

Shear failure mechanism of steel plate I-girders with a tubular compression flange

Abbas Ghadami Baderloo^{1*}, Mohammad Payband², Jafar Bakhtyari³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

3- Graduate M.Sc., Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

This study investigates the shear failure mode in steel plate I-girders with a tubular compression flange (SPTCF) using numerical simulations in ABAQUS software. To this end, a modeling technique was first developed to analyze the behavior of SPTCF, and its results were validated against available experimental and numerical data. Subsequently, a parametric study was conducted on 75 models, considering various geometric parameters, including beam length, web thickness and height, as well as flange thickness and height. The elastic buckling analysis revealed that the out-of-plane stiffness of the flange is identical in girders with flat and tubular flanges, leading to similar web deformation patterns at the onset of elastic shear buckling. However, in girders with an aspect ratio of 0.5, the elastic buckling behavior differs significantly, and the influence of tubular flange stiffness on web panel deformations is distinctly observed. Furthermore, the nonlinear analysis results indicated that in SPTCF with slender webs, the formation of tensile yielding bands in the web plate is clearly pronounced, allowing for the utilization of post-buckling strength similar to conventional I-shaped girders. However, the failure mode of these girders significantly differs from conventional plate girders, and classical models, such as the Basler model, are not applicable for their design. As the primary outcome of this research, a set of recommendations is provided for developing shear design equations for SPTCF, which can serve as a basis for the optimized design of such structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 March 2024

Revise Date: 03 July 2025

Accept Date: 20 July 2025

Keywords:

Girder
Tubular flange
Failure mode
Buckling mode
Slender web
Shear failure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.491139.3587

*Corresponding author: Abbas Ghadami Baderloo.

Email address: Abbasghadami@azaruniv.ac.ir

مکانیزم خرابی برشی تیرورق‌های I-شکل فولادی با بال فشاری جعبه‌ای

عباس قدمی بدرلو^{۱*}، محمد پای بند^۲، جعفر بختیاری^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

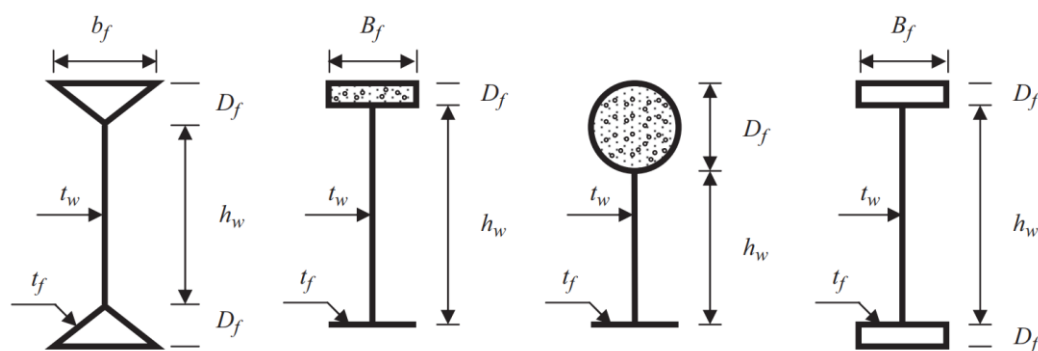
مقاله حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار *ABAQUS* به بررسی مد خرابی برشی در تیرهای I-شکل با بال فشاری جعبه‌ای می‌پردازد. در این راستا، ابتدا یک تکنیک مدل‌سازی جهت بررسی رفتار تیرورق‌های با بال جعبه‌ای توسعه داده شده و سپس نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی و عددی موجود صحت‌سنجی گردید. در ادامه، یک مطالعه پارامتریک شامل ۷۵ پانل برشی با در نظر گرفتن متغیرهای هندسی مختلف، از جمله طول تیر، ضخامت و ارتفاع جان، و همچنین ضخامت و ارتفاع بال انجام شد. نتایج تحلیل کماتش الاستیک نشان داد که سختی خارج از صفحه بال تیرورق در تیرهای با بال تخت و بال جعبه‌ای یکسان است، که این امر موجب توزیع مشابه تغییرشکل‌های جان در لحظه وقوع کماتش برشی الاستیک می‌شود. با این حال، در تیرهای با نسبت ابعادی ۰/۵، رفتار کماتش الاستیک به‌طور چشمگیری متفاوت بوده و تأثیر سختی بال جعبه‌ای در تغییرشکل‌های پانل جان به‌وضوح قابل مشاهده است. علاوه بر این، نتایج تحلیل غیرخطی نشان داد که در تیرهای I-شکل با بال فشاری جعبه‌ای و جان لاغر، تشکیل باند تسلیم کششی در ورق جان کاملاً مشهود بوده و مشابه تیرهای I-شکل متداول، امکان بهره‌گیری از ظرفیت پس کماتش ورق جان وجود دارد. با این حال، مد خرابی این تیرورق‌ها به‌طور قابل توجهی با تیرورق‌های I-شکل رایج متفاوت است و مدل‌های کلاسیکی نظیر مدل باسلر برای طراحی این نوع تیرها قابل استفاده نیستند. به عنوان نتیجه اصلی این پژوهش، مجموعه‌ای از توصیه‌ها جهت توسعه روابط طراحی برشی برای تیرهای I-شکل با بال فشاری جعبه‌ای ارائه شده است که می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی بهینه این سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بال جعبه‌ای، مد خرابی، کماتش، جان لاغر، خرابی برشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.491139.3587					
10.22065/jsce.2025.491139.3587	۱۴۰۴/۰۷/۳۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۱۲	۱۴۰۳/۱۲/۱۱
عباس قدمی بدرلو Abbasghadami@azaruniv.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

تیرورق‌ها به‌عنوان یکی از اجزای مهم در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ مانند ساختمان‌های پرتراکم و پل‌ها به کار می‌روند. در یک تیرورق، اجزای اصلی آن شامل بال‌ها و جان، وظایف مشخصی دارند و به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که بارهای وارد بر سازه را تحمل کنند. ورق جان، علاوه بر ایجاد پیوند میان بال‌ها، نقش کلیدی در تأمین مقاومت خمشی و برشی سازه ایفا می‌کند [۱]. در طراحی سازه‌های ساختمانی متداول، هنگامی که بار متمرکزی بر تیرورق وارد نشود، طراحی بر اساس ظرفیت خمشی عضو صورت می‌گیرد. از این رو، برای کاهش هزینه‌ها و وزن سازه، استفاده از تیرورق‌هایی با جان لاغر، ارتفاع زیاد، و بدون سخت‌کننده‌های عرضی ترجیح داده می‌شود [۲]. این رویکرد طراحی، احتمال وقوع خرابی‌هایی نظیر کمانش جانبی-پیچشی و کمانش برشی الاستیک را افزایش می‌دهد. به منظور رفع این چالش‌ها، در سال‌های اخیر، استفاده از تیرورق‌های با مقطع بال جعبه‌ای پیشنهاد شده است. نمونه‌هایی از تیرورق‌های با بال جعبه‌ای در شکل ۱ نمایش داده شده است [۳]. در این شکل، b_f عرض بال، D_f ارتفاع بال جعبه‌ای، h_w و t_w به ترتیب ارتفاع و ضخامت جان و t_f ضخامت ورق بال خواهد بود. این نوع تیرورق‌ها نسبت به نمونه‌های با مقطع I-شکل، از مزایای متعددی برخوردارند، از جمله مقاومت بالاتر در برابر کمانش موضعی ورق جان، کاهش لاغری کلی تیر، افزایش ظرفیت کمانشی بال فشاری، و بهبود سختی پیچشی. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که تیرهای مذکور در مقایسه با تیرهای I-شکل با وزن مشابه و بال‌های مسطح، عملکرد بهتری ارائه دهند.



شکل ۱: تیرورق‌های با بال جعبه‌ای.

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای به منظور بررسی رفتار تیرورق‌های فولادی، به‌ویژه تیرورق‌های با بال جعبه‌ای، انجام شده است [۴-۶]. با این وجود، مطالعات محدودی به بررسی عملکرد این تیرورق‌ها با اجزای لاغر، به‌ویژه با جان لاغر، اختصاص یافته است. از این رو، بررسی عملکرد برشی این نوع تیرورق‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار تیرورق‌ها در دهه‌های گذشته موضوع تحقیقات متعددی بوده که در مقاله مروری حسن و همکاران [۷]، به بخشی از این پژوهش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی اشاره شده است. به دلیل گسترش کاربرد تیرورق‌های با بال جعبه‌ای در صنایع ساختمان و پل‌سازی، این مقاطع به دلیل مزایای منحصر به فردشان مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، رفتار برشی و خمشی این تیرورق‌ها با بال‌های فشاری و کششی جعبه‌ای نیز به طور گسترده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است [۴-۶ و ۸]. یکی از تحقیقات عددی انجام شده توسط حسنین و خاروب^۱ [۸]، به بررسی مقاومت برشی تیرورق‌های با بال جعبه‌ای تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های عرضی اختصاص دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که معادلات طراحی برشی آیین‌نامه اروپا بسیار محافظه‌کارانه هستند. به همین دلیل، روش طراحی اصلاح‌شده‌ای برای پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی این تیرورق‌ها ارائه شد. با این حال، مطالعات بعدی نشان داد که روابط پیشنهادی این محققین برای تیرورق‌های با بال جعبه‌ای فشاری و بال کششی تحت نیز قابل استفاده نمی‌باشند [۳]. از سوی دیگر، تحقیقات محدودی درباره مکانیزم خرابی برشی تیرورق‌های دارای ورق جان لاغر انجام شده است. بدیهی است که به دلیل کاهش امکان وقوع کمانش موضعی در ورق جان این تیرها بدلیل سختی بال جعبه‌ای، روابط طراحی

¹ Hassanein and Kharoob

برشی موجود برای تیورق‌های I-شکل متداول نمی‌تواند برای این نوع تیورق‌ها به‌درستی عمل کند [۲]. لذا، بررسی دقیق‌تر عملکرد برشی تیورق‌های فولادی با بال جعبه‌ای و به‌ویژه دارای جان لاغر، ضروری به نظر می‌رسد. افزایش استفاده از ورق لاغر در طراحی سازه‌ها در سال‌های اخیر نیز اهمیت این موضوع را دوچندان کرده است [۹]. علاوه بر این، محدودیت‌های موجود در دسترسی به نرم‌افزارهای اجزای محدود پیشرفته نظیر ABAQUS و ANSYS، هزینه بالای آزمایش‌های تجربی، و نیاز به روش‌های طراحی ساده و سریع برای ارزیابی مقاومت برشی انواع ورق و تیورق، این ضرورت را تقویت می‌کند. اگرچه آیین‌نامه فولاد آمریکا [۱۰] دستورالعمل‌های جامعی برای پیش‌بینی رفتار برشی پانل‌های جان تیورق‌های I-شکل ارائه داده است، اما در زمینه تیورق‌های با بال جعبه‌ای، به‌ویژه تیورق‌هایی که دارای جان لاغر هستند، راهکاری ارائه نداده است و مطالعات جامعی نیز انجام نشده است.

