



## تحلیل رفتار برشی تیوروق فولادی با جان موج‌دار محلی تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی

سحر کرکزن<sup>۱</sup> و سید مهدی زندی آتشبار<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی  
<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

### چکیده

تیوروق‌ها اعضای خمشی فولادی هستند و در مواردی که نیم‌رخ‌های نوردشده موجود در بازار قادر به تحمل بارهای وارده بر عضو خمشی نباشند، از ترکیب مناسب ورق‌های فولادی ساخته می‌شوند. کنترل تنش‌های برشی در تیوروق‌های دارای جان نازک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا در همان مراحل اولیه بارگذاری می‌تواند باعث کمانش برشی و در نهایت شکست جان تیر شود. تجربیات نشان می‌دهند که اگر در تیوروق‌ها از سخت‌کننده‌های میانی عرضی استفاده شود، کمانش برشی منجر به خرابی نمی‌شود و پس از ایجاد کمانش، تیوروق به باربری خود ادامه می‌دهد. هدف از نگارش این مقاله، بررسی رفتار تیوروق‌ها با جان موج‌دار محلی در مقایسه با تیر ورق‌ها با سخت‌کننده‌های عرضی برای کنترل کمانش برشی است. موج محلی روی ورق جان توسط دستگاه پرس ایجاد می‌شود. با توجه به این که تاکنون مطالعات تحلیلی روی تیوروق‌ها با جان موج‌دار محلی انجام نشده است، در این مقاله به بررسی چگونگی ایجاد موج‌های محلی، مشخصات موج‌ها، عملکرد آن‌ها در برابر کمانش برشی و تغییرشکل‌های بزرگ و آنالیز کمانش، به صورت عددی پرداخته شده است. نتایج بدست آمده در اکثر تیوروق‌های مورد مطالعه، حاکی از آن است که تیوروق با جان موج‌دار محلی نسبت به یک تیوروق ساده بدون سخت‌کننده میانی عرضی، به ظرفیت برشی بیشتری رسیده است.

**کلمات کلیدی:** رفتار برشی تیوروق؛ تیوروق با جان موج‌دار محلی؛ سخت‌کننده‌های میانی؛ مدل‌سازی عددی.

## Shear Behavior Analysis of Steel Plate Girders with Local Corrugated Web under Monotonic Loading

S. Korkzan<sup>1</sup>, S.M. Zandi<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. student, Civil Eng., Ashrafi Isfahani Univ., Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Civil Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran.

### Abstract

Plate girders are flexural members and they usually use instead of hot rolled sections in the matter of their high flexural capacity. Plate girders are made by suitable combination of steel plates the reason why monitoring of shear stresses in plate girders with thin-walled webs are important is the probability of shear buckling and failure of web due to the initial steps of loading. Experiences illustrate that if intermediate and bearing stiffeners used in plate girders, not only the shear buckling do not cause failure but also it stay stable for bearing loads. The main objective of this research was study on their behavior of plate girders with corrugated web in comparison with plate girders with bearing stiffeners due to controlling of shear buckling (local corrugated web created by applying incremental static loading). In this research several items got studied like how to create local corrugated web and their properties and performances in shear buckling large deformations and numerical buckling analysis. Results provides information about the higher shear capacity in plate girders in local corrugated web in comparison with simple plate girders without any stiffeners.

**Keywords:** Shear Behavior of Plate Girder; Plate Girders with Local Corrugated Web; Intermediate Stiffener; Numerical Modeling.

## ۱- مقدمه

تیورق‌ها<sup>۱</sup> می‌توانند به دو روش طراحی شوند: ۱- طراحی تنش مجاز بر پایه‌ی کمانش الاستیک ۲- طراحی مقاومت بر اساس مقاومت نهایی، شامل مقاومت پس از کمانش. ماهیت الاستیک در تیورق‌ها توسط درجه‌گیری اتصال بال به جان محدود می‌شود [۱]. استفاده از تیرهایی با جان موجدار به منظور افزایش سختی خارج از صفحه و افزایش مقاومت کمانش، بدون استفاده از تقویت‌های عمودی، مورد توجه قرار گرفته است [۲]. عواملی که بر ظرفیت نهایی و حالت کمانش تیورق‌هایی با جان موجدار دوزنقه‌ای تحت اثر برش مؤثر است به ترتیب: ۱- ابعاد کلی ورق جان ۲- ضخامت ورق جان ۳- عمق موج دوزنقه‌ای ۴- زاویه موج دوزنقه‌ای ۵- عرض صفحه افقی موج دوزنقه‌ای می‌باشند [۳]. تئوری‌های شکست برشی موجود برای پانل جان، مانند مدل پیشنهاد شده توسط باسلا<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۳ و پورتر و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۵، مقاومت برشی نهایی پانل جان را برای طیف وسیعی از طرح‌های عملی پیش‌بینی کرده‌اند؛ اما فرض‌های در نظر گرفته شده در این تئوری‌ها نمی‌توانند رفتار برشی پانل جان را به دقت نشان دهند [۴]. ریل و همکاران در سال ۲۰۰۷ به صورت آزمایشگاهی دریافتند، رفتار برشی تیورق با فولاد ضدزنگ مشابه تیورق با فولاد کربنی است. از بررسی نتایج عددی و تجربی تیورق‌های با فولاد ضدزنگ مشاهده شده است که در تیورق‌هایی با جان لاغر، قبل از تسلیم شدن منجر به کمانش برشی می‌شود [۵]. با اعمال تنش برشی، شکست جان موجدار دوزنقه‌ای، تحت اثر یکی از سه نوع کمانش: موضعی<sup>۵</sup>، کلی<sup>۶</sup> و برشی تعاملی موجب می‌شود [۶]. پس از کمانش برشی جان، به دلیل عدم افزایش تنش فشاری مستقیم، بارگذاری اضافی به وسیله افزایش تنش کششی و تشکیل میدان کششی قطری انتقال می‌یابد [۷]. علی‌نیا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به صورت عددی دریافتند، ویژگی‌های شکست برشی در تیورق‌های فولادی همراه با

تغییرشکل‌های بزرگ، پانل‌های برشی ساده به صورت صفحات جدا شده، نمی‌توانند عیناً مکانیزم شکست ورق جان را نشان دهند. همچنین در سال ۲۰۱۱ در مطالعاتی عددی روی مقاومت پس از کمانش تیورق‌ها نتایج نشان می‌دهند که پس از کمانش برشی ورق جان در تیورق‌ها، تنش‌های اصلی کششی و فشاری در نزدیکی لبه‌های صفحات جان، افزایش می‌یابند [۸ و ۹]. ضخامت تیرهایی با جان موجدار سینوسی<sup>۷</sup>، معمولاً نازک و از ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر است. این عامل موجب کاهش قابل توجه وزن سازه در مقایسه با مقاطع گرم‌نوردشده یا مقاطع I شکل ساخته شده توسط جوش دادن ورق می‌شود [۱۰]. حسنین و خاروب در سال ۲۰۱۰ در مطالعاتی عددی دریافتند، مقاومت برشی تیورق‌های I شکل با بال توخالی، مفصل‌های پلاستیک در این تیورق‌ها، به دلیل تغییرشکل‌های برشی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها رخ می‌دهند. در سال ۲۰۱۳ در تحقیقی عددی که روی مقاومت برشی تیرهای پل با جان موجدار دوزنقه‌ای انجام شد، نتایج نشان می‌دهد که، تیرهایی با جان موجدار ضخیم، تسلیم برشی را تجربه نمی‌کنند [۱۱ و ۱۲]. سینور و بگ در سال ۲۰۱۲ در تحقیقی روی سخت‌کننده‌های عرضی میانی در تیورق‌ها دریافتند، نیروی محوری ایجاد شده در سخت‌کننده‌ها ناشی از عملکرد حوزه کشش در کدهای طراحی دست بالا گرفته شده است؛ همچنین همه الزامات طراحی برای سخت‌کننده‌های عرضی صلب، می‌تواند توسط تعریف حداقل ممان دوم مورد نیاز سطح، پوشش داده شود [۱۳]. نی و همکاران در سال ۲۰۱۳ مقاومت برشی تیرهای جعبه با جان موجدار دوزنقه‌ای در آزمایش‌هایی با حالت برش خالص، توزیع تنش و کرنش برشی فراتر از ارتفاع جان توزیعی یکنواخت است، در نتیجه می‌توان ارتفاع بیشتری برای جان فرض کرد [۱۴]. در تیرهایی با جان موجدار دوزنقه‌ای، اگرچه کمانش غیرالاستیک برای کنترل مقاومت برشی جان کاربردی‌تر است، اما ضریب کمانش برشی موضعی الاستیک ( $K_L$ )، یک پارامتر مهم در محاسبه‌ی مقاومت برشی است [۱۵]. حجازی و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی رفتار تیورق‌های فولادی با جان موجدار دوزنقه‌ای از نظر مقاومت

<sup>1</sup> Plate Girder<sup>2</sup> Trapezoidally Corrugated Web<sup>3</sup> Basler<sup>4</sup> Porter et al<sup>5</sup> Local Buckling<sup>6</sup> Global Buckling<sup>7</sup> Sinusoidal Corrugation Web

ابعاد تیوروق ایجاد شده است [۲۰]. گنکالو و همکارانش در سال ۲۰۱۶، تعیین لنگر بحرانی الاستیک برای تیرهایی با جان موج‌دار سینوسی را پیش رو گرفتند. در این تحقیق به محاسبه لنگر بحرانی الاستیک برای جان‌های موج‌دار تحت خمش یکنواخت یا خمش غیریکنواخت و یا تحت توزیع یکنواخت بار پرداخته شده است. بر اساس روش‌های موجود پیشین برای جان‌های دوزنقه‌ای، فرمول‌های کلی جدیدی برای محاسبه لنگر بحرانی الاستیک حالت کمانش پیچشی جانبی جان‌های سینوسی پیشنهاد شده است [۲۱].

