بررسی عددی مکانیزم خرابی لینک‌های برشی کوتاه و خیلی‌کوتاه ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲

عباس قدمی بدرلو[۱*]، ناصر زارع[۲]، محمد پای بند[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران/سازه، ، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران/سازه، ، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- abbasghadami@azaruniv.ac.ir

۲- zare۲۲۳۵۵@gmail.com

۳- mohammad.payband@azaruniv.ac.ir

چکیده:

به منظور رفع ابهامات آیین‌نامه AISC۳۴۱ در زمینه تعیین ظرفیت دوران و ضریب اضافه مقاومت لینک‌های برشی، پژوهش حاضر به بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ پرداخته است. مطابق نتایج، علت اصلی این ابهامات در تبیین دقیق مد خرابی لینک برشی خواهد بود. ضوابط آیین‌نامه منجر به نتایج محافظه‌کارانه (بیش از ۴۰ درصد) برای ظرفیت دوران لینک‌های برشی و بخصوص لینک‌های برشی بسیار کوتاه می‌شود. همچنین، با افزایش لاغری ورق جان، محل رخداد پارگی از محل اتصال سخت‌کننده به جان فاصله گرفته و به وسط پانل جان منتقل می‌شود. همچنین، در مدل‌های با نسبت طول لینک کمتر، خرابی اکثرا با ترک‌های قائم در کنار سخت‌کننده شروع شده و سپس در جان لینک گسترش می‌یابد. این در حالیست که در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و با نسبت طول کمتر، پارگی ورق جان در محل تقاطع بال و جان رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی: قاب مهاربندی واگرا، لینک برشی، شبیه‌سازی عددی، ظرفیت دوران، مد خرابی

* عباس قدمی، گروه مهندسی عمران- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

ایمیل: abbasghadami@azaruniv.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

ویراستاری شده

Numerical Investigation of the Failure Mechanism of Short and Very Short Shear Links Made from ASTM A٩٩٢ Steel

Abbas Ghadami [١*], Naser Zare [٢], Mohammad Payband [٣]

١- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

٢- M.Sc. in Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

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

Abstract:

There are numerous uncertainties in determining the rotation capacity and overstrength factor of shear links, which have raised concerns among structural designers regarding the design provisions in the AISC ٣٤١ code for accurately characterizing the behavior of shear links in eccentrically braced frames. Researchers attribute these past ambiguities to the failure mode of the links, as the maximum force developed in the link is proportional to the rotation capacity and, consequently, its failure mechanism. To address some of these previous uncertainties, this study examined the failure mode of short and very short shear links made from ASTM A٩٩٢ steel. For this purpose, a parametric study was conducted using the finite element software ABAQUS, considering the effects of local buckling, cumulative damage under cyclic loading, and the influence of crack initiation and propagation on the reduction of strength and stiffness. According to the results, the code provisions lead to conservative outcomes (by more than ٤٠٪) for the rotation capacity of shear links, especially very short shear links. Thus, one of the main reasons for the occurrence of a large overstrength factor in shear links is their rotation capacity exceeding ٠٫٠٨, which leads to strain hardening in the steel material and the development of forces greater than the plastic shear strength of the section. Furthermore, examining the failure mode of the links showed that, with an increase in web slenderness, the location of damage initiation and tearing shifts away from the stiffener-to-web connection and moves towards the center of the web panel. Additionally, in short shear links, particularly in models with smaller link length ratios, failure typically begins with vertical cracks near the stiffener and then propagates at the end of the stiffener into the link web. However, in very short shear links with smaller length ratios, web tearing occurs at the intersection of the flange and web.

Keywords: Eccentrically Braced Frame (EBF), Shear Link, Numerical Simulation, Rotation Capacity, Failure Mode

۱- مقدمه

در ساختمان‌های متداول امروزی، تلاش طراحان سازه بر آن است که تا حد امکان خرابی ناشی از زلزله در محل‌های مشخص از پیش-تعیین شده (فیوزها) متمرکز شود و اجزای اصلی سازه متحمل آسیب نشوند. تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی استهلاک انرژی سیستم‌های باربر جانبی مختلف صورت گرفته است. پاچیده و همکاران [۱] با بررسی عددی و آزمایشگاهی به بررسی تاثیر هسته فولادی بر رفتار بادبند کمانش‌تاب پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر نیز استفاده از دمپرهای دایره‌ای فولادی به‌عنوان المان‌های جذب انرژی در سیستم‌های مهاربندی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، پاچیده و همکاران [۲و۳] یک سیستم مهاربندی جدید شامل دمپر تسلیم‌پذیر به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در این سیستم، دمپر به‌عنوان المان اصلی جذب انرژی عمل کرده و مهاربندها الاستیک باقی می‌مانند. همچنین، ظرفیت باربری سیستم با استفاده از حلقه‌های فولادی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و ظرفیت جذب انرژی آن حدود ۴۵٪ بیشتر از مهاربندهای هم‌محور معادل است. در تحقیقی دیگر، پاچیده و همکاران [۴] یک مدل ساده‌شده جدید به نام "مدل سه‌نواره" برای دیوارهای برشی فولادی ارائه دادند که در آن ورق‌های پرکننده با سه نوار کششی جایگزین می‌شوند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌های مدل نشان‌دهنده تطابق مناسب است.

از میان انواع مختلف سیستم باربر لرزه‌ای، سیستم قاب مهاربندی شده واگرا[۱]، شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی و سختی کافی برای کنترل تغییرشکل‌های جانبی را فراهم می‌کند. در این سیستم، اتلاف انرژی ورودی زلزله از طریق تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر پیوند (لینک) صورت می‌گیرد. همچنین، به منظور تضمین رخداد رفتار الاستیک در اعضای خارج از تیر پیوند، تمامی عناصر خارج از این تیر باید برای حداکثر نیروهای داخلی حاصل از تسلیم تیر پیوند طراحی شوند [۵]. در شکل ۱ رایج‌ترین پیکربندی‌های قاب مهاربندی واگرا ارائه شده است. در این قاب‌ها، ویژگی‌های سایکلیک[۲] لینک‌ها به عوامل مختلفی مانند نسبت طول لینک[۳]، پروتکل بارگذاری، لاغری ورق، شرایط مرزی، مشخصات مصالح و آرایش سخت‌کننده‌های عرضی بستگی دارد [۶–۱۰]. اگر پارامتر نسبت طول لینک (یا نسبت طول)، که در رابطه (۱) ارائه شده است، در محدوده $\rho \leq 1.6$ باشد، لینک موردنظر به عنوان لینک برشی[۴] شناخته شده و مکانیزم خرابی لینک به صورت برشی خواهد بود. همچنین، لینک‌های با $\rho < 1$ و $1 \leq \rho \leq 1.6$ به ترتیب به عنوان لینک‌های برشی بسیار کوتاه و کوتاه طبقه‌بندی می‌شوند، که e طول لینک، M_p ظرفیت لنگر پلاستیک و V_p مقاومت برشی پلاستیک لینک است [۶,۱۱,۱۲]. از طرفی دیگر، لینک‌های بلند ($\rho \geq 2.6$) با مکانیزم خرابی خمشی و لینک‌های متوسط ($1.6 < \rho < 2.6$) با مکانیزم خرابی ناشی از اندرکنش خمش و برش به ظرفیت باربری نهایی خود می‌رسند. مطالعات عددی و آزمایشگاهی گذشته اثبات کرده است که لینک‌های برشی (لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه)، در مقایسه با لینک‌های بلند و متوسط، از استحکام، شکل‌پذیری، ظرفیت دوران و جذب انرژی قابل‌توجهی برخوردار هستند [۷,۱۰,۱۳,۱۴]. لذا، لینک‌های برشی همیشه به عنوان اولین انتخاب مهندسین مطرح بوده و کاربرد قابل توجهی در صنعت ساختمان دارد.

