مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۵۱-۶۰

Original Article

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی عملکرد چرخه‌یی قاب‌های مهاربندی ویژه

علی‌رضا فولادوند (کارشناس ارشد)
علی‌اکبر آقاکوچك * (استاد)
شریف شاه‌بیك (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

قاب‌های مهاربندی ویژه‌ی فولادی از نوع سیستم‌های متداول سازه‌یی برای مقابله با بارهای جانبی هستند، که ضوابطی برای شکل‌پذیری آن‌ها در برابر زلزله در آئین‌نامه‌های لرزه‌یی و پژوهش‌های پیشین ارائه شده است. در این پژوهش، رفتار ۴ نمونه قاب یک دهانه ـ یک طبقه‌ی مهاربندی ویژه‌ی فولادی با مهاری قطری با اعمال بار جانبی چرخه‌یی به روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. در قاب‌های مذکور، ورق اتصال مهاربند با فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم، بیضی‌گون و با سخت‌کننده طراحی شده‌اند. نتایج آزمایشگاهی و عددی این نمونه‌ها در قالب معیارهای سختی، مقاومت، استهلاک انرژی، کرنش خمیری معادل در نواحی بحرانی، ظرفیت کمانشی و جابجایی خارج از صفحه‌ی عضو مهاربند مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌است که قاب‌های مهاربندی ویژه در صورت رعایت شرایط لازم در اتصال مهاربند، شکل‌پذیری لازم و قابلیت استهلاک انرژی را به خوبی تأمین و عملکرد لرزه‌یی مطلوب را برآورده می‌کنند. در نمونه‌های با ورق اتصال، که براساس رعایت فاصله‌ی آزاد خط مستقیم یا بیضی‌گون طراحی شده‌اند، تجمع کرنش‌های خمیری در میانه‌ی مهاربند و گوشه‌های ورق اتصال در مراحل نهایی بارگذاری، باعث آغاز ترک و شکست در نمونه‌ها شده است. در نمونه‌های با ورق اتصال تقویت‌شده، امکان تشکیل ۳ مفصل خمیری در میانه و دو انتهای مهاربند فراهم شده است، ولی شکست نهایی در میانه‌ی مهاربند رخ داده است.

واژگان کلیدی: قاب مهاربندی ویژه‌ی فولادی، ورق اتصال، استهلاک انرژی، شکل‌پذیری، کرنش خمیری معادل، سخت‌کننده.

a.fooladvand@modares.ac.ir
a_agha@modares.ac.ir
shahbeyk@modares.ac.ir

۱. مقدمه

در زلزله‌های نورثریج آمریکا (۱۹۹۴) وکوبه‌ی ژاپن (۱۹۹۵)، ضعف‌هایی در سیستم قاب‌های خمشی مشاهده و موجب شده است که مهندسان گرایش بیشتری به استفاده از قاب‌های مهاربندی فولادی به‌منزله‌ی سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی پیدا کنند. در سیستم‌های مذکور، کمانش خارج از صفحه‌ی مهاربند، تغییرشکل قابل ملاحظه‌یی را به اتصال‌ها و به‌خصوص ورق اتصال تحمیل می‌کند.

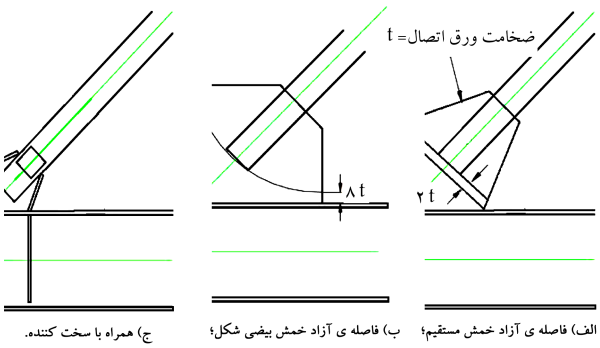
آئین‌نامه‌های کنونی همانند آئین‌نامه‌ی طراحی استاندارد AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] اساس طراحی را ظرفیت عضو مهاربند قرار می‌دهند و الزام می‌کنند که قسمت‌های اتصال مهاربند به تیر و ستون، ورق اتصال و جزئیات آن مقاوم‌تر از خود مهاربند باشند، تا از شکست ناخواسته‌ی این قسمت‌ها قبل از شکست خود مهاربند جلوگیری شود. اولین آزمایش‌های چرخه‌یی[۱] مهاربندها همراه با ورق‌های اتصال در اندازه‌ی واقعی، در پژوهشی در سال ۱۹۸۲ انجام شده است.[۲] در مطالعه‌ی مذکور، ۲۳ مهاربند جفت نبشی متصل به ورق‌های اتصال در بارگذاری چرخه‌یی بررسی و برای فراهم‌کردن امکان چرخش آزادانه‌ی ورق اتصال در قسمت انتهای مهاربند و تأمین رفتار ویژه در قاب‌های مهاربندی با شکل‌پذیری زیاد، فاصله‌ی آزاد مستقیم ۲ برابر ضخامت ورق اتصال عمود بر محور مهاربند مطابق شکل ۱الف پیشنهاد شده است.[۲-۵] این ضابطه متعاقباً در آئین‌نامه‌ی طراحی استاندارد AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] نیز منعکس شده است.

برخی پژوهشگران نیز در دانشگاه واشنگتن به منظور بررسی تأثیر پارامترهای طراحی اتصال در عملکرد لرزه‌یی قاب‌های مهاربندی ویژه به مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند و روشی بهینه در طراحی اتصال‌ها با تئوری فاصله‌ی آزاد خمش بیضی‌گون (شکل ۱ب) در ورق اتصال ارائه داده‌اند.[۶-۱۰] رفتار ایده‌آل سیستم در این روش مبتنی بر شکست هم‌زمان در عضو مهاری و ورق اتصال است. این طراحی باعث کوچک‌ترشدن ورق اتصال می‌شود. از طرفی با افزایش

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۶، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۳/۱/۳۰.



شکل ۱. طراحی ورق اتصال.