## ۲- نحوه‌ی مدل‌سازی و صحت‌سنجی

در این مقاله، از نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</sup> [۲۲] استفاده شده است. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج عددی و نحوه مدل‌سازی از مقاله‌ی ریل و همکاران [۷۴]، استفاده شده است. در این مقاله مقاله پاسخ برشی تیوروق‌هایی با ابعاد و مشخصات هندسی متفاوت به صورت آزمایشگاهی و عددی، مورد مطالعه قرار داد. ابعاد، مشخصات نمونه مورد آزمایش و مشخصات فولاد مصرفی ورق‌ها با ضخامت‌های مختلف به ترتیب در شکل ۱، جدول ۱ و شکل ۲ آمده است. به منظور مدل‌سازی تیوروق‌ها از المان پوسته<sup>۵</sup> در محیط سه بعدی استفاده شده است. برای تعریف ناحیه الاستیک در تمامی مدل‌ها، مدول یانگ<sup>۶</sup> و نسبت پواسون<sup>۷</sup> به ترتیب برابر با  $2 \times 10^5$  مگاپاسکال و  $0.3$  در نظر گرفته شده است. برای تعریف ناحیه غیرخطی در نرم‌افزار آباکوس لازم است تا تنش تسلیم<sup>۸</sup> و کرنش پلاستیک<sup>۹</sup> به صورت مجموعه‌ای از نقاط اعمال شوند. تکیه‌گاه‌های دو سر تیوروق از نوع مفصلی و غلظتی هستند؛ همچنین از حرکت جانبی تیرها نیز جلوگیری شده است. بارگذاری استاتیکی در نرم‌افزار آباکوس به دو طریق بارگذاری با اعمال تغییر مکان و بارگذاری با اعمال نیروی مستقیم قابل انجام است.

برشی، خمشی و کمانشی پرداختند. این نوع تیوروق‌ها به منظور افزایش سختی پیچشی که منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت کمانش جانبی می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. موج‌دار کردن جان، سختی محوری را کاهش و زمانی که تنش در جان به دلیل پیش‌تنیدگی ایجاد می‌شود، به موجب عدم سختی جان و امکان وقوع تغییر شکل در راستای محور جان، تحت تاثیر تنش‌های محوری قرار نمی‌گیرد. به سبب افزایش مقاومت کمانش موضعی و خارج از صفحه در این تیوروق‌ها سخت‌کننده‌ها حذف می‌شوند. از نتایج استفاده از جان موج‌دار می‌توان به حذف سخت‌کننده‌های طولی و عرضی و کاهش وزن تیر به حداقل مقدار ممکن، افزایش سختی پیچشی و به تبع آن افزایش ظرفیت کمانش جانبی، عدم تاثیر عمق موج در ظرفیت برشی نهایی، افزایش مقاومت برشی با زیاد شدن زاویه موج و کاهش ضخامت جان تا ۷۰ درصد اشاره کرد [۱۶]. نون و ریو در تحقیق آزمایشگاهی و عددی در سال ۲۰۱۶ مقاومت برشی صفحات انتهایی تیر ورق‌ها همراه با عمل حوزه کشش در آزمایش برش را بررسی کردند. طبق نتایج، مقاومت پس از کمانش در حالت کمانش برشی تأثیر به‌سزایی بر استحکام برشی نهایی ورق انتهایی جان تیوروق دارد [۱۷]. زمانی که از سخت‌کننده‌های طولی<sup>۱</sup> برای مهار تغییرشکل سخت‌کننده‌های عرضی<sup>۲</sup> در لبه‌های فشاری استفاده شود، مقاومت کمانش در آن بخش افزایش می‌یابد. با این حال سخت‌کننده‌های عرضی اضافی، نقشی در بالا بردن مقاومت کمانش نداشته است [۱۸]. دو و همکاران در سال ۲۰۱۶، درباره ورق فولادی موج‌دار سینوسی با عملکرد دیوار برشی نشان داده‌اند، تعداد تکرار موج‌ها تأثیر قابل توجهی بر بارهای کمانش برشی الاستیک دارد؛ 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 [۱۹]. طول مؤثر چین‌خوردگی در تیرهایی با جان موج‌دار دوزنقه‌ای، معمولاً ۵ تا ۷ برابر تیرهایی با جان موج‌دار سینوسی است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که جان موج‌دار دوزنقه‌ای لنگر خمشی بزرگ‌تری نسبت به جان موج‌دار سینوسی خواهد داشت. با این حال این تفاوت به خاطر

<sup>3</sup> ABAQUS

<sup>4</sup> Real et al

<sup>5</sup> Shell

<sup>6</sup> A Young's modulus

<sup>7</sup> Poisson's ratio

<sup>8</sup> Yield Stress

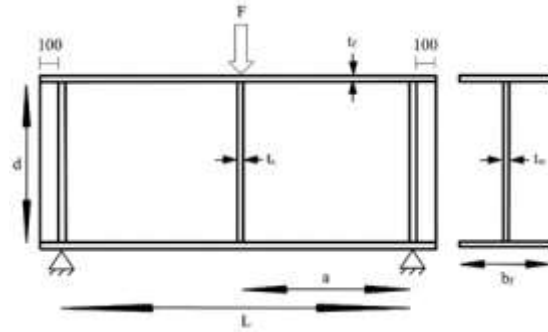
<sup>9</sup> Plastic Strain

<sup>1</sup> longitudinal stiffeners

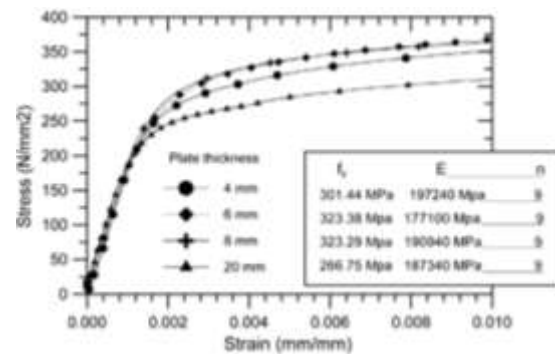
<sup>2</sup> Transverse stiffeners

جدول ۱- ابعاد تیوروق مورد نظر جهت صحت‌سنجی

تیوروق	L (mm)	a (mm)	d (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	t <sub>s</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)
ad1w4	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰	۲۰۰

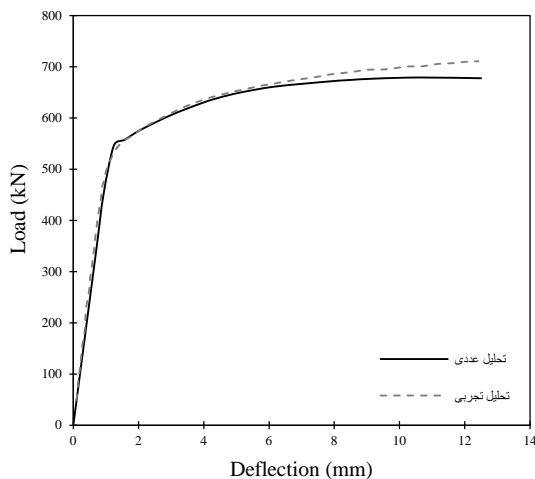


شکل ۱- هندسه و طرح بارگذاری نمونه‌ی مورد آزمایش



شکل ۲- منحنی‌های تنش-کرنش (مشخصات فولاد مصرفی) [۷]