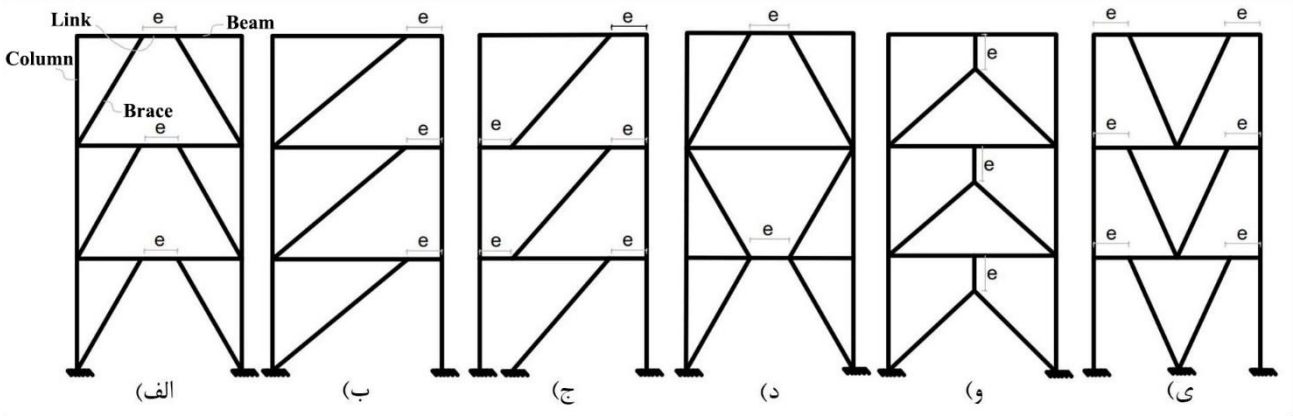
---

[۱] Eccentrically Braced Frame

[۲] Cyclic

[۳] Link length ratio

[۴] Shear Link



شکل ۱: برخی از آرایش‌های مرسوم برای قاب‌های مهاربندی واگرا

$$\rho = \frac{e V_p}{M_p} \qquad (۱)$$

تاکنون ابهامات زیادی در تعیین مقدار ضریب اضافه مقاومت و ظرفیت دوران لینک‌های برشی وجود دارد و محققین نتوانسته‌اند علت رخداد مقادیر بزرگ ضریب اضافه مقاومت و ظرفیت دوران زیاد (بالاتر از حد آیین‌نامه) را مشخص کنند [۸,۱۱,۱۵]، تا جایی که در بند F۳ از آیین‌نامه AISC۳۴۱-۲۲ [۱۶] هم به صراحت به این تناقض‌ها اشاره شده است. برخی محققین علت این موضوع را در قوانین اولیه آیین‌نامه جستجو کرده‌اند. چرا که ضوابط آیین‌نامه AISC۳۴۱-۲۲ برای طراحی لینک‌ها، ظرفیت دوران و ضریب اضافه مقاومت بر پایه مطالعات تجربی نسبتاً گسترده‌ای برروی مقاطع I-شکل ساخته شده از فولاد ASTM A۳۶ (با تنش تسلیم اسمی ۲۵۰ مگاپاسکال) تعیین شده است. با پیشرفت تکنولوژی و تولید مصالح جدید که تنش تسلیم و استحکام کششی متفاوتی نسبت به فولاد A۳۶ دارند، استفاده از مصالح جدید در صنعت ساختمان افزایش یافته و لزوم بررسی رفتار لینک‌ها و انجام تحقیقات جدید برای بررسی کفایت ضوابط آیین‌نامه ضروری خواهد بود [۱۷]. آیین‌نامه AISC ۳۴۱ ظرفیت دوران لینک‌های برشی ($\rho \leq$ ۱.۶) و خمشی ($\rho \geq$ ۲.۶) را به ترتیب به ۰/۰۸و ۰/۰۲ رادیان محدود کرده و برای لینک‌های متوسط نیز از درون‌یابی خطی بین این دو مقدار استفاده می‌کند. این در حالیست که ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه (۱.۶ $\leq \rho \leq$ ۱) و به‌خصوص بسیار کوتاه (۱ $> \rho$) از حدود آیین‌نامه با یک حاشیه اطمینان زیاد فراتر می‌رود. برای مثال، ظرفیت دوران لینک‌های برشی در تحقیقی که توسط جی و همکاران انجام شد، ۰/۰۸ – ۰/۱۷ رادیان [۱۵] و در تحقیقی که توسط بوزکورت و همکاران انجام شد ۰/۰۹۵– ۰/۱۴۱ رادیان گزارش شده‌است [۱۸]. این موضوع نشان می‌دهد که پارامترهای طراحی لرزه‌ای لینک‌های برشی با یک حاشیه قابل توجه از حد مذکور در آیین‌نامه AISC۳۴۱ فراتر رفته و در عمل منجر به طراحی غیر محافظه‌کارانه می‌شود. از طرفی، این نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه (لینک‌های برشی) نیاز به بررسی دقیق‌تر داشته و باید محدوده مناسب برای ظرفیت دوران لینک‌ها متناسب با مد خرابی حاکم بر رفتار آن‌ها تعیین شود. محققین علت ابهامات گذشته در این مورد را در مد خرابی لینک‌ها جستجو می‌کنند [۶–۹,۱۳,۱۴]، چرا که مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در لینک متناسب با ظرفیت دوران آن خواهد بود و تحمل دوران بیشتر منجر به ضریب اضافه مقاومت بیشتر خواهد شد.

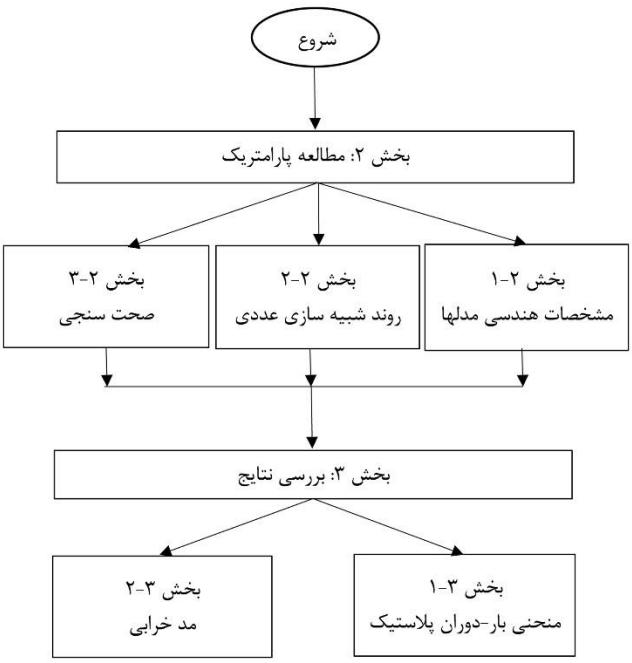
ریچاردز و اوانگ [۱۹و۲۰] نشان‌دادند که تحت پروتکل بارگذاری AISC۳۴۱-۲۰۰۲ بسیاری از لینک‌هایی که توسط محققین دیگر آزمایش شده‌اند به ظرفیت دوران غیرالاستیک پیش‌بینی‌شده دست نمی‌یابند. در نتیجه، او یک پروتکل بارگذاری اصلاح شده برای تست لینک‌ها پیشنهاد کرد که بعدها پایه و اساس ضوابط AISC۳۴۱-۰۵ و همچنین AISC۳۴۱-۲۲ شد. اوکازاکی و همکاران [۲۱] و اوکازاکی و انگلهارت [۲۲] با بررسی آزمایشگاهی دریافتند که پروتکل بارگذاری اعمال شده تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت دوران و ضریب

زیر استاری نشده

اضافه مقاومت لینک‌ها دارد. علاوه بر این، اوکازاکی و انگلهارت [۲۲] با بررسی مکانیزم خرابی لینک‌های برشی با آرایش مناسب سخت‌کننده‌های عرضی دریافتند که شروع آسیب از محل جوش‌های عمودی سخت‌کننده‌ها به جان می‌باشد. دوسیکا و همکاران [۱۷] به بررسی رفتار لرزه‌ای لینک‌های برشی ساخته‌شده از فولاد با تنش‌های تسلیم متفاوت پرداختند. مطابق نتایج، پارگی جان در انتهای جوش سخت‌کننده عرضی به جان لینک به عنوان مد خرابی غالب تعیین شد. همچنین، لینک‌های برشی بدون سخت‌کننده عرضی که از مصالح فولاد کم مقاومت ساخته شده‌اند دوران‌های غیرخطی در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲ رادیان را تحمل می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که تبیین مکانیزم خرابی لینک و ظرفیت دوران متناظر با آن، عامل مهم در تعیین مقدار ضریب اضافه مقاومت خواهد بود. دوسیکا و همکاران با بررسی اثر تنش تسلیم فولاد بر رفتار لینک‌های برشی نشان‌دادند که هرچه تنش تسلیم فولاد پایین‌تر باشد، منجر به ظرفیت دوران بالاتری خواهد شد. که علت این امر، ظرفیت شکل-پذیری فولادهای کم مقاومت اعلام شد. ولینکین و همکاران [۱۰] دریافتند که ظرفیت دوران غیرالاستیک لینک‌های برشی ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ به شدت به لاغری جان بستگی دارد. همچنین، مانگانیلو و همکاران [۵] نشان‌دادند که ظرفیت دوران ۰/۰۸ رادیان برای لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ محافظه کارانه است. امروزه به طور گسترده‌ای فولاد ASTM A۹۹۲ با تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال، بیشتر از فولاد A۳٦ (۲۵۰ مگاپاسکال) برای ساخت لینک‌های با مقطع I-شکل استفاده می‌شود [۲۳و۲۴]. از این رو، تغییر از فولاد A۳٦ به فولاد A۹۹۲ باعث نگرانی در مورد رفتار چرخه‌ای (سایکلیک) دقیق در لینک‌ها شده‌است؛ به ویژه برای لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه با بال-های سنگین که مستعد ایجاد ضریب اضافه‌مقاومت و ظرفیت دوران بزرگ هستند [۲۲].

مطابق توضیحات فوق، تحقیقات جامعی درباره رفتار چرخه‌ای لینک‌های کوتاه و به‌ویژه بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A۹۹۲ تحت پروتکل بارگذاری AISC۳٤۱-۲۲ صورت نگرفته است. همچنین، ابهامات قابل‌توجهی در مورد مقدار دقیق ضریب اضافه مقاومت و ظرفیت دوران لینک‌های برشی با بال‌های سنگین وجود دارد [۸،۱۱،۱۳،۱۴] که این موضوع موجب نگرانی طراحان سازه در استفاده از ضوابط طراحی فعلی توصیه‌شده در آیین‌نامه AISC۳٤۱-۲۲ برای تخمین رفتار دقیق لینک‌های برشی در قاب‌های مهاربندی واگرا شده است [۶،۸،۱۳،۲۵]. بنابراین، برای رفع این کاستی‌ها و با هدف ارائه نوآوری در پژوهش حاضر، دو هدف اصلی دنبال شده است: ۱) بررسی ظرفیت دوران لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه تحت پروتکل بارگذاری AISC۳٤۱-۲۲ و ۲) مطالعه مکانیزم خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه تحت پروتکل بارگذاری AISC۳٤۱-۲۲. روند انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. بدین ترتیب، ابتدا یک تکنیک شبیه‌سازی عددی غیرخطی برای بررسی رفتار لینک‌های برشی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس[۱] توسعه داده می‌شود که قادر به در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای سایکلیک و همچنین تاثیر شروع و گسترش ترک بر کاهش مقاومت و سختی باشد. در ادامه و پس از صحت‌سنجی روش مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، یک مطالعه پارامتریک جامع با ساخت ۱۱۴ لینک برشی انجام شده و منحنی بار-دوران پلاستیک و همچنین مکانیزم خرابی لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ بررسی خواهد شد.