ضخامت جوش اتصال ورق به تیر و ستون، شروع ترک در گوشه‌ی ورق اتصال به تأخیر می‌افتد.[۹]

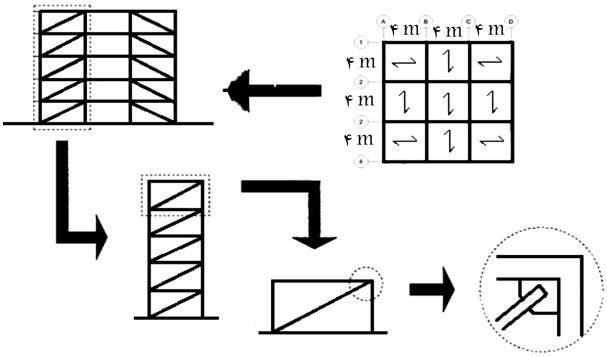
نوع دیگر سیستم قاب مهاربندی ویژه با ورق اتصال به همراه سخت‌کننده است، به‌طوری که سخت‌کننده‌ها از دوران دو انتهای مهاربند جلوگیری می‌کنند. نمونه‌یی از ورق اتصال به همراه سخت‌کننده در بالا و پائین ورق اتصال در شکل ۱ج نشان داده شده است. مطالعه‌یی در سال ۱۹۸۹، در مورد اندازه و شکل مهاربند در حالت دو سر گیردار انجام شده است، تا با ثابت‌کردن دو سر مهاربند در محل اتصال به ورق اتصال، گیرداری لازم تأمین شود.[۱۱] نتایج مطالعه‌ی مذکور نشان داده است که گیرداری دو سر اتصال مهاربند باعث افزایش مقاومت نهایی و همچنین افزایش انرژی مستهلک‌شده در کل سیستم می‌شود و این ممکن است سودمند باشد. هر چند که افزایش مقاومت فشاری ممکن است شکل‌پذیری سیستم را محدود کند؛ زیرا میانه‌ی مهاربند، تجمع کرنش غیرارتجاعی بیشتری را تحمل می‌کند و شکست زودتر رخ می‌دهد.

به‌طور کلی آئین‌نامه‌ی طراحی استاندارد AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] و آئین‌نامه‌های مشابه، از جمله مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران مقرر می‌دارند علاوه بر مقاومت‌های کششی و فشاری مورد نیاز، اتصال مهاربندها باید مقاومت خمشی لازم را نیز داشته و یا قابلیت سازگاری با دوران‌های غیرارتجاعی حاصل از کمانش در آن‌ها تأمین شده باشد. برای بررسی بیشتر این موضوع، در این پژوهش عملکرد چرخه‌یی ۴ نمونه قاب فولادی مهاربندی ویژه با مهاری قطری به روش آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نمونه‌ی اول براساس ضوابط آئین‌نامه با تأمین فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم به میزان دو برابر ضخامت ورق اتصال، نمونه‌ی دوم براساس روش طراحی بهینه و تأمین فاصله‌ی آزاد خمش بیضی‌شکل به‌میزان ۸ برابر ضخامت ورق اتصال و دو نمونه‌ی دیگر نیز به همراه سخت‌کننده در بالا و پائین ورق اتصال طراحی و آزمایش شده‌اند.

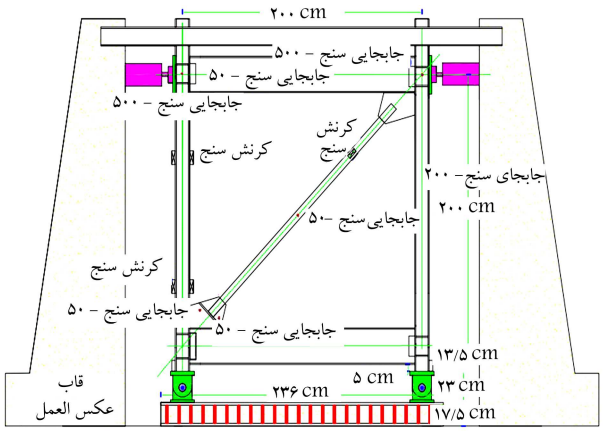
۲. مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

ابتدا سازه‌ی ۵ طبقه‌ی فولادی مطابق شکل ۲ در شهر تهران در نظر گرفته شده و با فرض واقع‌بودن آن بر خاک نوع دو، طراحی و یک دهانه از طبقه‌ی پنجم آن برای مطالعات آزمایشگاهی و عددی انتخاب و جزئیات طراحی آن در پژوهشی در سال ۲۰۱۳،[۱۲] ارائه شده است.

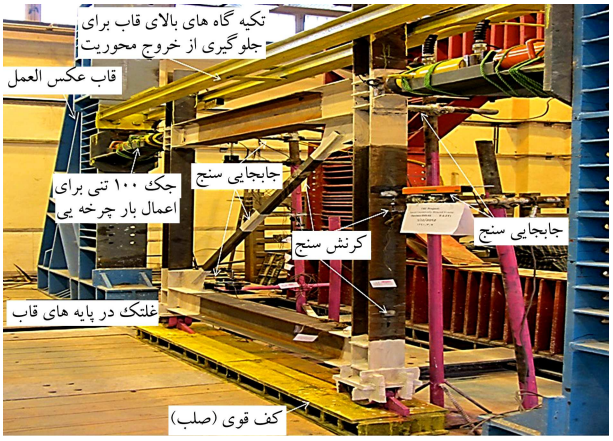
این دهانه از قاب با مقیاس ۰/۵ به‌عنوان مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده و مطابق شکل ۳ برای انجام آزمایش‌ها بر پا شده است. مقاطع ستون‌ها و مهاربندها نیز براساس مقیاس مذکور و نزدیک‌ترین مقاطع موجود در بازار انتخاب شده‌اند. ولی



شکل ۲. سازه‌ی طراحی‌شده و نحوه‌ی جداسازی یک قاب یک دهنه از آن.



شکل ۳. نحوه‌ی برپایی نمونه‌ی آزمایشگاهی و محل قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و جابجایی‌سنج‌ها.



شکل ۴. تصویر نمونه‌ی آزمایشگاهی.

به منظور امکان اعمال بارها در تراز تیر و جلوگیری از هر نوع اضافه تنش در آن‌ها، مقاطع تیرها به نسبت مدل، بزرگ‌تر اختیار شده‌اند.