S9R5 موجود در مقاله استفاده شده است. المان S8R5، بیان‌گر المان پوسته مکعبی سه بعدی کاهش یافته<sup>۳</sup> است که در آن هر گره به جای ۶ درجه‌ی آزادی<sup>۴</sup> دارای ۵ درجه‌ی آزادی است؛ همچنین ساختار مش‌بندی به صورت منظم<sup>۵</sup> اعمال شده است. ابعاد مش‌بندی نیز از ۵ تا ۳۰ میلی‌متر متغیر بوده است. در تیر ad1w4 بارگذاری به صورت تغییرمکان و با مقدار ۱۲/۵- میلی‌متر در راستای y به بالای تیر اعمال شده است. مطابق شکل ۳، نتایج حاکی از آن است که این شبیه‌سازی تطبیق مناسبی با مدل مقاله دارد؛ همچنین مطابق شکل ۴-الف، تشکیل حوزه کشش ناشی از کماتش قطری جان کاملاً محسوس است. در شکل ۴-ب، طرح و هندسه کلی تیوروق در آزمایش برش طبق مقاله ریل و همکاران [۵] قابل مشاهده است. هدف این مقاله، مقایسه رفتار برشی تیوروق‌هایی با جان موج‌دار محلی، با تیوروق ساده بوده است. ترکیبات مختلف سخت‌کننده و پرس برای دستیابی به این مهم انجام گردید که بسیاری از آن‌ها به نتیجه مطلوب منجر نشدند، با این حال در ادامه به منظور مقایسه و تکمیل نتیجه تحقیقات اکثر این مراحل تا رسیدن به مرحله نتایج مطلوب آورده شده‌اند.



شکل ۳- صحت‌سنجی مدل اجزا محدود

در این مقاله، صحت‌سنجی با بارگذاری تغییرمکان انجام شده است. در مقاله مرجع، مود اول کماتش ورق جان به عنوان نقص اولیه به مدل اعمال شده است. جهت شبیه‌سازی نقص اولیه‌ی هندسی<sup>۱</sup>، بار متمرکز به اندازه ۶۰۰ نیوتن عمود عمود بر جان در نقطه وسط هر پانل برشی جان اعمال شده است، به منظور انتگرال‌گیری مدل‌ها، تنظیمات روی انتگرال‌گیری گاوس<sup>۲</sup> نقطه‌ای قرار داده شده است. به منظور منظور مش‌بندی تمامی مدل‌ها از المان S8R5، به جای المان

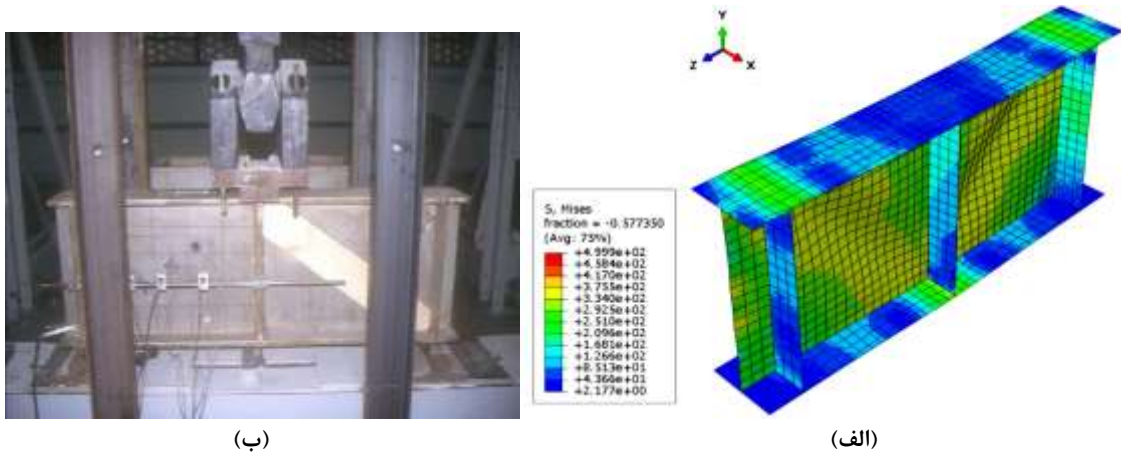
<sup>3</sup> Reduced Integration

<sup>4</sup> Freedom Degree

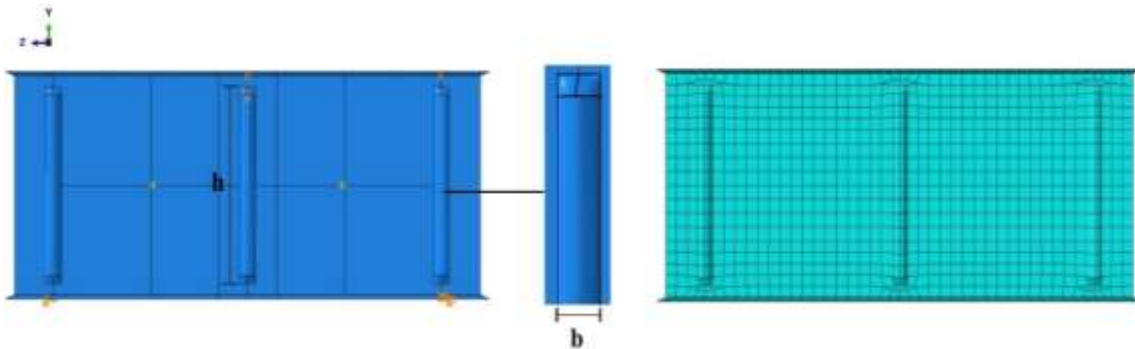
<sup>5</sup> Structured

<sup>1</sup> Geometric Imperfection

<sup>2</sup> Gauss



شکل ۴- الف) مود خرابی تیرورق ad1w4 پس از بارگذاری و ب) طرح کلی تیرورق در آزمایش برش [۷]



شکل ۵- تیرورق با جان موج دار محلی (پرس)

در این بخش به بررسی تیرورق‌هایی با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس در وسط تیر پرداخته خواهد شد. ابتدا با حذف دو سخت‌کننده وسط جان از مدل صحت‌سنجی، حالت پایه (نمونه‌های ۱ و ۶) را برای این مرحله آماده‌سازی شد تا سپس مدل‌های دارای پرس با این مدل‌ها مقایسه شوند. بارگذاری تغییرمکانی به اندازه ۱۲/۵- میلی‌متر در راستای  $y$  است. لازم به ذکر است، در تمامی مدل‌سازی‌های این مقاله، تغییرمکان براساس مقاله مرجع [۷] اعمال شده است. در حالت کلی، هدف بررسی رفتار برشی و پس از کمانش بوده است. این تغییرمکان‌ها علاوه بر این که تقریباً برابر با تغییرمکان مجاز تیرها هستند، رفتار برشی تیرهای مورد بررسی را نیز به خوبی نشان داده‌اند؛ همچنین به منظور اعمال نقص اولیه به مدل از دو بار متمرکز به اندازه ۶۰۰- نیوتن در راستای  $x$  استفاده شده است. پس از آن در وسط

### ۳- مشخصات هندسی مدل‌ها

ابعاد و مشخصات هندسی کلی مدل‌های مورد بررسی در مقاله مطابق جدول ۲ است. در صورت وجود سخت‌کننده در تیرورق، ضخامت ورق آن در جدول ۲ مشخص شده است؛ همچنین مدل‌ها با نسبت‌های پانل برشی مختلف تحلیل شده‌اند. مطابق شکل ۱، نسبت پانل برشی به صورت نسبت طول پانل برشی (a)، به ارتفاع تیرورق (d) تعریف می‌شود. تیرورق با جان موج دار محلی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۵،  $h$  و  $b$  به ترتیب برابر با عرض پرس و ارتفاع پرس هستند. تمامی کمیت‌های موجود در جدول ۲، در شکل ۱ مشخص شده‌اند

### ۴- تفسیر و تحلیل نتایج

#### ۴-۱- تیرورق با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس

نمودارهای بار-تغییرمکان حالات مختلف برای نمونه‌های ۱ تا ۵، مطابق با نمونه‌های ۱ تا ۵ در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶، نمودارها رفتاری نزدیک به هم دارند، با این حال به نظر می‌رسد که هرچه عرض پرس کمتر باشد، موج عملکرد بهتری داشته است؛ همچنین مشاهده می‌شود، ظرفیت تمامی مدل‌های با پرس، از مدل پایه بدون پرس کمتر شده است. پس از بررسی نمونه‌های ۱ تا ۵، به مدل‌سازی حالات مختلف تیورق ۲ متری مطابق نمونه‌های ۶ تا ۸ پرداخته شده است. بارگذاری برای نمونه‌های ۶ تا ۸، تغییرمکانی به اندازه ۲۰- میلی‌متر در راستای  $y$  بود. به منظور اعمال نقص اولیه به مدل از بارهای متمرکزی به اندازه ۶۰۰- نیوتن در راستای  $x$  در وسط هر پانل برشی استفاده شده است. نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۶ تا ۸، در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، ظرفیت برشی تیورق‌های دارای پرس در هر دو نمونه ۷ و ۸ کمتر از حالت پایه شده است. علت این امر می‌تواند، نیروی وارده به پرس و در نتیجه خمیدگی بیشتر جان باشد؛ همچنین نمودارهای بار-تغییرمکان دو مدل با پرس با نسبت‌های پانل برشی متفاوت، تقریباً بر هم منطبق هستند، چون جان در محل بارگذاری دچار لهیدگی شده است.

