

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: 01 September 2023; Reviewed: 27 January 2024; Accepted: 30 January 2024

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.

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz https://doi.org/10.22034/CEEJ.2054.58225.2284



Online ISSN: 2717-4077

* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-5499-7438

E-mail addresses hveladi@tabrizu.ac.ir (Hedayat Veladi), academicresearchforjournals@gmail.com (Mohammad Pouria Moosavi Solat Abad), seiedhamidlari97@yahoo.com (Seyyed Hamid Lari).

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 is 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 a 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 6.1×10⁶kg/cm², Poisson's ratio equal to 0.3, and the yield stress of steel equal to 2400kg/cm² 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 Fig. 1.

Model	Label	L (cm)	$t_{w~(cm)}$	<i>a</i> (cm)	<i>b</i> (cm)
	SH1	1000	0.69	30	104
7 and 8-shape	SH2	1000	0.56	30	60
	SH3	1000	0.4	30	34
Angular	SH4	1000	0.74	30	155.86
	SH5	1000	0.663	30	90
Aliguiai	SH6	1000	0.533	30	51.96
	SH8	1000	0.4	30	30

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

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

Model	Label	L (cm)	$t_{w~(cm)}$	<i>a</i> (cm)	<i>b</i> (cm)
Simple	SH7	1000	0.6	-	-
Triangular	SH9	1000	0.725	155	30
TTanyulai	SH10	1000	0.62	90	30
Sinusoidal	SH11	1000	0.65	25	25
Sindsordar	SH12	1000	0.45	12.5	12.5



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_w) 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. (Fig. (2-a))

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 (Fig. (2-b)). 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.

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

 3 هدایت ولادی $^{1^{*}}$ ، محمّدپوریا موسوی صولتآباد 2 ، سیّدحمید لاری

¹ دانشیار گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز ² کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز ³ کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دريافت: 1402/6/10، بازنگری: 1402/11/7، پذيرش: 1402/11/10، نشر آنلاين: 1402/11/30

چکیدہ

الشكا يزبز

تیر - ورقها جزو عناصر باربر اصلی سازههای بزرگی نظیر پلها میباشند که بهجهت نوع کاربردشان باید ویژگیهای هندسی و فیزیکی لازم را از لحاظ سختی و عدم کمانش احراز نمایند. در تیر - ورقهای عادی، طراحی جان مسطح بههمراه سخت کنندههای افقی و قائم صورت می گیرد، اما امروزه مزایای طراحی با ورق موجدار جان بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تیر - ورقهای با جان موجدار با حذف سخت کنندههای افقی و قائم و همچنین کاهش ضخامت جان، موجب کاهش چشمگیر وزن و اجرای ساده در سازههای ساختمانی و پلها شده است. هدف از این مطالعه، مقایسه مقاومت تیر -ورقهای با جان موجدار و مسطح با درنظر گرفتن اثر اندرکنش نیروی برشی و لنگر خمشی بهازای انواع شکل جان خواهد بود. در ابتدای این پژوهش، رفتار تیر - ورقهای موجدار شامل رفتار برشی، خمشی و ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته، پس از آن جهت صحتسنجی مدلهای عددی، از مدل آزمایشگاهی رفتار تیر - ورقهای موجدار شامل رفتار برشی، خمشی و ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته، پس از آن جهت صحتسنجی مدلهای عددی، از مدل آزمایشگاهی رفتار تیر - ورقهای موجدار شامل رفتار برشی، خمشی و ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته، پس از آن جهت صحتسنجی مدلهای عددی، از مدل آزمایشگاهی میار تیر - ورقهای موجدار شامل رفتار برشی، خمشی و ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته، پس از آن جهت صحتسنجی مدلهای عددی، از مدل آزمایشگاهی معاومت این نوع از تیر - ورقها به مورت یک دهانه 12 نمونه تیر - ورق با جان ساده، 7 و 8ای، ذوزنقهای، مثلثی، سینوسی تحت بار گذاری مقاومت این نوع از تیر - ورقها به صورت یک دهانه و دودهانه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در مطالعه اخیر، حجم فولاد مصرفی در تمام نمونه ها ثابت مقاومت این نوع از تیر - ورقها به صورت یک دهانه و دودهانه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در مطالعه اخیر، حجم فولاد مصرفی در تمام نمونه ها ثابت و نوع اعوجاج، فاصله اعوجاج و ضخامت جان تیر - ورقها متغیر می اشند که با مطالعه و بررسی تمامی مدل های عددی، بهینه ترین حالت از بین آنها ارائه و نوع اعوجاج، فاصله اعوجاج و ضخامت جان تیر - ورقها معنیر می واشند که با مطالعه و بررسی تمامی مدل های عددی، بهینه ترین حالت از بین آن ها ارائه و نوع اعوجاج، فاصله اعوجاج و ضخامت جان تیر - ورقهای با جان موجوار محسوسی افزایش داده، همچنین متغیرهای موج