نمونه‌های قاب مهاربندی بر روی کف صلب و پایه‌های مفصلی و همچنین در میان دو قاب عکس‌العمل قرار گرفته است. همچنین برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه در قسمت بالایی آن، دو تیر تکیه‌گاهی در دو طرف قاب نصب شده است. برای اعمال بار چرخه‌یی از دو جک فشاری ۱۰۰۰ کیلونیوتن در دو سمت قاب در محور اتصال تیر به ستون و عضو مهاری استفاده شده است (شکل ۴).

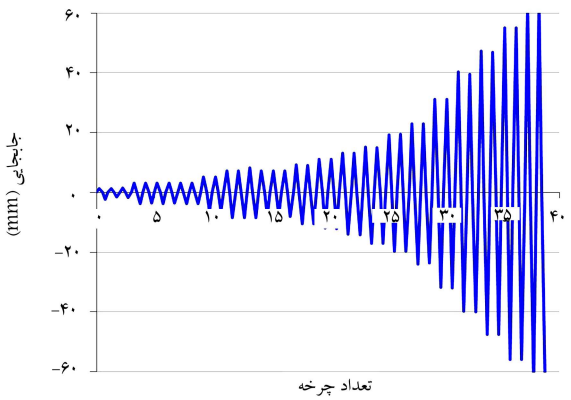
برای اندازه‌گیری کرنش در مهاربند و ستون در هر آزمایش از ۸ عدد کرنش‌سنج استفاده و نیز در هر قاب، ۶ جابجایی‌سنج نصب شده است.

همچنین ۴ نمونه‌قاب مهاربندی ویژه با مهاری قطری با جزئیات متفاوت در قسمت ورق اتصال در نظر گرفته شده است. در تمام نمونه‌ها، طراحی اتصالات مطابق با آئین‌نامه‌ی AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] انجام شده است. نمونه‌ی اول با تأمین فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم به‌میزان دو برابر ضخامت ورق اتصال، نمونه‌ی دوم با تأمین فاصله‌ی آزاد خمش بیضی شکل به میزان ۸ برابر ضخامت ورق اتصال و نمونه‌های سوم و چهارم نیز به همراه سخت‌کننده در بالا و پائین ورق اتصال طراحی شده‌اند. در جدول ۱، ابعاد و مشخصات اجزاء نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه و همچنین به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌یی نمونه‌های آزمایشگاهی، تاریخچه‌ی بارگذاری توصیه‌شده در آیین‌نامه‌ی ATC-۲۴،[۱۳] مطابق شکل ۵ استفاده شده است.

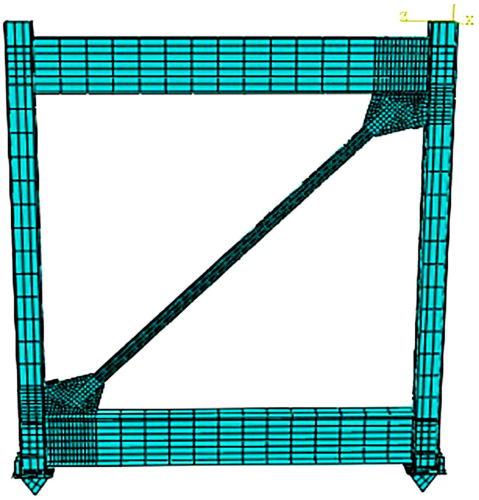
در تاریخچه‌ی بارگذاری مذکور برای محاسبه‌ی جابجایی نسبی طبقه‌ی متناظر با جاری‌شدگی قاب، ابتدا مدل‌های عددی از نمونه‌ها تهیه و تحت بارگذاری یکنوا[۲]، جابجایی جاری‌شدگی متناظر با کشش مهاربند برای هر نمونه تعیین شده است. شکل ۶، مدل تهیه‌شده در نرم‌افزار آباکوس را برای نمونه‌ی آزمایشگاهی قاب با ورق اتصال باریک‌شده با فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم، که با تمامی جزئیات و شرایط مرزی آزمایش شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد. المان‌های پوسته‌ی[۳] چهار گره‌یی در شبیه‌سازی کل اعضای قاب استفاده شده است. تحلیل حساسیت برای تعیین ابعاد المان‌ها در قسمت‌هایی که کمانش موضعی و رفتار غیرخطی اعضاء مهم است (مانند میانه‌ی مهاربند و قسمت ورق اتصال) انجام و کمینه‌ی اندازه المانها، ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. در پژوهش‌های پیشین، تأثیر نحوه‌ی مدل‌سازی جوش (به‌صورت جوش نفوذی کامل[۴] و یا جوش گوشه[۵]) بررسی شده است.[۹] در این پژوهش، تمامی محل‌های اتصال به هم بسته[۶] شده‌اند. برای نشان‌دادن کمانش و اثرات غیرخطی‌شدن هندسی در اعضاء از فرمولاسیون غیرخطی هندسی[۷] استفاده شده است.

به منظور اطمینان از کمانش خارج از صفحه‌ی عضو مهاری در مدل‌سازی اجزاء محدود و برای شبیه‌سازی عیوب[۸] اولیه‌ی قطعات سازه‌یی، جابجایی اولیه‌یی در جهت خارج از صفحه در مرکز مهاربند به اندازه‌ی ۰٫۰۰۱ طول مهاربند اعمال شده است. این میزان جابجایی اولیه در مطالعات پیشین نیز مورد استفاده قرارگرفته و تناسب آن تأیید شده است.[۹] تحلیل مدل عددی به‌صورت استاتیکی با چرخه‌های رفت و برگشت انجام شده است. برای اعمال بارگذاری از تاریخچه‌ی واقعی[۹] یعنی بارگذاری منطبق با نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. به منظور داشتن معیاری مناسب برای بررسی رفتار و شکل‌پذیری نمونه‌ها و پیش‌بینی عملکرد نهایی و شکست از متغیر کرنش خمیری معادل[۱۰] استفاده شده است.

