Sharif Civil Engineering Journal (2026), **41**(4), 3-15

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Numerical Investigation of the Failure Mechanism of Short and Very Short Shear Links Made from ASTM A992 Steel

Abbas Ghadami*, Naser Zare and Mohammad Payband

Dept. of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
* corresponding author:(abbasghadami@azaruniv.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 20 October 2024

Revised: 12 January 2025

Accepted: 12 March 2025

Keywords:

Eccentrically braced frame (EBF),
shear link,
numerical simulation,
rotation capacity,
failure mode.

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 341 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 A992 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 40%) 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 0.08, 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Ghadami, A., Zare, N. and Payband, M. 2026. Numerical investigation of the failure mechanism of short and very short shear links made from ASTM A992 steel, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 3-15 .
https://doi.org/10.24200/j30.2025.65406.3375

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

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

عباس قدمی بدرلو*، ناصر زارع و محمد پای بند

گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول (abbasghadami@azaruniv.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

واژگان کلیدی:

قاب مهاربندی واگرا،

لینک برشی،

شبیه‌سازی عددی،

ظرفیت دوران،

مد خرابی.

چکیده

به‌منظور رفع ابهام‌های آیین‌نامه‌ی AISC ۳۴۱ در زمینه‌ی تعیین ظرفیت دوران و ضریب اضافه مقاومت لینک‌های برشی، پژوهش حاضر به بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A۹۹۲ پرداخته است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، علت اصلی ابهام‌های ذکرشده در تبیین دقیق مد خرابی، لینک برشی است. ضوابط آیین‌نامه منجر به نتایج محافظه‌کارانه (بیش از ۴۰٪) برای ظرفیت دوران لینک‌های برشی و به‌خصوص لینک‌های برشی بسیار کوتاه می‌شود. همچنین، با افزایش لاغری ورق جان، محل رخداد پارگی از محل اتصال سخت‌کننده به جان فاصله می‌گیرد و به وسط پانل جان منتقل می‌شود. همچنین، در مدل‌های با نسبت طول لینک کمتر، خرابی اکثراً با ترک‌های قائم در کنار سخت‌کننده شروع می‌شود و سپس در جان لینک گسترش می‌یابد. این در حالی است که در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و با نسبت طول کمتر، پارگی ورق جان در محل تقاطع بال و جان رخ می‌دهد.

۱. مقدمه

در ساختمان‌های متداول امروزی، تلاش طراحان سازه بر آن است که تا حد امکان خرابی ناشی از زلزله در محل‌های مشخص از پیش‌تعیین‌شده (فیوزها) متمرکز شود و اجزاء اصلی سازه متحمل آسیب نشوند. مطالعات گسترده‌ای برای بررسی استهلاک انرژی سیستم‌های باربر جانبی مختلف صورت گرفته است. پاچیده[1] و همکاران (۲۰۲۰)،[1] با بررسی عددی و آزمایشگاهی به بررسی تأثیر هسته‌ی فولادی در رفتار بادبند کمانش‌تاب پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر، نیز استفاده از دمپرهای دایره‌ای فولادی به‌عنوان المان‌های جذب انرژی در سیستم‌های مهاربندی بررسی شده است. در این راستا، پاچیده و همکاران (۲۰۲۰)،[2 و 3] یک سیستم مهاربندی جدید شامل دمپر تسلیم‌پذیر را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کرده و دریافته‌اند که در سیستم مذکور، دمپر به‌عنوان المان اصلی جذب انرژی عمل می‌کند و مهاربندها الاستیک باقی می‌مانند. همچنین، ظرفیت باربری سیستم با استفاده از حلقه‌های فولادی به‌طورقابل‌توجهی افزایش یافته و ظرفیت جذب انرژی آن حدود ۴۵٪ بیشتر از مهاربندهای هم‌محور معادل شده است. در مطالعه‌ی دیگری، پاچیده و همکاران (۲۰۱۶)،[4] یک مدل ساده‌شده‌ی جدید به نام "مدل سه‌نواره" برای دیوارهای برشی فولادی ارائه داده‌اند، که در آن ورق‌های پُرکننده با سه نوار کششی جایگزین شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌های مدل مذکور، نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسب است.

از میان انواع مختلف سیستم‌های باربر لرزه‌ای، سیستم قاب مهاربندی‌شده‌ی واگرا[2]، شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی، و سختی کافی برای کنترل تغییرشکل‌های جانبی را فراهم می‌سازد؛ که در آن، اتلاف انرژی ورودی زلزله از طریق تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر پیوند (لینک) صورت می‌گیرد. همچنین، به‌منظور تضمین رخداد رفتار الاستیک در اعضاء خارج از تیر پیوند، تمامی عناصر خارج از آن باید برای بیشینه‌ی نیروهای داخلی حاصل از تسلیم تیر پیوند طراحی شوند.[5] در شکل ۱، رایج‌ترین پیکربندی‌های قاب مهاربندی واگرا مشاهده می‌شوند؛ که در آن‌ها، ویژگی‌های سایکلیک[3] لینک‌ها به عوامل مختلفی، مانند: نسبت طول لینک[4]، پروتکل بارگذاری، لاغری ورق، شرایط مرزی، مشخصات مصالح، و آرایش سخت‌کننده‌های عرضی بستگی دارد.[6-10] اگر پارامتر نسبت طول لینک (یا نسبت طول)، که در رابطه‌ی ۱ ارائه شده است، در محدوده‌ی $\rho \leq 1/6$ باشد، لینک موردنظر به‌عنوان لینک برشی[5] شناخته

[1] Pachideh
[2] Eccentrically Braced Frame
[3] Cyclic
[4] Link length ratio
[5] Shear Link

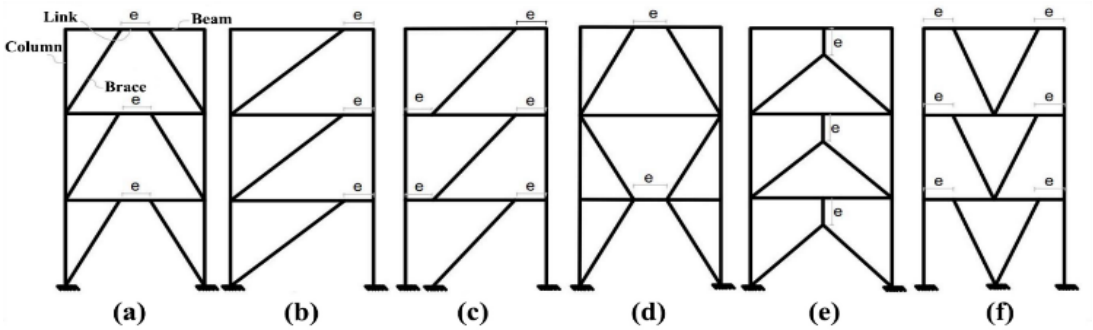
استناد به این مقاله:

قدمی بدرلو، عباس، زارع، ناصر و پای بند، محمد، ۱۴۰۴. بررسی عددی مکانیزم خرابی لینک‌های برشی کوتاه و خیلی‌کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A۹۹۲. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۳-۱۵. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65406.3375

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶



شکل ۱. برخی از آرایش‌های مرسوم برای قاب‌های مهاربندی واگرا.

می‌شود و مکانیزم خرابی لینک به‌صورت برشی خواهد بود. همچنین، لینک‌های با $\rho < 1$ و $1/6 \le \rho \le 1$ به‌ترتیب به‌عنوان لینک‌های برشی بسیار کوتاه و کوتاه طبقه‌بندی می‌شوند؛ که در آن‌ها، e طول لینک، M_p ظرفیت لنگر پلاستیک، و V_p مقاومت برشی پلاستیک لینک هستند.[۶، ۱۱، و ۱۲] از طرفی دیگر، لینک‌های بلند ($\rho \ge 2/6$) 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. برخی مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین اثبات کرده‌اند که لینک‌های برشی (لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه)، در مقایسه با لینک‌های بلند و متوسط، استحکام، شکل‌پذیری، ظرفیت دوران، و جذب انرژی قابل‌توجهی دارند.[۷، ۱۰، ۱۳، و ۱۴] لذا، لینک‌های برشی همیشه به‌عنوان اولین انتخاب مهندسان مطرح هستند و کاربرد قابل‌توجهی در صنعت ساختمان دارند.

