

## ارزیابی اثر متقابل نیروی برشی و لنگر خمشی در تیر ورقهای با جان موجدار

هدایت ولادی\*<sup>۱</sup>، محمد پوریا موسوی صولت آباد<sup>۲</sup>، سید حمید لاری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد عمران، مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد عمران، مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

تیر ورق ها جزو عناصر برابر اصلی سازه های بزرگی نظیر پل ها می باشند که به جهت نوع کاربردشان باید ویژگی های هندسی و فیزیکی لازم را از لحاظ سختی و عدم کمانش احراز نمایند. در تیر ورقهای عادی، طراحی جان مسطح به همراه سخت کننده های افقی و قائم صورت می گیرد، اما امروزه مزایای طراحی با ورق موجدار جان بیش از پیش مورد نظر قرار گرفته است. تیرورق های با جان موجدار با حذف سخت کننده های افقی و قائم و همچنین کاهش ضخامت جان، موجب کاهش چشمگیر وزن و اجرای ساده در سازه های ساختمانی و پل ها شده است. هدف از این مطالعه، مقایسه ی مقاومت تیرورق های با جان موجدار و مسطح با در نظر گرفتن اثر اندرکنش نیروی برشی و لنگر خمشی به ازای انواع شکل جان خواهد بود. در ابتدای این پژوهش، رفتار تیرورق های موجدار شامل رفتار برشی، خمشی و ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته، پس از آن جهت صحت سنجی مدل های عددی، از مدل آزمایشگاهی Robert G. Driver و همکاران استفاده شده است. در این مقاله ۱۲ نمونه تیر ورق با جان ساده، ۷ و ۸ ای، دوزنقه ای، مثلثی، سینوسی تحت بارگذاری گسترده با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده، سپس با مقایسه ی مقاومت آن ها بهترین شکل موج جان ارائه می شود. همچنین مقاومت این نوع از تیرورق ها به صورت یک دهانه و دو دهانه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در مطالعه اخیر، حجم فولاد مصرفی در تمام نمونه ها ثابت و نوع اعوجاج، فاصله ی اعوجاج و ضخامت جان تیر ورق ها متغیر می باشند که با مطالعه و بررسی تمامی مدل های عددی، بهینه ترین حالت از بین آن ها ارائه خواهد شد. تحلیل و بررسی نمونه ها نشان داد که موجدار کردن جان تیرورق ها، مقاومت آن ها را بطور محسوسی افزایش داده، همچنین متغیرهای موج و زاویه ی چین تأثیر بسیار زیادی بر روی عملکرد تیرورق های با جان موجدار داشته است.

**کلید واژه ها:** تیرورق، جان موجدار، اندرکنش نیروی برشی و خمشی، بارگذاری گسترده.

### ۱- مقدمه و پیشینه ی تحقیق

تیرهای فولادی در عرشه، وزن آن به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش می یابد. صفحات فولادی موجدار با استفاده از پرس های پیشرفته صنعتی تولید شده و به صورت پیش ساخته، به راحتی درپل ها و سازه های ساختمانی اجرا می شوند. همچنین باتوجه به اثر آکاردئونی، جان این تیرورق ها سختی قابل توجهی در برابر نیروهای محوری نداشته که موجب اقتصادی تر شدن پل با دهانه های زیاد می شود. مزیت اساسی دیگر این نوع صفحات، افزایش مناسب سختی خارج از صفحه جان تیر بدون حضور سخت کننده ها است. تیرهای با جان موجدار با حذف سخت کننده ها، علاوه بر کاهش وزن سازه بطور محسوس، در هزینه و وقت مورد نیاز

امروزه کاربرد صفحات موجدار در جان تیرهای سازه های ساختمانی و پل بصورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. وجود جان موجدار در پل ها، علاوه بر جنبه ی سازه ای باعث ایجاد جلوه های زیبای معماری نیز می شود. با موجدار کردن جان، سختی خمشی تیر به میزان زیادی افزایش می یابد (Chan و همکاران، 2002). اساساً یک پل پیش تنیده با تیرهای فولادی موجدار در عرشه، کم هزینه تر از یک پل پیش تنیده معمولی با عرشه کاملاً بتنی خواهد بود. با قراردادن تیرهای موجدار قابلیت تحمل تلاش های خمشی به میزان محسوسی افزایش می یابد. همچنین این تیرها تأثیر بسزایی در کاهش وزن عرشه نیز دارند، بطوریکه با قراردادن

یک روش تقریبی بر اساس تئوری صفحات غیر همگن برای تحلیل ورق‌های موجدار ارائه گردید.

مطالعات انجام شده در حوزه ی ورق های موجدار، عموماً منجر به ارائه ضرایب مناسب جهت تخمین سختی و مقاومت برشی شده است (Ibrahim و همکاران، ۲۰۰۶).

Bryan و همکاران در سال ۱۹۶۹، فرمول‌هایی جهت محاسبه اثرات برشی صفحات موجدار ارائه دادند که شامل سختی برشی و مقاومت برشی نهایی این صفحات در طراحی الاستیک و پلاستیک است.

در سال ۱۹۷۹، Korashy و همکاران در تحقیقاتی تحت اثر بارهای چرخه‌ای به بررسی آزمایشگاهی تیرهای عادی دارای سخت‌کننده و تیرهای باجان موجدار پرداختند. نتایج آن بدین صورت ارائه شد که مقاومت خستگی تیرهای باجان موجدار تحت بارهای فشاری در حدود ۲۵ درصد بیشتر از تیرهای باجان معمولی بوده، همچنین خرابی در تیرهای دارای سخت‌کننده با پارگی بال کشتی همراه بوده است.

Elgaaly و همکاران در سال ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ به بررسی رفتار و مدهای خرابی تیرهای باجان موجدار تحت تحلیل غیرخطی استاتیکی با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی مصالح و هندسی پرداختند. در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی عددی رفتار ورق های موجدار پرداخته و با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه شود. در این مطالعه مدهای خرابی ایجاد شده مطابقت مناسبی با مدل‌های آزمایشگاهی داشتند. نتایج تحلیلی نشان داد که در این نمونه‌ها، تسلیم در بال‌ها با کمانش عمودی تحت فشار جان همراه بوده است. (Hajdu و همکاران، ۲۰۲۳)

پس از آن مطالعات و تحقیقات بسیار اندکی توسط Moon و همکاران در سال ۲۰۰۹، Nguyen و همکاران در سال ۲۰۱۰، Larsson و Persson در سال ۲۰۱۳، Ibrahim در سال ۲۰۱۴، Lopez و همکاران در سال ۲۰۱۷، بر روی رفتار کمانشی محلی و کلی الاستیک تیروورق‌های باجان موجدار با استفاده از روش المان محدود انجام شده است.

Krasotina و Robra در سال ۲۰۱۹، مقاومت تیروورق‌های باجان موجدار، تقویت شده با اشکال توخالی دایره ای و مربعی را جهت تقویت جان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که سخت‌کننده های دایره ای باعث بهبود عملکرد برشی جان موجدار خواهد شد. همچنین ضخامت دیواره ی سخت‌کننده ها تأثیر بسزایی را بر رفتار برشی آن‌ها خواهد گذاشت. پس از آن در سال ۲۰۲۱ Lie و همکاران، با استفاده از تحلیل غیرخطی هندسی و با در نظر گرفتن غیرخطی بودن خصوصیات مواد، به روش عددی دریافتند که نقص های محلی تأثیر چشمگیری بر

جهت عملیات جوش کاری صرف جویی کرده، همچنین خستگی تیروورق‌ها ناشی از عملیات جوش کاری را به میزان بسیار محسوس کاهش می‌دهد (Fisher و Sherman، ۱۹۷۱). این موضوع می‌تواند در سازه‌هایی مانند پل‌های ترکیبی که در معرض بارگذاری و باربرداری‌های متوالی قرار دارند، تأثیر بسزایی بگذارد. (EN1993-1-5، ۲۰۰۶)

در تیروورق‌های باجان موجدار، مقاومت خمشی توسط بال‌های تیر ایجاد شده و جان موجدار مشارکت قابل‌توجهی در آن ندارد، ولی ظرفیت برشی تیر را به میزان بالایی تأمین می‌کند (Elgaaly، ۱۹۹۸). خرابی جان تیر در اثر تسلیم فولاد، کمانش و یا اندرکنشی از این دو پدیده ایجاد می‌گردد (Alinia و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین پیچش جانبی و کمانش محلی بال نیز به عنوان معیارهای مهم دیگر خرابی در این نوع تیرها در نظر گرفته شده است (Casanova و Graciano، ۲۰۰۵).

