

مطالعه آزمایشگاهی رفتار سیکلی اتصال خمشی فولادی با مقاطع کاهش یافته (RBS) و جان موج دار دوزنقه‌ای

غلامرضا نوری^{۱*}، لیلا توکلی^۲، سید حسین حسینی لواسانی^۱، مصطفی نصیری^۲

۱- دانشیار، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

*r.nouri@khu.ac.ir، ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، صندوق پستی

چکیده

استفاده از جان موج دار به دلیل افزایش سختی خارج از صفحه و مقاومت کمانشی آن در طرح و ساخت تیرهای عمیق (تیر ورق) مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه رفتار و عملکرد اتصال خمشی مقطع کاهش یافته در بال (RBS) با جان موج دار دوزنقه‌ای به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای متغیر در مدل‌های ساخته شده، زاویه موج جان و میزان کاهش یافتگی بال تیر در اتصال خمشی تعریف شده است. دو نمونه آزمایشگاهی با زاویه جان ورق ۴۵ و ۳۰ درجه ساخته شدند. همچنین در نمونه دیگری مشخصات کاهش یافتگی در بال تیر با رعایت ضوابط طراحی تغییر داده شد. از پروتکل بارگذاری سیکلی AISC جهت آزمایش استفاده و حداکثر ۴۰ سیکل تا شکست نهایی اتصال بارگذاری گردید. نتایج نشان از پایداری نمونه‌ها از نظر کاهش سختی و افت مقاومت و قابل پذیرش بودن آنها مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ای دارد. کاهش سختی و افت مقاومت قابل توجهی در منحنی‌های هیستریزس تا مرحله گسیختگی اتصال‌ها مشاهده نگردید. براساس نتایج آزمایش‌ها، با کاهش زاویه موج جان، ظرفیت خمشی اتصال حدود ۱۰ درصد و میزان جذب انرژی نیز حدود ۲۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش شعاع انحنا و فاصله ابتدای کاهش یافتگی تا بر ستون حداکثر ظرفیت خمشی اتصال ۵ درصد کاهش می‌یابد. براساس مشاهدات و همچنین منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی ثبت شده، در هر سه نمونه چشمه اتصال رفتار خطی از خود نشان داد.

واژگان کلیدی

اتصال خمشی، تیر با جان موج دار، جان دوزنقه‌ای، اتصال تیر مقطع کاهش یافته

Experimental study on the cyclic behavior of trapezoidal corrugated-web RBS connections

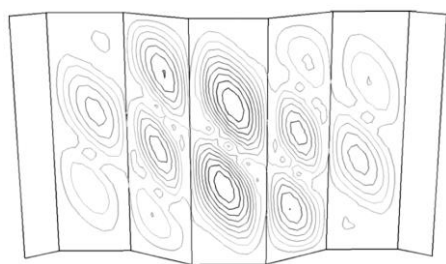
G.R. Nouri, L. Tavakoli, H. Hoseini Lavasani, M. Nasiri

Abstract

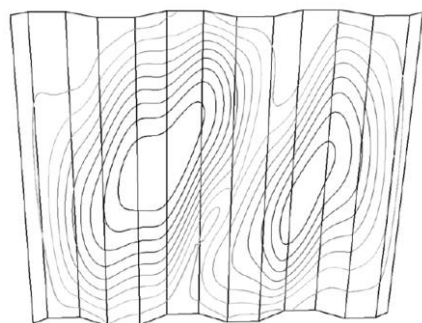
The use of corrugated-web has been considered due to the increase in off-plane stiffness and its buckling strength in the design and construction of deep beams. In this study, the performance of a moment resistant connection with reduced beam section (RBS) beam and trapezoidal corrugated web were investigated under cyclic loading. The variable parameters in the constructed models are defined as the corrugated web angle and the RBS parameters. Two specimens were made with corrugated sheet angle of 45 and 30 degrees. Also, in another sample, the RBS characteristics of the beam wing were changed in accordance with the design criteria. The AISC cycle loading protocol was used for testing and a maximum of 40 cycles were loaded until connection failure. The results show the stability of the specimens and their acceptability according to the regulations and no instability was observed in the hysteresis curves up to the point of failure of connections. According to the results of the experiments, by reducing the corrugated web angle, the bending capacity of the connection is reduced by about 10% and the amount of energy absorption is reduced by about 27%. Based on the observations as well as the recorded deformations, in all three specimens the panel zone showed linear behavior.

Keywords

Moment resistant connections, Corrugated-web, Trapezoidal corrugated-web, RBS connections



الف) کمانش موضعی



ب) کمانش کلی

شکل ۱- کمانش ورق‌های موج‌دار [۱]

دوزنقه‌ای را بر اساس معادله اندرکنشی کمانشی پیشنهاد داد. همچنین، رابطه دیگری برای به حداکثر رساندن ظرفیت کمانش برشی جان موج‌دار با صفحات منحنی ارائه داد [۶]. Wang و Wang (۲۰۱۴) به بررسی ارزیابی خستگی اتصالات جوشی جان‌های فولادی موج‌دار به صفحات بال پرداخت. زوایای موج صفحات جان در این مطالعه بین ۳۰ تا ۶۰ درجه در نظر گرفته شدند تا تنش اصلی در جهت طولی متفاوت باشد. پس از مطالعات پارامتریک برای یافتن اثر هندسی تمرکز تنش در امتداد پای جوش به روش المان محدود، نقطه بحرانی خستگی در قسمت قوسی اتصال با توجه به زاویه مرکزی انحنا و نسبت شعاع آن به عمق موج مورد مطالعه قرار گرفت [۷].

۲- اتصالات با جان موج‌دار و مقطع کاهش یافته

Deylami و Moslehi Tabar (۲۰۱۳) مطالعات گسترده‌ای را بر روی ارتقاء رفتار چرخه‌ای کمانش موضعی جان تیر در اتصالات گیردار با سطح مقطع کاهش یافته انجام داده و جزئیات جدیدی را به منظور افزایش عملکرد اتصال RBS با به تأخیر انداختن کمانش موضعی جان تیر، پیشنهاد کردند [۸]. Mirghaderi و همکارانش (۲۰۰۸) به بررسی اثر ایجاد کاهش یافتگی تیر در قسمت جان توسط دو مقطع جدید مربع و دوزنقه‌ای شکل (شکل ۲) پرداختند و نشان دادند این تضعیف عمده‌ی در جان تیر باعث بهبود پایداری اتصال می‌شود. براساس نتایج اثر این

صفحات فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای از یک سری صفحه و زیرصفحه کرکره‌ای تشکیل شده‌اند. ویژگی اصلی این صفحات ظرفیت خمشی کم و سختی خارج از صفحه‌ی کافی آن‌ها است. این صفحات موج‌دار می‌توانند به عنوان یک جایگزین به جای بتن یا جان‌های فولادی مسطح استفاده شوند. هنگامی که از صفحات موج‌دار در جان استفاده می‌شود جان تیر نیروهای برشی عمودی را تحمل می‌کنند و بال‌ها وظیفه تحمل لنگر را به خاطر اثر آکاردئونی دارا می‌باشند. استفاده از این نوع جان فولادی با بال‌های بتنی پیش‌تنیده نخستین بار در فرانسه و پس از آن در ژاپن رایج شد [۱]. چنین مقاطعی می‌تواند به‌طور گسترده در شاه‌تیر جرثقیل سازه‌های فولادی صنعتی نیز استفاده شود. ظرفیت کمانش پیچشی-جانبی شاه‌تیر جرثقیلی را که معمولاً به عنوان مقاطع غیرممتقارن استفاده می‌شود، به خصوص برای بال فشرده بدون تکیه‌گاه، می‌توان با استفاده از جان موج‌دار بهبود بخشید [۲]. ضخامت جان در این تیرها نسبت به تیرهای با جان ساده به مراتب کمتر بوده و نیازی به استفاده از صفحات سخت‌کننده نیست. به همین دلیل کاربرد تیرهای با جان موج‌دار بسیار اقتصادی است. وزن تیرهای با جان موج‌دار می‌تواند ۳۰٪ کمتر از وزن تیرهای با جان مسطح با همان ظرفیت استاتیکی باشد. نتیجه این‌که کاهش سطح مقطع و ضخامت کاهش هزینه ساخت کل سازه را در پی دارد [۳]. همچنین استفاده از این صفحات در جان شاه‌تیرهای I شکل سبب می‌شود که معایب جان‌های معمولی با سخت‌کننده مانند کمانش جان به علت تنش خمشی را نداشته و در عوض مقاومت بالایی را در برابر خستگی با به حداقل رساندن فرآیند جوشکاری فراهم کنند [۴]. بسته به ویژگی‌های هندسی جان موج‌دار، سه حالت مختلف کمانش برشی، شامل کمانش موضعی، کمانش کلی و کمانش اندرکنشی امکان‌پذیر است. کمانش موضعی نشان‌دهنده کمانش یک زیرصفحه است، در حالی‌که کمانش کلی، کمانش کل جان است. کمانش اندرکنشی، که شامل چند زیرصفحه است، با توجه به اندرکنش کمانش موضعی و کلی رخ می‌دهد (شکل ۱). پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که شکست کمانشی جان موج‌دار عمدتاً توسط کمانش برشی اندرکنشی ایجاد و کنترل می‌شود. با این حال، علل کمانش برشی اندرکنشی به وضوح تعریف نشده‌اند و در بسیاری از پژوهش‌ها مقاومت کمانش برشی نادیده گرفته می‌شود [۴ و ۵].