[۱] ABAQUS

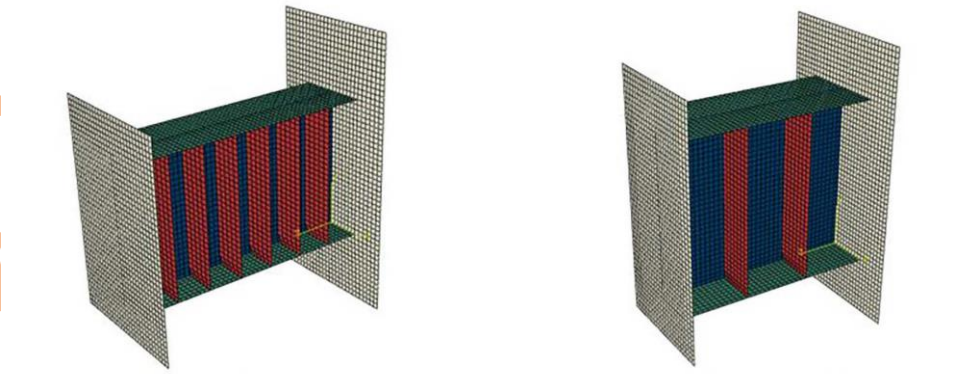


شکل ۲: شمای کلی از روند انجام مقاله حاضر

۲- مطالعه پارامتریک

۲-۱- مشخصات هندسی مدل‌های عددی

در این پژوهش، به منظور بررسی جامع رفتار لینک‌های برشی، ۱۱۴ لینک برشی (کوتاه و خیلی کوتاه) I-شکل با مشخصات هندسی مختلف تعریف شد.در شکل ۳ نمونه‌هایی از مدل‌های عددی نشان داده شده است. طول لینک، عرض بال، ضخامت بال، عمق جان، ضخامت جان و فاصله سخت‌کننده‌های عرضی به ترتیب در بازه ۲۲۰۰–۲۵۰، ۶۰۰–۸۰، ۵۷–۶، ۱۰۰۰–۱۰۰، ۴۸–۳ و ۱۳۴۰–۶۸ در نظر گرفته شده است. طبق بخش D۱،۱ از آیین‌نامه AISC۳۴۱-۲۲، لینک‌های برشی با مقطع I-شکل باید الزامات اعضای با شکل‌پذیری زیاد را ارضا کنند. در این لینک‌ها، بال‌ها (به عنوان استثناء) می‌توانند ضوابط اعضای با شکل‌پذیری متوسط را ارضا کنند. ولی، در این پژوهش، الزامات شکل‌پذیری زیاد برای نسبت‌های ارتفاع به ضخامت جان (h/t_w) و عرض به ضخامت بال (b_f/t_f) درنظرگرفته می‌شود. نسبت ضخامت بال به جان بزرگتر از ۱/۱ در نظر گرفته شد تا بال‌های مقطع I-شکل حداقل به عنوان تکیه‌گاه ساده برای پانل جان عمل کنند [۲۶–۳۱]. سخت‌کننده‌های عرضی در کل ارتفاع جان با حداقل عرض و ضخامت مشخص و طبق ضوابط بخش F۵b از آیین‌نامه AISC۳۴۱-۲۲ قرارداده شدند. مطابق همین بند از آیین‌نامه، سخت‌کننده‌های میانی با حداکثر فاصله $۳۰t_w-d/۵$ برای لینک‌های برشی استفاده شده است. از طرفی، اگر عمق لینک کمتر از ۶۳۰ میلی‌متر باشد، سخت‌کننده‌های عرضی را می‌توان فقط در یک طرف جان قرارداد. همچنین، برای لینک‌های با عمق ۶۳۰ میلی‌متر یا بیشتر نیز، سخت‌کننده‌های میانی باید در هر دو طرف جان قرارداده شوند.



λ=0.1 and ρ=0.82
(h= 500, t_w= 36, b_f= 250, t_f= 42, e= 600)

λ=0.11 and ρ=1.17
(h= 400, t_w= 18, b_f= 200, t_f= 22, e= 700)

شکل ۳: نمونه‌هایی از مدل‌های ساخته شده در نرم افزار آباکوس

در مطالعات گذشته، ابهامات زیادی در ارزیابی مکانیزم شکست لینک‌های برشی مشاهده شده‌است [۱۱]. اخیرا قدمی و همکاران [۸] دریافته‌اند که ریشه این تناقضات عمدتاً در پارامتر نسبت طول لینک، $\rho = e V_p/M_p$، است که برای طبقه‌بندی لینک‌های

برشی استفاده می‌شود .بنابراین این محققین یک پارامتر جدید تحت عنوان پارامتر بی‌بعد لاغری ورق[1] (NDPS) برای طبقه بندی مناسب رفتار لینک‌های کوتاه و بسیارکوتاه، همانطور که در رابطه (۲-الف) ارائه شده‌است، پیشنهاد کردند. که در آن a فاصله بین سخت‌کننده‌های عرضی است و K ضریب کمانش برشی الاستیک است که توسط رابطه (۲-ب) بر اساس AISC۳۶۰-۲۲ [۳۲] به دست می‌آید. در این تحقیق، از هر دو پارامتر NDPS و ρ برای ارزیابی رفتار لینک‌های برشی استفاده خواهد شد.

$$\lambda = \frac{h}{t_w}\sqrt{\frac{F_y}{KE}} \qquad (۲\text{-الف})$$

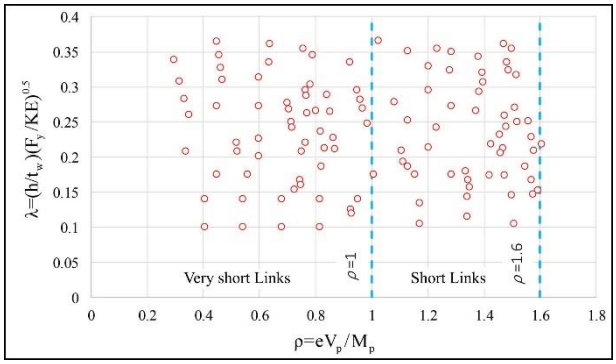
$$K = 5 + \frac{5}{\varphi^2} \quad \text{for} \quad \varphi = \frac{a}{h} \le 3 \qquad (۲\text{-ب})$$

مطابق ضوابط بخش F۳،۵b از آیین‌نامه AISC۳۴۱-۲۲، مقاومت برشی پلاستیک و ظرفیت لنگر پلاستیک برای لینک‌های I-شکل بدون حضور نیروی محوری به ترتیب با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند. در این روابط، F_y تنش تسلیم جان و Z اساس مقطع پلاستیک مقطع I-شکل خواهد بود.

$$V_p = 0.6F_y\, ht_w \qquad (۳)$$

$$M_p = ZF_y \qquad (۴)$$

در شکل ۴ توزیع پارامترهای انتخابی مدل‌ها نشان داده شده است. مطابق شکل، بازه وسیعی برای هر دو پارامتر نسبت طول لینک و لاغری ورق جان انتخاب شده است که منجر به انجام مطالعه پارامتریک جامع برای بررسی تمامی عوامل موثر بر رفتار چرخه ای لینک‌های برشی خواهد شد. پارامترهای مذکور به صورت تصادفی و با هدف ایجاد مدلهایی با پارامتر نسبت طول لینک در بازه $0.3 \le$ و $\rho \le 1.6$ و پارامتر نسبت لاغری $0.37 \le \lambda \le 0.1$ تعریف شده است. قابل ذکر است که توضیحات بیشتر در مورد نحوه تعیین پارامترهای مذکور در مرجع [۱۳] موجود می‌باشد.



شکل ۴: پراکندگی پارامترهای لاغری و نسبت طول لینک مدل‌های عددی

۲-۲- روش مدلسازی عددی

در این مقاله، یک مطالعه پارامتریک با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس و با در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای سایکلیک و همچنین تاثیر شروع و گسترش ترک بر کاهش مقاومت و سختی به بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ انجام شده و مکانیزم خرابی لینک برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای که شامل ترکیبی از رفتارهای غیرخطی مصالح و هندسه سازه می‌باشد بررسی شده است. این رفتارها شامل تسلیم مصالح، سخت‌شوندگی کرنشی، کمانش ورق، شروع ترک و گسترش آن تحت تغییرشکل‌های بزرگ غیرالاستیک می‌باشد. تحلیل چرخه‌ای غیرخطی با استفاده از روش General/Static انجام شده و برای مدل‌سازی اجزای لینک I-شکل نیز از المان پوسته عمومی چهارگره‌ای چهارضلعی S۴R استفاده شده است. در پیشینه تحقیق [۸,۱۴,۳۰,۳۱,۳۳] المان مذکور به طور گسترده برای مدل‌سازی اجزای سازه‌ای جدار نازک و ضخیم به کار می‌رود. این المان از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و فرمول‌بندی تغییرشکل‌های بزرگ استفاده می‌کند. همچنین المان مذکور توانایی شبیه‌سازی کرنش‌های غشایی و دوران‌های بزرگ را داراست و می‌تواند تغییرات ضخامت عضو را نیز لحاظ کند. مطابق نتایج تحلیل حساسیت مش [۱۳]، مقدار مش بهینه برابر ۱۵ میلیمتر تعیین شده و در تمامی مدل‌ها نیز استفاده شد.

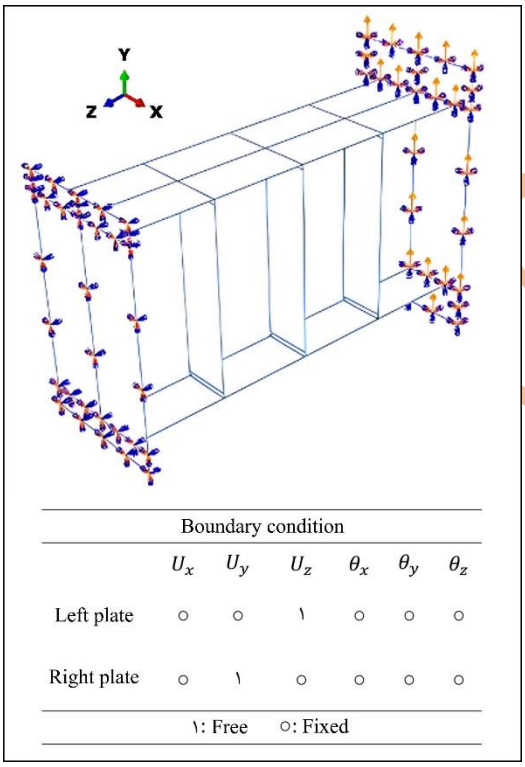
[1] Non-Dimensional Plate Slenderness

مدل‌های اجزای‌محدود به صورت لینک‌های ایزوله[1] مدل‌سازی شدند و شرایط مرزی آن‌ها بر اساس منابع [۸,۱۴,۲۳,۲۵] انتخاب شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری اعمالی بر لینک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۷، شرایط مرزی انتخابی بر اساس حالت تغییرشکل‌یافته لینک در داخل یک سیستم قاب ساده با مهاربند واگرا تحت بارگذاری جانبی می‌باشد. بر این اساس، تمامی درجات آزادی چرخشی و انتقالی در دو انتهای لینک محدود شده‌اند و تنها تغییرشکل محوری در انتهای چپ و تغییرشکل قائم در انتهای راست آزاد شده‌اند. پروتکل بارگذاری نیز مستخرج از بند K۲،۴C استاندارد AISC۳۴۱-۲۲ می‌باشد. مطابق این استاندارد، ۶ سیکل با دوران کل ۰/۰۰۳۷۵، ۶ سیکل با دوران کل ۰/۰۰۵، ۶ سیکل با دوران کل ۰/۰۰۷۵، ۶ سیکل با دوران کل ۰/۰۱، ۴ سیکل با دوران کل ۰/۰۱۵، ۴ سیکل با دوران کل ۰/۰۲، ۲ سیکل با دوران کل ۰/۰۳، ۱ سیکل با دوران کل ۰/۰۴، ۱ سیکل با دوران کل ۰/۰۵، ۱ سیکل با دوران کل ۰/۰۷ و ۱ سیکل با دوران کل ۰/۰۹ و مابقی با نرخ افزایش ۰/۰۲ رادیان اعمال شده است.