$$\rho = \frac{eV_p}{M_p} \qquad (1)$$

تاکنون ابهام‌های زیادی در تعیین مقدار ضریب اضافه‌مقاومت و ظرفیت دوران لینک‌های برشی وجود دارد و پژوهشگران نتوانسته‌اند علت رخداد مقادیر بزرگ ضریب اضافه‌مقاومت و ظرفیت دوران زیاد (بالاتر از حد آیین‌نامه) را مشخص کنند،[۸، ۱۱، و ۱۵] تا جایی که در بند F۳ از آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲،[۱۶] هم به صراحت به تناقض‌های ذکرشده اشاره شده است. برخی پژوهشگران علت این موضوع را در قوانین اولیه‌ی آیین‌نامه جستجو کرده‌اند؛ چرا که ضوابط آیین-نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲ برای طراحی لینک‌ها، ظرفیت دوران و ضریب اضافه‌مقاومت بر پایه‌ی مطالعات تجربی نسبتاً گسترده‌ای بر روی مقاطع I-شکل ساخته‌شده 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 است و لزوم بررسی رفتار لینک‌ها و انجام مطالعات جدید برای بررسی کفایت ضوابط آیین‌نامه ضروری خواهد بود.[۱۷] آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱، ظرفیت دوران لینک‌های برشی ($1/6 \le \rho$) و خمشی ($\rho \ge 2/6$) را به ترتیب به ۰/۰۸ و ۰/۰۲ رادیان محدود کرده و برای لینک‌های متوسط نیز درون‌یابی خطی بین دو مقدار اخیر را توصیه کرده است. این در حالی است که ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه ($1/6 \le \rho \le 1$) و به‌خصوص بسیار کوتاه ($\rho < 1$) از حدود آیین‌نامه با یک حاشیه‌ی اطمینان زیاد فراتر می‌رود. برای مثال، ظرفیت دوران لینک‌های برشی توسط جی[1] و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۵] ۰/۰۸ – ۰/۱۷ رادیان و توسط بوزکورت[2] و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۸] ۰/۰۹۵– ۰/۱۴۱ رادیان گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که پارامترهای طراحی لرزه‌ای لینک‌های برشی با یک حاشیه‌ی قابل‌توجه از حد مذکور در آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱ فراتر رفته و در عمل منجر به طراحی غیرمحافظه‌کارانه شده است. از طرفی، نتایج اخیر نشان می‌دهند که ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه (لینک‌های برشی) نیاز به بررسی دقیق‌تر دارند و باید محدوده‌ی مناسب برای ظرفیت دوران لینک‌ها متناسب با مد خرابی حاکم بر رفتار آن‌ها تعیین شود. برخی پژوهشگران علت ابهام‌های گذشته در این مورد را در مد خرابی لینک‌ها جستجو کرده‌اند،[۶–۹، ۱۳، و ۱۴] زیرا مقدار بیشینه‌ی نیروی ایجادشده در لینک متناسب با ظرفیت دوران آن خواهد بود و تحمل دوران بیشتر، منجر به ضریب اضافه‌مقاومت بیشتر خواهد شد.

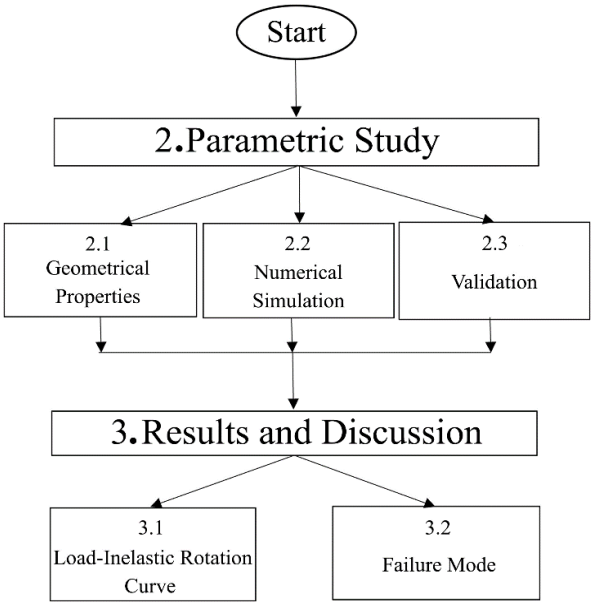
ریچاردز و اوانگ[3] (۲۰۰۶)،[۱۹] و ریچاردز (۲۰۰۴)، نشان داده‌اند که تحت پروتکل بارگذاری AISC۳۴۱-۲۰۰۲ بسیاری از لینک‌هایی که توسط پژوهشگران دیگر آزمایش شده‌اند، به ظرفیت دوران غیرالاستیک پیش‌بینی‌شده دست نمی‌یابند. در نتیجه، ایشان یک پروتکل بارگذاری اصلاح‌شده برای آزمون لینک‌ها پیشنهاد کرده‌اند، که بعدها پایه و اساس ضوابط AISC ۳۴۱-۰۵ و همچنین AISC۳۴۱-۲۲ شده است. اوکازاکی[4] و همکاران (۲۰۰۵)،[۲۱] و اوکازاکی و انگلهارت[5] (۲۰۰۷)،[۲۲] با بررسی آزمایشگاهی دریافته‌اند که پروتکل بارگذاری اعمال‌شده، تأثیر قابل‌توجهی در ظرفیت دوران و ضریب اضافه‌مقاومت لینک‌ها دارد. علاوه‌بر این، اوکازاکی و انگلهارت (۲۰۰۷)، با بررسی مکانیزم خرابی لینک‌های برشی با آرایش مناسب سخت‌کننده‌های عرضی دریافته‌اند که شروع آسیب از محل جوش‌های عمودی سخت‌کننده‌ها به جان است. دوسیکا[6] و همکاران (۲۰۱۰)،[۱۷] به بررسی رفتار لرزه‌ای لینک‌های برشی ساخته‌شده از فولاد با تنش‌های تسلیم متفاوت پرداخته و پارگی جان در انتهای جوش سخت-کننده‌ی عرضی را به جان لینک به عنوان مد خرابی غالب تعیین کرده‌اند. همچنین، لینک‌های برشی بدون سخت‌کننده‌ی عرضی، که از مصالح فولاد کم‌مقاومت ساخته شده‌اند، دوران‌های غیرخطی در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲ رادیان را تحمل می‌کنند. نتایج اخیر نشان می‌دهند که تبیین مکانیزم خرابی لینک و ظرفیت دوران متناظر با آن، عامل مهم در تعیین مقدار ضریب اضافه‌مقاومت خواهد بود. همچنین ایشان (۲۰۱۹)،[۱۰] با بررسی اثر تنش تسلیم فولاد در رفتار لینک‌های برشی نشان داده‌اند که هر چه تنش تسلیم فولاد پایین‌تر باشد، منجر به ظرفیت دوران بالاتری خواهد شد؛ که علت آن، ظرفیت شکل‌پذیری فولادهای کم‌مقاومت اعلام شده است. ضمناً دریافته‌اند که ظرفیت دوران

[1] Ji
[2] Bozkurt
[3] Richards & Uang
[4] Okazaki
[5] Okazaki & Engelhardt
[6] Dusicka

غیرالاستیک لینک‌های برشی ساخته‌شده از فولاد ASTM A992 به‌شدت به لاغری جان بستگی دارد. همچنین، مانگانیلو[7] و همکاران (۲۰۲۱)،[۵] نشان‌داده‌اند که ظرفیت دوران ۰/۰۸ رادیان برای لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A992 محافظه‌کارانه است. امروزه به‌طورگسترده‌ای فولاد ASTM A992 با تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال، بیشتر از فولاد A36 (۲۵۰ مگاپاسکال) برای ساخت لینک‌های با مقطع I- شکل استفاده می‌شود.[۲۳ و ۲۴] لذا، تغییر از فولاد A36 به فولاد A992 باعث نگرانی در مورد رفتار چرخه‌ای (سایکلیک) دقیق در لینک‌ها شده است؛ به‌ویژه برای لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه با بال‌های سنگین، که مستعد ایجاد ضریب اضافه‌مقاومت و ظرفیت دوران بزرگ هستند.[۲۲]

همان‌طور که گفته شد، مطالعات جامعی درباره‌ی رفتار چرخه‌ای لینک‌های کوتاه و به‌ویژه بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A992 تحت پروتکل بارگذاری AISC۳۴۱-۲۲ صورت نگرفته است. همچنین، ابهام‌های قابل‌توجهی در مورد مقدار دقیق ضریب اضافه‌مقاومت و ظرفیت دوران لینک‌های برشی با بال‌های سنگین وجود دارد،[۸، ۱۱، ۱۳، و ۱۴] که این موضوع موجب نگرانی طراحان سازه در استفاده از ضوابط طراحی فعلی توصیه‌شده در آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲ برای تخمین رفتار دقیق لینک‌های برشی در قاب‌های مهاربندی واگرا شده است.[۶، ۸، ۱۳، و ۲۵] بنابراین، برای رفع کاستی‌های ذکرشده و با هدف ارائه‌ی نوآوری در پژوهش حاضر، دو هدف اصلی دنبال شده است:

۱) بررسی ظرفیت دوران لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه تحت پروتکل بارگذاری AISC۳۴۱-۲۲. ۲) مطالعه‌ی مکانیزم خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه تحت پروتکل بارگذاری AISC۳۴۱-۲۲. روند انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا یک روش شبیه‌سازی عددی غیرخطی برای بررسی رفتار لینک‌های برشی در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس[8] توسعه داده شده است، که قادر به درنظرگرفتن آثار کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای سایکلیک، و همچنین تأثیر



شکل ۲. شمای کلی از روند انجام نوشتار حاضر.

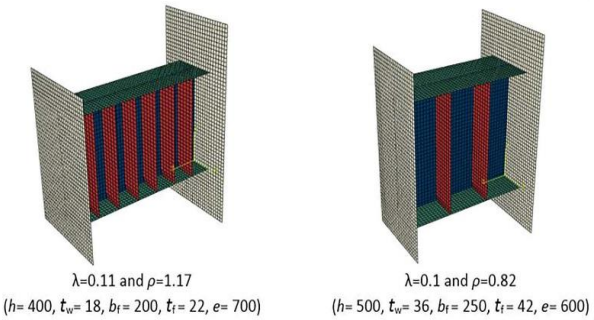
شروع و گسترش ترک در کاهش مقاومت و سختی باشد. در ادامه و پس از راستی‌آزمایی روش مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، یک مطالعه‌ی پارامتریک جامع با ساخت ۱۱۴ لینک برشی صورت گرفته و منحنی بار- دوران پلاستیک و همچنین مکانیزم خرابی لینک‌های کوتاه و بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A992 بررسی شده‌اند.

