

Investigating the influence of second order effects on the cyclic behavior of steel perforated beams

Morteza Daryaei¹, Vahid Akrami^{2*}

1- M.Sc. student, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Implementation of openings in beams web has been introduced as an innovative method for improving seismic performance of steel moment frames. The limited length of the opening zone and formation of the Vierendeel mechanism in this area causes the reduction of beam horizontal length in nonlinear behavior range. This is while, the rigidity of the structural floor system prevents the reduction of the beam span length. This causes the creation of tensile force in the beam which is known as the second order effect. In this article a numerical study is conducted to evaluate the influence of the second order effects on the cyclic behavior of steel beams with web opening. For this purpose, a perforated steel beam has been modeled in Abaqus software and its results has been validated using laboratory test data. The numerical models have been analyzed considering different opening dimensions and three different profiles for the beam cross-section. This is done once with and once again without considering the second order effects and the results are compared. Based on the results, considering the second order effects changes the behavior of the beam in the reduced area and prevents the stiffness and strength decrease in the post-capping part of the hysteresis curve. The amount of additional strength caused by second order effects is negligible for drift ratios smaller than 2%, but it increases with the increase of loading amplitude. At 6% drift ratio, the amount of this additional strength varies between 44% and 120%, depending on the dimensions of the opening. Determination of this additional strength as a function of lateral drift ratio and opening dimensions for use in the analysis and design of beams with web openings can be considered as the main innovation of this research.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 October 2023

Revise Date: 20 February 2024

Accept Date: 18 April 2024

Keywords:

Steel beam

Web opening

Second order effect

Finite element method Cyclic loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.418986.3231>

*Corresponding author: Vahid Akrami.

Email address: v.akrami@uma.ac.ir

تأثیر لحاظ اثرات ثانویه بر رفتار چرخه‌ای تیرهای فولادی با جان کاهش یافته

مرتضی دریایی^۱، وحید اکرمی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

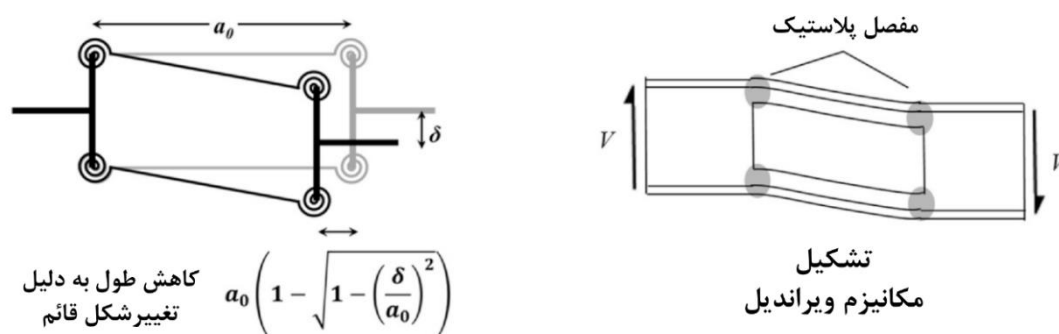
استفاده از بازشو در جان تیرهای فولادی به عنوان روشی جدید برای بهبود عملکرد لرزه ای قاب های خمشی فولادی مطرح می‌باشد. طول محدود ناحیه دارای بازشو در این تیرها و بروز مکانیزم ویراندیل در آنها، باعث کاهش طول افقی تیر در محدوده رفتار غیرارتجاعی می‌شود. در این میان، صلبیت کف سازه‌ای از کاهش طول دهانه قاب جلوگیری می‌کند. این مسئله باعث ایجاد نیروهای کششی در طول تیر می‌شود که به اثرات ثانویه مشهور است. مقاله حاضر تأثیر لحاظ اثرات ثانویه بر رفتار چرخه‌ای تیرهای فولادی با جان کاهش یافته را به روش المان محدود بررسی می‌نماید. برای این منظور ابتدا یک مدل المان محدود از تیر دارای بازشو در جان در نرم افزار آباکوس توسعه داده شده و برای اطمینان از صحت نتایج، داده‌های عددی با استفاده از گزارشات آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده‌اند. در ادامه با در نظر گرفتن سه پروفیل مختلف برای مقطع تیر و ابعاد مختلف برای بازشو، مدل‌های عددی یکبار بدون لحاظ اثرات ثانویه و بار دیگر با لحاظ این اثرات تحلیل شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، لحاظ اثرات ثانویه باعث تغییر رفتار تیر در ناحیه کاهش یافته و جلوگیری از افت سختی و مقاومت در شاخه نزولی نمودار می‌شود. مقدار اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در دررفت‌های پایین‌تر از ۲٪ ناچیز بوده، لیکن با افزایش دامنه بارگذاری بیشتر می‌شود. تحت دررفت بارگذاری ۶٪، مقدار این اضافه مقاومت بین ۴۴٪ تا ۱۲۰٪ بسته به ابعاد بازشو متغیر می‌باشد. تعیین مقدار این اضافه مقاومت به عنوان تابعی از دررفت بارگذاری و ابعاد مختلف بازشو برای استفاده در روند تحلیل و طراحی تیرهای با جان کاهش یافته را می‌توان به عنوان نوآوری اصلی این تحقیق برشمرد.

کلمات کلیدی: تیر فولادی، بازشوی جان، اثرات ثانویه، روش المان محدود، بارگذاری چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.418986.3231	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.418986.3231	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۰۱	۱۴۰۲/۰۸/۱۴
				*نویسنده مسئول:		وحید اکرمی
				پست الکترونیکی:		v.akrami@uma.ac.ir

۱- مقدمه

پایداری لرزه‌ای ساختمان‌های مختلف از عوامل زیادی نشأت می‌گیرد که مهمترین آنها انتخاب سیستم‌های سازه‌ای ساختمان است [۱]. سیستم قاب خمشی فولادی یکی از متداول‌ترین سیستم‌های باربر موجود در سطح جهان است. تجربه زمین‌لرزه‌های گذشته نشان داده است که اتصالات تیر به ستون، آسیب‌پذیرترین نقاط این سیستم‌های باربر می‌باشند [۲-۴]. با توجه به مطالعات صورت گرفته در سال‌های اخیر، محققین به این نتیجه رسیدند که کاهش سطح مقطع تیر در داخل دهانه باعث انتقال مفصل پلاستیک از محل اتصال تیر به ستون به محل کاهش یافته در تیر می‌شود. در اوایل، ایده کاهش مقطع تیر برای محافظت اتصال، تنها برای بال‌های تیر ارائه شد [۵-۷]. اما بعدها محققین تاثیر ایجاد بازشو در جان تیر بر کاهش نیازهای لرزه‌ای در محل اتصال را نیز بررسی نمودند. بر اساس نتایج این تحقیقات، استفاده از تیرهای دارای بازشو در جان به عنوان یکی از روش‌های انتقال تقاضای تغییرشکل پلاستیک از محل اتصال به داخل تیر (محل کاهش یافته تیر) مطرح شد [۸-۱۰]. قابلیت استفاده از تیرهای دارای بازشو در جان، بعنوان بخش فیوزی برای نخستین بار، توسط اشهایم^۱ [۱۱] مطرح شد. طی بررسی‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، مشاهده شد که طول محدود ناحیه دارای بازشو در تیرها با جان کاهش یافته و بروز مکانیزم ویراندیل در آنها، باعث کاهش طول افقی تیر (مطابق شکل ۱) در محدوده رفتار غیرارتجاعی می‌شود [۲-۴]. این در حالی است که صلبیت کف سازه‌ای از کاهش دهانه قاب یا به عبارتی طول تیر، جلوگیری خواهد نمود. این مسئله باعث ایجاد نیروهای کششی در طول تیر می‌شود که به اثرات ثانویه مشهور می‌باشد [۴].



شکل ۱: کاهش طول تیر در نتیجه بروز مکانیزم ویراندیل [۴].

اشهایم و هالترمن^۲ [۱۲] آزمایش‌هایی را بر روی تیرهای دارای بازشو در جان انجام دادند و بروز اثرات ثانویه در طول ناحیه تضعیف شده در محدوده رفتار غیرارتجاعی را گزارش نمودند. این مسئله بعداً توسط سایر تحقیقات نیز گزارش شده است. در سال ۲۰۱۷ آزمایش‌هایی برای تعیین تاثیر ابعاد، اندازه، شکل و محل قرار گیری بازشوها توسط شین و همکاران^۳ انجام شد [۲ و ۳]. این محققین ۱۰ تیر دارای بازشو با پیکربندی‌های متفاوت را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تیرهای دارای یک بازشو در وسط دهانه بهترین عملکرد را نسبت به باقی ترکیب‌ها دارند. همچنین، این محققین متوجه شدند که بروز اثرات ثانویه در طول بازشو، باعث تغییر مکانیزم رفتاری تیر در دریفت‌های محدوده رفتار غیرارتجاعی می‌شود. طی پژوهش دیگری که توسط عرفانی و همکاران [۴] در مورد رفتار قاب‌های خمشی دارای تیرهای با جان کاهش یافته در برابر بار جانبی صورت گرفت، محققین به این نتیجه رسیدند که وجود بازشو در جان تیر باعث کاهش جزئی در ظرفیت تحمل برش پایه این نمونه‌ها می‌شود. این در حالی است که ایجاد بازشو در جان تیرها، باعث کاهش تقاضای تغییرشکل پلاستیک در بر اتصال می‌شود. این محققین نیز مشابه تحقیقات قبل، بروز اثرات ثانویه در طول بازشو در دریفت‌های محدوده رفتار غیرارتجاعی را گزارش نموده‌اند که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۴].

¹ Aschheim

² Halterman

³ Shin et al.

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی بر روی رفتار تیرهای دارای بازشو در جان صورت گرفته است. بخشی از این مطالعات به ارائه روابط محاسباتی در راستای برآورد مقاومت تیرهای دارای بازشو در جان اختصاص یافته است [۱۳-۱۵]. در این زمینه کاروالو و همکاران^۴ [۱۶] کماتش پیچشی جانبی تیرهای با جان دارای سوراخ سینوسی را شبیه‌سازی نموده و از این طریق کفایت روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های طراحی را بررسی نموده‌اند. در تحقیق دیگری شاماس و همکاران^۵ [۱۷] به پیش‌بینی ظرفیت پس کماتشی تیرهایی با شکل بازشوی مشابه از طریق آموزش شبکه عصبی پرداخته‌اند. بخش دیگری از بررسی‌ها بر ارائه مقطع کاهش یافته با پیکربندی مناسب متمرکز می‌باشد. در همین راستا، چانگ و همکاران^۶ [۱۸] به بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار تیرهای دارای بازشو در جان با هدف کاربرد چنین اعضای در بحث بهسازی ساختمان‌ها پرداختند. در این مطالعه از تیر با مقطع کاهش یافته با سوراخ دابل لوبیایی استفاده شده بود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از این نوع تیرها در اتصالات خمشی، می‌تواند تغییرشکل‌های پلاستیک را از محل اتصال به ناحیه کاهش یافته انتقال دهد. گفتنی است، اتصالات مورد بررسی در این تحقیق توانستند بیش از ۸۰٪ ظرفیت نهایی خود را تا دریافت ۰/۰۴ رادیان حفظ نمایند. مورخاده و گوپتا^۷ [۱۹] تحقیقی عددی بر روی ظرفیت خمشی و مود خرابی تیرهای دارای بازشو در جان انجام داده و نشان دادند که مود خرابی غالب در این نمونه‌ها بروز مکانیزم ویراندیل و در ادامه کماتش موضعی جان تیر می‌باشد. جلالی و رفیعی [۲۰] تاثیر استفاده از روش کاهش مقطع جان تیر با تعبیه شیارهای طولی و عرضی بر رفتار قاب‌های خمشی فولادی با اتصالات پیچی را بررسی نمودند. این محققین نشان دادند که ایجاد تیر با مقطع کاهش یافته می‌تواند سبب انتقال مفصل پلاستیک از بر ستون به فاصله مناسب در محل مقطع کاهش یافته شود. از بین نمونه‌های مورد بررسی توسط این محققین، استفاده از شیارهای طولی در جان تیر، بهترین نتایج را در پی داشته است. سید^۸ [۲۱] تحقیقاتی را بر روی تیرهای با جان موجدار سوراخ شده انجام داده است که نشان‌دهنده مزیت ورق‌های موجدار مستطیلی نسبت به سایر انواع با موج‌های مثلثی و دوزنقه شکل می‌باشد. مینگ و همکاران^۹ [۲۲] خرابی پیشرونده در قاب‌های مرکب دارای بازشوی مستطیلی در جان تیرها را بررسی نموده و نشان دادند که هر چند وجود بازشو در جان تیرها باعث کاهش ظرفیت خمشی اتصال می‌شود، لیکن به دلیل دور شدن تغییرشکل‌های پلاستیک از بر ستون، رفتار کلی نمونه‌ها بهبود می‌یابد. در مطالعه دیگری، جیائو و همکاران^{۱۰} [۲۳] پیکربندی جدیدی از اتصالات خمشی تیرهای دارای بازشو در جان با عنوان "تیر با جان کاهش یافته دارای میله تقویتی" را پیشنهاد و رفتار خرابی پیشرونده در قاب‌های حاوی این نوع اتصالات را بررسی نمودند. نمونه‌های دیگری از این تحقیقات، مطالعه نظرعلیزاده و همکاران [۲۴] بر روی اتصالات خمشی دارای تیرهای با بازشوی لوبیایی قائم و مطالعه الموتائیری و همکاران^{۱۱} [۲۵] بر روی تیرهای کامپوزیت دارای بازشوی دایره‌ای در جان می‌باشد.