Eldib (۲۰۰۹) ضریب کمانش اندرکنشی برشی و پارامترهای کمانشی برشی برای جان‌های فولادی موج‌دار

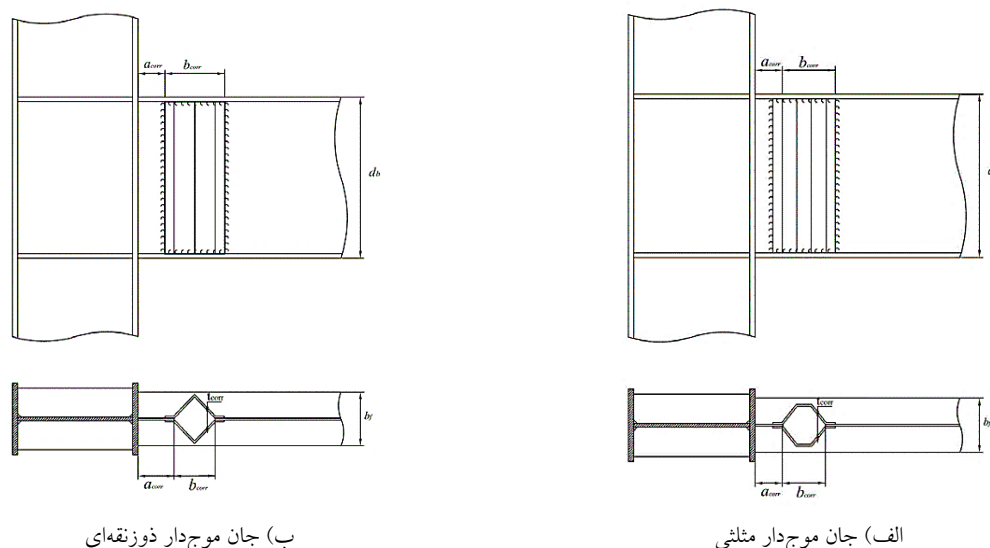
اتصال در تیرهای عمیق بیشتر است [۹].

Mirghaderi و همکارانش (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای عددی و آزمایشگاهی اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش یافته توسط جان موج‌دار را ارزیابی کردند. در مطالعه دو ورق L شکل به صورت متقارن نسبت به صفحه جان به عنوان ورق موج‌دار در نظر گرفته شده است که به جای جان حذف شده در اتصال اجرا می‌گردند. مقطع ایجاد شده Accordion Web RBS ACCORDING (AW-RBS) نام‌گذاری گردید (شکل (۳)). نمودار چرخه‌ای این اتصال بدون کاهش مقاومت تا تغییر مکان نسبی ۸٪ ستون همراه بوده است [۱۰].

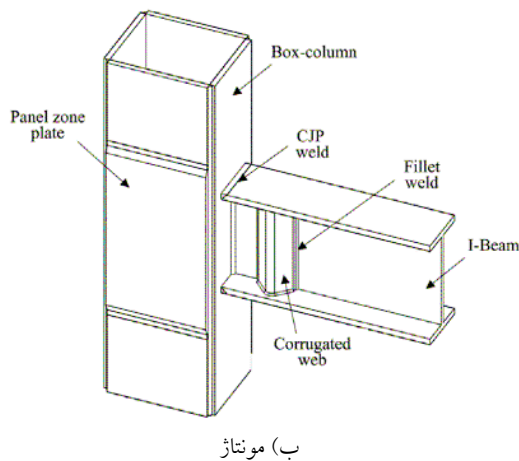
Saleh و همکارانش (۲۰۱۶) با ایجاد برش در جان پیوسته تیر و قرار دادن یک لوله به جای آن مدل جدیدی از اتصال با مقطع کاهش یافته را ارائه و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از جان آکاردئونی لوله‌ای شکل به دلیل کاهش مقاومت خمشی در اثر حذف جان باعث ایجاد مفصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته می‌گردد، به طوری که سایر اجزاء و اتصال تیر به ستون در امنیت نیرویی و تقاضای تغییر شکلی قرار می‌گیرند. با توجه به این که استفاده از ورق‌های موج‌دار در جان تیر باعث بهبود ناپایداری کماتش پیچشی- جانبی می‌گردد و سختی زیاد خارج از صفحه این اتصال در محل مفصل پلاستیک و کاهش عرض آزاد بال تیر به دلیل محدود شدن به لوله، پارامترهای مرتبط با پایداری مفصل پلاستیک را بهبود می‌دهد، استفاده از جان آکاردئونی لوله‌ای

شکل در جان تیر آهن نسبت به سایر اتصالات با مقطع کاهش یافته از جمله RBS پایداری بهتری ایجاد می‌کند [۱۱]. هم‌چنین Saleh و همکارانش (۲۰۱۶) به مطالعه تجربی و عددی یک مدل ابتکاری با لوله در جان ساده تیرهای کم عمق پرداختند. در این مطالعه، نیز نوع جدیدی از اتصالات با مقطع کاهش یافته تحت عنوان اتصال با جان لوله‌ای ارائه گردیده است که در آن با جایگزینی جان صاف تیر با لوله در ناحیه محدودی در نزدیکی ستون، مشارکت جان تیر در مقاومت خمشی مقطع با به‌کارگیری رفتار آکاردئونی شکل می‌گیرد. نتایج نشان داد در تمامی نمونه‌ها مفصل پلاستیک در محل پیش بینی شده دارای جان لوله‌ای و دور از وجه ستون تشکیل می‌گردد و کلیه نمونه‌ها از رفتار چرخه‌ای پایدار قابل اطمینانی برخوردارند [۱۲].

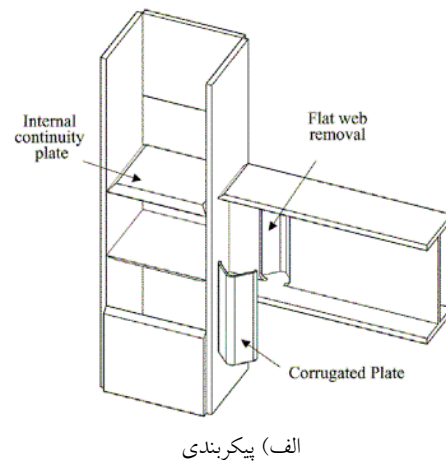
Zahrai و همکارانش (۲۰۱۷) طی بررسی تحلیلی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از دو نوع اتصال قاب خمشی ویژه مبتنی بر جان آکاردئونی با نام TW-RBS و AW-RBS به این نتیجه رسیدند که اگر چه هر دو اتصال از ضوابط پذیرش اتصال برخوردارند ولیکن استفاده از جان لوله‌ای، موجب نرم‌شدن رفتار آکاردئونی نسبت به دیگر جان‌های آکاردئونی می‌گردد. نتایج نشان داد که استفاده از TW-RBS نه تنها یک فیوز انعطاف‌پذیر را به دور از اجزای اتصال ستون ایجاد می‌کند، بلکه باعث افزایش ظرفیت دررفت طبقه تا ۹ درصد می‌شود [۱۳].



