

بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار برشی تیرورق‌های به صورت سرد نورد سخت شده

مهدی مرادی^۱، سید مهدی زندی^{۲*}، حسین عموشاهی^۲

۱- کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

* نویسنده مسئول: سید مهدی زندی، اصفهان، صندوق پستی ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۴، ایمیل: s.m.zandi@eng.ui.ac.ir

چکیده

استفاده از تیرورق‌ها به‌عنوان تیرهای با دهانه‌های بزرگ، از یک سو می‌تواند جایگزینی برای مقاطع نورد شده‌ای باشد که در هر مکان و زمان امکان ساخت آن‌ها وجود ندارد و از سوی دیگر می‌تواند جهت تحمل بارهای بزرگی به کار رود که نیم‌رخ مناسب نورد شده‌ای برای آن وجود ندارد. جان تیرورق‌های معمولی می‌تواند تحت اثر بارهای وارده در معرض خطر کم‌انرژی قرار گیرد. یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کم‌انرژی جان، ایجاد پرس در جان تیرورق، به‌صورت سرد نورد شده است. ایجاد پرس در جان تیرورق باعث می‌شود که ورق حول محور ضعیف، از سختی هندسی و مقاومت بیشتری نسبت به حالت اولیه خود برخوردار شود. حال با توجه به این موضوع، نیاز به بررسی دقیق‌تر ظرفیت تیرورق‌های دارای پرس احساس می‌شود. به همین منظور در این مطالعه با استفاده از تحلیل ریکس^۱ ابعاد بهینه پرس به‌دست‌آمده و تاثیر آن بر کم‌انرژی الاستیک ورق و تیرورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تاثیر پرس در تیرورق‌های طویل ۶ متری مورد بررسی قرار گرفته و در پایان یک نمونه آزمایشگاهی ساخته می‌شود تا از صحت نتایج حاصل از نرم‌افزار اجزا محدود اطمینان حاصل کرد. با توجه به اینکه تا به امروز اطلاعات کمی در مورد رفتار تیرورق‌های دارای وجود دارد لذا نیاز به انجام تحقیقاتی در این مورد، کاملاً لازم و بجا است.

کلمات کلیدی

جان سرد نورد سخت شده، رفتار برشی، تیرورق، پرس، جان موج‌دار.

^۱ Riks

طی سالیان گذشته تحقیقات زیادی بر روی تیوروق‌های با جان ساده و موج‌دار صورت گرفته است. در این تحقیقات با به‌کارگیری روش‌های عددی و آزمایشگاهی مسائل مختلفی مانند رفتار خمشی، رفتار برشی، اثر خصوصیات هندسی ورق جان بر رفتار تیر، رفتار تیرهای مرکب با جان موج‌دار، رفتار تلفیقی جان موج‌دار با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده، رفتار تیرهای با جان موج‌دار تحت اثر بارهای چرخه‌ای و مسائلی از این دست مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده‌اند [۱].

تنش‌های برشی در نیمرخ‌های نورد شده و در تیرهایی که دارای دهانه‌های معمولی هستند، معمولاً تعیین‌کننده نیستند. به عبارتی مقاومت تیرهای معمولی در مقابل نیروهای برشی در مقایسه با مقاومت آن‌ها در برابر لنگرهای خمشی بیش‌تر است [۲]. اما در تیوروق‌ها و هم‌چنین تیرهای نورد شده که دارای دهانه کوچک بوده و بارهای سنگین را تحمل می‌کنند، ممکن است باعث بحرانی شدن تنش‌های ناشی از برش شوند. مقاومت در مقابل برش یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی است که باید در مواقعی که سازه‌هایی با ورق فولادی نازک طراحی می‌گردد، مورد توجه قرار گیرد. ریل^۱ و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۷ پاسخ‌های برشی تیوروق‌های فولادی ضد زنگ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تیوروق‌هایی با ابعاد و خصوصیات هندسی متفاوت، تحت بار برشی نزدیک به حالت سرویس در آزمایشگاه مورد تحلیل قرار گرفت و برای حصول اطمینان، نتایج با نرم‌افزارهای اجزا محدود مقایسه شد.

دالی^۲ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۷ مقاومت برشی عضو مقطع فولادی I- شکل سخت نشده را مورد بررسی قرار دادند. مطابق با نتایج در تیرهای I- شکل، وجود بال باعث توزیع یکنواخت تنش در جان مقطع می‌شود. بال به‌صورت مستقیم در تحمل تنش برشی نقش کمی بر عهده دارد و وجود آن باعث می‌شود که تنش حداکثر که در جان قرار دارد، کاهش یابد.

ورق‌های سخت‌کننده عرضی جان ورق‌هایی هستند که به‌صورت تیغه قائم و در فواصل a در طول تیر عمود بر جان در حد فاصل دو بال قرار داده می‌شود. در تیرهایی که مقطع آن با توجه به تنش برشی مجاز در برش جواب ندهد، می‌توان برای جلوگیری از کمانش قطری، از سخت‌کننده‌های عرضی استفاده کرد [۵].

وایت^۳ و بارکر^۴ [۶] در سال ۲۰۰۸ به مطالعه‌ی مقاومت برشی تیوروق‌های I- شکل با سخت‌کننده‌ی عرضی پرداختند. آن‌ها به تعیین مقاومت برشی تیوروق‌های دارای سخت‌کننده‌ی عرضی با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های زیاد پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که نمونه‌ی باسلر که در آیین‌نامه‌های AASHTO [۷] و AISC 2005 [۸] مورد استفاده قرار گرفته است.

جان^۵ [۹] در سال ۲۰۱۶ به مطالعه و آنالیز کمانش پیچشی جانبی بر اساس شبیه‌سازی اجزا محدود پرداخت. این مقاله بیانگر یک مدل‌سازی غیرخطی اجزا محدود و مطالعات عددی برای آنالیز و تعیین مقاومت یک تیر تحت خمش حول محور اصلی می‌باشد. مدل‌سازی اجزا محدود غیرخطی مواد و هندسه، بر اساس المان‌های سه بعدی انجام شده و اثرات عیوب اولیه بر حالت حدی نهایی تیر فولادی مورد بررسی قرار گرفت.

تا اینجا به بررسی مقاومت برشی تیوروق‌های با جان ساده پرداخته شد. حال به مطالعه‌ی تیوروق‌های با جان موج‌دار و بررسی انواع تغییرشکل‌های ایجاد شده در جان تیوروق‌ها پرداخته می‌شود. برای اولین بار استفاده از تیوروق با جان موج‌دار توسط هرمان^۶ در شیکاگو ایالات متحده به عنوان یک اختراع ثبت شد و هدف اصلی استفاده از این ایده جلوگیری از کمانش ورق جان بود [۱۰].

الگالی^۷ و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۷ مقاومت خمشی تیرهای فولادی با جان موج‌دار را تحت بررسی قرار دادند، طی تحقیقات صورت گرفته مشخص شد که استفاده از ورق‌های موج‌دار باعث بهبود پایداری تیر در اثر کمانش جانبی پیچشی نیز می‌گردد [۱۲] و

¹ Real

² Daley

³ White

⁴ Barker

⁵ J. Valeš

⁶ Herman

⁷ Elgaaly

در آزمایشات مشاهده شد که مهار جانبی تیر در اثر تیرهای معمول از حساسیت بالایی برخوردار نمی‌باشند. این نوع تیروورق‌ها عمدتاً در کشورهای ژاپن، فرانسه، آلمان، ایالات متحده آمریکا ساخته شده‌اند [۱۳].

در سال ۲۰۱۰ [۱۴] تحلیل ظرفیت باربری تیرهای با جان موجدار سینوسی دارای بازشدگی مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه‌ای منحنی‌های بار-تغییرمکان نشان داد که هر چه میزان موجدار بودن جان بیشتر باشد، سختی نهایی کمتر است [۱۵]. قابل ذکر است که تعداد تکرار موج‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر بارهای کمانش برشی الاستیک دارد [۱۶]. همچنین برخلاف پانل‌های دوزنقه‌ای، در ورق‌های سینوسی کمانش موضعی و کلی در پایین‌ترین حالت خود مشاهده می‌شوند و اثر رفتار کمانشی در آن‌ها ناچیز است [۱۷]. جان‌های موجدار دوزنقه‌ای باعث افزایش بسیاری از ویژگی‌های تیروورق شده که بسیار در بحث طراحی سازه‌ها مهم است [۱۸]. تیرهایی با جان موجدار دوزنقه‌ای، حالت شکست جان می‌تواند به صورت کمانش محلی یا کلی و یا هر دو باشد [۱۹]. در میان عوامل بسیاری که بر ظرفیت نهایی و حالت کمانش تیروورق‌هایی با جان موجدار دوزنقه‌ای مؤثر هستند می‌توان به عمق، زاویه و عرض موج دوزنقه‌ای اشاره کرد [۲۰].

جان تیروورق‌های معمولی با ورق مسطح، می‌تواند تحت اثر بارهای وارده در معرض خطر کمانش قرار گیرد. برای جلوگیری از کمانش جان، یا باید ضخامت جان را زیاد کرد و یا از سخت‌کننده‌های طولی و عرضی استفاده نمود. یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کمانش جان، موجدار کردن جان به وسیله ایجاد تغییر شکل موضعی در آن است. به دلیل استفاده از نورد سرد در تولید این نوع از تیروورق‌ها، ساخت آن‌ها روند نسبتاً ساده و کم هزینه‌ای دارد. ایجاد پرس در ورق‌های تخت نازک تیروورق‌ها باعث می‌شود که ورق حول محور ضعیف، از سختی هندسی و مقاومت بیشتری نسبت به حالت اولیه خود برخوردار شود. سبکی، مقاومت بالا، سختی خارج از صفحه و سهولت کاربرد از ویژگی‌های مناسب این تیروورق‌ها است. بنابراین به‌کارگیری آن‌ها در هر سازه‌ای می‌تواند به کم کردن وزن سازه، تامین مقاومت با مصرف مصالح کمتر، تسهیل در ساخت و در نتیجه اقتصادی شدن طرح کمک کند. یکی از نکات مهم این تحقیق، کاهش استفاده از سخت‌کننده‌ها در جان تیروورق بوده که مهم‌ترین نتیجه آن کاهش هزینه‌های ساخت و ساز است. ایده اصلی این طرح در سال ۱۹۹۷ توسط شرکت Goldbeck [۲۱] مطرح و ساخته شد. با توجه به اینکه تا به امروز رفتار تیروورق‌های دارای پرس فاقد اطلاعات تحلیلی و آزمایشگاهی لازم بوده و مطالعات بسیار کمی در مورد آن انجام شده لذا نیاز به انجام تحقیقاتی در این مورد، کاملاً لازم و بجا است. [۲۲]

سحر کرکزن و مهدی زندی [۲۳] در سال ۱۳۹۷ به تحلیل رفتار برشی تیروورق فولادی با جان موجدار محلی تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی پرداختند. در این مطالعه تنها به تعیین ابعاد بهینه پرس برای تیروورق‌های ۱m، ۲m و ۴m با استفاده از حل‌گر استاتیک جنرال در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. اما در تحقیق پیش رو از حل‌گر ریکس در کلیه تحلیل‌ها استفاده شده که در مسائل مربوط به حوزه کمانش و تحلیل پس کمانش بسیار کارآمدتر است. در مطالعه حال حاضر با استفاده از حل‌گر ریکس به تعیین ابعاد بهینه پرس، تأثیر پرس در رفتار برشی و ظرفیت باربری تیروورق‌های طولی و همچنین ساخت یک نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده که این مطالعه را بسیار با ارزش‌تر و کامل‌تر کرده است.

۲- مدل اجزاء محدود

به منظور مطالعه پارامتریک نمونه‌ها تحت بار یکنواخت پوش‌آور از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. حل‌گر ریکس در تحلیل رفتار سازه‌هایی که دارای ناپایداری محلی یا کلی هستند، به‌ویژه مسائل مربوط به حوزه کمانش و تحلیل پس کمانش با در نظر گرفتن نقص هندسی^۱ بسیار کارآمد و توانمند بوده است. در مسائل غیرخطی شامل کمانش غیرخطی و هنگامی که پاسخ نیرو-جابجایی، یک سختی منفی نشان می‌دهد و سازه باید انرژی کرنشی را به‌منظور ماندن در حالت تعادل آزاد کند، از تحلیل ریکس

^۱ Imperfection

استفاده می‌شود. بنابراین صحت‌سنجی و همچنین تحلیل کلیه نمونه‌ها بر اساس تحلیل ریکس انجام می‌شوند. شرایط مرزی و نحوه بارگذاری، شبکه‌بندی و خصوصیات مصالح استفاده شده در این پژوهش در ادامه بیان می‌شود.