#### ۴-۲- تیورق با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی، زیر بار و پرس

با توجه به نتایج قسمت ۴-۱، در مرحله بعد علاوه بر سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی، سخت‌کننده‌های در قسمت بارگذاری نیز نگه داشته شده است تا از لهیدگی جان در این ناحیه جلوگیری شود. مشخصات تمامی نمونه‌های مورد بررسی در این بخش، مطابق جدول ۴ است. سایر شرایط مانند قبل است.

نمودارهای بار-تغییرمکان حالت‌های متفاوت برای تیورق ۲ متری، شامل نمونه‌های ۹ تا ۱۳ در شکل ۸ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۸، ظرفیت تمامی حالات دارای پرس کمتر از حالت دارای سخت‌کننده شده است. برداشت می‌شود، در پرس‌هایی با عرض کمتر، میزان کاهش ظرفیت تا قبل از تسلیم کمتر است. پس از تسلیم، پرس‌ها تحت اثر

پانل جان به جای سخت‌کننده‌های حذف شده، پرس (موج محلی) مدل کردیم. عمق پرس‌ها برابر با شعاعی به اندازه نصف عرض پرس‌ها است. مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده در این بخش، مطابق جدول ۳ است.

جدول ۲- مشخصات هندسی تیورق‌ها

تیورق	L (mm)	b <sub>f</sub> (mm)	d (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	t <sub>s</sub> (mm)
PG1W4	۱۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰
PG1W6	۱۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۶	۲۰	۲۰
PG1W8	۱۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۸	۲۰	۲۰
PG2W4	۲۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰
PG1W6	۲۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۶	۲۰	۲۰
PG1W8	۲۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۸	۲۰	۲۰
PG4W4	۴۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۴	۲۰	۲۰
PG4W6	۴۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۶	۲۰	۲۰
PG4W8	۴۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۸	۲۰	۲۰

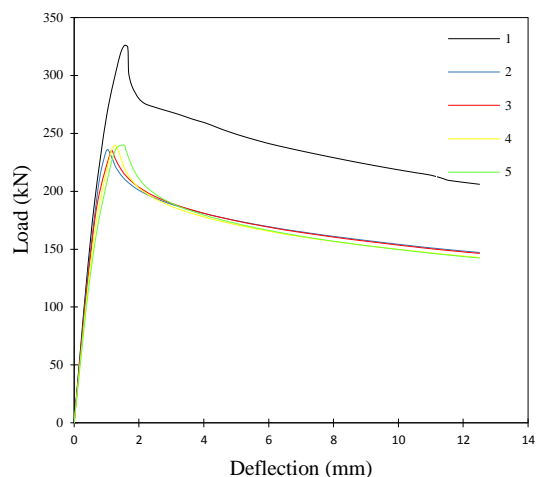
جدول ۳- مشخصات هندسی تیورق‌ها با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس

نمونه	تیورق	b (mm)	h (mm)	a/d
۱	PG1W4-ST	-	-	۲
۲	PG1W4-ST-40-400-1	۴۰	۴۰۰	۱
۳	PG1W4-ST-60-400-1	۶۰	۴۰۰	۱
۴	PG1W4-ST-80-400-1	۸۰	۴۰۰	۱
۵	PG1W4-ST-100-400-1	۱۰۰	۴۰۰	۱
۶	PG2W4-ST	-	-	۴
۷	PG2W4-ST-40-400-1	۴۰	۴۰۰	۱
۸	PG2W4-ST-40-400-2	۴۰	۴۰۰	۲

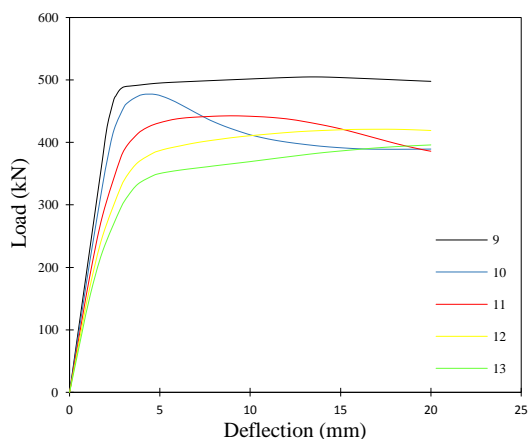
جدول ۴- مشخصات هندسی تیورق‌ها با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس

نمونه	تیورق	b (mm)	h (mm)	a/d
۹	PG2W4-ST	-	-	۲
۱۰	PG2W4-ST-40-400-1	۴۰	۴۰۰	۱
۱۱	PG2W4-ST-60-400-1	۶۰	۴۰۰	۱
۱۲	PG2W4-ST-80-400-1	۸۰	۴۰۰	۱
۱۳	PG2W4-ST-100-400-1	۱۰۰	۴۰۰	۱
۱۴	PG4W4-ST	-	-	۴
۱۵	PG4W4-ST-40-400-1	۴۰	۴۰۰	۱
۱۶	PG4W4-ST-60-400-1	۶۰	۴۰۰	۱
۱۷	PG4W4-ST-80-400-1	۸۰	۴۰۰	۱
۱۸	PG4W4-ST-40-400-2	۴۰	۴۰۰	۲
۱۹	PG4W4-ST-60-400-2	۶۰	۴۰۰	۲
۲۰	PG4W4-ST-80-400-2	۸۰	۴۰۰	۲
۲۱	PG4W6-ST	-	-	۴
۲۲	PG4W6-ST-20-400-1	۲۰	۴۰۰	۱
۲۳	PG4W6-ST-20-400-2	۲۰	۴۰۰	۲
۲۴	PG4W8-ST	-	-	۴
۲۵	PG4W8-ST-20-400-0.5	۲۰	۴۰۰	۰/۵
۲۶	PG4W8-ST-20-400-1	۲۰	۴۰۰	۱
۲۷	PG4W6-ST-20-400-2	۲۰	۴۰۰	۲

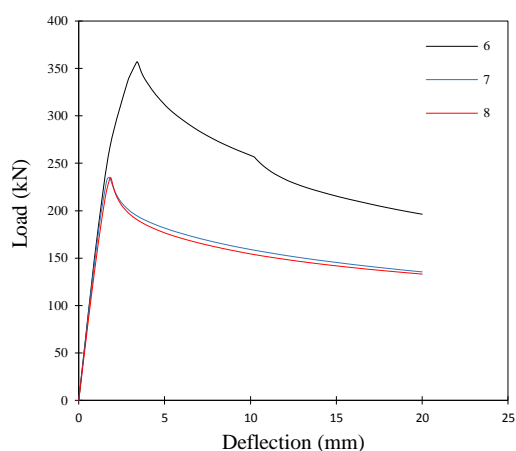
تشکیل حوزه‌ی کشش خم می‌شوند، با این‌حال پرس‌هایی با عرض بیشتر ثبات بیشتری تا مرحله آخر بارگذاری داشته‌اند و تا حدودی میان آن‌ها حوزه کشش تشکیل شده است. در ادامه به مدل‌سازی تیورق‌های ۱۴ تا ۲۷ در حالات مختلف پرداخته شده است. نمودارهای بار-تغییرمکان این نمونه‌ها در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۹، ظرفیت تمامی حالات با پرس، کمتر از حالت بدون پرس شده است؛ همچنین برداشت می‌شود که نمونه‌های با عرض پرس بیشتر، دچار کاهش ظرفیت بیشتری شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان گفت، پرس‌ها تأثیری در رفتار تیورق‌هایی با ضخامت جان ۶ و ۸ میلی‌متر نداشته است.