۲. مطالعه‌ی پارامتریک

۱.۲. مشخصات هندسی مدل‌های عددی

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی جامع رفتار لینک‌های برشی، ۱۱۴ لینک برشی (کوتاه و خیلی کوتاه) I- شکل با مشخصات هندسی مختلف تعریف شده‌اند. در شکل ۳، نمونه‌هایی از مدل‌های عددی مشاهده می‌شوند. طول لینک، عرض بال، ضخامت بال، عمق جان، ضخامت جان، و فاصله‌ی سخت‌کننده‌های عرضی به‌ترتیب در بازه‌های ۲۲۰۰–۲۵۰، ۶۰۰–۸۰، ۵۷–۶، ۱۰۰۰–۱۰۰، ۴۸–۳، و ۱۳۴۰–۶۸ در نظر گرفته شده‌اند. طبق بخش D۱.۱ از آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲، لینک‌های برشی با مقطع I- شکل باید الزام‌های اعضا با شکل‌پذیری زیاد را ارضاء کنند. در لینک‌های اخیر، بال‌ها (به‌عنوان استثناء) می‌توانند ضوابط اعضا با شکل‌پذیری متوسط را ارضاء کنند. ولی، در پژوهش حاضر، الزام‌های شکل‌پذیری زیاد برای نسبت‌های ارتفاع به ضخامت جان (h/t_w) و عرض به ضخامت بال (b_f/t_f) در نظر گرفته شده‌اند. نسبت ضخامت بال به جان بزرگ‌تر از ۱/۱ در نظر گرفته شده است، تا بال‌های مقطع I- شکل، دست‌کم به‌عنوان تکیه‌گاه ساده برای پانل جان عمل کنند.[۲۶–۳۱] سخت‌کننده‌های عرضی در کل ارتفاع جان با عرض کمینه و ضخامت مشخص و طبق ضوابط بخش F۵b از آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲ قرار داده شده‌اند. مطابق بند اخیر از آیین‌نامه، سخت‌کننده‌های میانی با بیشینه‌ی فاصله‌ی $d-30t_w$/۵ برای لینک‌های برشی استفاده شده‌اند. از طرفی، اگر عمق لینک کمتر از ۶۳۰ میلی‌متر باشد، سخت‌کننده‌های عرضی را می‌توان فقط در یک طرف جان قرار داد. همچنین، برای لینک‌های با عمق ۶۳۰ میلی‌متر یا بیشتر نیز سخت‌کننده‌های میانی باید در هر دو طرف جان قرار داده شوند.

در مطالعات پیشین، ابهام‌های زیادی در ارزیابی مکانیزم شکست لینک‌های برشی مشاهده شده است.[۱۱] اخیراً، قدمی و همکاران (۲۰۲۱)،[۸] دریافته‌اند که ریشه‌ی تناقض‌های مذکور، عمدتاً در پارامتر نسبت طول لینک، $\rho = eV_p / M_p$، است؛ که برای طبقه‌بندی لینک‌های برشی استفاده می‌شود. بنابراین، ایشان یک پارامتر جدید با عنوان پارامتر بی‌بُعد لاغری ورق (NDPS) [9] برای طبقه‌بندی مناسب رفتار لینک‌های کوتاه و بسیارکوتاه



شکل ۳. نمونه‌هایی از مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس.

[7] Manganiello
[8] ABAQUS
[9] Non-Dimensional Plate Slenderness

(مطابق رابطه‌ی ۲) پیشنهاد کرده‌اند؛ که در آن، a فاصله‌ی بین سخت‌کننده‌های عرضی و K ضریب کمانش برشی الاستیک است، که توسط رابطه‌ی ۳ براساس ضوابط AISC۳۶۰-۲۲،[۳۲] به‌دست می‌آید. در پژوهش حاضر، از هر دو پارامتر NDPS و ρ برای ارزیابی رفتار لینک‌های برشی استفاده شده است.

$$\lambda = \frac{h}{t_w}\sqrt{\frac{F_y}{KE}} \quad (2)$$

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

مطابق ضوابط بخش F۳.۵b از آیین‌نامه‌ی AISC۳۴۱-۲۲، مقاومت برشی پلاستیک و ظرفیت لنگر پلاستیک برای لینک‌های I- شکل بدون حضور نیروی محوری به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند؛ که در آن‌ها، F_y تنش تسلیم جان و Z اساس مقطع پلاستیک مقطع I- شکل هستند.

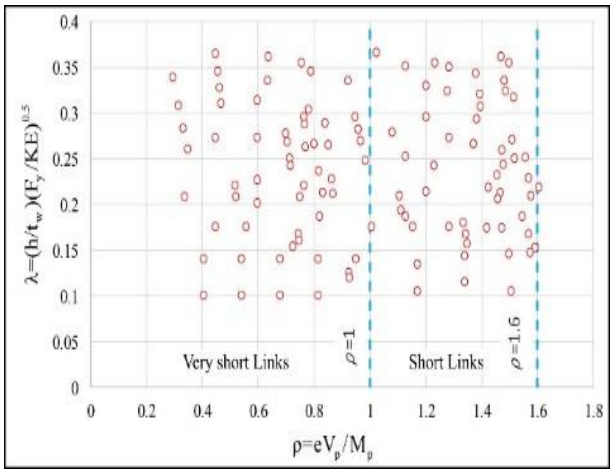
$$V_P = 0.6F_y ht_W \quad (4)$$

$$M_P = ZF_y \quad (5)$$

در شکل ۴، توزیع پارامترهای انتخابی مدل‌ها مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بازه‌ی وسیعی برای هر دو پارامتر نسبت طول لینک و لاغری ورق جان انتخاب شده است، که منجر به انجام مطالعه‌ی پارامتریک جامع برای بررسی تمامی عوامل مؤثر در رفتار چرخه‌ای لینک‌های برشی شده است. پارامترهای مذکور به‌صورت تصادفی و با هدف ایجاد مدل‌هایی با پارامتر نسبت طول لینک در بازه‌ی $۱/۶ \le \rho \le ۰/۳$ و پارامتر نسبت لاغری $۰/۳۷ \le \lambda \le ۰/۱$ تعریف شده است. شایان ذکر است که توضیحات بیشتر در مورد نحوه‌ی تعیین پارامترهای مذکور در نوشتار قدمی و زارع (۲۰۲۴)،[۱۳] ارائه شده است.

۲.۲. روش مدل‌سازی عددی

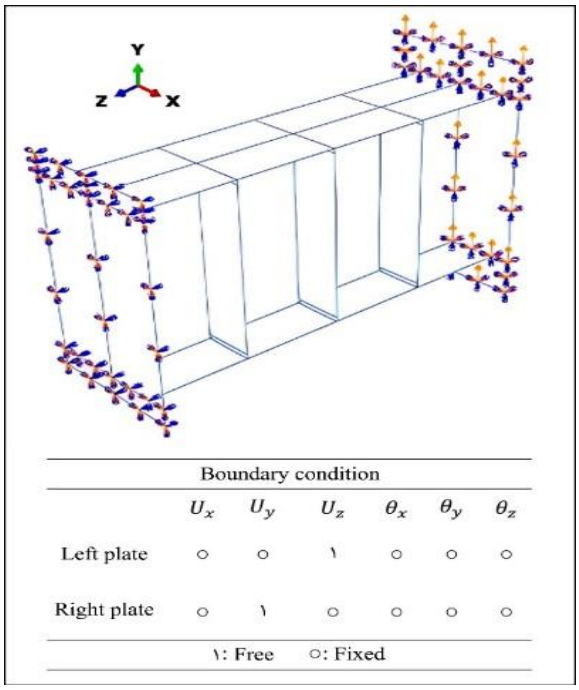
در نوشتار حاضر، یک مطالعه‌ی پارامتریک با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و با درنظرگرفتن آثار کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای سایکلیک، و همچنین تأثیر شروع و گسترش ترک در کاهش مقاومت و سختی به بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و بسیار کوتاه ساخته‌شده از فولاد ASTM A۹۹۲ پرداخته شده و مکانیزم خرابی لینک برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای، شامل ترکیبی از رفتارهای غیرخطی مصالح و هندسه‌ی سازه، بررسی



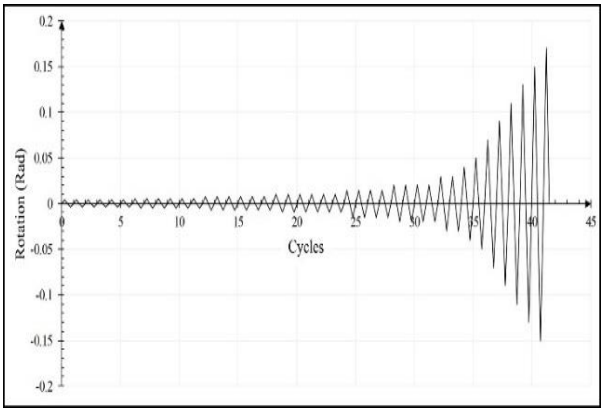
شکل ۴. پراکندگی پارامترهای لاغری و نسبت طول لینک مدل‌های عددی.