کلیدواژهها: تیر - ورق، جان موجدار، اندر کنش نیروی برشی و خمشی، بارگذاری گسترده.

1- مقدمه

امروزه کاربرد صفحات موجدار در جان تیرهای سازههای ساختمانی و پل بهصورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است. وجود جان موجدار در پلها، علاوهبر جنبه سازهای باعث ایجاد جلوههای زیبای معماری نیز میشود. با موجدار کردن جان، سختی خمشی تیر بهمیزان زیادی افزایش مییابد (Chan و همکاران، 2002).

اساساً یک پل پیش تنیده با تیرهای فولادی موجدار در عرشه، کم هزینه ر از یک پل پیش تنیده معمولی با عرشه کاملاً بتنی خواهد بود. با قراردادن تیرهای موجدار قابلیت تحمل تلاشهای

خمشی بهمیزان محسوسی افزایش مییابد. همچنین این تیرها تأثیر بسزایی در کاهش وزن عرشه نیز دارند، بهطوریکه با قرار دادن تیرهای فولادی در عرشه، وزن آن بهمیزان20 تا 30 درصد کاهش مییابد. صفحات فولادی موجدار با استفاده از پرسهای پیشرفته صنعتی تولید شده و بهصورت پیشساخته، بهراحتی در پلها و سازههای ساختمانی اجرا میشوند. همچنین با توجه به اثر آکاردئونی، جان این تیر- ورقها، سختی قابل توجهی در برابر نیروهای محوری نداشته که موجب اقتصادی تر شدن پل با دهانه-های زیاد میشود. مزیت اساسی دیگر این نوع صفحات، افزایش مناسب سختی خارج از صفحه جان تیر بدون حضور سختکنندهها

> ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 4077-2717 * نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 3392389-041

https://doi.org/10.22034/ceej.2024.58225.2284

* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-5499-7438

آدرس ایمیل: hveladi@tabrizu.ac.ir (ه. ولادی)، academicresearchforjournals@gmail.com (م. پ. موسوی صولتآباد)، seiedhamidlari97@yahoo.com (س.ح. لاری).

است. تیرهای با جان موجدار با حذف سخت کنندهها، علاوه بر کاهش وزن سازه بهطور محسوس، در هزینه و وقت مورد نیاز جهت عملیات جوشکاری صرفجویی کرده، همچنین خستگی تیر-ورق ها ناشی از عملیات جوشکاری را بهمیزان بسیار محسوسی کاهش میدهد (Sherman و Fisher، 1971). این موضوع میتواند در سازههایی مانند پلهای ترکیبی که در معرض بارگذاری و باربرداریهای متوالی قرار دارند، تأثیر بسوایی بگذارد (EN1993-1-5).

در تیر- ورقهای با جان موجدار، مقاومت خمشی توسط بالهای تیر ایجاد شده و جان موجدار مشارکت قابل توجهی در آن ندارد، اما ظرفیت برشی تیر را بهمیزان بالایی تأمین میکند (Elgaaly، 1998).

خرابی جان تیر در اثر تسلیم فولاد، کمانش و یا اندرکنشی از این دو پدیده ایجاد می گردد (Alinia و همکاران، 2009). همچنین پیچش جانبی و کمانش محلی بال نیز بهعنوان معیارهای مهم دیگر خرابی در این نوع تیرها در نظر گرفته شده است (Graciano و Casanova).

تحقیقات صورت گرفته اخیر بر روی سختی برشی غیرخطی شامل سختی الاستوپلاستیک و سختی هندسی تیر با جان موجدار نشان داد که سختی برشی این تیر بیش از 10 برابر سختی برشی تیر بتنی معادل هست که باعث کاهش 10 درصدی ارتفاع عرشه نیز میشود. از مزایای دیگر این نوع از تیر- ورقها سازگاری بیشتر آنها با محیط زیست است به طوری که میزان تولید گاز دی اکسید کربن یک پل پیش تنیده با تیر- ورق موجدار در مقایسه با پلهای پیش تنیده با عرشه بتنی و فولادی به میزان چشمگیری کاهش می یابد.

