



Numerical and experimental investigation of the shear behavior of hardened cold-rolled beams

Mahdi Moradi, Sayed Mahdi Zandi *, Hossein Amoshahi

Department of civil engineering & transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT: As large-span beams, plate girders can be excellent substitutes for rolled profiles that cannot be used in construction everywhere and at all times. Further, these members can withstand heavy loads that cannot be sustained by existing rolled profiles. Typical web plates are susceptible to buckling under loading. Cold rolling is an economical solution to prevent web plate buckling. Making deformations in the web plate enhances its geometric stiffness and strength around the weak axis. In this light, a detailed investigation of the capacity of plate girders with web deformations is in order. Accordingly, the Riks analysis was used to optimize the dimensions of these deformations and investigate their effects on elastic buckling in the plate and plate girder.

Review History:

Received: Jul. 19, 2020

Revised: Dec. 30, 2020

Accepted: Apr. 07, 2021

Available Online: Apr. 27, 2024

Keywords:

Hardened cold rolled steel plate

Shear Behavior

Press

Corrugated Steel Web

1- Introduction

Several studies have addressed plate girders integrating standard or corrugated webs. These studies used numerical and experimental methods to investigate the behavior of beams under bending and shear, the effects of the web plate geometry on the beam performance, the behavior of composite beams with a corrugated web, the combined effects of corrugated web plates with stiffeners, and performance of corrugated-web beams under cyclic loading among other topics [1].

Shear stress is rarely problematic for rolled profiles and beams with a normal span. In other words, the shear strength of typical beams surpasses their strength against bending moments [2]. However, in plate girders and rolled beams with small spans to withstand heavy loads, shear stress can be critical. Shear strength is an important design parameter that must be taken into account in cases where structures are designed with thin steel plates. In 2007, Real et al. [3] studied the shear responses of a stainless steel plate girder. The experimental study focused on plate girders of different dimensions and geometries under near-service loading, and the results were verified with Finite-Element (FE) software tools.

Daley et al. [4], in 2017, studied the shear strength of an unstiffened steel I-beam. According to the results, the flange

in I-beams ensures uniform stress distribution across the web. The flange has a negligible contribution to bearing the shear stress but helps reduce the maximum stress applied to the web.

Transverse web stiffeners are plates placed at intervals along the beam and normal to the web, between the flanges. In beams where the section is not sufficiently strong for the allowable shear stress, diagonal buckling can be prevented using transverse stiffeners [5].

Typical, flat web plates are susceptible to buckling under loading. Web buckling can be prevented by increasing the plate thickness or using longitudinal and transverse stiffeners. Creating corrugation in the web through making local deformations is an economical solution to preventing buckling. Relying on cold rolling, the production of these plate girders is straightforward and low-cost. Creating folds in the thin girder web plate enhances the geometric stiffness and strength of the plate around its weak axis. Lightweight, high strength, out-of-plane stiffness, and facility of use are some advantages of these plate girders. Accordingly, these girders help reduce the structural weight, enhance the strength while bringing down material consumption, and facilitate construction, helping cut down project costs. Another remarkable point here is reducing stiffeners in the web plate, which most importantly lowers the expenses. The

*Corresponding author's email: s.m.zandi@eng.ui.ac.ir



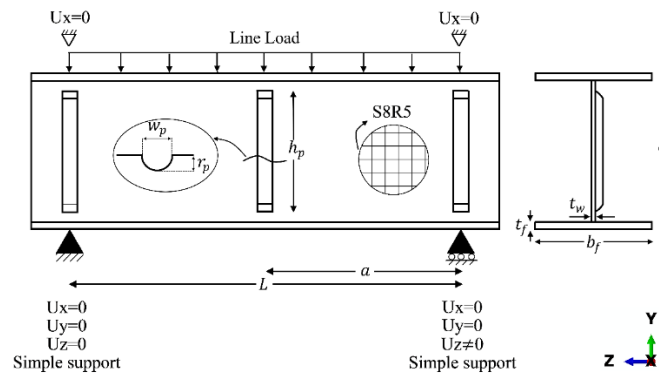


Fig. 1. Boundary conditions and geometrical specifications of the cold-rolled plate girder.

original idea was proposed and implemented by Goldbeck [6] in 1997. In as much as little analytical and experimental information is available on the behavior of plate girders with web deformations and few studies have addressed the issue, its investigation seems to be necessary.

2- Finite-Element Model

For a parametric study of models under uniform loading, a pushover analysis was carried out using ABAQUS. The Riks solver employed in the present study is highly effective for analyzing the behavior of structures with local or global instabilities, particularly, buckling problems and post-buckling analysis considering geometric imperfections. The materials used in this study include steel, which is characterized in the following.

2- 1- Boundary Conditions and Meshing

The 5R8S element was used for meshing all models. The element represents a reduced-integration shell element with eight 5 DOF nodes. The plate girder was modeled with hinged boundary conditions on one side and roller boundary conditions on the other and, therefore, movement was restricted in x , y , z directions on the hinged side and in x and y directions on the roller side. The lateral movements of beams normal to the plane, the x direction, were also restricted (Fig. 1).

3- preparing an Experimental Specimen and Investigating the Results

At this point in the study, an experimental specimen was prepared to make sure the ABAQUS numerical results were accurate, suggesting an improvement in the plate's load-bearing capacity. The experimental and numerical results are compared in the following. The specimen was made with two 3- m sheets of steel for the flange, a thin 3- m -long sheet for the web, and thick 3- cm plates for stiffeners. The girders were cut, welded, and assembled at the Saraman Structural Steel production plant in Razi Industrial Park, Iran. The trapezoidal

deformations were created in the girder's web using a press brake. The specimen was transported to the testing laboratory after fabrication. Hinged supports with specific dimensions were used to install the plate girder with trapezoidal web deformations in the test frame. Further, a double-web IPE27 beam was placed under the supports of the main girder. The specimen was laterally braced by angle beams installed diagonally and in parallel by welding one end to the top or bottom flange and attaching the other end to the test frame using four screws (Fig. 2).

3- 1- Verification of the Experimental Specimen

Based on the mechanical properties of the steel, the plate girder with trapezoidal deformations was placed under nonlinear loading and analyzed by the Riks method. A linearly distributed (four-point) load was applied over a beam with hinged support on one end and roller support on the other. Further, lateral movements were restricted normally to the plane. The 5R8S element was used for regular meshing. The analytical and experimental results are compared in Fig. 3 and 4.

4- Summary and Conclusion

A parametric study was carried out using ABAQUS on the behavior of cold-rolled plate girders under large deformations and the influence of different factors. The optimal fold dimensions (width, depth, and length) were optimized for different web thicknesses (46, and 8 mm) for 1 and 2 m beams to produce the maximum load-bearing capacity. The optimal width and depth of the fold were obtained at 20 and 40 mm, and the length is often a few centimeters short of the web depth to provide clearance for performing welding and forming jobs. The elastic buckling was also analyzed in plate girders to investigate the effects of folds on the plate girder's load-bearing capacity. The results were suggestive of the folds' excellent performance, as the buckling strength of the three-fold plate girder was increased by a factor of 5.78 compared to the simple girder. After optimizing fold dimensions, its

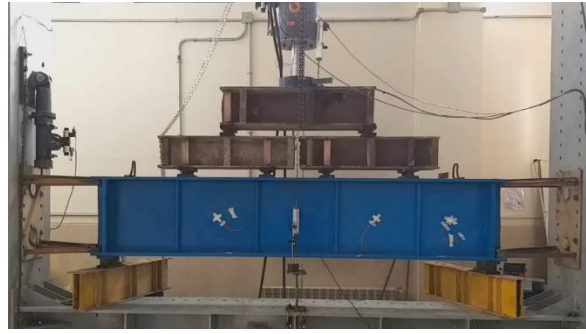


Fig. 2. Test frame and the placement of the specimen before testing.

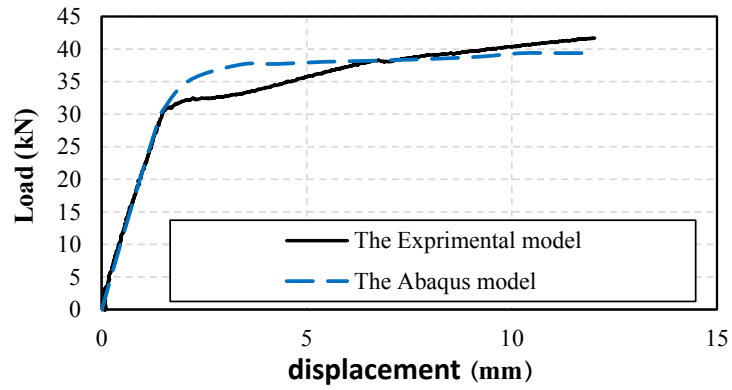


Fig. 3. Comparing numerical and experimental results for the plate girder with trapezoidal web deformations.

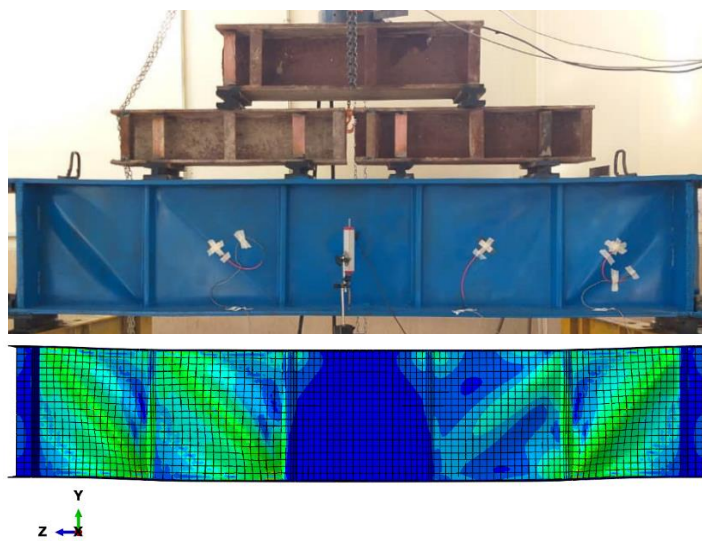


Fig. 4. Plate girder with trapezoidal web deformations after the experiment.

impact on long plate girders was examined. In this regard, 84 plate girder models with folds, as well as 84 simple plate girder models, were analyzed. In all cases, the load-bearing capacity of the plate girders with folds surpassed that of the simple girder, showing the effectiveness of the folds. Overall, the maximum strength of plate girders with folds was increased by 4–182% in models with 4 mm web thickness, by 29–193% in models with 6 mm web thickness, and by 15–121% in models with 8 mm web thickness compared to simple plate girders. A specimen was also fabricated to verify the accuracy of the numerical ABAQUS results, suggesting improvements in the plate's load-bearing capacity. Due to the considerable cost of making cylindrical deformations in the web plate, trapezoidal folds were alternatively used. The trapezoidal deformation considerably enhanced the load-bearing capacity of the plate girder, raising the linear region by 183% and the ultimate strength by 87%. In conclusion, trapezoidal folds, or in general any corrugation, can improve the load-bearing capacity of the plate girder.