۱-۲- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های المان محدود انتخاب نوع، تعداد و سائز مش‌ها برای تحلیل سازه می‌باشد. المان استفاده شده در این تحقیق المان پوسته‌ای است که این نوع المان‌ها دارای مقاومت خمشی، برشی، پیچشی و محوری است. به‌طور کلی هر گره المان پوسته‌ای دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. به‌منظور شبکه‌بندی در تمامی مدل‌ها از المان SAR5 استفاده شده است. المان SAR5 به ترتیب بیان‌گر المان پوسته‌ای دارای ۸ گره با انتگرال کاهش یافته^۱ است که هر گره دارای ۵ درجه آزادی می‌باشد. شرایط مرزی تیورق از نوع مفصلی در یک طرف و غلتکی در طرف دیگر می‌باشد. یعنی از جابجایی تیر در راستای x ، y و z در قسمت مفصلی و در راستای x و y در قسمت غلتکی جلوگیری شده است. همچنین از حرکت جانبی تیرها نیز در راستای عمود بر صفحه یعنی x جلوگیری شده است (شکل ۱). جهت اعمال شرایط مرزی مذکور در نرم افزار آباکوس از ماژول Load استفاده شده به طوری که در بخش Boundary condition برای ناحیه مفصلی U_x ، U_y و U_z و برای ناحیه غلتکی U_x و U_y مقید شده است. در این پژوهش جهت اعمال نقص هندسی اولیه لازم است دو تحلیل انجام می‌گیرد، ابتدا یک تحلیل کمناشی بر روی سازه ایده‌آل انجام داده تا مدهای کمناشی آن حاصل شود، برای ذخیره شدن جابه‌جایی گره‌ها در هر مد کمناشی از دستور ۱ استفاده می‌شود، سپس در تحلیل ریکس با استفاده از دستور ۲ این مدهای کمناشی به عنوان نقص هندسی اولیه تعریف می‌شود. اعمال مقدار نقص هندسی اولیه به صورت برهم نهی ضرایب مدهای کمناشی می‌باشد. در این پایان‌نامه از مدهای ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب با مقدارهای ۴mm، ۳mm، ۲mm و ۱mm به عنوان نقص هندسی اولیه استفاده می‌شود، ضمن بیان این نکته که چند مد اول رفتار واقعی سازه را بیشتر نشان می‌دهند.

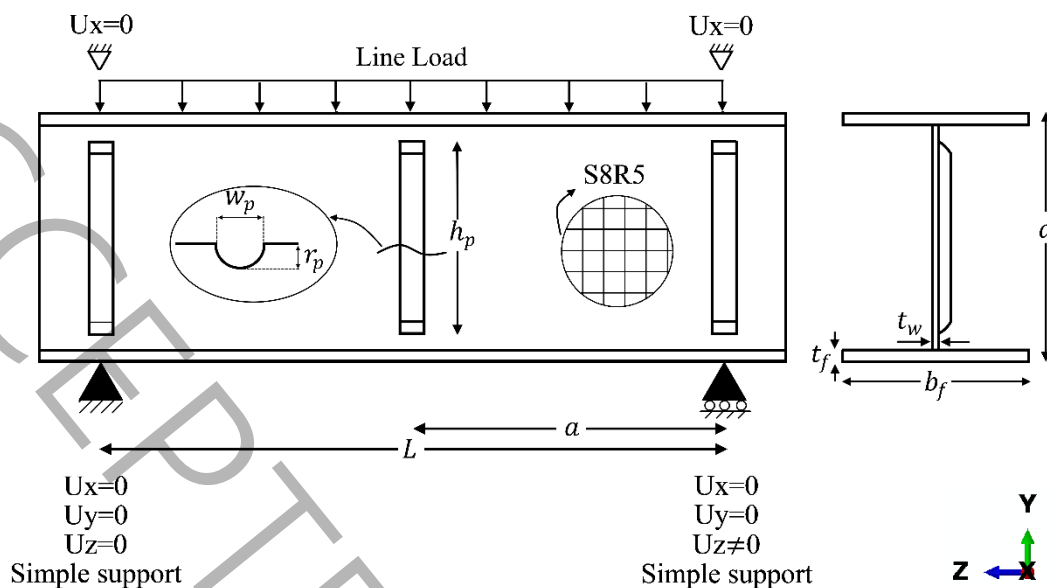
*Node file U,	دستور ۱
*Imperfection, File=result file, Step=step, NSET=name	دستور ۲

بر اساس شکل ۱، در این تحلیل یک بارگذاری یکنواخت خطی به قسمت بالایی تیر وارد شده تا ظرفیت باربری نمونه‌ها حاصل شود. جهت اعمال بارگذاری یکنواخت خطی در نرم افزار آباکوس از ماژول Load استفاده شده و بعد از وارد کردن مقدار بار از روش ریکس جهت بارگذاری استفاده می‌شود. روش ریکس ترکیبی از روش نیوتن رافسون و روش طول کمان می‌باشد و از نمو طول کمان برای افزودن بار استفاده می‌کند. اولین نمو طول کمان توسط کاربر تعریف می‌شود و بقیه نموها را آباکوس در جهت همگرا سازی به صورت خودکار اعمال می‌نماید و بارگذاری یکنواخت خطی به این صورت اعمال می‌گردد. بارگذاری در روش ریکس به صورت نسبی بوده و بار نهایی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$P_{total} = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0) \quad (1)$$

مقدار P_0 بار مرده اولیه سازه بوده و P_{ref} بار وارد بر سازه می‌باشد. λ ضریب تناسبی بار بوده که آباکوس تنها این ضریب را در هر نمو نشان می‌دهد.

¹ Reduced Integration

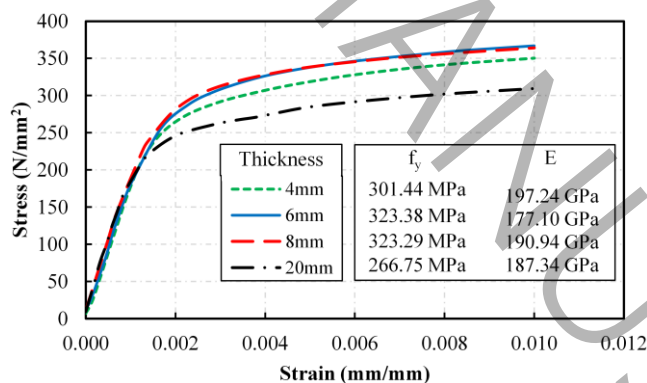


شکل ۱ شرایط مرزی و مشخصات هندسی تیرورق سرد نورد سخت شده

Figure 1. Boundary conditions and geometric characteristics of plate girder by hardened cold-rolled web

۲-۲- رفتار مکانیکی فولاد

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی خصوصیات تنش- کرنش فولاد در نرم‌افزار اجزاء محدود از مقاله ریل و همکاران [۳] استفاده شده است. بر اساس این مقاله، مشخصات فولاد مصرفی به تفکیک ضخامت هر ورق، طبق نمودار تنش-کرنش شکل ۲ است. برای تعریف ناحیه‌ی الاستیک در تمامی مدل‌ها، نسبت پواسون $\nu = 0.3$ و همچنین چگالی فولاد برابر با 7850 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

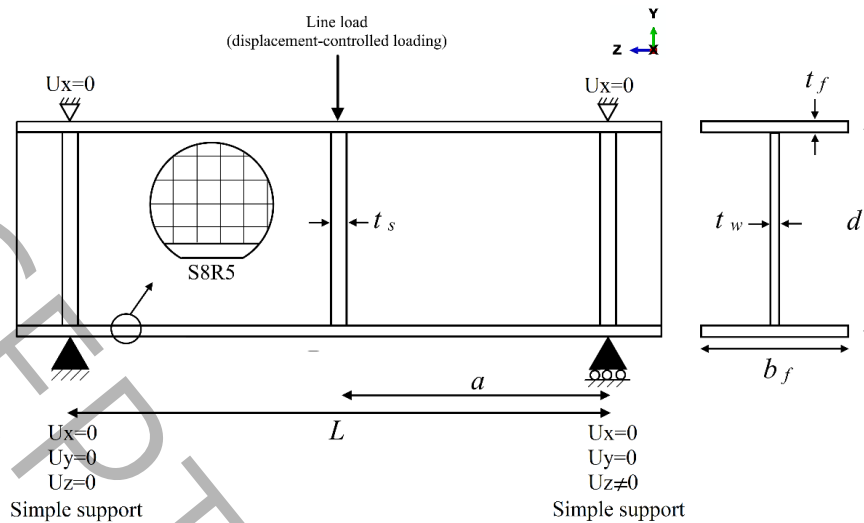


شکل ۲ نمودار تنش-کرنش ورق‌ها با ضخامت متفاوت [۳]

Figure 2: Stress-strain diagram of plates with different thickness [3]

۳- صحت‌سنجی و ساخت نمونه آزمایشگاهی

به منظور اعتبارسنجی و صحت عملکرد مدل اجزاء محدود، نتایج آزمایشگاهی ریل و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. دو پارامتر مهم در این مطالعه لاغری جان و ابعاد دهانه است، به همین منظور جهت صحت‌سنجی ۲ عدد تیرورق مدل شده است. ابعاد هندسی، شرایط مرزی، خصوصیات مصالح و بارگذاری مشابهی برای شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده رفتار برشی از تیرورق‌های دو سر مفصل با طول دهانه کوچک و عمق زیاد تحت بار متمرکز استفاده شده است که شکل ۳ ابعاد هندسی و شرایط مرزی آن را نشان می‌دهد. همچنین ابعاد نمونه‌های مورد بررسی در ذکر شده است.



شکل ۳ مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری تیرورق [۳]

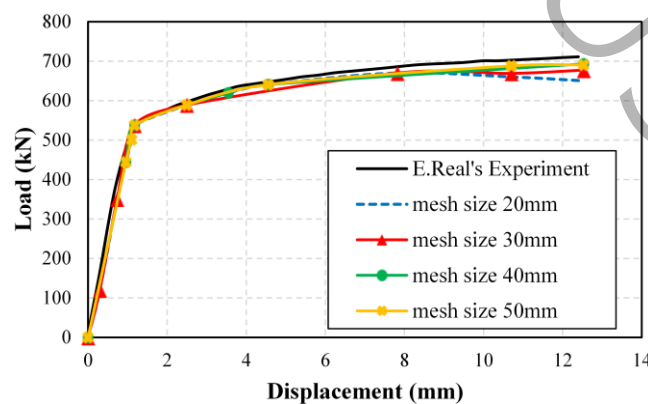
Figure 3. Geometric specifications and loading conditions of the beam [3]

جدول ۱ مشخصات هندسی تیرورق‌ها جهت صحت‌سنجی [۳]

Table 1. Geometric characteristics of beams for verification [3]

Girder	L	a	d	t_w	t_f	t_s	b_f
Unit	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
ad1w4	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰	۲۰۰
ad15w4	۱۵۰۰	۷۵۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰	۲۰۰

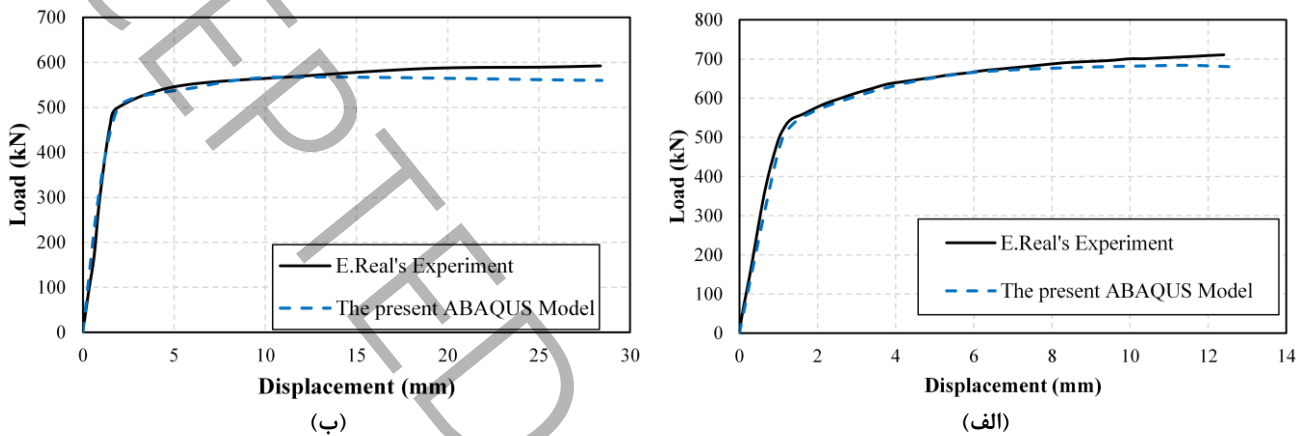
به‌منظور تعیین بهترین ابعاد شبکه‌بندی و همچنین اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، یک آنالیز حساسیت برای اندازه شبکه‌بندی (مش) انجام شده است. بنابراین تیرورق ad1w4 تحت تحلیل ریکس با اندازه شبکه‌های ۲۰mm، ۳۰mm، ۴۰mm و ۵۰mm مدل شده و نمودارهای بار-تغییر مکان آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۴ مقایسه شد. بر اساس نتایج شکل ۴ نمونه‌هایی با اندازه شبکه ۴۰mm و ۵۰mm انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین اندازه شبکه ۵۰mm برای مدل غیرخطی اجزا محدود در نظر گرفته می‌شود، همچنین از این اندازه شبکه، برای شبیه‌سازی تمام مدل‌های مطالعه پارامتری استفاده شده است.