شکل ۵- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۱ تا ۵



شکل ۸- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۹ تا ۱۳



شکل ۷- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۶ تا ۸

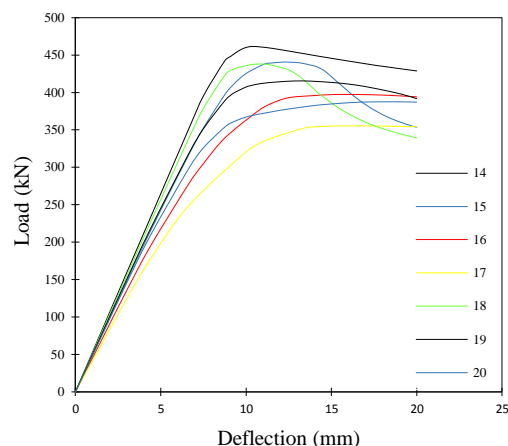
### ۳-۴- تحلیل کمانش الاستیک

پس از مشاهده نتایج مراحل قبل، در تیوروق PG1W4، ۵ حالت مختلف برای تحلیل کمانش در نظر گرفته شده است. برای هر مدل مود اول کمانش و مقادیر ویژه حاصل از تحلیل کمانش تحت بارگذاری متمرکز به اندازه ۶۷۷ کیلو نیوتن (این بار در بخش‌های قبلی به ازای تغییرمکان ۱۲/۵ در تیر یک متری به دست آمده است)، در راستای  $\gamma$  مشخص شده است تا با مقایسه آن‌ها تأثیر وجود پرس‌ها در جان مشخص شود. لازم به ذکر است که مقدار بار، تأثیری در تحلیل کمانش ندارد و می‌تواند حتی دارای مقدار ۱ باشد. اعمال این بار برای تشخیص نوع تحلیل کمانش در نرم‌افزار انجام شده است؛ همچنین از حرکت جانبی تیرها جلوگیری شده است. این مراحل به این شرح است: ۱- تحلیل کمانش تیوروق با سخت‌کننده‌های کامل، مانند مدل صحت سنجی به عنوان مدل پایه ۲- تحلیل کمانش تیوروق با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی (حذف سخت‌کننده‌های زیر بار) ۳- تحلیل کمانش تیوروق با سخت‌کننده‌های تکیه‌گاهی و پرس به عرض ۴۰ میلی‌متر در وسط جان (زیر بار) ۴- تحلیل کمانش تیوروق بدون هیچ سخت‌کننده‌ای ۵- تحلیل کمانش تیوروق با پرس‌هایی در نواحی تکیه‌گاهی و زیر بار، بدون سخت‌کننده. ضرایب کمانش توسط تحلیل کمانش در نرم‌افزار، برای حالات مختلف به ترتیب برابر با ۰/۸۶۴۷۸، ۰/۲۴۸۵۳، ۰/۵۶۱۹۴، ۰/۱۴۲۸۷ و ۰/۴۹۸۲۵ بدست آمده‌اند. از ضرایب کمانشی بدست آمده و با توجه به بار ۶۷۷ کیلونیوتن، بار کمانشی برای حالات مختلف قابل محاسبه خواهد بود. بر این اساس حالت اول، دارای بیشترین بار کمانش و حالت چهارم، دارای کمترین بار کمانش خواهد بود و در مجموع برای بار کمانشی هر ۵ حالت خواهیم داشت:

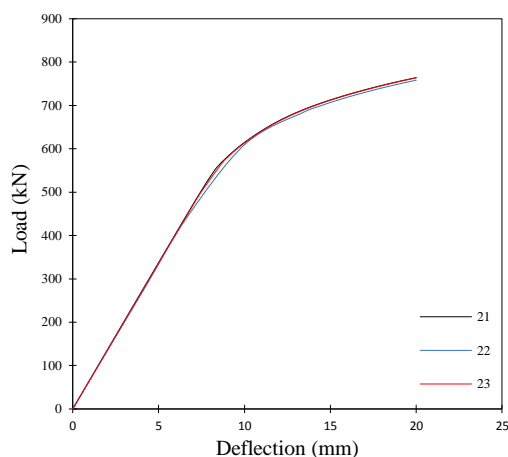
حالت ۴ > حالت ۲ > حالت ۵ > حالت ۳ > حالت ۱

۹۶/۷۲۳ kN > ۱۶۸/۲۵ > ۳۳۷/۳۱ > ۳۸۰/۴۳ > ۵۸۵/۴۶

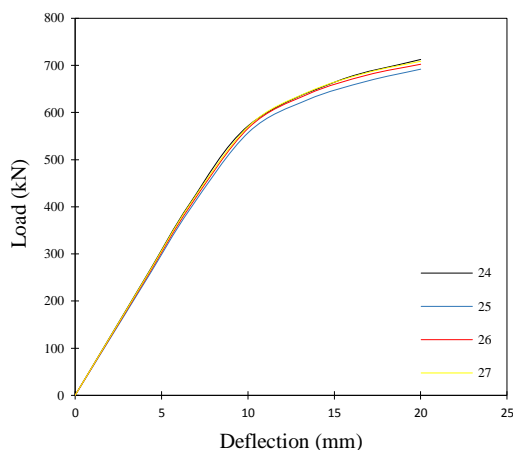
نتایج حاکی از آن است که وجود پرس در جان تیوروق عمل‌کرد، آن را در حالت بدون سخت‌کننده بهبود بخشیده است و باعث افزایش بار کمانشی تیوروق شده است. ظرفیت این نمونه نسبت به حالت با سخت‌کننده کمتر است. علت این کاهش ظرفیت می‌تواند به دلیل لهیدگی بیشتر جان تیوروق با پرس در نواحی لبه پرس‌ها در مقایسه با تیوروق



شکل ۹- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۱۴ تا ۲۰



شکل ۱۰- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۲۱ تا ۲۳



شکل ۱۱- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۲۴ تا ۲۷



جدول ۵- مشخصات هندسی تیورقها با ضخامت‌های

مختلف جان

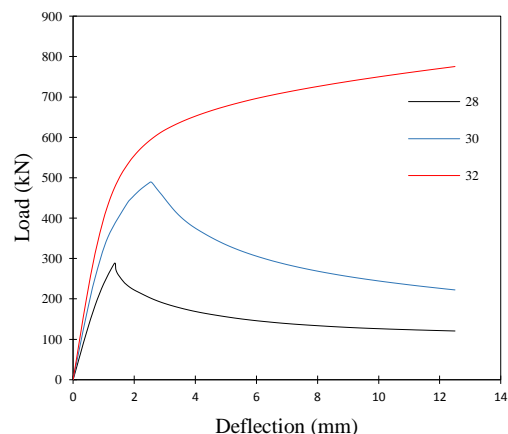
نمونه	تیورق	b (mm)	h (mm)	a/d	%T	%U
۲۸	PG1W4	-	-	-	-	-
۲۹	PG1W4-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۴/۴۳	۱۱/۷۵
۳۰	PG1W6	-	-	-	-	-
۳۱	PG1W6-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۳/۷۷	۶۵/۴
۳۲	PG1W8	-	-	-	-	-
۳۳	PG1W8-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	-۰/۷۶	-۰/۷۶
۳۴	PG2W4	-	-	-	-	-
۳۵	PG2W4-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۹/۶۲	۲۵/۲۳
۳۶	PG2W4-40-450-2	۴۰	۴۵۰	۲	۳۰/۵۱	۲۶/۱۴
۳۷	PG2W6	-	-	-	-	-
۳۸	PG2W6-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۱۲/۵	۵۴/۹
۳۹	PG2W6-40-450-2	۴۰	۴۵۰	۲	۱۲/۸	۵۵/۰۳
۴۰	PG2W8	-	-	-	-	-
۴۱	PG2W8-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	-۷/۶	-۷/۶
۴۲	PG2W8-40-450-2	۴۰	۴۵۰	۲	-۷/۳۴	-۷/۳۴

در لیه انتهایی پرس‌ها باشد. در شکل ۱۵ تا ناحیه خطی مشابه حالت ساده است، اما پس از رسیدن به نقطه تسلیم تأثیر وجود پرس‌ها در جان تیورق در افزایش ظرفیت کاملاً محسوس است و به دلیل ضخامت بیشتر جان ضعف‌های موجود در جان ۴ میلی‌متر را ندارد؛ همچنین در ناحیه غیرخطی نمودار صعودی است. در شکل ۱۶ به دلیل ضخامت زیاد جان، پرس‌ها تأثیری در ظرفیت تیورق نداشته‌اند. در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، نمودارهای بار-تغییرمکان برای حالات مختلف نمونه‌های ۳۴ تا ۴۲ ارائه شده‌اند. پرس‌ها برای هر دو نمونه ۳۵ و ۳۶، باعث افزایش ظرفیت در شکل ۱۷ شده‌اند، اما نمونه ۳۶، رفتار بهتری داشته است. در حالت کلی، قسمتی که پرس‌ها خم شده‌اند، نمودار دچار افت شده است. در شکل ۱۸، اگرچه در ابتدا ظرفیت برشی مدل‌های با پرس کمی افت کرده است، اما رفتار کلی خوبی از خود نشان داده

بدون پرس باشد. در مراحل بعدی مدل‌سازی تمامی سخت‌کننده‌ها حذف شدند و ظرفیت تیورق با جان موج‌دار محلی و با تیر ساده‌ی بدون سخت‌کننده، مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۴- ضخامت‌های مختلف جان تیورق

در این بخش به بررسی تیورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف جان پرداخته شده است. مشخصات تیورق‌های مورد بررسی، مطابق جدول ۵ است. تمامی نمونه‌ها بدون سخت‌کننده هستند. در جدول ۵، T و U به ترتیب، برابر با درصد افزایش مقاومت حداکثر و مقاومت نهایی نمونه‌های پرس‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پرس هستند. سایر مشخصات مشابه قبل است. در شکل ۱۳، رفتار تیورق‌های ۱ متری بدون پرس، با ضخامت‌های مختلف جان با هم مقایسه شده است (نمونه‌های ۲۸، ۳۰ و ۳۲). مطابق انتظار، تیورق با ضخامت بیشتر جان، دارای مقاومت بیشتر بوده است.