References

- [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 behavior 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] World Construction Company, Goldbeck Construction, in, 2013.



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

مهدی مرادی، سید مهدی زندی*، حسین عموشاهی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

جان سرد نورد سخت شده
رفتار برشی
تیرورق
پرس
جان موج‌دار

خلاصه: 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 کماتش قرار گیرد. یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کماتش 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 ابعاد بهینه پرس به‌دست‌آمده و تاثیر آن بر کماتش الاستیک ورق و تیرورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تاثیر پرس در تیرورق‌های طولی 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.

۱- مقدمه

طی سالیان گذشته تحقیقات زیادی بر روی تیرورق‌های 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 تیرورق‌ها 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 تیرورق‌های فولادی ضد زنگ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تیرورق‌هایی 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

1 Real

2 Daley

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.m.zandi@eng.ui.ac.ir



تأثیر قابل توجهی 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 تیورورق شده که بسیار در بحث طراحی سازه‌ها مهم است [۱۸]. در 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 تیورورق‌هایی با جان موج‌دار دوزنقه‌ای مؤثر هستند می‌توان به عمق، زاویه و عرض موج دوزنقه‌ای اشاره کرد [۲۰].

جان تیورورق‌های 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 تیورورق‌ها، ساخت آن‌ها روند نسبتاً ساده و کم هزینه‌ای دارد. ایجاد پرس در ورق‌های تخت نازک تیورورق‌ها 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 تیورورق‌ها است. بنابراین به کارگیری 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 تیورورق 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 تیورورق‌های 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 تیورورق فولادی با جان موج‌دار محلی تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی پرداختند. در این مطالعه تنها به تعیین ابعاد بهینه پرس برای تیورورق‌های ۱ m، ۲ m و ۴ m با استفاده از حل گر استاتیک جنرال در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. اما در تحقیق پیش رو از حل گر ریکس در کلیه تحلیل‌ها استفاده شده که در مسائل مربوط به حوزه کمانش و تحلیل پس کمانش

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^۱ و بارکر^۲ [۶] در سال ۲۰۰۸ به مطالعه‌ی مقاومت برشی تیورورق‌های I- شکل با سخت‌کننده‌ی عرضی پرداختند. آن‌ها به تعیین مقاومت برشی تیورورق‌های 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^۳ [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 تیورورق‌های با جان ساده پرداخته شد. حال به مطالعه‌ی تیورورق‌های با جان موج‌دار و بررسی انواع تغییرشکل‌های ایجاد شده در جان تیورورق‌ها پرداخته می‌شود. برای اولین بار استفاده از تیورورق با جان موج‌دار توسط هرمان^۴ 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^۵ 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 در آزمایشات مشاهده شد که مهار جانبی تیر در اثر تیرهای معمول از حساسیت بالایی برخوردار نمی‌باشند. این نوع تیورورق‌ها 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

- 1 White
- 2 Barker
- 3 J. Valeš
- 4 Herman
- 5 Elgaaly

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

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 Ux، Uy و Uz و برای ناحیه غلتکی Ux و Uy مقید شده است.

در این پژوهش جهت اعمال نقص هندسی اولیه لازم است دو تحلیل انجام می‌گیرد، ابتدا یک تحلیل کماتشی بر روی سازه ایده‌آل انجام داده تا مدهای کماتشی آن حاصل شود، برای ذخیره شدن جابه‌جایی گره‌ها در هر مد کماتشی از دستور ۱ استفاده می‌شود، سپس در تحلیل ریکس با استفاده از دستور ۲ این مدهای کماتشی به عنوان نقص هندسی اولیه تعریف می‌شود. اعمال مقدار نقص هندسی اولیه به صورت برهم نهی ضرایب مدهای کماتشی می‌باشد. در این پایان‌نامه از مدهای ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب با مقدارهای ۴ mm، ۳ mm، ۲ mm و ۱ mm به عنوان نقص هندسی اولیه استفاده می‌شود، ضمن بیان این نکته که چند مد اول رفتار واقعی سازه را بیشتر نشان می‌دهند.

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

بسیار کارآمدتر است. در مطالعه حال حاضر با استفاده از حل‌گر ریکس به تعیین ابعاد بهینه پرس، تاثیر پرس در رفتار برشی و ظرفیت باربری تیورق‌های طولی و همچنین ساخت یک نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده که این مطالعه را بسیار با ارزش‌تر و کامل‌تر کرده است.

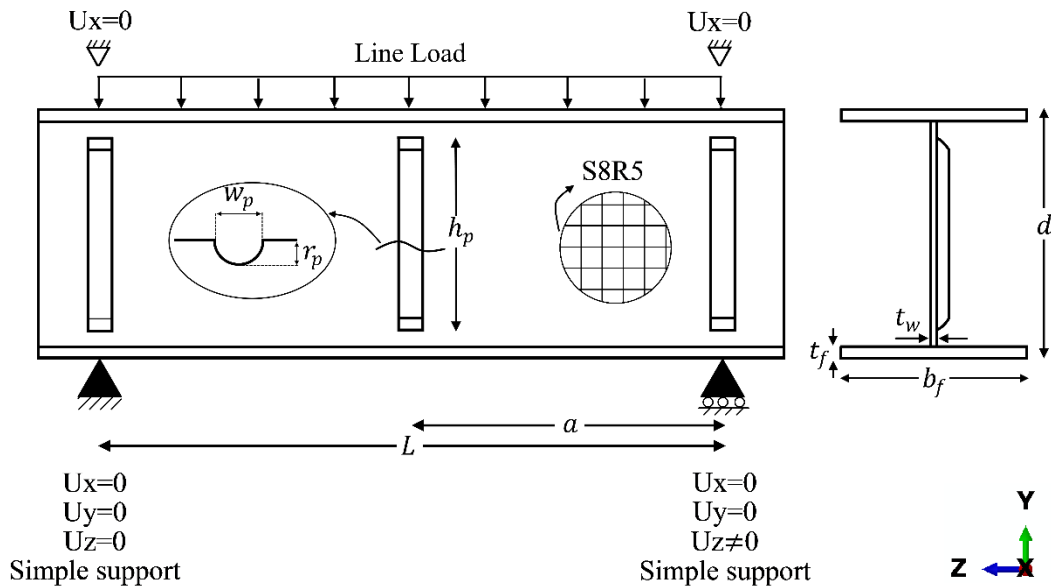
۲- مدل اجزاء محدود

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-جابه‌جایی، یک سختی منفی نشان می‌دهد و سازه باید انرژی کرنشی را به‌منظور ماندن در حالت تعادل آزاد کند، از تحلیل ریکس 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.

۲-۱- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های المان محدود انتخاب نوع، تعداد و سایز 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. به‌طورکلی هر گره المان پوسته‌ای دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. به‌منظور شبکه‌بندی در تمامی مدل‌ها از المان $SA8R5$ استفاده شده است. المان $SA8R5$ به ترتیب بیان‌گر المان پوسته‌ای دارای ۸ گره با انتگرال کاهش یافته^۲ 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 و Y و Z در قسمت مفصلی و در راستای X و Y در قسمت غلتکی جلوگیری شده

-
- 1 Imperfection
 - 2 Reduced Integration



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

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

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.

به منظور تعیین بهترین ابعاد شبکه‌بندی و همچنین اطمینان از نتایج به دست آمده، یک آنالیز حساسیت برای اندازه شبکه‌بندی (مش) انجام شده است. بنابراین تیرورق adlw4 تحت تحلیل ریکس با اندازه شبکه‌های ۲۰ mm، ۳۰ mm، ۴۰ mm و ۵۰ mm 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 ۴۰ mm و ۵۰ mm انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین اندازه شبکه ۵۰ mm برای مدل غیرخطی اجزا محدود در نظر گرفته می‌شود، همچنین از این اندازه شبکه، برای شبیه‌سازی تمام مدل‌های مطالعه پارامتری استفاده شده است.

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

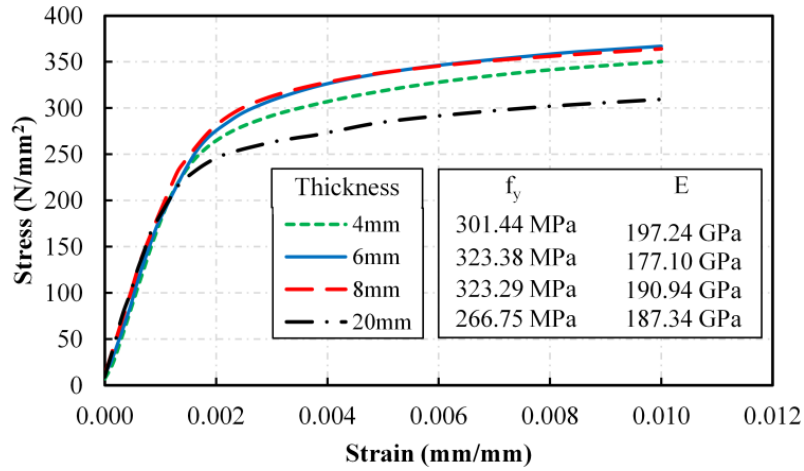
می‌دهد.

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 ۰/۳ و همچنین چگالی فولاد برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

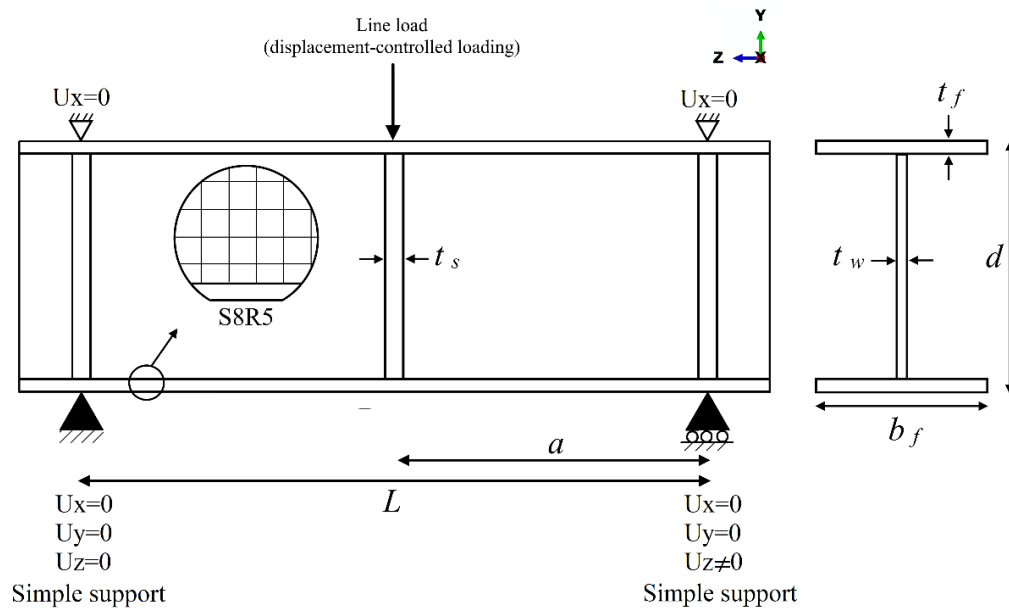
۳- صحت‌سنجی و ساخت نمونه آزمایشگاهی

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 اجزا محدود آباکوس در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده رفتار برشی