در حال حاضر تحقیقات زیادی بر روی رفتار تیرهای فولادی دارای بازشو در جان صورت گرفته است که به برخی از جدیدترین آنها اشاره شد. عمده تحقیقات صورت گرفته در این زمینه با فرض آزاد بودن تغییر طول محوری در تیرها و در نتیجه عدم لحاظ اثرات ثانویه در محل کاهش یافته تیر بوده و تنها چند تحقیق فقط بروز این اثرات را گزارش نموده‌اند. با توجه به اینکه بروز اثرات ثانویه رفتار ناحیه کاهش یافته را تغییر داده و می‌تواند باعث مختل شدن عملکرد فیوزی این ناحیه شود، در تحقیق حاضر تلاش خواهد شد تا تاثیر بروز این اثرات بر رفتار تیرهای فولادی با جان کاهش یافته به روش المان محدود بررسی و میزان این اثرات به صورت تابعی از دریافت بارگذاری و ابعاد مختلف بازشو برای استفاده در روند تحلیل و طراحی ارائه شود. برای این منظور ابتدا یک مدل المان محدود از تیر دارای بازشو در جان در نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شده و برای اطمینان از صحت نتایج، داده‌های عددی با استفاده از گزارشات آزمایشگاهی شین و همکاران [۲ و ۳] صحت‌سنجی شده‌اند. در ادامه با در نظر گرفتن سه پروفیل مختلف برای مقطع تیر و ابعاد مختلف برای بازشو، مدل‌های عددی یکبار بدون لحاظ اثرات ثانویه و بار دیگر با لحاظ این اثرات تحلیل شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. جزئیات مدلسازی، صحت‌سنجی و نتایج بدست آمده در بخش‌های بعد ارائه شده است.

⁴ Carvalho et al.

⁵ Shamass et al.

⁶ Chang et al.

⁷ Morkhade and Gupta

⁸ Sayed

⁹ Meng et al.

¹⁰ Qiao et al.

¹¹ Almutairi et al.

۲- مکانیزم عملکرد مورد انتظار

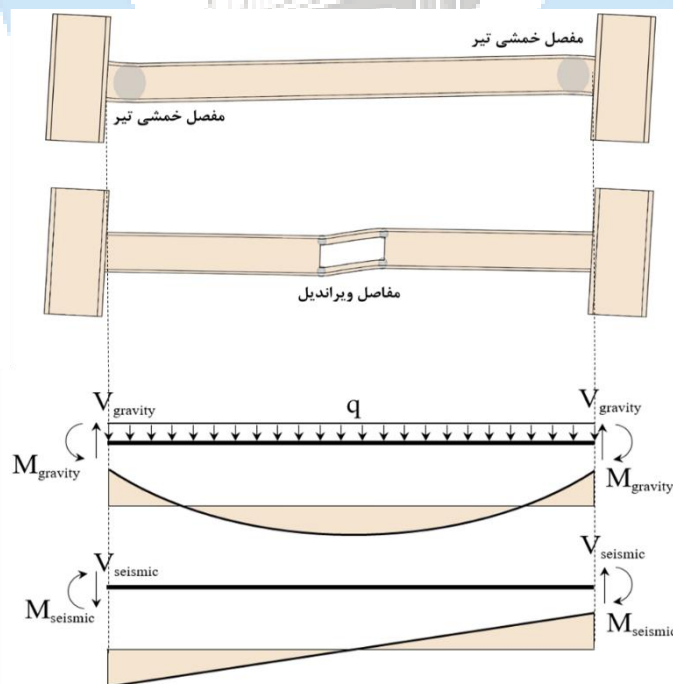
مکانیزم عملکرد مورد انتظار در قاب‌های خمشی متداول و قاب‌های خمشی با تیرهای دارای بازشوی جان در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، در قاب‌های خمشی متداول تغییر شکل‌های جانبی از طریق ایجاد مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیر امکان بروز می‌یابند. این در حالیست که در قاب‌های خمشی با تیرهای دارای بازشوی جان بروز مکانیزم ویراندیل در ناحیه کاهش یافته تیر منبع اصلی تامین تغییر شکل‌های پلاستیک در تیر می‌باشد. به طور کلی بیشینه لنگر موجود در محل اتصال تیر به ستون، $M_{connection}$ ، از دو بخش مربوط به بارهای ثقلی، $M_{gravity}$ ، و بارهای لرزه‌ای، $M_{seismic}$ ، تشکیل می‌شود:

$$M_{connection} = M_{gravity} + M_{seismic} \quad (1)$$

لنگر مربوط به بارهای ثقلی تابعی از شدت بار ثقلی، q ، و طول تیر، L ، می‌باشد. به عنوان مثال برای تیر دو سر گیردار تحت بار ثقلی یکنواخت مقدار این لنگر برابر با $M_{gravity} = qL^2/12$ می‌باشد. این در حالیست که در شرایط واقعی به دلیل شکل‌پذیری ستون‌ها مقدار این لنگر کمتر از مقدار یاد شده می‌باشد. مقدار لنگر مربوط به بارهای لرزه‌ای را می‌توان از رابطه $M_{seismic} = V_{seismic} \cdot L/2$ بدست آورد، که در آن $V_{seismic}$ برش تیر در اثر تغییر شکل‌های لرزه‌ای می‌باشد. بدین ترتیب بیشینه لنگر اتصال به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$M_{connection} = M_{gravity} + \frac{V_{seismic} \cdot L}{2} \quad (2)$$

با توجه به اینکه در قاب‌های خمشی متداول برش تیر تا ظرفیت برشی پلاستیک مقطع قابل افزایش می‌باشد، لذا بیشینه لنگر اتصال تا ظرفیت خمشی پلاستیک تیر افزایش یافته و نهایتاً منجر به تشکیل مفاصل پلاستیک در انتهای تیر خواهد شد. این در حالیست که در قاب‌های خمشی با تیرهای دارای بازشوی جان، بیشینه برش تیر از طریق رفتار فیوزی ناحیه کاهش یافته قابل کنترل می‌باشد. در صورتیکه ظرفیت برشی مقطع کاهش یافته را با $V_{vierendeel}$ نشان دهیم، بیشینه لنگر در محل اتصال مطابق رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۲: مکانیزم عملکرد مورد انتظار در قاب‌های خمشی متداول و قاب‌های خمشی با تیرهای دارای بازشوی جان.

$$M_{connection} = M_{gravity} + \frac{V_{vierendeel} \cdot L}{2} \quad (3)$$

مقدار این لنگر بایستی از ظرفیت خمشی پلاستیک محاسباتی مقطع تیر، M_{pe} ، کمتر باشد تا از تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک در دو انتهای تیر جلوگیری به عمل آید. بدین ترتیب حداکثر ظرفیت برشی محتمل مقطع کاهش یافته بایستی کمتر از مقدار بدست آمده از رابطه زیر در نظر گرفته شود:

$$V_{vierendeel} \leq \frac{2(M_{pe} - M_{gravity})}{L} \quad (4)$$

روش‌های مختلفی برای برآورد ظرفیت مقطع کاهش یافته و محاسبه ابعاد مناسب بازشو برای برآورده نمودن رابطه فوق پیشنهاد شده است که نمونه‌هایی از آن در مراجع [۴] و [۲۶] قابل مشاهده می‌باشد. لیکن تمامی این روابط با فرض آزاد بودن تغییر طول محوری در تیرها و در نتیجه عدم لحاظ اثرات ثانویه در محل کاهش یافته تیر انجام شده‌اند. این در حالیست که بروز این اثرات می‌تواند باعث بیشتر شدن ظرفیت برشی مقطع کاهش یافته از مقدار محاسبه شده و در نتیجه تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک در محل اتصال تیر به ستون شود. بدین ترتیب، بررسی میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در برآورد ظرفیت برشی مقطع کاهش یافته ضروری به نظر می‌رسد.

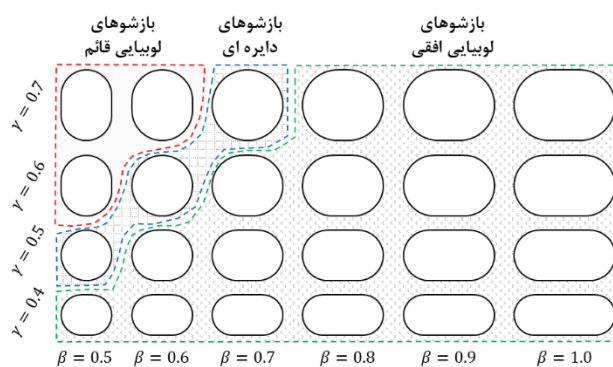
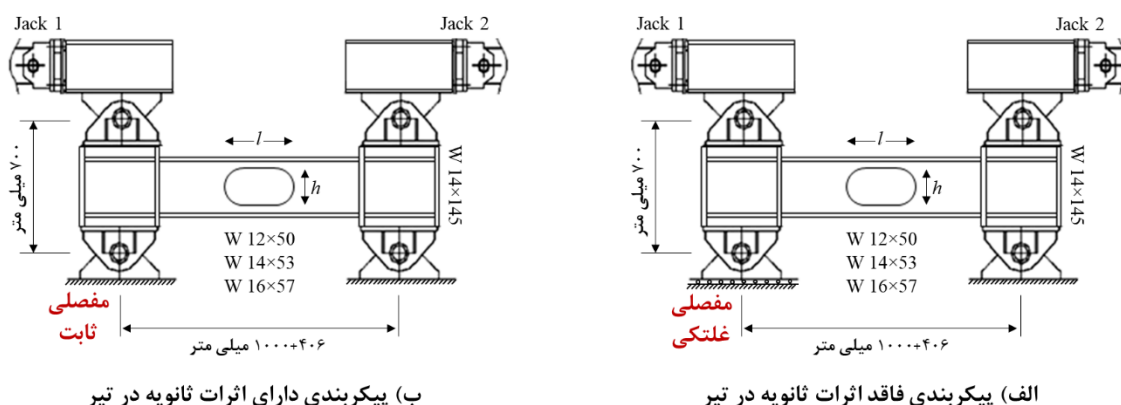
۳- پیکربندی نمونه‌های عددی

برای بررسی تاثیر لحاظ اثرات ثانویه بر رفتار تیرهای با جان کاهش یافته، از دو پیکربندی نشان داده شده در شکل ۳ استفاده خواهد شد. این پیکربندی‌ها نشان‌دهنده طول محدودی از تیر اصلی (ناحیه میانی در شکل ۲) می‌باشد که بین ستون‌های صلب طرفین به عنوان قیدهای گیرداری قرار گرفته تا بتوان رفتار ناحیه کاهش یافته را به صورت مجزا از تغییرشکل‌های سایر بخش‌های تیر و ستون مطالعه نمود. مطابق شکل، در پیکربندی نخست، تکیه‌گاه یک سمت به صورت مفصلی غلتکی بوده و لذا تغییر طول تیر در این مدل ایجاد نیروی محوری نخواهد نمود. این درحالیست که در پیکربندی دوم، تکیه‌گاه‌های هر دو سمت از نوع مفصلی ثابت بوده و تغییر طول تیر باعث بروز اثرات ثانویه در بازشو خواهد شد. حرکت هر دو جک سمت راست و چپ نمونه به صورت همزمان و در یک راستا می‌باشد ($\theta_l = \theta_r$) که شبیه‌سازی کننده تغییر شکل تیر تحت نیروی جانبی زلزله می‌باشد. مطابق شکل، برای هر دو پیکربندی طول ستون برابر با ۷۰۰ میلی‌متر و طول تیر برابر با ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. از پروفیل $W14 \times 145$ به عنوان مقطع ستون و از پروفیل‌های $W12 \times 50$ ، $W14 \times 53$ و $W16 \times 57$ به عنوان مقطع تیر استفاده شده است. استفاده از پروفیل $W12 \times 50$ برای مقطع تیر با توجه به تحقیقات شین و همکاران [۲] و [۳] و استفاده از دو مقطع بعدی به منظور بررسی افزایش سازه تیر بر نتایج بررسی‌ها صورت گرفته است. بازشوهای لحاظ شده در جان تیر به صورت سوراخ لوبیایی با طول l و ارتفاع h می‌باشند. در بررسی‌ها ابعاد بازشو با استفاده از ارتفاع تیر نرمال سازی خواهند شد ($\beta = l/d$ ، $\gamma = h/d$)، که در آن ارتفاع مقطع تیر می‌باشد. محدوده مورد بررسی برای طول بازشو $\beta = 0.5$ تا $\beta = 1.0$ و محدوده مورد بررسی برای ارتفاع بازشو $\gamma = 0.4$ تا $\gamma = 0.7$ می‌باشد. این محدوده با توجه به تحقیقات پیشین [۲۷] انتخاب شده و سه نوع شکل مختلف بازشو مطابق شکل ۳ (پ) را شامل می‌شود.