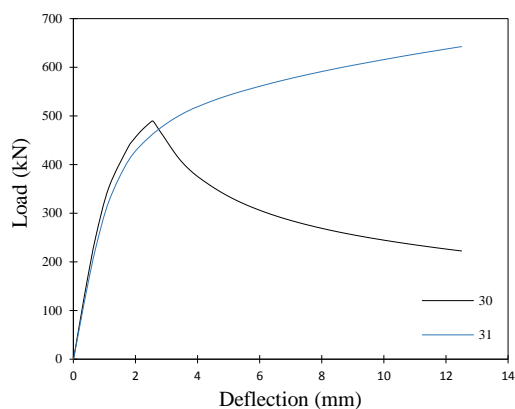


شکل ۱۳- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۲۸ و ۳۰ و ۳۲

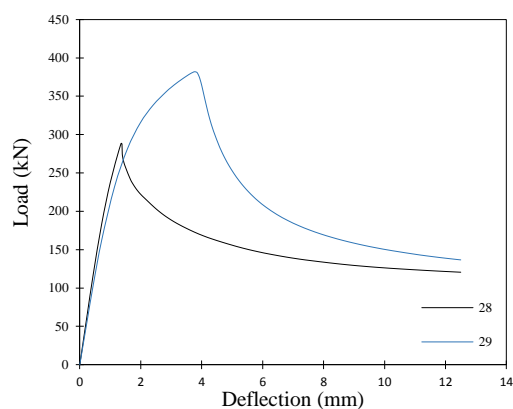
در ادامه به مقایسه تأثیر پرس در ضخامت‌های مختلف جان پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نمودارهای بار - تغییرمکان حالات مختلف نمونه‌های ۲۸ تا ۳۳ قابل مشاهده هستند. در شکل ۱۴ اگرچه در ابتدا افزایش قابل توجه ظرفیت مشاهده می‌شود، اما پس از رسیدن به کماتش کلی ظرفیت سیر نزولی داشته و بسیار کاهش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل ضخامت بسیار کم ورق جان و خم شدن

نمونه‌های ۴۱ و ۴۲ سبب کاهش ظرفیت برشی شده‌اند. درصد افزایش ظرفیت نمونه‌ها مطابق با جدول ۵ است.

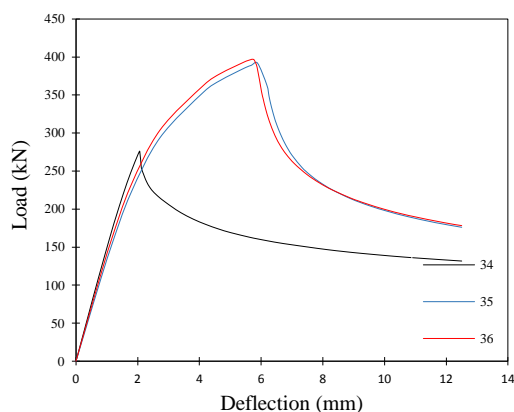
است. همچنین در هر دو نمونه‌های ۳۸ و ۳۹، نمودارها تقریباً بر هم منطبق هستند. در شکل ۱۹، پرس‌ها در



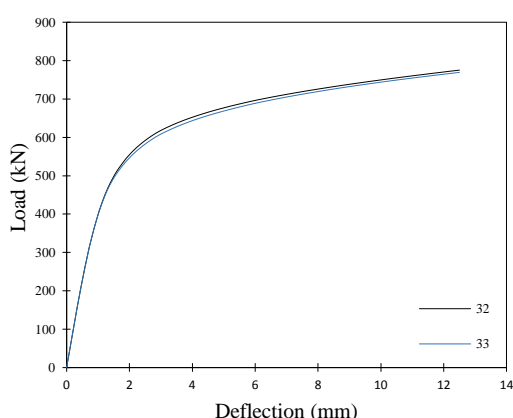
شکل ۱۵- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۳۰ و ۳۱



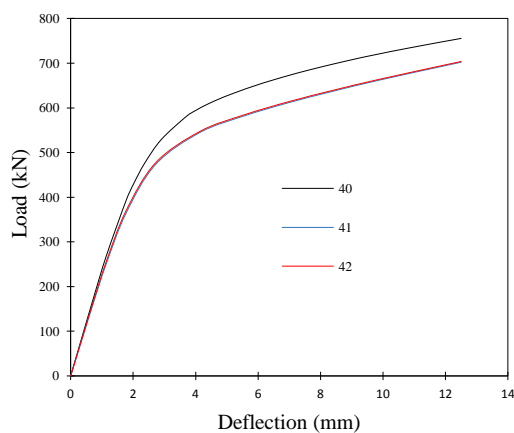
شکل ۱۴- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۲۸ و ۲۹



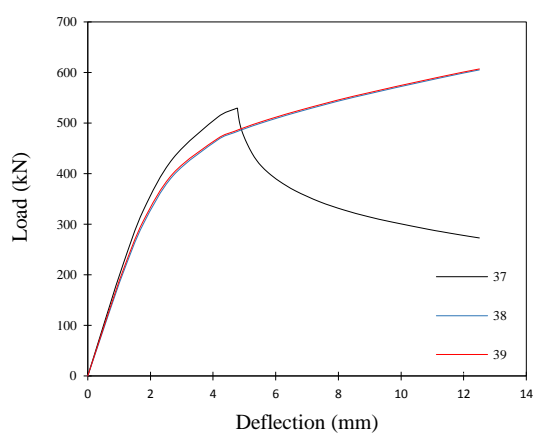
شکل ۱۷- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۳۴ تا ۳۶



شکل ۱۶- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۳۲ و ۳۳



شکل ۱۹- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۴۰ تا ۴۲



شکل ۱۸- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۳۷ تا ۳۹

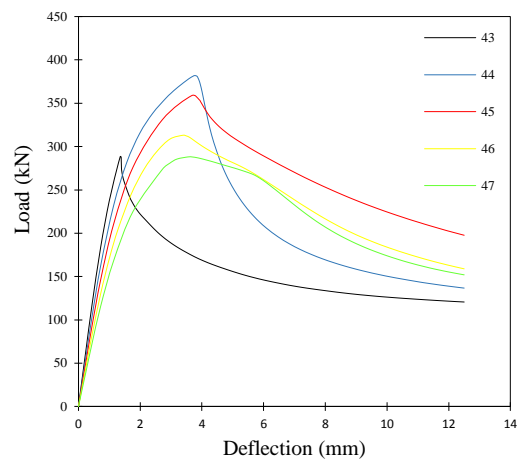
۵-۴- عرض‌های مختلف پرس

در این بخش عرض‌های مختلف پرس و تأثیر آن بر مقاومت برشی تیورورق‌ها در حالت بدون سخت‌کننده بررسی شده است. مشخصات هندسی مدل‌های مورد بررسی، مطابق با جدول ۶ است. سایر مشخصات مانند قیل است. عرض‌های مختلف پرس برای نمونه‌های ۴۳ تا ۶۶ در حالت‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل‌های ۲۰ تا ۲۳). مطابق شکل ۲۰ در مجموع عرض‌های مختلف پرس، سبب افزایش ظرفیت نسبت به تیورورق ساده شده‌اند. نمونه ۴۴ دارای بیشترین مقاومت اولیه نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است و در ناحیه خطی کاهش کمتری نسبت به عرض‌های دیگر پرس داشته است، اما کاهش در مقاومت نهایی آن از تمامی نمونه‌های دیگر پرس بیشتر بوده است. نمونه ۴۵ در ناحیه خطی، کاهش بیشتری نسبت به نمونه ۴۴ داشته است، اما دارای بیشترین ظرفیت نهایی نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است. در نمونه ۴۶، اگرچه تسلیم آن تقریباً برابر با حالت ساده است، اما پس از تسلیم، نسبت به حالت ساده افزایش قابل توجهی در ظرفیت داشته است. مطابق شکل ۲۱، برداشت می‌شود که هرچه عرض پرس کمتر باشد، ظرفیت برشی بیشتر بوده است. مطابق شکل ۲۲، با افزایش عرض پرس، کاهش ظرفیت اولیه بیشتری مشاهده می‌شود. همچنین نمونه‌های ۵۵ و ۵۸ مخصوصاً ۵۸، عملکرد بهتری نسبت به حالات دیگر داشته‌اند. اگرچه در ابتدا ظرفیت نمونه‌های ۵۴ و ۵۷ از سایر مدل‌ها بیشتر است، اما پس از تسلیم و با خم شدن پرس‌ها، افت قابل توجهی داشته است.