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

Fig. 2. Stress-strain diagram of plates with different thickness [3]



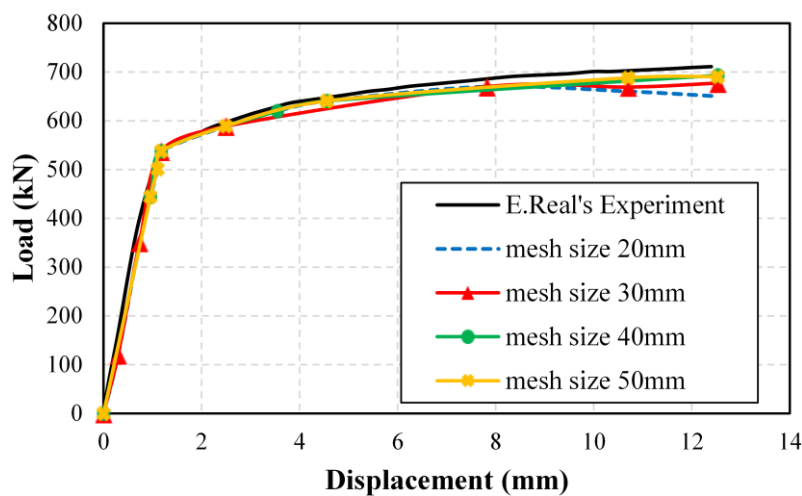
شکل ۳. مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری تیرورق [۳]

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

جدول ۱. مشخصات هندسی تیورق‌ها 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



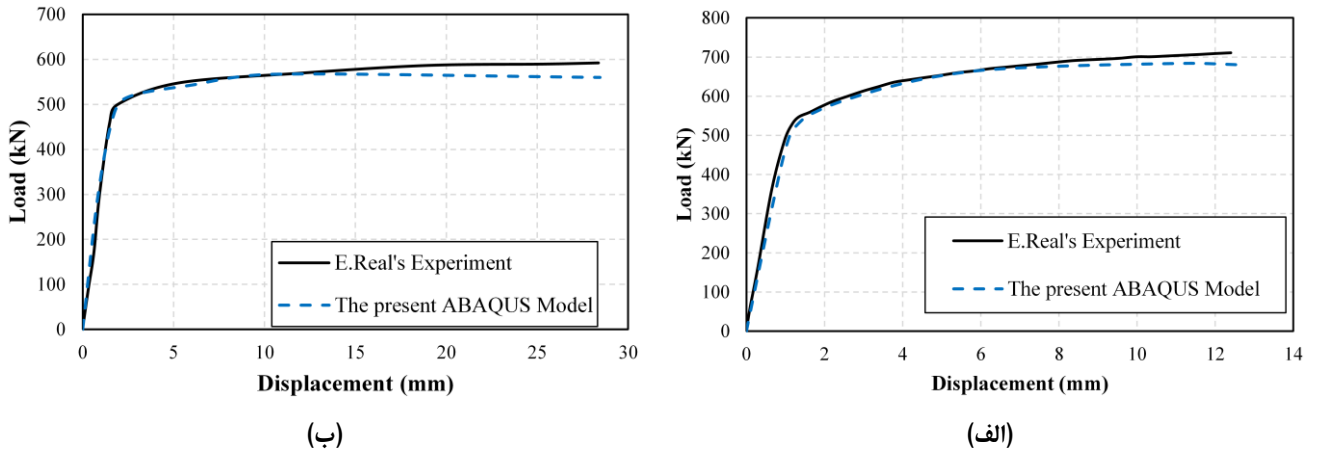
شکل ۴. مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان نمونه‌ها با اندازه شبکه‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی جهت حساسیت سنجی شبکه

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

در آزمایشگاه پرداخته می‌شود. در این نمونه با توجه به اینکه ساخت قالب استوانه‌ای بسیار هزینه‌بر بوده، لذا امکان ایجاد پرس به صورت استوانه‌ای شکل در جان تیورق وجود نداشت. راه کاری 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 به دست آمده است که ظرفیت باربری تیورق دارای خم دوزنقه‌ای مشابه نمونه‌ی دارای پرس استوانه‌ای آن باشد. 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 به دست آمده با یکدیگر مطابقت خیلی مناسبی دارد. به بیان دقیق‌تر می‌توان گفت همان‌طور که در نتایج عددی

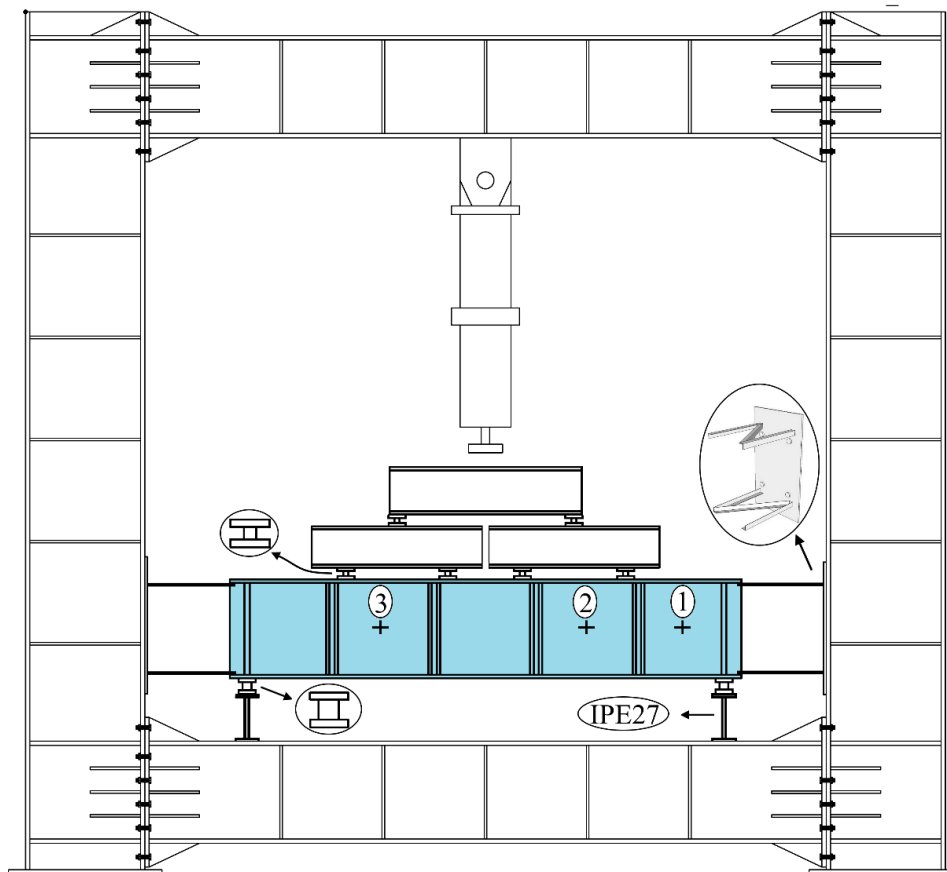
تیورق‌های ad1w4 و ad15w4 در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، مدل اجزا محدود به خوبی رفتار تیورق تحت بارگذاری پوش‌آور را شبیه‌سازی کرده و انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی فراهم کرده است. بر اساس نتایج اجزا محدود، حداکثر نیروی تحمل شده در تیورق ad1w4 برابر ۶۸۱ kN و در تیورق ad15w4 برابر ۵۶۰ kN می‌باشد که به ترتیب بیان‌گر ۴/۲۲٪ و ۵/۴۱٪ خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.

به منظور اطمینان از صحت نتایج عددی نرم‌افزار آباکوس مبنی بر افزایش ظرفیت تیورق به وسیله پرس، یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. در ادامه به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمونه‌ی ساخته شده



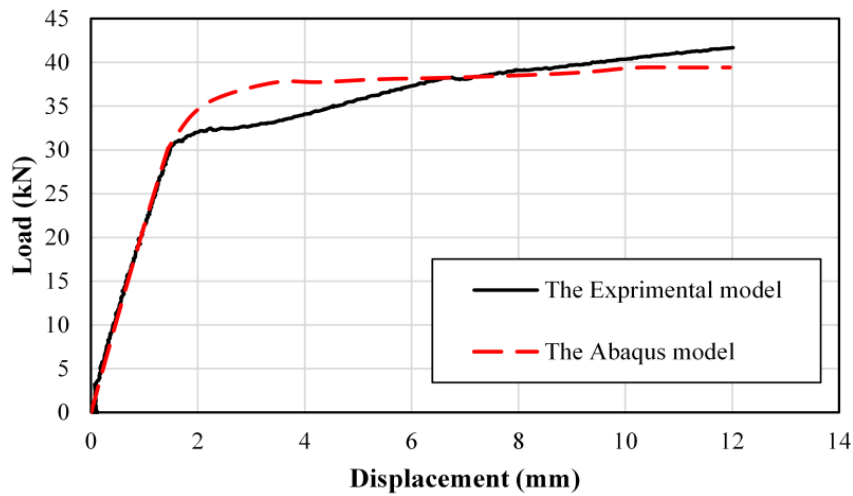
شکل ۵. مقایسه نتایج بار- تغییر مکان (الف) تیرورق ad1w4 (ب) تیرورق ad15w4

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



شکل ۶. قاب آزمایشگاهی و شیوه فرارگیری نمونه در آن

Fig. 6. Experiment setup



شکل ۷. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تیرورق دارای خم ذوزنقه‌ای

Fig. 7. Comparison of numerical and experimental results of a beam with a trapezoidal bend

۴-۱- تعیین مناسب‌ترین ابعاد پرس

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

۴-۲- تعیین مناسب‌ترین عرض پرس (w_p)

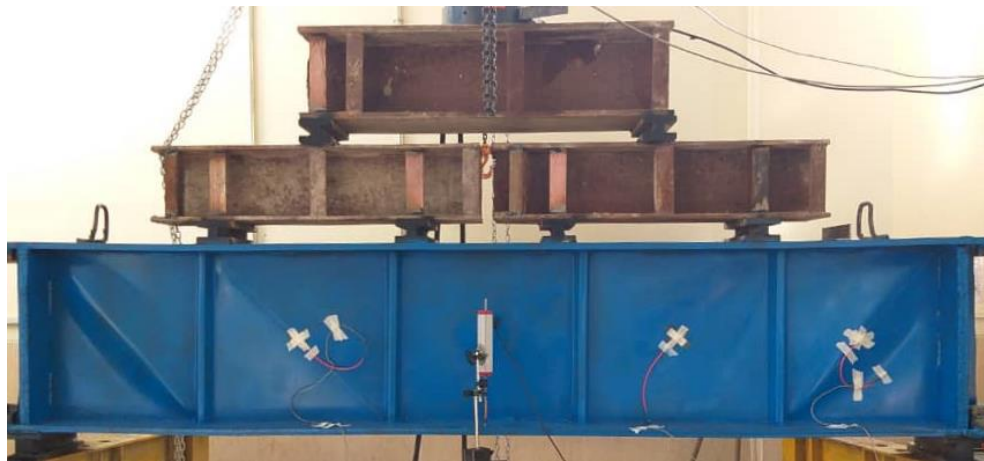
برای بررسی تاثیر عرض پرس بر روی میزان بار در تیرورق، آنالیز با عرض‌های مختلف ۲۰ mm، ۴۰ mm، ۶۰ mm، ۸۰ mm و ۱۰۰ mm صورت می‌گیرد. برای اینکه از صحت مقایسه اطمینان حاصل نمود، سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند. بر اساس شکل ۹ پرس با عرض ۲۰ mm تقریباً هیچ تاثیری در افزایش مقاومت تیرورق با ضخامت جان ۴۰ mm نداشتند. با توجه به شکل ۱۰ با تقریب خوبی می‌توان گفت که در

با ایجاد خم ذوزنقه‌ای 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.