تحقیقات صورت گرفته اخیر بر روی سختی برشی غیرخطی شامل سختی الاستو پلاستیک و سختی هندسی تیر باجان موجدار نشان داد که سختی برشی این تیر بیش از ۱۰ برابر سختی برشی تیر بتنی معادل هست که باعث کاهش ۱۰ درصدی ارتفاع عرشه نیز می‌شود. از مزایای دیگر این نوع از تیروورق‌ها سازگاری بیشتر آن‌ها با محیط زیست است بطوریکه میزان تولید گاز دی اکسید کربن یک پل پیش‌تنیده با تیروورق موجدار در مقایسه با پل‌های پیش‌تنیده با عرشه بتنی و فولادی به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد.

تحقیقات انجام شده در سوئد امکان استفاده گسترده از تیرهای باجان موجدار را در صنعت ساختمان سازی ایجاد کرد. از اواسط دهه ۷۰ میلادی تیرهای باجان موجدار در بازار سوئد جهت استفاده در اجرای دهانه‌های سقف کوچک و متوسط به صورت تیرهای با ارتفاع ثابت و متغیر، به میزان بسیار زیادی مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از این تیرها مخصوصاً در نواحی صنعتی معمول بود. (Sause و همکاران، ۲۰۰۳)

در دهه ۹۰ میلادی دولت فرانسه تحقیقاتی جهت استفاده از تیرهای باجان موجدار در طراحی پل‌ها انجام داد که در نهایت باعث اجرای ۴ پل توسط شرکت برنارد گردید. اجرای پل‌های مورد نظر بدون مشکلات اجرایی و فنی اساسی انجام شد و به عنوان مثال‌های اجرایی موفق در این حوزه محسوب می‌شوند. (Kovesdi و همکاران، ۲۰۱۶)

مقاومت برشی تیرهای باجان موجدار، که به عنوان بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری این تیرها محسوب می‌شود، موضوع مطالعه محققان زیادی بوده است (Abbas و همکاران، ۲۰۰۶). در سال ۱۹۶۹، رفتار کمانشی الاستیک ورق‌های موجدار فلزی توسط Easley و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه

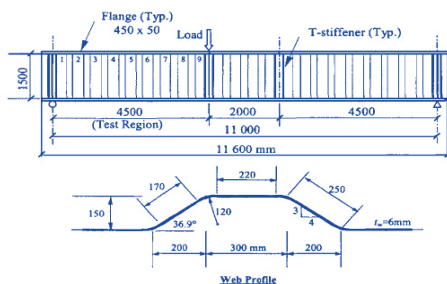
۲-۳- رفتار ترکیبی تیرورق ها تحت خمش و برش  
در این حالت مقاومت خمشی تیرهای با جان موجدار، تحت تأثیر تنش‌های برشی عمودی ایجاد شده قرار دارد. در اثر خروج از مرکزیت ذاتی جان که در تیرهای با جان موجدار وجود دارد، نیروهای برشی عمودی که در جان عمل می‌کنند، باعث ایجاد خمش‌های عرضی در جان تیر می‌گردند. (Roberts و Shahabian, 2001)

### ۳- صحت سنجی مدل عددی

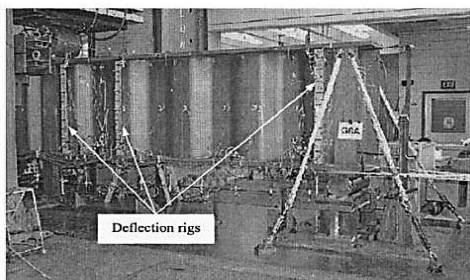
برای ارزیابی و صحت سنجی مدل المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS، از نتایج آزمایشگاهی Robert G. Driver و همکاران استفاده شده است (Robert G. Driver و همکاران، 2006).

او و همکارانش دو تیرورق G7 و G8 با مشخصات هندسی به طول دهانه ۱۱۰۰۰ mm با ابعاد بال ۵۰ mm × ۴۵۰ mm و جان ۶ mm × ۱۵۰۰ mm که تحت بار متمرکز به فاصله ۱۰۰۰ mm از وسط دهانه تیر قرار دارد را مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند. (شکل ۱)

این تیر ورق از دوطرف بر روی تکیه گاه‌های ساده، همچنین در انتهای دو سمت و زیر بار متمرکز سخت کننده‌هایی به ضخامت ۱۰ mm به صورت متقارن برای جلوگیری از لهیدگی جان و اعوجاج مقطع عرضی ناشی از بار متمرکز نیز قرار داده شده است. بار متمرکز وارد شده توسط جک‌ها مطابق شکل ۲ اعمال می‌شوند. (شکل ۲)



شکل ۱. مشخصات نمونه آزمایشگاهی Robert Driver et al



شکل ۲. بارگذاری نمونه آزمایشگاهی Robert Driver et al

روی تحلیل المان محدود نمونه‌ها خواهند گذاشت (محدثی و محمدپور، ۱۳۹۲). همچنین با افزایش ضخامت دیواره ی سخت کننده های دایره ای تأثیر آن‌ها بیشتر خواهد شد. (Wang و همکاران، 2022)

یکی از مشکلاتی که بشر دایما در استفاده از تیرهای با جان نازک با آن روبرو بوده، کماتش جان نازک تیرورق های فولادی است (Elgaaly و همکاران، 1996). بنابراین تعیین مقاومت جان موجدار این مقاطع از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار خواهد بود (Eldib, 2009). تا به امروز پژوهش‌های اندکی در مورد مقاومت جان های موجدار تحت اثر بارگذاری گسترده صورت گرفته است (Liew و همکاران، 2006). بر پایه نتایج تجربی و آزمایشگاهی به دست آمده از گذشته، در این مقاله ۱۲ نمونه تیر ورق با جان ساده، ۷ و ۸ ای، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی تحت بارگذاری گسترده با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده، سپس با مقایسه ی مقاومت این مقاطع، بهترین شکل موج جان از بین مدل های ارائه شده، بیان می‌شود. در ادامه مقاومت این نوع از تیرورق ها با دو دهانه نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه از نمونه آزمایشگاهی Robert G. Driver و همکاران جهت صحت سنجی مدل های عددی تحت بارگذاری گسترده استفاده شده است. در طول این مطالعه مشاهده شده است که موجدار کردن جان تیرورق ها، مقاومت آن‌ها را بطور محسوسی افزایش داده، رفتار تیرورق های با جان موجدار یک دهانه متفاوت از تیرورق های با دودهانه بوده، همچنین شکل اعوجاج و فاصله ی اعوجاج تأثیر زیادی را بر مقاومت این نوع از تیر ورق ها خواهند داشت.