شده است. رفتارهای مذکور، شامل تسلیم مصالح، سخت‌شوندگی کرنشی، کمانش ورق، شروع ترک، و گسترش آن تحت تغییرشکل‌های بزرگ غیرالاستیک بوده است. تحلیل چرخه‌ای غیرخطی با استفاده از روش General/Static صورت گرفته و برای مدل‌سازی اجزاء لینک I- شکل نیز از المان پوسته‌ی عمومی چهارگره‌ای چهارضلعی S۴R استفاده شده است. در برخی مطالعات،[۸، ۱۴، ۳۰، ۳۱، و ۳۳] المان مذکور به‌طورگسترده برای مدل‌سازی اجزاء سازه‌ای جدار نازک و ضخیم به‌کار رفته و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته و فرمول‌بندی تغییرشکل‌های بزرگ استفاده شده است. همچنین المان مذکور، توانایی شبیه‌سازی کرنش‌های غشایی و دوران‌های بزرگ را دارد و می‌تواند تغییرات ضخامت عضو را نیز لحاظ کند. مطابق نتایج تحلیل حساسیت مش در نوشتار قدمی و زارع (۲۰۲۴)،[۱۳] مقدار مش بهینه برابر ۱۵ میلی‌متر تعیین و در تمامی مدل‌ها نیز استفاده شده است.

مدل‌های اجزاء محدود به‌صورت لینک‌های ایزوله[۱۰] مدل‌سازی و شرایط مرزی آن‌ها براساس برخی پژوهش‌ها،[۸، ۱۴، ۲۳، و ۲۵] انتخاب شده است. در شکل‌های ۵ و ۶، به‌ترتیب شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری اعمالی بر لینک‌های بررسی‌شده



شکل ۵. بارگذاری و شرایط مرزی مدل‌های عددی.

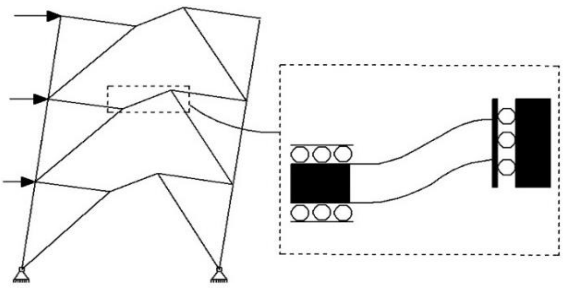


شکل ۶. پروتکل بارگذاری در استاندارد AISC ۳۴۱-۲۲ برای اتصال لینک به ستون.

[10] Isolated link

مشاهده می‌شوند. همچنین، مطابق شکل ۷، شرایط مرزی انتخابی براساس حالت تغییرشکل‌یافته‌ی لینک در داخل یک سیستم قاب ساده با مهاربند واگرا تحت بارگذاری جانبی بوده است. بر این اساس، تمامی درجه‌های آزادی چرخشی و انتقالی در دو انتهای لینک محدود بوده و فقط تغییرشکل محوری در انتهای چپ و تغییرشکل قائم در انتهای راست آزاد شده‌اند. پروتکل بارگذاری نیز مستخرج از بند K۲.۴C استاندارد AISC ۳۴۱-۲۲ است؛ که مطابق آن، 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 شده‌اند.

برای مصالح فولادی از فولاد ASTM A۹۹۲ با تنش تسلیم اسمی ۳۴۵ مگاپاسکال استفاده شده است. مطابق نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون کشش مستقیم،[۳۴] مقدار تنش تسلیم فولاد مذکور برابر ۳۸۰ مگاپاسکال تعیین شده است، که برای مدل‌سازی اجزاء لینک در نوشتار حاضر نیز استفاده شده است. به‌منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی از روش سخت‌شوندگی ترکیبی ایزوتروپیکی- سینماتیکی موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل اخیر 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 اندازه‌ی سطح تسلیم را به‌عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل نشان می‌دهد. به‌منظور اعمال سخت‌شوندگی کرنشی مصالح، از مدل ساختاری حلقوی توصیه‌شده توسط چابُچی[۱۱] (۱۹۸۹ و ۱۹۸۶)،[۳۵ و ۳۶] استفاده و مقادیر پارامترهای سخت‌شوندگی نیز طبق نوشتار آرک[۱۲] (۲۰۰۲)،[۳۴] انتخاب شده‌اند. پارامترهای سخت‌شوندگی فولاد در جدول ۱ ارائه شده‌اند. توضیحات بیشتر در مورد نحوه‌ی مدل‌سازی رفتار فولاد نیز در نوشتار قدمی و زارع (۲۰۲۴)،[۱۳] ارائه شده است. از معیار تسلیم فون میسز به‌عنوان معیار تسلیم در شکست لینک‌های برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. همچنین، توسط قابلیت Ductile damage در آباکوس، یک مدل شکست برای شروع خرابی و حذف المان بعد از تسلیم در فولاد استفاده شده است. کرنش پلاستیک معادل نیز در شروع خرابی مطابق نتایج پژوهش آزمایشگاهی هیو[۱۳] (۲۰۱۵)،[۳۷] تعریف شده است.



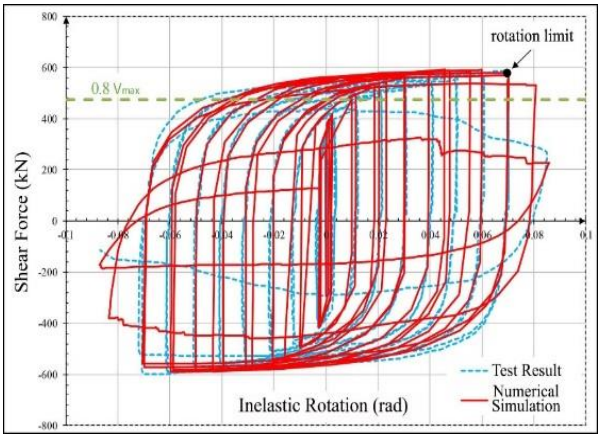
شکل ۷. حالت تغییرشکل لینک در یک سیستم قاب ساده با مهاربند واگرا.[۱۳]

جدول ۱. پارامترهای سخت‌شوندگی کرنشی مصالح فولادی.

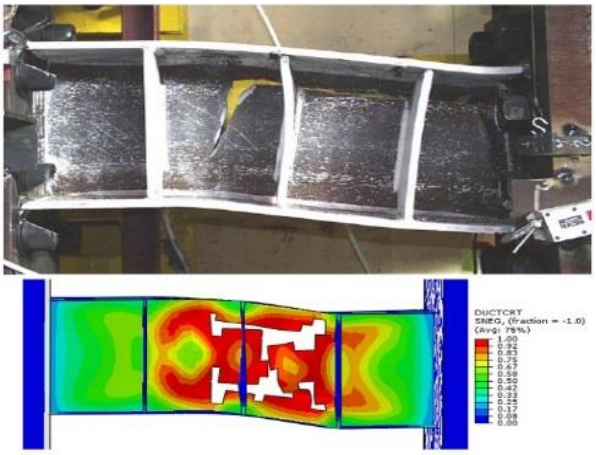
σ_∞ (MPa)	b	C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2	C_3 (MPa)	γ_3
50	1.2	7993	175	7100	116	2650	60

۳.۲. راستی‌آزمایی روش مدل‌سازی عددی

در بخش حاضر، به بررسی درستی عملکرد نرم‌افزار و صحیح‌بودن نحوه‌ی مدل‌سازی عددی پرداخته شده است. همچنین، قابل اطمینان‌بودن نحوه‌ی ساخت هندسه‌ی سازه، شرایط مرزی، بارگذاری، نوع المان، مش‌بندی، تعریف مصالح، و تنظیمات مربوط به تحلیل سازه بررسی شده‌اند. بدین منظور، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر با نتایج کار آزمایشگاهی آرک (۲۰۰۲)،[۳۴] مقایسه شده است. در پژوهش حاضر، مدل ۴B از پژوهش آزمایشگاهی مذکور انتخاب شده است. لینک اخیر از نوع لینک برشی با $\rho = ۱/۱$، ساخته‌شده از فولاد ASTM A۹۹۲ است، 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 نوشتار آرک (۲۰۰۲)،[۳۴] موجود است. پس از مدل‌سازی و تحلیل لینک موردنظر، نتایج عددی برای نمونه‌ی ۴B با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مطابق شکل ۸ (الف)، نتایج عددی تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته است، که نشان می‌دهد که رویکرد مدل‌سازی اجزاء محدود



(الف) منحنی بار– دوران پلاستیک.



(ب) مد خرابی: نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج عددی نوشتار حاضر با نتایج آزمایشگاهی.

[11] Chaboche
[12] Arce
[13] Hu

پیشنهادی در نوشتار حاضر می‌تواند سختی، مقاومت، ظرفیت دوران، آسیب تجمعی، و مد خرابی لینک‌های برشی را به‌دقت پیش‌بینی کند. بیشینه‌ی مقاومت برشی نمونه‌ی 4B طبق نتایج آزمایشگاهی برابر با ۵۹۰/۸۳ کیلونیوتن با خطای ۰/۸۸٪، تطابق بسیار خوبی با نتیجه‌ی مدل‌سازی عددی نوشتار حاضر (۵۹۶/۰۶ کیلونیوتن) داشته است. ظرفیت دوران مدل اجزاء محدود نیز برابر ۰/۰۷ رادیان به‌دست آمده است، که نزدیک به ۰/۰۶۹ رادیان گزارش‌شده در داده‌های آزمایشگاهی است. همچنین، مطابق شکل ۸ (ب)، تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی از لحاظ مد خرابی وجود دارد.