۴- مشخصات مصالح

به طور کلی، رفتار پساتسلیم مصالحی نظیر فولاد را می‌توان در قالب دو نوع سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک تعریف نمود. سخت‌شوندگی ایزوتروپیک بدین معنی است که با ایجاد تنش‌های پلاستیک، اندازه سطح تسلیم در تمام جهات به یک مقدار تغییر می‌کند. برعکس، در سخت‌شوندگی سینماتیک اندازه سطح تسلیم ثابت بوده و سطح تسلیم تنها در جهات مختلف حرکت می‌نماید. مصالح مورد استفاده در تحلیل‌های این تحقیق براساس سخت‌شوندگی ترکیبی ایزوتروپیک-سینماتیک مدل‌سازی شده‌اند. ضریب پواسون در تحلیل‌ها برابر با ۰/۳ و مقدار مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و تنش نهایی اسمی مصالح فولادی به ترتیب برابر با ۲۰۰۰۰۰، ۳۴۵ و ۴۴۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده فولاد نوع ASTM A992 [28] می‌باشد. در راستای به حداقل رساندن تغییرشکل‌های صورت

گرفته در ستون‌های طرفین (که شبیه‌سازی کننده شرایط گیردار می‌باشند)، مصالح این ناحیه از نوع الاستیک با مدول الاستیسته ۱۰ برابر مدلسازی شده است.



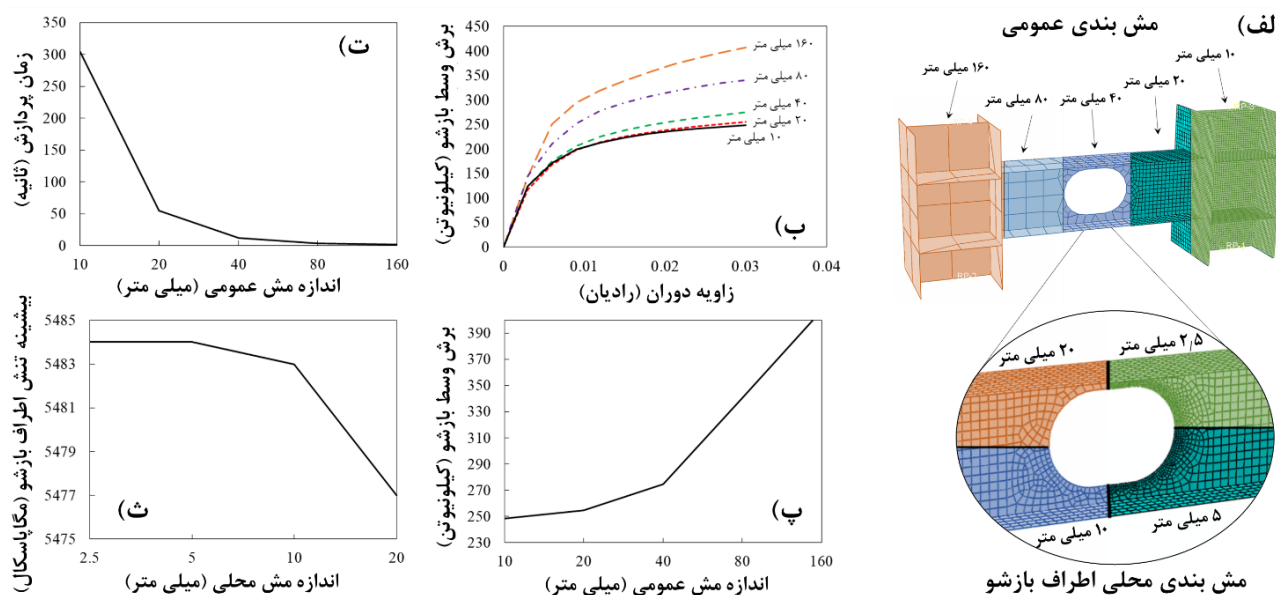
شکل ۳: پیکربندی نمونه‌های مورد بررسی؛ الف) بدون لحاظ اثرات ثانویه؛ ب) با لحاظ اثرات ثانویه؛ پ) انواع بازشوهای مورد بررسی.

۵- مش‌بندی نمونه‌ها

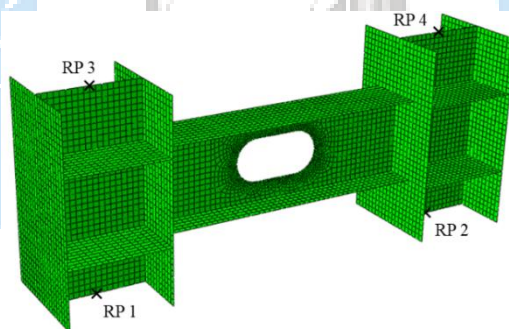
چنانچه گفته شد، شبیه‌سازی مدل‌های عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفته است. اجزای مختلف مدل‌های عددی نظیر بال‌ها و جان تیر و ستون به صورت ورق‌هایی با ابعاد ذکر شده در شکل ۳ در نرم‌افزار ایجاد و پس از قرار گرفتن در محل صحیح خود، با استفاده از قید چسباندن^{۱۲} به هم متصل شده‌اند. برای مش‌بندی مدل‌های المان محدود، از المان پوسته ۴ گرهی با انتگرال-گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است.

بطور کلی با ریزتر کردن اندازه مش دقت جواب‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که اگر اندازه مش خیلی ریز در نظر گرفته شود، دقت افزایش یافته ولی در عوض حجم محاسبات نیز به شدت افزایش می‌یابد. برای تعیین اندازه مش مناسب در نواحی مختلف مدل، از مطالعه حساسیت مش در مقیاس عمومی و محلی استفاده شده است که خلاصه‌ای از نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. مدل مورد مطالعه تیر با مقطع W12x50 با یک بازشو به ابعاد $\gamma=1.0$ و $\beta=0.7$ بوده است که تحت بارگذاری یکنواخت تا 0.3 رادیان قرار گرفته است. بر اساس نتایج این بررسی، در صورتیکه اندازه عمومی المان‌ها در نقاط مختلف مدل برابر با ۲۰ میلی‌متر انتخاب شود، می‌توان هم از لحاظ دقت محاسبات و هم از نظر زمان تحلیل به شرایطی نسبتاً بهینه رسید. نحوه مش‌بندی مدل المان محدود مورد نظر در شکل ۵ نمایش

داده شده است. مطابق شکل، به منظور بررسی دقیقتر تنش‌ها و کرنش‌ها در اطراف بازشو، سایز مش بندی در این ناحیه کوچکتر (۵ میلی - متر) لحاظ شده است.



شکل ۴: مطالعه حساسیت‌سنجی مش؛ الف) مش بندی عمومی و محلی؛ ب) نمودار برش-زاویه دوران برای مش عمومی با اندازه‌های مختلف؛ پ) ارتباط برش با اندازه مش عمومی در زاویه دوران ۰/۰۳ رادیان؛ ت) ارتباط زمان پردازش با اندازه مش عمومی؛ ث) ارتباط بیشینه تنش اطراف بازشو با اندازه مش محلی



شکل ۵: نحوه مش بندی مدل‌های المان محدود مورد بررسی

استفاده از مدل ایده‌آل در تحلیل‌های چرخه‌ای می‌تواند باعث واگرایی تحلیل در آستانه بروز کمناش‌های موضعی شود. رفع این مشکل از طریق تعریف نقص اولیه در مدل‌های عددی امکان‌پذیر می‌باشد [۲۷]. برای ایجاد مدل ناکامل، مختصات هر گره با استفاده از ضریبی از شکل مود کمناشی نمونه تغییر یافته است. برای انجام اینکار، ابتدا یک تحلیل کمناش در فایلی مجزا بر روی مدل ایده‌آل انجام گرفته است (مطابق شکل ۶). این تحلیل در یک گام از نوع کمناش^{۱۳} و با استفاده از رهیافت لنگزوس^{۱۴} انجام گرفته و خروجی تغییرمکان گره‌ها در یک فایل با پسوند *.fil ذخیره شده است. در ادامه شکل مود کمناش اول و دوم نمونه (متناظر بارگذاری در چرخه‌های رفت و برگشت) با مقیاس ۱٪ به عنوان نقص اولیه برای نمونه اصلی تعریف شده است. این کار با وارد نمودن دستور نقص اولیه^{۱۵} در بخش کلیدواژه‌های^{۱۶} فایل اصلی تحلیل که مربوط به بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد صورت گرفته است. دستور یاد شده، تغییرشکل‌های مربوط به

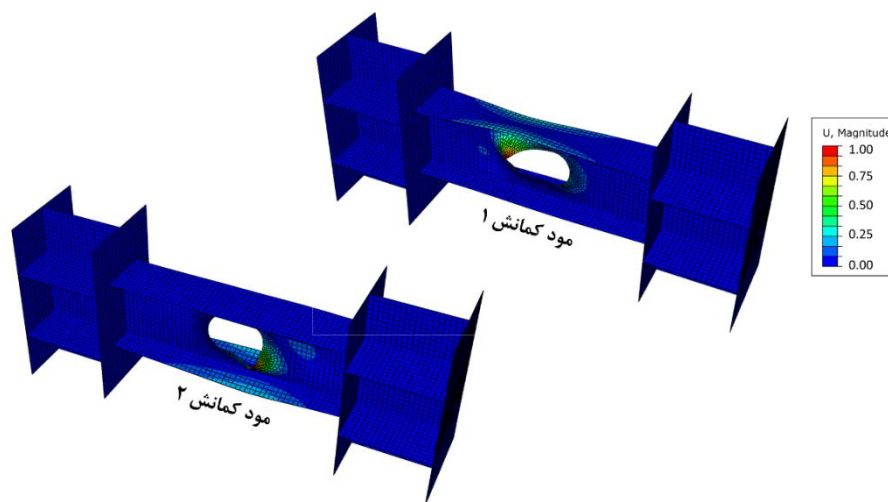
¹³ Buckle

¹⁴ Lanczos

¹⁵ Imperfection

¹⁶ Keywords

هر کدام از گره‌های مدل را از فایل کمانش ذخیره شده در مرحله قبل فراخوانی و پس از ضرب نمودن در ضریب مقیاس مشخص شده با مختصات گره مربوطه در مدل اصلی جمع می‌نماید. بدین ترتیب، مدل ناکامل برای استفاده در تحلیل‌های مربوط به بارگذاری چرخه‌ای بدست می‌آید.