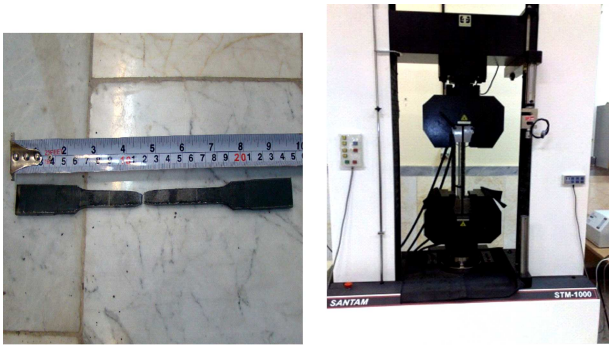
منحنی تنش - کرنش مصالح فولادی با انجام آزمایش کشش نمونه مطابق با استاندارد ASTM-E ۸[۱۴] استخراج شده است (شکل ۷). نمونه‌های دمبلی با



شکل ۵. تاریخچه‌ی بارگذاری ATC-۲۴.



شکل ۶. نمونه‌ی مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس.



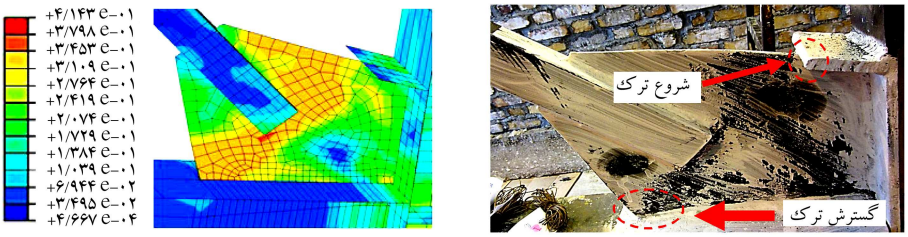
شکل ۷. انجام آزمایش کشش نمونه‌های دمبلی.

جدول ۱. ابعاد و مشخصات اجزاء نمونه‌های آزمایشی.

نمونه	ستون	تیر	اتصال تیر به ستون	مهاربند (mm)	زاویه‌ی مهاربند (درجه)	ورق اتصال (mm)	سخت‌کننده (mm)
۱	IPB ۱۲۰	IPE ۲۷۰	ورق ۱۰ × ۵۵ × ۱۹۰	قوطی ۴ × ۴۰ × ۶۰	۴۵	۶ × ۲۶۸ × ۳۴۴	—
۲	IPB ۱۲۰	IPE ۲۷۰	ورق ۱۰ × ۵۵ × ۱۹۰	قوطی ۴ × ۴۰ × ۶۰	۴۵	۶ × ۲۷۵ × ۳۳۰	—
۳	IPB ۱۲۰	IPE ۲۷۰	جفت نبشی ۱۲۰	قوطی ۴ × ۴۰ × ۶۰	۴۵	۶ × ۲۰۰ × ۲۷۵	ورق ۱۰ × ۱۲۰
۴	IPB ۱۲۰	IPE ۲۷۰	ورق ۱۰ × ۵۵ × ۱۹۰	قوطی ۴ × ۴۰ × ۶۰	۴۵	۶ × ۲۰۰ × ۲۷۵	ورق ۶ × ۱۲۰

جدول ۲. ابعاد و مشخصات مکانیکی مصالح.

نوع عضو	ابعاد و ضخامت (mm)	مدول ارتجاعی (GPa)	تنش جاری‌شدگی (GPa)	تنش نهایی (GPa)	ازدیاد طول (٪)
ورق اتصال	۶	۲۰۰	۰٫۲۷	۰٫۵۱	۰٫۲۸
عضو مهاری	قوطی ۴ × ۴۰ × ۶۰	۱۸۰	۰٫۳۰	۰٫۴۱	۰٫۲۶
اتصال برشی	ورق ۱۰ × ۵۵ × ۱۹۰	۲۰۰	۰٫۲۷	۰٫۵۱	۰٫۲۸
ستون	IPB ۱۴۰	۲۰۰	۰٫۲۸	۰٫۳۷	۰٫۲۰
تیر	IPE ۲۷۰	۲۰۰	۰٫۲۸	۰٫۳۷	۰٫۲۰
سخت‌کننده‌ها	ورق ۶ و ۱۰	۲۰۰	۰٫۲۷	۰٫۵۱	۰٫۲۸



الف) نمونه ی آزمایشگاهی؛ ب) نمونه ی مدل عددی همراه با توزیع تنش در آن.

شکل ۸. نحوه‌ی تغییرشکل در ورق اتصال.

طول ۲۰۳ میلی‌متر و عرض ۱۹ میلی‌متر در جهت طولی و عرضی از ورق اتصال و در جهت طولی از عضو مهاربند گرفته شده است. نمونه‌ها در داخل گیره‌های دستگاه آزمایش کشش قرار گرفته و یک کشش سنج در طول سنجش[۱۱] آن تعبیه شده است.

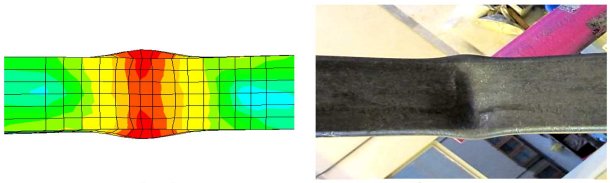
برای محاسبه‌ی نقطه‌ی جاری‌شدگی در مقطع از نمودار تنش ـ کرنش واقعی فولاد از روش جابجاسازی با آفست با کرنش ۰٫۰۰۲ استفاده شده است.[۱۴] خصوصیات فولاد اعضاء مختلف قاب براساس نتایج آزمایش‌ها مطابق با جدول ۲ حاصل شده است. مدل انتخابی برای رفتار مصالح در آباکوس مدل سخت‌شونده پویای غیرخطی[۱۲] با معیار تسلیم فون میسز[۱۳] است، که برای فولاد در حالت بارگذاری رفت و برگشتی انتخابی مناسب است.[۹،۱۵و۱۶]

۳. مشاهدات آزمایش‌ها و نتایج

۳.۱. قاب با فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم در ورق اتصال (نمونه‌ی اول)