جدول ۶- مشخصات هندسی تیورورق‌ها با عرض‌های مختلف پرس

نمونه	تیورورق	b (mm)	h (mm)	a/d	%T	%U
۴۳	PG1W4	-	-	-	-	-
۴۴	PG1W4-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۴/۴۳	۱۱/۷
۴۵	PG1W4-60-450-1	۶۰	۴۵۰	۱	۱۹/۶	۳۹
۴۶	PG1W4-80-450-1	۸۰	۴۵۰	۱	۷/۸۱	۲۴/۱
۴۷	PG1W4-100-450-1	۱۰۰	۴۵۰	۱	-۰/۲	۲۰/۶
۴۸	PG1W6	-	-	-	-	-
۴۹	PG1W6-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۳/۸	۶۵/۴
۵۰	PG1W6-60-450-1	۶۰	۴۵۰	۱	۲۲/۰۴	۶۴/۶۱
۵۱	PG1W6-80-450-1	۸۰	۴۵۰	۱	۱۸/۷	۶۳/۱
۵۲	PG1W6-100-450-1	۱۰۰	۴۵۰	۱	۱۴	۶۱
۵۳	PG2W4	-	-	-	-	-
۵۴	PG2W4-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۹/۶۲	۲۵/۲۳
۵۵	PG2W4-60-450-1	۶۰	۴۵۰	۱	۲۵/۶	۵۱/۰۴
۵۶	PG2W4-80-450-1	۸۰	۴۵۰	۱	۱۸/۹	۲۴/۵۳
۵۷	PG2W4-40-450-2	۴۰	۴۵۰	۲	۳۰/۵۱	۲۶/۱۴
۵۸	PG2W4-60-450-2	۶۰	۴۵۰	۲	۲۹/۸	۵۰/۸۵
۵۹	PG2W4-80-450-2	۸۰	۴۵۰	۲	۲۰/۱۵	۲۸/۶۱
۶۰	PG2W6	-	-	-	-	-
۶۱	PG2W6-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۱۲/۵	۵۴/۹
۶۲	PG2W6-60-450-1	۶۰	۴۵۰	۱	۷/۷۴	۵۲/۴۴
۶۳	PG2W6-80-450-1	۸۰	۴۵۰	۱	۰/۶	۴۸/۸
۶۴	PG2W6-40-450-2	۴۰	۴۵۰	۲	۱۲/۸	۵۵/۰۳
۶۵	PG2W6-60-450-2	۶۰	۴۵۰	۲	۸/۵۴	۵۲/۸۶
۶۶	PG2W6-80-450-2	۸۰	۴۵۰	۲	۲/۳	۴۹/۶۳

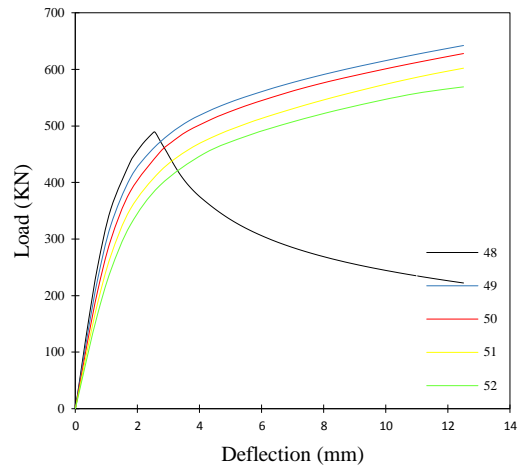
مطابق شکل ۲۳، در جان ۶ میلی‌متر کاهش عرض پرس موجب افزایش ظرفیت نهایی شده است. درصد افزایش مقاومت حداکثر و ظرفیت نهایی نمونه‌ها، مطابق جدول ۶ است.



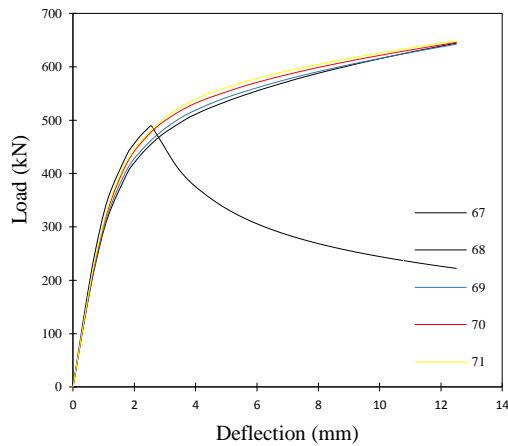
شکل ۲۰- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۴۳ تا ۴۷

#### ۴-۶- ارتفاع‌های مختلف پرس

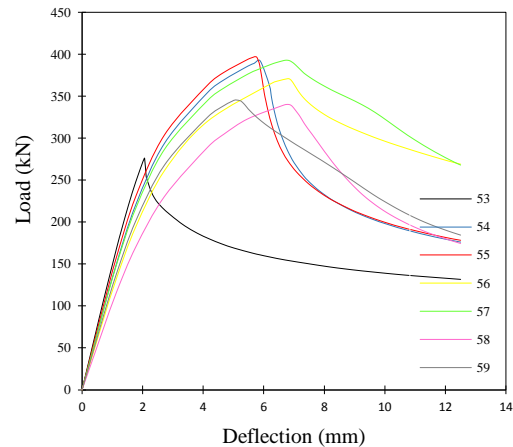
در این بخش تأثیر ارتفاع پرس در کاهش یا افزایش ظرفیت برشی تیورق بدون سخت‌کننده بررسی شده است. مشخصات هندسی نمونه‌ها مطابق جدول ۷ است. مطابق شکل ۲۴، اگرچه نمودارهای بار-تغییرمکان تمامی مدل‌ها به هم نزدیک هستند، اما به نظر می‌رسد، هرچه ارتفاع کمتر باشد، ظرفیت بیشتر شده است، به طوری که افزایش ظرفیت نهایی نمونه ۶۸ از سایر مدل‌ها بیشتر و حدوداً برابر با ۶۶٪ است. مطابق شکل‌های ۲۵ و ۲۶، نمونه‌های ۷۴ و ۷۹ دارای بهتری عملکرد بوده‌اند. درصد افزایش مقاومت حداکثر و ظرفیت نهایی نمونه‌ها مطابق جدول ۷ است.



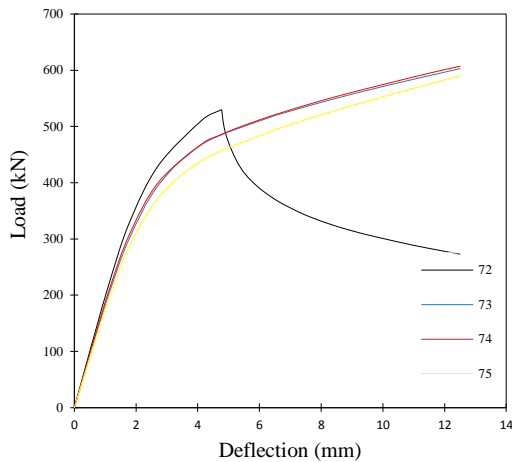
شکل ۲۱- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۴۸ تا ۵۲



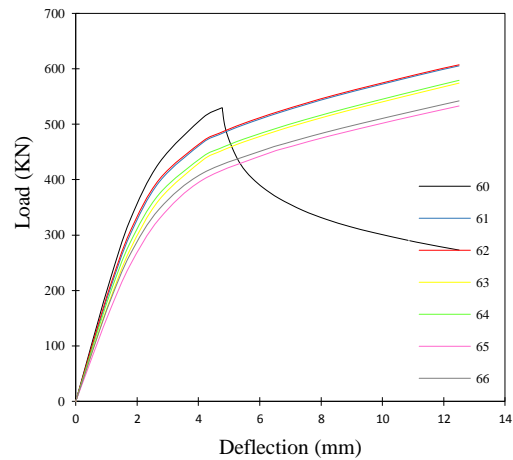
شکل ۲۴- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۶۷ تا ۷۱