شکل ۶: شکل مود کمانش اول و دوم برای نمونه‌های مورد بررسی

۶- شرایط گیرداری و بارگذاری نمونه‌ها

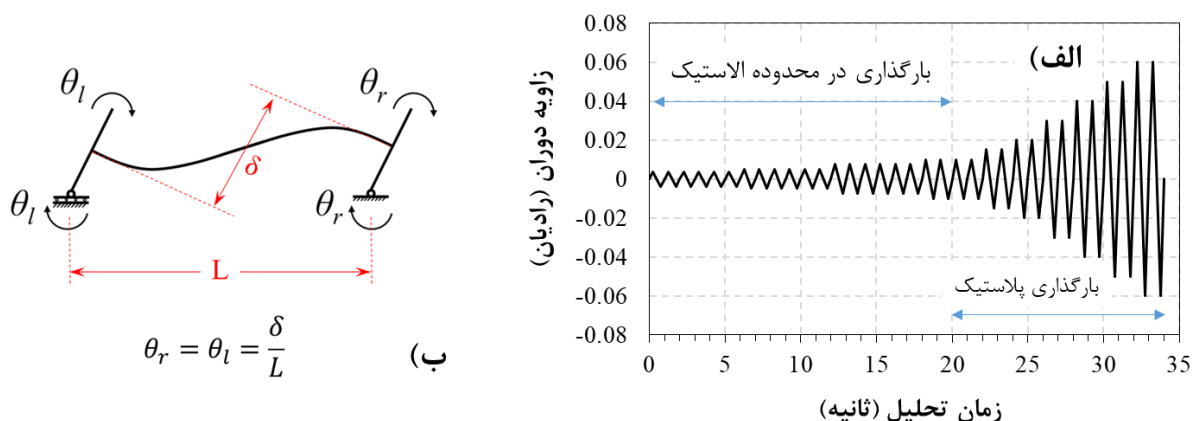
شرایط گیرداری برای نمونه‌های مورد بررسی مشابه پیکربندی نشان داده شده در شکل ۳ می‌باشد. چنانچه در شکل ۵ نشان داده شده است، ۴ نقطه مرجع در بالا و پایین ستون‌های مدل عددی تعریف شده است. درجات آزادی نقاط موجود در بالا و پایین ستون‌ها به نقاط مرجع مربوطه مقید^{۱۷} شده‌اند تا این نقاط به عنوان نقاط کنترل عمل نمایند. در ادامه هر چهار نقطه در جهت خارج از صفحه مقید شده است. دو نقطه مرجع تحتانی دارای شرایط مفصلی می‌باشند. برای نمونه‌های فاقد اثرات ثانویه تکیه‌گاه سمت چپ بصورت غلتکی و برای نمونه‌های دارای اثرات ثانویه این تکیه‌گاه به صورت ثابت می‌باشد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت اعمال دررفت (زاویه دوران) در نقاط کنترل ستون‌های سمت راست و چپ و مطابق تاریخچه بارگذاری ارائه شده توسط استاندارد [29] AISC 341 می‌باشد. ترسیم تاریخچه بارگذاری یاد شده در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق شکل ۷ (ب) زاویه دوران ستون‌های سمت راست و چپ تیر (θ_r و θ_l) برابر با هم و همچنین برابر با نسبت دررفت تیر (یعنی δ/L) می‌باشد که نشان‌دهنده شرایط حاکم بر ناحیه کاهش یافته در شکل ۲ می‌باشد. گام مورد استفاده برای تحلیل چرخه‌ای از نوع استاتیکی عمومی^{۱۸} و هسته تحلیلیگر از نوع حذف گاوسی مستقیم^{۱۹} با رهیافت نیوتن کامل^{۲۰} بوده است.

¹⁷ Tie

¹⁸ Static General

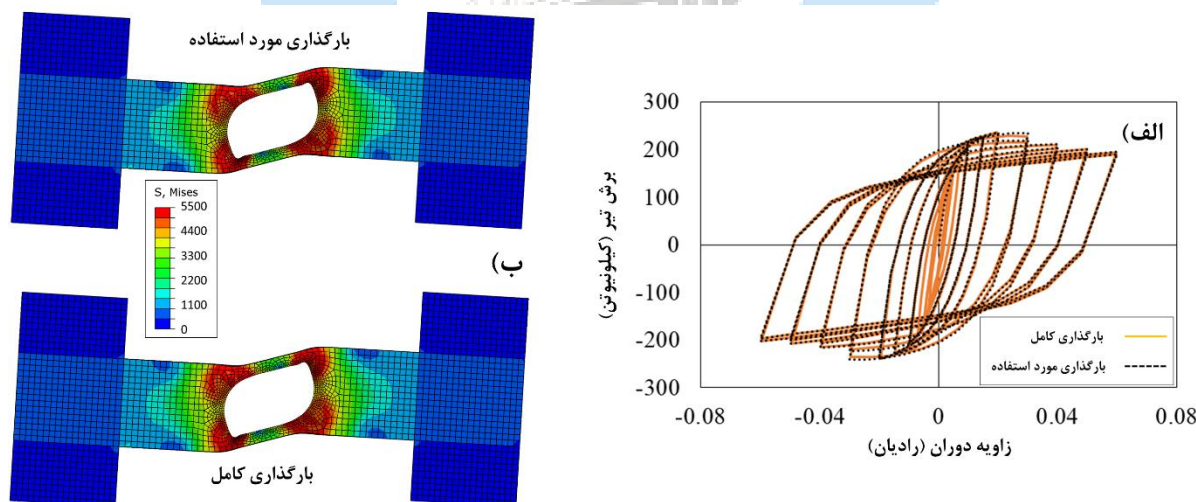
¹⁹ Direct Gauss elimination

²⁰ Full Newton



شکل ۷: بارگذاری نمونه‌ها؛ الف) تاریخچه بارگذاری نمونه‌ها مطابق [29] ASIC 341؛ ب) حالت تغییر شکل یافته تیر

با توجه به اینکه برای بارگذاری‌های کمتر از 0.01 رادیان (دریافت 1%)، عموماً مدل المان محدود در محدوده رفتار الاستیک یا پلاستیک شدگی محدود قرار دارد، لذا برای جلوگیری از طولانی شدن تحلیل‌ها، تاریخچه بارگذاری با زاویه دوران 0.01 رادیان و بیشتر در تحلیل‌ها لحاظ شده است (زوایای کمتر، در کارهای آزمایشگاهی حائز اهمیت می‌باشد). عدم تاثیرگذاری این اقدام بر نتایج تحلیل‌های عددی در شکل ۸ نشان داده شده است. مدل مورد استفاده در این تحلیل دارای تیر با مقطع $W12 \times 50$ و یک بازشو به ابعاد $\gamma=1.0$ و $\beta=0.7$ بوده است که یکبار تحت تاریخچه بارگذاری کامل و بار دیگر تحت تاریخچه بارگذاری با حذف دوران‌های کوچکتر از 0.01 رادیان قرار گرفته است. در این تحلیل‌ها تکیه‌گاه سمت چپ نمونه آزاد بوده و مدل‌ها فاقد اثرات ثانویه بوده‌اند. مطابق شکل، نمودارهای رفتار چرخه‌ای و کانتورهای تنش برای دو حالت بارگذاری یاد شده کاملاً مشابه هم می‌باشد. برای حالت با لحاظ اثرات ثانویه نیز نتایج مشابه حالت اخیر بوده و تاثیر حذف بارگذاری‌های کمتر از 0.01 رادیان قابل صرف‌نظر بوده که برای رعایت اختصار از ارائه آن اجتناب شده است.



شکل ۸: تاثیر حذف بارگذاری‌های کوچکتر از 0.01 رادیان بر رفتار مدل‌ها؛ الف) مقایسه منحنی رفتار چرخه‌ای؛ ب) توزیع تنش‌های مایسز در انتهای تحلیل

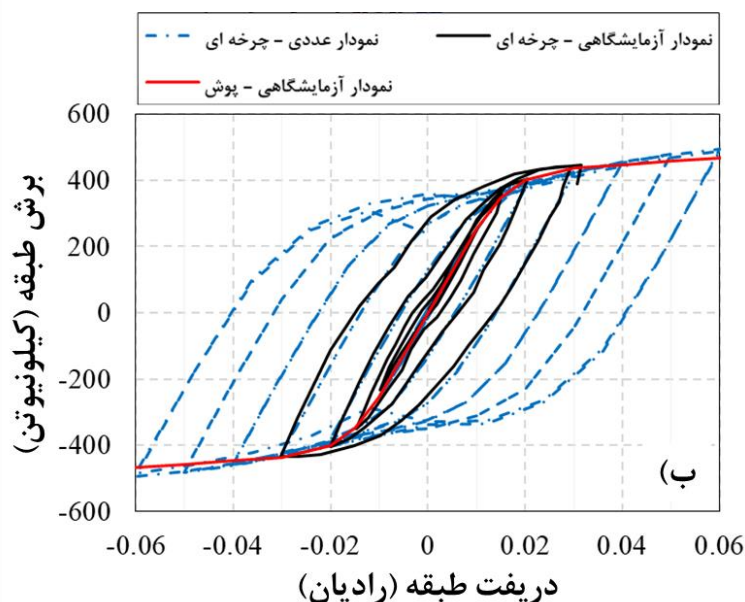
۷- صحت‌سنجی نمونه‌های عددی

برای صحت‌سنجی مدل‌های المان محدود مورد استفاده در این مقاله، از نمونه آزمایشگاهی تست شده توسط شین و همکاران [۳]، استفاده شده است. این نمونه که در شکل ۹ الف) قابل ملاحظه می‌باشد، به صورت بخشی از یک قاب فولادی شامل تیر با مقطع $W12 \times 50$

و دو ستون با مقطع $W14 \times 145$ و فاصله مرکز به مرکز $4495/8$ میلی‌متر می‌باشد. فارغ از ابعاد نمونه، پیکربندی کلی نمونه آزمایشگاهی مشابه شکل ۳(ب) بوده است. نمونه مورد آزمایش، دارای یک بازشوی دایره‌ای به قطر 256 میلی‌متر در وسط دهانه بوده است. گفتنی است که مدول الاستیسیته و تنش تسلیم برای مصالح بال تیر برابر با 198000 و 368 مگاپاسکال و مقادیر مربوطه برای جان تیر برابر با 225000 و 386 مگاپاسکال گزارش شده است [۳]. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها در شکل ۹(ب) ارائه شده است. مطابق شکل، نمونه آزمایشگاهی تا دررفت 4% به صورت چرخه‌ای بارگذاری شده است که منحنی مربوطه با رنگ مشکی قابل شناسایی می‌باشد. پس از این دررفت و با توجه به مشکل بوجود آمده برای جک بارگذاری، ادامه آزمایش به صورت بارگذاری مونوتونیک دنبال شده است که منحنی مربوطه در سمت مثبت و منفی نمودار با رنگ قرمز مشخص می‌باشد. منحنی آبی رنگ، مربوط به نتایج تحلیل عددی انجام شده توسط محققین در مقاله حاضر می‌باشد. مطابق شکل، سختی اولیه، مقاومت تسلیم و شیب پساتسلیم نمودار مربوط به مدل المان محدود مطابقت مناسبی با نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی دارد.



الف



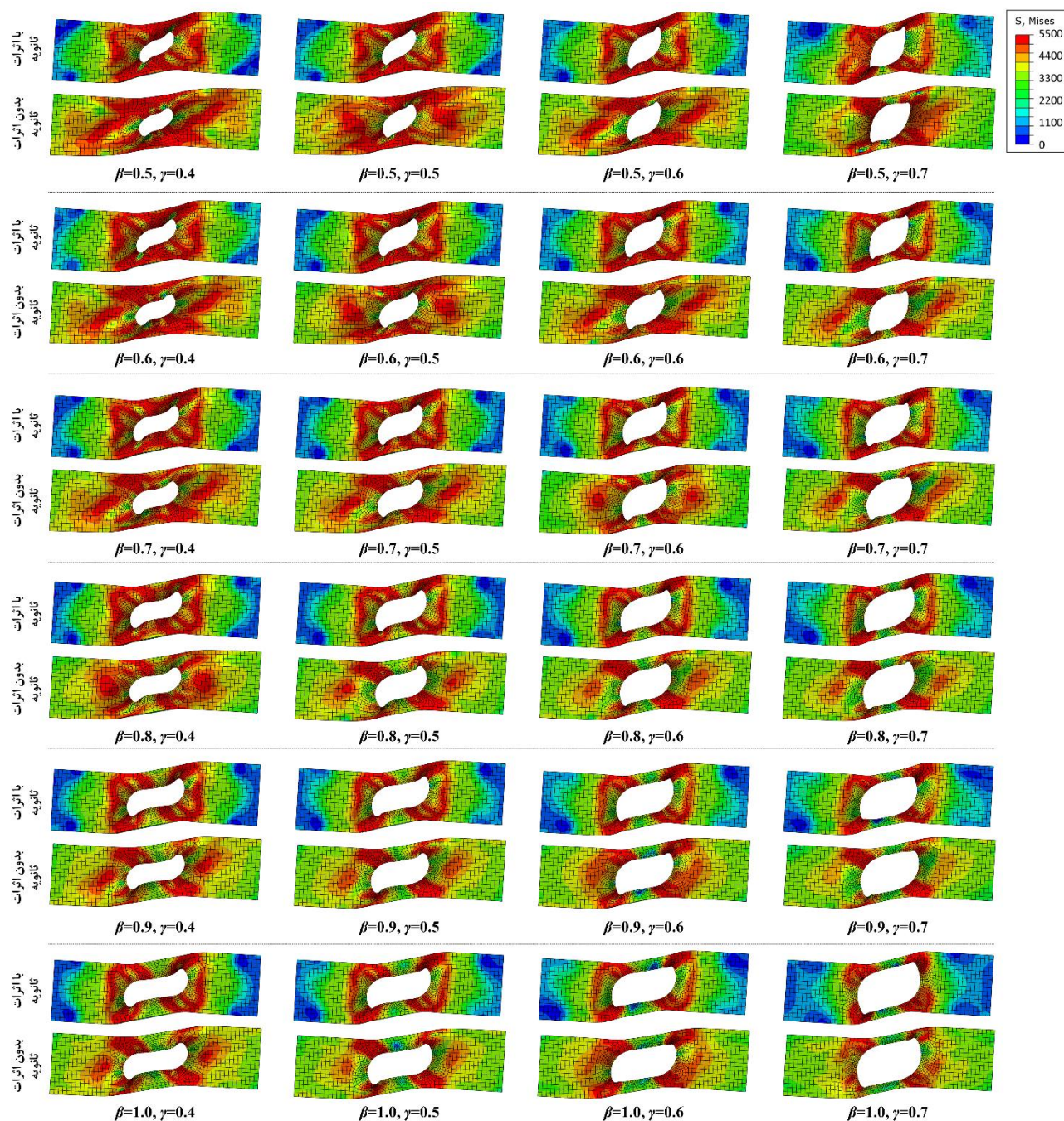
ب

شکل ۹: صحت سنجی مدل المان محدود؛ الف) پیکربندی نمونه آزمایشگاهی [۳] و عددی؛ ب) مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی