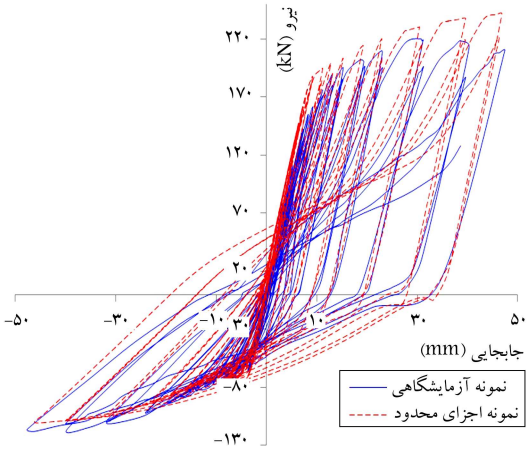
قاب این نمونه براساس آئین‌نامه‌ی استاندارد AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] با ورق‌های اتصال به‌صورت باریک‌شده با فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم به میزان ۲ برابر ضخامت ورق اتصال طراحی شده است. در این آزمایش در چرخه‌ی ۸ میلی‌متر، اولین خطوط جاری‌شدگی کششی در ورق اتصال مشاهده شده است. در چرخه‌ی ۴۸ میلی‌متر کمانش موضعی در میانه‌ی مهاربند ایجاد و در همین چرخه، اولین ترک در گوشه‌ی ورق اتصال پائینی در طول آزاد کوچک‌تر آن رخ داده است. در ادامه، در چرخه‌ی ۶۴ میلی‌متر، وقتی که این ترک تا ۲۰ میلی‌متر گسترش یافته است، ترک دیگری در ورق اتصال پائینی در لبه‌ی آزاد بالایی آن مشاهده شده است (شکل ۸)، ضمن اینکه اتصال تیر به ستون نیز دچار ترک شده و کاهش مقاومت در سیستم مشاهده و آزمایش در همین چرخه متوقف شده است.

کمانش خارج از صفحه‌ی مهاربند در طول بارگذاری در یک جهت رخ داده



الف) نمونه ی آزمایشگاهی؛ ب) مدل عددی.

شکل ۹. کمانش موضعی میانه‌ی مهاربند.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی رفتار چرخه‌یی نمونه‌ی اول آزمایشگاهی با مدل عددی.

و ورق اتصال پائینی به علت نقص اولیه در ساخت نمونه، اعوجاج و جاری‌شدگی بیشتری نسبت به ورق اتصال بالایی از خود نشان داده است. در شکل ۹، کمانش موضعی میانه‌ی مهاربند در نمونه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل عددی ارائه شده است.

در شکل ۱۰، مقایسه‌ی بین پاسخ چرخه‌یی نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. سختی ارتجاعی حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی ۴٪ بیشتر از سختی ارتجاعی نمونه‌ی آزمایشگاهی است، که علت آن می‌تواند جاری‌شدن‌های جزئی

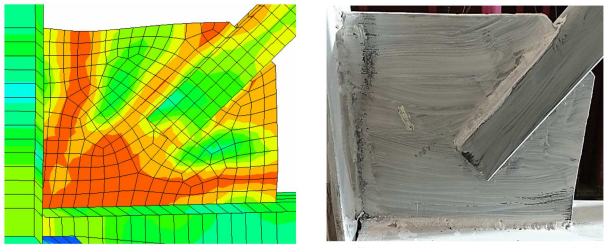
و وجود نقص اولیه در مواد و ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی باشد. در این نمونه تا مرحله‌ی جاری‌شدگی کششی در سیستم، بیشینه‌ی اختلاف مقاومتی بین نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی متناظر با فشار مهاربند ۸٪ و متناظر با کشش مهاربند ۱۲٪ به‌دست آمده است، که توانایی مدل‌های اجزاء محدود در تخمین پاسخ چرخه‌یی قاب مهاربندی را نشان می‌دهد.

۲.۳. قاب با فاصله‌ی آزاد خمش بیضی‌گون در ورق اتصال (نمونه‌ی دوم)

طراحی ورق اتصال در این نمونه براساس روش طراحی بهینه و رعایت فاصله‌ی آزاد ۸ برابر ضخامت ورق اتصال از منحنی بیضی‌گون انجام شده است.[۹] در طراحی اتصال‌ها در این روش به دلیل تمرکز بیشتر نیرو در گوشه‌ی ورق‌های اتصال، جوش با ابعاد بیشتری طرح می‌شود، که انتظار می‌رود این امر باعث تأخیر در ایجاد ترک در این نواحی شود. در این آزمایش گسترش تنش‌های کششی در ورق اتصال باعث اعواجاج در ورق‌های اتصال تحت کشش شده است (شکل ۱۱).

در چرخه‌ی ۵۶ میلی‌متر کمانش موضعی در میانه‌ی مهاربند به وضوح مشاهده شده است. همچنین در چرخه‌ی ۷۲ میلی‌متر پس از باریک‌شدگی میانه‌ی مهاربند، آثار ایجاد ترک‌های ریز در آن مشاهده و تغییرشکل بیضی‌گون در ورق اتصال در چرخه‌ی متناظر با فشار در مهاربند ایجاد شده است (شکل ۱۲).

در همین چرخه به دلیل کاهش مقاومت سیستم، آزمایش متوقف شده است. جهت کمانش خارج از صفحه، مهاربند در طول بارگذاری دو بار تغییر کرده و همین عامل باعث تأخیر در شروع ترک در میانه‌ی مهاربند شده است. این نمونه‌ی آزمایشگاهی نیز با تمامی جزئیات منطبق با کار آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس



الف) اعواجاج در ورق اتصال تحت کشش؛ ب) شبیه سازی اعواجاج در مدل عددی.

شکل ۱۱. تغییر شکل‌های ورق اتصال در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمونه دوم.

شکل ۱۲. ایجاد ناحیه‌ی غیرارتجاعی بیضی‌گون در ورق.