شکل ۴ مقایسه منحنی‌های بار-تغییر مکان نمونه‌ها با اندازه شبکه‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی جهت حساسیت سنجی شبکه

Figure 4. Comparison of load-displacement curves of samples with different grid sizes with laboratory results for grid sensitivity

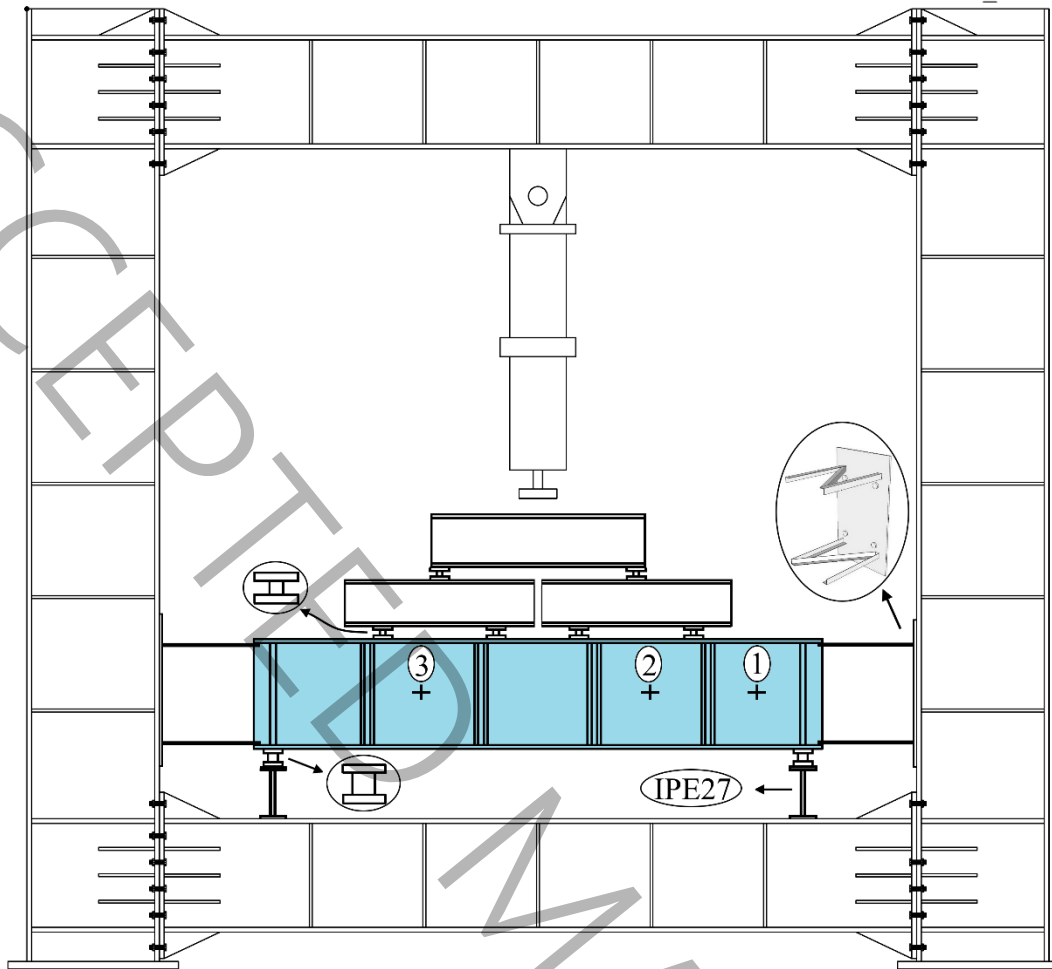
بررسی نتایج آزمایشگاهی و مقایسه‌ی آن با نتایج مدل‌سازی اجزا محدود، جهت اطمینان از عملکرد مدل‌های این مطالعه و دقت تحلیل آن حائز اهمیت بوده و در حصول نتایج قابل اطمینان موثر می‌باشد. به همین منظور نتایج آزمایشگاهی و عددی اجزا محدود مربوط به منحنی تغییر مکان تیورق‌های ad1w4 و ad15w4 در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، مدل اجزا محدود به خوبی رفتار تیورق تحت بارگذاری پوش‌آور را شبیه‌سازی کرده و انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی فراهم کرده است. بر اساس نتایج اجزا محدود، حداکثر نیروی تحمل شده در تیورق ad1w4 برابر ۶۸۱ kN و در تیورق ad15w4 برابر ۵۶۰ kN می‌باشد که به ترتیب بیان‌گر ۴۲٪ و ۵/۴۱٪ خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.



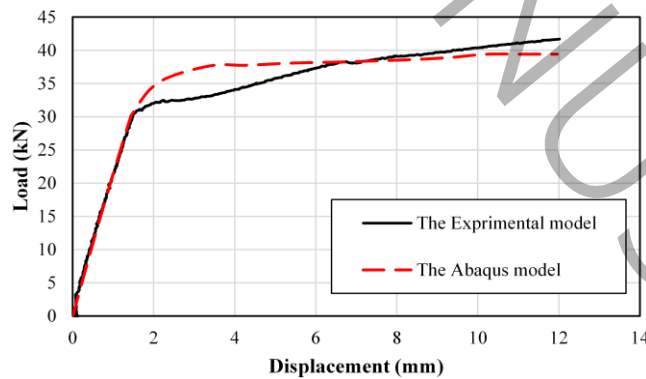
شکل ۵ مقایسه نتایج بار - تغییر مکان (الف) تیورق ad1w4 (ب) تیورق ad15w4

Figure 5. Comparison of load-displacement results a) ad1w4 beam b) ad15w4 beam

به‌منظور اطمینان از صحت نتایج عددی نرم‌افزار آباکوس مبنی بر افزایش ظرفیت تیورق به‌وسیله پرس، یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. در ادامه به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمونه‌ی ساخته شده در آزمایشگاه پرداخته می‌شود. در این نمونه با توجه به اینکه ساخت قالب استوانه‌ای بسیار هزینه‌بر بوده، لذا امکان ایجاد پرس به‌صورت استوانه‌ای شکل در جان تیورق وجود نداشت. راه‌کاری که برای حل این مشکل در نظر گرفته شده استفاده از خم دوزنقه‌ای شکل در جان تیورق است. ابعاد دوزنقه‌های ایجاد شده در جان طوری به‌دست‌آمده است که ظرفیت باربری تیورق دارای خم دوزنقه‌ای مشابه نمونه‌ی دارای پرس استوانه‌ای آن باشد.



شکل ۶ قاب آزمایشگاهی و شیوه قرارگیری نمونه در آن
Figure 6. Experiment setup



شکل ۷ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تیرورق دارای خم دوزنقه‌ای
Figure 7. Comparison of numerical and experimental results of a beam with a trapezoidal bend

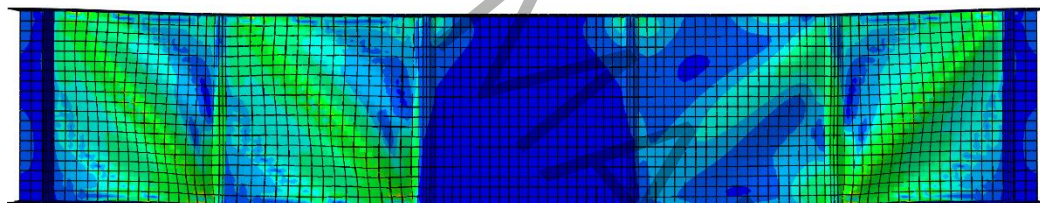
با مقایسه‌ی دو منحنی مربوطه، یعنی منحنی حاصل از آنالیز عددی نرم‌افزار آباکوس و منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مطابقت خیلی مناسبی دارد. به بیان دقیق‌تر می‌توان گفت همان‌طور که در نتایج عددی با ایجاد خم دوزنقه‌ای در جان تیرورق، ظرفیت باربری آن افزایش یافت، این افزایش ظرفیت در نمونه

آزمایشگاهی نیز مشاهده شد. ناحیه خطی دو منحنی به خوبی بر هم منطبق بوده اما در ناحیه غیرخطی یا پلاستیک، اختلافی جزئی قابل مشاهده است.

در شکل ۸-الف می‌توان به خوبی کمانش برشی که در جان نمونه آزمایشگاهی ایجاد شده است را مشاهده کرد. همچنین شکل تغییرشکل یافته نمونه مدل سازی شده در نرم‌افزار آباکوس و کمانش برشی که در جان آن رخ داده است به خوبی در شکل ۸-ب قابل رویت است.



(الف)



(ب)

شکل ۸ مقایسه تغییرشکل‌های ایجاد شده در تیوروق دارای خم دوزنقه‌ای (الف) آزمایش و (ب) مدل اجزاء محدود

Figure 8 Comparison of the deformations created in the beam with trapezoidal bend a) experiment and b) FE model

۴- بررسی پارامتریک اثر پرس جان بر ظرفیت برش تیرها

پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار و تسلط بر نکات مهم در روند حل و مدل‌سازی یک تیوروق، لازم است برای تحقق اهداف این تحقیق نمونه‌هایی تعریف و با نرم‌افزار تحلیل گردند. در این تحقیق اثر پنج پارامتر اصلی بر رفتار تیوروق‌های سرد نورد سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است که شامل ارتفاع پرس، عمق پرس، عرض پرس، ضخامت جان، طول تیر می‌باشند. پس از انجام تحلیل بر روی نمونه‌ها، منحنی‌های رفتاری مربوطه مانند نمودار بار-تغییر مکان ارائه می‌شود. نتایج حاصل از این آنالیزها شامل ابعاد بهینه پرس، اثر پرس بر رفتار ورق و تیوروق و اثر طول دهانه بر رفتار پرس در هر حالت است.

۴-۱- تعیین مناسب‌ترین ابعاد پرس

منظور از تعیین مناسب‌ترین بعد، به دست آوردن بعدی است که در آن حالت، تیوروق بیشترین بار را تحمل می‌کند. در تمامی مراحل مدل‌سازی، هدف، افزایش ظرفیت باربری تیوروق‌های سرد نورد سخت شده نسبت به تیوروق‌های ساده است. به همین منظور

نمونه‌های مورد نظر (شکل ۱) برای انجام آنالیز و تعیین ابعاد بهینه در جدول ۲ تا جدول ۴ آورده شده است. در این نمونه‌ها عرض پرس (w_p)، عمق پرس (r_p)، ارتفاع پرس (h_p)، ضخامت جان (t_w) و طول دهانه تیرورق (L) پارامترهای متغیر مورد بررسی در این تحقیق هستند. عرض و ضخامت بال تیرورق به ترتیب ۲۰۰ mm و ۲۰ mm در نظر گرفته شده است. در تمام حالات مقدار پارامتر a طوری انتخاب شده است که نسبت a/d برابر یک باشد.

جدول ۲ مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در حالت عرض پرس متغیر

Table 2. Characteristics of the examined samples with variable press width

شماره نمونه	نمونه	L	t_w	w_p	r_p	h_p	d
واحد	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	Wp1	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۲۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۲	Wp2	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۳	Wp3	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۶۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۴	Wp4	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۸۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۵	Wp5	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۱۰۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰

جدول ۳ مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در حالت شعاع پرس متغیر

Table 3. Characteristics of the examined samples with variable press radius

شماره نمونه	نمونه	L	t_w	w_p	r_p	h_p	d
واحد	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	Rp1	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۵	۴۵۰	۵۰۰
۲	Rp2	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۱۰	۴۵۰	۵۰۰
۳	Rp3	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۴	Rp4	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۲۵	۴۵۰	۵۰۰
۵	Rp5	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۳۰	۴۵۰	۵۰۰

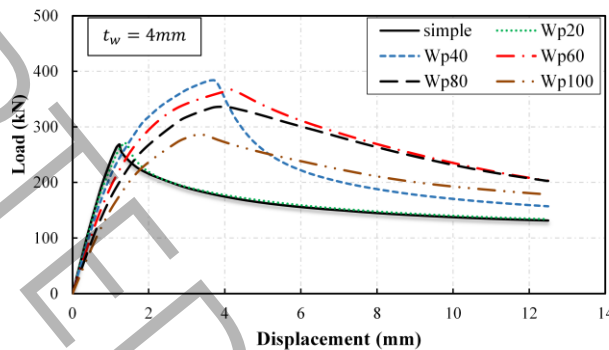
جدول ۴ مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در حالت عمق پرس متغیر

Table 4. Characteristics of the examined samples with variable press depth

شماره نمونه	نمونه	L	t_w	w_p	r_p	h_p	d
واحد	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	Hp1	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۵	۳۰۰	۵۰۰
۲	Hp2	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۱۰	۳۵۰	۵۰۰
۳	Hp3	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۲۰	۴۰۰	۵۰۰
۴	Hp4	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۲۵	۴۵۰	۵۰۰
۵	Hp5	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴-۶-۸	۴۰	۳۰	۴۸۰	۵۰۰