تحقیقات انجام شده در سوئد امکان استفاده گسترده از تیرهای باجان موجدار را در صنعت ساختمانسازی ایجاد کرد. از اواسط دهه 70 میلادی تیرهای با جان موجدار در بازار سوئد جهت استفاده در اجرای دهانههای سقف کوچک و متوسط بهصورت تیرهای با ارتفاع ثابت و متغیر، بهمیزان بسیار زیادی مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از این تیرها مخصوصاً در نواحی صنعتی معمول بود (Sause و همکاران، 2003).

در دهه 90 میلادی دولت فرانسه تحقیقاتی جهت استفاده از تیرهای با جان موجدار در طراحی پلها انجام داد که در نهایت باعث اجرای چهار پل توسط شرکت برنارد¹ گردید. اجرای پلهای مورد نظر بدون مشکلات اجرایی و فنی اساسی انجام شد و بهعنوان مثالهای اجرایی موفق در این حوزه محسوب می شوند (Kovesdi و همکاران، 2016).

مقاومت برشی تیرهای با جان موجدار، که بهعنوان بحرانی ترین شرایط بارگذاری این تیرها محسوب می شود، موضوع مطالعه محققان زیادی بوده است (Abbas و همکاران، 2006). در سال 1969، رفتار کمانشی الاستیک ورقهای موجدار فلزی توسط Easley و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه یک روش تقریبی بر اساس تئوری صفحات غیرهمگن برای تحلیل ورقهای موجدار ارائه گردید. مطالعات انجام شده در حوزه ورق -های موجدار، عموماً منجربه ارائه ضرایب مناسب جهت تخمین سختی و مقاومت برشی شده است (Ibrahim و همکاران، 2006).

Bryan و همکاران (1969)، 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.

Korashy و همکاران (1979) در تحقیقیاتی تحت اثر بارهای چرخهای به بررسی آزمایشگاهی تیرهای عادی دارای سخت کننده و تیرهای باجان موجدار پرداختند. نتایج آن بدینصورت ارائه شد که مقاومت خستگی تیرهای با جان موجدار تحت بارهای فشاری در حدود 25 درصد بیشتر از تیرهای با جان معمولی بوده، همچنین خرابی در تیرهای دارای سخت کننده، با پارگی بال کششی همراه بوده است.

Elgaaly و همکاران در سالهای 1997 و 1998 به بررسی رفتار و مدهای خرابی تیرهای با جان موجدار تحت تحلیل غیرخطی استاتیکی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح و هندسی پرداختند. در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از نرمافزار ABAQUS به بررسی عددی رفتار ورقهای موجدار پرداخته و با نتایج آزمایشهای تجربی مقایسه شود. در این مطالعه مدهای نتایج آزمایشگاهی آزمایشگاهی داشتند. نتایج تحلیلی نشان داد که در این نمونهها، تسلیم در بالها با کمانش عمودی تحت فشار جان همراه بوده است (2023). و همکاران، 2023).

پس از آن مطالعات و تحقیقات بسیار اندکی توسط Moon و همکاران، (2009)؛ Nguyen و همکاران، (2010)؛ Larsson و Persson، (2013)؛ Ibrahim، (2014)؛ Lopez و همکاران، (2017) بر روی رفتار کمانشی محلی و کلی الاستیک تیـر-ورقهای با جان موجدار با استفاده از روش المان محدود انجام شده است.

و Robra و Krasotin در سال 2019، مقاومت تیر- ورقهای با جان موجدار، تقویت شده با اشکال توخالی دایرهای و مربعی را جهت تقویت جان مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که سختکنندههای دایرهای باعث بهبود عملکرد برشی جان موجدار

^{1.} Bernard Construction Company

خواهد شد. همچنین ضخامت دیواره سخت کننده ها تأثیر بسزایی را بر رفتار برشی آنها خواهد گذاشت. پس از آن در سال 2021 Lie و همکاران، با استفاده از تحلیل غیرخطی هندسی و با در نظر گرفتن غیرخطی بودن خصوصیات مواد، بهروش عددی دریافتند که نقصهای محلی تأثیر چشمگیری بر روی تحلیل المان محدود نمونه ا خواهند گذاشت (MohammadPoor و Mohaddesi). 2013. همچنین با افزایش ضخامت دیواره سخت کننده های دایره ای تأثیر آن ها بیشتر خواهد شد (Wang و همکاران، 2022).