شکل ۲- مدل ارائه شده توسط Mirghaderi و همکارانش (۲۰۰۸) [۹]



(ب) مونتاژ



(الف) پیکربندی

شکل ۳- مدل آزمایشگاهی Mirghaderi و همکارانش (۲۰۱۰) [۱۰]

پیش‌تنیده، روش ساخت طره‌ای غیرهمزمان جدیدی برای شاه‌تیر جعبه‌ای مرکب با جان‌تیر فولادی موج‌دار در پلی با سه دهانه به ترتیب ۷۲، ۱۳۰ و ۷۲ متر، پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که روش ساخت طره‌ای غیرهمزمان پیشنهادی ساده است، دارای مدت زمان ساخت کوتاه و بازده اقتصادی بالا است و این روش به مراتب برتر از روش ساخت طره‌ای متعارف است [۱۶]. مکانیزم شکست تیرهای فولادی با جان موج‌دار دوزنقه‌ای جدار نازک (SBCW) توسط Elamary و همکارانش (۲۰۲۰) به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. این مطالعه تأثیر مشخصات ورق‌های مایل جان (IF) شامل طول تاخوردگی افقی و سخت‌کننده‌های بال عرضی را بر مکانیسم خرابی SBCW تحت بار سه محوره متمرکز با شش نمونه مورد بررسی قرار داد. نتایج بیانگر این بود که عدم جوشکاری IF بر رفتار غیرکششی و ظرفیت SBCW تأثیر می‌گذارد. هم‌چنین روابط مقاومت در برابر خمش ارائه شده توسط EN 1993-1-5 با اطمینان می‌تواند نتایج آزمون چین خوردگی مایل غیر جوش داده شده را پیش‌بینی کند [۱۷]. Zhang و همکارانش (۲۰۲۰) با رویکرد نظری و با استفاده از میدان تنش چرخشی، روشی را برای تحلیل وضعیت تنش در تیرهای دارای شبکه‌های فولادی موج‌دار تحت برش پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی توانست مقاومت برشی تعیین شده توسط رفتار کمناش برشی را به صورت تئوری توصیف نماید. آن‌ها برای بررسی عملکرد پس از کمناش و مکانیسم‌های شکست نهایی تیرهای دارای شبکه‌های فولادی موج‌دار (CSWG)، بر روی ۲۴ نمونه تیر I شکل، آنالیزهای غیرخطی انجام دادند. سیستم عملکرد پس از کمناش، متشکل از یک سیستم قابی شامل ناحیه کشش در جان، فلنچ‌ها و سخت‌کننده‌ها است. با تشکیل مفاصل پلاستیک در فلنچ‌ها،

Liu و همکارانش (۲۰۱۹) مقاومت برشی تیرهای فولادی با جان موج‌دار دوزنقه‌ای را در تیروورق‌های دارای انحنا مورد بررسی قرار دادند. تیر فولادی با جان موج‌دار در تیروورق‌های خمیده افقی را به عنوان یک پوسته استوانه‌ای ارتوتروپیک کم‌عمق در نظر گرفته و رابطه تحلیلی برای تنش کمناش برشی کلی الاستیک با استفاده از روش گالرکین به دست آوردند و جداول محاسبه برای ضریب کلی کمناش برشی را برای سه نمونه که به ترتیب دارای تکیه‌گاه ساده در چهار طرف، تکیه‌گاه گیردار در چهار طرف و برای دو لبه مقید شده توسط فلنچ‌های گیردار و دو لبه دیگر ساده مورد بررسی قرار دادند. سپس مطالعه پارامتریکی براساس تحلیل کمناش خطی برای بررسی تأثیر شعاع انحنا و دهانه تیر بر تنش کمناش برشی انجام شد. نتایج بررسی تحلیلی و عددی نشان داد که تفاوت تنش کمناش برشی بین تیر ورق‌های خمیده و تیروورق‌های مستقیم کم است، بنابراین روابط طراحی برشی برای تیر ورق‌های مستقیم را می‌توان برای تیر ورق‌های خمیده به کار برد [۱۴]. Feng و همکارانش (۲۰۱۹) روش تحلیلی بهبود یافته‌ای (IAM) برای محاسبه ویژگی‌های دینامیکی تیر جعبه‌ای مرکب با جان‌های موج‌دار (CBBCW) پیشنهاد دادند. در آن مطالعه فرکانس‌های طبیعی چند تیر جعبه‌ای مرکب با جان موج‌دار با دهانه‌های مختلف، درجات اتصال برشی و شرایط مرزی متفاوت محاسبه شده و با نتایج محاسبه شده بوسیله روش المان محدود و نظریه تیر عمومی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد اثر لنگی برشی در تیرهای جعبه‌ای مرکب با جان‌های موج‌دار معمولاً کمتر از اثر لنگی برشی تیر جعبه‌ای ترکیبی معمولی با همان ضخامت جان است [۱۵]. Wang و همکارانش (۲۰۲۰) به منظور ترویج به‌کارگیری تیرهای جعبه‌ای جان موج‌دار فولادی با بتن

شاه تیرها فرو می‌ریزند و مکانیسم‌های احتمالی ریزش، شامل مکانیسم شبه مقاطع میانی، مکانیزم مقاطع میانی و مکانیزم شاه‌تیر هستند. میزان مقاومت برشی باقیمانده پس از کمانش و مکانیسم فروپاشی، به طور قابل توجهی، تحت تأثیر سختی خم شدن فلنج و نسبت عرض به ارتفاع جان است [۱۸].

شاه‌تیرهای با جان موج‌دار (CWG) به دلیل مقاومت برشی بالا در مقایسه با شاه‌تیرهای I شکل با جان مسطح همراه با سخت کننده عرضی (IPG) به طور گسترده‌ای به عنوان شاه‌تیرهای پل مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین سختی خارج از صفحه شاه‌تیرهای با جان موج‌دار مقاومت کمانش جانبی-پیچشی آن‌ها را افزایش می‌دهد. با این حال نمی‌توان با اطمینان گفت که سختی خارج از صفحه شاه‌تیرهای با جان موج‌دار بالاتر از IPG است. Shao و همکارانش (۲۰۲۱) بر اساس دو روش به تحلیل کمانش الاستیک شاه‌تیرهای با جان موج‌دار، با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداختند. این تحقیق نشان داد که شاه‌تیرهای با جان موج‌دار همیشه در مقایسه با IPG‌های معادل خود، از سختی خارج از صفحه بالاتری برخوردار نیستند [۱۹].

Zhou و An (۲۰۲۰) به صورت آزمایشگاهی و عددی رفتار برشی یک تیر غیرمنشوری، با دال بتنی و تیرهای با جان موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد این فرضیه مرسوم که جان‌تیرهای موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی در برابر برش عمودی کل در یک مقطع مقاومت می‌کنند، برای اعضای غیر منشوری کاربردی نیست. دال بتنی انتهایی مورب، بخش قابل توجهی از نیروی برشی را در ناحیه‌ای با لنگر خمشی منفی بزرگتر، به اشتراک می‌گذارد؛ بنابراین، نیروی برشی واقعی تجربه شده در جان‌تیرهای موج دار دوزنقه‌ای فولادی، کاهش می‌یابد. فاکتور غالب باز توزیع نیروی برشی بین دال‌های بتنی و جان‌های موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی، اثر ریسال بود، که یکی از عوامل مهم تفاوت رفتار برشی بین تیرهای منشوری و غیر منشوری با جان تیرهای موج دار دوزنقه‌ای است. آزمایش هم چنین نشان داد که ترک خوردگی و خرد شدن دال‌های بتنی، عامل مهم موثر دیگری بر ظرفیت باربری نهایی تیر آزمایش شده است. یافته قابل توجه این بود که کمانش برشی جان تیرهای موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی، در مقطع تکیه‌گاه رخ نداد، اگرچه این مقطع حداکثر نیروی برشی و لنگر خمشی و بالاترین عمق مقطع را داشت، به دلیل اثر ریسال، حداکثر تنش برشی و کمانش برشی در جان‌تیرهای موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی، در فاصله مشخصی از تکیه‌گاه قرار گرفتند [۲۰]. Wang و همکارانش

(۲۰۲۱) به بررسی کمانش برشی موضعی الاستیک جان موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی (TCSW) با لبه‌های گیردار با استفاده از روش‌های اجزا محدود پرداختند و توانستند یک روش بهبود یافته برای محاسبه تنش کمانش موضعی در تیرهای موج‌دار دوزنقه‌ای فولادی ارائه دهند. روش ساده ارائه شده توسط این مطالعه به خوبی با نتایج تجزیه و تحلیل عددی و روش‌های محاسبه قبلی هنگامی که کمانش توسط کمانش موضعی کنترل می‌شود، مطابقت دارد. همچنین پیشنهادی برای تنش کمانش برشی و ضریب لاغری کمانش برای تیرهای TCSW تحت تأثیر کمانش موضعی داده شده است. نتایج آزمون هم چنین نشان می‌دهد که نسبت لاغری پیشنهادی کمانش ارتباط زیادی با مقاومت برشی نرمال شده دارد [۲۱].

تیرهای مورد استفاده در اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) تاکنون تیرهای معمول و مورد استفاده در اکثر سازه‌های متداول بوده، ولیکن ترکیب تیر با مقطع بال کاهش یافته و ورق‌های جان فولادی موج‌دار تاکنون در مطالعات انجام نگرفته است و ویژگی این مطالعه ترکیب هردو مورد می‌باشد.