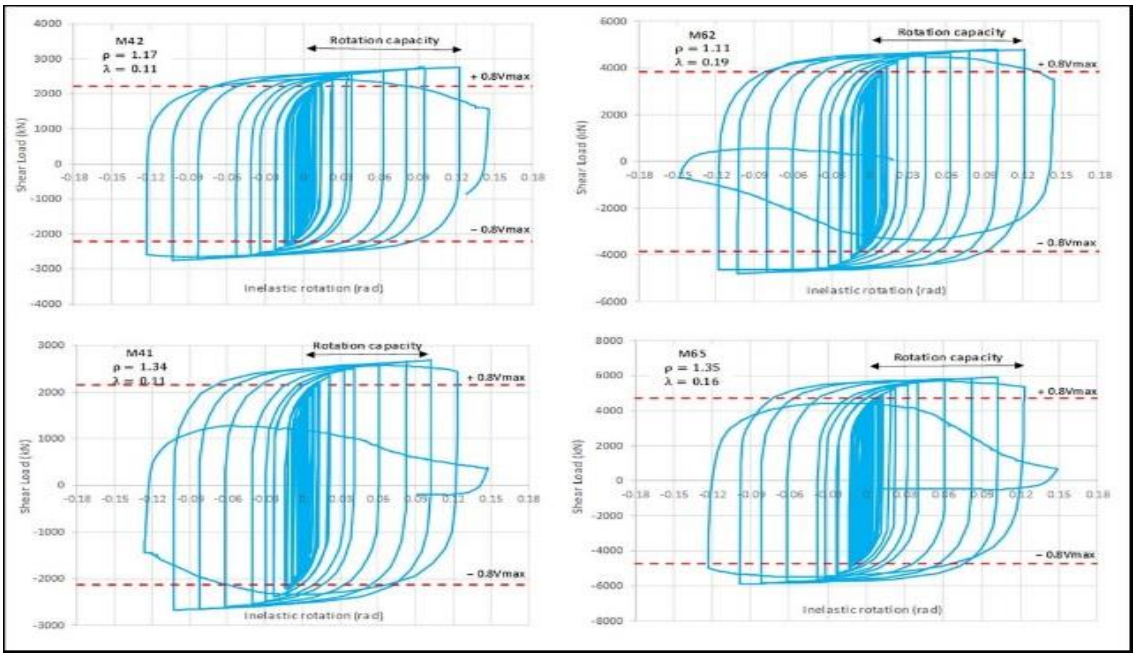
۳. بحث و بررسی نتایج

۱.۳. منحنی بار- دوران پلاستیک

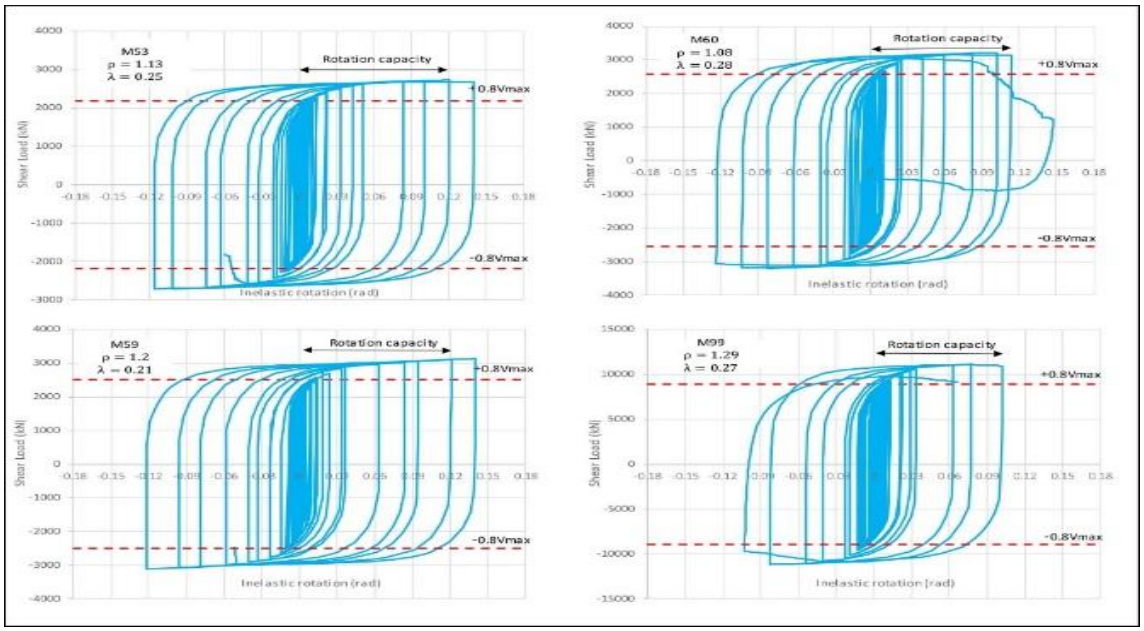
مطابق ضوابط بخش F4a از آیین‌نامه‌ی AISC341-22، زاویه‌ی دوران لینک برابر زاویه‌ی غیرارتجاعی بین لینک و تیر خارج از لینک تعریف می‌شود. همچنین، به بیشینه‌ی سطح دوران غیرالاستیک پایدار برای دست‌کم یک چرخه‌ی کامل بارگذاری قبل از اینکه مقاومت برشی لینک به کمتر از ۸۰٪ بیشینه‌ی مقاومت برشی برسد، ظرفیت دوران غیرالاستیک گفته می‌شود. در پژوهش حاضر، زاویه‌ی دوران غیرالاستیک مطابق رابطه‌ی ۵ تعیین می‌شود؛ که در آن، θ دوران کلی لینک، V برش وارد بر مقطع، و K_e نیز سختی الاستیک لینک هستند. یادآور می‌شود که در آیین‌نامه‌ی AISC341-22، ظرفیت دوران غیرالاستیک لینک‌های برشی به ۰/۰۸ رادیان محدود شده است.

$$\theta_{\text{inelastic}} = \theta - \frac{V}{K_e} \qquad (5)$$

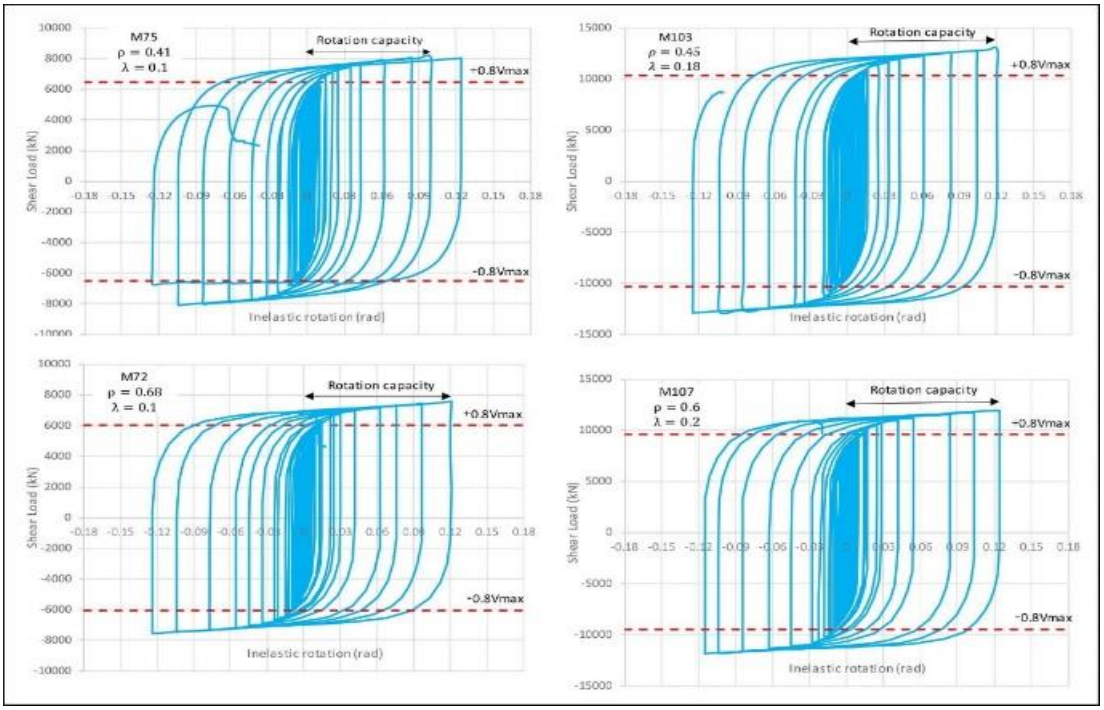
در شکل‌های ۹ و ۱۰، به‌ترتیب منحنی نیروی برشی در مقابل دوران پلاستیک برخی از لینک‌های برشی کوتاه و خیلی‌کوتاه به‌عنوان نماینده‌ای از تمامی مدل‌ها مشاهده می‌شوند، که در آن‌ها ظرفیت دوران مدل‌ها طبق رابطه‌ی ۵ تعیین