یکی از مشکلاتی که بشر دائما در استفاده از تیرهای با جان نازک با آن روبرو بوده، کمانش جان نازک تیر- ورقهای فولادی است (Elgaaly و همکاران، 1996). بنابراین تعیین مقاومت جان موجدار این مقاطع از اهمیت بسیار ویژهای برخوردار خواهد بود (Eldib، 2009).

تا به امروز پژوهشهای اندکی در مورد مقاومت جانهای موج-دار تحت اثر بارگذاری گسترده صورت گرفته است (Liew و همكاران، 2006). بر پايه نتايج تجربي و آزمايشگاهي بهدست آمده از گـذشته، در این مقاله 12 نم.ونه تیر- ورق با جان ساده، 7 و 8ای، ذوزنقهای، مثلثی و سینوسی تحت بارگذاری گسترده با استفاده از نرمافزار المان محدود ABAQUS مدلسازی شده، سپس با مقایسه مقاومت این مقاطع، بهترین شکل موج جان از بین مدل -های ارائه شده، بیان می شود. در ادامه، مقاومت این نوع از تیر-ورقها با دو دهانه نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه از نمونه آزمایشگاهی Driver و همکاران (2006) جهت صحتسنجی مدلهای عددی تحت بارگذاری گسترده استفاده شده است. در طول این مطالعه مشاهده شده است که موجدار كردن جان تير - ورقها، مقاومت آنها را بهطور محسوسي افزايش داده، رفتار تیر- ورقهای با جان موجدار یک دهانه متفاوت از تیر-ورقهای با دو دهانه بوده، همچنین شکل اعوجاج و فاصله اعواج تأثير زيادي را بر مقاومت اين نوع از تير- ورقها خواهند داشت.

2- رفتار تیر- ورقهای با جان موجدار 2-1- رفتار برشی

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

2-2- 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 صرفنظر کرد (Kovesdi و همکاران، 2010).

2-3- رفتار ترکیبی تیر- ورقها تحت خمش و برش

در این حالت مقاومت خمشی تیرهای با جان موجدار، تحت تأثیر تنش های 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 خمش های عرضی در جان تیر می گردند (Roberts و Shahabian 2001).

3- صحتسنجی مدل عددی

برای ارزیابی و صحتسنجی مدل المان محدود با استفاده از نرمافزار ABAQUS، از نتایج آزمایشگاهی Driver و همکاران (2006) استفاده شده است. وی دو تیر- ورق G7 و G8 با مشخصات هندسی بهطول دهانه است00mm با ابعاد بال 450mm×50mm و جان 1500mm×6mm که تحت بار متمرکز به فاصله 1000mm از وسط دهانه تیر قرار دارد را مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند (شکل (1)).

این تیر- ورق از دو طرف بر روی تکیه گاههای ساده، همچنین در انتهای دو سمت و زیر بار متمرکز سخت کنندههایی به ضخامت 10mm 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 (2) اعمال می شوند.



شکل 1- مشخصات نمونه آزمایشگاهی Driver و همکاران، (2006)



شکل **2-** بارگذاری نمونه آزمایشگاهی Driver و همکاران (2006)

حال با استفاده از نرمافزار ABAQUS مدل آزمایشگاهی را به -صورت Shell مدلسازی مینماییم (شکل (3)). مدول الاستیسیته فولاد برابر 10⁶kg/cm² هریب پواسون برابر 0/3 و تنش تسلیم برابر 4850kg/cm² در نظر گرفته شده است. در تحلیل و آنالیز مدل، فرض بر رفتار غیرخطی مصالح و هندسه نمونه شده است.

با مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی نمونه آزمایشگاهی G8 با مدل المان محدود توسط نرمافزار میتوان دریافت که مقدار حداکثر مقاومت برای نمونه آزمایشگاهی 364/7ton، همچنین این مقدار برای مدل المان محدود برابر 350ton خواهد بود (شکل (4) و (5)). باتوجه به مقادیر ذکر شده خطای محاسباتی برابر 4/2%. که مقداری ناچیز است که میتوان از آن صرفنظر نمود. ممکن است اینخطا ناشی از نقص اولیه نمونه باشد (Maiorana و همکاران، 2009).