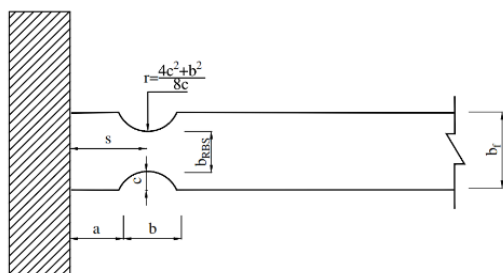
در این مطالعه جهت بررسی عملکرد رفتار اتصال خمشی با جان موج‌دار، سه نمونه اتصال مطابق ضوابط و استانداردهای آیین‌نامه‌ای ساخته و کنترل‌های مربوطه برای ساخت مقاطع صورت گرفت. بال این نمونه‌ها همگی از نوع کاهش یافته و جان نمونه‌ها از نوع موج‌دار دوزنقه‌ای می‌باشد. مقایسه نمونه‌ها بدین صورت است که نمونه اول و دوم دارای جان موج‌دار با زاویه ۴۵ درجه بوده و تمام مشخصات جان و بال در هر دو نمونه یکسان است و تغییرات فقط در ناحیه کاهش یافته بال ایجاد گردیده است. نمونه اول و سوم دارای بال با مشخصات کاهش یافتگی یکسان و زاویه جان موج‌دار در نمونه سوم به ۳۰ درجه کاهش یافته است. هر سه این نمونه‌های آزمایشگاهی تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای آیین نامه AISC و جک هیدرولیکی با ظرفیت ۴۰۰ کیلو نیوتن در فشار و کشش با دامنه رفت و برگشت ۱۵۰ میلی‌متر قرار گرفته است. ظرفیت باربری و رفتار اتصال‌ها با تغییر مشخصات اتصال به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳- طراحی و انتخاب مقطع

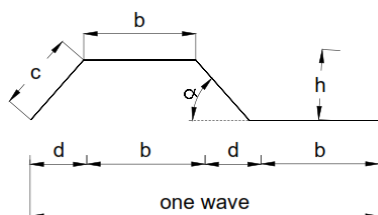
برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصال پیشنهادی و همچنین بررسی رفتار کلی و موضعی اتصال RBS با جان موج دار، سه نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. در نمونه‌های ساخته شده، ستون در جهت قوی مقطع قرار گرفته و تیرها به آن متصل



کاهش یافته و شعاع انحنای کاهش یافته در بال تیر است و همچنین d تصویر افقی پانل مورب، b پانل افقی، c پانل مورب، rh ارتفاع جان و α زاویه بین دو پانل افقی و مورب می باشد.



الف) بال مقطع کاهش یافته



ب) جان موج دار

شکل ۵- مشخصات اتصال

جدول ۱- مشخصات ابعادی ورق موج دار جان تیر و بال اتصال با مقطع یافته

نمونه	مشخصات تیر فولادی (سانتی متر)				مشخصات کاهش یافتگی بال تیر فولادی (سانتی متر)			
	t_{bf}	b_{bf}	t_{bw}	h_{bw}	a	b	c	s
اول	۱۲	۰/۶	۱۲	۲۲	۹	۱۹	۳	۱۹
دوم	۱۲	۰/۶	۱۲	۲۲	۶	۱۶	۳	۱۴
سوم	۱۲	۰/۶	۱۲	۲۲	۹	۱۹	۳	۱۹
نمونه	مشخصات جان موج دار تیر فولادی (سانتی متر)				مشخصات ورق موج دار جان تیر (سانتی متر)			
	t_f	b_f	tw	hw	d	b	c	h_r
اول	۱	۱۲	۰/۶	۲۲	۵	۱۰	۷	۵
دوم	۱	۱۲	۰/۶	۲۲	۵	۱۰	۷	۵
سوم	۱	۱۲	۰/۶	۲۲	۵	۱۰	۷	۳/۵

۴- پیکربندی و بارگذاری آزمایش و نتایج بارگذاری

شرایط نمونه های تحت آزمایش و همچنین شرایط سرحدی نمونه های مورد آزمایشگاهی به نحوی در نظر گرفته شد که طی اعمال بارگذاری، نمونه ها تحت تغییرشکل هایی قرار گیرند که

شدند. تناسب بندی نمونه ها بر اساس بیشترین ظرفیت بار و حداکثر تغییر مکان جک و مقاومت مورد انتظار تیر انجام گرفت و همچنین معیار ستون قوی-تیر ضعیف برای تضمین مکانیزم مفصل پلاستیک تیر، ارضا گردید.

جهت ایجاد جان موج دار در جان تیر، ابتدا جان تیر با استفاده از دستگاه پرس به اندازه و زاویه مورد نظر ساخته شد و توسط جوش نفوذی قطعات ورق به هم جوش داده شدند. سپس ورق های موج دار آماده شده با جوش گوشه به بال تیر متصل گردیدند. پس از ساخت تیرهای با جان موج دار، بال ها و جان به وسیله جوش نفوذی به وجه ستون متصل شدند. پس از اتمام فرآیند جوش کاری به منظور کسب اطمینان از کیفیت آن، کلیه جوش های گوشه به صورت چشمی و جوش های نفوذی نیز با استفاده از روش غیرمخرب امواج فراصوتی توسط بازرس مجاز جوش آزمایش گردیدند (شکل ۴). تمامی قطعات شامل تیر، ستون ورق های پیوستگی و ورق های موج دار از فولاد ST37 با مقاومت تسلیم اسمی ۲۴۰ مگاپاسکال انتخاب شدند.



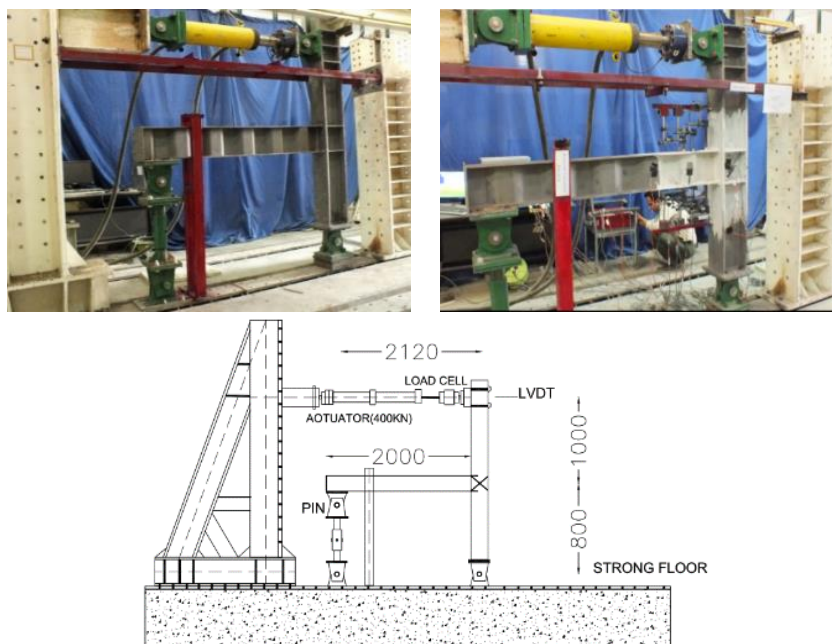
شکل ۴- نمونه اتصال ساخته شده جهت آزمایش

بال و جان تیرها به ترتیب از ورق ۱۲۰×۱۰ و ۲۲۰×۶ میلی متری و ستون ها از مقطع ۲۰۰×۲۰ (بال ها)، ۲۰۰×۲۰ (جان) میلی متری ساخته شدند و ورق های پیوستگی داخلی با ابعاد $۹۰ \times ۲۰ \times ۱۰$ میلی متر در داخل ستون و در امتداد بال های تیر قرار گرفت. در جان موج دار نمونه آزمایشگاهی اول و دوم از ورق های دوزنقه ای شکل با زاویه موج ۴۵ درجه و در نمونه سوم از زاویه موج ۳۰ درجه استفاده گردید.

در شکل (۵) و جدول (۱) مشخصات میزان کاهش یافتگی در بال تیرهای مورد استفاده و همچنین مشخصات ورق موج دار در مدل های ساخته شده مشاهده می گردد که به ترتیب، فاصله ابتدای ناحیه کاهش یافتگی تا بر ستون طول ناحیه کاهش یافتگی و پارامتر عمق میزان کاهش یافتگی درون بال تیر می باشند. پارامترهای r و نیز به ترتیب فاصله بر ستون تا نیمه ناحیه

غلطکی با استفاده از دو مفصل که یکی به انتهای تیر متصل شده و دیگری بر روی کف صلب آزمایشگاه قرار دارد و توسط یک عضو رابط به یکدیگر متصل شده‌اند، فراهم گردیده و همچنین در انتهای ستون یک تکیه گاه مفصلی قرار داده شده است.