برای مصالح فولادی از فولاد ASTM A۹۹۲ با تنش تسلیم اسمی ۳۴۵ مگاپاسکال استفاده شده است. مطابق نتایج آزمایشگاهی حاصل از تست کشش مستقیم [۳۴]، مقدار تنش تسلیم این فولاد برابر ۳۸۰ مگاپاسکال تعیین شده که برای مدل‌سازی اجزای لینک در مقاله حاضر نیز استفاده می‌شود. به منظور مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی از روش سخت‌شوندگی ترکیبی ایزوتروپیکی-سینماتیکی موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. این مدل با ترکیب سخت‌شوندگی سینماتیکی غیرخطی و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، رفتار ماده را بازتولید می‌کند. جزء سینماتیکی، جابجایی سطح تسلیم را توصیف می‌کند، در حالی که جزء ایزوتروپیک، تغییرات اندازه سطح تسلیم را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل نشان می‌دهد. به منظور اعمال سخت‌شوندگی کرنشی مصالح، از مدل ساختاری حلقوی توصیه شده توسط چابچی [۳۵و۳۶] استفاده شده و مقادیر پارامترهای سخت‌شوندگی نیز طبق مرجع [۳۴] انتخاب شدند. پارامترهای سخت‌شوندگی فولاد در جدول ۱ ارائه شده است. توضیحات بیشتر در مورد نحوه مدلسازی رفتار فولاد نیز در مرجع [۱۳] قابل مشاهده است. از معیار تسلیم فون میسز به عنوان معیار تسلیم در شکست لینک‌های برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده و با استفاده از قابلیت Ductile damage در آباکوس، یک مدل شکست برای شروع خرابی و حذف المان بعد از تسلیم در فولاد استفاده شده‌است. همچنین، کرنش پلاستیک معادل در شروع خرابی مطابق نتایج تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط هیو [۳۷] تعریف شد.

جدول ۱: پارامترهای سخت‌شوندگی کرنشی مصالح فولادی

σ_∞ (MPa)	b	C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2	C_3 (MPa)	γ_3
۵۰	۱/۲	۷۹۹۳	۱۷۵	۷۱۰۰	۱۱۶	۲۶۵۰	۶۰

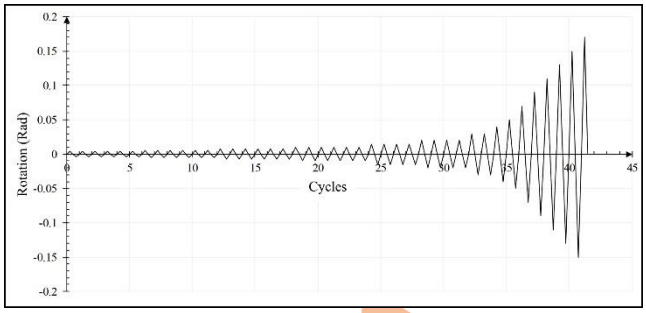


Boundary condition						
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
Left plate	○	○	١	○	○	○
Right plate	○	١	○	○	○	○

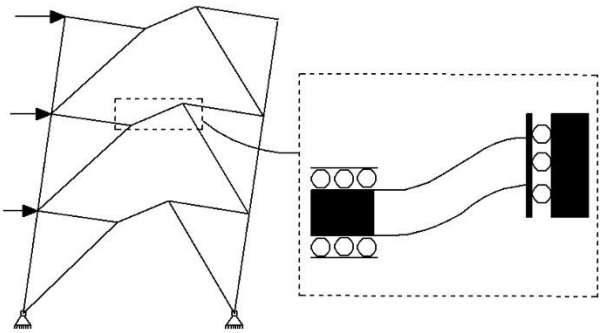
١: Free ○: Fixed

شکل ۵: بارگذاری و شرایط مرزی مدل‌های عددی

[1] Isolated link



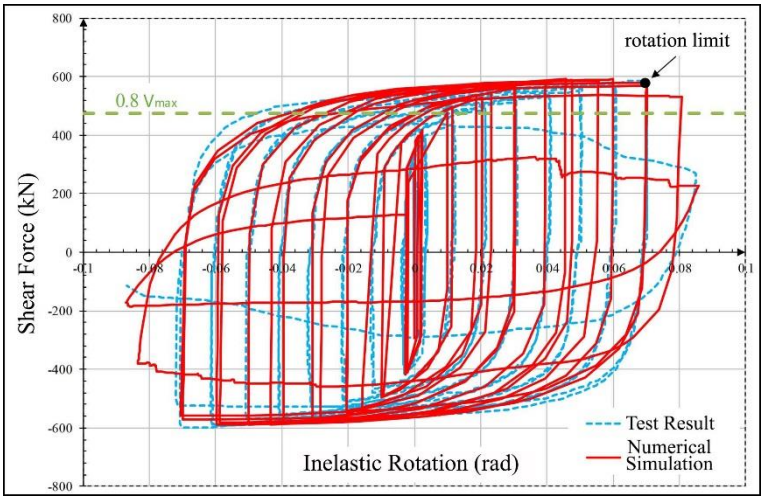
شکل ۶: پروتکل بارگذاری در AISC۳۴۱-۲۲ برای اتصال لینک به ستون



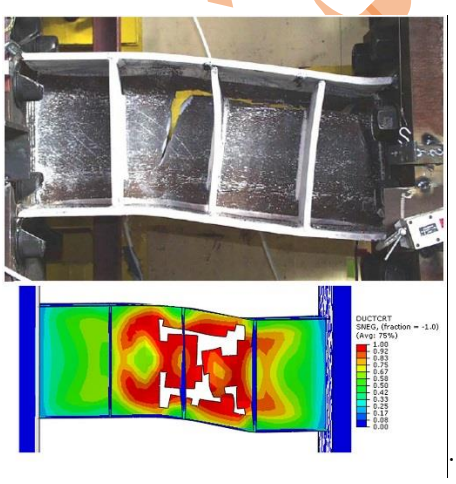
شکل ۷: حالت تغییرشکل لینک در یک سیستم قاب ساده با مهاربند واگرا [۱۳]

۲-۳- صحت سنجی روش مدلسازی عددی

در این بخش به بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار و صحیح بودن نحوه مدلسازی عددی پرداخته شده و قابل اطمینان بودن نحوه ساخت هندسه سازه، شرایط مرزی، بارگذاری، نوع المان، مش‌بندی، تعریف مصالح و تنظیمات مربوط به تحلیل سازه بررسی شده است. بدین منظور نتایج حاصل از مدلسازی عددی پژوهش حاضر با نتایج کار آزمایشگاهی آرک [۳۴] مقایسه شده است. در پژوهش حاضر، مدل 4B از تحقیق آزمایشگاهی مذکور انتخاب شد. این لینک از نوع لینک برشی با $\rho = 1.1$، ساخته شده از فولاد ASTM A۹۹۲ می‌باشد که تحت پروتکل بارگذاری موجود در شکل ۶ تحلیل شده است. تمامی خصوصیات هندسی و مصالح لینک‌ها و همچنین شرایط بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی مدل‌های مذکور در منبع [۳۴] موجود می‌باشد. پس از مدلسازی و تحلیل لینک مورد نظر، نتایج عددی برای نمونه‌ی 4B با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مطابق شکل ۸-الف، نتایج عددی تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و این نشان می‌دهد که رویکرد مدلسازی اجزا محدود پیشنهادی مقاله حاضر می‌تواند سختی، مقاومت، ظرفیت دوران، آسیب تجمعی و مد خرابی لینک‌های برشی را به دقت پیش‌بینی کند. حداکثر مقاومت برشی نمونه 4B طبق نتایج آزمایشگاهی برابر با ۵۹۰/۸۳ کیلونیوتن تعیین است که این مقدار با خطای ۰/۸۸ درصد تطابق بسیار خوبی با نتیجه مدلسازی عددی مقاله حاضر (۵۹۶/۰۶ کیلونیوتن) دارد. ظرفیت دوران مدل اجزا محدود نیز برابر ۰/۰۷ رادیان به دست آمد که نزدیک به ۰/۰۶۹ رادیان گزارش شده در داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. همچنین، مطابق شکل۸-ب تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی از لحاظ مد خرابی وجود دارد



الف) منحنی بار–دوران پلاستیک



ب) مد خرابی: نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

شکل ۸: مقایسه نتایج عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- منحنی بار-دوران پلاستیک

مطابق ضوابط بخش F٤a از آیین‌نامه AISC٣٤١-٢٢، زاویه دوران لینک برابر زاویه غیرارتجاعی بین لینک و تیر خارج از لینک تعریف می‌شود. همچنین، به حداکثر سطح دوران غیرالاستیک پایدار برای حداقل یک چرخه کامل بارگذاری قبل از این‌که مقاومت برشی لینک به کمتر از ۸۰٪ حداکثر مقاومت برشی برسد ظرفیت دوران غیرالاستیک گفته می‌شود. در این پژوهش، زاویه دوران غیرالاستیک از رابطه (۵) تعیین می‌شود؛ که در آن θ دوران کلی لینک، V برش وارد بر مقطع و K_e نیز سختی الاستیک لینک خواهد بود. یادآور می‌شود که در آیین‌نامه AISC٣٤١-٢٢ ظرفیت دوران غیرالاستیک لینک‌های برشی به ۰/۰۸ رادیان محدود شده است.