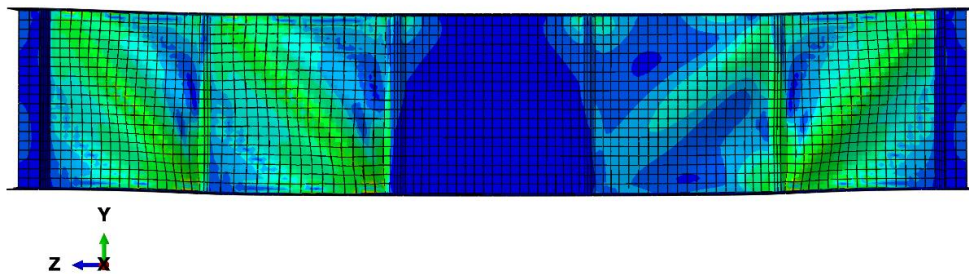
در شکل ۸-الف می‌توان به خوبی کمانش برشی که در جان نمونه آزمایشگاهی ایجاد شده است را مشاهده کرد. همچنین شکل تغییرشکل یافته نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس و کمانش برشی که در جان آن رخ داده است به خوبی در شکل ۸-ب قابل رویت است.

۴-۳- 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 تیرورق، لازم است برای تحقق اهداف این تحقیق نمونه‌هایی تعریف و با نرم‌افزار تحلیل گردند. در این تحقیق اثر پنج پارامتر اصلی بر رفتار تیرورق‌های 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 تیرورق و اثر طول دهانه بر رفتار پرس در هر حالت است.



(الف)



(ب)

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

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

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

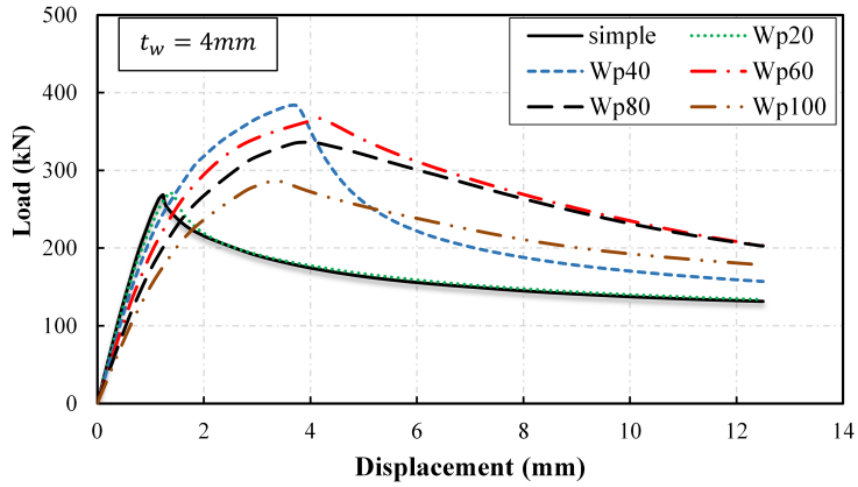
Table 3. Characteristics of the examined samples with variable press radius

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

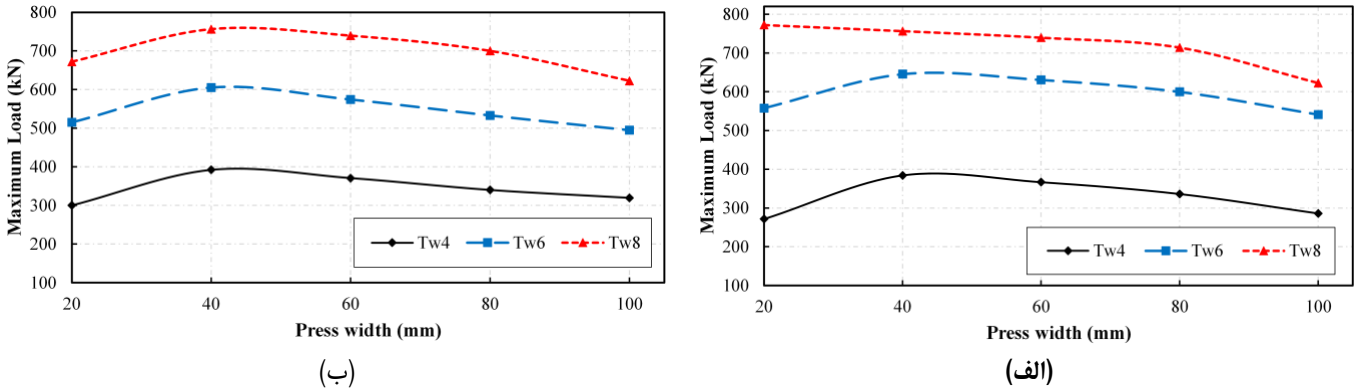
Table 4. Characteristics of the examined samples with variable press depth

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



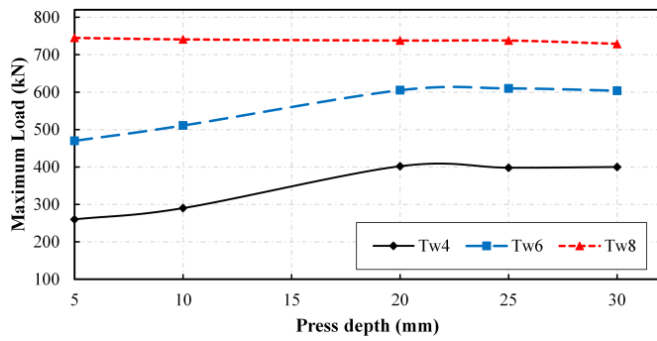
شکل ۹. ظرفیت باربری نمونه‌ها برای عرض‌های مختلف پرس ($t_w = 4\text{ mm}$ و $L = 1\text{ m}$)

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

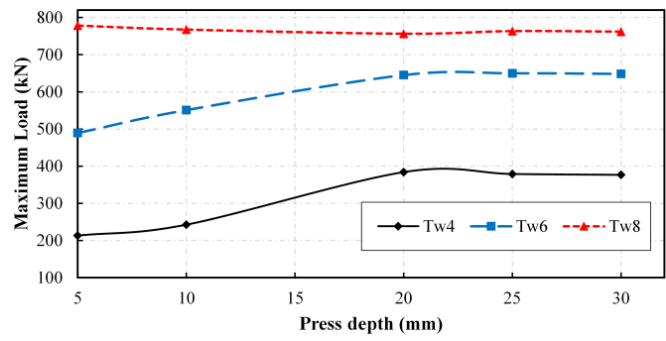


شکل ۱۰. ظرفیت باربری حداکثر نمونه‌ها برحسب تغییرات عرض پرس (الف) طول دهانه تیر ۱ m و (ب) طول دهانه تیر ۲ m

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



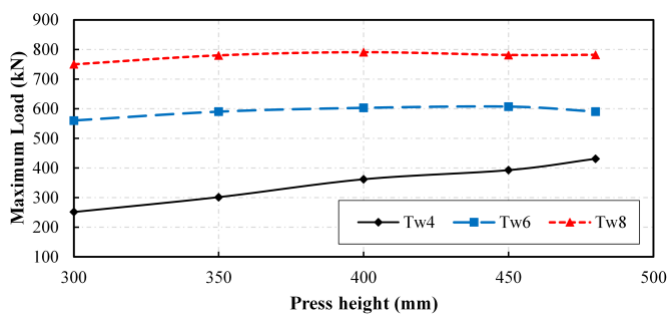
(ب)



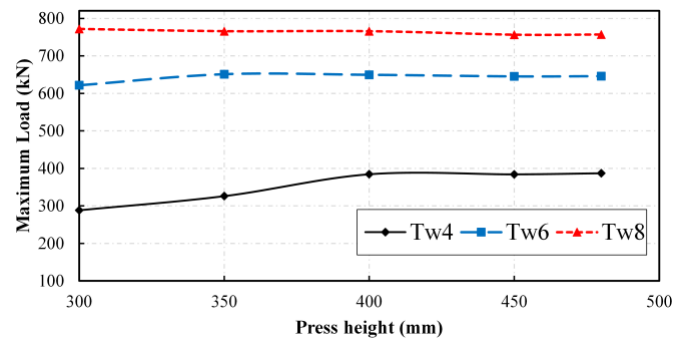
(الف)

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

Fig. 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 ۱ m و (ب) طول دهانه تیر ۲ m