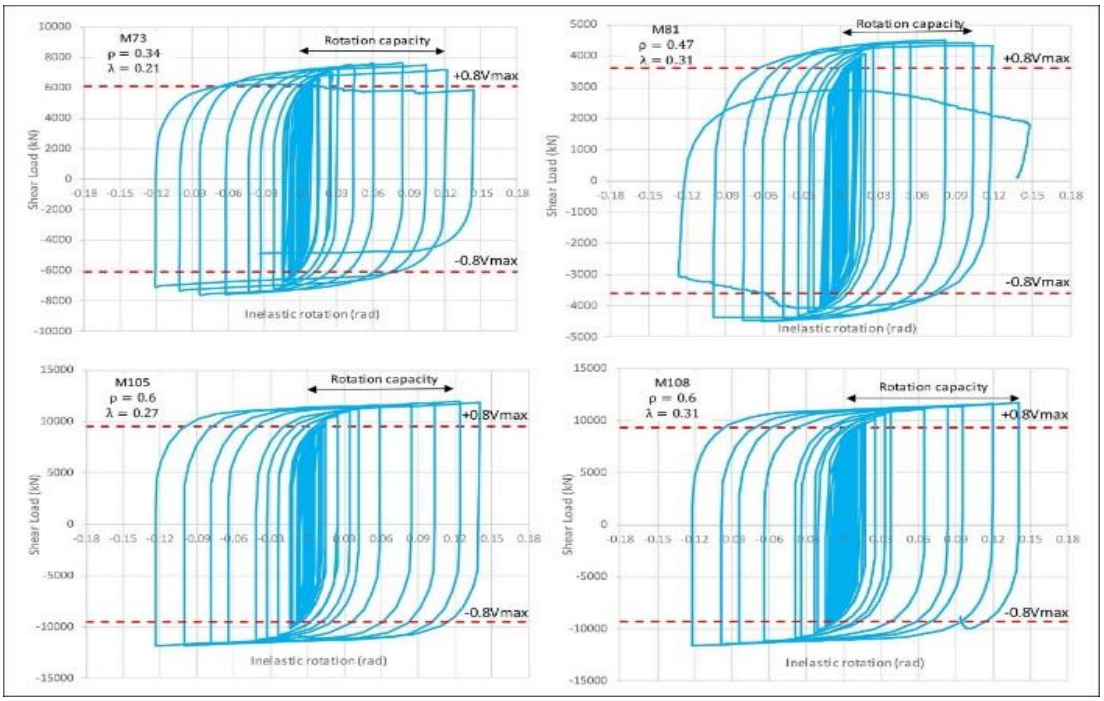
شکل ۹ (الف). منحنی‌های بار- دوران پلاستیک لینک‌های کوتاه (مدل‌های M۴۲، M۶۲، M۴۱، و M۶۵).



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).

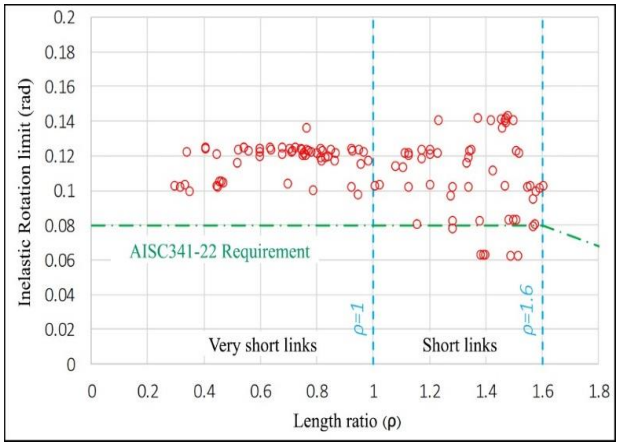


شکل ۱۰ (ب). منحنی‌های بار- دوران پلاستیک لینک‌های خیلی‌کوتاه (مدل‌های M۷۳، M۸۱، M۱۰۵، و M۱۰۸).

شده است. منحنی‌های مذکور به‌عنوان نمونه‌های شاهد طوری از بین تمامی مدل‌های پژوهش حاضر انتخاب شده‌اند که پارامترهای لاغری و نسبت طول لینک نمونه‌های انتخابی، معرف رفتار ۱۱۴ مدل ساخته‌شده باشند. 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 تقریباً ثابت فرض شده است. در یک ستون از بالا به پایین نیز با فرض ثابت‌ماندن پارامتر لاغری ورق، مقدار نسبت طول لینک افزایش یافته است.

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، تقریباً 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 یافته است. در برخی مدل‌ها (مثلاً مدل‌های M۶۵ و M۷۳)، 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 یافته است.

همچنین، در شکل ۱۱، ظرفیت دوران تمامی مدل‌ها بر حسب پارامتر نسبت طول لینک مشاهده می‌شود؛ که در آن، ظرفیت دوران پیشنهادی در آیین‌نامه‌ی AISC۲۲-۳۴۱ (۰/۰۸ رادیان) با خط سبز نشان داده شده است. مطابق نتایج



شکل ۱۱. ظرفیت دوران پلاستیک لینک‌های کوتاه و خیلی‌کوتاه.

به‌دست‌آمده، ظرفیت دوران بیشتر لینک‌ها به‌طورقابل‌توجهی از سطح دوران موردانتظار آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان) فراتر رفته و در محدوده‌ی ۰/۰۶-۰/۱۴ رادیان با مقدار متوسط ۰/۱۱۲ رادیان متغیر بوده است. این مقدار متوسط با مقدار ظرفیت دوران گزارش‌شده در نوشتار اوکازاکی و انگلهارت (۲۰۰۷)،[۲۲] (برابر ۰/۱۱۷رادیان) تطابق خوبی داشته است. ظرفیت دوران لینک‌های بسیار کوتاه ($\rho < 1$) به‌طورکلی نسبت به پارامتر نسبت طول لینک، ثابت و میانگین آن نزدیک به ۰/۱۱۸رادیان بوده است. پراکندگی داده‌ها برای لینک‌هایی با ρ در بازه‌ی 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 نیز با نسبت طول لینک در بازه‌ی $1/4 < \rho < 1/6$ ، مقدار ظرفیت دوران لینک‌های کوتاه تا حدودی کمتر از حد آیین‌نامه بوده است. به‌طورکلی، نتایج حاکی از آن است که اگر لینک‌های برشی براساس الزام‌های آیین‌نامه‌ی AISC ۳۴۱-۲۲ طراحی شوند، می‌توانند کمینه‌ی الزام آیین‌نامه را در رسیدن به ظرفیت دوران پلاستیک ۰/۰۸رادیان برآورده سازند. همچنین، با توجه به حاشیه‌ی اطمینان بیشتر موجود در ظرفیت دوران لینک‌های بسیار کوتاه، فاصله‌ی سخت‌کننده‌ها را می‌توان در لینک‌های اخیر افزایش داد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که یکی از عوامل اصلی بروز ضریب اضافه‌مقاومت بیش از حد مذکور در آیین‌نامه، عدم تخمین درست ظرفیت دوران لینک‌های برشی است، چرا که مقدار بیشینه‌ی نیروی ایجادشده 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 تُردتر شده و ظرفیت دوران مقطع نیز کاهش یافته است. به‌طورکلی، با مقایسه‌ی رفتار لینک‌های برشی کوتاه مشاهده می‌شود که تأثیر مقدار لاغری ورق در مقدار ظرفیت دوران بیشتر از تأثیر پارامتر نسبت طول لینک است. این تذکر لازم است که خوانندگان محترم جهت دریافت اطلاعات بیشتر می‌توانند به نوشتار قدمی و زارع (۲۰۲۴)،[۱۳] مراجعه کنند.