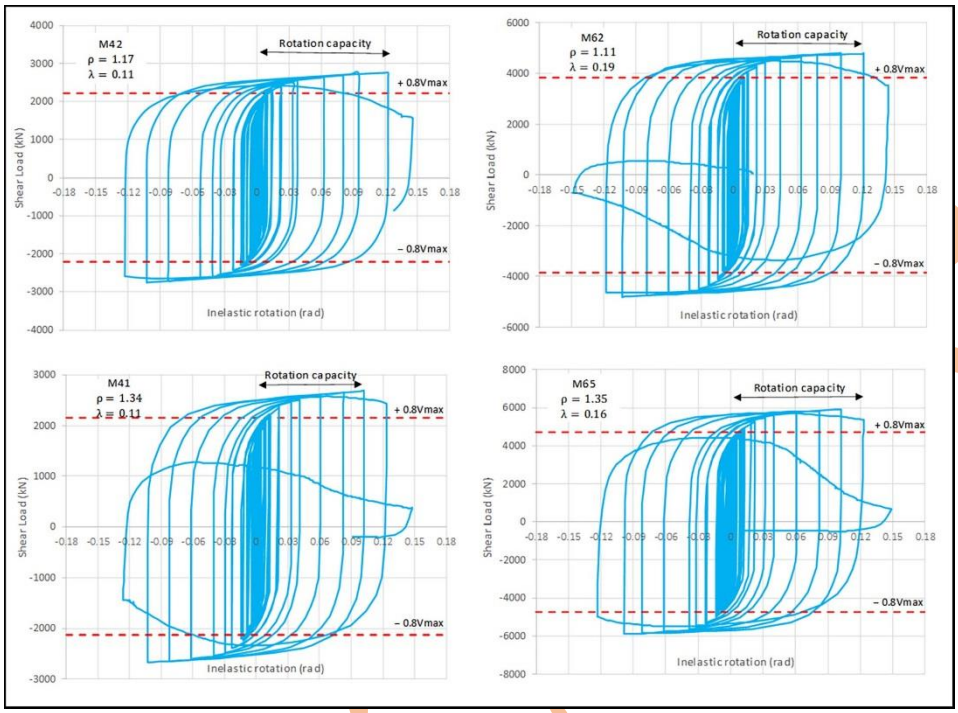
$$\theta_{\text{inelastic}} = \theta - \frac{V}{K_e} \qquad (۵)$$

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب منحنی نیروی برشی در مقابل دوران پلاستیک برخی از لینک‌های برشی کوتاه و خیلی‌کوتاه را به عنوان نماینده ای از تمامی مدل‌ها نشان می‌دهند که در آن‌ها ظرفیت دوران مدل‌ها طبق رابطه (۵) تعیین شده است. این منحنی‌ها به عنوان نمونه‌های شاهد طوری از بین تمامی مدل‌های تحقیق حاضر انتخاب شده است که پارامترهای لاغری و نسبت طول لینک نمونه‌های انتخابی معرف رفتار ۱۱۴ مدل ساخته شده باشد. همچنین، شکل‌های ۹ و ۱۰ طوری تنظیم شده‌اند که از چپ به راست مقدار پارامتر لاغری ورق افزایش یافته و مقدار پارامتر نسبت طول لینک نیز تقریبا ثابت فرض شده است. در یک ستون از بالا به پایین با فرض ثابت ماندن پارامتر لاغری ورق، مقدار نسبت طول لینک افزایش می‌یابد.

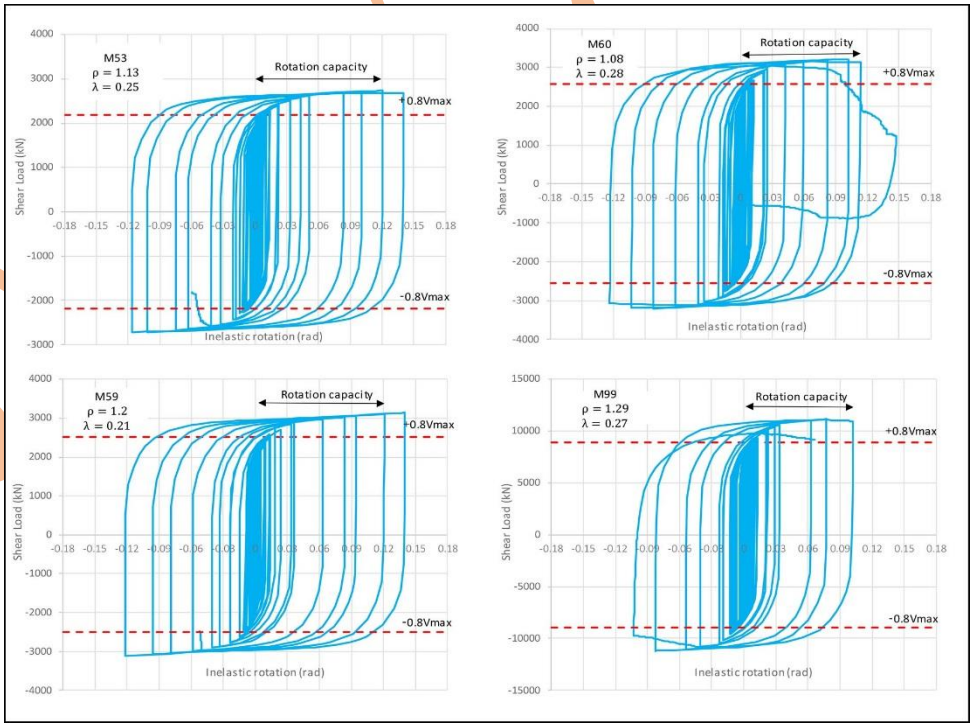
مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، تقریبا تمامی مدل‌ها رفتار چرخه‌ای پایداری از خود نشان داده و قبل از رسیدن به ظرفیت دوران نهایی خود دچار افت مقاومت و سختی قابل توجهی نشده‌اند. مقدار ظرفیت برشی لینک با کاهش نسبت طول لینک و همچنین کاهش پارامتر لاغری ورق جان افزایش می‌یابد. در برخی مدل‌ها (مثلا مدل‌های M٦٥ و M٧٣) مقداری کاهش مقاومت در دوران‌های بالاتر از ۰/۰۸ رادیان و قبل از رسیدن به ظرفیت دوران پلاستیک مشاهده می‌شود. لذا، بارگذاری تا رسیدن به ظرفیت دورانی متناظر با کاهش ۲۰ درصدی مقاومت ادامه می‌یابد.

در شکل ۱۱ ظرفیت دوران تمامی مدلها بر حسب پارامتر نسبت طول لینک ارائه شده است. همچنین در این شکل، ظرفیت دوران پیشنهادی در آیین‌نامه AISC٣٤١-٢٢ (۰/۰۸ رادیان) با خط سبز نشان داده شده است. مطابق نتایج، ظرفیت دوران اکثر لینک‌ها به طور قابل توجهی از سطح دوران مورد انتظار آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان) فراتر رفته و در محدوده ۰/۰۶-۰/۱۴رادیان با مقدار متوسط ۰/۱۱۲رادیان متغیر است. این مقدار متوسط با مقدار ظرفیت دوران گزارش شده در تحقیق اوکازاکی و انگلهارت [۲۲] (برابر ۰/۱۱۷رادیان) تطابق خوبی دارد. ظرفیت دوران لینک‌های بسیار کوتاه (ρ < ۱) به طور کلی نسبت به پارامتر نسبت طول لینک ثابت است و میانگین آن نزدیک به ۰/۱۱۸رادیان می‌باشد. پراکندگی داده‌ها برای لینک‌هایی با ρ در بازه ۱ تا ۱/۶ نشان می‌دهد که لینک‌های کوتاه نسبت به پارامتر ρ حساس‌تر از لینک‌های بسیار کوتاه هستند و این حساسیت با افزایش پارامتر نسبت طول بیشتر می‌شود. در برخی مدل‌ها با نسبت طول لینک در بازه ۱٫٦ < ρ < ۱.۴ نیز مقدار ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه تا حدودی کمتر از حد آیین‌نامه می‌باشد. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که اگر لینک‌های برشی بر اساس الزامات AISC٣٤١-٢٢ طراحی شوند، می‌توانند حداقل الزام آیین‌نامه در رسیدن به ظرفیت دوران پلاستیک ۰/۰۸رادیان را برآورده کنند. همچنین، با توجه به حاشیه اطمینان بیشتر موجود در ظرفیت دوران لینک‌های بسیار کوتاه، فاصله سخت‌کننده‌ها را می‌توان در این لینک‌ها افزایش داد. این نتایج نشان می‌دهد که یکی از عوامل اصلی بروز ضریب اضافه مقاومت بیش از حد مذکور در آیین‌نامه، عدم تخمین درست ظرفیت دوران لینک‌های برشی می‌باشد، چرا که مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در لینک متناسب با ظرفیت دوران و در نتیجه مکانیزم خرابی آن خواهد بود. مطابق نتایج، با افزایش نسبت طول لینک و افزایش پارامتر لاغری ورق جان رفتار لینک تردتر شده و ظرفیت دوران مقطع نیز کاهش می‌یابد. به طور کلی و با مقایسه رفتار لینک‌های برشی کوتاه، مشاهده

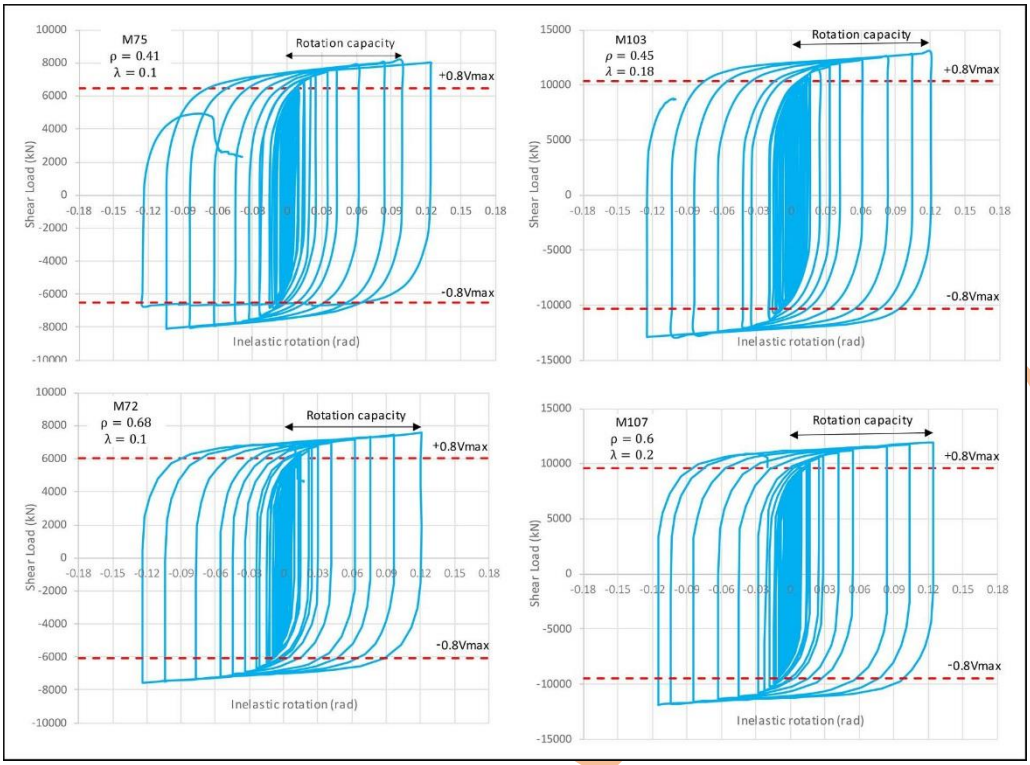
می‌شود که تاثیر مقدار لاغری ورق بر مقدار ظرفیت دوران بیشتر از تاثیر پارامتر نسبت طول لینک می‌باشد. قابل ذکر است که خوانندگان محترم جهت دریافت اطلاعات بیشتر می‌توانند به مرجع [۱۳] مراجعه کنند.