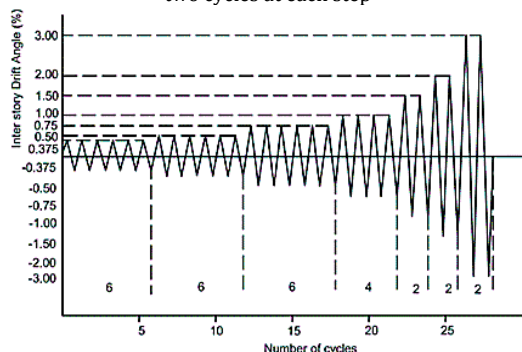
مشابه تغییر شکل‌های اعضای یک قاب خمشی تحت بار جانبی باشد. در شکل (۵) پیکربندی آزمایش، قاب صلب آزمایشگاه، جک هیدرولیکی و لود سل به همراه تصویر یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی دیده می‌شود. در انتهای تیرها شرایط تکیه‌گاه



شکل ۵- نمای کلی از نمونه آزمایشگاهی و نحوه مقید شدن و بارگذاری محوری مدل (ابعاد به میلی‌متر)

Number of cycles, n	Peak deformation	Load step
۶	۰/۰۰۳۷۵	۱
۶	۰/۰۰۵۰۰	۲
۶	۰/۰۰۷۵۰	۳
۴	۰/۰۱۰۰۰	۴
۲	۰/۰۱۵۰۰	۵
۲	۰/۰۲۰۰۰	۶
۲	۰/۰۳۰۰۰	۷

Continue with increments in θ of 0.01, and perform two cycles at each step



شکل ۶- مشخصات و الگوی بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های مورد آزمایش

جک هیدرولیکی با ظرفیت ۴۰۰ کیلونیوتن و با حداکثر دامنه تغییر مکانی رفت و برگشتی ۱۵ سانتی‌متر، تغییرمکان چرخه‌ای را به سر آزاد ستون اعمال می‌کند. همچنین به منظور جلوگیری از ناپایداری خارج از صفحه نمونه‌ها، از مهارکننده‌های جانبی در فاصله‌های مناسب استفاده گردید. تاریخچه بارگذاری طبق الگوی استاندارد پیشنهاد شده توسط آیین نامه AISC انتخاب شد. این تاریخچه که به صورت چرخه-ای دو طرفه افزایش یابنده می‌باشد، به شیوه کنترل تغییرمکان و بر مبنای زاویه تغییر مکان نسبی طبقه به مدل‌ها اعمال گردید.

تاریخچه بارگذاری پیشنهادی AISC با اعمال شش سیکل متوالی برای ۰/۰۳۷۵٪، ۰/۰۵٪ و ۰/۰۷۵٪ زاویه تغییر مکان نسبی طبقه شروع و سپس چهار سیکل با بیشینه زاویه تغییر مکان نسبی طبقه ۱٪ و با اعمال دو سیکل بارگذاری برای هر افزایش زاویه تغییر مکان نسبی طبقه به اندازه ۱٪ ادامه می‌یابد (شکل ۶). محل اعمال بارگذاری نوک ستون می‌باشد. بارگذاری چرخه‌ای به شیوه نیمه استاتیک (کنترل دستی نیرو و جابجایی) و در مود کنترل تغییرمکان با نرخ کم به نمونه‌های آزمایشگاهی اعمال می‌گردد.



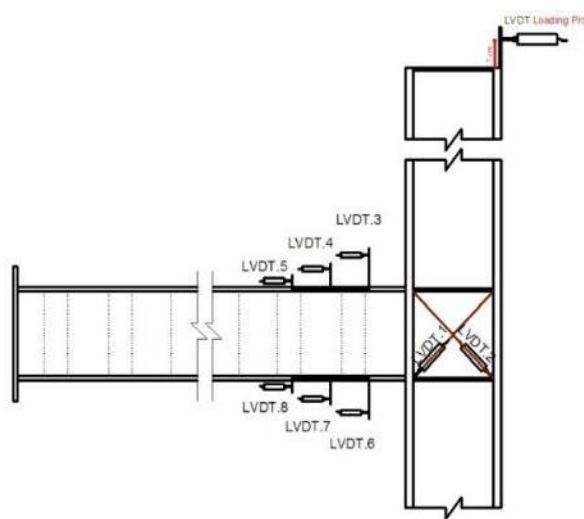
۵-۱- مقایسه کیفی و مشاهدات عینی

مشاهدات عینی صورت گرفته در آزمایش‌ها نشان داد که الگوی خرابی در هر سه نمونه با تسلیم در بال تیر در ناحیه کاهش یافته در دوران ۴٪ شروع و با افزایش زاویه دوران گسترش یافت. در جدول (۲) خلاصه مشاهدات سه نمونه آزمایشگاهی در گام‌های مختلف بارگذاری برای جان و بال تیر جمع‌بندی شده است. در مقایسه عملکرد کلی نمونه‌ها مشاهده گردید در نمونه شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در سیکل ۴۰، ۳۸ و ۴۰ حدود ۳۰٪ افت مقاومت اتفاق افتاد که نشان دهنده عملکرد بهتر نمونه شماره ۱ نسبت به سایر نمونه‌ها است.

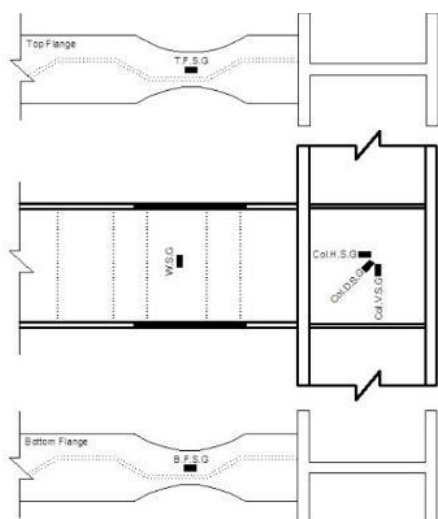
در شکل‌های (۷) و (۸) موقعیت قرارگیری جابه‌جایی سنج‌ها (LVDT) و همچنین کرنش سنج‌ها (Strain gauge) مشخص گردیده است. جهت مطالعه کرنش جان ستون در چشمه اتصال از یک کرنش سنج ۳ محوره ۵ میلی‌متری YEFA-5 محصول شرکت TML ژاپن و برای مطالعه کرنش بال‌های تیر در محل کاهش یافتگی از یک کرنش سنج تک محوره ۵ میلی‌متری FLA-5 استفاده گردیده است.

۵- مقایسه عملکرد نمونه‌های آزمایشگاهی

مقایسه نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی در دو بخش مقایسه کیفی و مشاهدات عینی و مقایسه کمی انجام شده است.



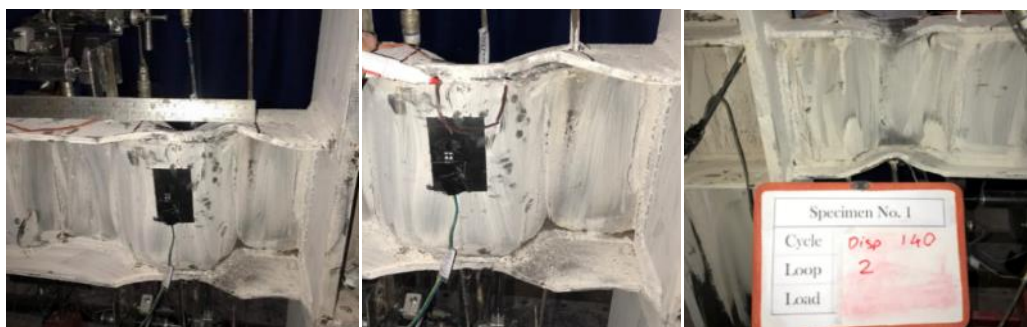
شکل ۷- موقعیت نصب جابه‌جایی سنج‌های (LVDT) نمونه‌های آزمایشی



شکل ۸- موقعیت کرنش سنج‌های نصب شده در نمونه

جدول ۲- خلاصه مشاهدات عینی نمونه‌های آزمایشگاهی در گام‌های مختلف بارگذاری (شکل ۹)

میزان دوران/سیکل بارگذاری	موقعیت	شماره نمونه	توصیف وضعیت خرابی
سیکل ۳۲ بارگذاری ۵٪	جان تیر	۱	نشانه‌ای از ناپایداری، شکست و یا تسلیم مشاهده نگردید.
		۲	
		۳	
	بال تیر	۱	کمانش جزئی در بال بالای تیر در جلو و عقب در محدوده کاهش یافتگی مشاهده گردید و در بال پایین اتفاق خاصی پدید نیامد.
		۲	کمانش جزئی در جلوی بال بالای تیر در محدوده کاهش یافتگی و دربال پایین در پشت نمونه کمانش جزئی پدید آمد.
		۳	کمانش در بال بالا در مرکز کاهش یافتگی در سمت دیگر بال به صورت متقارن.
سیکل ۳۴ بارگذاری ۶٪	جان تیر	۱	نشانه‌ای از تسلیم در جان موج‌دار مشاهده نگردید.
		۲	
		۳	
	بال تیر	۱	گسترش کمانش در بال بالا در ناحیه تضعیف شده-تسلیم در جوش‌های بال تیر مشاهده نگردید.
		۲	
		۳	
سیکل ۳۶ بارگذاری ۷٪	جان تیر	۱	نشانه‌ای از تسلیم در جان موج‌دار مشاهده نگردید.
		۲	نشانه‌ای از تسلیم در جان موج‌دار مشاهده نگردید.
		۳	افت نیرو حدود ۳۰٪ - ادامه بارگذاری جهت مشاهده رفتار اتصال
	بال تیر	۱	گسترش کمانش در بر بال بالا- شروع کمانش در بال پایین
		۲	تغییر شکل عمیق در پشت و جلوی بال‌های بالا ایجاد گردید و دو LVDT از مدار خارج گردید.
		۳	افت نیرو حدود ۳۰٪ - برای مشاهده ادامه تغییر شکل LVDTها باز و بارگذاری ادامه یافت.
سیکل ۳۸ بارگذاری ۸٪	جان تیر	۱	شروع کمانش در جان تیر
		۲	افت نیرو حدود ۳۰٪ - شروع کمانش در جان تیر
		۳	شروع کمانش در جان تیر
	بال تیر	۱	ادامه گسترش ناحیه تضعیف شده تیر در بال بالا و پایین
		۲	افت نیرو حدود ۳۰٪ - گسترش تغییرات در ناحیه تضعیف شده تیر در بال بالا و پایین
		۳	ایجاد گسیختگی دربال پایین در پشت نمونه - شکست جوش در پشت بال بالا
سیکل ۴۰ بارگذاری ۹٪	جان تیر	۱	افت نیرو حدود ۳۰٪ - کمانش جزئی در جان تیر
		۲	
		۳	
	بال تیر	۱	افت نیرو حدود ۳۰٪ افت - ترک خوردگی در جوش اتصال جان موج‌دار به بال بالا در پشت مقطع. طول مفصل پلاستیک ۱۴ سانتی‌متر (شکل ۹)
		۲	ایجاد ترک در بال پایین در پشت نمونه - شکست جوش در پشت بال بالا
		۳	ایجاد شکست دربال بالا و پایین در بال تیر در ناحیه کاهش یافتگی