در سال ۲۰۱۳، حسنین و خاروب^۱ مطالعه‌ای بر روی ظرفیت برشی تیورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای و جان لاغر انجام دادند. هدف از انجام این پژوهش عددی، بررسی تأثیر سخت‌کننده‌ها و هندسه مقطع بر رفتار برشی این نوع تیرها بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که تیورق‌های دارای بال جعبه‌ای عملکرد بهتری در برابر کمانش برشی دارند، زیرا بال جعبه‌ای باعث افزایش سختی پیچشی و کاهش تمرکز تنش در محل اتصال بال و جان می‌شود [۱۱]. حسنین و خاروب^۲ [۳] در بررسی رفتار برشی تیورق‌های فولادی با بال فشاری جعبه‌ای توخالی نشان دادند که این نوع تیورق‌ها، علاوه بر افزایش استحکام برشی، می‌توانند باعث کاهش وزن کلی تیورق‌ها شوند. در پژوهش دیگری، حسنین^۳ [۱۲] به مطالعه تأثیر اندازه و محل بازشوهای جان در رفتار برشی تیورق‌های با بال جعبه‌ای توخالی و همچنین مکانیزم خرابی برشی این تیرها پرداخت. این تحقیق، پارامترهایی نظیر نوع بال، اندازه بال، و لاغری ورق جان را مدنظر قرار داده و راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی بازشوهای جان بر مقاومت برشی ارائه کرد. در سال ۲۰۱۵، تیرهایی با بال پنج‌ضلعی پر شده از بتن به‌منظور بهبود مقاومت خمشی خارج از صفحه تیرهای معمولی پیشنهاد شدند. مقایسه نتایج نشان داد که تیورق‌های پنج‌ضلعی پر شده از بتن، در مقایسه با نمونه‌های توخالی با ابعاد یکسان، دارای اشکال کمانشی مشابه اما مقاومت کمانشی بیشتری هستند. این یافته، نقش بتن پرکننده را در افزایش سختی جانبی بال فشاری برجسته کرد [۱۳]. شاو و همکاران^۴ [۱۴] به‌صورت آزمایشگاهی رفتار تیرهای I-شکل با بال جعبه‌ای مستطیلی پر شده از بتن و جان موج‌دار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این تیورق‌های پیشنهادی دارای سختی پیچشی و خمشی بیشتری هستند و عملکرد بهتری در برابر کمانش کلی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، جان موج‌دار، حتی با وجود سخت‌کننده‌های عرضی یا طولی، به دلیل ضخامت کمتر ورق جان، وزن کمتری نسبت به جان‌های تخت دارد. همچنین، این نوع جان‌ها سختی خمشی خارج از صفحه و سختی برشی بالاتری دارند که باعث افزایش ظرفیت مقاومت در برابر کمانش موضعی و بهبود کارایی جان می‌شود. پیرا و ماهندران^۵ [۱۵] در پژوهش دیگری تیورق‌های فولادی با بال توخالی مستطیلی و جان تخت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که صلبیت پیچشی و هندسه منحصربه‌فرد این تیورق‌ها باعث افزایش قابل توجه ظرفیت خمشی و بهبود عملکرد آن‌ها در سازه‌های با دهانه بلند می‌شود.

دنگ^۶ و همکاران [۱۶] رفتار تیورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای توخالی، جان موج‌دار، و بال کششی تخت را بررسی کردند. این تحقیق اثر عواملی چون ضخامت و ارتفاع جان، نسبت لاغری جان، و نسبت عمق به عرض بال جعبه‌ای را بر عملکرد برشی ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که استفاده از بال جعبه‌ای تأثیر بسزایی در رفتار برشی تیورق‌ها دارد. علاوه بر این، تیورق‌های با جان موج‌دار و بال جعبه‌ای، استحکام پس‌کمانش بیشتری نسبت به نمونه‌های با بال تخت دارند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، جان یک تیورق تحت بارگذاری برش خالص، از نظر تنوری و بدون لحاظ سختی خمشی ورق بال در زاویه ۴۵ درجه دچار کمانش الاستیک می‌شود. شکل ۲(b) مدل باسلر^۷ [۱۷] را نشان می‌دهد که مبنای روابط طراحی برشی موجود در آیین‌نامه فولاد آمریکا است. در این مدل خرابی، پس از کمانش الاستیک ورق جان، کشش مورب در جان رخ داده و منجر به تشکیل یک میدان کششی مشخص با زاویه‌ای در حدود ۴۵

¹ Hassanein and Kharoob

² Hassanein and Kharoob

³ Hassanein

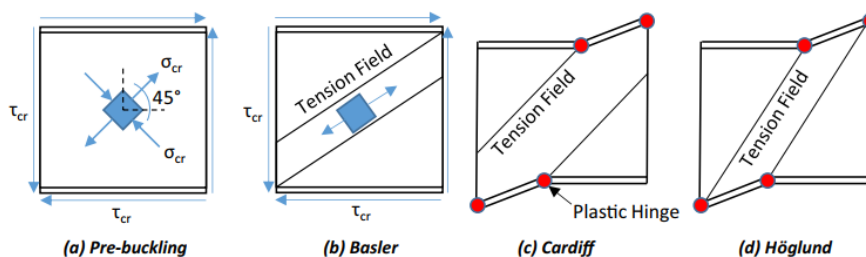
⁴ Shao and Wang

⁵ Perera and Mahendran

⁶ Deng

⁷ Basler

درجه می‌شود. باسلر پیشنهاد می‌کند که سخت‌کننده‌ها باید جزء عمودی تنش‌های مورب را از یک انتهای جان دریافت کرده و آن را به انتهای دیگر منتقل کنند. در این شرایط، بال‌های تیرورق نیز عملکردی مشابه با اعضای خرپایی پیدا می‌کنند [۱۸]. در این مدل، انتهای میدان کششی به سخت‌کننده‌ها متصل شده و سپس به محل اتصال سخت‌کننده و بال ختم می‌شود [۱۹]. در شکل ۲(c)، مدل کاردیف^۱ [۲۰]، را نشان می‌دهد که فرض می‌کند میدان کششی نه تنها به سخت‌کننده‌ها بلکه به بال نیز متصل می‌شود. در این مدل، ظرفیت نهایی پس از کمانش تحت تأثیر ایجاد مفاصل پلاستیک در نقاط اتصال سخت‌کننده به بال و همچنین در خود بال قرار دارد. این فرضیات نقش مهمی در تحلیل رفتار تیرورق‌ها پس از وقوع کمانش ایفا می‌کنند.



شکل ۲: انواع مدل پیشنهاد شده برای تبیین مکانیزم خرابی برشی تیرورق‌های با جان لاغر [۲۱]

در سال ۲۰۲۲، دنگ^۲ و همکاران پژوهشی بر روی عملکرد فشاری موضعی تیرهای I-شکل با جان موج‌دار و بال فشاری مستطیلی پر شده با بتن انجام دادند. این پژوهش با هدف بررسی اثرات جان موج‌دار و بال جعبه‌ای بر رفتار مکانیکی تیرها، از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی بهره برد. نتایج نشان داد که پر کردن بال توخالی با بتن باعث افزایش سختی و مقاومت فشاری موضعی تیر شده و توزیع تنش در مقطع را بهبود می‌بخشد. همچنین مشخص شد که جان موج‌دار نقش مهمی در تأخیر کمانش موضعی ایفا کرده و به بهبود پایداری کلی سازه کمک می‌کند [۲۲]. در سال ۲۰۲۴، دنگ و همکاران به بررسی تحلیل الاستیک تیرهای I-شکل با بال جعبه‌ای و جان موج‌دار پرداختند. این پژوهش با هدف ارزیابی رفتار سازه‌ای این نوع تیرها، مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی انجام شد. یافته‌ها نشان داد که جان موج‌دار به طور مؤثری سختی خمشی تیر را کاهش می‌دهد اما در عین حال، عملکرد برشی مطلوبی را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، بال جعبه‌ای منجر به افزایش سختی پیچشی و کاهش تمرکز تنش در محل اتصال بال و جان شد. این تحقیق نشان داد که ترکیب این دو ویژگی هندسی (بال جعبه‌ای و جان موج‌دار) می‌تواند به طراحی تیرهای سبک‌تر و مقاوم‌تر برای کاربردهای مهندسی سازه‌ای کمک کند [۲۳]. در سال ۲۰۲۵، ناصریا و اشتري [۲۴] به کمک شبیه‌سازی عددی به بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال گیردار تیرورق-های با بال جعبه‌ای پرداختند. در این تحقیق، تأثیر استفاده از بال جعبه‌ای بر منحنی لنگر-انتهای و توزیع کرنش پلاستیک تحت بارگذاری مونوتونیک و چرخه‌ای^۳ مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج، تغییر ابعاد بال فشاری تأثیر قابل توجهی بر سختی الاستیک و مقاومت خمشی پلاستیک اتصال داشته است که نشان از عملکرد مناسب این تیرها نسبت به تیرهای I-شکل متداول داشته است. ژنگ^۴ و همکاران [۲۵] مقاومت برشی و خمشی تیرورق‌های دارای بال جعبه‌ای پر شده با بتن و همچنین دارای خوردگی موضعی در ورق بال و جان را بررسی کردند. مطابق نتایج، خوردگی ورق بال کششی منجر به کاهش مقاومت خمشی شده و با افزایش ارتفاع بخش خوردگی در ورق جان، مقاومت برشی نیز به شدت کاهش می‌یابد.

مطابق توضیحات فوق و بررسی مطالعات پیشین مشاهده می‌شود که عمده تحقیقات بر روی رفتار برشی تیرورق‌های I-شکل و تیرورق‌های با بال‌های فشاری و کششی جعبه‌ای متمرکز بوده است. با این حال، پژوهش‌های بسیار محدودی به بررسی عملکرد برشی تیرورق‌هایی که تنها دارای بال فشاری جعبه‌ای و بال کششی تخت هستند، پرداخته‌اند. این محدودیت مطالعاتی منجر به ایجاد ابهاماتی در

¹ Cardiff

² Deng

³ monotonic and cyclic loadings

⁴ Zhang

شناسایی مکانیزم خرابی برشی این نوع تیرورق‌ها، به‌ویژه در مقاطع با اجزای لاغر شده است. به منظور پوشش این ضعف تحقیقاتی، در این پژوهش تلاش می‌شود رفتار برشی این دسته از تیرورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته و برخی از ابهامات موجود در تحقیقات پیشین در ارتباط با مد خرابی برشی رفع شود.

۲- مدلسازی و روش اجزای محدود

۲-۱- معرفی مدل‌های اجزای محدود

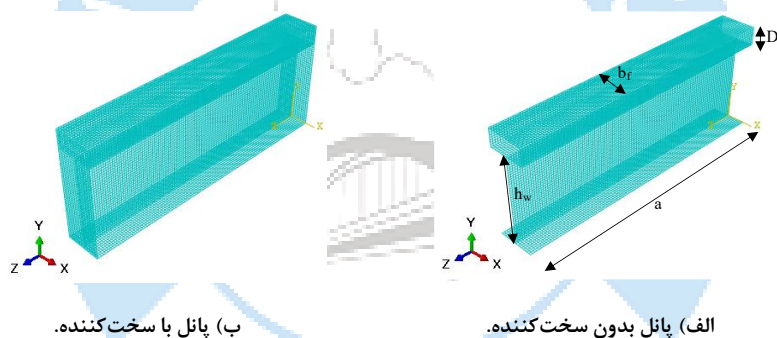
در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار برشی تیرورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای، تعداد ۷۵ تیرورق با لحاظ لاغری مختلف برای ورق بال و جان انتخاب و در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شد. مشخصات هندسی و نام‌گذاری مدل‌ها در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده است. به‌منظور جلوگیری از کمانش موضعی ورق جان در محل بارگذاری، در ابتدا و انتهای تمامی مدل‌ها از سخت‌کننده عرضی استفاده شده است. جهت درک بهتر و مشاهده سایر جزئیات مدل‌ها در شکل ۳-الف سخت‌کننده‌های انتهایی حذف شده است. پانل‌های I-شکل با بال جعبه‌ای فشاری با طول تیر، آرایش سخت‌کننده، عرض، ضخامت جان و بال متفاوت در نظر گرفته شدند تا طیف گسترده‌ای از پانل‌های تیرورق با مقادیر مختلف و نسبت طول مختلف بررسی شود. طول پانل (a)، عرض بال، ضخامت بال، ارتفاع جان، ضخامت جان و فاصله سخت‌کننده‌ها به ترتیب در محدوده‌های ۲۰۰ - ۲۴۰۰، ۱۶۰ - ۳۲۰، ۶/۱۰ - ۲۰، ۴۰۰ - ۸۰۰، ۱/۳۵ - ۹/۱۰، و ۲۰۰ - ۲۴۰۰ میلی‌متر متغیر است. انتخاب این مقادیر به منظور انجام مطالعه پارامتریک و بر پایه محدوده‌های متداول در طراحی سازه‌های فولادی، آیین‌نامه‌های معتبر و مطالعات پیشین صورت گرفته است. به‌ویژه، انتخاب نسبت‌های هندسی مختلف به منظور بررسی تأثیر پارامترهای لاغری بر ظرفیت باربری و مدهای خرابی محتمل مورد توجه قرار گرفته‌اند تا اطمینان حاصل شود که نتایج این پژوهش قابلیت تعمیم به طیف وسیعی از تیرورق‌ها را دارد. نام‌گذاری مدل‌ها به‌صورت $G_i-h_w-a/h-t_w$ می‌باشد که در آن i شماره گروه، h_w ارتفاع جان، a/h نسبت ابعادی پانل جان و t_w معرف ضخامت ورق جان خواهد بود. به‌عنوان مثال، G1-400-0.50-2.70 معرف تیرورق گروه ۱، ارتفاع جان برابر $h_w = 400\text{mm}$ نسبت ابعادی $a/h = 0.50$ و با جان لاغر به ضخامت $t_w = 2.70\text{mm}$ می‌باشد. ابعاد نمونه‌ها به نحوی انتخاب شد که الزامات آیین‌نامه AISC360-16 را ارضا کند.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های عددی.