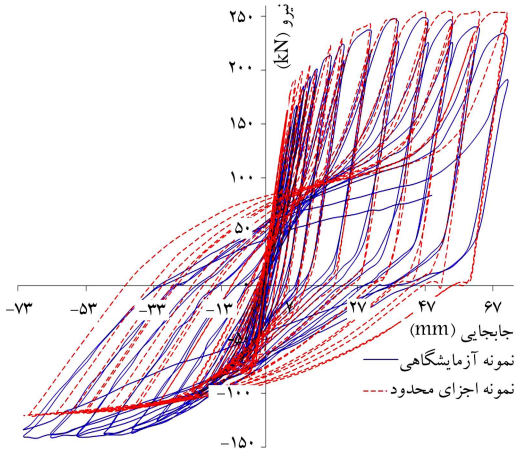
مدل‌سازی و تحلیل عددی شده است. در شکل ۱۳، مقایسه‌ی بین پاسخ چرخه‌یی نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. در این منحنی بیشینه‌ی اختلاف بین نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی در پوش مقاومت سیستم متناظر با فشار در مهاربند ۱۴٪ و در پوش مقاومت سیستم متناظر با کشش در مهاربند ۸٪ اندازه‌گیری شده است. علت افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی آزمایشگاهی، سختی زیاد اتصال تیر به ستون نمونه‌ی آزمایشگاهی مذکور است.

۳.۳. قاب با سخت‌کننده در ورق اتصال (نمونه‌ی سوم)

روش‌های مرسوم طراحی که وابسته به ظرفیت مقطع عضو مهاربند است، منجر به ورق‌های اتصال بزرگ و غیراقتصادی می‌شود، که ضعف این سیستم‌ها به شمار می‌رود. ضعف دیگر آن‌ها، مقاومت فشاری کم مهاربند در مقایسه با مقاومت کششی است. استفاده از سخت‌کننده در بالا و پائین ورق اتصال باعث کاهش طول مؤثر کمانش عضو مهاری می‌شود و ضمن افزایش مقاومت فشاری سیستم، طرح ورق کوچک‌تری نسبت به روش‌های دیگر طراحی را موجب می‌شود. ابعاد و ضخامت سخت‌کننده‌در این نمونه، براساس برابر قراردادن ظرفیت خمش ارتجاعی جفت سخت‌کننده با ظرفیت خمش غیرارتجاعی عضو مهاربند طراحی‌شده است. در این نمونه بیشینه‌ی مقاومت قاب در زمان کمانش مهاربند تحت فشار ۱۴۲ کیلونیوتن به‌دست آمده است، که نسبت به دو نمونه‌ی قبلی بسیار بالاتر بوده است. این امر به دلیل اثر سخت‌کننده‌ها در گیردارکردن انتها و کاهش طول مؤثر کمانشی مهاربند است. در جابجایی ۴۰ میلی‌متر متناظر با فشار در مهاربند، کمانش موضعی در میانه‌ی مهاربند ایجاد شده است، که این پدیده زودتر از نمونه‌های قبلی رخ داده و علت آن افزایش تمرکز تنش به واسطه‌ی طول مؤثر کم مهاربند نسبت به نمونه‌های قبلی بوده است. در چرخه‌ی ۴۸ میلی‌متر، کمانش موضعی در دو سر مهاربند در محل اتصال سخت‌کننده‌ی ورق اتصال رخ داده است (شکل ۱۴).

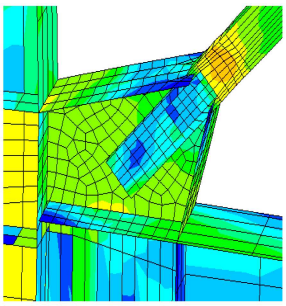
در چرخه‌ی اول ۵۶ میلی‌متر، اولین ترک در میانه‌ی مهاربند ایجاد شده (شکل ۱۵) و در چرخه‌ی ۶۴ میلی‌متر پس از کاهش مقاومت در سیستم و شکست در میانه‌ی مهاربند، آزمایش متوقف شده است.

در شکل ۱۶، مقایسه‌ی بین پاسخ چرخه‌یی نمونه آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود. در این نمونه بیشینه‌ی اختلاف بین نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی در پوش مقاومت سیستم متناظر با فشار در مهاربند ۸٪ و در پوش مقاومت سیستم متناظر با کشش در مهاربند ۴٪ به‌دست آمده است.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی منحنی رفتار چرخه‌یی نمونه‌ی دوم آزمایشگاهی با مدل عددی.

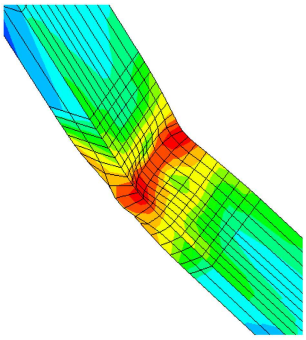
الف) کمانش موضعی انتهای مهاربند نمونه ی آزمایشگاهی؛



ب) شبیه سازی مدل عددی.

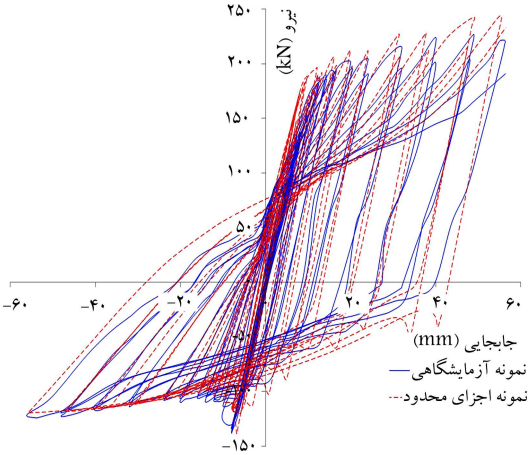
شکل ۱۴. تغییر شکل‌های ورق اتصال در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمونه سوم.

الف) کمانش موضعی در میانه ی مهاربند؛



ب) شبیه سازی مدل عددی.

شکل ۱۵. تغییر شکل‌های میانه مهاربند در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمونه سوم.

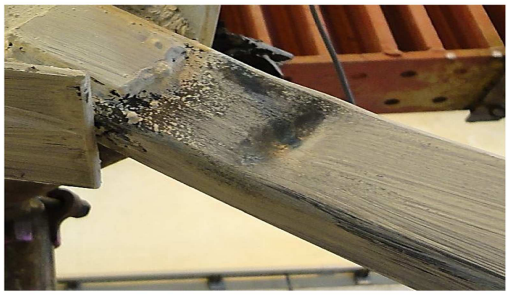


شکل ۱۶. مقایسه‌ی منحنی رفتار چرخه‌یی نمونه‌ی سوم آزمایشگاهی با مدل عددی.