الف) نمونه اول در سیکل ۴۰



ب) نمونه دوم در سیکل ۳۸



ج) نمونه سوم در سیکل ۳۶



د) تغییر شکل و تشکیل مفاصل در مقطع کاهش یافته بال

شکل ۹- تغییر شکل نمونه‌ها

۲-۵- بررسی رفتار اتصالات با منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران

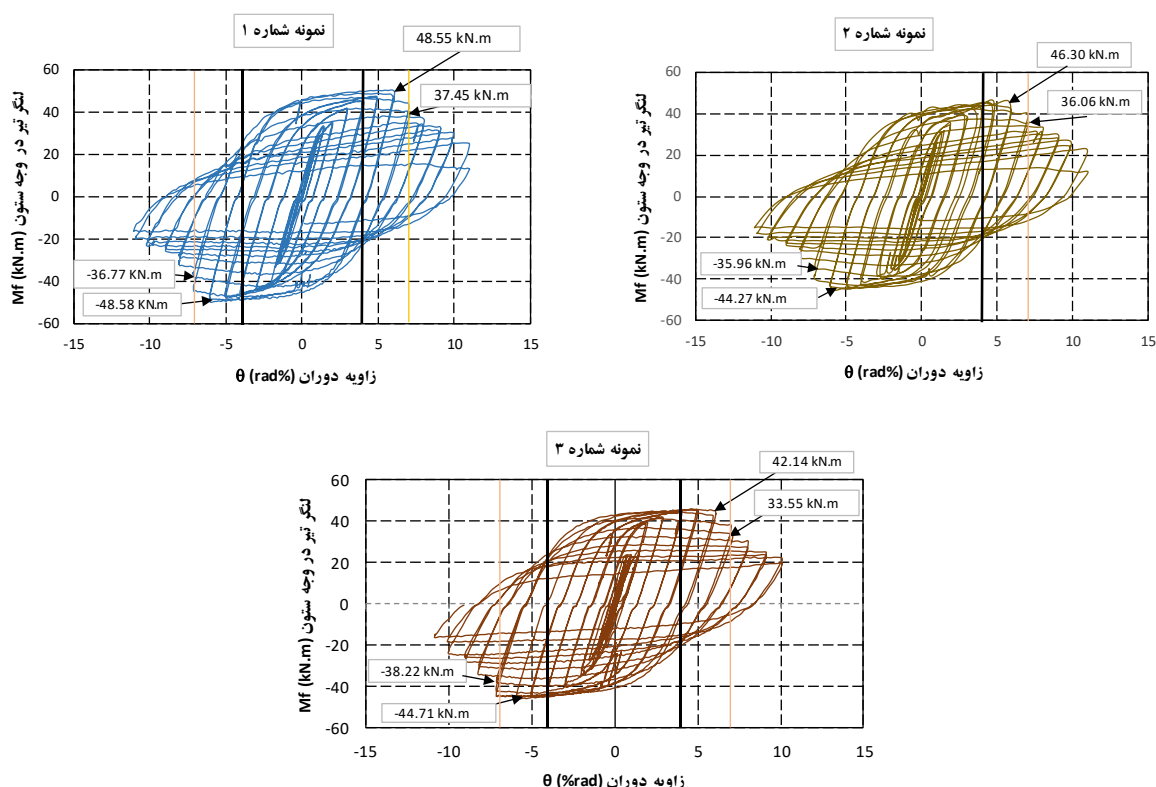
نمودارهای آزمایشگاهی چرخه‌ای لنگر-دوران برای نمونه‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقدار لنگر در وجه ستون از ضرب این فاصله در عکس‌العمل نیرویی محل اعمال

بار محاسبه می‌گردد. براساس نتایج به دست آمده از نمودارها می‌توان گفت به جهت رفتار چرخه‌ای هر سه نمونه از رفتار قابل قبولی برخوردارند. هیچ‌گونه کاهش مقاومت خمشی در نمودارها تا انتهای زاویه دوران ۶٪ مشاهده نمی‌گردد و کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌ها از دوران ۷٪ اتفاق می‌افتد. مطابق



ضوابط AISC2010 اتصال قاب خمشی باید باید بتواند حداقل ۳٪ رادیان زاویه تغییر مکان نسبی طبقه را تحمل نماید و در زاویه تغییر مکان نسبی ۴٪ رادیان، ظرفیت نمونه از ۸۰٪ مقدار ظرفیت پلاستیک تیر کم‌تر نگردد. مقاومت خمشی نمونه‌ها در زاویه دوران ۷٪ و ظرفیت خمشی پلاستیک آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. لذا این سه نمونه ضوابط آیین‌نامه AISC2010 در خصوص تایید اتصال قاب خمشی را برآورده می‌نمایند. نمونه‌های آزمایش شده در دوران ۷٪ ظرفیتی برابر با حدود ۸۰٪ ظرفیت خمشی پلاستیک خود را دارا هستند. ظرفیت در دوران ۳٪ اختلاف قابل توجهی بین ظرفیت

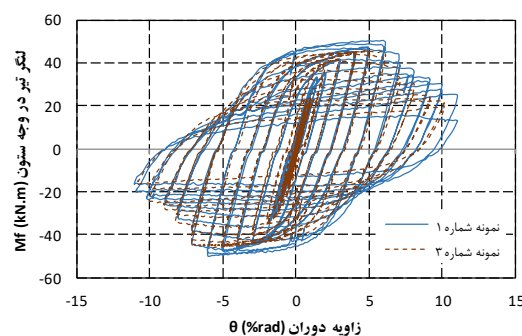
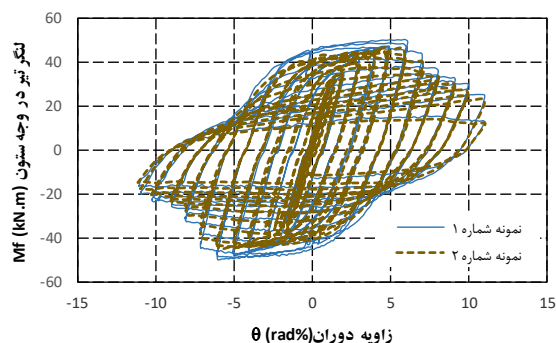
نمونه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. مقایسه منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های شماره ۲ و ۳ با منحنی هیستریزس نمونه شماره ۱ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. هر سه نمونه در سختی اولیه و رفتار در سطح دوران‌های کوچک رفتار مشابهی دارند. همچنین منحنی‌های هیستریزس نشان می‌دهد که نمونه‌ها رفتار پایداری را از خود نشان می‌دهند. حتی در سیکل‌های بالاتر از دوران ۳٪ رادیان نیز کماتش جانبی-پیچشی ایجاد نمی‌شود و کاهش مقاومت در این نمونه‌ها تا سیکل نهایی که نمونه دچار گسیختگی می‌شود، کنترل شده می‌باشد.