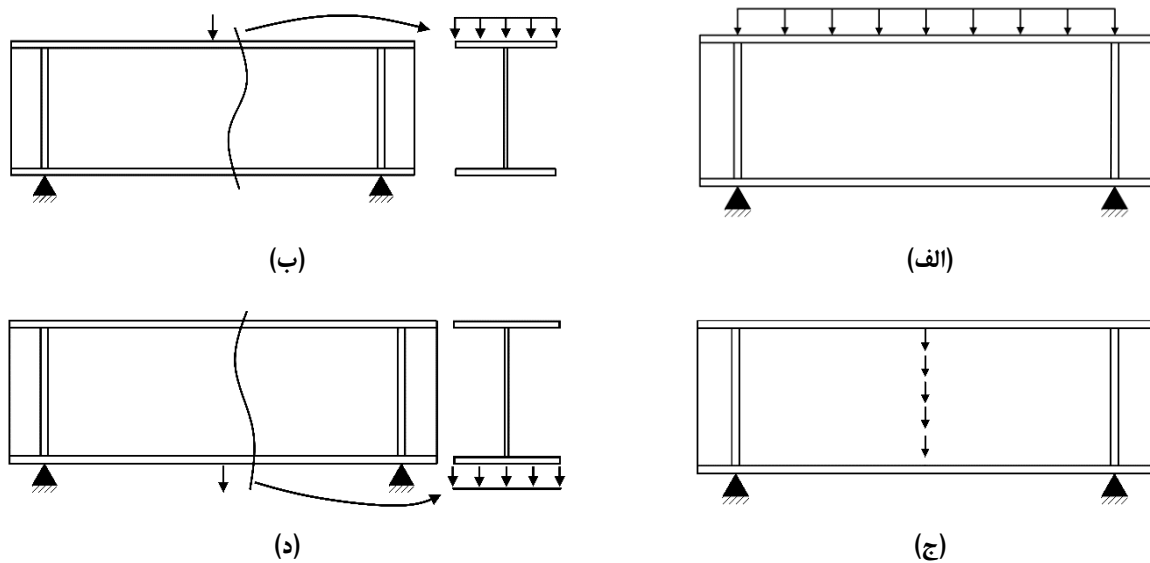
Fig. 12. Maximum capacity of samples in terms of changes in press height a) length of beam 1m and b) length of beam 2m

عمق پرس آن‌ها از ۲۰ mm بیشتر است، تغییری در حداکثر نیروی قابل تحمل آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به همین منظور پرس با شعاع ۲۰ mm انتخاب مناسبی است. جهت تعیین ارتفاع بهینه پرس مطابق شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که از ارتفاع ۴۰۰ mm و بیش‌تر ظرفیت باربری تیروورق 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

تمامی حالات پرس با عرض ۴۰ mm بالاترین ظرفیت تیروورق را به ارمغان می‌آورد و با افزایش بیش‌تر عرض پرس، ظرفیت تیروورق کاهش می‌یابد.

۳-۴ تعیین مناسب‌ترین عمق و ارتفاع پرس (h_p و r_p)

بر اساس شکل ۱۱ در اکثر نمونه‌ها، ظرفیت باربری به ازای عمق پرس ۲۰ mm به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از طرفی در تمام نمونه‌هایی که



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

Fig. 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

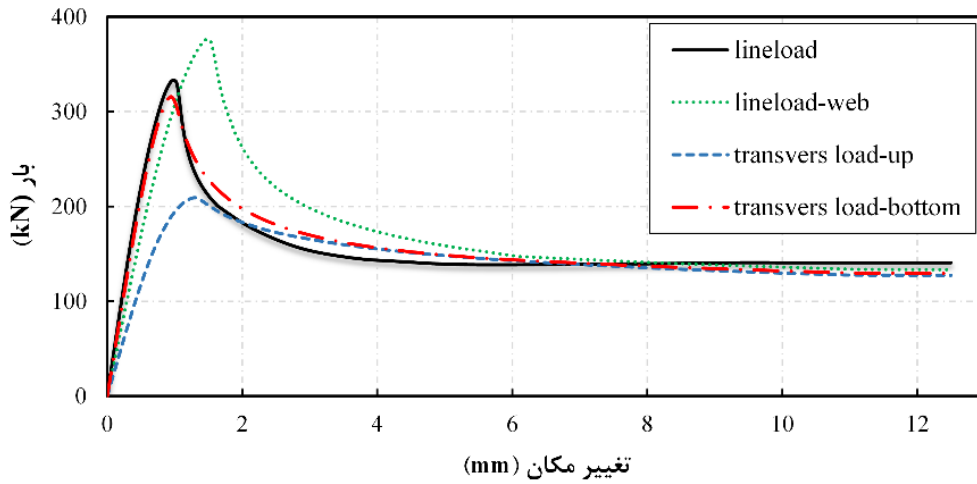
خطی وارد شده بحث لهیدگی و کمانش موضعی جان کمتر اتفاق افتاده و از این رو ظرفیت باربری در تیرورق تا حد زیادی بیش تر است. در حالت (ب)، تیرورق در معرض تسلیم موضعی جان و لهیدگی جان در برابر نیروی متمرکز فشاری است از این رو کمترین ظرفیت باربری به دست آمده است. همچنین در حالت (د) با توجه به اینکه تیرورق سرد نورد سخت شده بار قابل توجهی را تحمل کرده می توان گفت که تسلیم موضعی جان کمتر اتفاق افتاده است. در شکل ۱۶ لهیدگی های ایجاد شده در جان مشخص است.

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

ارتفاع جان در نظر گرفته می شود.

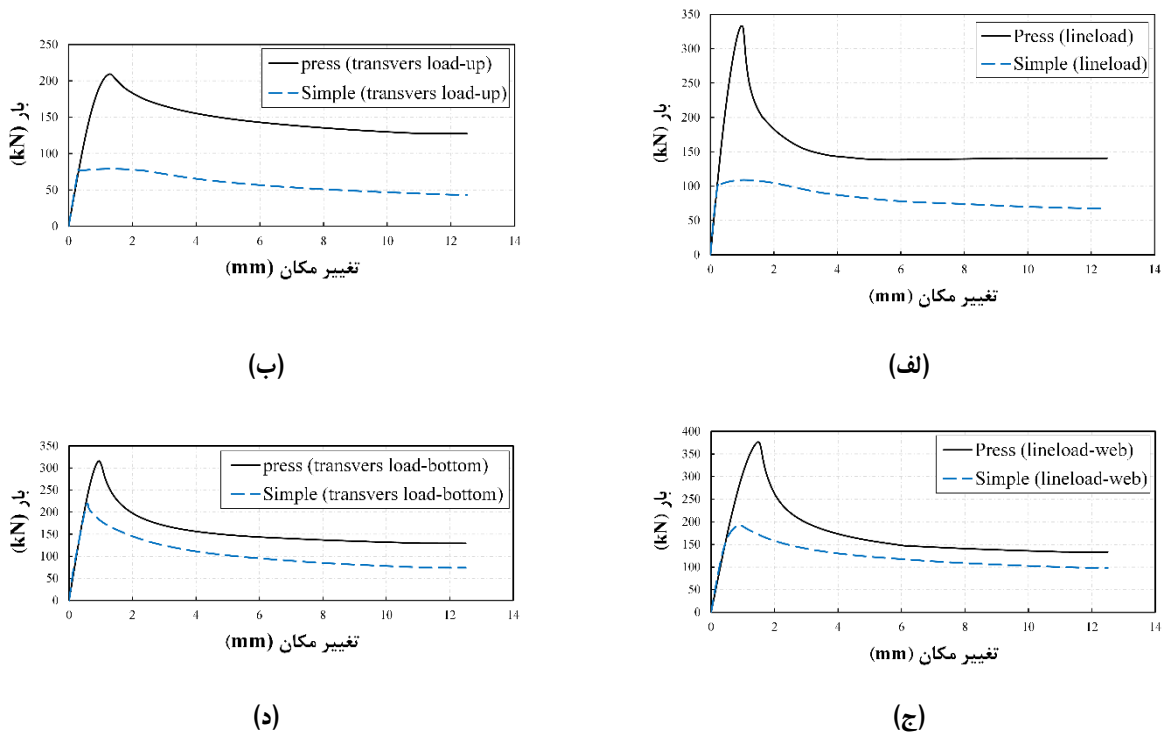
۴-۴- تاثیر اثر بارگذاری تیرورق بر ظرفیت برشی تیرهای دارای پرس
برای دست یافتن به درک بهتر از تاثیر بارگذاری بر ظرفیت برشی تیرهای دارای پرس در ادامه انواع حالات بارگذاری که شامل الف) بارگذاری خطی در طول بال فوقانی، ب) بارگذاری خطی در عرض بال فوقانی، ج) بارگذاری خطی در جان و د) بارگذاری خطی در عرض بال پایینی هستند مورد تحلیل قرار می گیرند. در شکل ۱۳ انواع حالات بارگذاری که برای تیرورق ساده و پرس مشابه است، بیان می گردد.

نمودارهای بار- تغییر مکان حالت های مختلف بارگذاری در شکل ۱۴ آورده شده است. از مقایسه این نمودارها می توان 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) به دست آمده است. دلیل این موضوع است که در حالات (الف) و (ج) از آنجا که بار به صورت



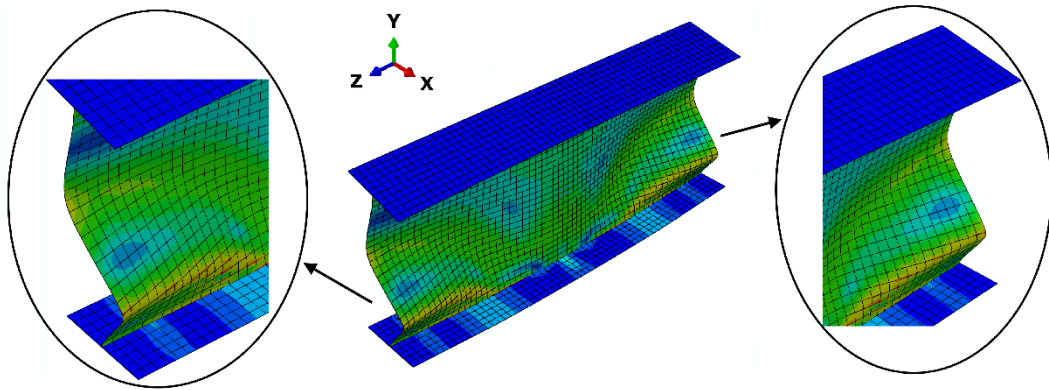
شکل ۱۴. نمودار بار-تغییر مکان در انواع حالت‌های بارگذاری برای تیروورق ۱ متری

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



شکل ۱۵. ظرفیت باربری نمونه‌های ۱ m 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

Fig. 15. 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



شکل ۱۶. کمانش فشاری قائم در جان در محل تکیه‌گاه

Fig. 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 تأثیر 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.

۵-۱- تحلیل کمانش الاستیک ورق

به منظور بررسی تأثیر پرس در جان تیروورق، 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.

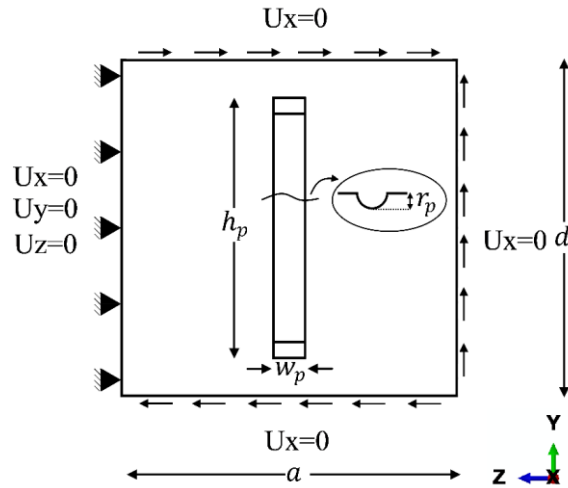
بر اساس اصول تئوری ورق‌ها [۲۲]، می‌توان تنش برشی بحرانی که در جان مقطع I شکل ایجاد کمانش برشی می‌کند را به کمک رابطه (۲) محاسبه نمود.