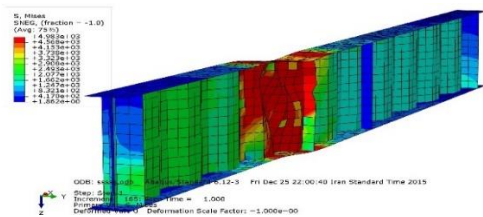
### ۲- رفتار تیرورق های با جان موجدار

#### ۲-۱- رفتار برشی :

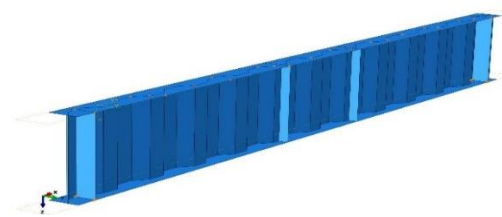
کمانش برشی در تیرهای با جان موجدار اساساً می‌تواند در دو حالت کلی و محلی اتفاق بیفتد. همچنین عوامل مختلف ممکن است در اندرکنش با تنش‌های برشی باعث خرابی و گسیختگی زودرس تیرورق ها شوند. (Leblouba و همکاران، 2017)

#### ۲-۲- رفتار خمشی :

رفتار خمشی تیرهای با جان موجدار تابعی از عمق جان، ابعاد بال و مشخصات مصالح است. تحت تلاش‌های خمشی، بیشترین تنش‌های طولی در بال‌های تیر و نواحی نزدیک بال به جان اتفاق می‌افتد و دیگر نقاط جان تیر تنش‌های بسیار کوچکی را تحمل می‌کنند. بنابراین رفتار خمشی تیر با جان موجدار عموماً توسط بال‌های آن ایجاد می‌شود و جان تیر در رفتار خمشی تأثیر محسوسی ندارد و می‌توان در تعیین مقاومت نهایی تیر تحت خمش از اثر آن صرف نظر کرد. (Kovesdi و همکاران، 2010)



ب: توزیع تنش در مدل المان محدود



الف: نمونه مدل سازی شده توسط نرم افزار

شکل ۳. مدل عددی المان محدود. الف: نمونه مدل سازی شده توسط نرم افزار. ب: توزیع تنش در مدل المان محدود.

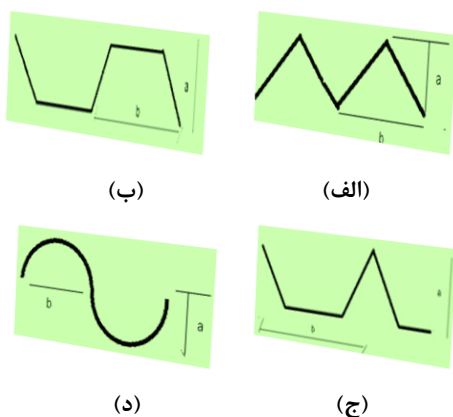
#### ۴- مطالعه مدل های عددی

##### ۴-۱- خصوصیات هندسی مدل های المان محدود

در این پژوهش ۱۲ نمونه تیر ورق با یک دهانه و دو دهانه بطور مشابه، با جان ساده، ۷ و ۸ ای، دوزنقه ای، مثلثی، سینوسی تحت بارگذاری گسترده با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده، سپس با مقایسه ی مقاومت آن ها بهترین شکل موج جان ارائه می شود.

بدین ترتیب ۱۲ مدل عددی تیر ورق با یک دهانه و همچنین ۱۲ مدل مشابه با دودهانه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در تیر ورق های با یک دهانه هر مدل دارای ۲ تکیه گاه گیردار در دو انتهای خود، همچنین در مدل های با دودهانه هر نمونه دارای ۲ تکیه گاه گیردار در دو انتهای خود و یک تکیه گاه مفصلی در وسط دهانه می باشند. بار اعمالی بر روی دو نوع تیر ورق به صورت گسترده بر روی بال فوقانی اعمال می شود و تا خرابی نهایی ادامه دارد.

در شکل ۶ می توان مقطع هندسه ی موج مدل های عددی با یک دهانه و دو دهانه را مشاهده نمود.

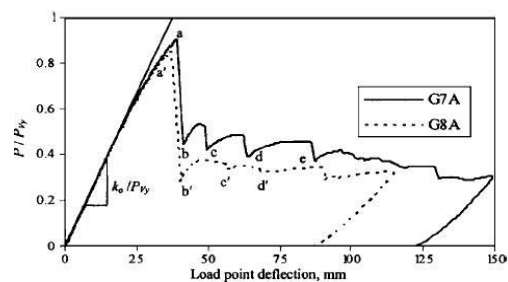


شکل ۶. جزئیات جان موجدار تیرورقهای با یک دهانه و دودهانه.

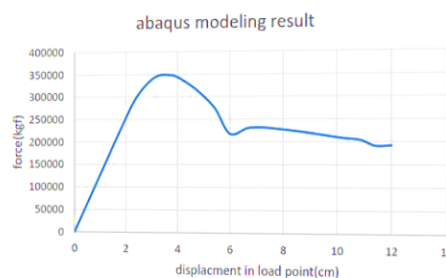
الف: ۷ و ۸ ای. ب: دوزنقه ای. ج: مثلثی. د: سینوسی.

حال با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل آزمایشگاهی را به صورت Shell مدل سازی می نماییم (شکل ۳). مدول الاستیسیته فولاد برابر  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، ضریب پواسون برابر ۰.۳ و تنش تسلیم برابر  $4850 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. در تحلیل و آنالیز مدل، فرض بر رفتار غیر خطی مصالح و هندسه ی نمونه شده است.

با مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی G8 با مدل المان محدود توسط نرم افزار می توان دریافت که مقدار حداکثر مقاومت برای نمونه آزمایشگاهی ۳۶۴.۷ ton، همچنین این مقدار برای مدل المان محدود برابر ۳۵۰ ton خواهد بود (شکل ۴ و ۵). باتوجه به مقادیر ذکر شده خطای محاسباتی برابر ۴.۲٪، که مقداری ناچیز است که می توان از آن صرف نظر نمود. ممکن است این خطا ناشی از نقص اولیه نمونه باشد. (Maiorana و همکاران، 2009)



شکل ۴. منحنی نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی G8



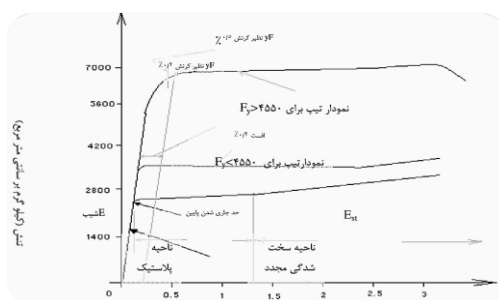
شکل ۵. منحنی نیرو-جابجایی مدل المان محدود G8

جدول ۱. خصوصیات هندسی تیرورق های با جان موجدار ۷ و ۸ ای، دوزنقه ای.

مدل	نمونه ها	L (cm)	t <sub>w</sub> (cm)	a (cm)	b (cm)
۷ و ۸ ای	SH1	۱۰۰۰	۰.۶۹	۳۰	۱۰۴
	SH2	۱۰۰۰	۰.۵۶	۳۰	۶۰
	SH3	۱۰۰۰	۰.۴	۳۰	۳۴
	SH4	۱۰۰۰	۰.۷۴	۳۰	۱۵۵.۸۶
دوزنقه ای	SH5	۱۰۰۰	۰.۶۶۳	۳۰	۹۰
	SH6	۱۰۰۰	۰.۵۳۳	۳۰	۵۱.۹۶
	SH8	۱۰۰۰	۰.۴	۳۰	۳۰

جدول ۲. خصوصیات هندسی تیرورق های با جان ساده، موجدار مثلثی و سینوسی.

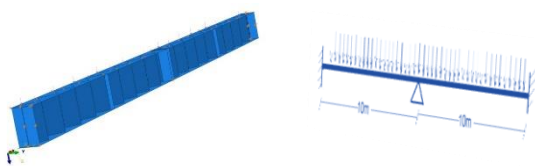
مدل	نمونه ها	L (cm)	t <sub>w</sub> (cm)	a (cm)	b (cm)
ساده	SH7	۱۰۰۰	۰.۶	-	-
مثلثی	SH9	۱۰۰۰	۰.۷۲۵	۱۵۵	۳۰
	SH10	۱۰۰۰	۰.۶۲	۹۰	۳۰
سینوسی	SH11	۱۰۰۰	۰.۶۵	۲۵	۲۵
	SH12	۱۰۰۰	۰.۴۵	۱۲.۵	۱۲.۵



شکل ۷. نمودار تنش- کرنش فولاد مصرفی

#### ۴-۴- نحوه ی بارگذاری و شرایط مرزی

در این مقاله کلیه ی مدل ها، تحت بارگذاری گسترده بر روی بال فوقانی قراردارند. این بارگذاری با استفاده از روش اصلاح شده RIKS اعمال شده است. در دو انتهای تیرورق های با یک دهانه، تکیه گاه گیردار و در تیرورق های بادودهانه، علاوه بر تکیه گاه گیردار در انتهای دو سمت، تکیه گاه مفصلی در وسط دهانه تعبیه شده است. همچنین، سخت کننده هایی به ضخامت ۱۰ mm در انتهای دو سمت و وسط دهانه ی تیرورق ها جهت انتقال بار از بال به جان و جلوگیری از لهیدگی قرار داده شده است. نوع تکیه گاه ها و بارگذاری تیر ورق ها را می توان در شکل ۱۱ مشاهده نمود.