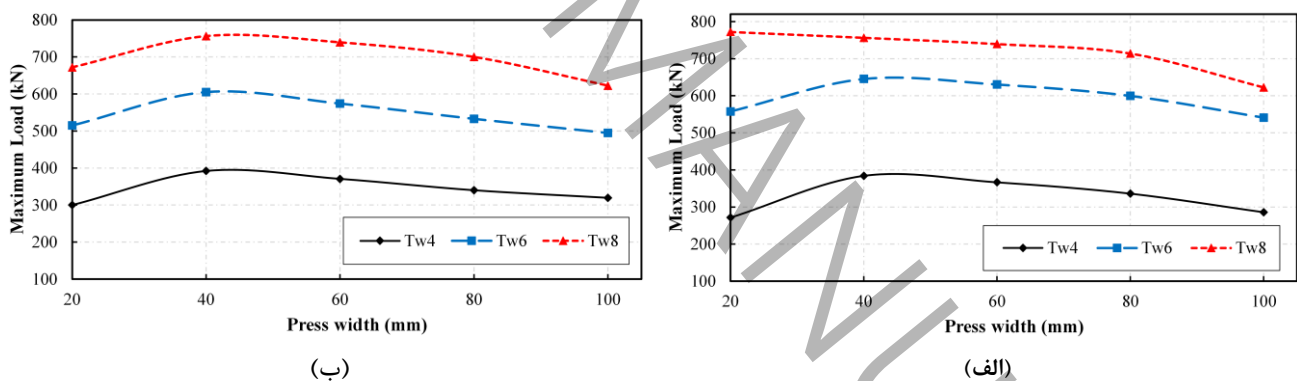
تعیین مناسب‌ترین عرض پرس (w_p)

برای بررسی تاثیر عرض پرس بر روی میزان بار در تیوروق، آنالیز با عرض‌های مختلف 20mm ، 40mm ، 60mm ، 80mm و 100mm صورت می‌گیرد. برای اینکه از صحت مقایسه اطمینان حاصل نمود، سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند. بر اساس شکل ۹ پرس با عرض 20mm تقریباً هیچ تاثیری در افزایش مقاومت تیوروق با ضخامت جان 4mm نداشته است. با توجه به شکل ۱۰ با تقریب خوبی می‌توان گفت که در تمامی حالات پرس با عرض 40mm بالاترین ظرفیت تیوروق را به ارمغان می‌آورد و با افزایش بیش‌تر عرض پرس، ظرفیت تیوروق کاهش می‌یابد.



شکل ۹ ظرفیت باربری نمونه‌ها برای عرض‌های مختلف پرس ($L = 1\text{m}$ و $t_w = 4\text{mm}$)

Figure 9. Loading capacity of samples for different widths of the press ($t_w = 4\text{mm}$, $L = 1\text{m}$)

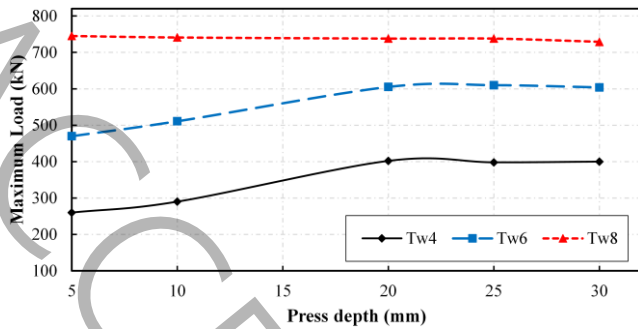


شکل ۱۰ ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها برحسب تغییرات عرض پرس (الف) طول دهانه تیر 1m و (ب) طول دهانه تیر 2m

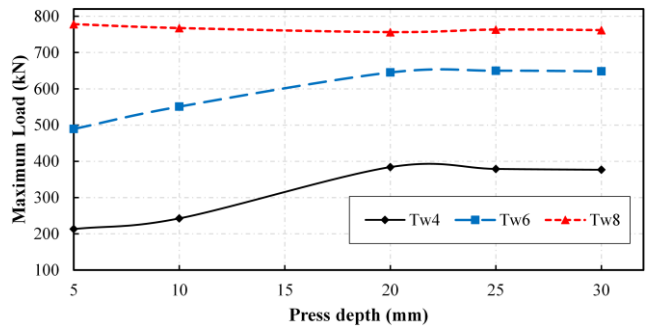
Figure 10. Maximum capacity of samples in terms of changes in press width
a) length of beam 1m and b) length of beam 2m

تعیین مناسب‌ترین عمق و ارتفاع پرس (h_p و r_p)

بر اساس شکل ۱۱ در اکثر نمونه‌ها، ظرفیت باربری به ازای عمق پرس 20mm به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از طرفی در تمام نمونه‌هایی که عمق پرس آن‌ها از 20mm بیش‌تر است، تغییری در حداکثر نیروی قابل تحمل آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به همین منظور پرس با شعاع 20mm انتخاب مناسبی است. جهت تعیین ارتفاع بهینه پرس مطابق شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که از ارتفاع 400mm و بیش‌تر ظرفیت باربری تیوروق تقریباً ثابت است. با توجه به نکات اجرایی مانند فاصله مورد نیاز برای جوش کاری و عملیات پرس زدن، ارتفاع پرس معمولاً چند سانتی‌متر کمتر از ارتفاع جان در نظر گرفته می‌شود.



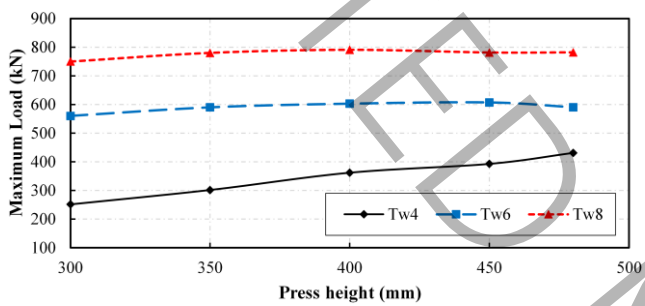
(ب)



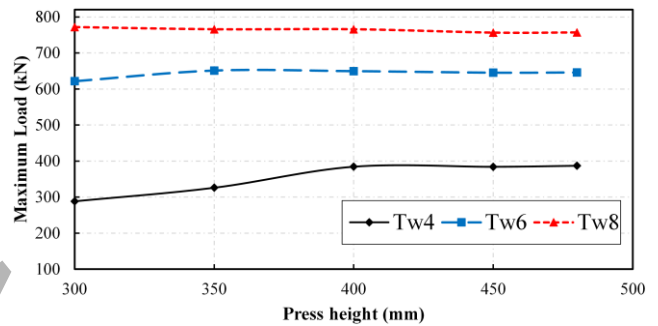
(الف)

شکل ۱۱ ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها برحسب تغییرات عمق پرس الف) طول دهانه تیر ۱م و ب) طول دهانه تیر ۲م

Figure 11. Maximum capacity of samples in terms of changes in press depth
a) length of beam 1m and b) length of beam 2m



(ب)



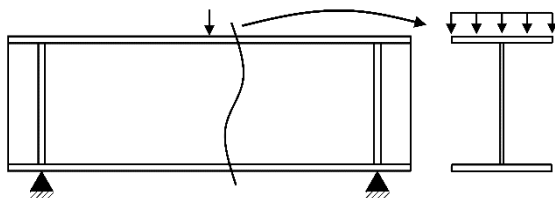
(الف)

شکل ۱۲ ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها برحسب تغییرات ارتفاع پرس الف) طول دهانه تیر ۱م و ب) طول دهانه تیر ۲م

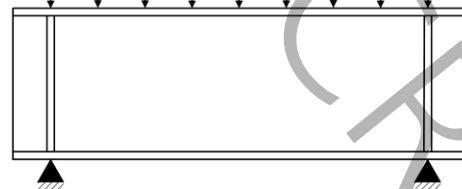
Figure 12. Maximum capacity of samples in terms of changes in press height
a) length of beam 1m and b) length of beam 2m

تأثیر اثر بارگذاری تیرورق بر ظرفیت برشی تیرهای دارای پرس

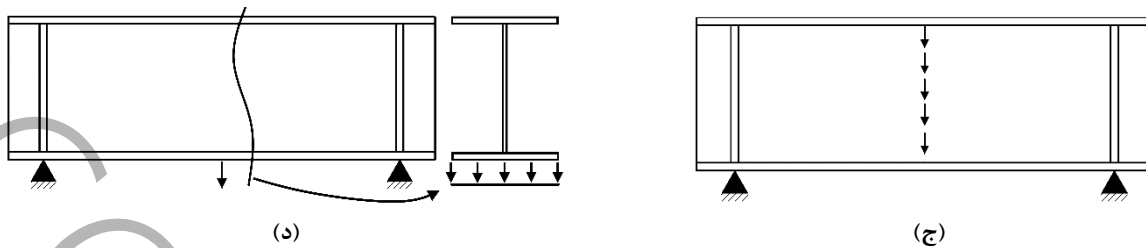
برای دست یافتن به درک بهتر از تأثیر بارگذاری بر ظرفیت برشی تیرهای دارای پرس در ادامه انواع حالات بارگذاری که شامل الف) بارگذاری خطی در طول بال فوقانی، ب) بارگذاری خطی در عرض بال فوقانی، ج) بارگذاری خطی در جان و د) بارگذاری خطی در عرض بال پایینی هستند مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در شکل ۱۳ انواع حالات بارگذاری که برای تیرورق ساده و پرس مشابه است، بیان می‌گردد.



(ب)



(الف)

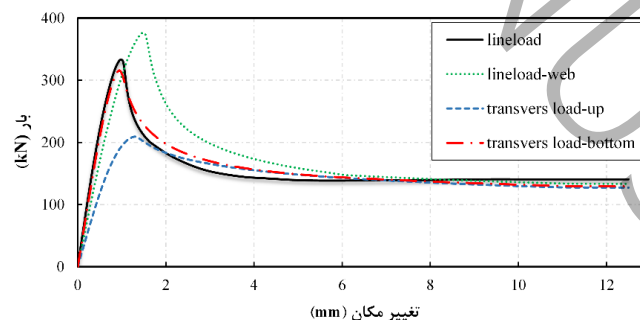


شکل ۱۳ انواع حالت بارگذاری در تیرورق، الف) بارگذاری خطی در طول بال فوقانی، ب) بارگذاری خطی در عرض بال فوقانی، ج) بارگذاری خطی در جان و د) بارگذاری خطی در عرض بال پایینی

Figure 13. Types of loading mode in the beam, a) linear loading along the length of the upper wing, b) linear loading across the width of the upper wing, c) linear loading in the web and d) linear loading across the width of the lower wing

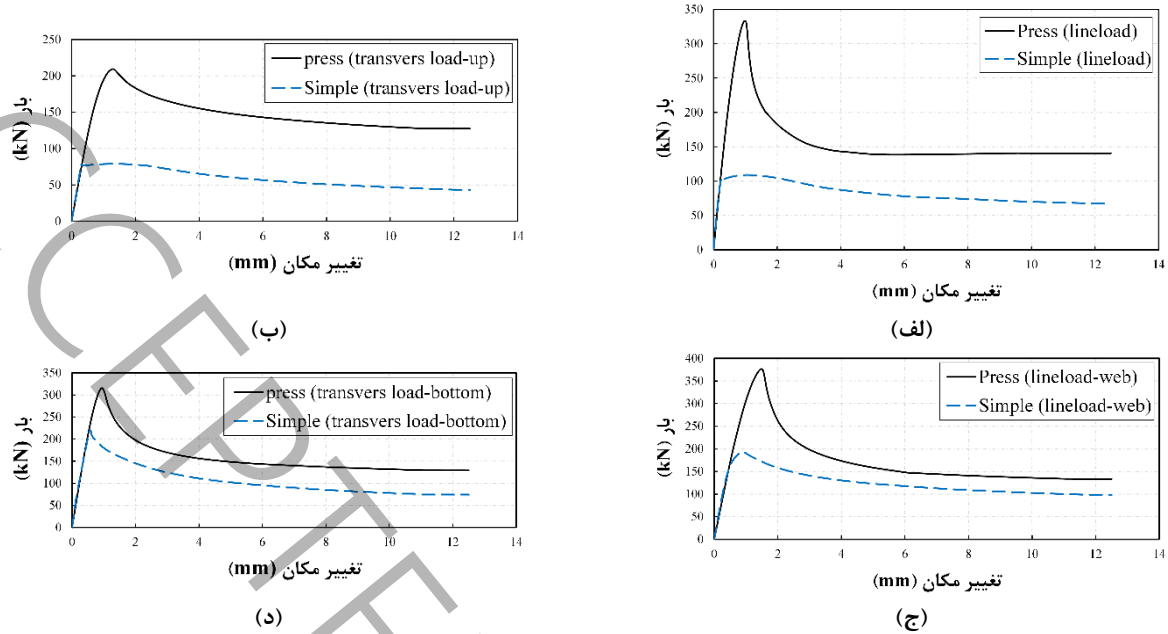
نمودارهای بار- تغییر مکان حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل ۱۴ آورده شده است. از مقایسه این نمودارها می‌توان متوجه شد که بیشترین ظرفیت باربری در تیرورق سرد نورد سخت شده هنگامی حاصل شده که بارگذاری در وسط جان اعمال شده است. هم‌چنین کمترین ظرفیت برشی در بارگذاری خطی در عرض بال فوقانی تیرورق (حالت ب) به‌دست‌آمده است. دلیل این موضوع است که در حالات الف) و ج) از آنجا که بار به‌صورت خطی وارد شده بحث لهدیگی و کمانش موضعی جان کمتر اتفاق افتاده و از این‌رو ظرفیت باربری در تیرورق تا حد زیادی بیشتر است. در حالت ب)، تیرورق در معرض تسلیم موضعی جان و لهدیگی جان در برابر نیروی متمرکز فشاری است از این‌رو کمترین ظرفیت باربری به‌دست‌آمده است. هم‌چنین در حالت د) با توجه به اینکه تیرورق سرد نورد سخت شده بار قابل توجهی را تحمل کرده می‌توان گفت که تسلیم موضعی جان کمتر اتفاق افتاده است. در شکل ۱۶ لهدیگی‌های ایجاد شده در جان مشخص است.