گروه	نام مدل	لاندا	ارتفاع جان (mm)	فاصله سخت‌کننده (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت جان (mm)	ضخامت بال جعبه‌ای (mm)	ضخامت بال تخت (mm)
G1	G1-400-0.50-2.70	۱/۲۱	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۲/۷۰	۷/۲۰	۲۰
	G1-400-1.00-3.90	۱/۲۲	۴۰۰	۴۰۰	۱۶۰	۳/۹۰	۶/۶۵	۱۳
	G1-400-2.00-4.40	۱/۲۰	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۴/۴۰	۶/۱۰	۱۰
	G1-600-3.00-6.80	۱/۲۰	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۶/۸۰	۸/۱۰	۱۲
	G1-600-0.50-4.00	۱/۲۲	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۴/۰۰	۸/۰۰	۱۰
	G1-600-1.00-5.95	۱/۲۰	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۵/۹۵	۷/۵۰	۹
	G1-800-2.00-8.85	۱/۲۰	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۸/۸۵	۹/۰۰	۹
	G1-800-3.00-9.10	۱/۲۰	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۹/۱۰	۹/۰۰	۸
	G1-800-0.50-5.45	۱/۲۰	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۵/۴۵	۸/۴۰	۷
G2	G2-400-0.50-2.50	۱/۳۰	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۲/۵۰	۷/۳۰	۲۰
	G2-400-1.00-3.60	۱/۳۲	۴۰۰	۴۰۰	۱۶۰	۳/۶۰	۶/۷۰	۱۳
	G2-400-2.00-4.00	۱/۳۲	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۴/۰۰	۶/۲۰	۱۰
	G2-600-3.00-6.30	۱/۳۰	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۶/۳۰	۸/۱۰	۱۲
	G2-600-0.50-3.80	۱/۲۹	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۳/۸۰	۸/۰۰	۱۰
	G2-600-1.00-5.50	۱/۲۹	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۵/۵۰	۷/۵۰	۹
	G2-800-2.00-8.20	۱/۲۹	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۸/۲۰	۹/۰۰	۹

گروه	نام مدل	لاند	ارتفاع جان	فاصله سخت کننده	عرض بال	ضخامت جان	ضخامت بال جعبه‌ای	ضخامت بال تخت
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
G3	G2-800-3.00-8.40	۱/۳۰	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۸/۴۰	۹/۰۰	۸
	G2-800-0.50-5.00	۱/۳۰	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۵/۰۰	۸/۴۰	۷
	G3-400-0.50-2.30	۱/۴۲	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۲/۳۰	۷/۳۰	۲۰
	G3-400-1.00-3.40	۱/۴۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۶۰	۳/۴۰	۶/۷۰	۱۳
	G3-400-2.00-3.80	۱/۳۹	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۳/۸۰	۶/۲۰	۱۰
	G3-600-3.00-5.90	۱/۳۹	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۵/۹۰	۸/۱۰	۱۲
	G3-600-0.50-3.50	۱/۴۰	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۳/۵۰	۸/۰۰	۱۰
	G3-600-1.00-5.10	۱/۴۰	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۵/۱۰	۷/۵۰	۹
	G3-800-2.00-7.50	۱/۴۱	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۷/۵۰	۹/۰۰	۱۰
	G3-800-3.00-7.80	۱/۴۰	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۷/۸۰	۸/۹۰	۸
G3-800-0.50-4.70	۱/۳۹	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۴/۷۰	۸/۴۰	۷	
G4	G4-400-0.50-2.00	۱/۶۳	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۲/۰۰	۷/۳۰	۲۰
	G4-400-2.00-3.30	۱/۶۰	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۳/۳۰	۶/۲۰	۱۰
	G4-600-3.00-5.10	۱/۶۱	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۵/۱۰	۸/۱۰	۱۲
	G4-600-0.50-3.00	۱/۶۳	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۳/۰۰	۸/۰۰	۱۰
	G4-600-1.00-4.45	۱/۶۰	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۴/۴۵	۷/۵۰	۹
	G4-800-2.00-6.65	۱/۵۹	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۶/۶۵	۹/۰۰	۱۰
	G4-800-3.00-6.85	۱/۵۹	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۶/۸۵	۸/۸۰	۸
	G5	G5-400-0.50-1.80	۱/۸۱	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱/۸۰	۷/۳۰
G5-400-2.00-2.95	۱/۷۹	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۲/۹۵	۶/۲۰	۱۰	
G5-600-3.00-4.90	۱/۶۷	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۴/۹۰	۸/۱۰	۱۲	
G5-600-0.50-2.70	۱/۸۱	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۷۰	۸/۰۰	۱۰	
G5-600-1.00-4.00	۱/۷۸	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۴/۰۰	۷/۵۰	۹	
G5-800-2.00-5.90	۱/۷۹	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۵/۹۰	۹/۰۰	۱۰	
G5-800-3.00-6.00	۱/۸۲	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۶/۰۰	۸/۹۰	۸	
G5-800-0.50-3.70	۱/۷۶	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۳/۷۰	۸/۴۰	۷	
G6	G6-400-0.50-1.60	۲/۰۴	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱/۶۰	۷/۳۰	۲۰
	G6-400-2.00-2.70	۱/۹۶	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۲/۷۰	۶/۲۰	۱۰
	G6-600-3.00-4.10	۲/۰۰	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۴/۱۰	۸/۱۰	۱۲
	G6-600-0.50-2.45	۱/۹۹	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۴۵	۷/۵۰	۱۰
	G6-600-1.00-3.60	۱/۹۸	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۳/۶۰	۷/۵۰	۹
	G6-800-2.00-5.30	۲/۰۰	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۵/۳۰	۹/۰۰	۱۰
	G6-800-3.00-5.50	۱/۹۹	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۵/۵۰	۸/۹۰	۸
	G6-800-0.50-3.30	۱/۹۸	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۳/۳۰	۸/۴۰	۷
G7	G7-400-0.50-1.50	۲/۱۷	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱/۵۰	۷/۳۰	۲۰
	G7-400-2.00-2.45	۲/۱۶	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۲/۴۵	۶/۲۰	۱۰
	G7-600-3.00-3.75	۲/۱۸	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۳/۷۵	۸/۱۰	۱۲
	G7-600-0.50-2.20	۲/۲۲	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۲۰	۸/۰۰	۱۰
	G7-600-1.00-3.25	۲/۱۹	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۳/۲۵	۷/۵۰	۹
	G7-800-2.00-4.80	۲/۲۱	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۴/۸۰	۹/۰۰	۱۰
	G7-800-3.00-5.00	۲/۱۸	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۵/۰۰	۸/۹۰	۸

گروه	نام مدل	لاندا	ارتفاع جان (mm)	فاصله سخت کننده (mm)	عرض بال (mm)	ضخامت جان (mm)	ضخامت بال جعبه‌ای (mm)	ضخامت بال تخت (mm)
G8	G7-800-0.50-3.00	۲/۱۷	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۳/۰۰	۸/۴۰	۷
	G8-400-0.50-1.35	۲/۴۱	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱/۳۵	۷/۳۰	۲۰
	G8-400-2.00-2.20	۲/۴۱	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۲/۲۰	۶/۲۰	۱۰
	G8-600-3.00-3.45	۲/۳۷	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۳/۴۵	۸/۱۰	۱۲
	G8-600-0.50-2.00	۲/۴۴	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۰۰	۸/۰۰	۱۰
	G8-600-1.00-3.00	۲/۳۷	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۳/۰۰	۷/۵۰	۹
	G8-800-2.00-4.45	۲/۳۸	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۴/۴۵	۹/۰۰	۱۰
	G8-800-3.00-4.55	۲/۴۰	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۴/۵۵	۸/۹۰	۱۰
G9	G8-800-0.50-2.70	۲/۴۱	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۲/۷۰	۸/۴۰	۷
	G9-400-0.50-1.20	۲/۷۲	۴۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱/۲۰	۷/۳۰	۲۰
	G9-400-2.00-2.00	۲/۶۵	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۲/۰۰	۶/۲۰	۱۰
	G9-600-3.00-3.00	۲/۷۳	۶۰۰	۱۸۰۰	۲۴۰	۳/۰۰	۸/۱۰	۱۲
	G9-600-0.50-1.80	۲/۷۲	۶۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۱/۸۰	۸/۰۰	۱۰
	G9-600-1.00-2.60	۲/۷۴	۶۰۰	۶۰۰	۲۴۰	۲/۶۰	۷/۵۰	۹
	G9-800-2.00-3.90	۲/۷۱	۸۰۰	۱۶۰۰	۳۲۰	۳/۹۰	۹/۰۰	۹
	G9-800-3.00-4.00	۲/۷۳	۸۰۰	۲۴۰۰	۳۲۰	۴/۰۰	۸/۹۰	۱۰
G9-800-0.50-2.35	۲/۷۷	۸۰۰	۴۰۰	۳۲۰	۲/۳۵	۸/۴۰	۷	



شکل ۳: پارامترهای مدل‌های اجزای محدود.

