2	139.65	115.7	1.58	135.43	104.36	1.60	133.62	102.66	1.64
C2.5- Cir 90.4	68.22	64.67	1.72	66.11	64.14	1.78	65.46	64.08	1.87
C2.5- Cir 135.6	22.5	34.54	2.70	20.8	34.67	2.77	19.31	34.68	2.79
C3- Cir 45.2	179.81	167.62	1.23	172.6	152.2	1.25	170.18	149.85	1.30
C3- Cir 90.4	78.95	95.27	1.31	72.38	94.52	1.38	69.52	94.43	1.42
C3- Cir 135.6	23.83	51.31	2.13	20.55	51.51	2.17	19.12	51.52	2.28

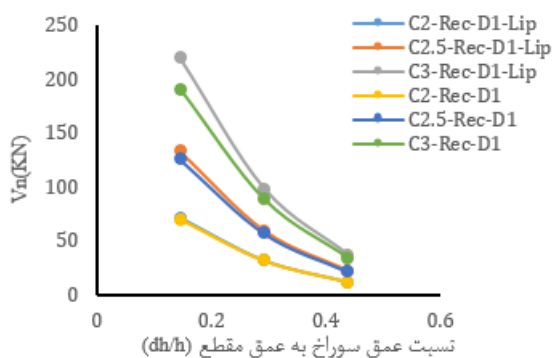
نمودار مقایسه نسبت سوراخ جان به ارتفاع مسطح جان ( $d_h/h$ ) با ( $V_n$ ) در سه شکل مختلف سوراخ و به فاصله D1 از تکیه‌گاه در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت ( $d_h/h$ ) مقدار ( $V_n$ ) کاهش می‌یابد.



(ب) دایره



(الف) مربع



(ج) مستطیل

شکل ۱۱: مقایسه نسبت سوراخ جان به ارتفاع جان نسبت به مقاومت برشی اسمی ( $V_n$ ) با ضخامت ۲ میلی‌متر در مقاطع با لبه و بدون لبه در مقاطع با شکل سوراخ (الف) مربع، (ب) دایره، (ج) مستطیل

## ۶ - نتیجه‌گیری

در این مطالعه عددی، ظرفیت برشی، نیروی برشی تسلیم و برش ماکزیمم با استفاده از روش (DSM) و اجزای محدود (FEM) برای تیرهای مقطع اشکل ساخته شده از دوپل C فولاد سرد نورد شده دارای سوراخ جان به طول تیر ۱۰۰۰ میلی‌متر با تکیه‌گاه مفصلی با متغیرهای شکل سوراخ، ابعاد سوراخ، فاصله سوراخ از تکیه‌گاه، ضخامت مقطع جان در مقاطع با و بدون لبه، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر قابل ذکر است:

- با افزایش ضخامت مقطع و کاهش نسبت لاغری جان، ظرفیت برشی و مقاومت نهایی مقطع افزایش می‌یابد.
- با افزایش ضخامت ورق، علی‌رغم افزایش عمق و طول زیاد سوراخ، تا حدی نیروی کمانش موضعی سوراخ و مقاومت برشی تسلیم افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت از ۲ میلی‌متر به ۲/۵ میلی‌متر و از ۲/۵ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر ظرفیت برشی به ترتیب حدود ۲۵٪ تا ۳۰٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت سوراخ از ۲ میلی‌متر به ۲/۵ میلی‌متر تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت تیر دارد.

- در سه شکل سوراخ مدل شده با سه اندازه متفاوت با مساحت معادل، تیر با شکل سوراخ مستطیل با نسبت طول به عرض ۲، سوراخ دایره و سوراخ مربع، به ترتیب بیشترین ظرفیت برشی تا کمترین ظرفیت برشی را دارند. ظرفیت برشی مستطیل حدود ۰.۴٪ بیشتر از دایره و ۰.۷٪ بیشتر از مربع است.

- هرچه قدر عمق سوراخ کمتر باشد مقاومت برشی افزایش می یابد و متغیر طول سوراخ تأثیر کمتری دارد. نسبت عمق سوراخ جان به ارتفاع جان (di/h) در سوراخ های مستطیل از ۰/۱۵ تا ۰/۴۳ و در سوراخ های دایره از ۰/۱۹ تا ۰/۵۹ و در سوراخ های مربع از ۰/۲ تا ۰/۶ است.