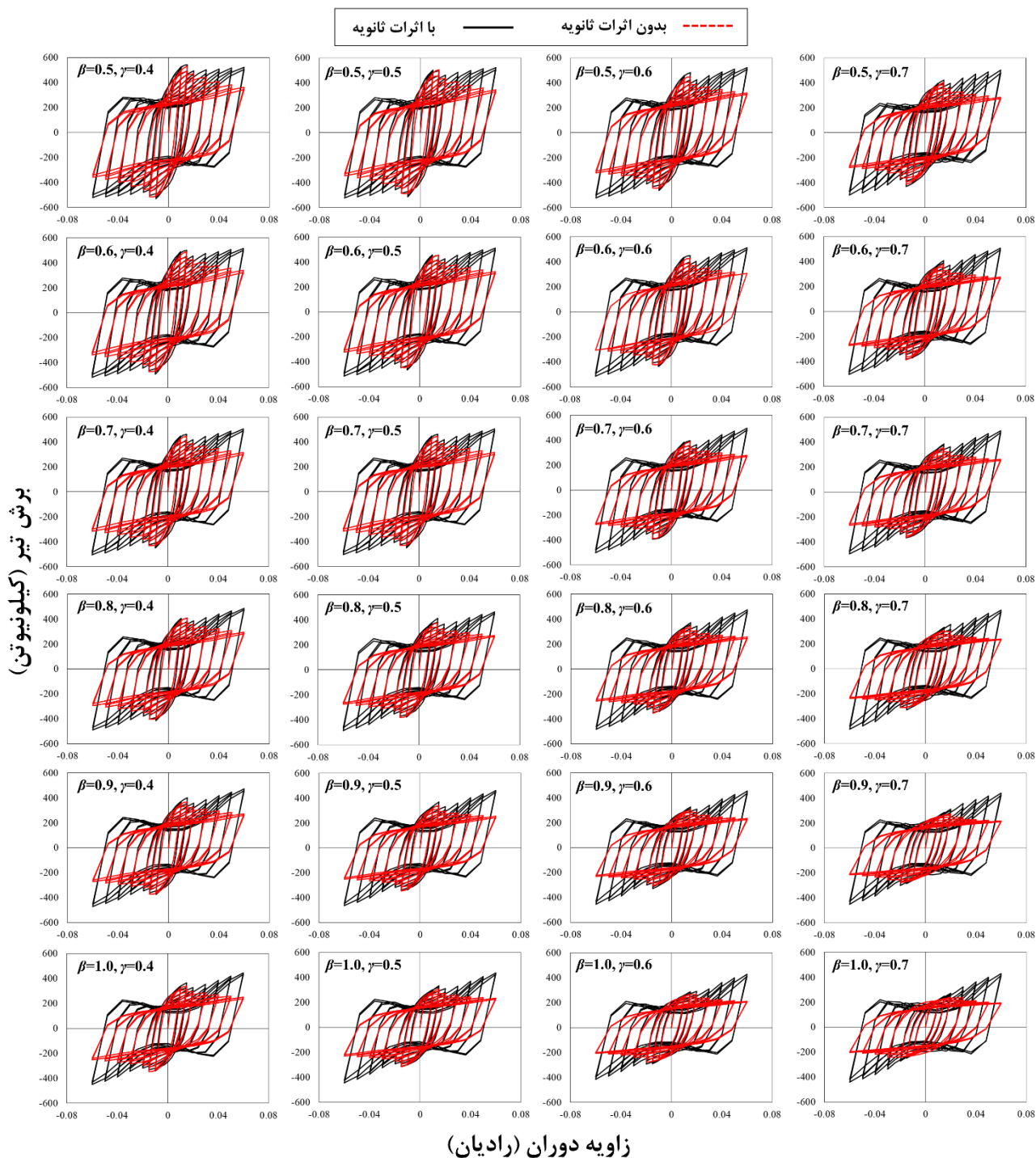
۸- توزیع تنش و منحنی رفتاری نمونه‌ها

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های المان محدود در قالب کانتورهای توزیع تنش و منحنی‌های رفتاری نمونه‌ها ارائه و مقایسه خواهند شد. بدین منظور شکل ۱۰ توزیع تنش‌های مایسز در نمونه‌های دارای تیر با پروفیل $W12 \times 50$ و ابعاد مختلف بازشو را تحت زاویه دوران $0/06$ رادیان نشان می‌دهد. در این شکل، تصاویر هر ردیف عمودی مربوط به یک ارتفاع بازشوی مشخص و تصاویر هر ردیف افقی مربوط به یک طول بازشوی مشخص می‌باشد. با توجه به صلبیت ستون‌های طرفین نمونه‌ها مطابق توضیحات بند ۴، برای ساده‌سازی تصاویر شکل ۱۰ از نمایش ستون‌های طرفین خودداری شده است. با توجه به شکل و با مقایسه کانتورهای مربوط به حالات با و بدون لحاظ اثرات ثانویه، ملاحظه می‌شود که در هر دو حالت با و بدون لحاظ اثرات ثانویه، رفتار غالب مکانیزم ویرانیدیل و تشکیل ۴ مفصل پلاستیک در گوشه‌های بازشو می‌باشد. لیکن همانطور که مشخص است، در نظر گرفتن اثرات ثانویه باعث ایجاد نیروی محوری در تیر نمونه‌ها می‌شود. شکل ۱۱ مقایسه منحنی‌های رفتاری نمونه‌های دارای تیر با پروفیل $W12 \times 50$ را نمایش می‌دهد. مشابه شکل ۱۰، ردیف‌های عمودی و افقی به ترتیب نشان‌دهنده ارتفاع و طول بازشو می‌باشند. در هر نمودار، منحنی مربوط به حالت بدون لحاظ اثرات ثانویه با رنگ قرمز و منحنی مربوط به حالت با لحاظ اثرات ثانویه با رنگ مشکی نمایش داده شده است. با مقایسه این دو منحنی در نمودارهای مربوط به نمونه‌های مختلف می‌توان ملاحظه کرد که تا زاویه دوران $0/02$ رادیان، منحنی‌های مربوط به حالات با و بدون لحاظ اثرات ثانویه انطباق مناسبی با هم دارند. این درحالیست که با افزایش دامنه بارگذاری، افت سختی و مقاومت در نمونه‌های فاقد اثرات ثانویه مشهود می‌باشد. این مسئله را می‌توان به تشدید کمانش‌های موضعی تحت تنش‌های فشاری موجود در اطراف بازشو در زوایای دوران بیشتر از $0/02$ رادیان مربوط دانست. در مقابل، ایجاد نیروهای کششی در نمونه‌های دارای اثرات ثانویه با افزایش دامنه بارگذاری، باعث ایجاد ظرفیت اضافی در این نمونه‌ها و جلوگیری از افت سختی و مقاومت می‌شود. توزیع تنش‌ها و رفتار کلی نمونه‌های دارای دو نوع پروفیل دیگر نیز مشابه نمونه‌های بررسی شده در این بخش می‌باشد. در ادامه، تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان اختلاف ناشی از لحاظ یا عدم لحاظ اثرات ثانویه بررسی می‌شود.





شکل ۱۰: توزیع تنش‌های مایسز در نمونه‌های دارای تیر با پروفیل $W12 \times 50$ تحت دوران 0.06 رادیان

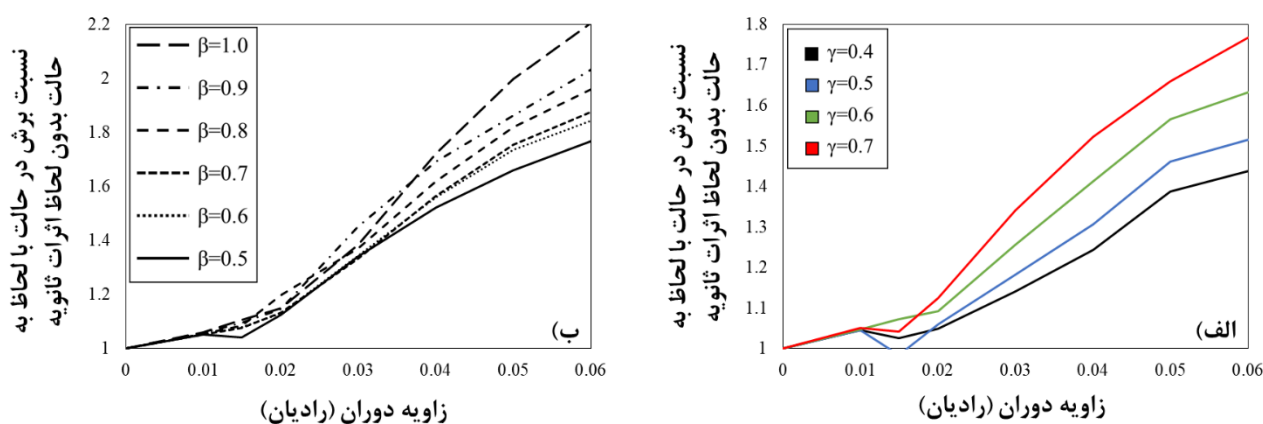


شکل ۹: مقایسه منحنی‌های رفتاری نمونه‌های دارای تیر با پروفیل W12x50

۹- تاثیر ارتفاع بازشو

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان اختلاف ناشی از لحاظ یا عدم لحاظ اثرات ثانویه، بیشینه برش تیر در هر چرخه از بارگذاری برای نمونه حاوی اثرات ثانویه تعیین و بر مقدار متناظر در نمونه فاقد اثرات ثانویه تقسیم شده است. منحنی‌های حاصل برای تیر

با مقطع W12×50 و طول بازشو $\beta=0.5$ در شکل ۱۲ (الف) ترسیم شده است. مطابق شکل، تاثیر اثرات ثانویه تا زاویه دوران 0.102 رادیان چندان قابل ملاحظه نمی‌باشد. لیکن با افزایش دامنه بارگذاری، این تاثیر افزایش یافته و تفاوت بین دو حالت، قابل ملاحظه می‌شود. این مسئله را می‌توان به تشدید عملکرد کششی تیر با افزایش زاویه دوران در دو انتهای آن مربوط دانست. در این میان، بایستی توجه نمود که با افزایش ارتفاع بازشو، میزان اختلاف بوجود آمده بین دو حالت لحاظ یا عدم لحاظ اثرات ثانویه افزایش می‌یابد. به طور مشخص، در زاویه دوران 0.106 رادیان، مقاومت نمونه دارای بازشو با کمترین ارتفاع در حالت لحاظ اثرات ثانویه 1.44 برابر حالت بدون لحاظ اثرات ثانویه و مقاومت نمونه دارای بازشو با بیشترین ارتفاع در حالت لحاظ اثرات ثانویه 1.77 برابر حالت بدون لحاظ اثرات ثانویه بوده است. با توجه به تصاویر شکل ۱۰ و منحنی‌های شکل ۱۱، می‌توان ملاحظه نمود که برای یک طول بازشوی مشخص با افزایش ارتفاع بازشو رفتار نمونه فاقد اثرات ثانویه بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته و دچار کاهش شده است که این مسئله افزایش اختلاف بوجود آمده بین دو حالت با و بدون لحاظ اثرات ثانویه را توضیح می‌دهد.