۲-۲- طبقه بندی اجزای تیرورق بر اساس لاغری

به‌طور کلی در بحث بررسی رفتار برشی پانل‌ها، ورق‌های برشی بر اساس پارامتر بی‌بعد لاغری جان (λ_w) می‌توانند به سه دسته لاغر، غیرفشرده (متوسط) و فشرده (ضخیم) تقسیم شوند [۹ و ۲۶]. لاغری جان (λ_w) یا پارامتر لاندا طبق رابطه ۱ تعیین می‌شود که در آن E مدول الاستیسته، t_w ضخامت جان، h ارتفاع جان و K ضریب کمانش برشی الاستیک خواهد بود که مقدار این ضریب به شرایط مرزی و نسبت ابعادی ورق بستگی دارد [۲۷]. در روش باسلر (مطابق شکل ۲)، ضریب کمانش برشی الاستیک پانل با شرایط مرزی ۴ طرف ساده، تعیین می‌شود و بال‌ها سختی لازم برای ایجاد سختی پیچشی در اطراف پانل جان را ندارند. مطابق پارامتر λ ، ورق با $\lambda_w > 1/37$ و $\lambda_w \leq 1/1$ به ترتیب به عنوان ورق فشرده با کمانش پلاستیک و ورق لاغر با کمانش الاستیک در نظر گرفته می‌شود. از طرفی، ورق با $1/1 < \lambda_w \leq 1/37$ نیز به‌عنوان ورق غیرفشرده با کمانش برشی غیرالاستیک خواهد بود. لازم به ذکر است که تمامی تیرورق‌ها با یک لاندا مشخص، رفتار برشی یکسانی دارند. به عبارتی، لاندا (λ) پارامتری است که نحوه بررسی رفتار برشی جان تیرورق‌ها را مستقل از ابعاد ورق جان میسر خواهد کرد. طبق این نکته، هر مدل با لاندا مشخص، نماینده تمام مدل‌ها با ارتفاع جان، ضخامت جان و فاصله سخت کننده‌های مختلف ولی با لاندا یکسان خواهد بود [۲۸]. انتخاب بازه گسترده ضخامت و پارامتر بی‌بعد لاغری جان (λ) امکان بررسی کمانش الاستیک خطی

و غیرخطی ورق‌های نازک و ضخیم را مهیا می‌سازد. دلیل استفاده از پارامتر λ ، در نظر گرفتن اثر خصوصیات مصالح، نسبت ابعادی و شرایط مرزی در رفتار برشی ورق می‌باشد.

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} \frac{\sqrt{f_{yw}}}{\sqrt{K_{AISC} E}} \quad (1)$$

برای محاسبه لاغری بال تخت و بال جعبه‌ای در تیورورق‌ها، از معیارهای لاغری آیین‌نامه فولاد آمریکا (AISC360) استفاده شده است. این معیارها با توجه به دو پارامتر کلیدی λ_p و λ_r تعریف می‌شوند. پارامتر λ_r مشخص‌کننده مرز بین کمانش الاستیک و کمانش غیرالاستیک (الاستوپلاستیک) ورق است. درحالی‌که λ_p مرز بین کمانش غیرالاستیک و پلاستیک را مشخص کرده و حد آستانه‌ای برای ورود مقطع به رفتار پلاستیک محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، این پارامترها نوع کمانش را از لحاظ رفتاری تعیین می‌کنند و تأثیر آن بر رفتار سازه‌ای تیورورق‌ها در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد. برای بال تخت، پارامتر لاغری به صورت نسبت عرض موثر به ضخامت بال (b_f) $(2t_f)$ محاسبه می‌شود. مقادیر مرزی λ_p و λ_r مطابق AISC، وابسته به شرایط بارگذاری و نوع فولاد مشخص می‌شوند. برای بال جعبه‌ای، لاغری با نسبت $(b_f - 2t_f)/t_f$ تعیین می‌شود. مقادیر مرزی λ_p و λ_r برای این نوع بال‌ها نیز مطابق جدول ۲ به دست می‌آید. که در آن E و F_y به ترتیب مدول الاستیسیته و تنش تسلیم فولاد می‌باشد و نحوه محاسبه K_c و F_L در بخش مربوطه در آیین‌نامه فولاد آمریکا موجود می‌باشد. قابل ذکر است که در تحقیق حاضر بار محوری به تیورورق اعمال نشده و بال‌های تیورورق تنها تحت تنش‌های محوری ناشی از خمش قرار دارند. مقادیر جدول ۲ نیز آیین‌نامه AISC360 برای حالت تنش فشاری ناشی از خمش انتخاب شده است.

جدول ۲: محاسبه پارامترهای حد لاغری

نوع بال	λ_r	λ_p
بال تخت	$0.95 \sqrt{\frac{K_c E}{F_L}}$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
بال جعبه‌ای	$1/4 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1/12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

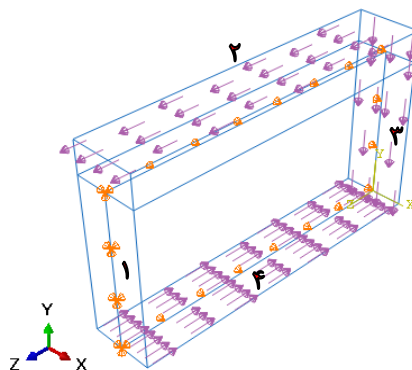
۲-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

تحلیل سازه تحت بارگذاری برش خالص و با لحاظ هر دو رفتار غیرخطی مصالح^۱ و غیرخطی هندسی^۲ انجام شد [۲۹ و ۲۸]. مطابق شکل ۴، بارگذاری و شرایط مرزی تیورورق‌ها به نحوی انتخاب شده که شرایط برش خالص در ورق جان ایجاد شود؛ بنابراین، مطالعه حاضر از تحقیقات انجام شده بر روی ورق‌های مسطح در مراجع [۳۰ و ۳۱] انتخاب شده است؛ لذا به منظور حذف امکان رخداد پدیده کمانش جانبی-پیچشی، تمامی نقاط وسط بال‌های تیورورق (لبه شماره ۲-۴) در جهت عمود بر صفحه جان (جهت Y) مقید شده است، تمام درجات آزادی انتقالی انتهای سمت چپ (لبه شماره ۱) بسته شده و درجات آزادی دورانی آزاد می‌باشد و در قسمت انتهایی سمت راست (لبه شماره ۳) در جهت X بسته شده است. شایان ذکر است که در شکل ۴ منظور از عدد ۱ در شرایط مرزی یعنی جابجایی و دوران پانل آزاد و منظور از عدد صفر یعنی جابجایی و دوران در آن جهت بسته می‌باشد.

¹ Material nonlinearity

² Geometric nonlinearity

شرایط مرزی						
	Ux	Uy	Uz	θ_x	θ_y	θ_z
لبه ۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
صفحات	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۲-۳-۴	آزاد = ۱			بسته = ۰		



شکل ۴: بارگذاری و شرایط مرزی مدل‌های عددی.

۲-۴- مدل‌سازی، انتخاب نوع المان و الگوی مش‌بندی

برای شبیه‌سازی تیورق‌ها از المان پوسته S4R در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. به منظور اتصال اجزای مختلف تیورق از قابلیت Merge نرم‌افزار استفاده شد که در این حالت فرض بر عدم گسیختگی جوش قبل از رسیدن تیورق به باربری نهایی می‌باشد [۳۲ و ۳۳]. جهت انتخاب مش بهینه، مدل ۲ با بیشترین لاغری و نسبت‌های ابعادی ۰/۵ و ۳ انتخاب شدند. سپس، از نتایج تجزیه و تحلیل این مدل‌ها مطابق جدول ۳ درصد خطای مش ۲۰ میلی‌متر نسبت به مش ۱۰ میلی‌متر به دست آمده که مقدار آن‌ها به ترتیب برای مدل اول ۱/۹۵٪، خطای کمانش برشی، ۱/۷۴٪، خطای مقاومت برشی نهایی و برای مدل دوم به همین ترتیب با خطای ۰/۴۶ و ۱/۰۳ درصد بدست آمده. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت‌های ابعادی کوچکتر، کمانش الاستیک نسبت به مقاومت برشی نهایی حساسیت بیشتری به اندازه مش دارد و در نسبت‌های ابعادی بزرگتر حساسیت مش تقریباً برابر هم می‌باشند. بنابراین مطابق نتایج به دست آمده، برای تمامی مدل‌ها اندازه مش ۲۰ میلی‌متر به عنوان مش بهینه با حداکثر خطای حدود ۲٪ لحاظ شده است.

جدول ۳: حساسیت سنجی مش.

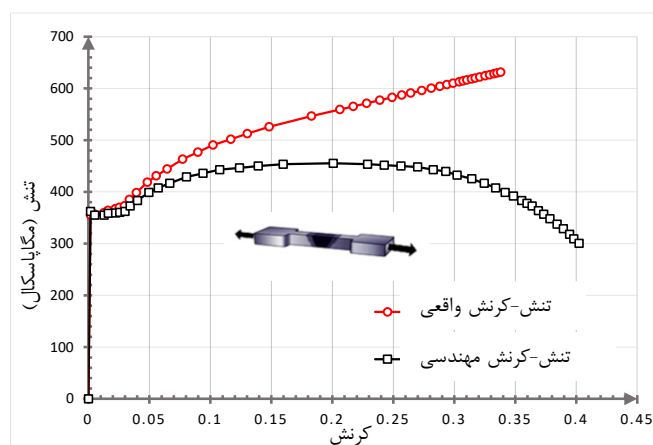
مدل G8-800-3.00-4.55						
سایز مش (mm)	تعداد المان	مقاومت کمانش برشی الاستیک (Vcr)	خطای کمانش برشی الاستیک (Error)	مقاومت برشی نهایی (Vu)	خطای مقاومت برشی نهایی (Error)	
۱۰	۵۶۰۶۴	۲۳۲/۶۱	۰/۰۰	۴۴۹/۹۰	۰/۰۰	
۱۵	۲۵۲۷۶	۲۳۲/۰۷	۰/۲۰	۴۵۲/۳۳	۰/۵۴	
۲۰	۱۴۰۱۶	۲۳۳/۶۸	۰/۴۶	۴۵۴/۵۵	۱/۰۳	
۳۰	۶۰۰۰	۲۳۵/۳۹	۱/۱۹	۴۵۹/۹۱	۲/۲۲	
۵۰	۲۱۴۸	۲۴۱/۳۰	۳/۷۳	۴۷۵/۲۳	۵/۶۳	
۱۰۰	۶۵۶	۲۷۲/۰۵	۱۶/۹۵	۵۳۷/۴۹	۱۹/۴۷	
مدل G8-800-0.50-2.70						
سایز مش (mm)	تعداد المان	مقاومت کمانش برشی الاستیک (Vcr)	خطای کمانش برشی الاستیک (Error)	مقاومت برشی نهایی (Vu)	خطای مقاومت برشی نهایی (Error)	
۱۰	۱۴۴۶۴	۲۱۸/۸۳	۰/۰۰	۳۴۵/۹۸	۰/۰۰	
۱۵	۶۶۲۳	۲۲۰/۲۹	۰/۶۷	۳۴۸/۳۴	۰/۶۸	
۲۰	۳۶۱۶	۲۲۳/۱۱	۱/۹۵	۳۵۱/۹۹	۱/۷۴	
۳۰	۱۵۱۱	۲۳۱/۱۰	۵/۶۱	۳۶۱/۹۶	۴/۶۲	
۵۰	۵۴۸	۲۵۷/۱۷	۱۷/۵۲	۳۸۹/۸۸	۱۲/۶۹	
۱۰۰	۱۷۶	۴۹۸/۱۹	۱۲۷/۶۵	۵۰۴/۱۰	۴۵/۷۰	

۲-۵- مشخصات مصالح و معیار جاری شدن

همه مدل‌های اجزای محدود در این پژوهش از فولاد ASTM A992 با تنش تسلیم اسمی ۳۵۸ مگاپاسکال، تنش تسلیم واقعی ۳۵۵ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ ساخته شده‌اند [۳۴]. برای ارائه شبیه‌سازی‌های واقعی‌تر، نرم‌افزار ABAQUS از تنش واقعی به جای تنش مهندسی استفاده می‌کند. منحنی‌های تنش-کرنش فولاد ASTM A992 با توجه به روابط (۱-۲) و (۲-۲)، تنش-کرنش واقعی^۱ داده‌ها با اصلاح داده‌های تنش-کرنش مهندسی^۲ به دست می‌آید که در شکل ۵ این اصلاح قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که توضیحات مربوط به منحنی تنش-کرنش مهندسی در مقاله [۹] گزارش شده است. همچنین، جهت بررسی تسلیم یا عدم تسلیم یک نقطه از سازه، معیار تسلیم ون مایسز^۳ به کار گرفته شده است.

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (1-2)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2-2)$$



شکل ۵: دیاگرام تنش-کرنش مهندسی و واقعی مصالح.