- در مدل های آنالیز شده به روش (FEM)، اثر تمرکز تنش بر روی سوراخ های ایجاد شده در جان مقطع بررسی شد. مقایسه حالت های شکست برشی و توزیع تنش نشان می دهد که کمانش موضعی تمام نمونه ها از محل سوراخ ایجاد شده است و الگوی تسلیم متقارن و تشکیل مفصل پلاستیک در اطراف گوشه های سوراخ است که تا لبه ها گسترش یافته است. وجود سوراخ های بزرگ، ظرفیت کمانش کلی مقطع را بیشتر تحت تأثیر قرار می دهد و باعث تغییر شکل های کمانش اعوجاجی می شود.

- با افزایش ابعاد سوراخ، به دلیل افزایش عمق و طول سوراخ افت قابل توجهی در ظرفیت برشی و مقاومت ماکزیمم مقطع ایجاد می گردد؛ بنابراین توصیه می شود از سوراخ های با ابعاد بزرگ تر در این مقاطع استفاده نشود. نیروی کمانش برشی الاستیک نهایی جان، با افزایش ابعاد سوراخ برای مستطیل و دایره کاهش تقریبی ۳۵٪ تا ۴۰٪ و برای مربع کاهش ۴۵٪ تا ۵۰٪ را دارد و با افزایش قطر سوراخ برای هر سه شکل کاهش ۵۰٪ تا ۵۵٪ وجود دارد.

- ظرفیت برشی و بار ماکزیمم مقاطع CFS، با کاهش فاصله سوراخ ها از یکدیگر به دلیل کاهش سختی کاهش می یابد. با افزایش فاصله سوراخ ها از یکدیگر عملکرد باز شو بهتر است و بار ماکزیمم حاصل از آنالیز اجزای محدود حدود ۴٪ تا ۶٪ افزایش می یابد.

- سوراخ های جان ظرفیت برشی مقطع را کاهش می دهد که برای افزایش ظرفیت مقطع و جبران اثرات ناشی از آن، از مقاطع با لبه استفاده می شود. وجود لبه باعث بهبود توزیع تنش و کمانش موضعی مقطع می گردد. همچنین افزایش مقاومت برشی ماکزیمم و مقاومت برشی اسمی را نسبت به مقاطع بدون لبه داریم. در مقاطع با لبه با سوراخ های دایره و مربع مقاومت برشی اسمی با افزایش ابعاد سوراخ کاهش تقریبی ۴۰٪ تا ۴۵٪ و در مستطیل کاهش ۶۱٪ تا ۶۴٪ مشاهده شد و در مقاطع بدون لبه مقاومت برشی اسمی در مقاطع مربع و دایره حدود ۳۵٪ تا ۴۰٪ کاهش می یابد. ولی در مقاطع مستطیل این کاهش به ضخامت بستگی دارد و بین ۵٪ تا ۱۵٪ متغیر است. به منظور تکمیل تحقیق حاضر می توان به بررسی آزمایشگاهی، افزایش طول تیر، افزایش و کاهش تعداد سوراخ، افزایش طول بال مقاطع و همچنین تأثیر تقویت لبه های سوراخ با حضور سختی عرشه بال مقاطع پرداخت.

## مراجع

- [1] LaBouLip R, Yu. W, Langan J, Shan M. (1997). Cold-Formed Steel webs with opening: Summary Report. Thin-Walled Structures, Vol (27), pp.79-84.
- [2] Elham Ghandi, Nayyer Mohammadi Rana, Shirin Esmaeili. (2020). Numerical study of the Liphavior of partially concrete- filled cold-formed steel columns, under simultaneous loading of static axial compressive load and axial. impact loading. Journal of Structural and Construction Engineering, Vol 8(8), pp. 310-329. [In Persian].
- [3] D. Moen C, Schafer B.W. (2008). Experiments on cold-formed steel columns with holes. Thin-Walled Structures, Vol (46), pp.1164-1182.
- [4] Moen C, Schafer B. (2009). Elastic buckling of cold-formed steel columns and Lipams with holes. Engineering Structures, Vol (31), 2812\_2824.
- [5] Moen D, Schafer B. (2011). Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes. Journal of Structural Engineering. Vol (137), p.p. 559-570.
- [6] Shanmugam N.E, Dhanalakshmi, M. (2001). Design for openings in cold-formed steel channel stub columns. Thin-Walled Structures, Vol (39), pp. 961-981.
- [7] Cao Hung Pham, Gregory J. Hancock. (2010). Direct Strength Design of Cold-formed C-sections in Combined Lipnding and Shear. 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- [8] Keerthan P, Mahendran M. (2011). Shear Liphavior and Strength of Lite Steel Lipams with Web Openings. Advances in Structural Engineering Vol (15), pp.171-184.