بنابراین اعمال بار خطی در عرض بال فوقانی تیرورق، باعث مشکلاتی مانند تسلیم موضعی و لهدیگی جان شده و مانع بروز رفتار واقعی تیرورق سرد نورد سخت شده می‌شود. هم‌چنین اعمال بارگذاری خطی به جان و بال پایینی تیرورق در عمل و آزمایشگاه تقریباً سخت و غیرممکن می‌باشد، از این‌رو حالت الف) یعنی بارگذاری خطی در طول بال فوقانی بهترین نوع بارگذاری برای موضوع مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد. به‌منظور درک بهتر نتایج هر یک از حالات بارگذاری برای تیرورق ساده و دارای پرس را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده کرد.



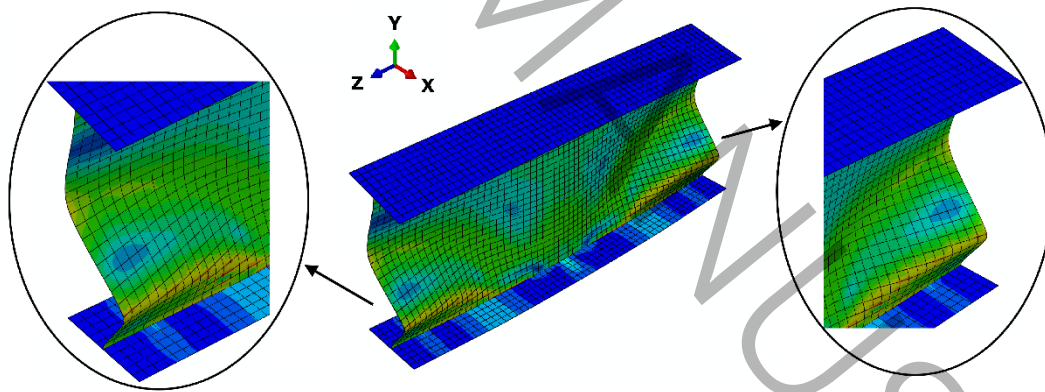
شکل ۱۴ نمودار بار-تغییر مکان در انواع حالت‌های بارگذاری برای تیرورق ۱ متری

Figure 14. Load-displacement diagram in various loading modes for a 1m beam



شکل ۱۵ ظرفیت باربری نمونه‌های ۱m با حالت‌های بارگذاری، الف) خطی در طول بال فوقانی، ب) خطی در عرض بال فوقانی، ج) خطی در طول جان و د) خطی در عرض بال پایینی

Figure 15. The bearing capacity of 1m samples with loading modes, a) linear along the upper wing, b) linear along the width of the upper wing, c) linear along the web and d) linear along the width of the lower wing



شکل ۱۶ کمانش فشاری قائم در جان در محل تکیه‌گاه

Figure 16. Vertical compressive buckling in the web at the support location

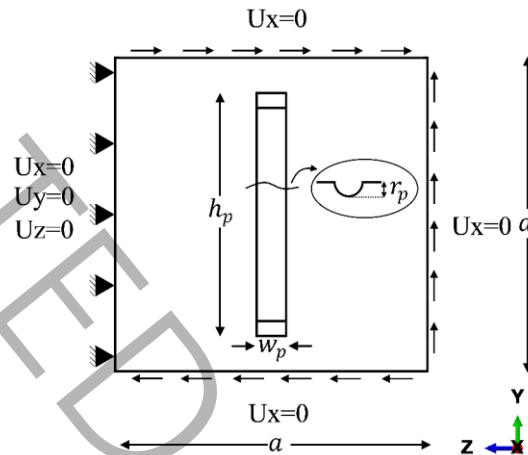
۵- تحلیل کمانش الاستیک

از آنجایی که مقاطع سازه‌های فولادی عمدتاً از ورق‌های نازک تشکیل شده‌اند، غالباً تحت فشارهای وارده در معرض ناپایداری موضعی قرار دارند. تنش‌های برشی در راستای مایل به تنش‌های فشاری و کششی تبدیل شده و تنش‌های فشاری قطری در ورق (جان تیروورق) ایجاد کمانش موضعی می‌کند. با یادآوری این نکات حال می‌توان تأثیری که پرس بر ظرفیت کمانشی ورق جان و سپس کل تیروورق دارد را بررسی کرد. به عبارت دیگر هدف بررسی این موضوع است که وجود پرس چه میزان بر ظرفیت برشی ورق و تیروورق

تاثیر گذار است. در تمامی نمونه‌های دارای پرس ابعاد پرس بهینه از بخش ۴-۱ محاسبه شده است. همچنین ابعاد سخت‌کننده که شامل ارتفاع و ضخامت است به ترتیب برابر با ۵۰۰ mm و ۲۰ mm اعمال شده‌اند.

۱-۵- تحلیل کمانش الاستیک ورق

به منظور بررسی تاثیر پرس در جان تیوروق، ۳ نمونه ورق مربعی و ۵ نمونه ورق مستطیلی با ابعاد مشخص به ترتیب در جدول ۵ و جدول ۶ بیان شده‌اند. ورق‌های مورد مطالعه تحت بار برشی خالص و به صورت خطی در لبه‌های آن قرار داده شده‌اند. شرایط مرزی لبه‌های ورق‌ها به صورت مفصلی است که در شکل ۱۷ به وضوح مشخص شده است.



شکل ۱۷ مشخصات هندسی ورق، شرایط مرزی و بارگذاری برشی ورق

Figure 17. Geometric characteristics of the plate, boundary conditions and shear loading

جدول ۵ مشخصات ورق‌های مربعی جهت تحلیل کمانش

Table 5. Specifications of square plates for buckling analysis

شماره نمونه	نمونه	نوع ورق	a	d	t_w	w_p	r_p	h_p
			mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	SP1	ساده	۵۰۰	۵۰۰	۴	-	-	-
۲	SP2	با پرس	۵۰۰	۵۰۰	۴	۴۰	۲۰	۴۵۰
۳	SP3	با سخت‌کننده	۵۰۰	۵۰۰	۴	-	-	-

جدول ۶ مشخصات ورق‌های مستطیلی جهت تحلیل کمانش

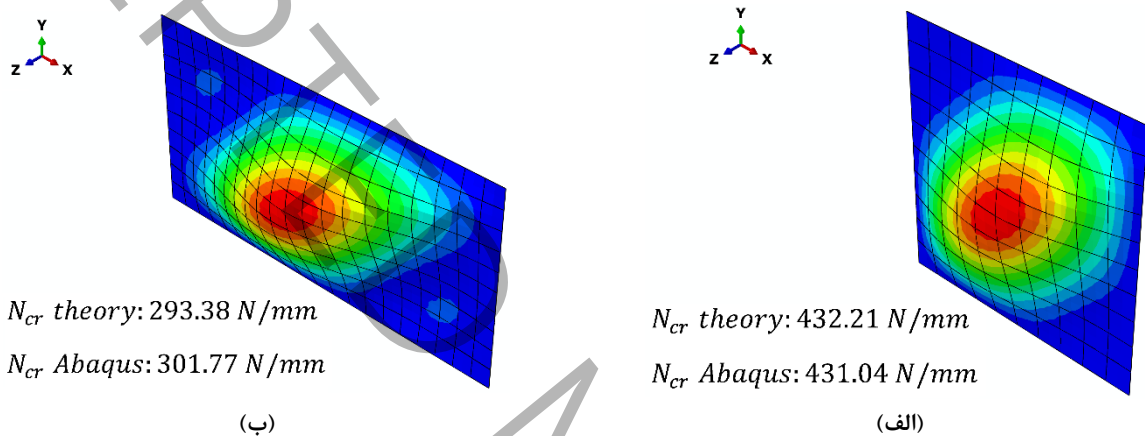
Table 6. Specifications of rectangular plates for buckling analysis

شماره نمونه	نمونه	نوع ورق	a	d	t_w	w_p	r_p	h_p
			mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	RP1	ساده	۱۰۰۰	۵۰۰	۴	-	-	-
۲	RP2	با ۱ پرس	۱۰۰۰	۵۰۰	۴	۴۰	۲۰	۴۵۰
۳	RP3	با ۱ سخت‌کننده	۱۰۰۰	۵۰۰	۴	-	-	-
۴	RP4	با ۳ پرس	۱۰۰۰	۵۰۰	۴	۴۰	۲۰	۴۵۰
۵	RP5	با ۳ سخت‌کننده	۱۰۰۰	۵۰۰	۴	-	-	-

بر اساس اصول تئوری ورق‌ها [۲۲]، می‌توان تنش برشی بحرانی که در جان مقاطع I شکل ایجاد کمانش برشی می‌کند را به کمک رابطه (۲) محاسبه نمود.

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 EK_v}{12(1-\nu^2)(h/t_w)^2} \quad (2)$$

برای اطمینان از درستی نتایج به دست آمده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس، تنش بحرانی ورق مربعی ساده و ورق مستطیلی ساده حاصل از آباکوس با نتایج نظری رابطه (۲) مقایسه شده و نتایج آن در شکل ۱۸ آورده شده است. بر اساس نتایج اجزا محدود، بار بحرانی ورق ساده مربعی برابر 431.04 N/mm و ورق ساده مستطیلی برابر 301.77 N/mm می‌باشد که به ترتیب بیان گر 0.23% و 2.86% خطا نسبت به نتایج نظری است.

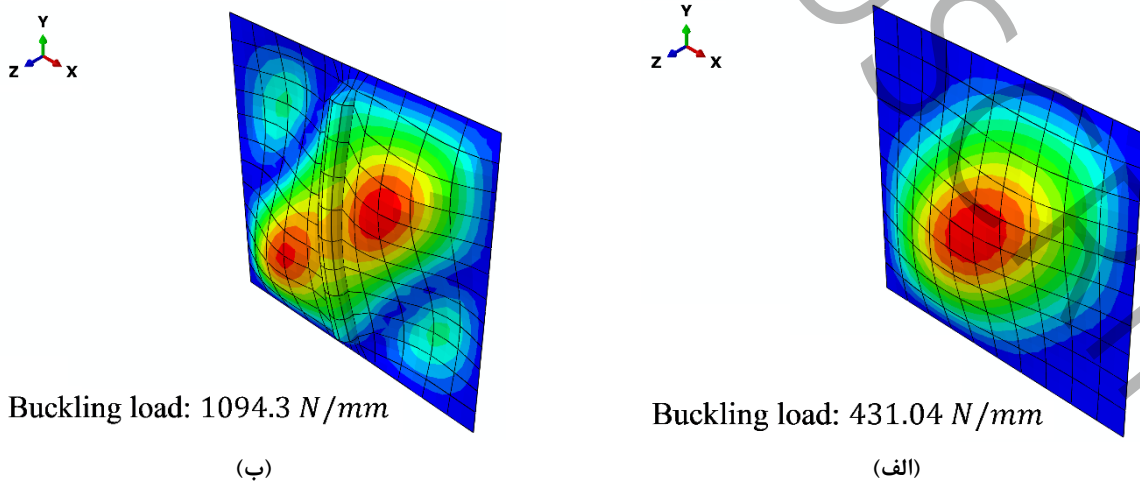


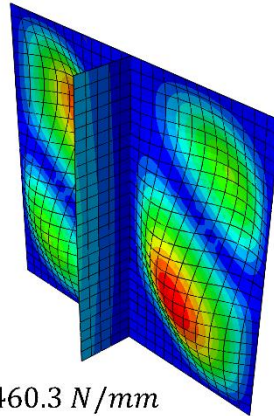
شکل ۱۸ مقایسه تنش‌های بحرانی تئوری و آباکوس برای ورق‌های مربعی و مستطیلی ساده

Figure 18. Comparison of theoretical and Abaqus critical stresses for simple square and rectangular plates

الف) تحلیل کمانش الاستیک ورق مربعی:

بار کمانشی برای ورق‌های مربعی در سه حالت ساده، با پرس و دارای سخت‌کننده به ترتیب 431.04 N/mm ، 1094.3 N/mm و 1460.3 N/mm به دست آمده‌اند (شکل ۱۹). بر این اساس در ورق مربعی، حالت ۳ دارای بیش‌ترین بار کمانشی و حالت ۱ دارای کم‌ترین بار کمانش در بین حالات بررسی شده است. وجود پرس باعث افزایش 15.4% ظرفیت برشی نسبت به ورق ساده می‌شود و تنها 3.3% از ظرفیت برشی آن نسبت به ورق دارای سخت‌کننده کاهش می‌یابد. مقایسه این حالات در نمودار شکل ۲۰ به خوبی نشان داده شده است.