شکل ۱۱. شرایط تکیه گاهی و بارگذاری تیر ورق با دودهانه

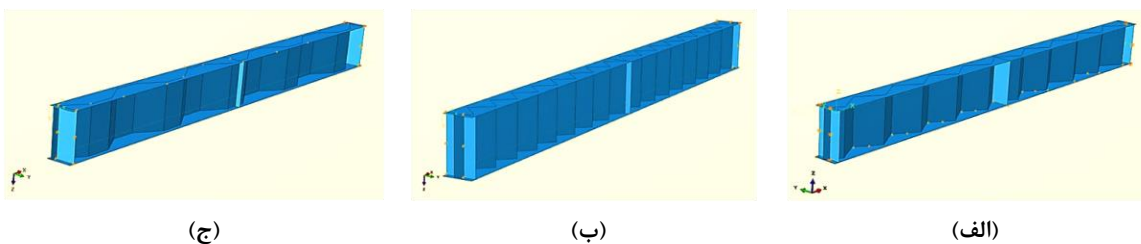
در این مطالعه، طول دهانه ی تیرورق های با یک دهانه و دو دهانه به ترتیب ۱۰ m و ۲۰ m در نظر گرفته شده است. نوع فولاد در جان و بال تیرورق ها یکسان بوده است. همچنین حجم فولاد مصرفی در تمامی مدل ها یکسان و با توجه به آن، ضخامت جان مدل های عددی تغییر می یابد. ابعاد موج جان و مشخصات هندسی مدل های تیرورق با جان ساده و موجدار یک دهانه را می توان در جداول ۱ و ۲ مشاهده نمود. همچنین نمونه های مدل سازی شده با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS در اشکال ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. برای مدل سازی تیرورق های بادودهانه نیز از مشخصات هندسی مشابه تیرورق های یک دهانه استفاده شده است.

#### ۴-۲- خصوصیات مواد مدل های تیرورق باجان موجدار

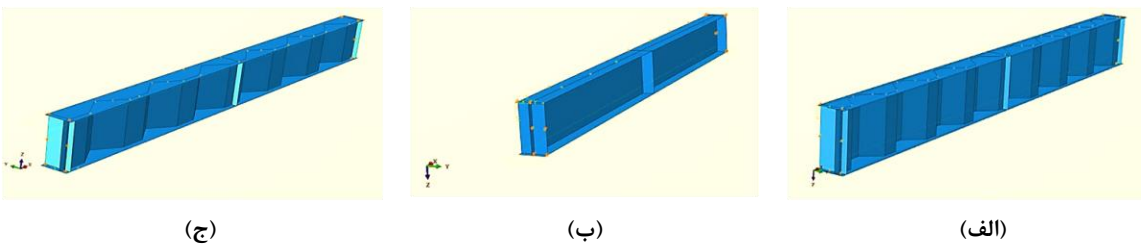
در تحلیل و آنالیز مدل ها، خصوصیات فولاد مصرفی از جمله مدول الاستیسیته برابر  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، ضریب پواسون برابر ۰.۳ و تنش تسلیم فولاد برابر  $2400 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. رابطه ی بین تنش و کرنش فولاد را می توان در شکل ۷ مشاهده نمود. همچنین از تنش تسلیم Von Mises برای مدل سازی نمونه ها استفاده شده است.

#### ۴-۳- مدل سازی المان محدود

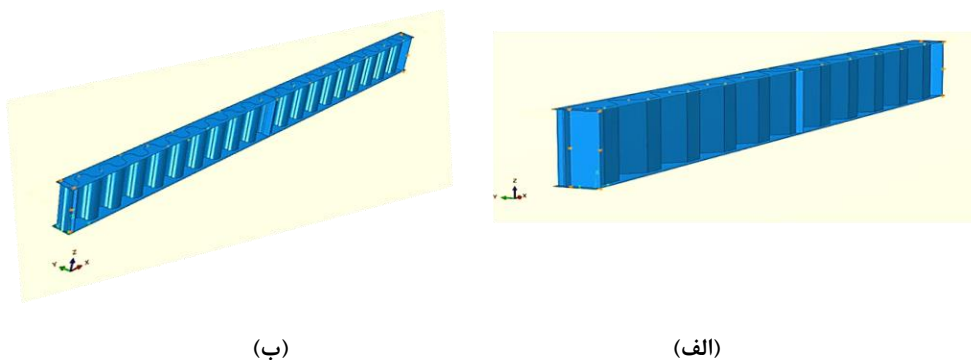
برای مدلسازی و تحلیل، از نرم افزار ABAQUS استفاده شده که با بکارگیری از روش المان محدود و تحلیل Static Riks به حل مسائل عددی می پردازد. همچنین فرض بر رفتار غیر خطی مصالح و هندسه مدل ها شده است. (Ghanim و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۸. نمونه های مدل سازی شده تیورق با Abaqus. الف:SH1. ب:SH2. ج:SH4.



شکل ۹. نمونه های مدل سازی شده تیورق با Abaqus. الف:SH5. ب:SH7. ج:SH9.



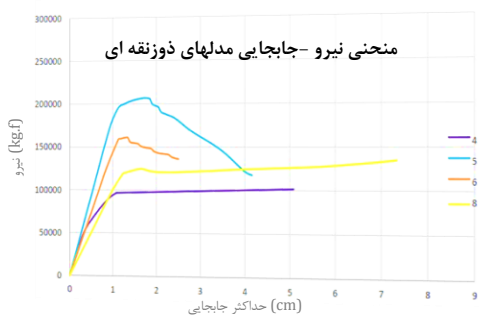
شکل ۱۰. نمونه های مدل سازی شده تیورق با Abaqus. الف:SH10. ب:SH12.

۵- نتایج و تفسیر داده ها

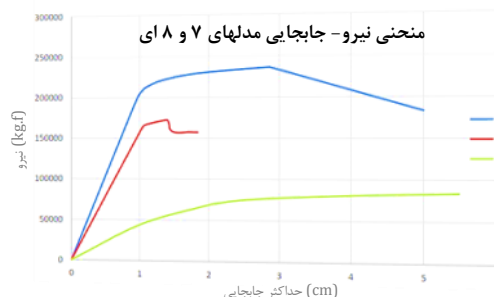
۵-۱- بررسی رفتار مدل های ۷ و ۸ ای تحت بارگذاری گسترده همانطور که در نمودار شکل زیر مشخص است، رفتار مدل های ۷ و ۸ ای تحت تاثیر ضخامت جان و فاصله ی موج ها از هم بوده، بطوریکه برای ارتفاع موج برابر (a)، کاهش ضخامت جان (tw) و کاهش فاصله ی موج ها از یکدیگر (b) موجب کاهش مقاومت تیورق ها تحت بارگذاری گسترده شده است. (شکل ۱۲)

۵-۲- بررسی رفتار مدل های دوزنقه ای تحت بارگذاری گسترده

در تیورق های دوزنقه ای تحت بار گسترده، با چشم پوشی از نتایج SH4، می توان همانند تیورق های ۷ و ۸ ای به این نتیجه رسید که کاهش ضخامت جان و فاصله ی اعوجاج ها باعث کاهش مقاومت حداکثر در ۳ مدل SH5، SH6، SH8 شده است. (شکل ۱۳) در شکل های ۱۴ و ۱۵ نحوه خرابی نمونه های مدل سازی شده با استفاده از نرم افزار Abaqus تحت بارگذاری گسترده را می توان مشاهده نمود.