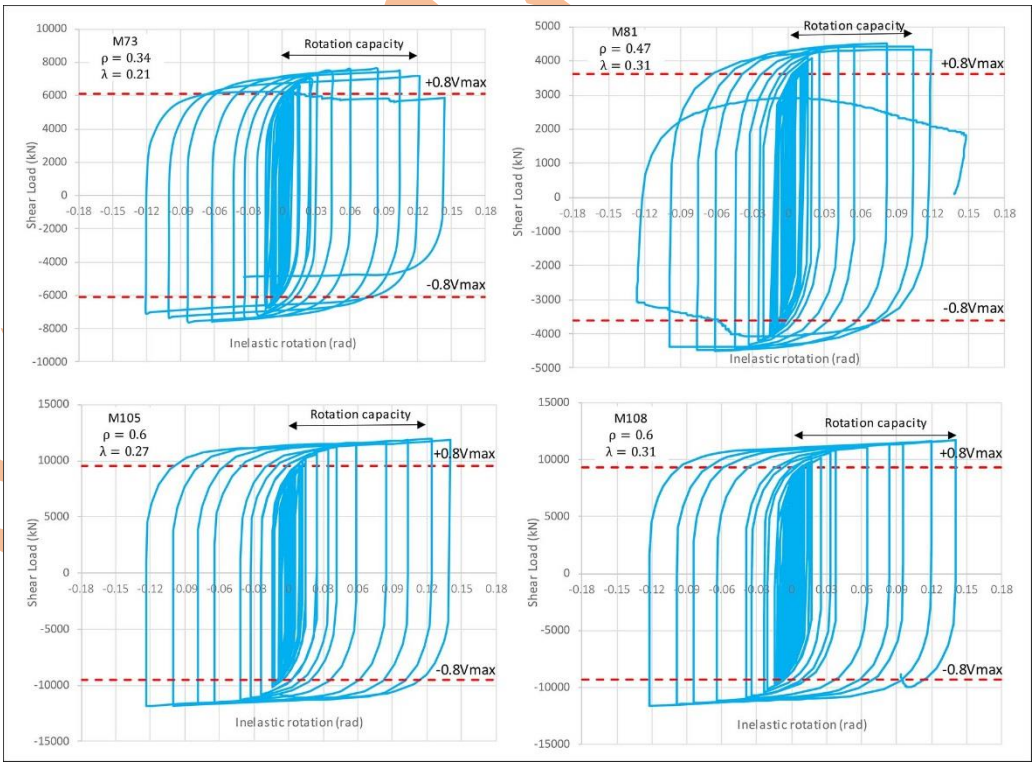
شکل ۹-الف: منحنی‌های بار-دوران پلاستیک لینک‌های کوتاه (مدل‌های M۴۲، M۶۲، M۴۱، و M۶۵)



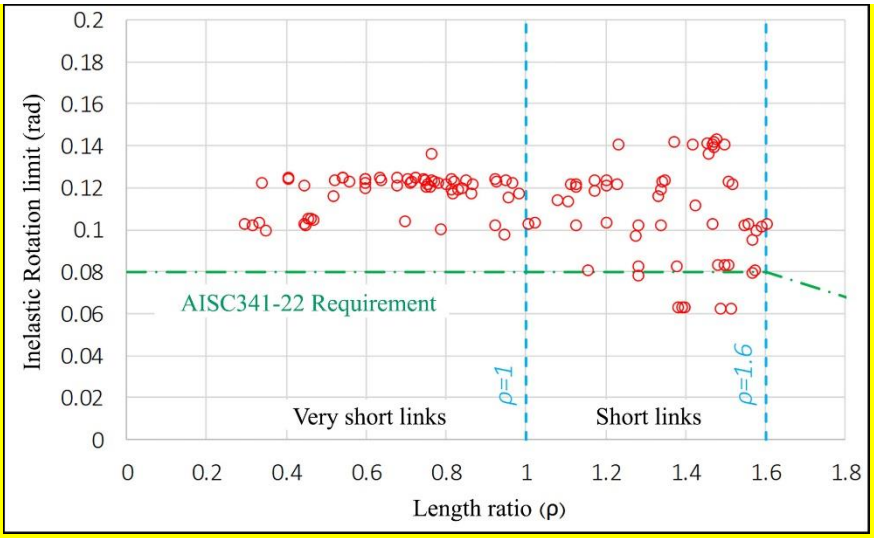
شکل ۹-ب: منحنی‌های بار-دوران پلاستیک لینک‌های کوتاه (مدل‌های M۵۳، M۶۰، M۵۹، و M۹۹)



شکل ۱۰-الف: منحنی‌های بار-دوران پلاستیک لینک‌های خیلی‌کوتاه (مدل‌های M۷۵، M۱۰۳، M۷۲، و M۱۰۷)



شکل ۱۰-ب: منحنی‌های بار-دوران پلاستیک لینک‌های خیلی‌کوتاه (مدل‌های M۷۳، M۸۱، M۱۰۵، و M۱۰۸)



شکل ۱۱: ظرفیت دوران پلاستیک لینک‌های کوتاه و خیلی‌کوتاه

۳-۲- مد خرابی لینک‌های برشی

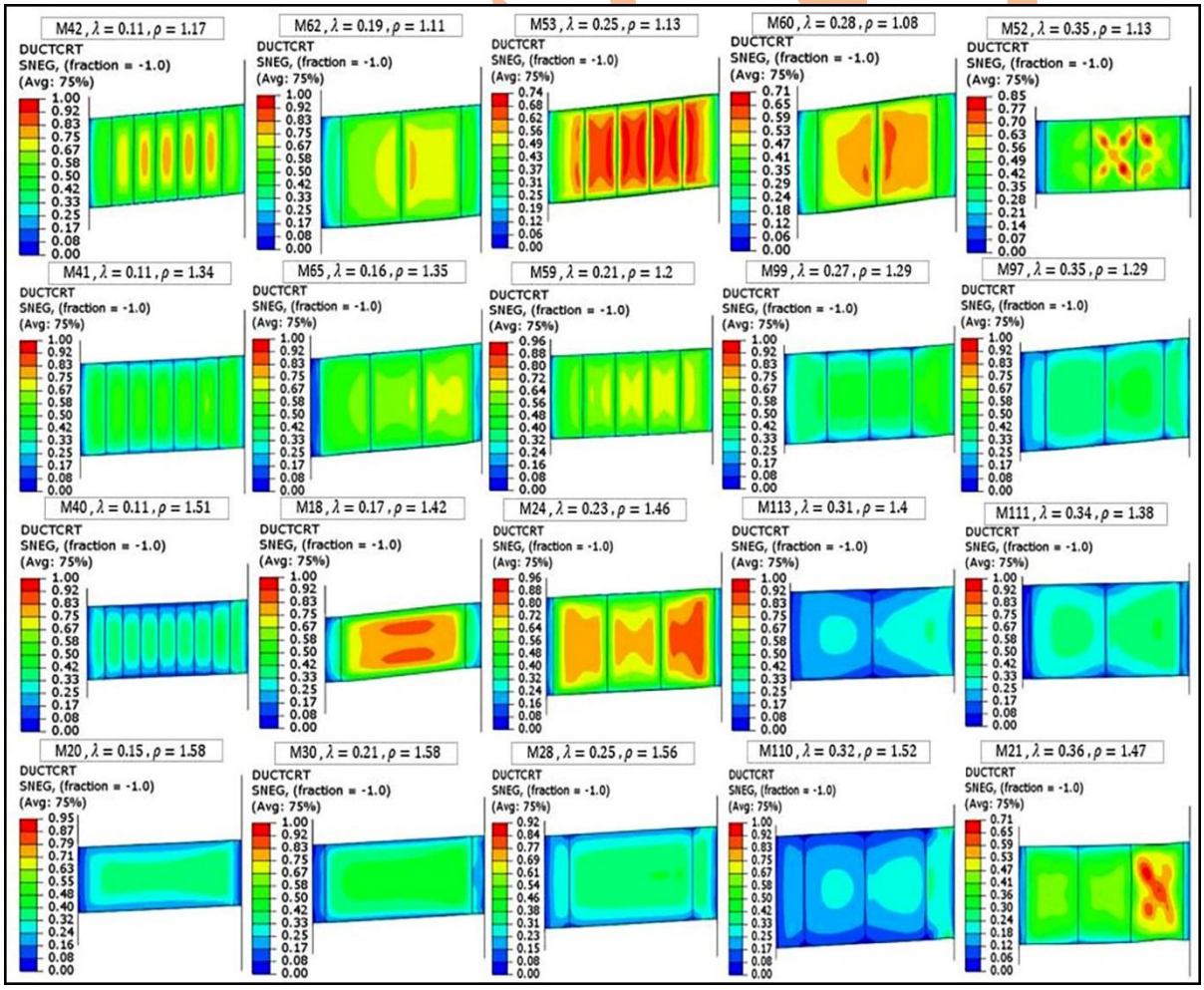
در این بخش، مد خرابی متناظر با ظرفیت دوران پلاستیک لینک‌ها بررسی می‌شود. در ادبیات فنی، مدل‌های رفتاری متعددی برای پیش‌بینی نحوه‌ی رشد و توزیع آسیب در سازه‌های فولادی ارائه شده است که هریک محدودیت‌ها و مزایایی نسبت به هم دارند. در این پژوهش از مدل آسیب نرم و پارامتر DUCTCRT نرم‌افزار آباکوس جهت تخمین محل شروع پارگی ورق و نحوه توزیع خرابی استفاده شده است. مطابق این روش، با ترسیم کانتور پارامتر DUCTCRT می‌توان نحوه توزیع خرابی تحت یک بارگذاری مشخص را بررسی نمود، که در آن مناطقی از سازه با DUCTCRT در حدود ۱ به حد خرابی رسیده و در آستانه پارگی قرار دارند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مد خرابی لینک‌های کوتاه و بسیارکوتاه برخی از مدل‌های انتخابی را نشان می‌دهد. این مدهای خرابی به عنوان مثالی از کل نتایج اجزای محدود نشان داده شده و پراکندگی مشخصات نمونه‌های انتخابی به نحوی است که رفتار تمامی ۱۱۴ مدل را پوشش می‌دهد.