۲-۶- صحت سنجی روش شبیه‌سازی عددی

۲-۶-۱- صحت سنجی اول

به منظور اطمینان از صحت روش ساخت هندسه سازه، اعمال شرایط مرزی، بارگذاری، نوع المان، مش‌بندی، تعریف مصالح و تنظیمات مربوط به تحلیل، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شد. برای بررسی صحت روش مدل‌سازی عددی، تیورق G4 از کار آزمایشگاهی لی^۴ و همکاران [۱۹] انتخاب و در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل شده - است. شکل کلی مدل، محل بارگذاری، جزئیات مدل و همچنین مشخصات مصالح آن با استفاده از مقاله مذکور مطابق شکل‌های ۶ و ۷ و

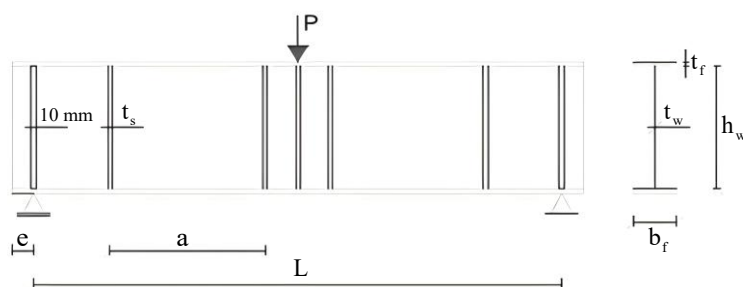
¹ True strain stress

² Engineering strain stress

³ Von Mises yield criterion

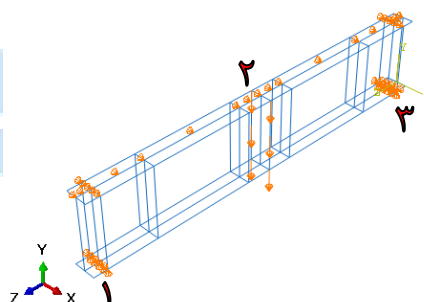
⁴ Lee

جدول ۴ می‌باشد. تیر مورد نظر دو سر ساده بوده و به منظور اعمال بار متمرکز در وسط دهانه، بار مورد نظر به لبه‌های سخت‌کننده‌های عرضی موجود در وسط دهانه و به صورت جابجایی-کنترل اعمال شده است.



شکل ۶: جزئیات تیرورق G4.

شرایط مرزی						
لبه	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱
۲	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۰	۰	۰	۱	۱	۱
آزاد = ۱			بسته = ۰			

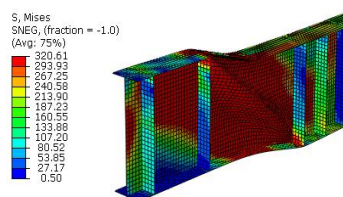
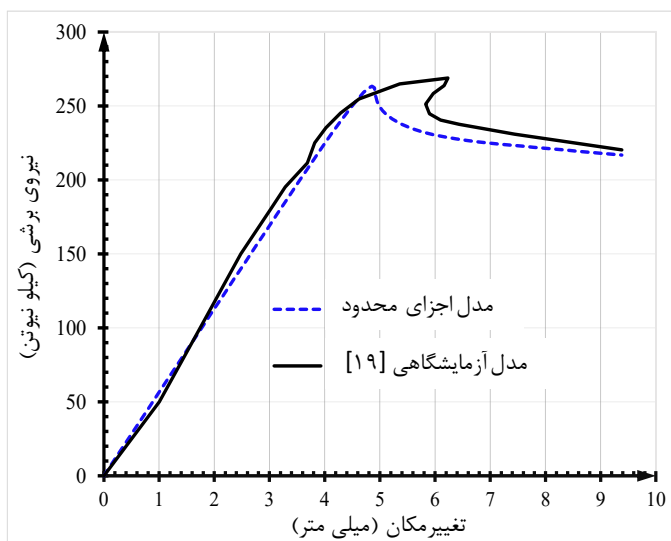


شکل ۷: بارگذاری و شرایط مرزی تیرورق G4.

جدول ۴: مشخصات مدل G4.

مشخصات مدل G4			
۱۳۰	عرض بال	۴۰۰	ارتفاع جان
۳۰۳/۸	تنش تسلیم بال	۶۰۰	فاصله سخت‌کننده
۳۱۸/۵	تنش تسلیم جان	۱/۵	a/h_w
۲۶۳/۲۵	مقاومت برشی نهایی اجزای محدود	۴	ضخامت جان
۲۶۸/۸۰	مقاومت برشی نهایی آزمایشگاهی	۱۵	ضخامت بال
		۳/۷۵	t_f/t_w

به منظور در نظر گرفتن اثر خطای ساخت، شکل نقص هندسی مشابه مد اول کمانش تیرورق لحاظ شده و حداکثر خطای ساخت آن برابر یک‌دهم ضخامت جان ($t_w/10$) لحاظ شد. مطابق شکل ۸، نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که تطابق بسیار خوبی از لحاظ مد خرابی و منحنی بار-تغییر مکان وجود دارد. مقاومت برشی نهایی حاصل از تحلیل عددی ۲۶۳/۲۵ کیلونیوتن به دست آمده است که با ۲/۰۶ درصد خطا، بسیار نزدیک به مقاومت برشی نهایی حاصل از نمونه تست شده در آزمایشگاه با ۲۶۸/۸۰ کیلونیوتن می‌باشد. مطابق شکل مذکور، مد خرابی نمونه آزمایشگاهی با مد خرابی حاصل از تحلیل عددی با فرض رفتار غیرخطی مصالح همخوانی دارد. همچنین، مقدار تغییر مکان متناظر با لحظه باربری نهایی در مدل اجزای محدود حدود ۵ میلی‌متر است که با داده آزمایشگاهی (حدود ۶/۴ میلی‌متر) همخوانی ندارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این عدم همخوانی در نتایج سایر تحقیقات [۳۵] هم قابل مشاهده است و احتمالاً بدلیل جابجایی تجهیزات اندازه‌گیری در لحظه انجام آزمایش بوده است.



مد خرابی مدل اجزای محدود

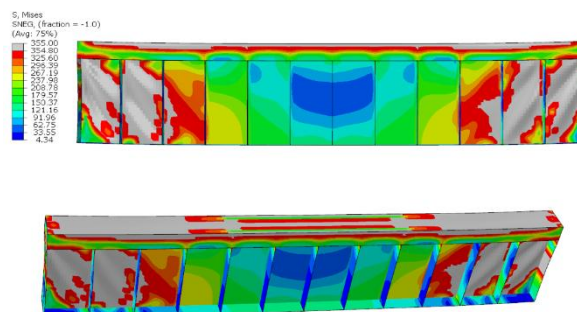
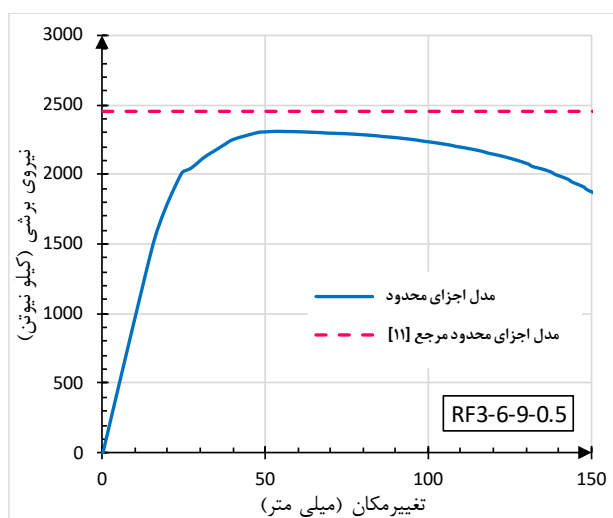


مد خرابی مدل آزمایشگاهی [۱۹]

شکل ۸: مقایسه نتایج تحلیل عددی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۹].

۲-۶-۲- صحت سنجی دوم

به منظور بررسی صحت کارکرد روش مدلسازی پیشنهادی در بررسی رفتار تیورورق‌های با بال جعبه‌ای، مدل RF3-6-9-0.5 از مرجع [۱۱] برای صحت سنجی دوم انتخاب شد. مدل مذکور یک تیورورق با بال فشاری جعبه‌ای و بال کششی تخت است که به صورت دو سر ساده تحت بارگسترده یکنواخت می‌باشد. این مدل دارای ضخامت جان ۶ میلی‌متر، طول دهانه ۹ متر و نسبت ابعادی ۰/۵ می‌باشد. سایر خصوصیات هندسی، مشخصات مصالح تیورورق، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مدل مذکور در مرجع [۱۱] موجود می‌باشد. مطابق شکل ۹ و نتایج مرجع [۱۱]، مقدار مقاومت برشی نهایی تیورورق برابر ۲۴۵۷ کیلونیوتن گزارش شده است که با نتایج عددی مقاله حاضر (۲۳۱۴/۰۵) تطابق خوبی دارد و خطای مدلسازی به حدود ۵/۸- درصد می‌رسد. نتایج حاضر نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی عددی مقاله حاضر می‌تواند برای انجام مطالعه پارامتریک و بررسی اهداف پژوهش حاضر نیز استفاده شود.