- [9] Keerthan P, Mahendran M. (2013). Experimental studies of the shear Liphavior and strength of Lipped channel Lipams with web openings. *Thin-Walled Structures* Vol (73), p.p. 131–144.
- [10] Amir M. Yousefi, James B.P. Lim, G. Charles Clifton. (2017). Cold-formed ferritic stainless steel un Lipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition. *Thin-Walled Structures*. Vol (116), p.p. 342-356. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.025.
- [11] Amir M Yousefi, James BP Lim, Asraf Uzzaman, Ying Lian, G Charles Clifton and Lipn Young. (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*. Vol. 20, P.P. 1024–1045. DOI: 10.1177/1369433216670170.
- [12] Amir M. Yousefi, James B.P. Lim, G. (2017). Charles. Cold-formed ferritic stainless steel un Lipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition – Part I: Tests and finite element model validation. *Clifton Thin-Walled Structures*. DOI: org/10.1016/j.tws.2017.03.026.
- [13] Wanniarachchi K.S, M. Mahendran, Keerthan P. (2017). Shear Liphavior and design of Lipped Channel Lipams with non-circular web openings. *Thin-Walled Structures* Vol (119), pp. 83-102. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.035.
- [14] Mitat Öztürk, Gokhan Yucel. (2020). Distortional buckling of cold-formed steel Lipams with different hole types. 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology.
- [15] Hung Pham C, Hancock J. (2020). Shear tests and design of cold-formed steel channels with central square holes. *J. Struct. Eng*, Vol (146), 04019173. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002464.
- [16] Cao Hung Pham, Gregory J. Hancock. (2020). Shear tests and design of cold-formed steel channels with central square holes. *Thin-Walled Structures* 149, 106650. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106650.
- [17] Duy Khanh Pham, Cao Hung Pham, Song Hong Pham, Gregory J. Hancock. (2020). Experimental investigation of high strength cold-formed channel sections in shear with rectangular and slotted web openings. *Journal of Constructional Steel Research* 165 (2020) 105889. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105889.
- [18] Xingyou Yao. (2021). Experimental Investigation and Load Capacity of Slender Cold-Formed Lipped Channel Sections with Holes in Compression. *Advances in Civil Engineering* Vol (2021), Article ID 6658099, 18 pages. DOI: 10.1155/2021/6658099.
- [19] Nan-ting Yua,b, Boksun Kimb, Xu-hao Huangc, Wei-bin Yuana, Rui Yea, Long Wua and Jia-jie Lea. . (2021). Analytical solution for flange/web distortional buckling of cold-formed steel Lipams with circular web perforations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. p.p. 3-26. DOI: 10.1080/15376494.2021.1902594.
- [20] MERVE SAGIROGLU MAALI, BURAK KANAN CIRPICI, MAHYAR MAALI and MUHAMMET SEMIH SOLAK. (2022). Influence of Lipam/gusset plate thicknesses on the moment–rotation capacity of cold-formed steel screwed back-to-back sections. *Indian Academy of Sciences. Sadhana* 47: 278. DOI: 10.1007/s12046-022-02057-0.
- [21] Fattouh M. F. Shaker, Zekriat Mamdooh, Ahmed Deifalla, and Mohamed M. Yehia. (2022). Experimental Investigations of the Liphavior of Stiffened Perforated Cold-Formed Steel Sections Subjected to Axial Compression. *Buildings* 2022,12, 812. DOI: org/10.3390/buildings12060812.
- [22] Vladimir Živaljević, Đorđe Jovanović, Dušan Kovac'ević and Igor Džolev. (2022). The Influence of Web Holes on the Liphaviour of Cold-Formed Steel MemLiprs: A Review. *Buildings* 2022, 12, 1091. DOI: 10.3390/buildings12081091.
- [23] Zhiyuan Fang, Krishanu Roy, Asraf Uzzaman, James B.P. Lim. (2022). Numerical simulation and proposed design rules of cold-formed stainless steel channels with web holes under interior-one-flange loading. *Engineering Structures* ·DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113566.
- [24] panelJinyou Zhao, Jiaqi Liu, Cheng Yu, Wenying Zhang. (2022) Test investigation and direct strength method on cold formed steel compression memLiprs with web holes of different widths. *Engineering Structures*. Vol (272), 114979. DOI: org/10.1016/j.engstruct.2022.114979.
- [25] Ngoc Hieu Pham. (2023). Investigation of Web Hole Effects on Capacities of Cold-Formed Steel Channel MemLiprs. *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Solutions in Hydropower Engineering and Civil Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering* 235, DOI:10.1007/978-981-99-1748-8\_13.
- [26] American Iron and Steel Institute (AISI S100-16.), North American Specification for The Design of Cold-Formed Steel Structural MemLiprs, 2022 Edition.