شکل ۱۰- منحنی چرخه‌ای دوران-لنگر برای هر سه نمونه و مقاومت خمشی در دوران‌های مختلف

جدول ۳- ظرفیت خمشی پلاستیک و مقاومت خمشی اتصالات در زاویه دوران ۷٪

شماره نمونه	ظرفیت خمشی پلاستیک اتصال (kN.m)	مقاومت خمشی اتصال در دوران ۷٪ (kN.m)	نسبت مقاومت خمشی به ظرفیت پلاستیک
۱	۴۸/۵۸	۳۷/۴۵	۰/۷۷
۲	۴۶/۳۰	۳۶/۰۶	۰/۷۸
۳	۴۲/۱۴	۳۳/۵۵	۰/۸۰



شکل ۱۱- مقایسه منحنی هیستریزیس لنگر تیر در وجه ستون-زاویه تغییر مکان نسبی طبقه

پلاستیک در نمونه‌های ۱ الی ۳ به ترتیب ۱۴، ۱۳ و ۱۲ سانتی‌متر است که نشان دهنده جذب انرژی بیشتر با افزایش طول مفصل پلاستیک می‌باشد.

جدول ۴- میزان انرژی مستهلک شده در نمونه‌های مورد آزمایش در زوایای تغییر مکان نسبی مختلف

انرژی مستهلک شده (kN.m)			زاویه تغییر مکان نسبی
نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۱	
۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۲۰	٪۱/۵
۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۸۰	٪۲
۱/۳۲	۱/۷۰	۱/۶۴	٪۳
۲/۰۶	۲/۵۷	۲/۷۵	٪۴
۲/۸۸	۳/۴۵	۳/۶۷	٪۵
۳/۸۳	۴/۷۲	۴/۹۱	٪۶

۴-۵- بررسی رفتار چشمه اتصال

اندازه‌گیری تغییر شکل ناحیه چشمه اتصال به منظور مطالعه رفتار اتصال در این ناحیه و هم‌چنین تشخیص سهم هریک از اجزاء مفصل پلاستیک و ناحیه چشمه اتصال در چرخش غیرالاستیک نمونه انجام می‌گردد. اندازه‌گیری چشمه اتصال معمولاً با به‌کار بردن تغییر مکان سنج‌های قطری انجام و سپس تغییر مکان قطری به تغییر شکل برشی تبدیل می‌گردد. هم‌چنین تغییر مکان برشی ناحیه چشمه اتصال می‌تواند با روابط هندسی به تغییر مکان افقی نمونه نیز تبدیل گردد. نتایج حاصل در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که دامنه تغییر شکل چشمه اتصال جان ستون بسیار اندک و حداکثر در حدود ۰/۳۵ میلیمتر می‌باشد، لذا می‌توان نتیجه گرفت تغییر پارامترهای جان و بال تیر موجب تغییر در رفتار چشمه اتصال نشده و در هر سه نمونه، چشمه اتصال رفتار خطی دارد.

از مقایسه نتایج آزمایش‌ها می‌توان مشاهده کرد با کاهش زاویه جان موج دار از ۴۵ به ۳۰ درجه ظرفیت خمشی در دوران ۷٪، حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه جان موج‌دار، حداکثر ظرفیت خمشی نیز ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، در صورت کاهش شعاع انحنا و فاصله ابتدای کاهش یافتگی تا بر ستون ظرفیت خمشی اتصال ۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان دهنده آن است که در بین ۳ نمونه، ابعاد در نظر گرفته شده در نمونه اول ظرفیت بالاتری از دو نمونه دیگر نشان می‌دهد.

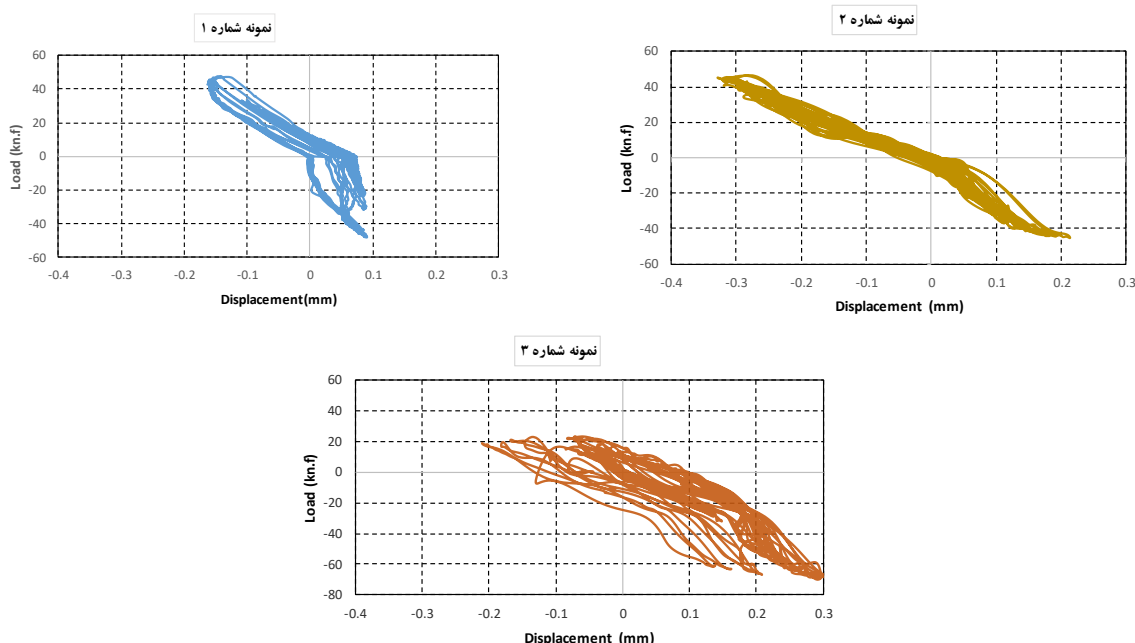
۵-۳- محاسبه استهلاک انرژی

جهت کمی نمودن نمودارهای چرخه‌ای ارائه شده، انرژی مستهلک شده در هر نمونه براساس منحنی‌های هیستریزیس محاسبه گردید. جدول (۴) این میزان انرژی را در زاویه دوران‌های مختلف نشان می‌دهد. جهت کمی نمودن نمودارهای چرخه‌ای ارائه شده از رابطه انرژی مستهلک شده در هر چرخه استفاده گردید. این میزان انرژی از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$E_D = 4(V_y \Delta_i - V_i \Delta_y) \quad (1)$$

که در آن V_i و V_y به ترتیب نیروی وارد بر سر ستون در شروع رفتار پلاستیک زیر سازه که زاویه تغییر مکان نسبی ۱٪ می‌باشد و نیروی وارد بر سر ستون در زاویه تغییر مکان مورد بررسی است. Δ_i و Δ_y نیز به ترتیب تغییر مکان سر ستون در زاویه تغییر مکان نسبی شروع رفتار پلاستیک زیر سازه (۱٪) و در زاویه تغییر مکان نسبی مورد بررسی است.

بر اساس جدول (۴) در زاویه تغییر مکان نسبی ۵ و ۶ درصد انرژی جذب شده به طور میانگین در نمونه اول به ترتیب حدود ۵٪ و ۲۷٪ بیشتر از نمونه دوم و سوم می‌باشد و همانطور که در برداشت‌های آزمایشگاهی مشاهده شد، طول مفصل

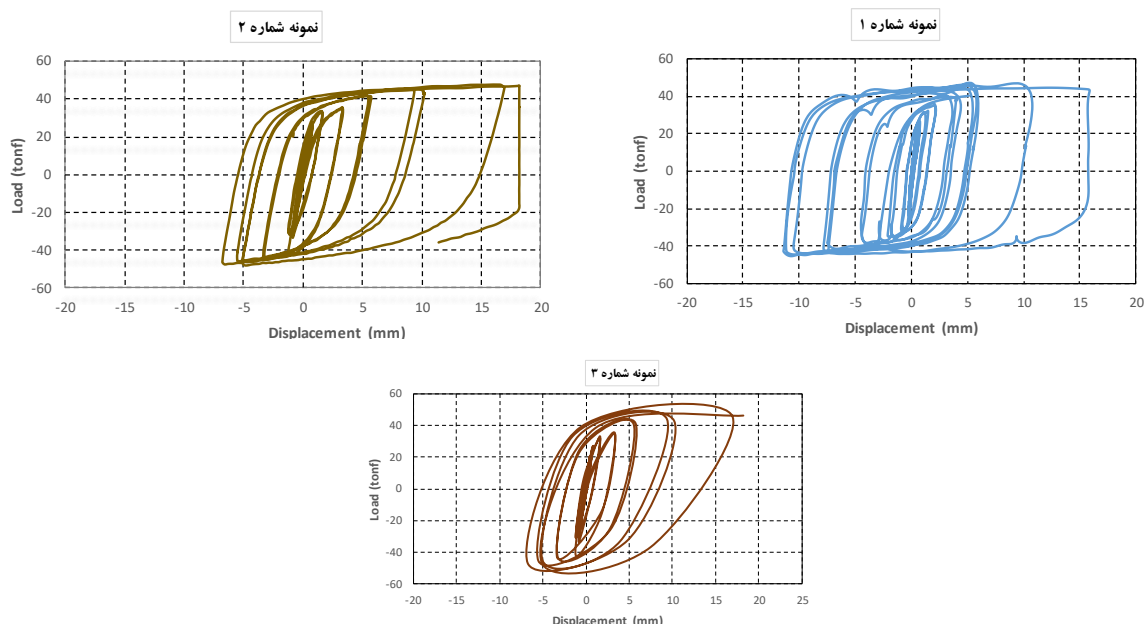


شکل ۱۲- منحنی هیستریزیس نیرو - جابجایی LVTD2 نصب شده در چشمه اتصال

۵-۵- بررسی عملکرد تیر

پلاستیک از بر ستون و هم چنین قرار گیری بهتر موج جان در قسمت ناحیه کاهش یافته نسبت داد. لازم به ذکر می باشد که قرارگیری متقارن هندسی بخش مورب جان در محل کاهش یافتگی بال بر متقارن و یا غیر متقارن بودن تغییر شکل در ناحیه کاهش یافته تاثیر بسزایی دارد.