مطابق شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که در لینک‌های کوتاه و با افزایش لاغری ورق، محل شروع آسیب و رخداد پارگی از محل سخت‌کننده‌های عرضی فاصله گرفته و به وسط پانل جان منتقل می‌شود. علت این امر، بروز ناسازگاری جابجایی[۱] بدلیل تغییرشکل برشی ورق جان خواهد بود. این رفتار در لینک‌های با لاغری جان زیاد و نسبت طول لینک کم؛ بیشتر مشهود است. در این لینک‌ها و بخصوص در مدل‌های با نسبت طول لینک کمتر، خرابی اکثرا با شروع ترک‌های قائم در کنار سخت‌کننده‌های عرضی شروع شده و در انتهای سخت‌کننده در جان گسترش می‌یابد. همچنین، با افزایش پارامتر نسبت طول لینک و کاهش لاغری ورق جان خرابی‌ای در لینک مشاهده نشده و لینک بدون رخداد پارگی در جان به ظرفیت دوران پلاستیک خود می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که در صورت استفاده از لینک‌های با طول کم و حذف سخت‌کننده‌های عرضی می‌توان از تمرکز تنش و رخداد خرابی در اطراف سخت‌کننده‌ها جلوگیری کرد. همچنین، بررسی کانتور پارامتر DUCTCRT نشان می‌دهد که در لینک‌های کوتاه با نسبت طول لینک نزدیک به ۱، سطح بیشتری از جان لینک به DUCTCRT نزدیک به عدد ۱ می‌رسد که بیانگر استفاده مناسب از ظرفیت دوران لینک‌ها برای استهلاک انرژی است. قابل ذکر است که عدم وقوع خرابی در اطراف سخت‌کننده‌های عرضی لینک‌های کوتاه، یک مزیت طراحی محسوب می‌شود؛ زیرا حذف تمرکز تنش در این نواحی از شروع زودهنگام

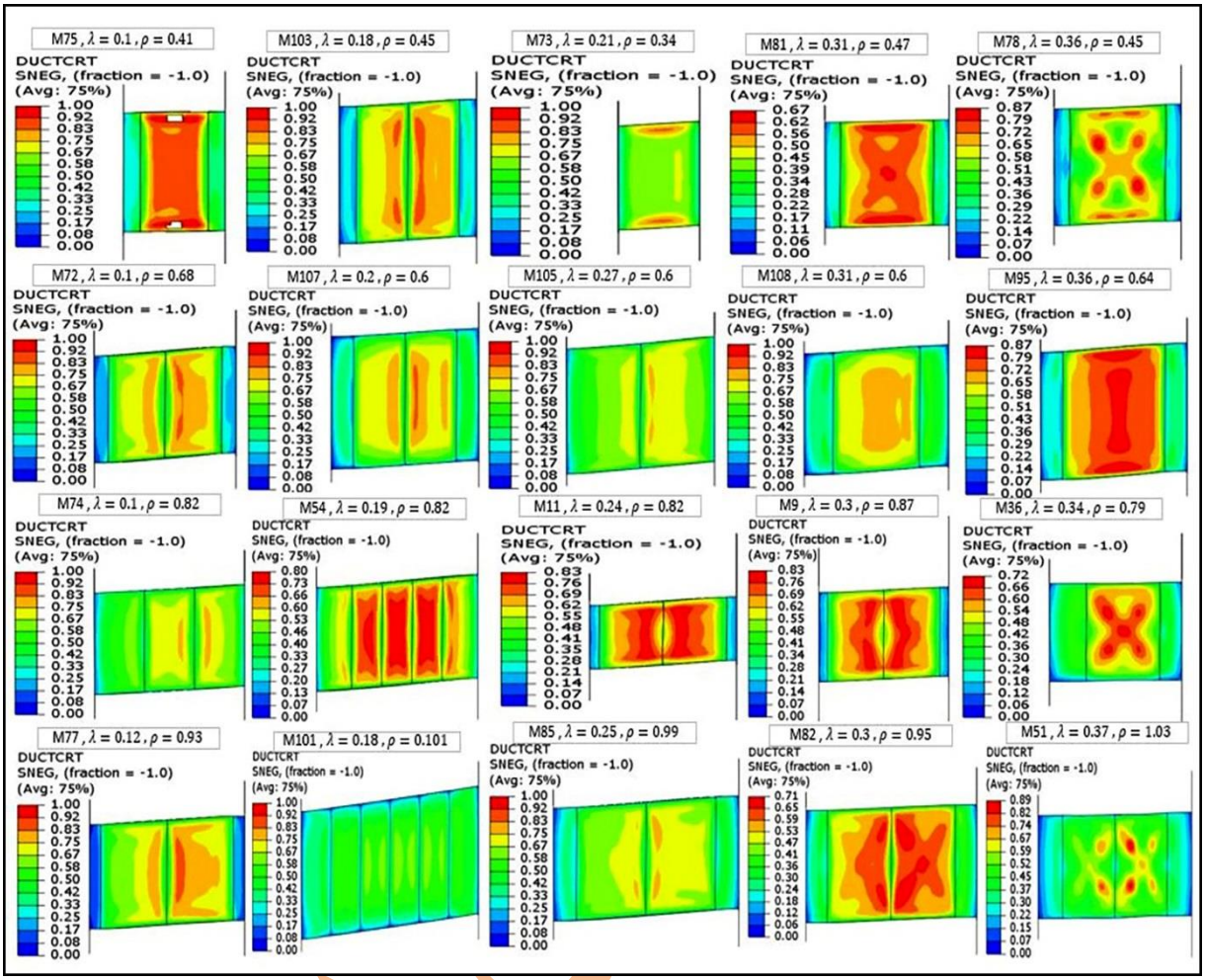
[۱] Ddisplacement incompatibilities

پارگی (بخصوص پارگی ترد) جلوگیری کرده و امکان استفاده کامل از ظرفیت دوران پلاستیک لینک برای استهلاک انرژی را فراهم می‌سازد. در این حالت، خرابی در بخش میانی جان لینک رخ داده و توزیع یکنواخت‌تری از انرژی کرنشی در لینک حاصل می‌شود که عملکرد بهینه آن به‌عنوان یک فیوز لرزه‌ای را تضمین می‌کند.

مطابق شکل ۱۳، در لینک‌های بسیار کوتاه نیز رفتاری مشابه لینک‌های کوتاه مشاهده شده و با افزایش لاغری ورق، محل پارگی از محل سخت‌کننده‌های عرضی فاصله گرفته و به وسط جان منتقل می‌شود. مدل‌های با لاغری کم و نسبت طول نزدیک به عدد ۱ تقریبا بدون رخداد آسیب به باربری نهایی خود می‌رسند که نشان از سخت‌گیرانه بودن ضوابط آیین‌نامه در مورد رفتار این لینک‌ها می‌باشد. در مدل‌های با نسبت طول لینک کم، پارگی ورق جان در محل تقاطع بال و جان رخ داده و با ادامه بارگذاری، ترک در راستای سخت‌کننده‌های عرضی در جان لینک و بدون کاهش قابل ملاحظه مقاومت برشی مقطع گسترش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش پارامتر نسبت طول لینک و کاهش لاغری ورق جان، شروع آسیب در محل تقاطع سخت‌کننده عرضی با ورق جان بوده و منجر به ایجاد ترک‌های قائم می‌شود. این امر نشان دهنده این موضوع مهم است که در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و برای کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در محل اتصال سخت‌کننده به جان لینک، جوش این ناحیه باید با دقت بیشتر و در تعداد پاس‌های کمتری اجرا شود. همچنین، بررسی کانتور پارامتر DUCTCRT نشان می‌دهد که در لینک‌های خیلی کوتاه سطح بیشتری از جان لینک به عدد ۱ می‌رسد.



شکل ۱۲: مد خرابی لینک‌های کوتاه



شکل ۱۳: مد خرابی لینک‌های خیلی‌کوتاه

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و خیلی کوتاه ساخته شده از مصالح فولادی ASTM A۹۹۲، یک مطالعه پارامتریک با ساخت ۱۱۴ مدل اجزای محدود در نرم افزار آباکوس انجام شد. تحلیل چرخه‌ای غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای چرخه‌ای و همچنین تاثیر شروع و گسترش ترک بر کاهش مقاومت و سختی انجام شد. نتایج تحقیق حاضر به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- لینک‌های برشی کوتاه و خیلی کوتاه که مطابق الزامات AISC ۳۴۱-۲۲ طراحی شده اند، رفتار چرخه‌ای پایداری از خود نشان داده و قبل از رسیدن به ظرفیت دوران نهایی خود دچار افت مقاومت و سختی قابل توجهی نمی‌شوند.
- مقدار ظرفیت برشی لینک با کاهش نسبت طول لینک و همچنین کاهش پارامتر لاغری ورق جان افزایش می‌یابد.
- با افزایش نسبت طول لینک و افزایش پارامتر لاغری ورق جان، رفتار لینک تردتر شده و ظرفیت دوران لینک برشی کاهش می‌یابد.

- تاثیر مقدار لاغری ورق بر مقدار ظرفیت دوران بیشـــتر از تاثیر پارامتر نسبت طول لینک می‌باشد.
- با توجه به حاشـــیه اطمینان بیشـــتر موجود در ظرفیت دوران لینک‌های بســـیار کوتاه نســـبت به ســـطح دوران مورد انتظار آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان)، فاصله سخت‌کننده‌ها را می‌توان در این لینک‌ها افزایش داد.
- مقـدار ظرفیـت دوران لینـک‌هـای برشـــی کوتـاه در برخی از مدل‌های عددی تا حدودی کمتر از حد آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان) می‌باشد.
- یکی از عوامل اصـــلی بروز ضـــریب اضـــافه مقاومت بیش از حد مـذکور در آیین‌نـامـه، عـدم تخمین درســـت ظرفیـت دوران لینک‌های برشی می‌باشد.
- مشـخصـات هندسـی مقطع و آرایش سـخت‌کننده‌ها تاثیر قابل توجهی بر مد خرابی لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه دارد.
- در لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه، با افزایش لاغری ورق، محل شـروع آسـیب و رخداد پارگی از محل سـخت‌کننده‌های عرضـی فاصله گرفته و به وسط پانل جان منتقل می‌شود.
- در لینک‌های کوتاه و بخصوص در مدل‌های با نسبت طول لینک کمـتر، خرابی اکثرا بـا شـــروع ترک‌هـای قـائم در کنـار سخت‌کننده‌های عرضی آغاز شده و در انتهای سخت‌کننده در جان گسترش می‌یابد.
- در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و برای کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در محل اتصال سخت‌کننده به جان لینک، جوش این ناحیه باید با دقت بیشـــتر و در تعداد پالس‌های کمتری اجرا شود.