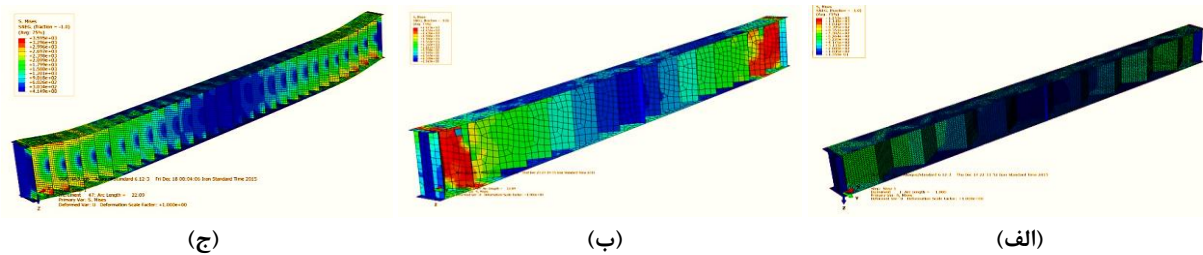


شکل ۱۳. منحنی نیرو-جابجایی دوزنقه ای: SH4، SH5، SH6، SH8.

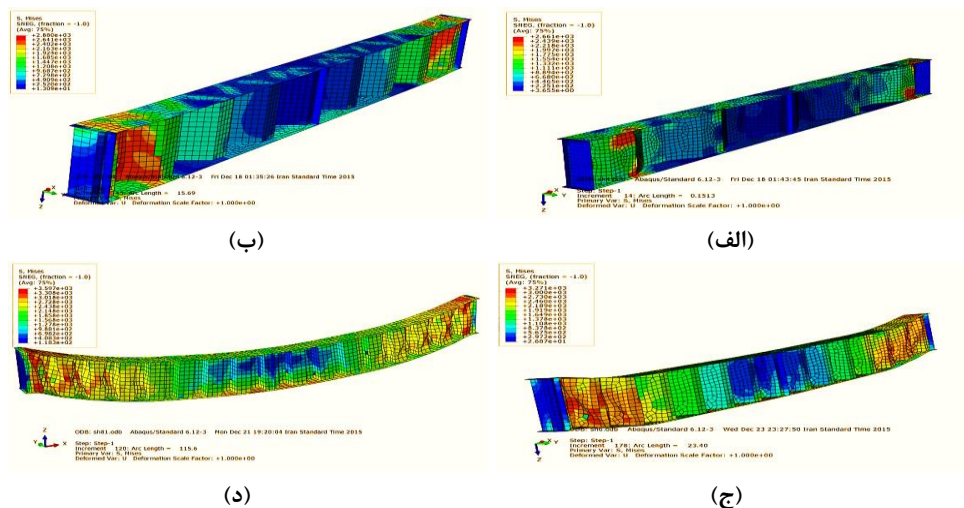


شکل ۱۲. منحنی نیرو-جابجایی مدل های ۷ و ۸ ای: SH1، SH2، SH3.



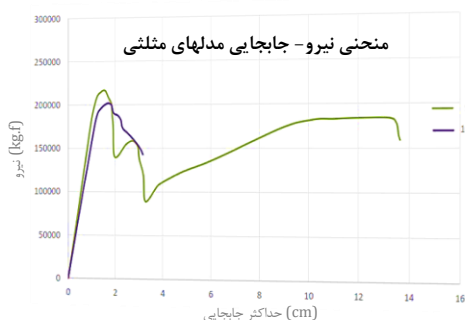


شکل ۱۴. خرابی نمونه‌های مدل سازی شده ۷ و ۸ ای با Abaqus. الف: SH1. ب: SH2. ج: SH3.



شکل ۱۵. خرابی نمونه‌های مدل سازی شده ذوزنقه ای با Abaqus. الف: SH4. ب: SH5. ج: SH6. د: SH8.

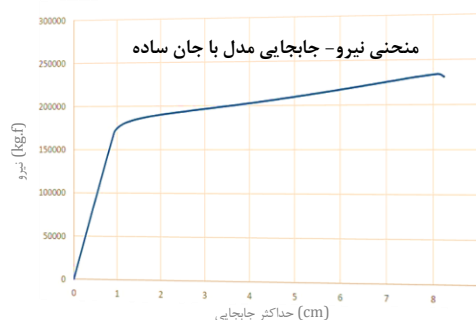
نداشته، تنها شکل پذیری و تغییر شکل آن ها کاهش پیدا کرده است. (شکل ۱۷)



شکل ۱۷. منحنی نیرو-جابجایی مدل مثلثی: SH10. SH9.

۵-۵- بررسی رفتار مدلهای سینوسی تحت بار گذاری گسترده بدین ترتیب در نمودار شکل زیر نیز مشخص است که در مدل های تیر ورق با جان سینوسی تحت اثر بارگذاری گسترده، با ارتفاع موج یکسان (a) و فواصل برابر موج (b)، کاهش ضخامت جان موجب کاهش چشمگیری در حداکثر مقاومت تیرورق ها باجان سینوسی شده است. همچنین افزایش شکل پذیری و تغییر شکل مدل ها را به همراه داشته است. (شکل ۱۸)

۳-۵- بررسی رفتار مدل باجان ساده تحت بار گذاری گسترده رفتار مدل تیر ورق با جان ساده مطابق نمودار زیر است (شکل ۱۶). همچنین می توان نحوه ی خرابی این نوع از تیر ورق را تحت بار گسترده در شکل ۱۹ مشاهده نمود.



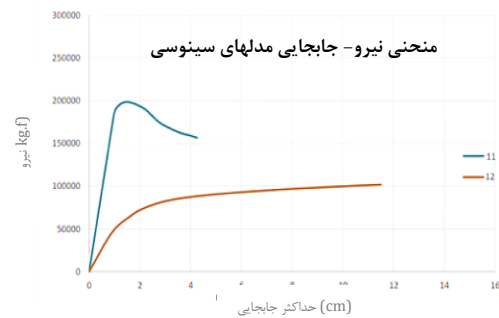
شکل ۱۶. منحنی نیرو-جابجایی مدل باجان ساده: SH7.

۴-۵- بررسی رفتار مدلهای مثلثی تحت بار گذاری گسترده همانگونه که مشاهده می نمایید، تیر ورق های موجدار با جان مثلثی مطابق نمودار شکل زیر تحت اثر بارگذاری گسترده در فواصل یکسان موج (b)، کاهش ارتفاع موج (a) و ضخامت جان در آن ها، تأثیر چندانی بر روی حداکثر مقاومت تیر ورق ها

موجدار با اشکال مختلف تأثیر می گذارد. همچنین ضخامت جان موجدار تأثیر چشمگیری را بر روی حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرورق را دارد.

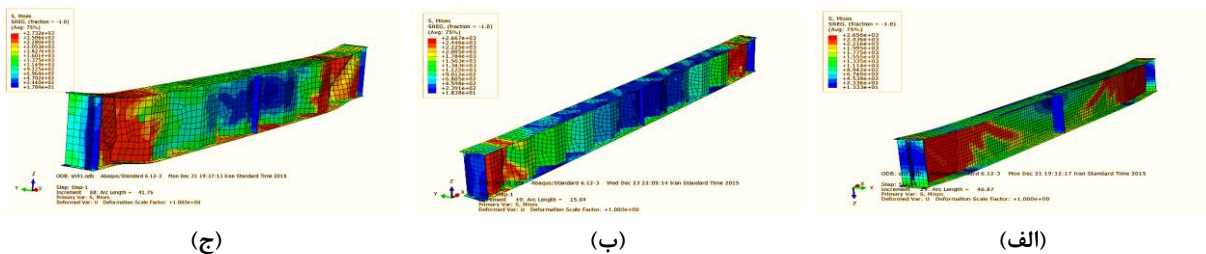
حال می خواهیم تأثیر اشکال مختلف موج در جان تیرورق های با یک دهانه و دودهانه تحت اثر بارگذاری گسترده را بر روی مقاومت نهایی مدل های المان محدود مورد مطالعه و ارزیابی قرار دهیم.

در شکل های ۱۹ و ۲۰ نحوه ی خرابی نمونه های تیرورق با جان ساده، مثلثی و سینوسی تحت بارگذاری گسترده که با نرم افزار المان محدود Abaqus مدل سازی شده اند را می توان مشاهده نمود.