شکل 3- مدل عددی المان محدود: الف) نمونه مدلسازی شده توسط نرمافزار، ب) توزیع تنش در مدل المان محدود



شکل 4- منحنی نیرو- جابهجایی نمونه آزمایشگاهی G8



شكل 5- منحنى نيرو- جابهجايي مدل المان محدود G8

4- مطالعه مدلهای عددی

1-4- خصوصيات هندسي مدلهاي المان محدود

در این پژوهش، 12 نمونه تیر- ورق با یک دهانه و دو دهانه بهطور مشابه، با جان ساده، 7 و 8ای، ذوزنقهای، مثلثی، سینوسی تحت بارگذاری گسترده با استفاده از نرمافزار المان محدود ABAQUS مدلسازی شده، سپس با مقایسه مقاومت آنها بهترین شکل موج جان ارائه میشود. بدینترتیب، 12 مدل عددی تیر-ورق با یک دهانه و همچنین 12 مدل مشابه با دو دهانه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در تیر- ورقهای با یک دهانه هر مدل دارای دو تکیهگاه گیردار در دو انتهای خود، همچنین در انتهای خود و یک تکیهگاه مفصلی در وسط دهانه تکیهگاه می-ایشند. بار اعمالی بر روی دو نوع تیر- ورق بهصورت گسترده بر باشند. بار اعمالی بر روی دو نوع تیر- ورق بهصورت گسترده بر مدل های ما دو دهانه، هر نمونه دارای دو تکیهگاه گیردار در دو وی بال فوقانی اعمال میشود و تا خرابی نهایی ادامه دارد. در شکل (6) میتوان مقطع هندسه موج مدلهای عددی با یک دهانه و دو دهانه را مشاهده نمود.

در این مطالعه، طول دهانه تیر- ورقهای با یک دهانه و دو دهانه بهترتیب 10m و 20m در نظر گرفته شده است. نوع فولاد در جان و بال تیر- ورقها یکسان بوده است. همچنین حجم فولاد مصرفی در تمامی مدلها یکسان و با توجه به آن، ضخامت جان مدلهای عددی تغییر مییابد. ابعاد موج جان و مشخصات هندسی مدلهای تیر- ورق با جان ساده و موجدار یک دهانه را میتوان در جداول (1) و (2) مشاهده نمود. همچنین نمونهها مدلسازی

شده با استفاده از نرمافزار المان محدود ABAQUS در شکلهای (8) و (9) و (10) نشان داده شده است. برای مدلسازی تیر-ورقهای با دو دهانه نیز از مشخصات هندسی مشابه تیر- ورقهای یک دهانه استفاده شده است.



شکل 6- جزئیات جان موجدار تیر- ورقهای با یک دهانه و دو دهانه: الف) 7 و 8ای، ب) ذوزنقهای، ج) مثلثی، د) سینوسی

جدول 1- خصوصیات هندسی تیر - ورقهای با جان موجدار 7 و 8ای ذوزنقهای

			-		
<i>b</i> (cm)	<i>a</i> (cm)	t _w (cm)	<i>L</i> (cm)	نمونهها	مدل
104	30	0/69	1000	SH1	
60	30	0/56	1000	SH2	7 و 8 ای
34	30	0/4	1000	SH3	
155/86	30	0/74	1000	SH4	
90	30	0/663	1000	SH5	ذوزنقهاي
51/96	30	0/533	1000	SH6	
30	30	0/4	1000	SH8	

جدول 2- خصوصیات هندسی تیر- ورقهای با جان ساده،

سىنەسە	٩	مثلثي	4	موجدار
	2	6	۰.	J-67

		-	-	-	
مدل	نمونهها	<i>L</i> (cm)	t _w (cm)	<i>a</i> (cm)	<i>b</i> (cm)
سادہ	SH7	1000	0/6	-	-
مام	SH9	1000	0/725	155	30
مىلىي	SH10	1000	0/62	90	30
	SH11	1000	0/65	25	25
سيىوسى	SH12	1000	0/45	12/5	12/5

2-4- خصوصيات مواد مدلهاى تير- ورق باجان موجدار

در آنالیز مدلها، خصوصیات فولاد مصرفی از جمله مدول الاستیسیته برابر 6/1×10⁶kg/cm²، ضریب پواسون برابر 0/3 و تنش تسلیم فولاد برابر 2400kg/cm² در نظر گرفته شده است. رابطه بین تنش و کرنش فولاد را میتوان در شکل (7) مشاهده

نمود. همچنین از تنش تسلیم Von Mises برای مدلسازی نمونهها استفاده شده است.