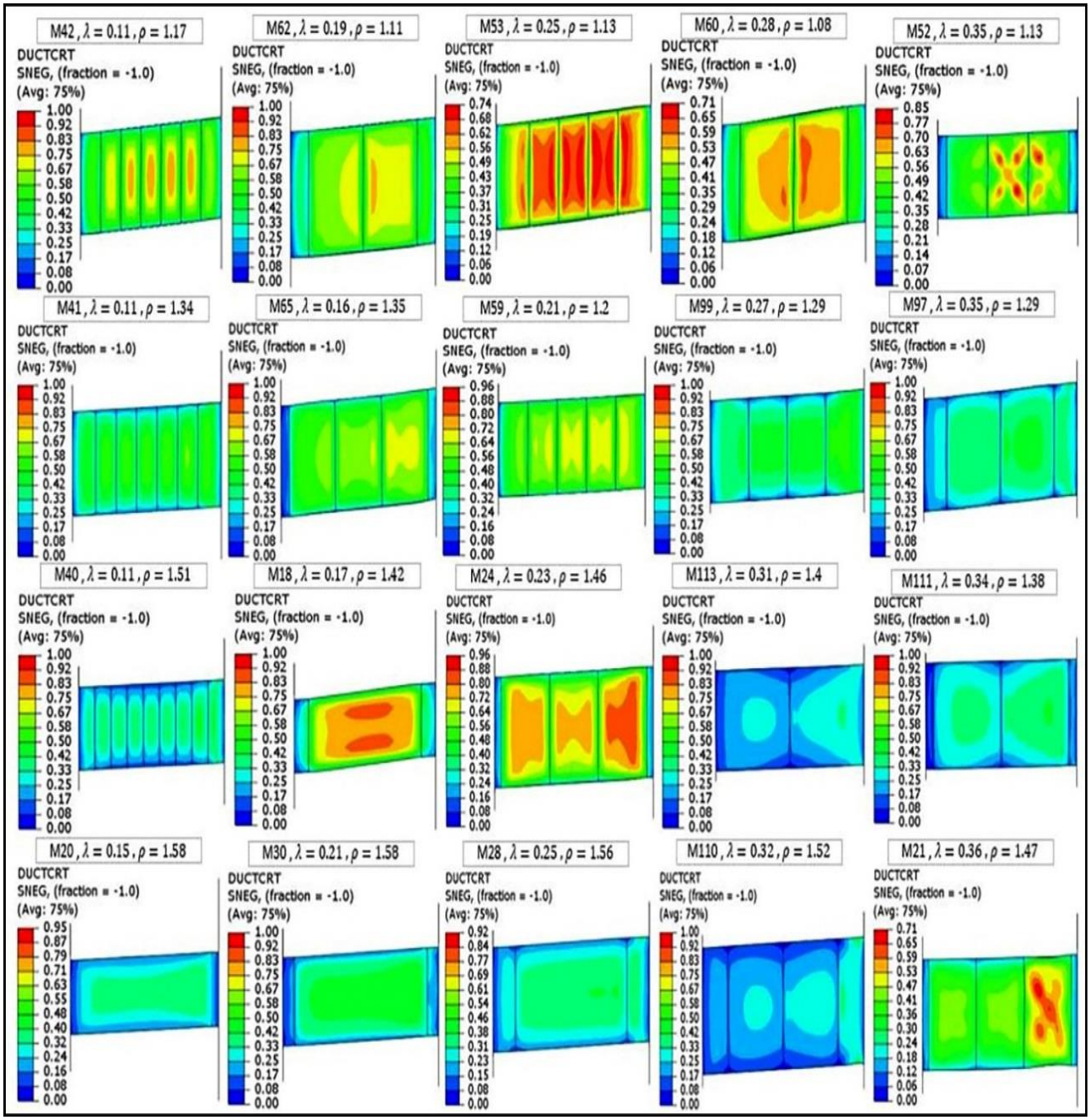
۲.۳. مد خرابی لینک‌های برشی

در بخش کنونی، مد خرابی متناظر با ظرفیت دوران پلاستیک لینک‌ها بررسی شده است. در ادبیات فنی، مدل‌های رفتاری متعددی برای پیش‌بینی نحوه‌ی رشد و توزیع آسیب در سازه‌های فولادی ارائه شده‌اند؛ که هر یک محدودیت‌ها و مزایایی نسبت به هم دارند. در پژوهش حاضر از مدل آسیب نرم و پارامتر DUCTCRT نرم‌افزار آباکوس جهت تخمین محل شروع پارگی ورق و نحوه‌ی توزیع خرابی استفاده شده است؛ که مطابق آن، با ترسیم کانتور پارامتر DUCTCRT ، می‌توان نحوه‌ی توزیع خرابی تحت یک بارگذاری مشخص را بررسی کرد، که در آن مناطقی از سازه با DUCTCRT در حدود ۱، به حد خرابی رسیده و در آستانه‌ی پارگی قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب مد خرابی لینک‌های کوتاه و بسیارکوتاه برخی از مدل‌های انتخابی مشاهده می‌شوند. مدهای خرابی مذکور به‌عنوان مثالی از کل نتایج اجزاء محدود نشان داده شده‌اند و پراکندگی مشخصات نمونه‌های انتخابی به نحوی بوده است که رفتار تمامی ۱۱۴ مدل را پوشش می‌دهند.

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 شده است؛ که علت آن، بروز ناسازگاری جابجایی[۱۴] به‌دلیل تغییرشکل برشی ورق جان بوده است. این رفتار در لینک-های با لاغری جان زیاد و نسبت طول لینک کم بیشتر مشهود است. در لینک-های اخیر و بخصوص در مدل‌های با نسبت طول لینک کمتر، خرابی اکثراً با شروع ترک‌های قائم در کنار سخت‌کننده‌های عرضی شروع شده و در انتهای سخت‌کننده در جان گسترش یافته است. همچنین، با افزایش پارامتر نسبت طول لینک و کاهش لاغری ورق جان، خرابی در لینک مشاهده نشده و لینک بدون رخداد پارگی در جان به ظرفیت دوران پلاستیک خود رسیده است. 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 رسیده است، که بیانگر استفاده‌ی مناسب از ظرفیت دوران لینک‌ها برای استهلاک انرژی است. شایان ذکر است که عدم وقوع خرابی در اطراف سخت‌کننده‌های عرضی لینک‌های کوتاه، یک مزیت طراحی محسوب می‌شود؛ زیرا حذف تمرکز تنش در نواحی ذکرشده از شروع زودهنگام پارگی (بخصوص پارگی ترد) جلوگیری می‌کند و امکان استفاده‌ی کامل از ظرفیت دوران پلاستیک لینک برای استهلاک انرژی را فراهم می‌سازد. در این حالت، خرابی در بخش میانی جان لینک رخ می‌دهد و توزیع یکنواخت‌تری از انرژی کرنشی در لینک حاصل می‌شود، که عملکرد بهینه‌ی 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 شده است. مدل‌های با لاغری کم و نسبت طول نزدیک به عدد ۱، تقریباً بدون رخداد آسیب به باربری نهایی خود می‌رسند، که نشان از سخت‌گیرانه‌بودن ضوابط آیین‌نامه در مورد رفتار لینک-های بسیار کوتاه است. در مدل‌های با نسبت طول لینک کم، پارگی ورق جان در محل تقاطع بال و جان رخ داده و با ادامه‌ی بارگذاری، ترک در راستای سخت‌کننده‌های عرضی در جان لینک و بدون کاهش قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت برشی مقطع گسترش یافته است. این در حالی است که با افزایش پارامتر نسبت طول لینک و کاهش لاغری ورق جان، شروع آسیب در محل تقاطع سخت-کننده‌ی عرضی با ورق جان است و منجر به ایجاد ترک‌های قائم می‌شود. این امر نشانگر این موضوع مهم است که در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و برای کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در محل اتصال سخت‌کننده به

[14] Ddisplacement incompatibilities



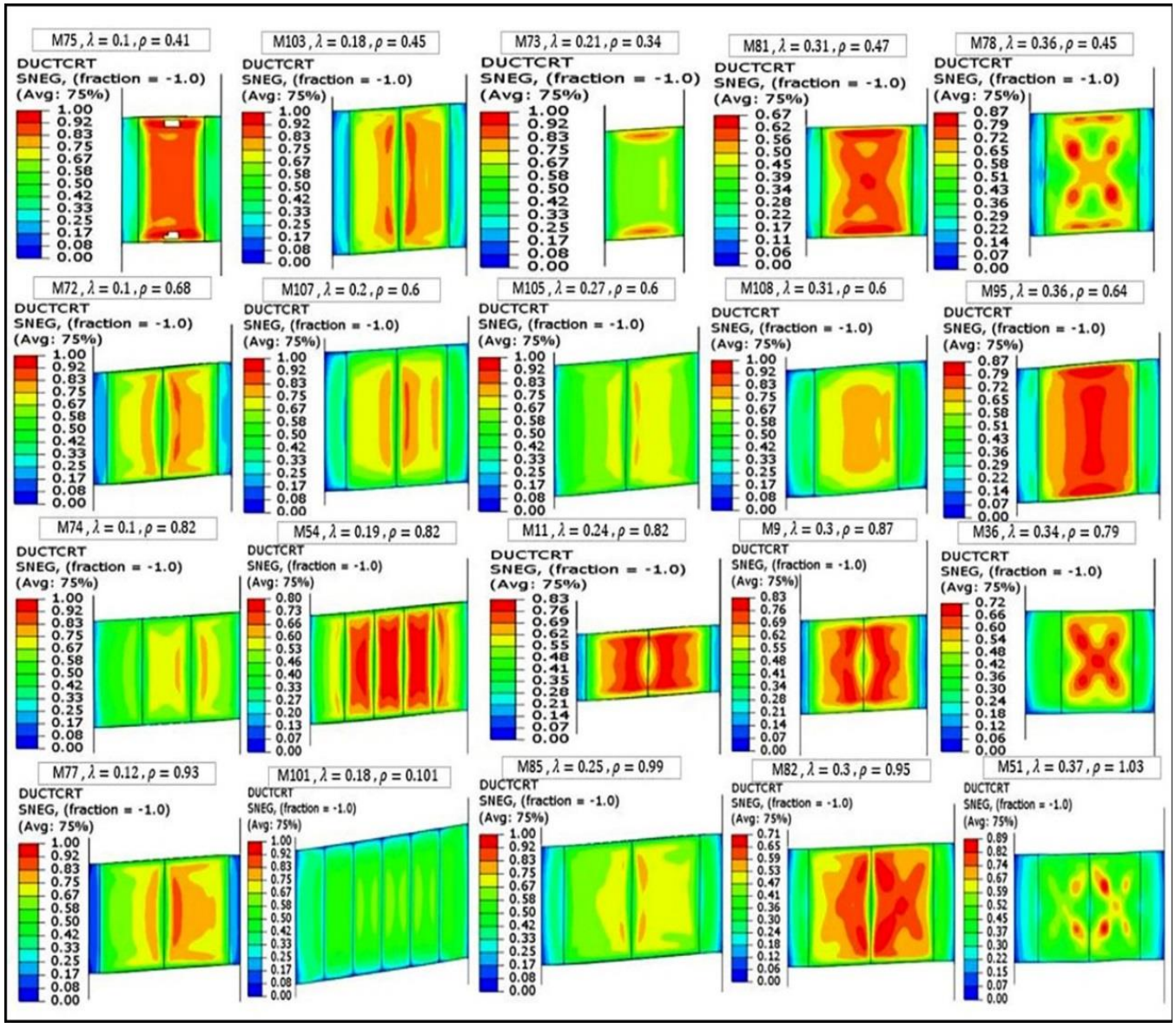
شکل ۱۲. مد خرابی لینک‌های کوتاه.

جان لینک، جوش ناحیه‌ی اخیر 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.