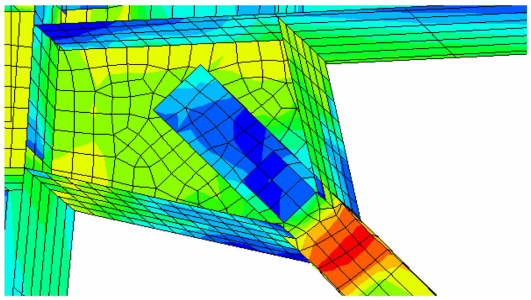
۴.۳. قاب با سخت‌کننده در ورق اتصال (نمونه‌ی چهارم)

ابعاد ورق اتصال این نمونه، مشابه نمونه‌ی سوم طراحی شده است، اما سخت‌کننده‌ها برخلاف نمونه‌ی سوم به مهاربند جوش نشده‌اند و ابعاد و ضخامت سخت‌کننده براساس برابر قراردادن ظرفیت خمش غیرارتجاعی جفت سخت‌کننده با ظرفیت خمش غیرارتجاعی عضو مهاربند مطابق بند F۱۱ در آئین‌نامه‌ی استاندارد ۳۴۱-۰۵ AISC/ANSI،[۱] طراحی شده‌اند. در نتیجه، ضخامت سخت‌کننده‌ها در این نمونه نسبت به نمونه‌ی چهارم کمتر طراحی شده و از ۱۰ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. در این آزمایش، اولین خطوط جاری‌شدگی در چرخه‌ی ۷ میلی‌متر

الف) تغییر شکل در قسمت انتهای مهاربند؛



ب) تغییر شکل در مهاربند و تشکیل مفصل خمیری؛



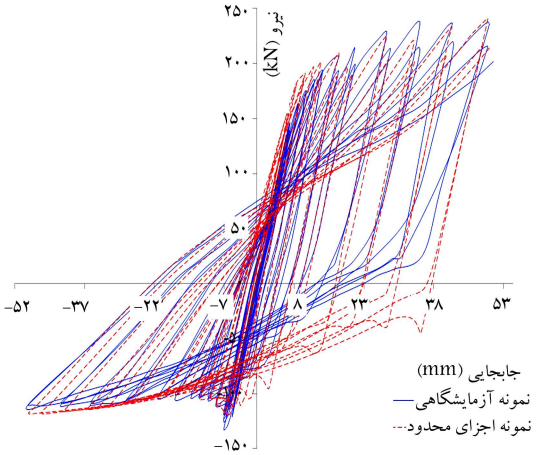
ج) تغییر شکل در شبیه سازی مدل عددی.

شکل ۱۷. تغییر شکل‌های ورق اتصال و انتهای مهاربند در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نمونه چهارم.

درگوشه‌ی ورق اتصال پائینی در امتداد عضو مهاری ایجاد شده است. در چرخه‌ی ۳۵ میلی‌متر، کمانش موضعی در میانه‌ی مهاربند رخ داده است. سپس دو مفصل خمشی در دو سر اتصال مهاربند به سخت‌کننده‌ها در چرخه‌ی ۴۲ میلی‌متر ایجاد شده است (شکل ۱۷).

در چرخه‌ی دوم ۴۹ میلی‌متر متناظر با کمانش فشاری مهاربند ضمن گسترش خطوط جاری‌شدگی در داخل ورق اتصال و مهاربند، اولین ترک در میانه‌ی مهاربند ایجاد شده است. در چرخه‌ی ۵۶ میلی‌متر، پس از کاهش مقاومت متناظر با کشش مهاربند در سیستم، میانه‌ی مهاربند گسیخته و آزمایش متوقف شده است. در این نمونه، که سخت‌کننده‌ضخامت کمتری نسبت به نمونه‌ی سوم داشته است، هدف توزیع یکنواخت‌تر تنش در بین مفاصل غیرارتجاعی میانه‌ی مهاربند و دو انتهای آن بوده است. اگرچه این رخداد به وضوح در آزمایش مشاهده شده است، اما به دلیل سختی کمتر سخت‌کننده‌ها، جابجایی بیشتری در میانه‌ی مهاربند رخ داده و در نتیجه، تنش‌های غیرارتجاعی بیشتری به میانه‌ی مهاربند اعمال شده و در چرخه‌ی زودتری، شکست در میانه‌ی مهاربند رخ داده است.

در شکل ۱۸، مقایسه‌ی بین پاسخ چرخه‌یی نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی ارائه



شکل ۱۸. مقایسه‌ی منحنی رفتار چرخه‌یی نمونه‌ی چهارم آزمایشگاهی با مدل عددی.

شده است. در این نمونه بیشینه‌ی اختلاف بین نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی در پوش مقاومت سیستم متناظر با فشار در مهاربند ۴٪ و در پوش مقاومت سیستم متناظر با کشش در مهاربند ۸٪ مشاهده شده است.

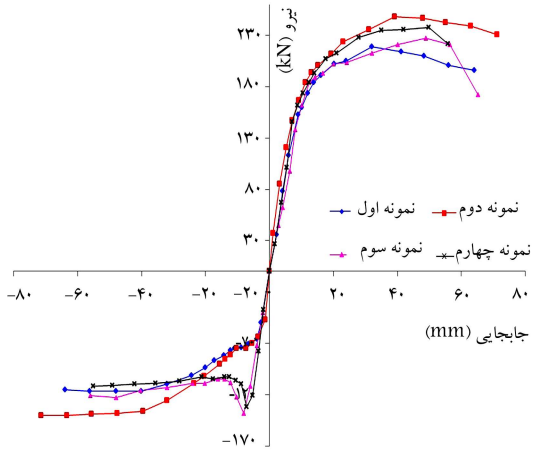
۴. بررسی نتایج

۱.۴. معرفی معیارهای مقایسه

در این پژوهش به منظور مقایسه‌ی رفتار چرخه‌یی قاب‌های مهاربندی ویژه‌ی مورد مطالعه، معیارهای: سختی، مقاومت، ضریب طول مؤثرکمانش مهاربند، شکل‌پذیری، ظرفیت استهلاک انرژی، محل‌های بحرانی ایجاد ترک و کرنش خمیری معادل متناظر با شروع ترک در هر نمونه بررسی و در ادامه تشریح شده‌اند.