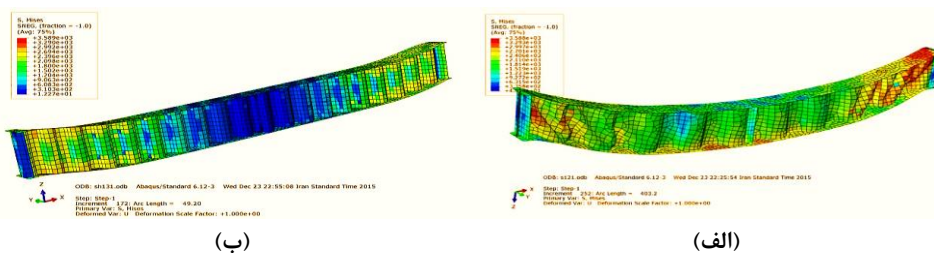


شکل ۱۸. منحنی نیرو-جابجایی مدل سینوسی: SH12.SH11

همانگونه که تابدین جای مقاله بحث شد، متغیر های موج شامل ارتفاع و فواصل موج از یکدیگر بر روی مقاومت تیرورق های

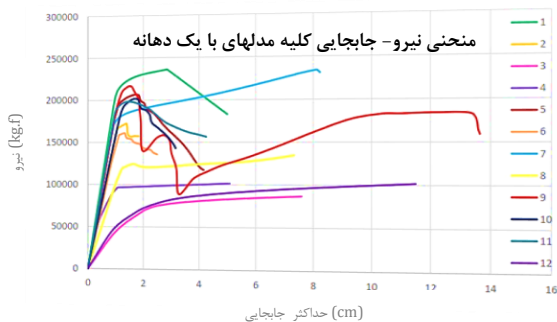


شکل ۱۹. خرابی نمونه های ساده و مثلثی مدل سازی شده با Abaqus. الف: SH7. ب: SH9. ج: SH10.



شکل ۲۰. خرابی نمونه های مدل سازی شده سینوسی با Abaqus. الف: SH11. ب: SH12.

علاوه بر این، مدل های SH12 و SH9 دارای بیشترین تغییرشکل در بین نمونه های عددی تحت بارگذاری گسترده هستند که این موضوع نشان دهنده ی شکل پذیری مطلوب مدل های تیرورق با جان مثلثی و سینوسی خواهد بود. (شکل ۲۱)



شکل ۲۱. منحنی نیرو-جابجایی ۱۲ مدل عددی با یک دهانه

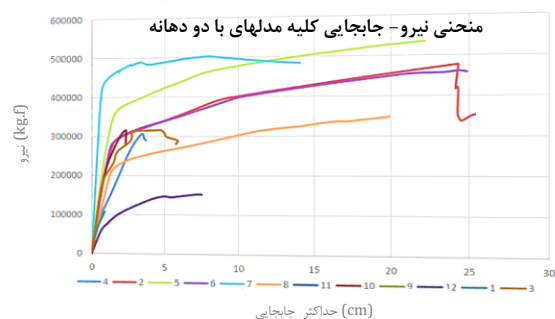
### ۵-۶- بررسی رفتار و مقاومت مدل های عددی با یک دهانه تحت بارگذاری گسترده

با بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی و مطالعه مقاومت و تغییرشکل کلیه مدل های عددی تیرورق با جان ساده و موجدار (۷ و ۸ ای، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی) با یک دهانه تحت اثر بارگذاری گسترده، می توان فهمید که مدل های SH1، SH7، SH9 و SH12 دارای حداکثر مقاومت بین نمونه ها بوده که نشان دهنده ی تأثیر بسیار زیاد ارتفاع موج (a)، فاصله موج ها از یکدیگر (b) و ضخامت جان (tw) است به طوری که تیرورق های با چین بزرگ و ضخامت زیاد بیشترین تحمل را در برابر بارهای وارده از خود نشان می دهند. همچنین با بررسی شکل موج مدل های تیر ورق می توان به این نتیجه رسید که از بین کلیه مدل ها، تیرورق با جان ۷ و ۸ ای و مثلثی بهترین و بهینه ترین نوع شکل موج تحت اثر بار گسترده هستند. (شکل ۲۱)



## ۵-۷- بررسی رفتار و مقاومت مدل‌های عددی با دو دهانه تحت بارگذاری گسترده

تحت همان شرایط و بارگذاری، مطالعه نمودارهای نیرو-جابجایی و همچنین بررسی مقاومت و تغییر شکل کلیه مدل‌های عددی تیر ورق با جان ساده و موجدار (۷ و ۸ ای، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی) با دو دهانه تحت اثر بارگذاری گسترده، نشان می‌دهد که بهترین و بهینه ترین شکل جان، تیورق‌های با جان ساده و موجدار با جان دوزنقه ای می‌باشند که حداکثر مقاومت را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان می‌دهند (شکل ۲۲). همچنین ضخامت جان در این نوع از تیورق‌ها تأثیر بیشتری در مقایسه با دو متغیر موج (a,b) دارد.



شکل ۲۲. منحنی نیرو-جابجایی ۱۲ مدل عددی با دو دهانه

۵) مطالعه مدل‌های عددی نشان می‌دهد که تیورق‌های با چین بزرگ مانند نمونه‌های SH1 و SH9، بیش از تمامی نمونه‌ها، بار وارده را تحمل کرده، همچنین هرچه چین‌ها زاویه دارتر بوده، مقاومت بیشتری را متحمل شده‌اند. می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که چین‌ها با زوایای بزرگتر ( $0 < \alpha < 90$ ) بهترین و بهینه‌ترین حالت را دارند (مانند نمونه SH1). البته بایستی خاطر نشان شد که در تمامی نمونه‌ها فولاد مصرفی یکسان، تنها شکل، نوع و ابعاد چین و ضخامت جان به دلیل ثابت بودن وزن نهایی متفاوت بوده است.

مطالعه تیورق‌های موجدار با دو دهانه به طول کلی ۲۰ متر تحت اثر بارگذاری گسترده نشان می‌دهد که:

۱) بهترین شکل جان از بین مدل‌ها، تحت اثر بارگذاری گسترده، مدل‌های با جان ساده و دوزنقه‌ای شکل هستند که حداکثر مقاومت (۵۰۰۰۰۰ kgf) را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان می‌دهند. (در حدود بیش از ۴ برابر نمونه‌های تیورق با جان سینوسی)

۲) ضخامت جان تأثیر بسزایی در مقاومت تیورق‌ها دارد بطوریکه مدل‌های SH5 و SH7 با حداقل ضخامت ۶ mm، حداکثر مقاومت را در بین مدل‌های مورد مطالعه دارند.

## ۷- قدردانی

بدینوسیله بر خود لازم میدانم که از تلاش‌ها و همکاری‌های استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر هدایت ولادی برای انجام پژوهش حاضر کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

## ۷- مراجع

- محدثی، محمدپور ب، "بررسی رفتار خمشی و برشی شاستیرهای فولادی I شکل با جان موج دار"، سومین کنفرانس سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی سازه‌های سبک فولادی، ۱۳۹۲
- ABAQUS Standard User's Manual. The Abaqus Software is a product of Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA Dassault Systemes, USA.
- Abbas H.H, Sause R, and Driver R.G, "Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads", Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(8), 806-814.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132:8\(806\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:8(806)).
- Alinia MM, Shakiba M, Habashi HR, "Shear failure characteristics of steel plate girders", Thin-Walled Steel Struct, 2009, 498-506.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.06.002>.
- Bryan E.R, Jackson P, "The shear behaviour of corrugated steel sheeting", Thin Walled Steel Structures, 1969, 258-274.
- Chan C.L, Khalid Y.A, Sahari B.B, and Hamouda A.M.S, "Finite element analysis of corrugated web beams under bending", Journal of Constructional Steel

## ۶- نتیجه‌گیری

مطالعه تیورق‌های موجدار با یک دهانه ۱۰ متری تحت اثر بارگذاری گسترده نشان می‌دهد که:

۱) در تیورق‌های با جان موجدار ۷ و ۸ ای، ضخامت جان (t<sub>w</sub>) و فواصل موج (b) تأثیر بسیار زیادی بر روی مقاومت آن‌ها داشته بطوریکه با کاهش ضخامت جان و فاصله ی موج‌ها، حداکثر مقاومت تیورق‌ها کاهش می‌یابد. همچنین رفتار تیورق‌های دوزنقه‌ای مشابه تیورق‌های ۷ و ۸ ای است.