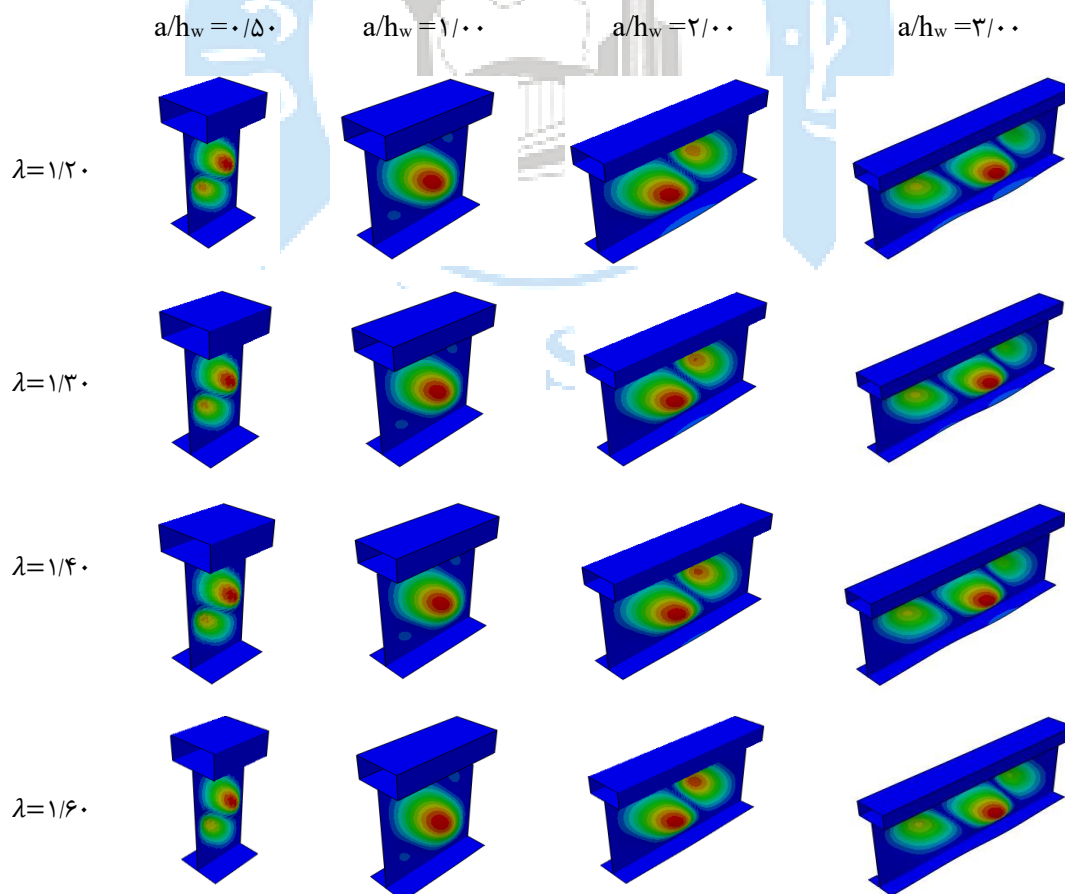


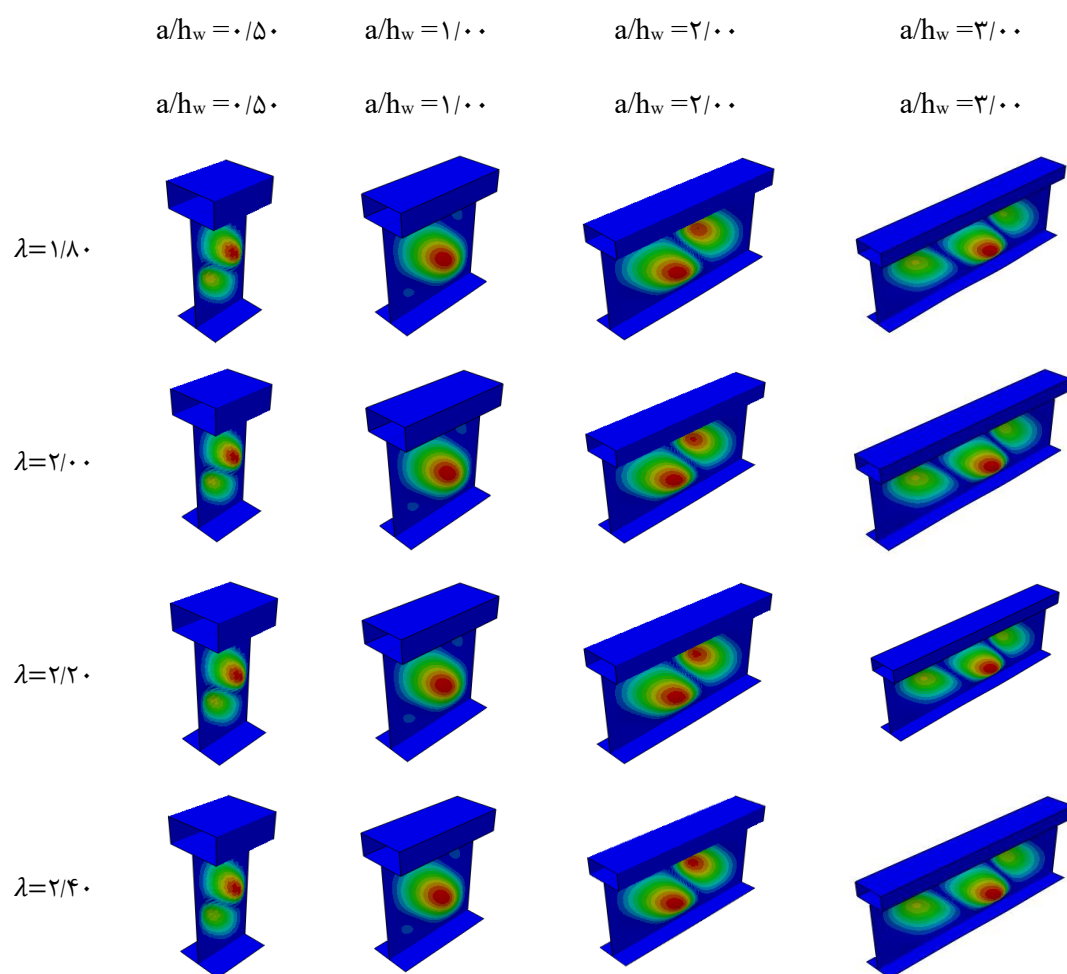
الف) منحنی بار-تغییر مکان

ب) مد خرابی تیورورق

شکل ۹: مقایسه نتایج شبیه‌سازی مقاله حاضر با نتایج عددی مرجع [۱۱]

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل مقادیر ویژه مدل‌های اجزای محدود ارائه می‌شود. نتایج این روش تحلیل در بررسی مد خرابی محتمل سازه با فرض رفتار الاستیک مصالح کاربرد دارد؛ بنابراین، فقط مشخصات الاستیک سازه از جمله مدول الاستیسیته مصالح، مشخصات هندسی مقطع و همچنین شرایط مرزی بر رفتار تیورق تأثیر خواهد داشت. به دلیل حجم زیاد مدل‌ها، اولین مد کمانش مثبت برخی از مدل‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، نمایش مدل‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که معرف رفتار کلی تیورق‌های دارای بال فشاری با نسبت ابعادی ۰/۵ تا ۳ و پارامتر لاغری ۱/۲ تا ۲/۴ باشد. مطابق نتایج، در همه مدل‌ها کمانش موضعی در ناحیه میانی جان و با تغییرشکل خارج از صفحه رخ می‌دهد. این کمانش مورب که با زاویه حدودی ۴۵ درجه رخ می‌دهد، حاکی از کمانش برشی الاستیک ورق جان تحت تنش‌های اصلی کششی و فشاری موجود در صفحات اصلی خواهد بود. بررسی کانتور تغییرشکل خارج از صفحه ورق جان در مدل‌های با نسبت ابعادی بزرگتر و مساوی ۱ ($a/h_w \geq 1$) نشان می‌دهد که تقارن قابل قبولی در مقدار تغییرشکل نقاط مختلف صفحه جان در نزدیکی بال جعبه‌ای فوقانی و بال تخت تحتانی وجود دارد. این امر نشان دهنده عملکرد مشابه بال تحتانی و فوقانی در تامین قید دوران خارج از صفحه برای ورق جان خواهد بود. به عبارتی، در تحلیل کمانشی تیورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای دارای نسبت ابعادی بزرگتر و مساوی ۱، با تقریب بسیار خوبی می‌توان یک شرایط تکیه گاهی یکسان برای لبه های جان در نزدیکی هر دو بال فوقانی و تحتانی لحاظ کرده و مقدار مقاومت کمانش برشی الاستیک را تعیین کرد. این در حالیست که بدلیل تفاوت مد کمانشی در نسبت ابعادی ۰/۵، رفتار این تیرها کاملاً متفاوت بوده و تأثیر اختلاف سختی بال فوقانی و تحتانی در توزیع تغییرشکل‌ها مشهود است. لذا، انتخاب ورق جان با شرایط مرزی یکسان در هر دو لبه فوقانی و تحتانی در مدل‌های با $a/h_w=0.5$ فرض صحیحی نخواهد بود.





شکل ۱۰: مود اول کمانش الاستیک برخی از مدل‌های اجزاء محدود.

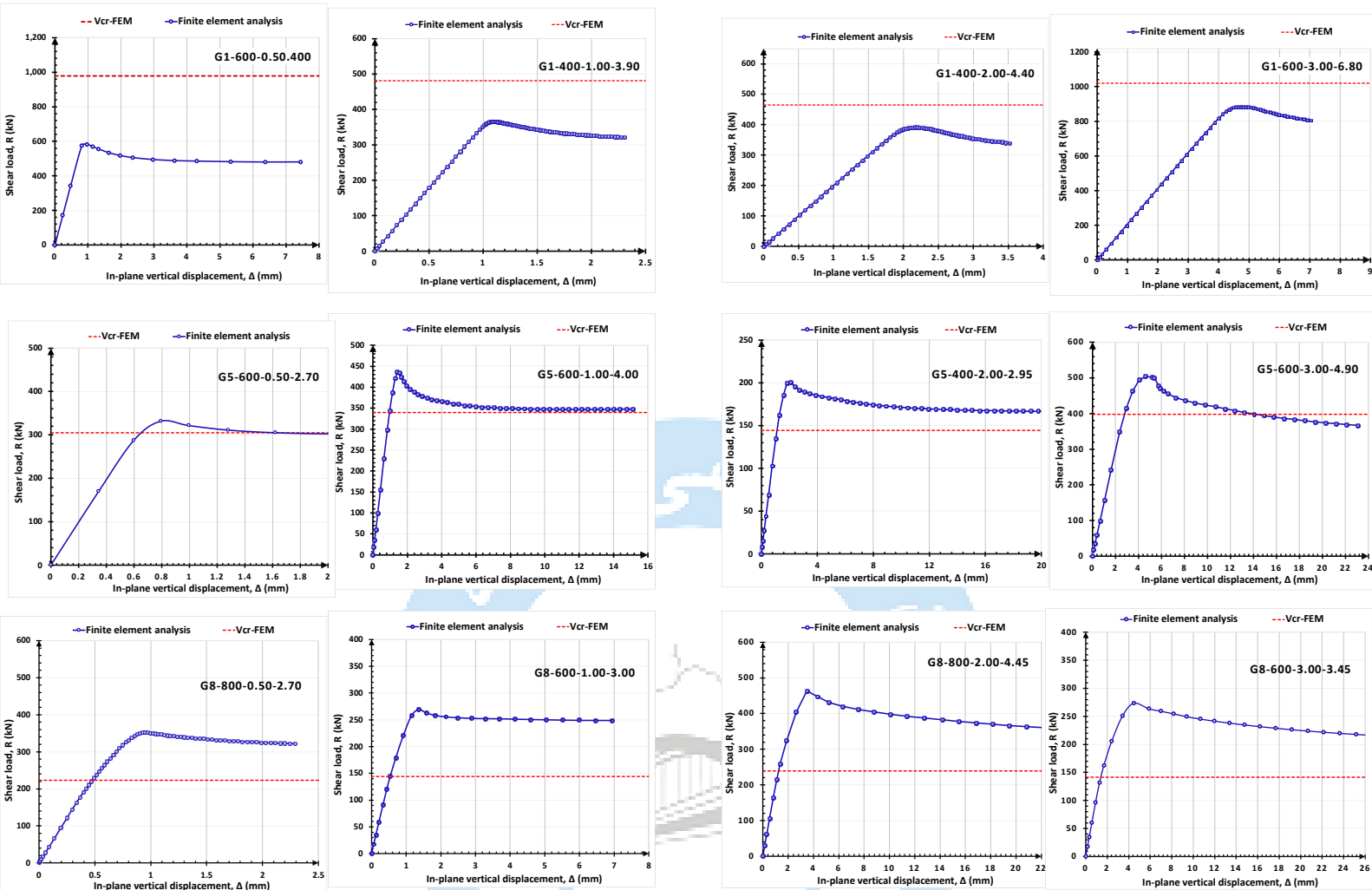
بسته به شرایط بارگذاری و شرایط مرزی حاکم بر طرح، تیورق‌های فولادی تحت مدهای خرابی مختلف با حاکم بودن رفتار الاستیک، غیرالاستیک یا پلاستیک در اجزای آن به باربری نهایی می‌رسند. از جمله مدهای خرابی متداول، کمناش برشی ورق جان، کمناش جانبی-پیچشی، کمناش فشاری جان و همچنین تسلیم کششی یا فشاری ورق بال خواهد بود. با این حال، به منظور بررسی اهداف پژوهش حاضر، مدل‌های اجزای محدود پژوهش حاضر به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مد خرابی برشی حاکم بر رفتار ورق جان باشد. در این پژوهش، مد خرابی با ترسیم منحنی بار-تغییرمکان و سپس مقایسه ظرفیت باربری نهایی تیورق با مقاومت متناظر با کمناش الاستیک آن تعیین شده است. معیار اصلی در تشخیص مد خرابی، لحظه‌ای است که مدل اجزای محدود به حداکثر ظرفیت باربری خود رسیده و پس از آن کاهش قابل توجهی در ظرفیت تحمل بار مشاهده می‌شود [۳۶ و ۳۷]. در تحلیل عددی، این لحظه به عنوان نقطه بحرانی خرابی در نظر گرفته شده است، چرا که نشان‌دهنده آغاز مکانیزم‌های ناپایداری نظیر کمناش جان، جاری شدن موضعی، گسیختگی برشی یا ترکیبی از این موارد است. به این ترتیب، از طریق بررسی توزیع تنش‌ها، تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌های پلاستیک در سازه، نوع مد خرابی تعیین شده است.