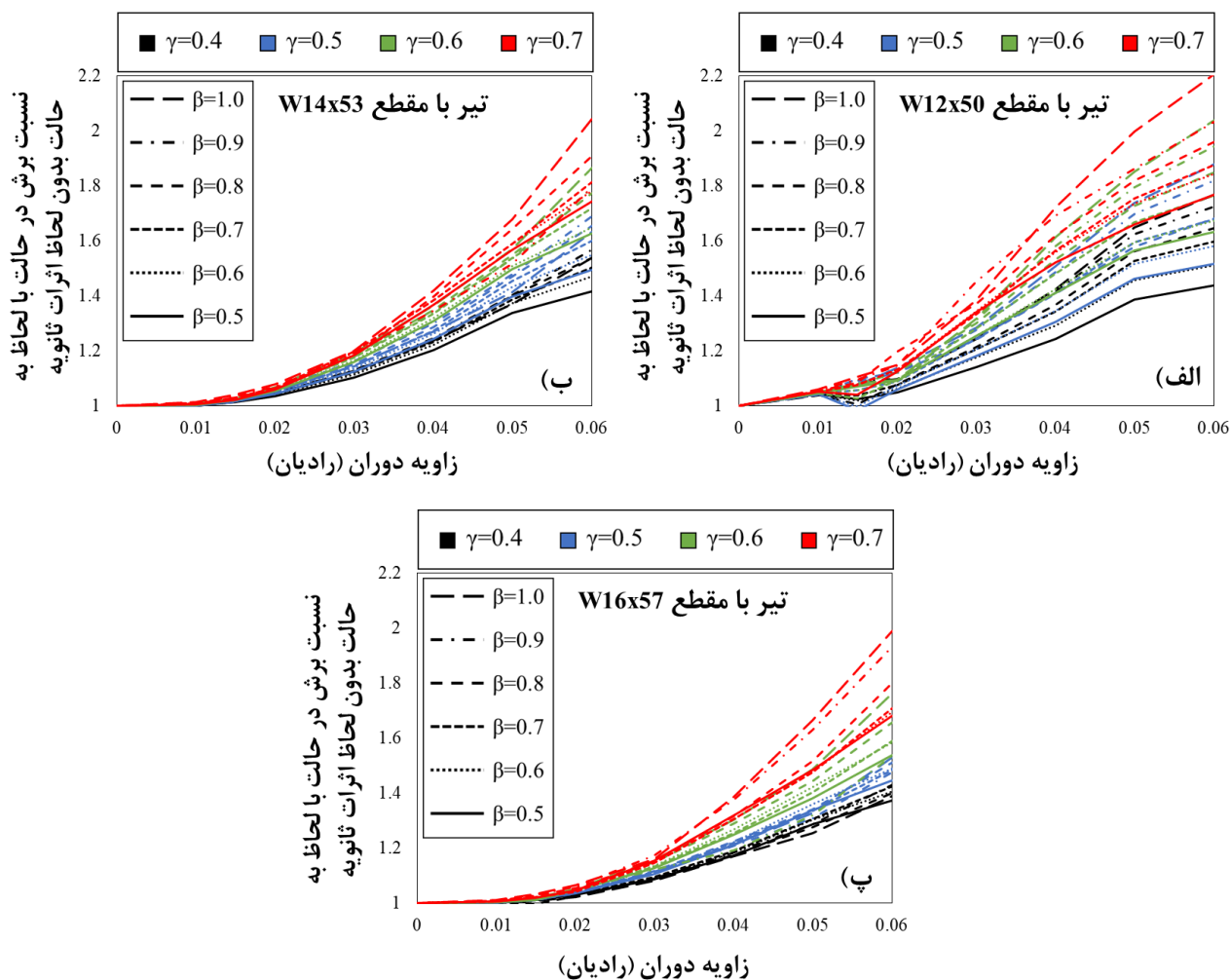
شکل ۱۲: نسبت برش در حالت لحاظ به حالت عدم لحاظ اثرات ثانویه برای تیر با مقطع W12×50؛ (الف) تاثیر ارتفاع بازشو (طول بازشو $\beta=0.5$)؛ (ب) تاثیر طول بازشو (ارتفاع بازشو $\gamma=0.7$)

۱۰- تاثیر طول بازشو

برای بررسی تاثیر طول بازشو، از نمودار مشابهی استفاده شده است. شکل ۱۲ (ب)، نسبت بیشینه برش تیر در هر چرخه از بارگذاری را برای دو حالت با و بدون اثرات ثانویه نمایش می‌دهد. نمودار برای تیر با مقطع W12×50 و ارتفاع بازشو $\gamma=0.7$ ترسیم شده است. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که مجدداً برای زوایای دوران کمتر از 0.102 رادیان لحاظ اثرات ثانویه تاثیر چندانی بر نتایج تحلیل‌ها نداشته است. این درحالیست که برای زوایای دوران بیشتر، لحاظ اثرات ثانویه، افزایش مقاومت حتی بیش از دو برابر را نیز در پی داشته است. همانطور که بیان شد، علت این مسئله تشدید عملکرد کششی تیر با افزایش زاویه دوران در دو انتهای آن می‌باشد. مطابق شکل، با افزایش طول بازشو، نسبت مقاومت نمونه برای دو حالت با و بدون لحاظ اثرات ثانویه، افزایش قابل توجهی داشته است. لازم به ذکر است که این روند در زوایای دوران بالاتر بیشتر مشهود بوده و در مواردی برای زوایای دوران پایین صادق نمی‌باشد. در زاویه دوران 0.106 رادیان، مقاومت نمونه دارای بازشو با کمترین طول در حالت لحاظ اثرات ثانویه 1.77 برابر حالت بدون لحاظ اثرات ثانویه و مقاومت نمونه دارای بازشو با بیشترین طول در حالت لحاظ اثرات ثانویه 2.2 برابر حالت بدون لحاظ اثرات ثانویه بوده است. مشابه آنچه برای تاثیر ارتفاع بازشو گفته شد، در این مورد نیز افزایش اختلاف بوجود آمده بین دو حالت با و بدون لحاظ اثرات ثانویه را می‌توان به کاهش بیشتر مقاومت در نمونه‌های فاقد اثرات ثانویه به هنگام افزایش طول بازشو مربوط دانست.

۱۱- تاثیر مقطع تیر

برای بررسی مقطع تیر بر نتایج تحلیل‌ها، از پروفیل‌های W12x50، W14x53 و W16x57 به عنوان مقطع تیر در تحلیل‌ها استفاده شده است. شکل ۱۳ نتایج تحلیل‌ها برای هر سه پروفیل یاد شده را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، ارتفاع بازشو بین $\gamma=0.4\sim 0.7$ و طول بازشو بین $\beta=0.5\sim 1.0$ متغیر بوده است. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، روند کلی برای هر سه مقطع تقریباً مشابه هم می‌باشد. این در حالیست که با افزایش عمق مقطع، مقداری از میزان افزایش مقاومت مربوط به اثرات ثانویه کاسته می‌شود.

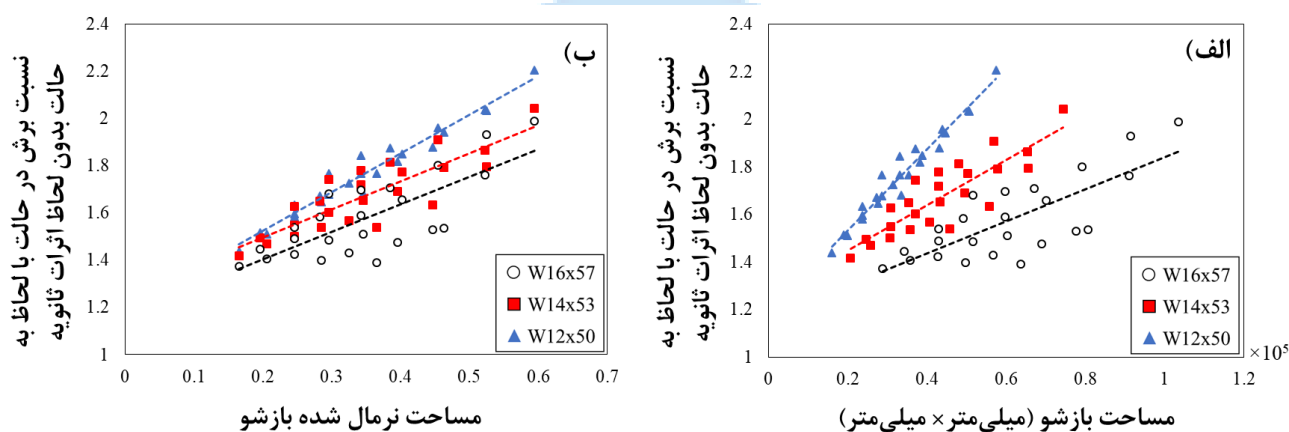


شکل ۱۳: تاثیر مقطع تیر بر لحاظ یا عدم لحاظ اثرات ثانویه؛ (الف) تیر با مقطع W12x50؛ (ب) تیر با مقطع W14x53؛ (پ) تیر با مقطع W16x57

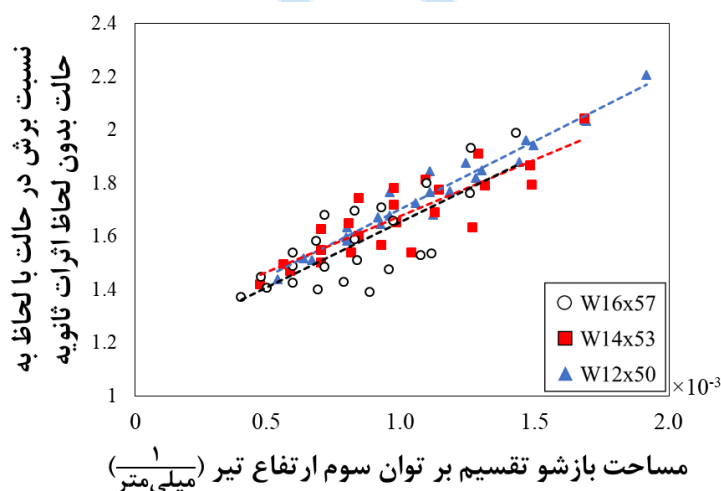
۱۲- ارائه رابطه پیشنهادی

چنانچه در بخش‌های قبل ملاحظه شد، با افزایش طول و ارتفاع بازشو، میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه تشدید می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که میزان افزایش مقاومت یاد شده ارتباط مستقیم با مساحت بازشو داشته باشد. شکل ۱۴ (الف)، میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه را در زاویه دوران ۰/۰۶ رادیان نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود، برای هر کدام از مقاطع ارتباط مناسبی بین مساحت بازشو و افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه برقرار می‌باشد. این در حالی است که خطوط برازش شده

به داده‌های مربوط به هر کدام از پروفیل‌ها متفاوت با هم می‌باشد. برای کاهش این تفاوت، بایستی توجه نمود که برای بازشو با یک نسبت ابعادی ثابت، با افزایش سایز مقطع تیر، مساحت بازشو به تناسب افزایش می‌یابد. لذا این ایده به ذهن می‌رسد که مساحت بازشو را می‌توان با استفاده از توان دوم عمق تیر نرمال سازی نمود تا پارامتر مورد استفاده به صورت نسبت کاهش سطح یک بخش مربعی از جان تیر مورد بررسی بیان شود. شکل ۱۴(ب)، نمودار مشابه شکل ۱۴(الف) را با محور افقی نرمال شده نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود، در این حالت تفاوت بین خطوط برازش شده کاهش یافته و لذا می‌توان گفت که مساحت نرمال شده بازشو پارامتر مناسب‌تری برای بیان رفتار مدل‌های عددی می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۴(ب)، ملاحظه می‌شود که هنوز هم تفاوت معناداری بین خطوط برازش شده برای پروفیل‌های مختلف موجود می‌باشد. این تفاوت را می‌توان با آنچه در بند ۱۱ در ارتباط با تعویض مقطع تیر مشاهده شد، معادل دانست. همانطور که در بند مربوطه ذکر شد، با افزایش عمق مقطع تیر از میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه کاسته می‌شود. لذا می‌توان تصور نمود که با تقسیم دوباره محور افقی نمودار شکل ۱۴(ب) بر عمق مقطع تیر بتوان تاثیر ناشی از افزایش سایز مقطع را در نمودارها لحاظ کرد. شکل ۱۵ نمودار مربوطه را برای زاویه دوران ۰/۰۶ رادیان نشان می‌دهد.