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

برای اطمینان از درستی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار 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 N/۳۰۱/۷۷ و ورق ساده مستطیلی برابر N/mm ۴۳۱/۰۴ می‌باشد که به ترتیب بیان‌گر ۰/۲۲٪ و ۲/۸۶٪ خطا نسبت به نتایج نظری است.

الف) تحلیل کمانش الاستیک ورق مربعی:

بار کمانشی برای ورق‌های مربعی در سه حالت ساده، با پرس و دارای



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

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

جدول ۵. مشخصات ورق‌های مربعی جهت تحلیل کمانش

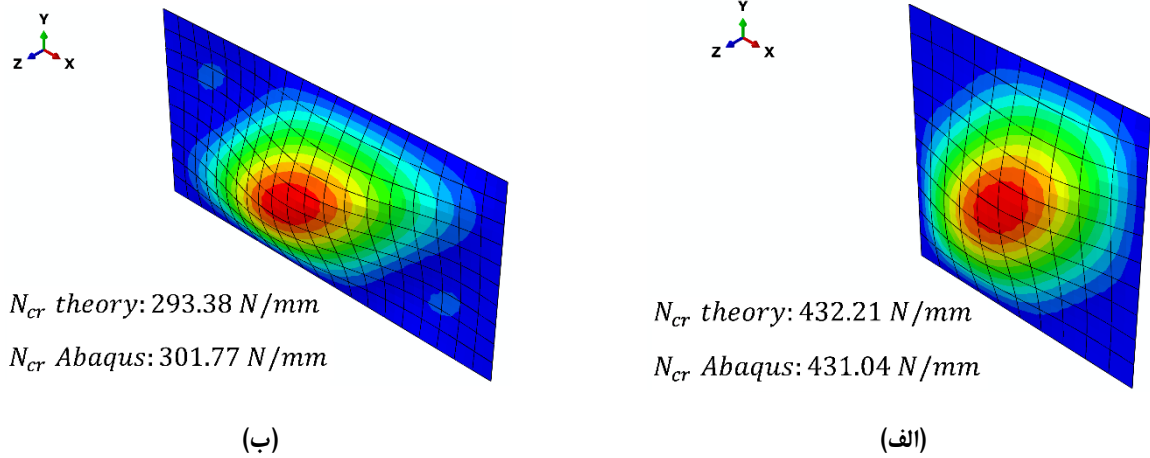
Table 5. Specifications of square plates for buckling analysis

شماره نمونه	نمونه	نوع ورق	a	d	t_w	w_p	r_p	h_p
واحد	-	-	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
واحد	-	-	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	-	-	-



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

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

درک بهتر این موضوع با مقایسه ورق‌های دارای پرس نسبت به ورق ساده می‌توان گفت که بار کماتشی ورق دارای یک پرس و ورق دارای سه پرس به ترتیب $1/56$ و $3/5$ برابر ورق ساده می‌باشند. در مقایسه‌ای دیگر می‌توان به نکته‌ای جالب اشاره کرد که ورق دارای یک پرس نسبت به ورق دارای یک سخت‌کننده، بار کماتشی بیشتری را تحمل می‌کند.

۵-۲- تحلیل کماتش الاستیک تیرورق

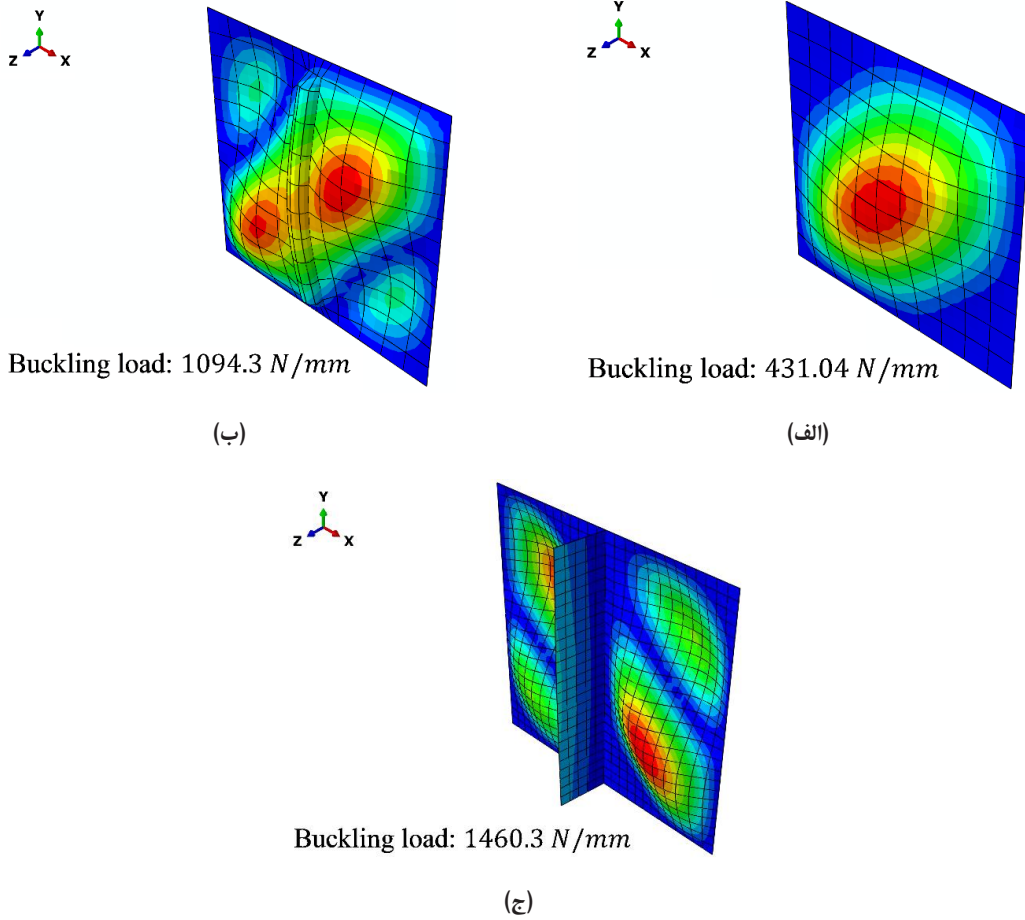
در این قسمت ۵ حالت مختلف از تیرورق (که شامل تیرورق ساده، با ۳ پرس، با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی، با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس و با ۳ سخت‌کننده هستند) بر اساس جدول ۷ جهت تحلیل کماتش مورد بررسی قرار می‌گیرند. مد اول کماتش و ضریب کماتش، خروجی‌های مورد نظر برای هر تیرورق بوده تا با مقایسه و بررسی آن‌ها،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

بار کماتشی برای حالات مختلف به ترتیب برابر با $489/23\text{ kN}$ ، $165/58\text{ kN}$ ، $353/29\text{ kN}$ ، $177/41\text{ kN}$ و $30/71\text{ kN}$ به‌دست آمده‌اند. بر این اساس حالت ۱ دارای بیش‌ترین بار کماتشی و حالت ۵ دارای کم‌ترین بار

سخت‌کننده به ترتیب $431/04\text{ N/mm}$ ، $1094/3\text{ N/mm}$ و $1460/3\text{ N/mm}$ به‌دست آمده‌اند (شکل ۱۹). بر این اساس در ورق مربعی، حالت ۳ دارای بیش‌ترین بار کماتشی و حالت ۱ دارای کم‌ترین بار کماتش در بین حالات بررسی شده است. وجود پرس باعث افزایش 154% ظرفیت برشی نسبت به ورق ساده می‌شود و تنها 33% از ظرفیت برشی آن نسبت به ورق دارای سخت‌کننده کاهش می‌یابد. مقایسه این حالات در نمودار شکل ۲۰ به‌خوبی نشان داده شده است.

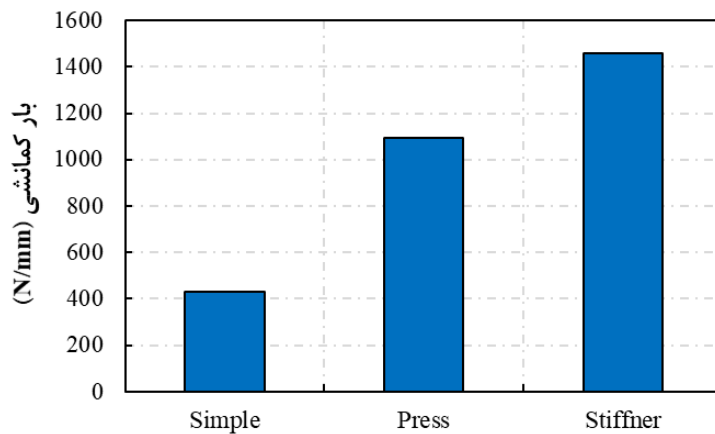
ب) تحلیل کماتش الاستیک ورق مستطیلی:

بار کماتشی برای ورق‌های مستطیلی در ۵ حالت که شامل ورق ساده، ورق با یک پرس، ورق با سه پرس، ورق دارای یک سخت‌کننده و ورق دارای سه سخت‌کننده مطابق شکل ۲۱ به‌دست آمده است. این بار کماتشی برای حالات گفته شده به ترتیب برابر با $301/77\text{ N/mm}$ ، $470/03\text{ N/mm}$ ، $1055/7\text{ N/mm}$ ، $463/51\text{ N/mm}$ و $1679/7\text{ N/mm}$ به‌دست آمده‌اند. بار کماتشی در ۵ حالت مختلف در شکل ۲۲ به‌خوبی باهم مقایسه شده‌اند. بر این اساس ورق با سه سخت‌کننده دارای بیش‌ترین بار کماتشی و ورق ساده دارای کم‌ترین بار کماتش است. نتایج نشان می‌دهند که وجود پرس در ورق، ظرفیت برشی آن را تا حد زیادی بهبود بخشیده است. جهت