در این پژوهش، تمرکز اصلی بر بررسی رفتار کمناشی و پس کمناشی تیورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای بوده است. به همین دلیل، مدل‌سازی انجام شده بر پایه رفتار غیرخطی هندسی و مصالح، بدون در نظر گرفتن پارامترهای پارگی ورق انجام شده است. این روش تحقیق در سایر تحقیقات مشابه [۳۲-۳۳ و ۳۷] نیز اتخاذ شده که امکان تحلیل دقیق مکانیزم‌های کمناش و بررسی نحوه توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها را فراهم کرده است. علت این امر، رسیدن تیورق به باربری نهایی قبل از پاره شده ورق می‌باشد. پارگی ورق بیشتر در بارگذاری‌های چرخه‌ای رخ می‌دهد که این موضوع در سایر پژوهش‌های نویسندگان مقاله حاضر [۳۸ و ۳۹] در زمینه بررسی رفتار چرخه‌ای سازه‌ها با لحاظ پارامترهای پارگی فولاد لحاظ شده است. البته، درک تأثیر پارامترهای خرابی بر رفتار این سازه‌ها می‌تواند به توسعه بیشتر مدل کمک کند. بنابراین، پیشنهاد شما کاملاً ارزشمند است و در تحقیقات آینده بررسی مدل‌هایی که شامل پارامترهای خرابی باشند، در دستور کار قرار خواهد گرفت.

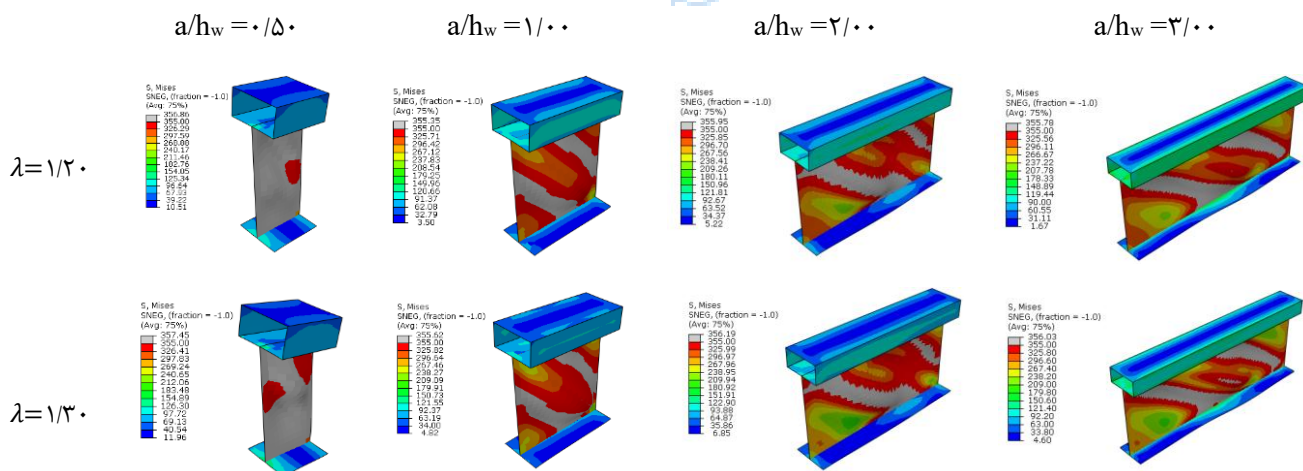
منحنی بار-تغییرمکان برخی از مدل‌ها مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. در این شکل مقدار مقاومت نهایی تیورق را می‌توان با مقدار مقاومت کمناش برشی الاستیک آن مقایسه کرده و رفتار برشی ورق جان را طبقه‌بندی نمود. به طور کلی در بحث رفتار برشی، ورق‌ها به سه دسته لاغر، متوسط (غیرفشرده) و فشرده (ضخیم) طبقه‌بندی می‌شوند [۳۲ و ۳۳]. هر ورق مستطیل متناسب با لاغری آن، تحت بارگذاری برشی داخل صفحه، امکان کمناش قبل، همزمان یا بعد از جاری شدن مصالح را دارد. تحت برش خالص، ورق لاغر قبل از تسلیم مصالح و در مراحل اولیه بارگذاری به صورت الاستیک کمناش می‌کند. پس از کمناش برشی الاستیک، ورق مذکور با ایجاد رفتار غیرخطی مصالح و هندسی وارد رفتار پس از کمناش خواهد شد. تاریخچه بار-تغییرمکان این ورق‌ها به ۴ مرحله کمناش الاستیک، تشکیل باند تسلیم قطری، ظرفیت برشی نهایی و کاهش باربری تقسیم می‌شود. در مقابل، ورق فشرده قبل از کمناش دچار تسلیم شده و هیچ ظرفیت پس از کمناشی از خود نشان نمی‌دهد. تاریخچه بار-تغییرمکان این ورق‌ها نیز به ۳ مرحله رسیدن مصالح به تنش حد تناسب، کمناش پلاستیک و کاهش باربری بعد از کمناش پلاستیک تقسیم می‌شود. در ورق غیرفشرده، تسلیم مصالح و ناپایداری هندسی (کمناش) به صورت همزمان رخ داده و تاریخچه بار-تغییرمکان این ورق‌ها به ۲ مرحله رسیدن مصالح به تنش حد تناسب و متعاقباً کاهش باربری بعد از کمناش غیرالاستیک تقسیم می‌شود. مطابق نتایج شکل ۱۱، با کمناش برشی جان تیورق، باربری آن به پایان نمی‌رسد؛ بلکه مکانیزم باربری تغییر کرده و حوزه کشش قطری در جان تیورق ایجاد شده و نیروهای داخل میدان کششی توسط بال‌ها و سخت‌کننده‌ها جذب می‌شود. این فرآیند در اصطلاح عمل میدان کششی نامیده می‌شود. به عبارتی دیگر، پانلی از ورق جان که توسط بال‌ها و سخت‌کننده‌ها محاط است، دارای مقاومت پس از کمناش قابل توجهی به‌خاطر عمل میدان کششی خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد که ورق‌های لاغر، مقاومت پس از کمناش قابل توجهی دارند، که این یافته با نتایج تحقیقات گذشته [۳۲ و ۳۳] کاملاً همخوانی دارد.

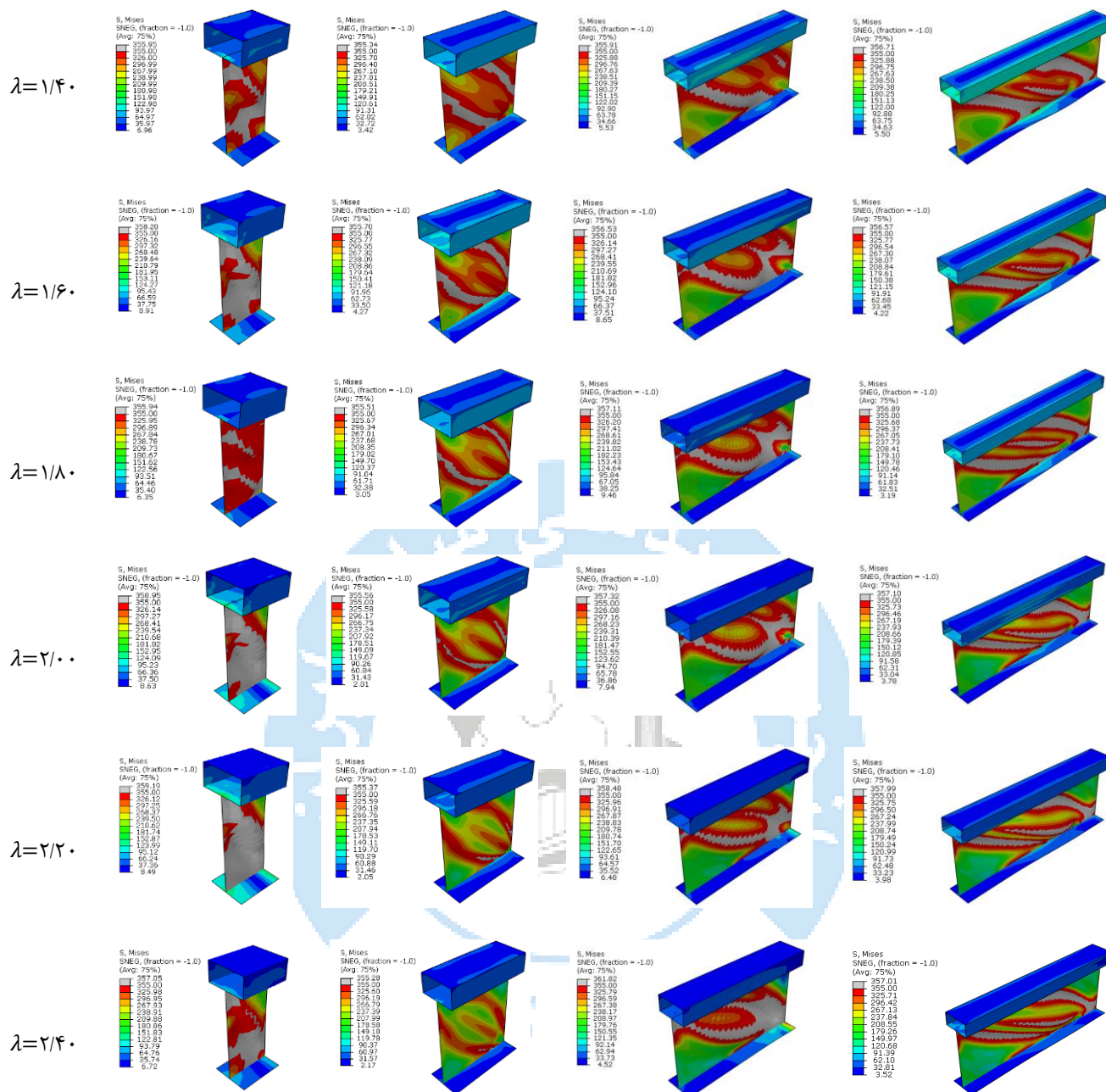
در شکل ۱۲ مد خرابی تیورق‌ها در لحظه متناظر با باربری نهایی نشان داده شده است. همچنین، در این شکل کانتور توزیع تنش وون‌مایسز در اجزای مختلف تیر نشان داده شده است که رنگ سفید در این کانتورها نشان‌دهنده بخشی از سازه است که تنش وون‌مایسز آن نقطه از تنش تسلیم ۳۵۵ مگاپاسکال فراتر رفته است. بررسی رفتار بار-تغییرمکان تیرها نشان می‌دهد که با ادامه بارگذاری، ابتدا ورق جان

کمانش الاستیک یا غیرالاستیک کرده و پس از آن با تشکیل باند تسلیم کششی در ناحیه میانی پانل جان به باربری نهایی خود می‌رسد. در لحظه متناظر با باربری نهایی مدل‌های با نسبت ابعادی کوچک‌تر، کمانش ناگهانی و کاهش شدید سختی مشاهده می‌شود. این در حالی است که در مدل‌های با نسبت ابعادی بزرگ‌تر و لاغری کمتر، پانل جان دارای شکل‌پذیری کافی بوده و کاهش تدریجی سختی رخ می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که نسبت عرض بال به ارتفاع جان بر حالت‌های خرابی تأثیر نمی‌گذارد. در شکل ۱۲، تشکیل باند تسلیم مورب با شیب تقریبی ۴۵ درجه در مدل‌های با نسبت ابعادی بزرگ‌تر مساوی ۱ کاملاً مشهود می‌باشد. این امر نشان‌دهنده امکان استفاده از مقاومت پس از کمانش در تیرورق‌های جدار نازک و بخصوص با لاغری زیاد خواهد بود. به عبارتی، به دلیل کمانش زودهنگام جان لاغر، بخش قابل توجهی از مقاومت نهایی تیرورق‌های با جان لاغر، ناشی از رفتار پس از تسلیم الاستیک یا غیرالاستیک آن خواهد بود. از طرفی، بررسی مد خرابی تیرورق‌های با نسبت ابعادی ۰/۵ نشان می‌دهد که این تیرها با تسلیم بخش قابل توجهی از ورق جان به باربری نهایی می‌رسند. علت این امر، عرض قابل توجه باند تسلیم کششی در این مدل‌ها خواهد بود؛ لذا، به نظر می‌رسد که تبیین مکانیزم مقاومت نهایی این مدل‌ها به کمک فرضیاتی نظیر مدل باسلر (به شکل ۲ مراجعه شود) میسر نخواهد بود. بررسی توزیع تنش در اجزای بال و جان مدل‌ها نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها فقط ورق جان تسلیم شده و هیچ‌گونه خرابی بر روی بال‌ها مشاهده نمی‌شود. همین امر مجدداً نشان‌دهنده این است که مقاومت نهایی تیرورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای را نمی‌توان به کمک مدل‌های موجود (شکل ۲) تعیین نمود و باید مدل جدیدی برای این تیرورق‌ها بسط داد.