۲) در مورد تیورق‌های با جان مثلثی، ضخامت جان و متغیرهای موج تأثیر چندانی در حداکثر مقاومت تیورق‌ها ندارد و تنها با کاهش متغیرها شکل پذیری آن‌ها کاهش می‌یابد.

۳) در تیورق‌های با جان موجدار سینوسی، ضخامت جان تأثیر چشمگیری در مقاومت نمونه‌ها دارد بطوریکه کاهش ضخامت جان باعث کاهش بسیار چشمگیر حداکثر مقاومت تیورق‌ها می‌شود.

۴) با تحلیل و آنالیز کلیه نمونه‌ها، میتوان فهمید که شکل جان مدل‌های ۷ و ۸ ای و مثلثی، حداکثر مقاومت (۲۴۰۰۰۰ kgf) را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان می‌دهند. (در حدود بیش از ۲۰ برابر نمونه‌های تیورق با جان سینوسی)

- fatigue strength of beams with web plate stiffened in the traditional way and by corrugation", *Acta Technica Academia Scientiarum Hungariche*, Budapest, 1979.
- Kovesdi B, "Patch loading resistance of girders with corrugated webs", PhD Dissertation, Budapest University of Technology and Economics, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.05.011>.
- Kovesdi B, Jager B, and Dunai L, "Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs", *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 383-397. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.002>.
- Larsson M, Persson J, "Lateral-Torsional Buckling of Steel Girders with Trapezoidally Corrugated Webs", MSc thesis, Chalmers University of Technology, 2013.
- Leblouba M, Junaid MT, Barakat S, Altoubat S, Maalej M, "Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams", *Thin-Walled Struct*, 2017, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.01.002>.
- Li Z, Pasternak H, Robra J, "Tragverhalten von Wellstegträgern mit kreisförmigen Öffnungskranz", *Bauingenieur*, 2021, 96, 114-120. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2021-04-50>
- Liew K.M, Kitipornchai S, and Peng L.X, "Mesh-free methods for buckling analysis of stiffened and corrugated plates", CRC Press, Book Cahpter, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00466-005-0721-2>.
- Lopes G.C, Carlos C, Real P.L, Lopes N, "Elastic critical moment of beams with sinusoidally corrugated webs", *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 129, 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.005>.
- Maiorana E, Pellegrino C, Modena C, "Imperfections in steel girders with and without perforations under patch loading", *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65, 1121-1129. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.10.007>.
- Moon J, Yi J.W, Choi B.H, Lee H.E, "Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending", *Thin-Walled Struct*, 2009, 47, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.04.005>.
- Nguyen N.D, Kim S.N, Han S.R, Kang Y.J, "Elastic lateral-torsional buckling strength of I-girder with trapezoidal web corrugations using a new warping constant under uniform moment", *Journal Structural Engineering*, 2010, 32, 2157-2165. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.03.018>.
- Roberts T.M, Shahabian F, "Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading", *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57, 779-790. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00009-8)
- Robra J, Krasotina L, "Querkrafttragfähigkeit von sinusförmig profilierten Stahlträgerstegen mit runden und quadratischen Öffnungen", *Bauingenieur*, 2019, 94, 285-291. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2019-07-08-63>.
- Sause R, Abbas H.H, Wassef W.G, Driver R.G, and Elgaaly M, "Corrugated Web Girder Shape and Research, 2002, 1391-1406. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
- Driver R.G, Abbas H.H, Sause R, "Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders", *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:2\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:2(195)).
- Easley J.T, McFarland D.E, "Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms", *Journal of Struct*, 1969, 95(7), 1497-1516. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002313>.
- Eldib M.E.A, "Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges", *Journal of Constr Steel Res*, 2009, 2129-2139. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.002>.
- Elgaaly M, "Thin steel plate shear walls behavior and analysis", *Thin-Walled Structures*, 1998, 32, 151-180. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00031-7)
- Elgaaly M, Hamilton R.W, and Seshadri A, "Shear strength of beams with corrugated webs", *American Society of Civil Engineers, Journal Structural Engineering*, 1996, 122(4), 390-398. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:4\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(390)).
- Elgaaly M, Seshadri A, "Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading", *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(6), 783-791. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:6\(783\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(783)).
- Elgaaly M, Seshadri A, "Depicting the behavior of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis", *Advances in Engineering Software*, 1998, 29(3), 195-208. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00020-9)
- EN 1993-1-5, Eurocode 3, "Design of steel structures", part 1-5: Plated structural elements, CEN. Brussels, 2006.
- Ghanim G, Wael S, Baldawi, Ammar A, "A Review of Composite Steel Plate Girders with Corrugated Webs", *Engineering and Technology Journal*, 2021. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i12.2193>.
- Graciano C, Casanova E, "Ultimate strength of longitudinally stiffened I-girder webs subjected to combined patch loading and bending", *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 93-111. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.07.006>.
- Hajdú G, Pasternak H, Papp F, "Lateral-torsional buckling assessment of I-beams with sinusoidally corrugated web", *Journal of Constructional Steel Research*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107916>.
- Ibrahim S.A, "Lateral torsional buckling strength of unsymmetrical plate girders with corrugated webs", *Journal of Structural Engineering*, 2014, 81, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.040>.
- Ibrahim S.A, El-Dakhkhni W.W, and Elgaaly M, "Fatigue of corrugated web plate girders", *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(9), 1381-1392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:9\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:9(1381)).
- Korashy M, Varga J, "Comparative investigation of

- Strength Criteria”, Lehigh University, ATLSS Reports, 2003.
- Sherman D, Fisher J, “ Beams with corrugated webs”, Missouri University of Science and Technology, International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 1971.
- Wang J, Li Z, Robra J, Pasternak H, Euler M, “Investigation on Shear Buckling of Corrugated Web Beams with Reinforced Web Openings”, 2022. <https://doi.org/10.1002/cepa.1800>.

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of the Mutual Effect of Shear Force and Bending Moment in Plate Girders with Corrugated Webs

Hedayat Veladi, Mohammad Pouria Moosavi Solat Abad, Seyyed Hamid Lari \*

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received:

Accepted:

### Keywords:

Plate girder, Corrugated web, Interaction of shear force and bending moment, Distributed loading.

## 1. Introduction

Plate girders are among the main load-bearing elements of large structures such as bridges, which, due to their type of application, must meet the necessary geometric and physical characteristics in terms of hardness and non-buckling. The existence of corrugated web in the bridges greatly increases the bending stiffness of the girder. With the removal of stiffeners, plate girders with corrugated web, in addition to significantly reducing the weight of the structure, save the cost and time required for welding operations, and also significantly reduce the fatigue of girder due to welding operations. This issue can have a significant impact on structures such as bridges that are subject to successive loading and unloading. In plate girders with corrugated web, the bending resistance is created by the flanges of the girder, and the corrugated web does not contribute significantly to it, but it provides the shear capacity of the plate girder to a high extent. The failure in such girders is caused by steel yielding, buckling or interaction of these two phenomena. lateral twisting and local buckling of the flange are also considered as other important criteria of failure in this type of girders. One of the problems that mankind has been constantly facing is the buckling of thin web. Therefore, the determination of the resistance of corrugated web will be of special importance. So far, few studies have been done on the resistance of corrugated web under distributed loading. The purpose of this study is to compare the strength of corrugated and flat web plate girders by considering the interaction effect of shear force and bending moment according to the types of web shapes.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

To validate the finite element model, the experimental results of Robert G. Driver et al have been used. The comparison of the force-displacement diagram of the G8 laboratory sample with the finite element model by ABAQUS software shows that the maximum resistance value for the laboratory sample and the finite element model will be equal to 364.7 ton and 350 ton, respectively. According to the mentioned values, the calculation error is equal to 4.2%, which is a small amount and can be ignored. This error may be caused by the initial imperfection of the modeled sample.