شکل ۲۲- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۵۳ تا ۵۹



شکل ۲۵- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۷۲ تا ۷۵



شکل ۲۳- نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های ۶۰ تا ۶۶

آمده، افزایش ظرفیت برشی با وجود پرس‌ها در جان تیورورق هنگامی حاصل می‌شود که هیچ‌گونه سخت‌کننده‌ای در تیورورق وجود نداشته باشد. با وجود سخت‌کننده‌ها، پرس‌ها موجب تأثیر منفی در ظرفیت تیورورق می‌شوند. سایر نتایج به شرح زیر است:

- وجود پرس‌ها در تیورورق‌هایی با جان‌های نازک، سبب افزایش ظرفیت برشی شده است؛ اما به نظر می‌رسد در تیورورق‌هایی با ضخامت جان بیشتر بدون تأثیر است و حتی ممکن است، سبب کاهش اندکی در ظرفیت نیز بشود. به طوری که بیشترین افزایش در مقاومت نهایی در نمونه ۲ متری با ضخامت جان ۶ میلی‌متر به اندازه ۵۵٪ و بیشترین افزایش در حداکثر ظرفیت به اندازه ۳۰٪ در نمونه ۲ متری با ضخامت جان ۴ میلی‌متر به دست آمده است.

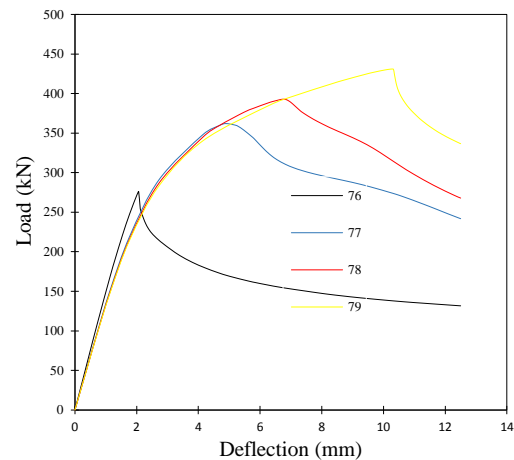
- عرض پرس‌های متوسط مانند ۴۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر عملکرد مناسبی داشته‌اند. افزایش ظرفیت نهایی تا ۶۵٪ به دست آمده است.

- ارتفاع‌های مختلف پرس تأثیر چندانی بر ظرفیت برشی تیورورق ۱ متری ندارد و درصد افزایش مقاومت نهایی برای تمامی ارتفاع‌ها حدود ۶۵٪ به دست آمده است.

- در تیورورق‌هایی با طول بیشتر، چنین به نظر می‌رسد که هرچه تیورورق دارای جان نازک‌تری باشد، وجود پرس سبب افزایش بیشتری در ظرفیت اولیه خواهد شد؛ اما اگر ضخامت جان بیشتر باشد، وجود پرس تأثیر بیشتری بر ظرفیت نهایی خواهد داشت و ممکن است حتی سبب کاهش ظرفیت اولیه شود.

- در تیورورق‌هایی با طول دهانه‌ی برشی بیشتر (a)، عملکرد نسبت به دهانه برشی با طول کمتر بهبود یافته است.

در مدل‌های بررسی شده در این مقاله رفتارهای متفاوتی برای طول تیرهای مختلف با ضخامت جان‌های مختلف مشاهده شده است، اما با این حال می‌توان گفت، پرس‌هایی با عرض و ارتفاع متوسط و طول دهانه برشی بیشتر، دارای بهترین عملکردها بوده‌اند.



شکل ۲۶- نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های ۷۶ تا ۷۹

جدول ۷- مشخصات هندسی تیورورق‌ها با ارتفاع‌های مختلف پرس

نمونه	تیورورق	b (mm)	h (mm)	a/d	%T	%U
۶۷	PG1W6	-	-	-	-	-
۶۸	PG1W6-40-350-1	۴۰	۳۵۰	۱	۲۴/۵	۶۵/۷۳
۶۹	PG1W6-40-400-1	۴۰	۴۰۰	۱	۲۴/۱۷	۶۵/۵۷
۷۰	PG1W6-40-450-1	۴۰	۴۵۰	۱	۲۳/۷۷	۶۵/۴
۷۱	PG1W6-40-480-1	۴۰	۴۸۰	۱	۲۴/۰۲	۶۵/۵۱
۷۲	PG2W4	-	-	-	-	-
۷۳	PG2W4-60-400-2	۶۰	۴۰۰	۲	۱۲/۱۴	۵۴/۷۱
۷۴	PG2W4-60-450-2	۶۰	۴۵۰	۲	۱۲/۸	۵۵/۰۳
۷۵	PG2W4-60-480-2	۶۰	۴۸۰	۲	۱۰/۲۷	۵۳/۷۵
۷۶	PG2W6	-	-	-	-	-
۷۷	PG2W6-60-400-2	۶۰	۴۰۰	۲	۲۳/۸	۴۵/۵۶
۷۸	PG2W6-60-450-2	۶۰	۴۵۰	۲	۲۹/۸	۵۰/۸۵
۷۹	PG2W6-60-480-2	۶۰	۴۸۰	۲	۳۶	۶۰/۹

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی رفتار برشی تیورورق‌هایی با جان موج‌دار محلی پرداخته شده است. مطابق نتایج بدست

۶- مراجع

- [12] Hassanein MF, Kharoob OF (2013) Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design. *Eng Struct* 57: 544-553.
- [13] Sinur F, Beg D (2012) Intermediate transverse stiffeners in plate girders. *Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Steel Construction* 5(1).
- [14] Nie J, Zhu L, Tao M, Tang L (2013) Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs. *J Constr Steel Res* 85: 105-115.
- [15] Guo T, Sause R (2014) Analysis of local elastic shear buckling of trapezoidal corrugated steel webs. *J Constr Steel Res* 102: 59-71.
- [۱۶] حجازی م، خیبری ن (۱۳۹۳) بررسی رفتار تیوروق‌های فولادی با جان موجدار دوزنقه‌ای. پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه اصفهان.
- [17] Kwon YB, Ryu SW (2016) The shear strength of end web panels of plate girders with tension field action. *Thin Wall Struct* 98: 578-591.
- [18] Li LZ, Jiang CJ, Lu ZD (2016) Local buckling of bolted steel plates with different stiffener configuration. *Eng Struct* 119: 186-197.
- [19] Dou C, Jiang Z, Pi Y, Guo Y (2016) Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall. *Eng Struct* 121: 136-146.
- [20] Kövesdi B, Jáger B, Dunai L (2016) Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs. *J Constr Steel Res* 121: 383-397.
- [21] Correia Lopes GC, Couto P, Real V, Lopes N (2016) Elastic critical moment of beams with sinusoidally corrugated webs. *J Constr Steel Res* 129: 185-194.
- [22] ABAQUS (2016) ABAQUS user's manual version 6.12. Habbt, Karlson and Sarenson Inc.
- [1] Lee SC, Davidson JS, Yoo CH (1996) Shear buckling coefficients of plate girder web panels. *Comput Struct* 59(5): 189-795.
- [2] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A (1996) Shear strength of beams with corrugated webs. *J Struct Eng-ASCE* 122(4): 390-398.
- [3] Luo R, Edlund B (1996) Shear Capacity of Plate Girders with Trapezoidally Corrugated Webs. *Thin Wall Struct* 26(1): 19-44.
- [4] Lee SC, Yoo CH (1998) Strength of plate girder web panels under pure shear *J Struct Eng-ASCE* 124(2): 184-194.
- [5] Real E, Mirambell E, Estrada I (2007) Shear response of stainless steel plate girders. *Eng Struct* 29: 1626-1640.
- [6] Yi J, Gil H, Youm K, Lee H (2008) Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs. *Eng Struct* 30: 1659-1666.
- [7] Estrada I, Real E, Mirambell E (2008) Shear resistance in stainless steel plate girders with transverse and longitudinal stiffening. *J Constr Steel Res* 64: 1239-1254.
- [8] Alinia MM, Shakiba M, Habashi HR (2009) Shear failure characteristics of steel plate girders. *Thin Wall Struct* 47: 1498-1506.
- [9] Alinia MM, Gheitasi A, Shakiba M (2011) Postbuckling and ultimate state of stresses in steel plate girders. *Thin Wall Struct* 49: 455-464.
- [10] Pasternak H, Kubieniec G (2010) Plate girders with corrugated webs. *J Civ Eng Manag* 16(2): 166-171.
- [11] Hassanein MF, Kharoob OF (2010) Shear strength and behavior of transversely stiffened tubular flange plate girders. *Eng Struct* 32: 2617-2630.