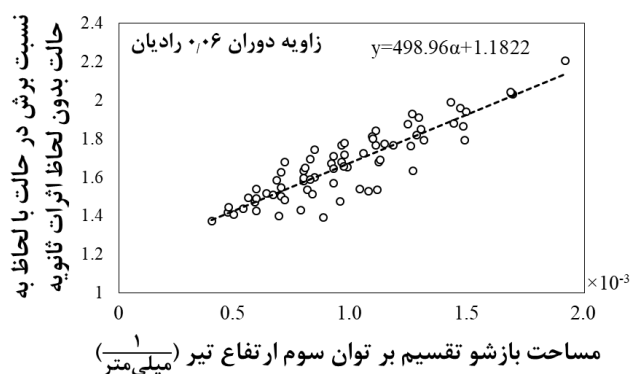
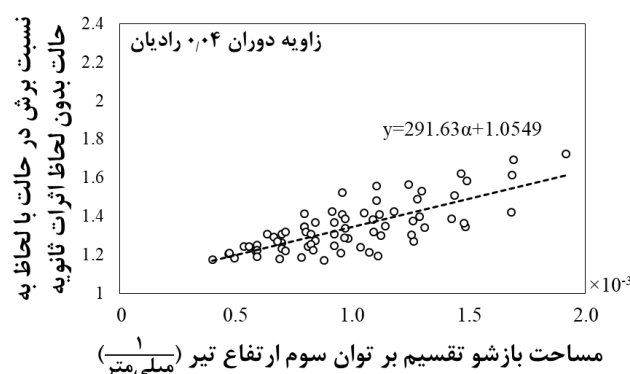
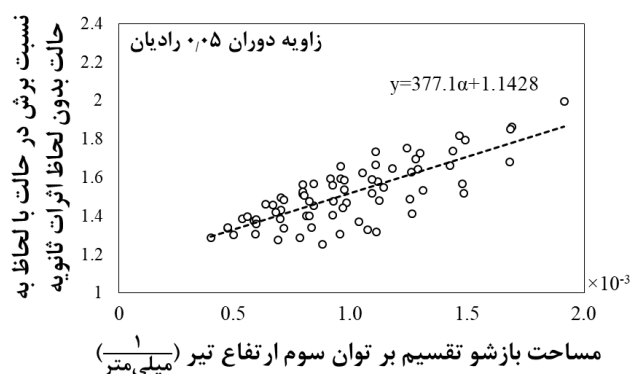
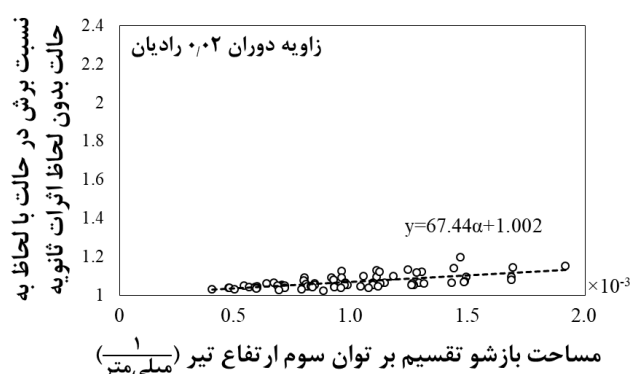
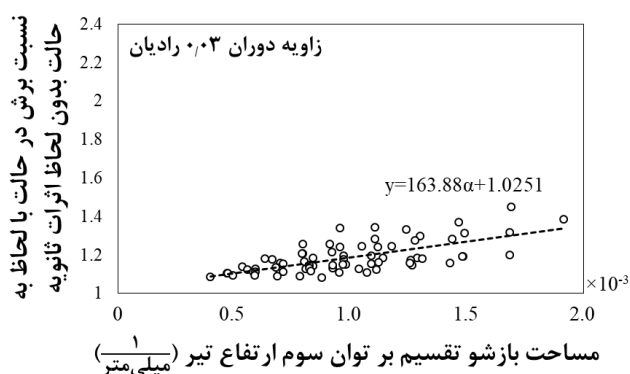


شکل ۱۴: میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در زاویه دوران ۰/۰۶ رادیان: (الف) نسبت به مساحت بازشو؛ (ب) نسبت به مساحت نرمال شده بازشو



شکل ۱۵: میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در زاویه دوران ۰/۰۶ رادیان نسبت به مساحت بازشو تقسیم بر توان سوم ارتفاع تیر

همانطور که در این شکل مشخص است، داده‌های مربوط به هر سه پروفیل، انطباق مناسبی با هم داشته و لذا در این مرحله می‌توان نتایج مربوط به هر سه گروه مدل را با هم تلفیق و برای برازش خط راهنما از آنها استفاده نمود. شکل ۱۶ میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در دامنه‌های مختلف بارگذاری را نمایش می‌دهد. در این نمودارها، داده‌های مربوط به هر سه گروه مدل عددی با پروفیل‌های مختلف با هم تلفیق شده‌اند. چنانچه در نمودارها مشخص است، روند توضیح داده شده برای زاویه دوران 0.06 رادیان، در زوایای دوران کمتر نیز صادق می‌باشد. با این تفاوت که میزان اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در زوایای دوران پایین، کمتر می‌باشد. مطابق شکل، هر کدام از نمودارها شامل یک خط برازش به همراه رابطه مشخصه آن می‌باشد. در این روابط، پارامتر α ، نشان‌دهنده مساحت بازشو تقسیم بر ارتفاع تیر به توان ۳ می‌باشد.

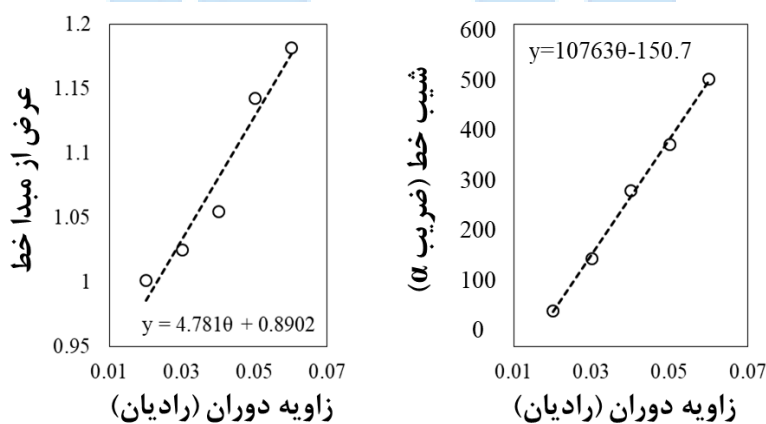


شکل ۱۶: میزان افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در دامنه‌های مختلف بارگذاری

چنانچه در نمودارهای شکل ۱۶ ملاحظه می شود، مقدار شیب خط (ضریب) برازش شده و عرض از مبدا آن دارای الگوی خاصی بوده و می توان آنها را بر حسب زاویه دوران دو انتهای تیر بیان نمود. به عنوان مثال، شیب خط برازش از مقدار $۶۷/۴۴$ برای زاویه دوران $۰/۰۲$ رادیان به $۴۹۸/۹۶$ برای زاویه دوران $۰/۰۶$ رادیان افزایش یافته است. به طور مشابه عرض از مبدا این خطوط از مقدار $۱/۰۰۲$ برای زاویه دوران $۰/۰۲$ رادیان به $۱/۱۸۲۲$ برای زاویه دوران $۰/۰۶$ رادیان افزایش یافته است. شکل ۱۷ ترسیم ضریب و عرض از مبدا روابط موجود در شکل ۱۶ بر حسب زاویه دوران تکیه گاه های تیر ارائه می نماید. هر نقطه در این شکل ها نماینده شیب و عرض از مبدا خطوط برازش شده در یکی از نمودارهای شکل ۱۶ می باشد. با توجه به شکل، شیب خطوط برازش شده در این نمودارها را می توان از رابطه $۱۵۱-۰۷۶۳\theta$ و عرض از مبدا آنها را از رابطه $۰/۸۹+۴۸\theta$ بدست آورد. بدین ترتیب، میزان اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه برای بازوهای مختلف و در زوایای دوران مختلف برای دو انتهای تیر، θ ، را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

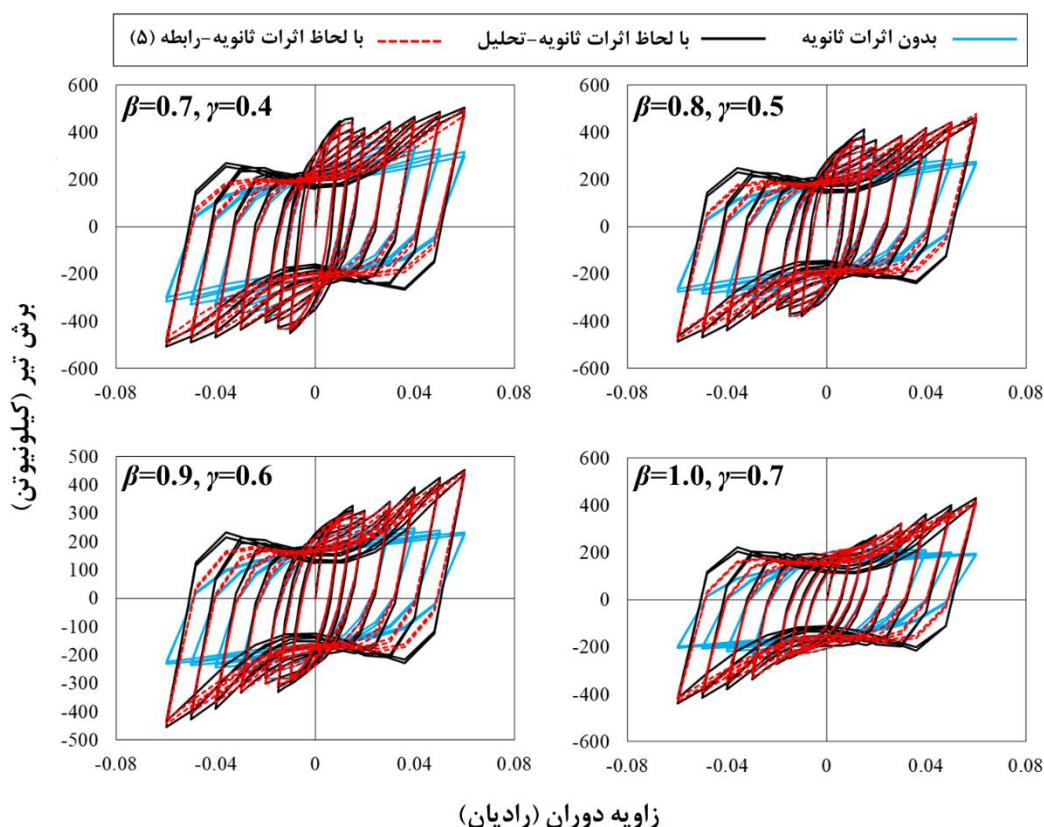
$$\frac{V_{op,2nd}}{V_{op}} = (10763\theta - 151)\alpha + 4.78\theta + 0.89 \quad (5)$$

که در آن پارامتر α ، نشان دهنده مساحت بازو تقسیم بر توان سوم ارتفاع تیر (ابعاد بر حسب میلی متر) و پارامتر θ نشان دهنده زاویه دوران دو انتهای تیر بر حسب رادیان (برابر با درجیت تیر) می باشد. رابطه فوق برای زوایای دوران بین $۰/۰۲$ تا $۰/۰۶$ رادیان برازش شده و باید در این بازه مورد استفاده قرار گیرد. برای زوایای دوران کوچکتر از $۰/۰۲$ رادیان ضریب فوق را می توان برابر با $۱/۰$ در نظر گرفت.



شکل ۱۷: ضریب و عرض از مبدا روابط موجود در شکل ۱۶ بر حسب زاویه دوران دو انتهای تیر

برای بررسی دقت رابطه (۵)، چهار نمونه از مدل های دارای تیر با پروفیل $W12 \times 50$ انتخاب و منحنی رفتار چرخه ای مربوط به حالت لحاظ اثرات ثانویه برای آنها با استفاده از ضرب منحنی رفتار چرخه ای حالت فاقد اثرات ثانویه در رابطه (۵) تولید شده است. شکل ۱۸ مقایسه بین منحنی های رفتار چرخه ای مربوط به حالت لحاظ اثرات ثانویه حاصل از تحلیل المان محدود و رابطه (۵) را نمایش می دهد. در نمودارهای این شکل، منحنی آبی رنگ مربوط به نتایج تحلیل در حالت فاقد اثرات ثانویه، منحنی مشکی رنگ مربوط به نتایج تحلیل در حالت لحاظ اثرات ثانویه و منحنی قرمز رنگ مربوط به نمودار تولید شده توسط رابطه (۵) می باشد. لازم به ذکر است که در محاسبات مربوط به منحنی حاصل از رابطه (۵) مقدار دوران دو انتهای تیر برابر با $\theta_p + 0.01$ لحاظ شده است که در آن θ_p بخش غیرارتجاعی مربوط به دوران دو انتها می باشد. این کار تاثیری بر نتایج شاخه بارگذاری نمودار نداشته لیکن باعث ایجاد انطباق بهتری بین دو نمودار عددی و تحلیلی در شاخه باربرداری (ربع دوم و چهارم محورهای مختصات) می شود. همانطور که در شکل ۱۸ ملاحظه می شود، منحنی حاصل از رابطه (۵) همخوانی مناسبی با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود دارد. بدین ترتیب می توان گفت که رابطه (۵) ابزار مناسبی برای برآورد اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در تیرهای دارای بازو میانی می باشد.