۴. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، به‌منظور بررسی مد خرابی لینک‌های برشی کوتاه و خیلی کوتاه ساخته‌شده از مصالح فولادی ASTM A۹۹۲، یک مطالعه‌ی پارامتریک با ساخت ۱۱۴ مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. تحلیل چرخه‌ای غیرخطی با درنظرگرفتن آثار کمانش موضعی، آسیب تجمعی تحت بارهای چرخه‌ای و همچنین تأثیر شروع و گسترش ترک در کاهش مقاومت و سختی انجام شده است. نتایج پژوهش حاضر به این شرح خلاصه شده است:

- لینک‌های برشی کوتاه و خیلی کوتاه، که مطابق الزام‌های آیین‌نامه‌ی ۲۲-AISC ۳۴۱ طراحی شده‌اند، 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 یافته است.
- با افزایش نسبت طول لینک و افزایش پارامتر لاغری ورق جان، رفتار لینک تُردتر شده و ظرفیت دوران لینک برشی کاهش یافته است.
- تأثیر مقدار لاغری ورق در مقدار ظرفیت دوران بیشتر از تأثیر پارامتر نسبت طول لینک بوده است.
- با توجه به حاشیه‌ی اطمینان بیشتر موجود در ظرفیت دوران لینک‌های بسیار کوتاه نسبت به سطح دوران موردانتظار آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان)، فاصله‌ی سخت‌کننده‌ها را می‌توان در لینک‌های مذکور افزایش داد.



شکل ۱۳. مد خرابی لینک‌های خیلی‌کوتاه.

- مقدار ظرفیت دوران لینک‌های برشی کوتاه در برخی از مدل‌های عددی تا حدودی کمتر از حد آیین‌نامه (۰/۰۸رادیان) بوده است.
- یکی از عوامل اصلی بروز ضریب اضافه‌مقاومت بیش از حد مذکور در آیین‌نامه، عدم تخمین درست ظرفیت دوران لینک‌های برشی بوده است.
- مشخصات هندسی مقطع و آرایش سخت‌کننده‌ها، تأثیر قابل‌توجهی در مد خرابی لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه داشته است.
- در لینک‌های کوتاه و خیلی کوتاه، با افزایش لاغری ورق، محل شروع آسیب و رخداد پارگی از محل سخت‌کننده‌های عرضی فاصله گرفته و به وسط پانل جان منتقل شده است.
- در لینک‌های کوتاه و بخصوص در مدل‌های با نسبت طول لینک کمتر، خرابی اکثراً با شروع ترک‌های قائم در کنار سخت‌کننده‌های عرضی آغاز شده و در انتهای سخت‌کننده در جان گسترش یافته است.
- در لینک‌های برشی بسیار کوتاه و برای کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری در محل اتصال سخت‌کننده به جان لینک، جوش ناحیه‌ی اخیر باید با دقت بیشتر و در تعداد پالس‌های کمتری اجرا شود.

References- منابع

1. Pachideh, G. Gholhaki, M. Lashkari, R. and Rezayfar, O., 2020. Behavior of BRB equipped with a casing comprised of steel and polyamide. Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings.
2. Pachideh, G. Kafi, M. and Gholhaki, M., 2020. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *J. of Structures* ,pp. 467–481. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.007

3. Pachideh, G. Gholhaki, M. and Kafi, M., 2020. Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper, *J. of Steel Compos. Struct*. 36, pp.197–211. DOI: https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.2.197

4. Pachideh, G. Gholhaki, M. Shiri, M., 2016. Modeling and analysis of thin steel plate shear walls using the new method, *In 2nd Int. Conf. Civ. Eng. Archit. Urban Plan. Elit*., pp. 124–136.

5. Manganiello, L. Montuori, R. Nastri, E. and Piluso, V., 2021. The influence of the axial restraint on the overstrength of short links. *J. of Constructional Steel Research*, *184*, pp.106758. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106758

6. Ghadami, A. and Pourmoosavi, G., 2022. Numerical investigation on the flange contribution in the shear strength of short LYP I-shaped links without intermediate stiffeners. *J. of Structures*, pp. 485-497. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.043.

7. Ghadami, A. Pourmoosavi, G. and Ghamari, A., 2021. Seismic design of elements outside of the short low-yield-point steel shear links. *J. of Constructional Steel Research*, *178*, pp.106489. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106489.

8. Ghadami, A. Pourmoosavi, G. Talatahari, S. and Azar, B.F., 2021. Overstrength factor of short low-yield-point steel shear links. *J. of Thin-Walled Structures*, *161*, p.107473. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107473.

9. Mohebkhah, A. and Chegeni, B., 2014. Overstrength and rotation capacity for EBF links made of European IPE sections. *J. of Thin-Walled Structures*, *74*, pp.255-260. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.013.

10. Volynkin, D. Dusicka, P. and Clifton, G.C., 2019. Intermediate web stiffener spacing evaluation for shear links. *J. of Structural Engineering*, *145*(2), p.04018257. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002244.

11. Azad, S.K. and Topkaya, C., 2017. A review of research on steel eccentrically braced frames. *J. of Constructional Steel Research*, *128*, pp.53-73. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.032.

12. Zhuang, L. Wang, J. Nie, X. and Wu, Z., 2022. Experimental study on the cyclic behaviour of shear links made of BLY160 steel. *J. of Thin-Walled Structures*, *174*, p.109072. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109072.

13. Ghadami, A. and Zare, N., 2024. Overstrength and rotation capacity of short and very short links made of ASTM A992 steel and subjected to AISC341-22 loading protocol, *Arab. J. Sci. Eng.* pp.1–15. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09103-5

14. Ghadami, A. and Pourmoosavi, G., 2023. The effect of heat-affected zone on the cyclic backbone curve of I-shaped LYP steel links, *J. of Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng*. 45. https://doi.org/10.1007/s40430-023-04233-7.

15. Ji, X. Wang, Y. Ma, Q. and Okazaki, T., 2016. Cyclic behavior of very short steel shear links. *J. of Structural Engineering*, *142*(2), p.04015114. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001375.

16. ANSI/AISC 341-22., 2022. *Seismic provisions for structural steel buildings*. America: American Institute of Steel Construction.

17. Dusicka, P. Itani, A.M. and Buckle, I.G., 2010. Cyclic behavior of shear links of various grades of plate steel. *J. of Structural Engineering*, *136*(4), pp.370-378. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000131.

18. Bozkurt, M.B. and Topkaya, C., 2017. Replaceable links with direct brace attachments for eccentrically braced frames. *J. of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *46*(13),pp.2121-2139. https://doi.org/10.1002/eqe.2896.

19. Richards, P.W. and Uang, C.M., 2006. Testing protocol for short links in eccentrically braced frames. *J. of Structural Engineering*, *132*(8), pp.1183-1191. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:8(1183).

20. Richards, P.W., 2004. *Cyclic stability and capacity design of steel eccentrically braced frames.* University of California, San Diego.

21. Okazaki, T. Arce, G. Ryu, H.C. and Engelhardt, M.D., 2005. Experimental study of local buckling, overstrength, and fracture of links in eccentrically braced frames. *J. of Structural Engineering*, *131*(10), pp.1526-1535. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:10(1526).

22. Okazaki, T. and Engelhardt, M.D., 2007. Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel. *J. of Constructional Steel Research*, *63*(6), pp.751-765. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.08.004.

23. Richards, P.W. and Uang, C.M., 2005. Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity. *J. of Structural Engineering*, *131*(10), pp.1546-1552. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:10(1546).

24. Mansour, N. Christopoulos, C. and Tremblay, R., 2011. Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames. *J. of Structural Engineering*, *137*(10), pp.1141-1152. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000350.

25. Ghadami, A. and Pourmoosavi, G., 2024, Development and application of an analytical model for LYP steel shear links in eccentrically braced frames, *Arab. J. Sci. Eng*. pp. 1–24. https://doi.org/10.1007/s13369-023-08644-5

26. AASHTO, L., 2020. *AASHTO LRFD bridge design specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

27. Ghadami, A. and Broujerdian, V., 2019. Shear behavior of steel plate girders considering variations in geometrical properties. *J. of Constructional Steel Research*, *153*, pp.567-577. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.009.

28. Ghadami, A. and Broujerdian, V., 2019. Flexure–shear interaction in hybrid steel I-girders at ambient and elevated temperatures. *J. of Advances in Structural Engineering*, *22*(6), pp.1501-1516. https://doi.org/10.1177/1369433218817893

29. Broujerdian, V. Mahyar, P. and Ghadami, A., 2015. Effect of curvature and aspect ratio on shear resistance of unstiffened plates. *J. of Constructional Steel Research*, *112*, pp.263-270. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.025.

30. Ghadami, A. Khoshknab, P. and Entezari, A.R., 2021. Ultimate shear strength of unstiffened long web panels at high temperatures. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *37*(3.1), pp.63-73. [In Persian]. https://doi.org/10.24200/j30.2021.56814.2860.

31. Ghadami, A. Pourmoosavi, G. and Broujerdian, V., 2021. Slenderness classification of shear panels with random pitting corrosion damage. *J. of Constructional Steel Research*, *184*, p.106802. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106802.

32. ANSI/AISC 360-22., 2022. *Specification for structural steel buildings*, America: American Institute of Steel Construction.

33. Ghadami, A. Jawdhari, A. and Pourmoosavi, G., 2024. Buckling and post-buckling behavior of top flange coped I-beams with slender web panels, *J. of Thin-Walled Struct.* 111640. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111640

34. Arce, G., 2002. *Impact of higher strength steels on local buckling and overstrength of links in eccentrically braced frames* (Doctoral dissertation, University of Texas at Austin).

35. Chaboche, J.L., 1989. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International journal of Plasticity*, *5*(3), pp.247-302. https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6.

36. Chaboche, J.L., 1986. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*, *2*(2), pp.149-188. https://doi.org/10.1016/0749-6419(86)90010-0.

37. Hu, H., 2015. *Numerical study of seismic behavior of high strength steel replaceable shear links* (Master's thesis, University of Maryland, College Park).

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.