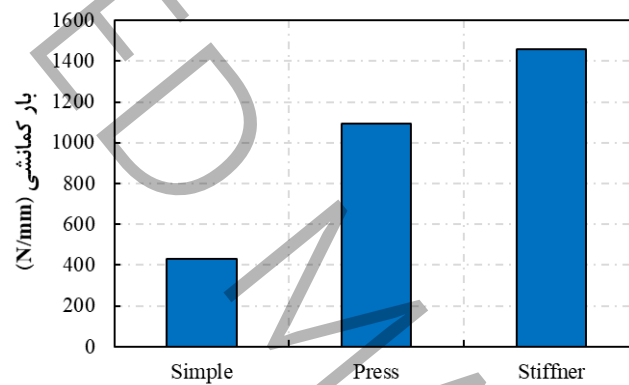


Buckling load: 1460.3 N/mm

(ج)

شکل ۱۹ مد اول کمانش برای حالات مختلف ورق مربعی الف) ورق ساده، ب) ورق با پرس و ج) ورق با سخت کننده

Figure 19. The first mode of buckling for different states of square plate a) plain, b) with press and c) with stiffener



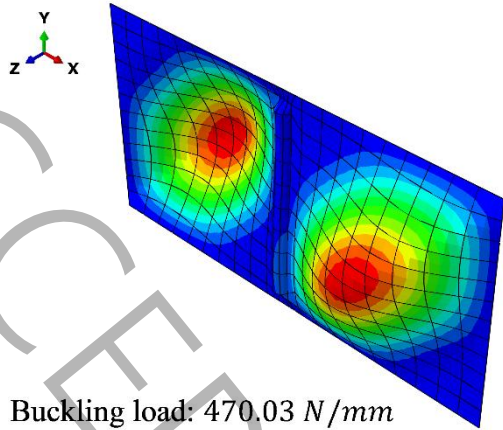
شکل ۲۰ نمودار بار کمانش برشی - حالات مختلف ورق مربعی

Figure 20. Shear buckling load diagram - different states of square plate

ب) تحلیل کمانش الاستیک ورق مستطیلی:

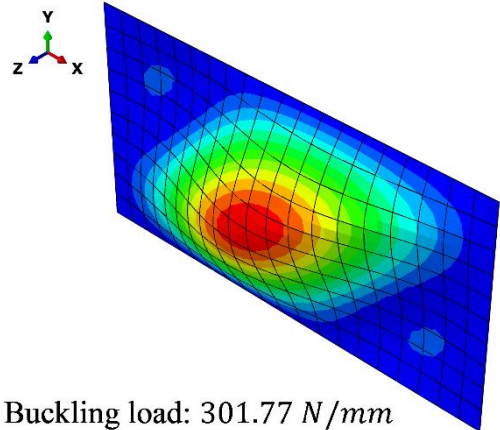
بار کمانشی برای ورق‌های مستطیلی در ۵ حالت که شامل ورق ساده، ورق با یک پرس، ورق با سه پرس، ورق دارای یک سخت کننده و ورق دارای سه سخت کننده مطابق شکل ۲۱ به دست آمده است. این بار کمانشی برای حالات گفته شده به ترتیب برابر با $۳۰۱/۷۷\text{N/mm}$ ، $۴۷۰/۰۳\text{N/mm}$ ، $۱۰۵۵/۷\text{N/mm}$ و $۱۶۷۹/۷\text{N/mm}$ به دست آمده‌اند.

بار کمانشی در ۵ حالت مختلف در شکل ۲۲ به خوبی با هم مقایسه شده‌اند. بر این اساس ورق با سه سخت کننده دارای بیشترین بار کمانشی و ورق ساده دارای کمترین بار کمانش است. نتایج نشان می‌دهند که وجود پرس در ورق، ظرفیت برشی آن را تا حد زیادی بهبود بخشیده است. جهت درک بهتر این موضوع با مقایسه ورق‌های دارای پرس نسبت به ورق ساده می‌توان گفت که بار کمانشی ورق دارای یک پرس و ورق دارای سه پرس به ترتیب $۱/۵۶$ و $۳/۵$ برابر ورق ساده می‌باشند. در مقایسه‌ای دیگر می‌توان به نکته‌ای جالب اشاره کرد که ورق دارای یک پرس نسبت به ورق دارای یک سخت کننده، بار کمانشی بیشتری را تحمل می‌کند.



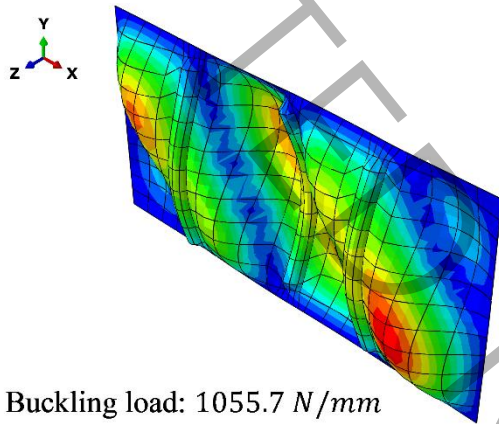
Buckling load: 470.03 N/mm

(ب)



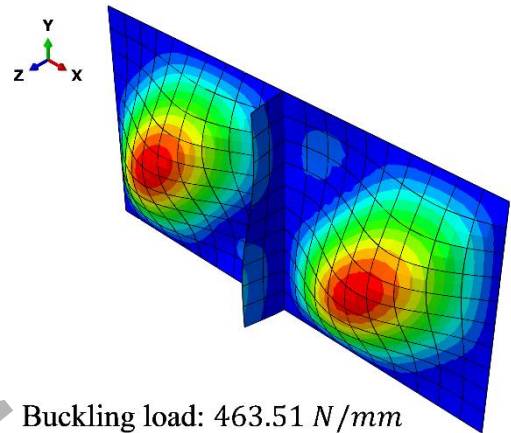
Buckling load: 301.77 N/mm

(الف)



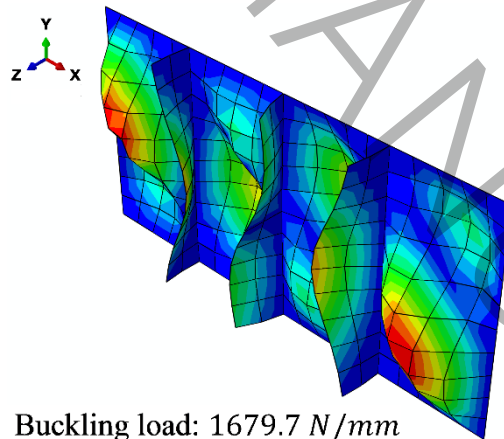
Buckling load: 1055.7 N/mm

(د)



Buckling load: 463.51 N/mm

(ج)

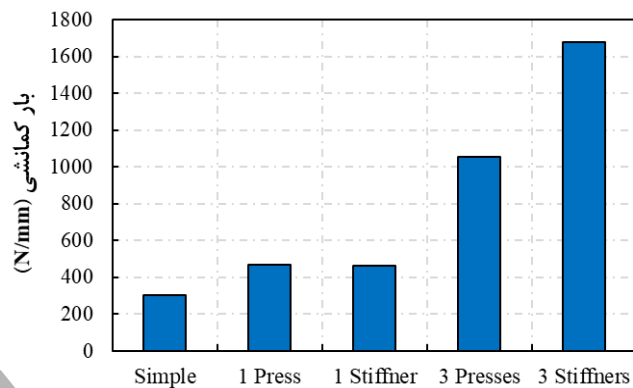


Buckling load: 1679.7 N/mm

(ه)

شکل ۲۱ مدل اول کمانش برای حالات مختلف ورق مستطیلی الف) ورق ساده، ب) ورق با یک پرس، ج) ورق با یک سخت‌کننده، د) ورق با سه پرس، و ه) ورق با سه سخت‌کننده

First buckling mode of rectangular plate a) plain, b) with one press, c) with one stiffener, d) with three presses, and e) with three stiffeners

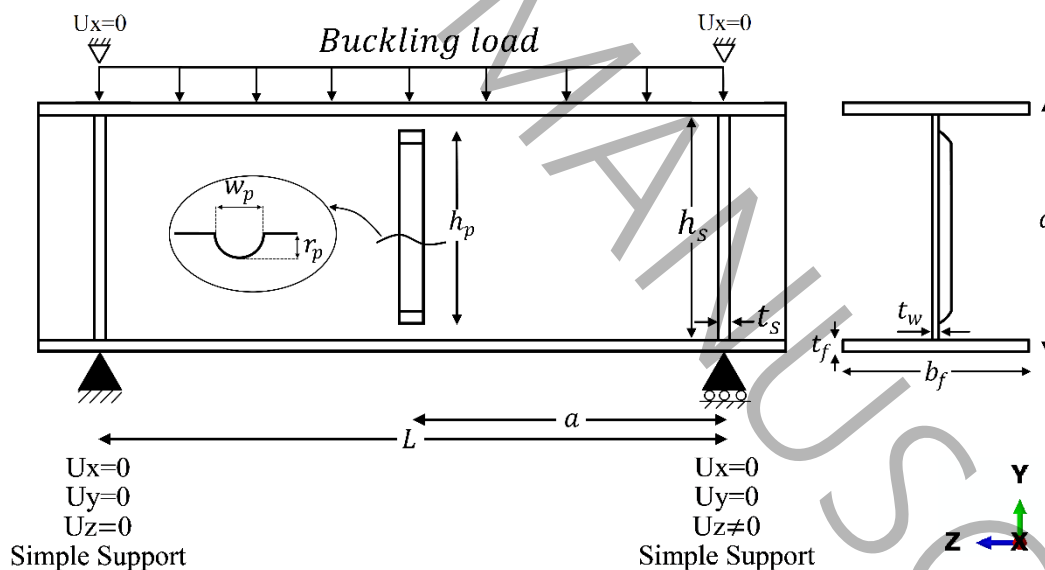


شکل ۲۲ نمودار بار کمانش برشی - حالات مختلف ورق مستطیلی

Figure 22. Shear buckling load diagram - different states of rectangular plate

۲-۵- تحلیل کمانش الاستیک تیوروق

در این قسمت ۵ حالت مختلف از تیوروق (که شامل تیوروق ساده، با ۳ پرس، با سخت کننده‌های تکیه‌گاهی، با سخت کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس و با ۳ سخت کننده هستند) بر اساس جدول ۷ جهت تحلیل کمانش مورد بررسی قرار می‌گیرند. مد اول کمانش و ضریب کمانش، خروجی‌های مورد نظر برای هر تیوروق بوده تا با مقایسه و بررسی آن‌ها، تاثیر وجود پرس بر ظرفیت باربری تیر مشخص شود. تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری خطی در طول بال فوقانی به اندازه 1N در راستای y آنالیز می‌شوند (شکل ۲۳). عرض بال تیوروق 200mm و ضخامت آن 20mm در نظر گرفته شده و مقدار پارامتر a برابر 500mm است.