4-3- مدلسازی المان محدود

برای مدلسازی و تحلیل، از نرمافزار ABAQUS استفاده شده که با بهکارگیری از روش المان محدود و تحلیل Static Riks به حل مسائل عددی می پردازد. همچنین فرض بر رفتار غیرخطی مصالح و هندسه مدل ها شده است (Ghanim و همکاران، 2021).





شكل 7- نمودار تنش- كرنش فولاد مصرفي

شکل 8- نمونههای مدلسازی شده تیر - ورق با Abaqus: الف) SH1 ، ب) SH2 ، ج) SH4





(ب) شکل 10- نمونههای مدلسازی شده تیر - ورق با Abaqus: الف) SH12 ، ب) SH12

· in

4-4- نحوه بارگذاری و شرایط مرزی

در این مقاله، کلیه مدلها، تحت بارگذاری گسترده بر روی بال فوقانی قراردارند. این بارگذاری با استفاده از روش اصلاح شده RIKS اعمال شده است. در دو انتهای تیر- ورقهای با یک دهانه، تکیهگاه گیردار و در تیر- ورقهای با دو دهانه، علاوه برتکیهگاه

گیردار در انتهای دو سمت، تکیه گاه مفصلی در وسط دهانه تعبیه شده است. همچنین، سخت کنندههایی به ضخامت 10mm در انتهای دو سمت و وسط دهانه تیر- ورق ها جهت انتقال بار از بال به جان و جلوگیری از لهیدگی قرار داده شده است. نوع تکیه گاهها و بارگذاری تیر- ورق ها را می توان در شکل (11) مشاهده نمود.



شکل 11- شرایط تکیهگاهی و بارگذاری تیر - ورق با دو دهانه

5- نتايج و تفسير دادهها

5-1- بررسی رفتار مدلهای 7 و 8ای تحت بارگذاری گسترده

همان طور که در نمودار شکل (12) مشخص است، رفتار مدل -های 7 و 8ای تحت تأثیر ضخامت جان و فاصله موجها از هم بوده، به طوری که برای ارتفاع موج برابر (۵)، کاهش ضخامت جان (*w*) و کاهش فاصله موجها از یکدیگر (b) موجب کاهش مقاومت تیر -ورقها تحت بارگذاری گسترده شده است.



شکل 12- منحنی نیرو- جابهجایی مدلهای 7 و 8ای SH1، SH3 ،SH2

5-2- بررسی رفتار مدلهای ذوزنقهای تحتبارگذاری گسترده

در تیر- ورقهای ذوزنقهای تحت بار گسترده، با چشمپوشی از نتایج SH4، میتوان همانند تیر- ورقهای 7 و 8 به این نتیجه رسید که کاهش ضخامت جان و فاصله اعوجاجها باعث کاهش مقاومت حداکثر در سه مدل SH5، SH5 و SH8 شده است (شکل (13)) در شکلهای (14) و (15) نحوه خرابی نمونههای مدل-سازیشده با استفاده از نرمافزار Abaqus تحت بارگذاری گسترده را میتوان مشاهده نمود.





3-5- بررسی رفتار مدل با جان ساده تحت بارگذاری گسترده

رفتار مدل تیر- ورق با جان ساده مطابق نمودار زیر است (شکل (16)). همچنین میتوان نحوه خرابی این نوع از تیر- ورق را تحت بار گسترده در شکل (19) مشاهده نمود.



شکل 16- منحنی نیرو- جابهجایی مدل با جان ساده (SH7)

5-4- بررسی رفتار مدلهای مثلثی تحت بارگذاری گسترده

همان گونه که مشاهده مینمایید، تیر - ورقهای موجدار با جان مثلثی مطابق نمودار شکل (17) تحت اثر بارگذاری گسترده در فواصل یکسان موج (b)، کاهش ارتفاع موج (a) و ضخامت جان (tw) در آنها، تأثیر چندانی بر روی حداکثر مقاومت تیر -ورقها نداشته، تنها شکلپذیری و تغییرشکل کاهش پیدا کرده است.