۵- منابع

[۱] Pachideh, G., Gholhaki, M., Lashkari, R., and Rezayfar, O., ۲۰۲۰. Behavior of BRB equipped with a casing comprised of steel and polyamide, *Inst. Civ. Eng. Build.*

[۲] Pachideh, G., Kafi, M., and Gholhaki, M., ۲۰۲۰. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *J. of Structures* ,pp. ٤٦٧–٤٨١.

https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.istruc.٢٠٢٠,٠٩,٠٠٧

[۳] Pachideh, G., Gholhaki, M., and Kafi, M., ۲۰۲۰. Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper, *J. of Steel Compos. Struct*. ٣٦, pp.١٩٧–٢١١.

[٤] Pachideh, G., Gholhaki, M., Shiri, M., ٢٠١٦. Modeling and analysis of thin steel plate shear walls using the new method, *In 2nd Int. Conf. Civ. Eng. Archit. Urban Plan. Elit.*, pp. ١٢٤–١٣٦.

[٥] Manganiello, L., Montuori, R., Nastri, E. and Piluso, V., ٢٠٢١. The influence of the axial restraint on the overstrength of short links. *J. of Constructional Steel Research*, *184*, pp.١٠٦٧٥٨.

[٦] Ghadami, A. and Pourmoosavi, G., ٢٠٢٢. Numerical investigation on the flange contribution in the shear strength of short LYP I-shaped links without intermediate stiffeners. *J. of Structures*, pp. ٤٨٥-٤٩٧. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.istruc.٢٠٢٢,٠٤,٠٤٣.

[٧] Ghadami, A., Pourmoosavi, G. and Ghamari, A., ٢٠٢١. Seismic design of elements outside of the short low-yield-point steel shear links. *J. of Constructional Steel Research*, *178*, pp.١٠٦٤٨٩. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠٢٠,١٠٦٤٨٩.

[٨] Ghadami, A., Pourmoosavi, G., Talatahari, S. and Azar, B.F., ٢٠٢١. Overstrength factor of short low-yield-point steel shear links. *J. of Thin-Walled Structures*, *161*, p.١٠٧٤٧٣. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.tws.٢٠٢١,١٠٧٤٧٣.

[٩] Mohebkhah, A. and Chegeni, B., ٢٠١٤. Overstrength and rotation capacity for EBF links made of European IPE sections. *J. of Thin-Walled Structures*, *74*, pp.٢٥٥-٢٦٠. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.tws.٢٠١٣,١٠,٠١٣.

[١٠] Volynkin, D., Dusicka, P. and Clifton, G.C., ٢٠١٩. Intermediate web stiffener spacing evaluation for shear links. *J. of Structural Engineering*, *145*(٢), p.٠٤٠١٨٢٥٧. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)ST.١٩٤٣-٥٤١X.٠٠٠٢٢٤٤.

[١١] Azad, S.K. and Topkaya, C., ٢٠١٧. A review of research on steel eccentrically braced frames. *J. of constructional steel research*, *128*, pp.٥٣-٧٣. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠١٦,٠٧,٠٣٢.

[١٢] Zhuang, L., Wang, J., Nie, X. and Wu, Z., ٢٠٢٢. Experimental study on the cyclic behaviour of shear links made of BLY١٦٠ steel. *J. of Thin-Walled Structures*, *174*, p.١٠٩٠٧٢. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.tws.٢٠٢٢,١٠٩٠٧٢.

[١٣] Ghadami, A., and Zare, N., ٢٠٢٤. Overstrength and rotation capacity of short and very short links made of ASTM A٩٩٢ steel and subjected to AISC٣٤١-٢٢ loading protocol, *Arab. J. Sci. Eng.* pp.١–١٥. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s١٣٣٦٩-٠٢٤-٠٩١٠٣-٥

Structural Engineering, *137*(١٠), pp.١١٤١-١١٥٢. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)ST.١٩٤٣-٥٤١X.٠٠٠٠٣٥٠.

[٢٥] Ghadami, A., and Pourmoosavi, G., ٢٠٢٤, Development and application of an analytical model for LYP steel shear links in eccentrically braced frames, *Arab. J. Sci. Eng*. pp. ١–٢٤.

[٢٦] AASHTO, L., ٢٠٢٠. *AASHTO LRFD bridge design specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

[٢٧] Ghadami, A. and Broujerdian, V., ٢٠١٩. Shear behavior of steel plate girders considering variations in geometrical properties. *J. of Constructional Steel Research*, *153*, pp.٥٦٧-٥٧٧. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠١٨,١١,٠٠٩.

[٢٨] Ghadami, A. and Broujerdian, V., ٢٠١٩. Flexure–shear interaction in hybrid steel I-girders at ambient and elevated temperatures. *J. of Advances in Structural Engineering*, *22*(٦), pp.١٥٠١-١٥١٦. https://doi.org/١٠,١١٧٧/١٣٦٩٤٣٣٢١٨٨١٧٨٩٣

[٢٩] Broujerdian, V., Mahyar, P. and Ghadami, A., ٢٠١٥. Effect of curvature and aspect ratio on shear resistance of unstiffened plates. *J. of Constructional Steel Research*, *112*, pp.٢٦٣-٢٧٠. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠١٥,٠٤,٠٢٥.

[٣٠] Ghadami, A., Khoshknab, P. and Entezari, A.R., ٢٠٢١. Ultimate shear strength of unstiffened long web panels at high temperatures. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *37*(٣,١), pp.٦٣-٧٣. [In Persian]. https://doi.org/١٠,٢٤٢٠٠/j٣٠,٢٠٢١,٥٦٨١٤,٢٨٦٠.

[٣١] Ghadami, A., Pourmoosavi, G. and Broujerdian, V., ٢٠٢١. Slenderness classification of shear panels with random pitting corrosion damage. *J. of Constructional Steel Research*, *184*, p.١٠٦٨٠٢. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠٢١,١٠٦٨٠٢.

[٣٢] ANSI/AISC ٣٦٠-٢٢., ٢٠٢٢. *Specification for structural steel buildings*, America: American Institute of Steel Construction.

[٣٣] Ghadami, A., Jawdhari, A, and Pourmoosavi, G., ٢٠٢٤. Buckling and post-buckling behavior of top flange coped I-beams with slender web panels, *J. of Thin-Walled Struct.* ١١١٦٤٠. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.tws.٢٠٢٤,١١١٦٤٠

[٣٤] Arce, G., ٢٠٠٢. *Impact of higher strength steels on local buckling and overstrength of links in eccentrically braced frames* (Doctoral dissertation, University of Texas at Austin).

[٣٥] Chaboche, J.L., ١٩٨٩. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International journal of plasticity*, *5*(٣), pp.٢٤٧-٣٠٢. https://doi.org/١٠,١٠١٦/٠٧٤٩-٦٤١٩(٨٩)٩٠٠١٥-٦.

[١٤] Ghadami, A., and Pourmoosavi, G., ٢٠٢٣. The effect of heat-affected zone on the cyclic backbone curve of I-shaped LYP steel links, *J. of Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng*. ٤٥. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s٤٠٤٣٠-٠٢٣-٠٤٢٣٣-٧.

[١٥] Ji, X., Wang, Y., Ma, Q. and Okazaki, T., ٢٠١٦. Cyclic behavior of very short steel shear links. *J. of Structural Engineering*, *142*(٢), p.٠٤٠١٥١١٤. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)ST.١٩٤٣-٥٤١X.٠٠٠١٣٧٥.

[١٦] ANSI/AISC ٣٤١-٢٢., ٢٠٢٢. *Seismic provisions for structural steel buildings*. America: American Institute of Steel Construction.

[١٧] Dusicka, P., Itani, A.M. and Buckle, I.G., ٢٠١٠. Cyclic behavior of shear links of various grades of plate steel. *J. of structural engineering*, *136*(٤), pp.٣٧٠-٣٧٨. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)ST.١٩٤٣-٥٤١X.٠٠٠٠١٣١.

[١٨] Bozkurt, M.B. and Topkaya, C., ٢٠١٧. Replaceable links with direct brace attachments for eccentrically braced frames. *J. of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *46*(١٣),pp.٢١٢١-٢١٣٩. https://doi.org/١٠,١٠٠٢/eqe.٢٨٩٦.

[١٩] Richards, P.W. and Uang, C.M., ٢٠٠٦. Testing protocol for short links in eccentrically braced frames. *J. of Structural Engineering*, *132*(٨), pp.١١٨٣-١١٩١. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)٠٧٣٣-٩٤٤٥(٢٠٠٦)١٣٢:٨(١١٨٣).

[٢٠] Richards, P.W., ٢٠٠٤. *Cyclic stability and capacity design of steel eccentrically braced frames.* University of California, San Diego.

[٢١] Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.C. and Engelhardt, M.D., ٢٠٠٥. Experimental study of local buckling, overstrength, and fracture of links in eccentrically braced frames. *J. of Structural Engineering*, *131*(١٠), pp.١٥٢٦-١٥٣٥. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)٠٧٣٣-٩٤٤٥(٢٠٠٥)١٣١:١٠(١٥٢٦).

[٢٢] Okazaki, T. and Engelhardt, M.D., ٢٠٠٧. Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A٩٩٢ steel. *J. of constructional steel Research*, *63*(٦), pp.٧٥١-٧٦٥. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jcsr.٢٠٠٦,٠٨,٠٠٤.

[٢٣] Richards, P.W. and Uang, C.M., ٢٠٠٥. Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity. *J. of structural engineering*, *131*(١٠), pp.١٥٤٦-١٥٥٢. https://doi.org/١٠,١٠٦١/(ASCE)٠٧٣٣-٩٤٤٥(٢٠٠٥)١٣١:١٠(١٥٤٦).

[٢٤] Mansour, N., Christopoulos, C. and Tremblay, R., ٢٠١١. Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames. *J. of*

[۳۶] Chaboche, J.L., ۱۹۸۶. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of plasticity*, *2*(۲), pp.۱٤۹-۱۸۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/۰۷٤۹-٦٤۱۹(۸٦)۹۰۰۱۰-۰.

[۳۷] Hu, H., ۲۰۱٥. *Numerical study of seismic behavior of high strength steel replaceable shear links* (Master's thesis, University of Maryland, College Park).

ویراستاری نشده