شکل ۲۳ مشخصات کلی تیوروق‌های مورد بررسی جهت تحلیل کمانش

Figure 23. General characteristics of the beams for buckling analysis

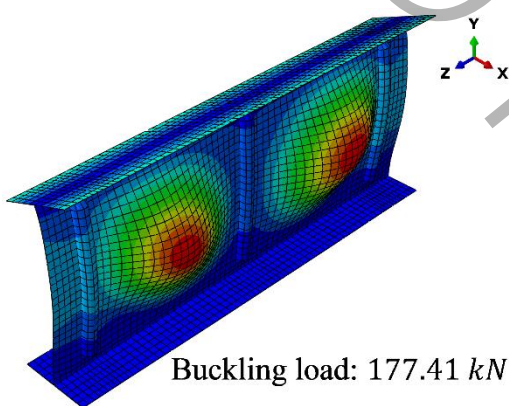
جدول ۷ مشخصات تیوروق‌های مورد بررسی جهت تحلیل کمانش

Table 7. Specifications of beams examined for buckling analysis

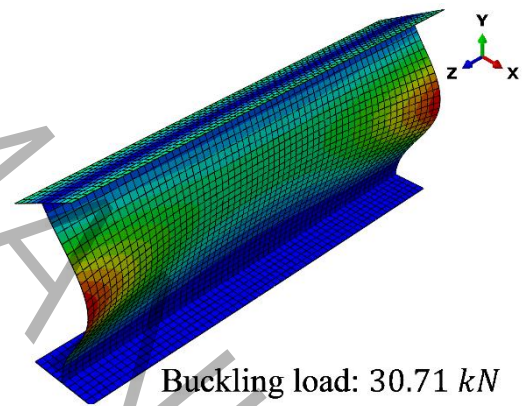
شماره نمونه	نمونه	نوع تیوروق	L	t_w	w_p	r_p	h_p	d
واحد	-	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
۱	PG1	ساده	۱۰۰۰	۴	-	-	-	۵۰۰

۲	PG2	با ۳ پرس	۱۰۰۰	۴	۴۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۳	PG3	با ۲ سخت‌کننده	۱۰۰۰	۴	-	-	-	۵۰۰
۴	PG4	با ۲ سخت‌کننده و ۱ پرس	۱۰۰۰	۴	۴۰	۲۰	۴۵۰	۵۰۰
۵	PG5	با ۳ سخت‌کننده	۱۰۰۰	۴	-	-	-	۵۰۰

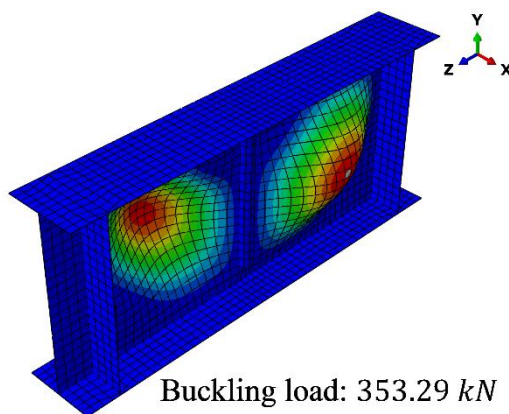
بار کمانشی برای حالات مختلف به ترتیب برابر با $۴۸۹/۲۳kN$ ، $۱۶۵/۵۸kN$ ، $۳۵۳/۲۹kN$ و $۱۷۷/۴۱kN$ و $۳۰/۷۱kN$ به دست آمده‌اند. بر این اساس حالت ۱ دارای بیش‌ترین بار کمانشی و حالت ۵ دارای کم‌ترین بار کمانش است و بار کمانشی در ۵ حالت مختلف در شکل ۲۴ به خوبی باهم مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که وجود پرس در جان تیوروق عملکرد آن را تا حد قابل توجهی بهبود بخشیده است و باعث افزایش بار کمانشی تیوروق شده است. جهت درک بهتر این موضوع با مقایسه حالات ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که بار کمانشی تیوروق با وجود پرس ۱۱۳٪ افزایش می‌یابد. در مقایسه حالت ۴ (تیوروق دارای ۳ پرس) با حالت ۵ (تیوروق ساده) مشاهده می‌شود که وجود پرس باعث افزایش ۴۷۸٪ بار کمانشی شده است. همچنین با مقایسه حالت ۱ و حالت ۳ به این نتیجه می‌توان رسید که جایگزین کردن پرس با سخت‌کننده تنها باعث کاهش ۲۸٪ از ظرفیت بار کمانشی تیوروق شده است (شکل ۲۵).



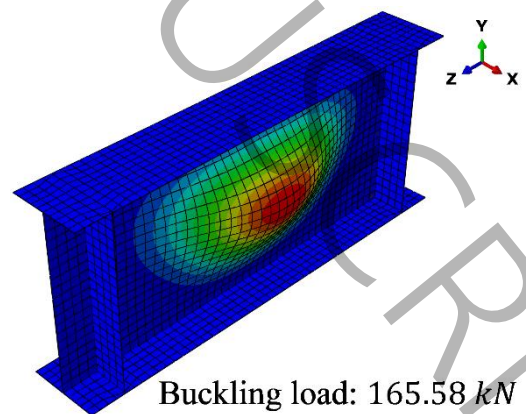
(حالت ۲)



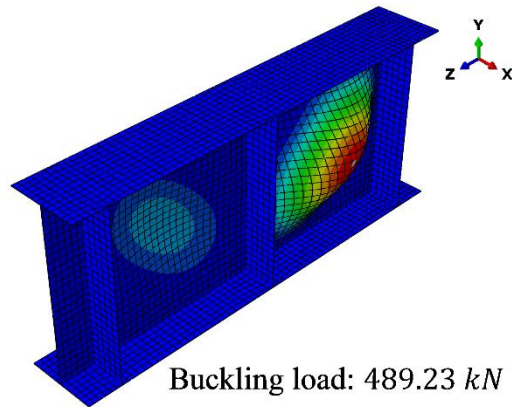
(حالت ۱)



(حالت ۴)



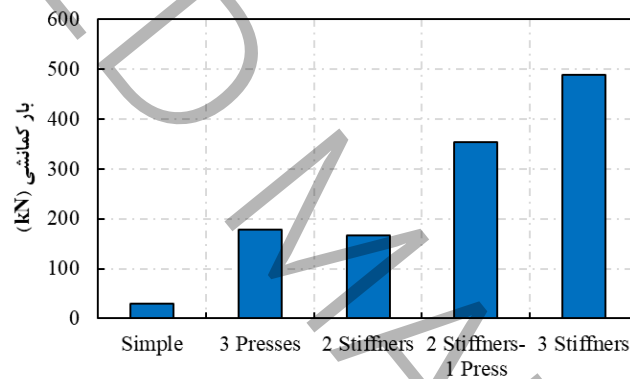
(حالت ۳)



(حالت ۵)

شکل ۲۴ مد اول کمانش برای حالات مختلف تیورق، الف) ساده، ب) با سه پرس، ج) با سخت کننده‌های تکیه‌گاهی، د) با سخت کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس، و ه) با سخت کننده‌های کامل

Figure 24. First buckling mode for different beams, a) plain, b) with three presses, c) with support stiffeners, d) with support stiffeners and press, and e) with full stiffeners

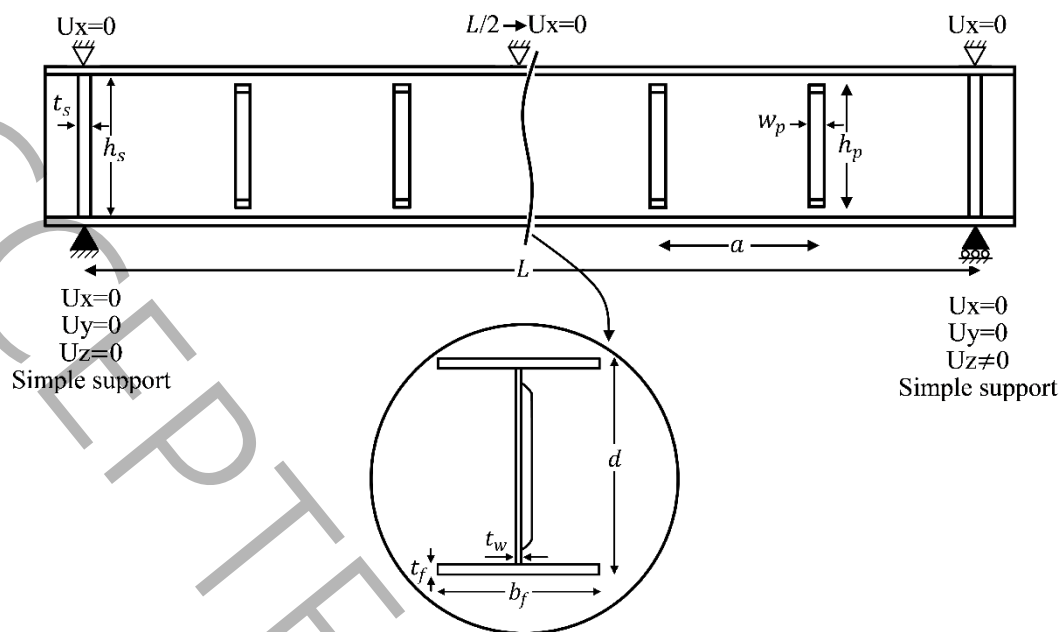


شکل ۲۵ نمودار بار کمانشی - حالات مختلف تیورق

Figure 25. Buckling load diagram - different states of beams

۶- تحلیل تیورق‌های طویل سرد نورد سخت شده

با مشخص شدن مناسب‌ترین ابعاد پرس تحت شرایط مختلف، حال می‌توان عملکرد و تاثیر آن را در تیورق‌های طویل ۶ متری بررسی کرد. از این رو تیورق‌های با طول ۶m و ضخامت جان ۸mm که شامل ۲۸ نمونه تیورق ساده و ۲۸ نمونه تیورق دارای پرس است، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند تا به اثر پرس در این دسته از تیرها پی برد. همچنین نتایج تیورق‌های سرد نورد سخت شده با تیورق ساده مشابه آن به منظور درک بهتر مقایسه می‌شوند. مشخصات هندسی تیورق ۶ متری مطابق شکل ۲۶ است.



شکل ۲۶ مشخصات هندسی نمونه‌های طولی ۶ متری

Figure 26. Geometric characteristics of 6 meters long samples

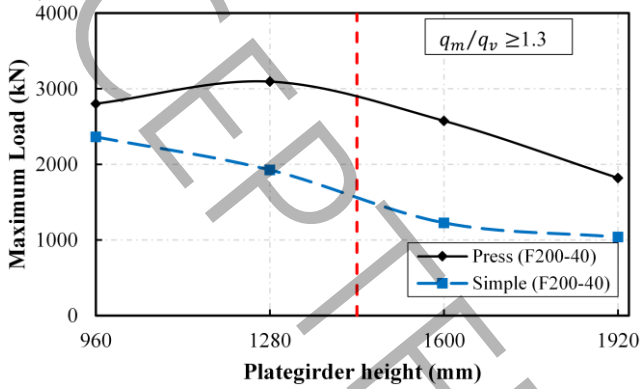
چنانچه جان نازک تیوروق تحت تنش‌های برشی قرار بگیرد، ممکن است در آن کمانش برشی رخ دهد. از طرفی برای حاکم شدن و مشاهده کمانش برشی باید از کمانش ناشی از خمش تیوروق جلوگیری کرد که برای رسیدن به این هدف، طراحی خمشی مقاطع طوری انجام شده که بار معادل ظرفیت خمشی $1/3$ برابر یا بیشتر از بار معادل ظرفیت برشی شود. از آنجا که هدف بررسی تاثیر پرس در کلیه حالات است بنابراین تمام نمونه‌هایی که نسبت بار معادل ظرفیت خمشی به ظرفیت برشی آن‌ها، کمتر و بیش‌تر از $1/3$ باشد یعنی تمام ۵۶ نمونه با ذکر شرط ($1/3$ برابر بودن بار معادل ظرفیت خمشی نسبت به بار معادل ظرفیت برشی) مدل و تحلیل شده و نتایج به صورت تفکیک شده بیان خواهند شد. در جدول ۸ نمونه‌هایی که بار معادل ظرفیت خمشی نسبت به بار معادل ظرفیت برشی آن‌ها از $1/3$ بیش‌تر است آورده شده‌اند.

جدول ۸ مشخصات هندسی نمونه‌های مورد تحلیل با جان ۸mm

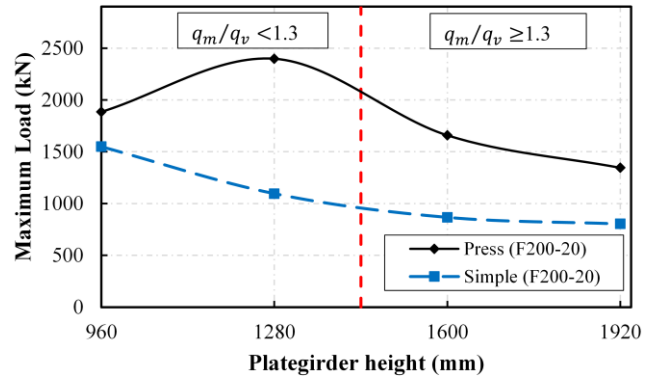
Table 8. Geometrical characteristics of samples with 8mm web

شماره نمونه	b_f	t_f	d	شماره نمونه	b_f	t_f	d
واحد	mm	mm	mm	واحد	mm	mm	mm
۱	۲۰۰	۲۰	۱۶۰۰	۸	۴۰۰	۴۰	۱۹۲۰
۲	۲۰۰	۲۰	۱۹۲۰	۹	۵۰۰	۴۰	۱۶۰۰
۳	۲۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۱۰	۵۰۰	۴۰	۱۹۲۰
۴	۲۰۰	۴۰	۱۹۲۰	۱۱	۶۰۰	۶۰	۱۶۰۰
۵	۳۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۱۲	۶۰۰	۶۰	۱۹۲۰
۶	۳۰۰	۴۰	۱۹۲۰	۱۳	۸۰۰	۸۰	۱۶۰۰
۷	۴۰۰	۴۰	۱۶۰۰	۱۴	۸۰۰	۸۰	۱۹۲۰

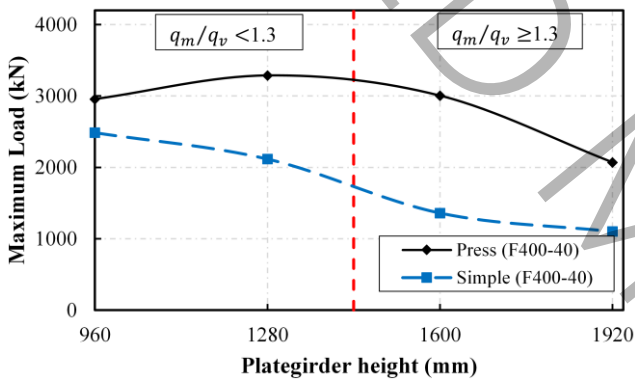
نتایج نمونه‌های با ضخامت جان ۸mm در شکل ۲۷ آورده شده است. در این شکل‌ها بار حداکثری که نمونه‌ها در طول کل بارگذاری برحسب تغییرات ارتفاع تیوروق تحمل می‌کنند، نشان داده شده است. در تمام حالات ظرفیت تیوروق سرد نورد سخت شده از ظرفیت تیوروق ساده بیش‌تر می‌باشد و این نشان دهنده عملکرد خوب پرس در افزایش ظرفیت تیوروق است. در تیوروق‌هایی مورد بررسی، پرس، ظرفیت حداکثر برابری نمونه‌ها در کل فرایند بارگذاری را بین ۱۵ تا ۱۲۱ درصد افزایش داده است.