SH8 .SH6 .SH5 .SH4



شکل 14- خرابی نمونههای مدلسازیشده 7 و 8ای با Abaqus: (ی ج) SH3 (ج) SH2 (الف) SH1 (الف)





شکل 17- منحنی نیرو - جابهجایی مدل مثلثی SH9 و SH10

5-5- بررسی رفتار مدلهای سینوسی تحت بارگذاری گسترده

بدینترتیب در نمودار شکل (18) نیز مشخص است که در مدلهای تیر- ورق با جان سینوسی تحت اثر بارگذاری گسترده، با ارتفاع موج یکسان (a) و فواصل برابر موج (d)، کاهش ضخامت جان موجب کاهش چشمگیری در حداکثر مقاومت تیر- ورقها با جان سینوسی شده است. همچنین افزایش شکل پذیری و تغییر شکل مدلها را بههمراه داشته است.





همان گونه که تا این بخش از مقاله بحث شد، متغیرهای موج، شامل ارتفاع و فواصل موج از یکدیگر بر روی مقاومت تیر- ورقهای موجدار با اشکال مختلف تأثیر میگذارد. همچنین ضخامت جان موجدار تأثیر چشمگیری را بر روی حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیر- ورق را دارد. حال میخواهیم تأثیر اشکال مختلف موج در جان تیر- ورقهای با یک دهانه و دو دهانه تحت اثر بارگذاری گسترده را بر روی مقاومت نهایی مدلهای المان محدود مورد

مطالعه و ارزیابی قرار دهیم. در شکلهای (19) و (20) نحوه خرابی نمـونههای تیر- ورق با جان ساده، مثلثـی و سینـوسی تحت بارگذاری گسترده که با نرمافزار المان محدود Abaqus مدلسازی شدهاند را می توان مشاهده نمود.



ص) شکل **19- خرابی نمونههای ساده و مثلثی مدلسازی شده با** Abaqus: الف) SH7، ب) SH3، ج) SH10



شکل **20-** خرابی نمونههای مدلسازی شده سینوسی با SH12 (ب) SH12. (ب) SH12

5-6- بررسی رفتار و مقاومت مدلهای عددی با یک دهانه تحت بارگذاری گسترده

با بررسی نمودارهای نیرو- جابهجایی و مطالعه مقاومت و تغییر شکل کلیه مدلهای عددی تیر- ورق با جان ساده و موجدار (7 و 8ای، ذوزنقهای، مثلثی و سینوسی) با یک دهانه تحت اثر بارگذاری گسترده، می توان فهمید که مدل های SH7 ، SH1 و SH9 دارای حداکثر مقاومت بین نمونهها بوده که نشاندهنده تأثیر بسیار زیاد ارتفاع موج (a)، فاصله موجها از یکدیگر (b) و ضخامت جان (۲٫۷) است به طوری که تیر - ورق های با چین بزرگ و ضخامت زیاد بیشترین تحمل را در برابر بارهای وارده از خود نشان میدهند. همچنین با بررسی شکل موج مدلهای تیر- ورق میتوان به این نتیجه رسیدکه از بین کلیه مدلها، تیر- ورق با جان 7 و 8ای و مثلثی بهترین و بهینهترین نوع شکل موج تحت اثر بار گسترده هستند (شکل (21)). علاوه براین، مدلهای SH9 و SH12 دارای بیشترین تغییر شکل در بین نمونههای عددی تحت بارگذاری گسترده هستند که این موضوع نشاندهنده شکل پذیری مطلوب مدلهای تیر- ورق با جان مثلثی و سینوسی خواهد بود (شکل .((21)



شکل 21- منحنی نیرو جابهجایی 12 مدل عددی با یک دهانه

5-7- بررسی رفتار و مقاومت مدلهای عددی با دو دهانه تحت بارگذاری گسترده

تحت همان شرایط و بارگذاری، مطالعه نمودارهای نیرو-جابهجایی و همچنین بررسی مقاومت و تغییر شکل کلیه مدلهای عددی تیر- ورق با جان ساده و موجدار (7 و 8 ای، ذوزنقهای، مثلثی و سینوسی) با دو دهانه تحت اثر بارگذاری گسترده، نشان میدهد که بهترین و بهینهترین شکل جان، تیر- ورقهای با جان ساده و موجدار با جان ذوزنقهای میباشند که حداکثر مقاومت را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان میدهند (شکل (22)). همچنین ضخامت جان در این نوع از تیر- ورقها تأثیر بیشتری در مقایسه با دو متغیر موج (a, b) دارد.