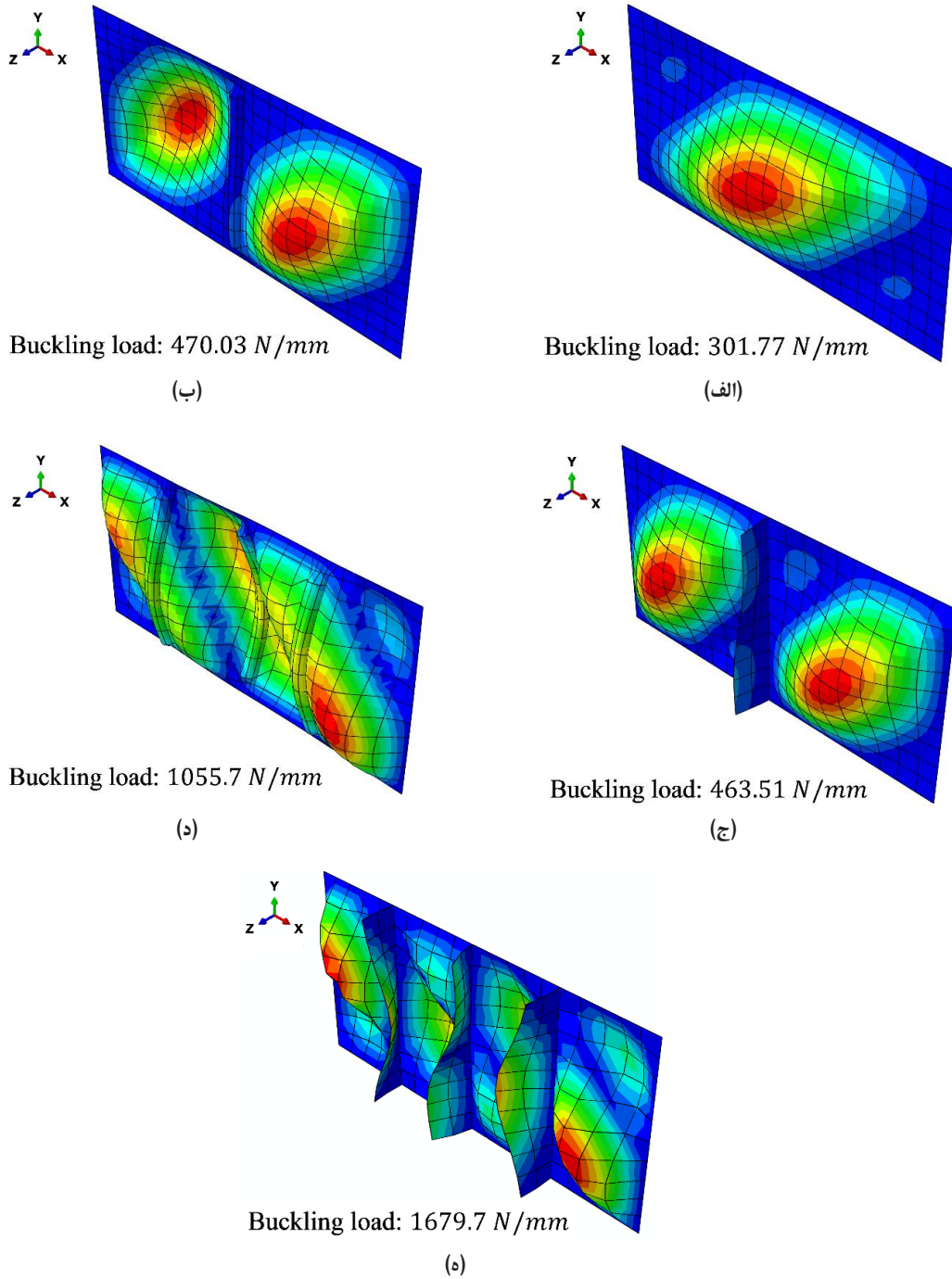
شکل ۱۹. مد اول کمانش برای حالات مختلف ورق مربعی الف) ورق ساده، ب) ورق با پرس و ج) ورق با سخت کننده

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



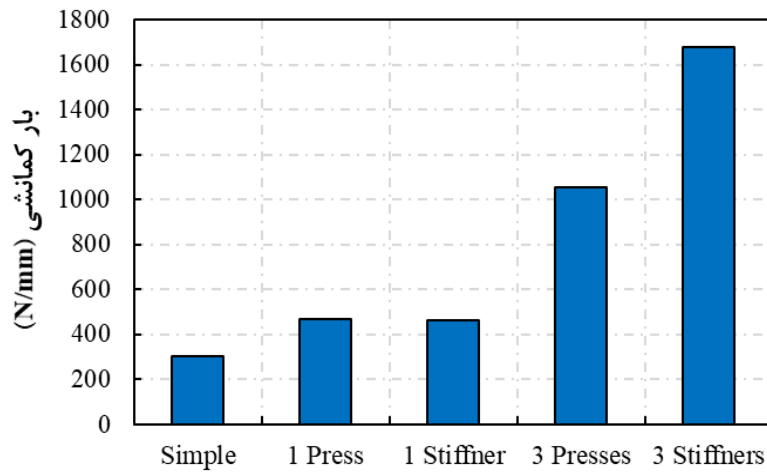
شکل ۲۰. نمودار بار کمانش برشی - حالات مختلف ورق مربعی

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



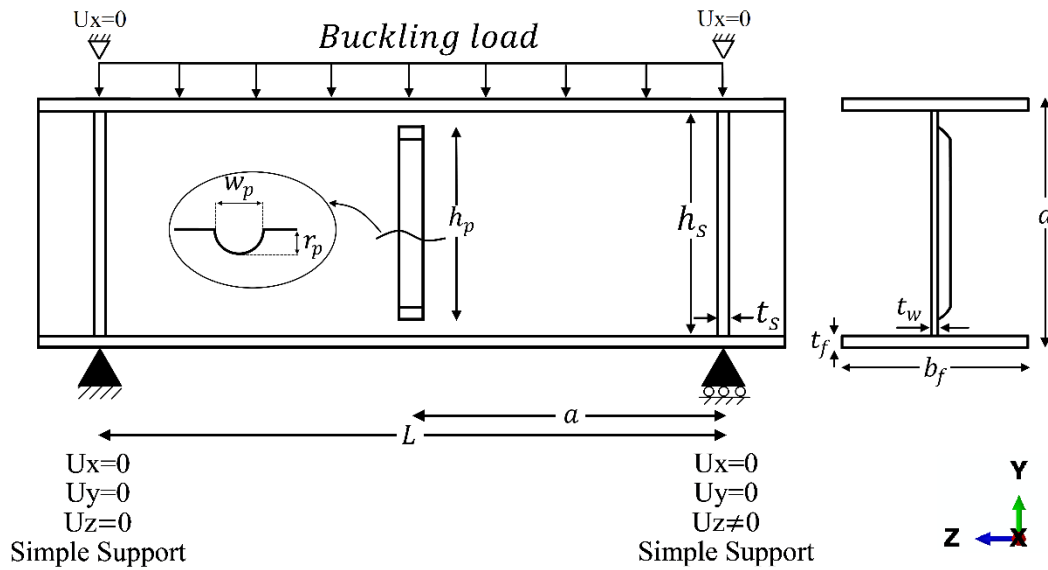
شکل ۲۱. مد اول کمانش برای حالات مختلف ورق مستطیلی الف) ورق ساده، ب) ورق با یک پرس، ج) ورق با یک سخت‌کننده، د) ورق با سه پرس، و ه) ورق با سه سخت‌کننده

Fig. 21. 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

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



شکل ۲۳. مشخصات کلی تیورق‌های مورد بررسی جهت تحلیل کمانش

Fig. 23. General characteristics of the beams for buckling analysis

جدول ۷. مشخصات تیورق‌های مورد بررسی جهت تحلیل کمانش

Table 7. Specifications of beams examined for buckling analysis

شماره نمونه	نمونه	نوع تیورق	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

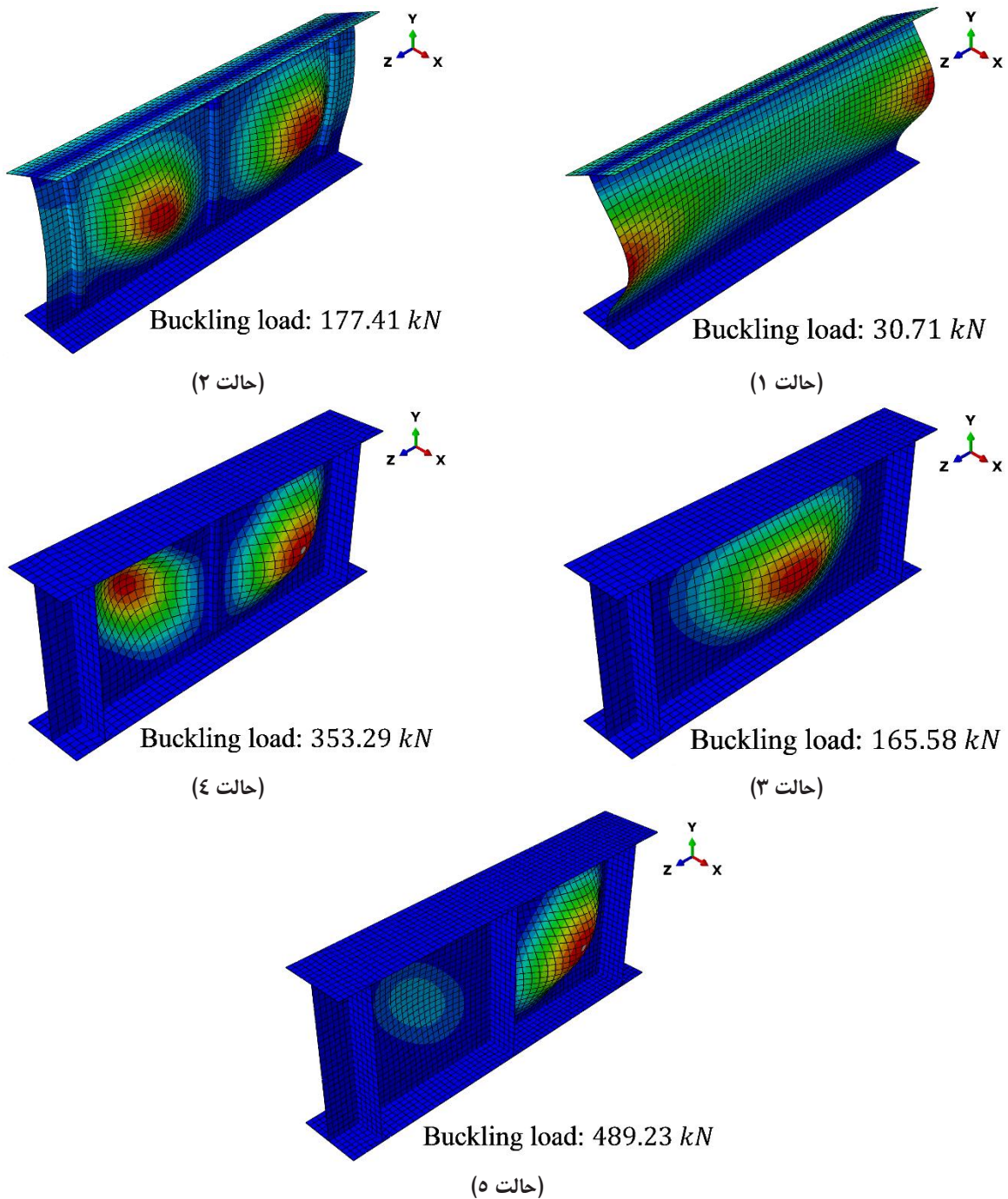
چنانچه جان نازک تیورق تحت تنش‌های برشی قرار بگیرد، ممکن است در آن کمانش برشی رخ دهد. از طرفی برای حاکم شدن و مشاهده کمانش برشی باید از کمانش ناشی از خمش تیورق جلوگیری کرد که برای رسیدن به این هدف، طراحی خمشی مقاطع طوری انجام شده که بار معادل ظرفیت خمشی $1/3$ برابر یا بیشتر از بار معادل ظرفیت برشی شود. 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 به‌صورت 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.