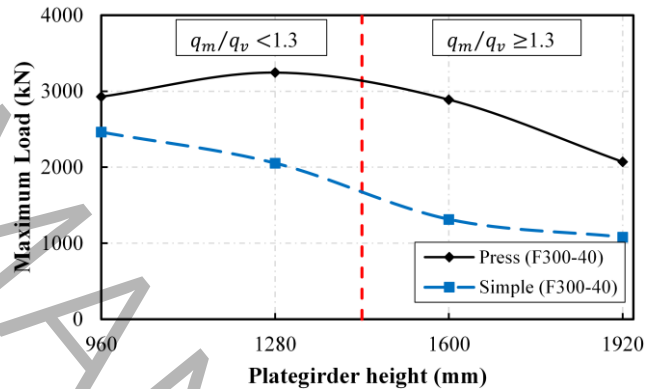
(ب)



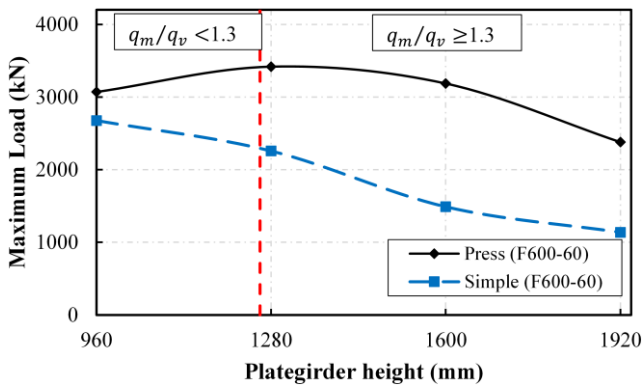
(الف)



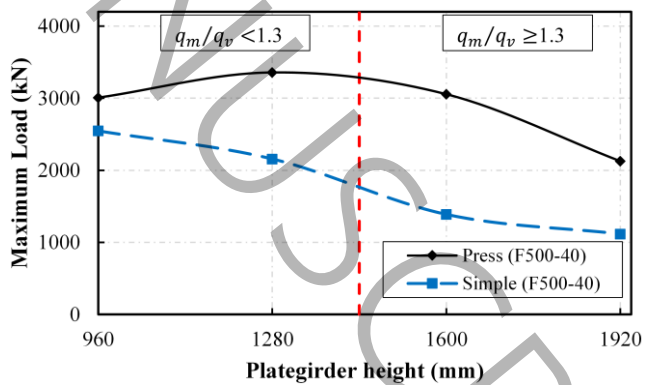
(د)



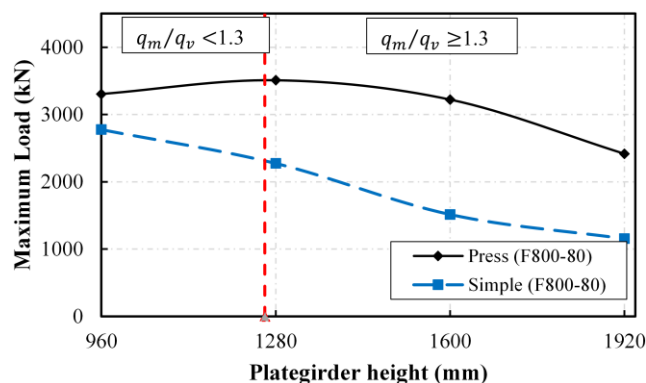
(ج)



(و)



(ه)



(ز)

شکل ۲۷ نمودار بار حداکثر- ارتفاع نمونه‌های با ضخامت جان ۸mm با ابعاد بال مختلف، الف) ۲۰۰ × ۲۰۰ mm (ب) ۴۰ × ۲۰۰ mm (ج) ۸۰ × ۲۰۰ mm (د) ۴۰ × ۴۰۰ mm (ه) ۴۰ × ۵۰۰ mm (و) ۶۰ × ۶۰۰ mm (ز) ۸۰ × ۸۰۰ mm

Figure 27. Maximum load-height diagram of specimens with web thickness of 8 mm and different wing dimensions, a) 20 x 200, b) 40 x 200, c) 40 x 300, d) 40 x 400, e) 40 x 500, f) 60 x 600 g) 80 x 800 mm

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به‌منظور مطالعه رفتار تیوروق‌های سرد نورد شده تحت تغییرشکل‌های بزرگ و تاثیر عوامل مختلف، مطالعه‌ای پارامتریک توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس صورت گرفت. در این مطالعه ابعاد بهینه پرس (عرض، عمق و ارتفاع پرس) برای ضخامت‌های متفاوت جان (۴mm، ۶mm و ۸mm) برای تیرهایی به طول ۱ و ۲ متری به این صورت به‌دست‌آمده که حداکثر ظرفیت باربری تیر را نتیجه دهد. عرض و عمق بهینه پرس به ترتیب ۴۰mm و ۲۰mm به دست آمد، ارتفاع پرس متناسب با ارتفاع تیوروق بوده به این صورت که با توجه به نکات اجرایی مانند فاصله مورد نیاز برای جوش کاری و عملیات پرس زدن، ارتفاع پرس معمولاً چند سانتی‌متر کمتر از ارتفاع جان در نظر گرفته می‌شود.

جهت بررسی تاثیری که پرس در ظرفیت باربری ورق و تیوروق دارد، ابتدا تحلیل کمانش الاستیک بر روی ورق‌های مربعی و مستطیلی و سپس تیوروق صورت گرفت. بر اساس نتایج مذکور، مشخص شد که در ورق‌های مربعی، بار کمانشی ورق دارای پرس ۲/۵۴ برابر ورق ساده است. در ورق‌های مستطیلی بار کمانشی به‌وسیله تک پرس ۵۶ درصد (۱/۵۶ برابر) و به‌وسیله ۳ پرس ۲۵۰ درصد (۳/۵ برابر) افزایش یافته است. در بحث تیوروق‌ها پرس نیز به‌خوبی عمل کرده چرا که بار کمانشی تیوروق دارای ۳ پرس، ۵/۷۸ برابر تیوروق ساده است. در تمامی حالات بررسی شده، پرس، باعث افزایش ظرفیت کمانشی یا بار بحرانی نمونه‌ها می‌شود.

پس از مشخص شدن ابعاد بهینه پرس، تاثیر آن در تیوروق‌های طویل مورد بررسی قرار گرفت. از این رو ۸۴ نمونه تیوروق دارای پرس با ۸۴ نمونه تیوروق ساده مدل شدند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در تمام حالات ظرفیت باربری تیوروق دارای پرس از تیوروق ساده بیش‌تر می‌باشد و این نشان دهنده عملکرد خوب پرس در افزایش ظرفیت تیوروق است. در کل فرایند بارگذاری، بار حداکثر تیوروق‌های دارای پرس نسبت به تیوروق‌های ساده برای نمونه‌هایی با ضخامت جان ۸mm، به میزان ۱۵ تا ۱۲۱ درصد افزایش یافته است.

۸- منابع و مراجع

- [1] G. Issa-El-Khoury, D.G. Linzell, L.F. Geschwindner, Flexure-shear interaction influence on curved, plate girder web longitudinal stiffener placement, *Journal of Constructional Steel Research*, 120 (2016) 25-32.
- [2] X. Chen, H. Yuan, X. Du, Y. Zhao, J. Ye, L. Yang, Shear buckling behaviour of welded stainless steel plate girders with transverse stiffeners, *Thin-Walled Structures*, 122 (2018) 529-544.
- [3] E. Real, E. Mirambell, I. Estrada, Shear response of stainless steel plate girders, *Engineering Structures*, 29(7) (2007) 1626-1640.

- [4] A.J. Daley, D. Brad Davis, D.W. White, Shear strength of unstiffened steel I-section members, *Journal of Structural Engineering*, 143(3) (2017) 04016190.
- [5] Y.B. Kwon, S.W. Ryu, The shear strength of end web panels of plate girders with tension field action, *Thin-Walled Structures*, 98 (2016) 578-591.
- [6] D.W. White, M.G. Barker, Shear resistance of transversely stiffened steel I-girders, *Journal of Structural Engineering*, 134(9) (2008) 1425-1436.
- [7] L. Aashto, Bridge design specifications, in, American Association of State Highway and Transportation, 1998.
- [8] A. Committee, Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-05), American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, (2005).
- [9] J. Valeš, Z. Kala, J. Martinásek, A. Omishore, FE nonlinear analysis of lateral-torsional buckling resistance, *International Journal of Mechanics*, 10 (2016) 235-241.
- [10] H.F. Voshardt, Structural i-beam, in, Google Patents, 1907.
- [11] M. Elgaaly, A. Seshadri, R.W. Hamilton, Bending strength of steel beams with corrugated webs, *Journal of Structural Engineering*, 123(6) (1997) 772-782.
- [12] E.Y. Sayed-Ahmed, Behaviour of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(4) (2001) 656-672.
- [13] M. Leblouba, S. Barakat, S. Altoubat, T.M. Junaid, M. Maalej, Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel webs, *Journal of Constructional Steel Research*, 136 (2017) 75-90.
- [14] H.R. Kazemi nia korrani, Lateral bracing of I-girder with corrugated webs under uniform bending, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(12) (2010) 1502-1509.
- [15] C.-J. Chang, Construction simulation of curved steel I-girder bridges, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [16] B. Jáger, L. Dunai, B. Kövesdi, Flange buckling behavior of girders with corrugated web Part I: Experimental study, *Thin-Walled Structures*, 118 (2017) 181-195.
- [17] M. Zhou, Z. Liu, J. Zhang, L. An, Deformation analysis of a non-prismatic beam with corrugated steel webs in the elastic stage, *Thin-Walled Structures*, 109 (2016) 260-270.
- [18] L. Li, C. Jiang, L. Jia, Z. Lu, Local buckling of bolted steel plates with different stiffener configuration, *Engineering Structures*, 119 (2016) 186-197.
- [19] S.C. Lee, J. Davidson, C. Yoo, Shear buckling coefficients of plate girder web panels, *Computers & structures*, 59(5) (1996) 789-795.
- [20] R. Luo, B. Edlund, Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs, *Thin-Walled Structures*, 26(1) (1996) 19-44.
- [21] World Construction Company, Goldbeck Construction, in, 2013.
- [22] A. Committee, Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10), American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, (2010).
- [23] S. Korkzan, S.M. Zandi, Shear Behavior Analysis of Steel Plate Girders with Local Corrugated Web under Monotonic Loading, *Solid and Fluid Mechanics*, 8(3) (2018) 77-90.

Numerical and experimental evaluation of shear behavior of cold formed stiffened web girders

ABSTRACT

Using plate girders as large-span beams can, on the one hand, be an alternative to rolled sections that cannot be constructed easily in every intended place and time and, on the other hand, can be utilized to withstand large loads for which a suitable rolled profile does not exist. The web of ordinary plate girders might be at risk of buckling under heavy loads. A cost-effective method to prevent the buckling of the web is to create a cold-formed press on the web. Creating press on the plate girder's web allows the plate to enjoy more geometric stiffness and resistance around the weak axis compared to its original state. Considering this issue, there is a need to examine the capacity of the pressed plate girders meticulously. Therefore, in this study, the optimal dimensions of the press are obtained using Riks analysis, and its effect on the elastic buckling of plates and plate girders is investigated. Furthermore, the effect of press on 6-meter-long plate girders is also studied and a laboratory sample is finally made to ensure the accuracy of the results from the finite element software. Since there is slight information about the behavior of pressed plate girders, it is quite necessary to research in this regard.

KEYWORDS

Cold Formed web, Shear Behaviour, Girder, Pressing, Corrugated web.