شکل 22- منحنی نیرو- جابهجایی 12 مدل عددی با دو دهانه

6- نتيجەگىرى

مطالعه تیر- ورقهای موجدار با یک دهانه 10 متری تحت اثر بارگذاری گسترده نشان میدهد که:

 در تیر- ورقهای با جان موجدار 7 و 8ای، ضخامت جان (*tw*) و فواصل موج (*d*) تأثیر بسیار زیادی بر روی مقاومت آنها داشته بهطوری که با کاهش ضخامت جان و فاصله موجها، حداکثر مقاومت تیر- ورقها کاهش مییابد. همچنین رفتار تیر- ورقهای ذوزنقهای مشابه تیر- ورقهای 7 و 8ای است.

2) در مورد تیر- ورقهای با جان مثلثی، ضخامت جان و متغیرهای موج تأثیر چندانی در حداکثر مقاومت تیر- ورقها ندارد و تنها با کاهش متغیرها شکلپذیری کاهش مییابد.

3) در تیر- ورقهای با جان موجدار سینوسی، ضخامت جان تأثیر چشمگیری در مقاومت نمونهها دارد بهطوری که کاهش ضخامت جان باعث کاهش بسیار چشمگیر حداکثر مقاومت تیر-ورقها می شود.

4) با آنالیز کلیه نمونهها، میتوان فهمید که شکل جان مدل -های 7 و 8ای و مثلثی، حداکثر مقاومت (240000kgf) را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان میدهند (در حدود بیش از 20 برابر نمونههای تیر - ورق با جان سینوسی).

5) مطالعه مدلهای عددی نشان میدهد که تیر - ورقهای با چین بزرگ مانند نمونههای SH1 و SH9 بیش از تمامی نمونهها، بار وارده را تحمل کرده، همچنین هرچه چینها زاویهدارتر بوده، مقاومت بیشتری را متحمل شدهاند. میتوان این گونه نتیجه گیری کرد که چینها با زوایای بزرگتر (90-20) 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 بهدلیل ثابت بودن وزن نهایی متفاوت بوده است. مطالعه تیر - ورقهای موجدار با دو دهانه به طول کلی 20 متر تحت اثر بارگذاری گسترده نشان میدهد که:

1) بهترین شکل جان از بین مدلها، تحت اثر بارگذاری گسترده، مدلهای با جان ساده و ذوزنقهای شکل هستند که 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 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
- Ghannin G, waer S, Baldawi, Annnar A, A Review of composite steel plate girders with corrugated webs", Engineering and Technology Journal, 2021, 39 (12), 1927-1938. 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 SA, "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 SA, El-Dakhakhni WW, 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)

- Korashy M, Varga J, "Comparative investigation of 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, 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 KM, Kitipornchai S, Peng LX, "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

حداکثر مقاومت (500000kgf) را در برابر بارهای اعمالی از خود نشان میدهند (درحدود بیش از 4 برابر نمونههای تیر- ورق با جان سینوسی).

2) ضخامت جان تأثیر به سزایی در مقاومت تیر- ورقها دارد به طوری که مدلهای SH5 و SH7 با حداقل ضخامت omm. حداکثر مقاومت را در بین مدلهای مورد مطالعه دارند.

7- مراجع

- Mohaddesi A, MohammadPoor B, "Investigation of the bending and shear behavior of I-shaped steel beams with corrugated webs", 4th Conference of steel and structure, 2013.
- ABAQUS Standard User's Manual. The Abaqus Software is a product of Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA Dassault Systemes, USA.
- Abbas HH, Sause R, Driver RG, "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).
- 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 ER, Jackson P, "The shear behaviour of corrugated steel sheeting", Thin-Walled Steel Structures, 1969, 258-274.
- Chan CL, Khalid YA, Sahari BB, Hamouda AMS, "Finite element analysis of corrugated web beams under bending", Journal of Constructional Steel Research, 2002, 1391-1406.

https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X

- Driver RG, Abbas HH, Sause R, "Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders", Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (2), 195-203. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006) 132:2(195)
- Easley JT, McFarland DE, "Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms", Journal of Struct, 1969, 95 (7), 1497-1516. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002313
- Eldib MEA, "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

- Elgaaly M, Hamilton RW, 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)
- 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)

Lopes GC, Carlos C, Real 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 JW, Choi BH, Lee HE, "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 ND, Kim SN, Han SR, Kang YJ, "Elastic lateraltorsional 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 TM, 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 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 HH, Wassef WG, Driver RG, Elgaaly M, "Corrugated web girder shape and 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