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

کمانش است و بار کمانشی در ۵ حالت مختلف در شکل ۲۴ به‌خوبی باهم مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که وجود پرس در جان تیورق عملکرد آن را تا حد قابل‌توجهی بهبود بخشیده است و باعث افزایش بار کمانشی تیورق شده است. جهت درک بهتر این موضوع با مقایسه حالات ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که بار کمانشی تیورق با وجود پرس ۱۱۳٪ افزایش می‌یابد. در مقایسه حالت ۴ (تیورق دارای ۳ پرس) با حالت ۵ (تیورق 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 تیورق شده است (شکل ۲۵).

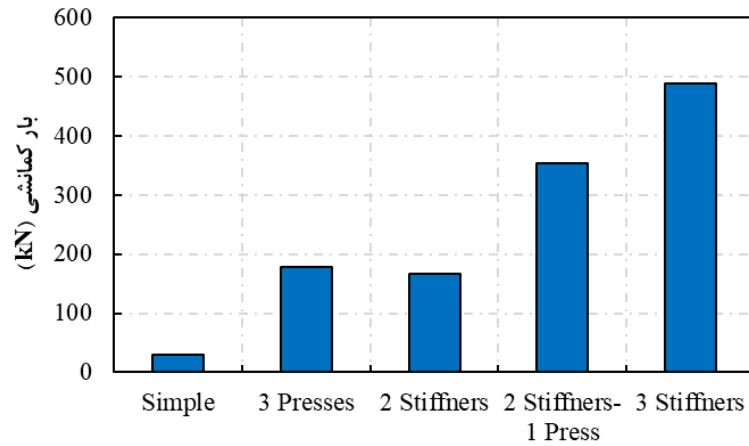
۶- تحلیل تیورق‌های طویل سرد نورد سخت شده

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 ۶ m و ضخامت جان ۸ mm 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 به‌منظور درک بهتر مقایسه می‌شوند. مشخصات هندسی تیورق ۶ متری مطابق شکل ۲۶ است.



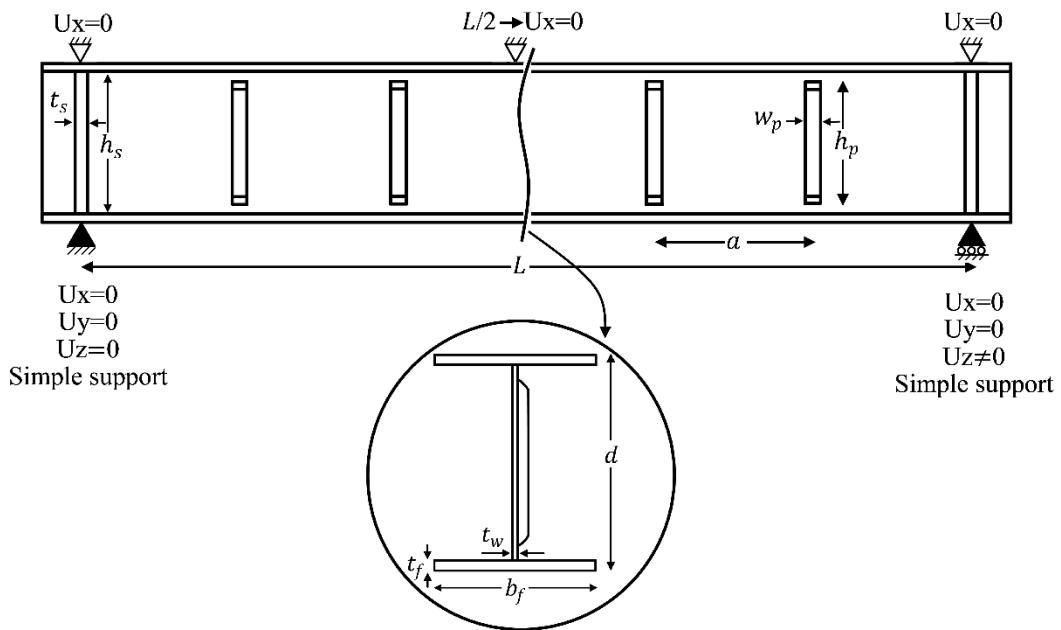
شکل ۲۴. مد اول کمانش برای حالات مختلف تیورق، الف) ساده، ب) با سه پرس، ج) با سخت کننده‌های تکیه گاهی، د) با سخت کننده‌های تکیه گاهی و پرس، و ه) با سخت کننده‌های کامل

Fig. 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



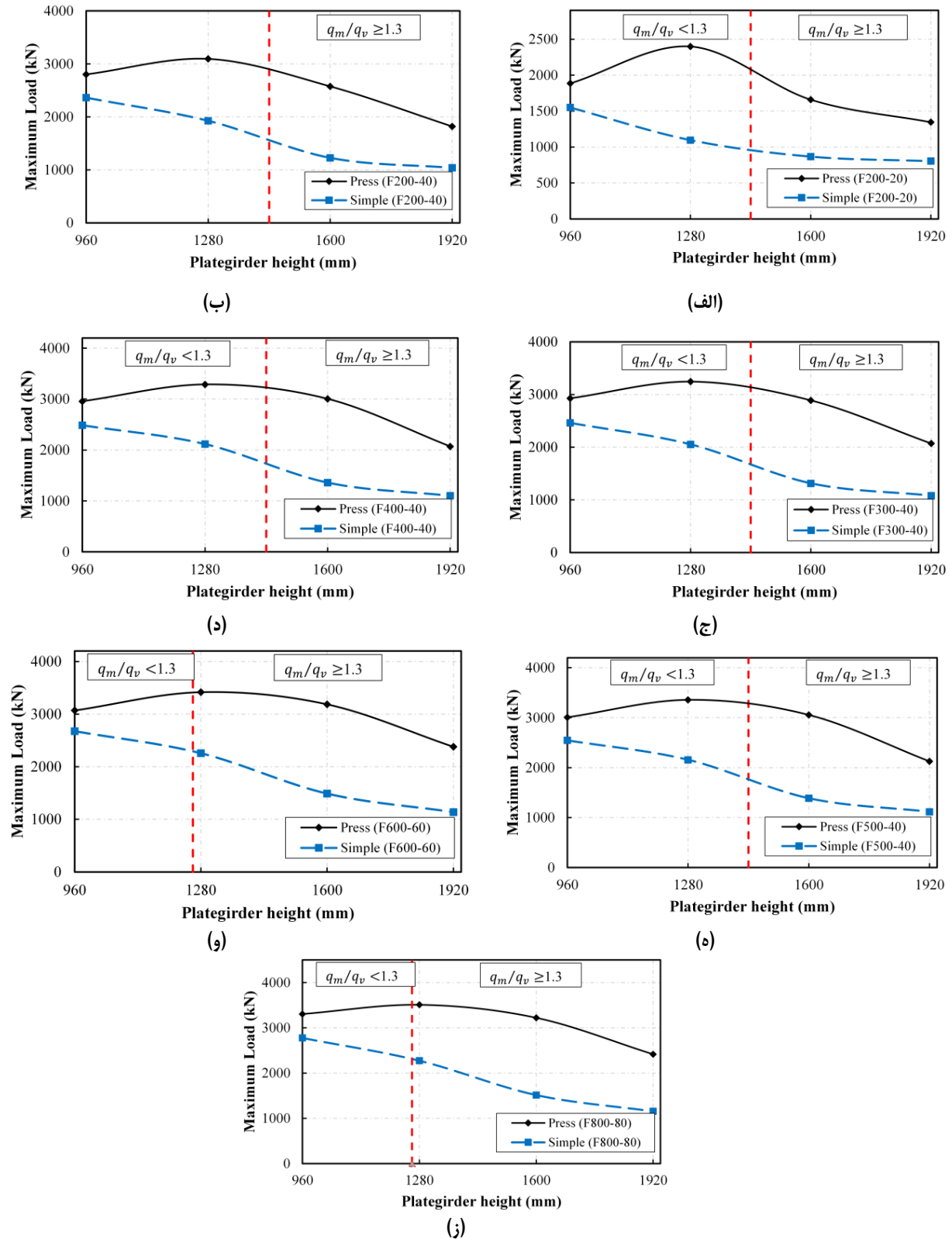
شکل ۲۵. نمودار بار کمانشی - حالات مختلف تیرورق

Fig. 25. Buckling load diagram - different states of beams



شکل ۲۶. مشخصات هندسی نمونه‌های طولی ۶ متری

Fig. 26. Geometric characteristics of 6 meters long samples



شکل ۲۷. نمودار بار حداکثر- ارتفاع نمونه‌های با ضخامت جان ۸ mm با ابعاد بال مختلف، الف) ۲۰ × ۲۰ mm، ب) ۲۰ × ۴۰ mm، ج) ۴۰ × ۳۰۰ mm، د) ۴۰ × ۴۰۰ mm، ه) ۴۰ × ۵۰۰ mm، و) ۵۰۰ × ۴۰ mm، ز) ۶۰۰ × ۶۰۰ mm، ح) ۸۰۰ × ۸۰۰ mm

Fig. 24. 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

جدول ۸. مشخصات هندسی نمونه‌های مورد تحلیل با جان ۸ mm

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

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

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

به‌منظور مطالعه رفتار تیورق‌های سرد نورد سرد 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 (۴ mm، ۶ mm و ۸ mm) 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 ۴۰ mm و ۲۰ mm به دست آمد، ارتفاع پرس متناسب با ارتفاع تیورق بوده به این صورت که با توجه به نکات اجرایی مانند فاصله مورد نیاز برای جوش‌کاری و عملیات پرس زدن، ارتفاع پرس معمولاً چند سانتی‌متر کمتر از ارتفاع جان در نظر گرفته می‌شود.

منابع

- [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

جهت بررسی تاثیر پرس در ظرفیت باربری ورق و تیورق دارد، ابتدا تحلیل کمانش الاستیک بر روی ورق‌های مربعی و مستطیلی و سپس تیورق 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 تیورق‌ها پرس نیز به‌خوبی عمل کرده چرا که بار کمانشی تیورق دارای ۳ پرس، ۵/۷۸ برابر تیورق ساده است. در تمامی حالات بررسی شده، پرس، باعث افزایش ظرفیت کمانشی یا بار بحرانی نمونه‌ها می‌شود.

- 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.
- 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Moradi, S. M. Zandi, H. Amoshahi, Numerical and experimental investigation of the shear behavior of hardened cold-rolled beams, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(4) (2024) 377-406.

DOI: [10.22060/ceej.2024.18644.6950](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.18644.6950)