شکل ۱۱: منحنی بار-تغییر مکان





شکل ۱۲: توزیع تنش ون مایسز در لحظه متناظر با باربری نهایی (مگاپاسکال)

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی مکانیزم خرابی برشی تیورق‌های با بال فشاری جعبه‌ای، تعداد ۷۵ مدل با نسبت ابعادی ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ و خصوصیات هندسی مختلف در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه‌سازی و تحلیل شد. نتایج اصلی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- مدل اجزای محدود توسعه داده شده در مقاله حاضر قابلیت استفاده جهت بررسی رفتار الاستیک، غیرالاستیک و پلاستیک تیورق‌های با بال جعبه‌ای را دارد.

- ۲- در تمامی مدلها، کمانش برشی الاستیک ورق جان در ناحیه میانی ورق جان و با زاویه تقریبی ۴۵ درجه رخ میدهد که ناشی از کمانش فشاری ورق جان تحت تنش فشاری در صفحات اصلی می باشد.
- ۳- با فرض رخداد رفتار الاستیک، تیورورق های با نسبت ابعادی بزرگ تر یا مساوی ۱ تغییر شکل های متقارن تری در نزدیکی بال های فوقانی و تحتانی دارند. این موضوع نشان دهنده رفتار مشابه و یکسان بال فشاری و کششی در تأمین قید دوران خارج از صفحه برای ورق جان است.
- ۴- استفاده از روابط آیین نامه های متداول (از جمله مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان) برای تعیین مقاومت نهایی تیورورق های با نسبت ابعادی کوچک تر (مدل با نسبت ابعادی ۰/۵) صحیح نخواهد بود. چرا که این روابط بر اساس مدل خرابی باسلر (شکل ۲) تعیین شده اند و تیرهای با نسبت ابعادی کوچکتر، مکانیزم خرابی متفاوتی نسبت به فرضیات روش باسلر دارند.
- ۵- در تیورورق های دارای جان لاغر، بخش قابل توجهی از مقاومت نهایی حاصل از رفتار پس از کمانش ورق جان خواهد بود.
- ۶- نتایج نشان می دهد که نسبت عرض بال به ارتفاع جان تأثیر قابل ملاحظه ای بر مد خرابی ندارد.
- ۷- مدل های با نسبت ابعادی بزرگ تر و لاغری کمتر رفتار شکل پذیرتری از خود نشان داده و کاهش سختی تدریجی دارند. این در حالی است که مدل های با نسبت ابعادی کوچک تر دچار کمانش ناگهانی و کاهش سختی شدید می شوند.

مراجع

- [1] Ghadami, A., Pourmoosavi, G., and Ghamari, A. (2021). Seismic design of elements outside of the short low-yield-point steel shear links. *Journal of Constructional Steel Research*, **178**, 106489.
- [2] Ghadami, A., and Pourmoosavi, G. H. (2022, June). Numerical investigation on the flange contribution in the shear strength of short LYP I-shaped links without intermediate stiffeners. In *Structures* (Vol. **40**, pp. 485-497). Elsevier.
- [3] Hassanein, M. F., and Kharoob, O. F. (2013). Flexural strength of hollow tubular flange plate girders with slender stiffened webs under mid-span concentrated loads. *Thin-Walled Structures*, **69**, 18-28.
- [4] Deng, H., Hassanein, M. F., Shao, Y. B., and He, J. (2022). Shear mechanism and design of small-scale tubular flange corrugated web girders. *Journal of Constructional Steel Research*, **197**, 107501.
- [5] Dong, J., and Sause, R. (2009). Flexural strength of tubular flange girders. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(3), 622-630.
- [6] Gao, F., Yang, F., Zhu, H., and Liang, H. (2021). Lateral-torsional buckling behaviour of concrete-filled high-strength steel tubular flange beams under mid-span load. *Journal of Constructional Steel Research*, **176**, 106398.
- [7] Hasan, Q. A., Badaruzzaman, W. W., Al-Zand, A. W., and Mutalib, A. A. (2017). The state of the art of steel and steel concrete composite straight plate girder bridges. *Thin-Walled Structures*, **119**, 988-1020.
- [8] Hassanein, M. F., and Kharoob, O. F. (2010). Shear strength and behavior of transversely stiffened tubular flange plate girders. *Engineering Structures*, **32**(9), 2617-2630.
- [9] Broujerdian, V., Mahyar, P., and Ghadami, A. (2015). Effect of curvature and aspect ratio on shear resistance of unstiffened plates. *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, 263-270.
- [10] ANSI, B. (2016). AISC 360-16, specification for structural steel buildings. *Chicago AISC*.
- [11] Hassanein, M. F., and Kharoob, O. F. (2013). Shear capacity of stiffened plate girders with compression tubular flanges and slender webs. *Thin-Walled Structures*, **70**, 81-92.
- [12] Hassanein, M. F. (2014). Shear strength of tubular flange plate girders with square web openings. *Engineering structures*, **58**, 92-104.
- [13] Hassanein, M. F. (2015). Fundamental behaviour of concrete-filled pentagonal flange plate girders under shear. *Thin-Walled Structures*, **95**, 221-230.

- [14] Shao, Y., and Wang, Y. (2017). Experimental study on static behavior of I-girder with concrete-filled rectangular flange and corrugated web under concentrated load at mid-span. *Engineering Structures*, **130**, 124-141.
- [15] Perera, N., and Mahendran, M. (2018). Section moment capacity tests of hollow flange steel plate girders. *Journal of Constructional Steel Research*, **148**, 97-111.
- [16] Deng, H., Shao, Y. B., and Hassanein, M. F. (2022). Experimental shear testing of corrugated web girders with compression tubular flanges used in conventional buildings. *Thin-Walled Structures*, **179**, 109557.
- [17] Basler, K. (1961). Strength of plate girders in shear. *Journal of the Structural Division*, **87**(7), 151-180.
- [17-18] Basler, K., Yen, B. T., Mueller, J. A., and Thurlimann, B. (1960). *WEB BUCKLING TESTS ON WELDED PLATE GIRDERS. PART 3: TESTS ON PLATE GIRDERS SUBJECTED TO SHEAR* (No. 251-13).
- [19] Lee, S. C., and Yoo, C. H. (1999). Experimental study on ultimate shear strength of web panels. *Journal of structural engineering*, **125**(8), 838-846.
- [20] Porter, D. M., KC, R., and HR, E. (1975). The collapse behaviour of plate girders loaded in shear.
- [21] Augustyn, K.E., Quiel, S.E., Garlock, M.E.M. (2022). Post-buckling shear resistance of slender girder webs: Stiffener participation and flange contributions, *J. Constr. Steel Res.* **190**, 107117.
- [22] Deng, L., Shao, Y., Liu, G., Wang, Z., Wu, C., and Wang, J. (2022). Investigation on local compressive performance of corrugated web I-girder with rectangular grouted tubular flange. *Thin-Walled Structures*, **179**, 109687.
- [23] Deng, L., Shao, Y., Jiang, D., Hassanein, M. F., and He, J. (2024). Elastic analysis of I-girders with tubular flange and corrugated web. *Journal of Constructional Steel Research*, **213**, 108407.
- [24] Naseria, A., and Ashtari, P. (2025). Seismic performance evaluation of Tubular Flange Beam (TFB) in moment resisting frames, *Struct. Eng. Mech. an Int. J.* **93**, 207-220.
- [25] Zhang, Y., Wang, X., Ji, S.-H. (2025). Flexural and shear behaviour of concrete-filled weathering steel tubular flange girders with local corrosion: Tests and numerical analysis, *J. Constr. Steel Res.* **232**, 109659.
- [26] Gheitasi, A., and Alinia, M. M. (2010). Slenderness classification of unstiffened metal plates under shear loading. *Thin-Walled Structures*, **48**(7), 508-518.
- [27] Garlock, M. E. M., and Glassman, J. D. (2014). Elevated temperature evaluation of an existing steel web shear buckling analytical model. *Journal of Constructional Steel Research*, **101**, 395-406.
- [28] Ghadami, A., Pourmoosavi, G. H., Talatahari, S., and Azar, B. F. (2021). Overstrength factor of short low-yield-point steel shear links. *Thin-Walled Structures*, **161**, 107473.
- [29] Fatemi Nasab, V., Shahabian, F. (2024), Shear strengthening of corroded Plate Girders, *J. Struct. Constr. Eng.* **11**, 238-259.
- [30] Alinia, M. M., Hosseinzadeh, S. A. A., and Habashi, H. R. (2007). Numerical modelling for buckling analysis of cracked shear panels. *Thin-Walled Structures*, **45**(12), 1058-1067.
- [31] Amani, M., Edlund, B. L. O., and Alinia, M. M. (2011). Buckling and postbuckling behavior of unstiffened slender curved plates under uniform shear. *Thin-walled structures*, **49**(8), 1017-1031.
- [32] Ghadami, A., and Broujerdian, V. (2019). Shear behavior of steel plate girders considering variations in geometrical properties. *Journal of Constructional Steel Research*, **153**, 567-577.
- [33] Ghadami, A., Jawdhari, A., and PourMoosavi, G. (2024). Buckling and post-buckling behavior of top flange coped I-beams with slender web panels. *Thin-Walled Structures*, **198**, 111640.
- [34] Ghadami, A., and Zare, N. (2024). Overstrength and Rotation Capacity of Short and Very Short Links Made of ASTM A992 Steel and Subjected to AISC 341-22 Loading Protocol. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-15.
- [35] Ghadami, A., and Broujerdian, V. (2019). Flexure-shear interaction in hybrid steel I-girders at ambient and elevated temperatures. *Advances in Structural Engineering*, **22**(6), 1501-1516.
- [36] Alinia, M. M., and Shirazi, R. S. (2009). On the design of stiffeners in steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(10-11), 2069-2077.

- [37] Amani, M., Alinia, M. M., and Fadakar, M. (2013). Imperfection sensitivity of slender/stocky metal plates. *Thin-Walled Structures*, **73**, 207-215.
- [38] Ghadami, A., and Pourmoosavi, G. (2023). The effect of heat-affected zone on the cyclic backbone curve of I-shaped LYP steel links. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **45**(6), 307.
- [39] Ghadami, A., and Pourmoosavi, G. (2024). An Experimentally Validated Numerical Model for Generating the Cyclic Backbone Curve of LYP Links. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **48**(6), 4489-4504.