جهت بررسی عملکرد تیر، نتایج به دست آمده از LVDT شماره ۴ در بال بالا که در بحرانی ترین نقطه می باشد در شکل (۱۳) آورده شده است. همانطور که انتظار می رفت سطح زیر نمودار منحنی هیستریزیس نمونه اول عملکرد بهتری نسبت به دو نمونه بعدی داشته و علت این موضوع را می توان به دور شدن مفصل



شکل ۱۳- منحنی هیستریزیس نیرو - جابه جایی LVDT شماره ۴ بال بالای تیر

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد اتصال‌های خمشی با تیر با بال کاهش یافته و جان موج‌دار به صورت آزمایشگاهی تحت اثر بار سیکلی مورد بررسی قرار گرفت. سه نمونه آزمایشگاهی با مشخصات مختلف کاهش یافتگی بال تیر و زاویه موج جان ساخته شد. علاوه بر مشاهدات کیفی، عملکرد لرزه‌ای اتصال‌ها با مقایسه منحنی‌های هیستریزس زاویه دوران - لنگر، میزان انرژی جذب شده، تغییرات نیرو جابجایی چشمه اتصال و تیر مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده در نمونه‌ها نشان داد که میزان مقاومت خمشی، سختی و کاهش مقاومت در سیکل‌های بالاتر از دوران ۳٪ رادیان نیز دچار ناپایداری منحنی چرخه‌ای (به دلیل ایجاد کمانش جانبی - پیچشی) نمی‌گردند و تمامی نمونه‌ها رفتار پایداری را از خود نشان می‌دهند. براساس نتایج کاهش مقاومت تا سیکل نهایی که نمونه دچار گسیختگی می‌شود، کنترل شده می‌باشد.

از مقایسه نتایج آزمایش‌ها می‌توان مشاهده کرد با کاهش زاویه جان موج دار از ۴۵ به ۳۰ حداکثر ظرفیت خمشی و ظرفیت خمشی اتصال در دوران ۷٪ به ترتیب حدود ۱۱ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در صورت کاهش شعاع انحنا و فاصله ابتدای کاهش یافتگی تا بر ستون حداکثر ظرفیت خمشی اتصال ۵ درصد کاهش می‌یابد.

انرژی جذب شده در نمونه اول نسبت به نمونه دوم و سوم به ترتیب حدود ۵ و ۲۷ درصد بیشتر است که نشان دهنده افزایش جذب انرژی با افزایش طول مفصل پلاستیک است. براساس نتایج، کاهش زاویه موج جان، موجب کاهش جذب انرژی گردید.

براساس نتایج آزمایشگاهی، ساز و کار غیرخطی اتصالات تحت بررسی در ناحیه مفصل پلاستیک اتفاق می‌افتد و ستون از سهم ناچیزی در تأمین تغییر مکان غیرارتجاعی زیر سازه برخوردار است. چشمه اتصال در هر سه نمونه رفتار خطی داشت.

وجود جان موج‌دار موجب می‌گردد بال تیر در محل مفصل پلاستیک توسط ورق‌های جان، مهار گردد و عرض آزاد بال کاهش یابد. براساس روابط پایداری، کاهش عرض آزاد بال موجب افزایش مقاومت تیر در برابر کمانش موضعی می‌گردد و مفصل می‌تواند تغییر شکل‌های پلاستیک زیادی را تحمل نماید. براساس نتایج مشاهده شده در نمونه‌های تحت بارگذاری آزمایشگاهی با وجود اینکه کرنش در بال تیر در محل مفصل

پلاستیک متمرکز شده و کمانش موضعی از این محل در نمونه - های آزمایشگاهی شروع گردید ولیکن به دلیل مقید شدن آن توسط جان موج‌دار و وجه ستون، در بال تیر تشکیل و گسترش یافت. همین امر منجر به انتقال گسیختگی به جلوی ناحیه جان موج‌دار در نمونه‌ها شد.

در اتصال با جان موج‌دار به دلیل پتانسیل کم‌تر برای کمانش - جانبی پیچشی و پایداری مناسب‌تر مفصل پلاستیک، پتانسیل پیچش ستون کاهش می‌یابد و در پی آن ستون به مهار جانبی کم‌تری احتیاج دارد.

۷- مراجع

- [1] Yi, J., Gil, H., Youm, K. and Lee, H. (2008), "Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs", Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1659-1666.
- [2] He, J., Liu, Y., Lin, Z., Chen, A. and Yoda, T. (2012), "Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web: Numerical study", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 79, pp. 166-182.
- [3] Ibrahim, S.A. (2014), "Lateral torsional buckling strength of unsymmetrical plate girders with corrugated webs", Engineering Structures, Vol. 81, pp. 123-134.
- [4] Moon, J., Lim, N.H. and Lee, H.E. (2013), "Moment gradient correction factor and inelastic flexural-torsional buckling of I-girder with corrugated steel webs", Thin-Walled Structures, Vol. 62, pp. 18-27.
- [5] Hamburger, R.O. (2006), "Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications, ANSI/AISC 358-05", In Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety, pp. 1-8.
- [6] Eldib, M.H. (2009), "Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 2129-2139.
- [7] Wang, Z. and Wang, Q. (2014), "Fatigue assessment of welds joining corrugated steel webs to flange plates", Engineering Structures, Vol. 73, pp. 1-12.
- [8] Deylami, A. and Tabar, A.M. (2013), "Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling", Thin-Walled Structures, Vol. 73, pp. 112-120.
- [9] Mirghaderi, R., Sobhan, S. and Torabian, S. (2008), "Reducing beam section by corrugated webs for developing a connection of specially moment resisting frame", In Structures Congress 2008: Crossing Borders: Crossing the Borders, 2008, vol. 314, pp. 1-10.
- [10] Mirghaderi, S.R., Torabian, S. and Imanpour, A. (2010), "Seismic performance of the Accordion-Web RBS connection", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 277-288.
- [11] Saleh, A., Mirghaderi, S.R. and Zahrai, S.M. (2016), "Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 117, pp. 214-226.
- [12] Saleh, A., Zahrai, S.M. and Mirghaderi, S.R. (2016), "Experimental study on innovative tubular web RBS connections in steel MRFs with typical shallow beams", Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal, Vol. 57, pp. 785-808.



- [13] Zahrai, S.M., Mirghader, S.R. and Saleh, A. (2017), "Tubular web RBS connection to improve seismic behavior of moment resisting steel frames", *Scientia Iranica*, Vol. 24, pp. 2726-2740.
- [14] Liu, S., Ding, H., Taerwe, L. and De Corte, W. (2019), "Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs for horizontally curved girder bridges", *Applied Sciences*, Vol. 9, pp. 1942.
- [15] Feng, Y., Jiang, L. and Zhou, W. (2020), "Improved analytical method to investigate the dynamic characteristics of composite box beam with corrugated webs", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 20, pp. 194-206.
- [16] Wang, D., Wang, L. and Tang, C. (2021), "Mechanical characteristic analysis of corrugated steel webs using asynchronous construction technology", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, pp. 185-196.
- [17] Elamary, A.S., Alharthi, Y., Abdalla, O., Alqurashi, M. and Sharaky, I.A. (2021), "Failure mechanism of hybrid steel beams with trapezoidal corrugated-web non-welded inclined folds", *Materials*, Vol. 14, pp. 1424.
- [18] Zhang, B., Yu, J., Chen, W., Wang, H. and Xu, J. (2020), "Stress states and shear failure mechanisms of girders with corrugated steel webs", *Thin-Walled Structures*, Vol. 157, pp. 106858.
- [19] Shao, Y.B., Elsisy, A.R. and Hassanein, M.F. (2021), "On the out-of-plane stiffness of I-section girders with corrugated webs using elastic finite element analyses", *In Structures*, Vol. 29, pp. 1242-1258.
- [20] Zhou, M. and An, L. (2020), "Full-range shear behavior of a nonprismatic beam with steel trapezoidal corrugated webs: Experimental tests and fe modeling", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 146, pp. 04020162.
- [21] Wang, T., Ma, J. and Wang, Y. (2021), "Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel web dominated by local buckling", *Engineering Structures*, Vol. 233, pp. 111909.