### 2.2. FE modeling

In this article, 12 models of plate girder with simple, 7 and 8-shape, angular, triangular and sinusoidal web under distributed loading are modeled using ABAQUS finite element software, then the best girder corrugation form is presented by comparing their resistance. In the following, the resistance of this type of

plate girders with two spans will be investigated. In the recent study, the amount of steel used in all the samples is constant and the type of corrugation, the corrugation distance and the thickness of the web of the plate girders are variable.

Plate girders with one span have 2 fixed supports at both ends, and models with two spans have 2 fixed supports at both ends and an hinged support in the middle of the span. The applied load on two types of plate girder is distributed applied on the upper flange and continues until the final failure. Loading was applied using the modified RIKS method. In addition, stiffeners are placed at the ends of both sides and in the middle of the span of the girders to transfer the load from the flange to the girder and prevent crippling.

In the analysis of the models, the characteristics of the steel used, including the modulus of elasticity equal to  $6.1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>, Poisson's ratio equal to 0.3, and the yield stress of steel equal to 2400 kg/cm<sup>2</sup> have been considered. Von Mises yield stress has also been used to model the samples. In the analysis of the models, the non-linear behavior of the materials and the geometry of the models is assumed.

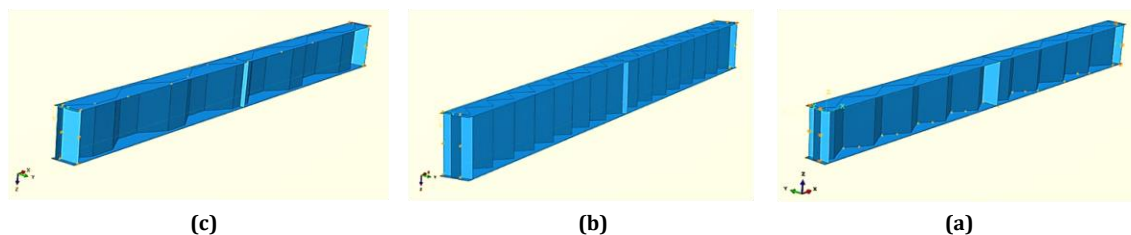
In Tables 1 and 2, you can see the variable values of corrugated webs in girders with simple and corrugated webs. Also, examples of girder modeling with corrugated web by ABAQUS software are given in Figure 1.

**Table 1. Geometrical characteristics of 7 and 8-shape and angular corrugated plate girders.**

Model	Label	L (cm)	t <sub>w</sub> (cm)	a (cm)	b (cm)
7 and 8-shape	SH1	1000	0.69	30	104
	SH2	1000	0.56	30	60
	SH3	1000	0.4	30	34
	SH4	1000	0.74	30	155.86
Angular	SH5	1000	0.663	30	90
	SH6	1000	0.533	30	51.96
	SH7	1000	0.4	30	30
	SH8	1000	0.4	30	30

**Table 2. Geometric characteristics of simple, triangular and sinusoidal corrugated plate girders.**

Model	Label	L (cm)	t <sub>w</sub> (cm)	a (cm)	b (cm)
Simple	SH7	1000	0.6	-	-
Triangular	SH9	1000	0.725	155	30
	SH10	1000	0.62	90	30
Sinusoidal	SH11	1000	0.65	25	25
	SH12	1000	0.45	12.5	12.5



**Fig 1. girder models modeled with Abaqus.(a):SH1.(b):SH2.(c):SH4**

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Numerical models with one span under distributed loading

By investigation the force-displacement diagrams and studying the resistance and deformation of all the numerical models of plate girders with simple and corrugated webs (7 and 8-shape, angular, triangular and sinusoidal) with a span under the effect of distributed loading, it can be understood that SH1, SH7 and SH9 models have the maximum strength between the samples, which indicates the great influence of the wave height (a), the distance of the waves from each other (b) and the thickness of the web (t<sub>w</sub>) so that the girders with large fold and the great thickness show the greatest tolerance against the applied loads. Also, by investigation the wave shape of plate girder models, it can be concluded that among all the models, girder with 7, 8-shape and triangular web are the best and the most optimal type of wave shape under the effect

of distributed load. In addition, the SH9 and SH12 models have the most deformation among the numerical samples under distributed loading, which indicates the favorable deformation of the girder models with triangular and sinusoidal webs. (figure 2a)

### 3.2. Numerical models with two spans under distributed loading

Under the same conditions and loading, the study of the force-displacement diagrams as well as the resistance and deformation of all numerical models of plate girders with simple and corrugated webs (7, 8-shape, angular, triangular and sinusoidal) with two spans under the effect of the distributed loading shows that the best and the most optimal form of the girder is the plate girders with simple web and angular web, which show the maximum resistance against the applied loads (Figure 2b). Also, the web thickness in this type of girders has a greater effect compared to the two wave variables (a,b).

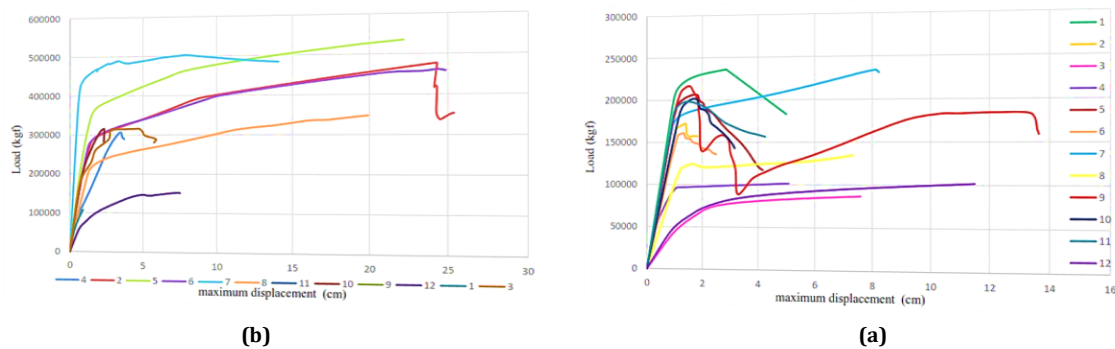


Fig 2. Force-displacement diagrams 12 of numerical models.(a): with with one span.(b): with two spans

## 4. Conclusions

By analyzing all the models with one span, it can be understood that the best and the most optimal shape of web among the samples under the effect of distributed loading are the 7, 8-shape and triangular models, which show the maximum resistance against applied loads. . Also, the study of numerical models shows that the girders with large folds, such as SH1 and SH9 samples, have endured the applied load more than all the samples, so that the more angular the folds, the more resistance they have endured. It can be concluded that folds with larger angles have the best and the most optimal state (such as the SH1 sample). Of course, it should be noted that in all the samples, the steel used is the same, only the shape, type and dimensions of the folds and the thickness of the web, were different due to the constant final weight. Also, the study of corrugated girders with two spans under the effect of distributed loading shows that the best and the most optimal form of the web is the models with a simple web and an angular shape, which show the maximum resistance against applied loads. In addition, the thickness of the web has a significant effect on the resistance of the girders, so that models SH5 and SH7 with a minimum thickness of 6 mm have the maximum resistance among the studied models.

## 5. References

- Ghanim G, Wael S, Baldawi, Ammar A, "A Review of Composite Steel Plate Girders with Corrugated Webs", Engineering and Technology Journal, 2021. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i12.2193>.
- Hajdú G, Pasternak H, Papp F, "Lateral-torsional buckling assessment of I-beams with sinusoidally corrugated web,Journal of Constructional Steel Research,2023.<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107916>.
- Kovesdi B, Jager B, and Dunai L, "Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs", Journal of Constructional Steel Research, 2016, 383-397. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.002>.
- Leblouba M, Junaid MT, Barakat S, Altoubat S, Maalej M, "Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams", Thin-Walled Struct, 2017, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.01.002>.
- Li Z, Pasternak H, Robra J, "Tragverhalten von Wellstegträgern mit kreisförmigen Öffnungskranz", Bauingenieur, 2021, 96, 114-120. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2021-04-50>.
- Wang J, Li Z, Robra J, Pasternak H, Euler M, "Investigation on Shear Buckling of Corrugated Web Beams with Reinforced Web Openings", 2022. <https://doi.org/10.1002/cepa.1800>.