شکل ۱۸: مقایسه منحنی‌های رفتار چرخه‌ای مربوط به حالت لحاظ اثرات ثانویه حاصل از تحلیل المان محدود و رابطه (د)

۱۳- نتیجه گیری

استفاده از تیرهای با جان کاهش یافته به عنوان فیوز سازه‌ای یکی از روش‌های پیشنهادی برای کاهش نیازهای لرزه‌ای در محل اتصال تیر به ستون می‌باشد. عملکرد فیوزی این نواحی متکی بر تشکیل مکانیزم ویران‌دیل در ناحیه تضعیف شده، می‌باشد که به نوبه خود باعث بروز تغییرشکل‌های محوری در تیر می‌شود. این در حالیست که صلبیت کف سازه‌ای از کاهش طول تیر جلوگیری نموده و باعث ایجاد نیروهای کششی در طول تیر می‌شود که به اثرات ثانویه مشهور می‌باشد. بروز این اثرات می‌تواند باعث بیشتر شدن ظرفیت مقطع کاهش یافته از مقدار محاسبه شده و در نتیجه تمرکز تغییرشکل‌های پلاستیک در محل اتصال تیر به ستون شود. در همین راستا، تحقیق حاضر به بررسی تاثیر لحاظ اثرات ثانویه بر رفتار چرخه‌ای تیرهای فولادی با جان کاهش یافته می‌پردازد. بدین منظور، سه گروه مدل المان محدود با مقاطع تیر مختلف در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و تاثیر ابعاد بازشوی جان تیر در حضور یا عدم حضور اثرات ثانویه بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده:

۱- تاثیر لحاظ اثرات ثانویه تا زاویه دوران ۰/۰۲ رادیان چندان قابل ملاحظه نمی‌باشد. لیکن با افزایش زاویه دوران دو انتهای تیر، این تاثیر افزایش یافته و تفاوت بین دو حالت لحاظ یا عدم لحاظ این اثرات قابل ملاحظه می‌شود.

۲- با افزایش ارتفاع بازشو، میزان اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه افزایش می‌یابد، به نحوی که میزان اضافه مقاومت تحت زاویه دوران ۰/۰۶ رادیان، برای نسبت ارتفاع بازشو $\gamma=0.4$ به طور میانگین برابر با ۵۰٪ و برای نسبت ارتفاع بازشو $\gamma=0.7$ برابر با ۸۹٪ می‌باشد.

۳- با افزایش طول بازشو نیز میزان اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه افزایش می‌یابد. میزان اضافه مقاومت تحت زاویه دوران 0.7β به طور میانگین برابر با 0.56% و برای نسبت ارتفاع بازشو $\beta=1.0$ برابر با 0.84% می‌باشد.

۴- به طور کلی می‌توان گفت که میزان اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در زوایای دوران مختلف ارتباط مستقیم با مساحت بازشو دارد. میزان اضافه مقاومت تحت زاویه دوران 0.7β رادیان، برای 0.16% کاهش مساحت جان تیر به طور میانگین برابر با 0.41% و برای 0.60% کاهش مساحت جان تیر برابر با 0.104% می‌باشد.

۵- روند کلی توضیح داده شده در بندهای فوق برای تیرها با ارتفاع مقطع متفاوت، تقریباً مشابه هم می‌باشد. این در حالیست که با افزایش عمق مقطع تیر از میزان افزایش مقاومت مربوط به اثرات ثانویه کاسته می‌شود. به طور مثال در زاویه دوران 0.7β رادیان، افزایش عمق مقطع تیر به میزان 0.33% ، کاهش میزان اضافه مقاومت ناشی از اثرات ثانویه به مقدار 0.30% را در پی خواهد داشت.

نهایتاً، داده‌های مربوط به هر سه گروه مدل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و با نرمال‌سازی آنها رابطه‌ای جهت تخمین افزایش مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه برای بازشوه‌های مختلف و در دریفت‌های مختلف ارائه شده است. بررسی دقت رابطه پیشنهادی نشان داد که نتایج حاصل از آن هم‌خوانی مناسبی با نتایج حاصل از تحلیل‌های المان محدود داشته و این رابطه ابزار مناسبی برای برآورد اضافه مقاومت ناشی از لحاظ اثرات ثانویه در تیرهای دارای بازشوی میانی می‌باشد. لحاظ افزایش مقاومت ناشی از اثرات ثانویه در بررسی رفتار تیرهای دارای بازشو در جان، می‌تواند فصل جدیدی در مطالعات مربوط به این نوع اعضای سازه‌ای باشد. بررسی تاب‌آوری ناحیه کاهش یافته در برابر پارگی ناشی از نیروهای کششی ثانویه، بررسی اثرات ثانویه در بازشوه‌های واقع در انتهای تیر و بررسی رفتار قاب‌های دارای تیر با جان کاهش یافته در حضور و عدم حضور اثرات ثانویه را می‌توان به عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی ذکر نمود.

سیاسگزاری

بدینوسیله از زحمات اعضای کمیته انجمن مهندسی سازه ایران، هیات داوران و هیات تحریریه نشریه مهندسی سازه و ساخت در ارتقای کیفیت مقاله و انتشار آن تقدیر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Rashidi, S., Hedayat, A.A. & Bameri, M. (2022). Evaluating the impact of replacing gusset plates with slotted metal dampers on the vibration behavior of concentrically braced frames. In: *6th international conference on researches in science & engineering & 3rd international congress on civil, architecture and urbanism in Asia*, Bangkok, Thailand.
- [2] Shin, M., Kim, S.P., Halterman, A. & Aschheim, M. (2017). Seismic toughness and failure mechanisms of reduced web-section beams: Phase 1 tests. *Engineering Structures*, Vol. 141, pp. 198-216, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.03.016.
- [3] Shin, M., Kim, S.P., Halterman, A. & Aschheim, M. (2017). Seismic toughness and failure mechanisms of reduced web-section beams: Phase 2 tests. *Engineering Structures*, Vol. 141, pp. 607-623, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.03.046.
- [4] Erfani, S., Akrami, V. & Mohammad-nejad, A. (2020). Lateral load resisting behavior of steel moment frames with reduced web section (RWS) beams. *Structures*, Vol. 28, pp. 251-265, doi: 10.1016/j.istruc.2020.08.060.
- [5] Chaghazardi, S., TahamouliRoudsari, M., Oghabi, M., & Movahednia, M. (2023). Experimental and Numerical Evaluation of a New Reduced Beam Section Connection without Flange Tapering. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Published online. doi: 10.22065/jsce.2023.394078.3097.
- [6] GanjiMorad, S., Oghabi, M., & TahamouliRoudsari, M. (2023). Investigation of Rigid Saddle Connection type II with Reduced Beam Sections and Web Stiffeners by Experimental Method. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Published online. doi: 10.22065/jsce.2023.394209.3100.
- [7] Ghaderi, M., Gerami, M., & Vahdani, R. (2020). Investigating the effect of extremely low cyclic fatigue in steel moment frames with reduced beam section connections. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), 5-19. doi: 10.22065/jsce.2018.127480.1526.
- [8] Hejazi, M. & Amere, F. (2021). Parametric study of behaviour of perforated yielding shear panel device as a vertical link beam in inverted v-braced steel frames under cyclic load. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 8(8), pp. 266-288. doi: 10.22065/jsce.2020.220995.2088.
- [9] safi, M., Gholami Alam, I., Darvishan, E. & beheshti, S. (2020). Experimental modeling for effect of knee fuse perforated web on performance of structural knee fuse subjected to cyclic loading in steel knee braced frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 7(3), pp. 114-128. doi: 10.22065/jsce.2018.127235.1521.

- [10] Hadi, A., Saffari, H. & Hedayat, A.A. (2011). Evaluation and study of the performance of steel beams having sinusoidal reduced beam web (RBW). In: *6th National Congress on Civil Engineering*, Semnan, Iran.
- [11] Aschheim, M.A. (2000). *Moment-resistant structure, sustainer and method of resisting episodic loads*. U.S. Patent No. 6012256, Washington DC, USA.
- [12] Aschheim, M. & Halterman, A. (2002). Reduced web section beams, Phase One: Experimental findings and design implications. In: *7th US national conference on earthquake engineering*, Boston, Massachusetts.
- [13] Akrami, V. (2021). Development of Strut Model for Evaluating Shear Capacity of Beams with Elongated Circular Web Openings. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 8(5), pp. 179-197. doi: 10.22065/jsce.2019.202614.1958.
- [14] Zeytinci, B.M., Şahin, M., Güler, M.A. & Tsavdaridis, K.D. (2021). A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring type stiffeners subject to Vierendeel actions. *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, Article No. 102915, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102915.
- [15] Classen, M., Kurz, W., Schäfer, M. & Hegger, J. (2019). A mechanical design model for steel and concrete composite members with web openings. *Engineering structures*, Vol. 197, Article No. 109417, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109417.
- [16] Carvalho, A.S., Rossi, A. & Martins, C.H. (2022). Assessment of lateral-torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. *Thin-Walled Structures*, Vol. 175, 109242, doi: 10.1016/j.tws.2022.109242.
- [17] Shamass, R., Ferreira, F.P.V., Limbachiya, V., Santos, L.F.P. & Tsavdaridis, K.D. (2022). Web-post buckling prediction resistance of steel beams with elliptically-based web openings using Artificial Neural Networks (ANN). *Thin-Walled Structures*, Vol. 180, 109959, doi: 10.1016/j.tws.2022.109959.
- [18] Chang, H.Y., Liao, C.T., Kang, S.Y., Ho, S.Y. & Lai, C.M. (2023). Seismic performance of RWS moment connections to steel box-columns and H-beams with general sections. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 201, Article No. 107691, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107691.
- [19] Morkhade, S.G. & Gupta, L.M. (2023). Critical study of steel beams with web openings. *Australian Journal of Structural Engineering*, Vol. 24(1), 24-35, doi: 10.1080/13287982.2022.2117319.
- [20] Jalali, M., & Rafiee, A. (2023). Performance Evaluation of Bolted Moment Frame with Reduced Beam Section. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Published online. doi: 10.22065/jsce.2023.393962.3098.
- [21] Sayed, A.M. (2022). Numerical study of the effects of web openings on the load capacity of steel beams with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 196, 107418, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107418.
- [22] Meng, B., Xiong, Y., Zhong, W., Duan, S. & Li, H. (2023). Progressive collapse behaviour of composite substructure with large rectangular beam-web openings. *Engineering Structures*, Vol. 295, 116861, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116861.
- [23] Qiao, H., Xie, X. & Chen, Y. (2022). Improvement of progressive collapse resistance for a steel frame system with beam-web opening. *Engineering Structures*, Vol. 256, Article No. 113995, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113995.
- [24] Nazaralizadeh, H., Ronagh, H., Memarzadeh, P. & Behnamfar, F. (2022). A practical design approach to bolted end-plate vertical-slits RWS connection. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 20, pp. 547-586, doi: 10.1007/s10518-021-01238-2.
- [25] Almutairi, F.F., Tsavdaridis, K.D., Alonso Rodríguez, A., Asteris, P.G. & Lemonis, M.E. (2023). Hysteretic Behaviour of Composite Reduced Web Section (RWS) Connections for Seismic Applications. *Journal of Earthquake Engineering*, published online, doi: 10.1080/13632469.2023.2204172.
- [26] Akrami, V., & Erfani, S. (2016). Review and assessment of design methodologies for perforated steel beams. *Journal of Structural Engineering*, 142(2), 04015148, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001421.
- [27] Erfani, S., & Akrami, V. (2016). Evaluation of cyclic fracture in perforated beams using micromechanical fatigue model. *Steel and Composite Structures*, 20(4), 913-930.
- [28] American Society for Testing and Materials, ASTM A992, (2015). *Standard Specification for Structural Steel Shapes*. West Conshohocken, PA, USA.
- [29] American Institute of Steel Construction, AISC 341, (2016). *Seismic provisions for structural steel buildings*. Chicago, IL, USA.