۲.۴. سختی و مقاومت

برای تعیین سختی و مقاومت نمونه‌ها، پوش منحنی‌های چرخه‌یی نمونه‌های آزمایشگاهی مطابق با شکل ۱۹ به دست آورده شده است، که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی پوش منحنی‌های چرخه‌یی نمونه‌های آزمایشگاهی.

مطابق با جدول ۳، نمونه‌ی دوم بالاترین سختی ارتجاعی و مقاومت نهایی را داشته است، که بخشی از آن به دلیل سخت‌تربودن جزئیات اتصال تیر به ستون و بخشی دیگر نیز به دلیل مستطیلی‌بودن ورق اتصال در گوشه‌ی قاب در این نمونه بوده است. یادآور می‌شود که در آزمایش نمونه‌های سوم و چهارم از قاب نمونه‌های اول و دوم استفاده شده و مهاربند و ورق اتصال جایگزین شده است. مشاهدات آزمایش نشان داده‌اند که اگرچه اتصالات قاب‌ها ساده فرض شده‌اند، لیکن در عمل جزئیات اتصالات تیر به ستون و وجود ورق اتصال مهاربند، گیرداری ایجاد کرده و لذا در جابجایی‌های جانبی به‌صورت موضعی تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در اجزاء قاب ایجاد شده‌اند، که این امر در آزمایش‌های انجام‌شده موجب ایجاد نقایص اولیه در قاب‌ها و متعاقب آن، کاهش سختی اولیه‌ی نمونه‌های سوم و چهارم شده است؛ ولی این نمونه‌ها به دلیل گیردارکردن دو سر اتصال مهاربند، مقاومت کمانشی فشاری بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های اول و دوم داشته‌اند. در این کار آزمایشگاهی به دلیل جزئیات خاص اتصال و ابعاد بزرگ تیر و ستون، بعد از شروع کمانش غیرارتجاعی فشاری در مهاربند، در قاب سخت‌شدگی رخ داده و افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده است.

۳.۴. ظرفیت کمانشی عضو مهاربند

برای محاسبه‌ی بار بحرانی کمانشی در مهاربند، ۴ کرنش‌سنج در ۴ وجه عضو مهاری قرار داده شده است، که میانگین کرنش‌در ۴ وجه مهاربند مبنای محاسبه نیروی موجود در مهاربند قرار گرفته است. سپس مقدار بار بحرانی کمانشی به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی با ظرفیت کمانشی اسمی محاسبه‌شده براساس روش طراحی آئین‌نامه‌ی استاندارد AISC/ANSI ۳۴۱-۰۵،[۱] مقایسه شده است. ظرفیت کمانشی اسمی مهاربند در نمونه‌های اول و دوم با درنظرگرفتن طول مؤثر کمانش برابر طول واقعی مهاربند و در نمونه‌های سوم و چهارم با درنظرگرفتن این طول برابر نصف طول واقعی محاسبه شده است. یعنی در نمونه‌های اول و دوم ضریب طول مؤثر برابر ۱ و در سایر نمونه‌ها این ضریب ۰٫۵ در نظرگرفته شده است. در جدول ۴، مقادیر ضریب طول مؤثر مناسب، که بر مبنای نیروی کمانشی محاسبه شده است، براساس داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده ارائه شده است. ضریب طول مؤثر کمانشی نمونه‌های اول و دوم ۰٫۸۹ برداشت شده است، که کمتر از ۱ است و نشان می‌دهد که ورق‌های اتصال با طراحی فاصله‌ی آزاد خمش، به‌صورت مفصلی ایده‌آل عمل نمی‌کنند و عملاً قدری گیرداری در دو انتهای مهاربند ایجاد می‌کنند. نمونه‌های با ورق اتصال به همراه سخت‌کننده نیزگیرداری قابل توجهی در انتهای اتصال مهاربند ایجاد کرده‌اند، اما به‌صورت گیردار کامل نیستند.

یادآوری می‌شود (مطابق جدول ۳) اگرچه مقاومت کمانش فشاری مهاربند در نمونه‌های اول و دوم به مراتب کمتر از نمونه‌های سوم و چهارم است، لیکن پس از بروز پدیده‌ی کمانش به دلیل سخت‌شدگی کرنشی و مشارکت قاب در باربری جانبی، مقاومت متناظر فشاری با مهاربند در نمونه‌های مختلف، اختلاف کمتری دارند.

۴.۴. جابجایی خارج از صفحه‌ی عضو مهاربند و ورق اتصال

قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه با کمانش خارج از صفحه‌ی[۱۴] عضو مهاری و ورق اتصال آن باعث مستهلک‌کردن انرژی زلزله می‌شوند. شکل کمانش مهاربند و ایجاد مفاصل خمشی درکمانش موضعی و میزان جابجایی خارج از صفحه‌ی عضو مهاری به نوع اتصال‌های دو سر مهاربند بستگی دارد. در نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی بیشینه جابجایی خارج از صفحه در میانه‌ی عضو مهاری در هر چرخه‌ی

جدول ۳. سختی و مقاومت نمونه‌ها.

نمونه	سختی ارتجاعی (GPa)	مقاومت متناظر با تسلیم کششی مهاربند (kN)	مقاومت متناظر با مقاومت نهایی کششی مهاربند (kN)	مقاومت متناظر با کمانش فشاری مهاربند (kN)	مقاومت متناظر با مقاومت نهایی فشاری مهاربند (kN)
۱	۲۱	۱۶۰	۲۱۹	۶۴	۱۱۷
۲	۲۵	۱۶۷	۲۴۸	۷۰	۱۴۰
۳	۱۹	۱۴۸	۲۳۰	۱۴۲	۱۴۲
۴	۲۲	۱۴۶	۲۳۸	۱۳۲	۱۳۲

جدول ۴. ضریب طول مؤثر کمانشی مهاربند واقعی نمونه‌های آزمایشگاهی.

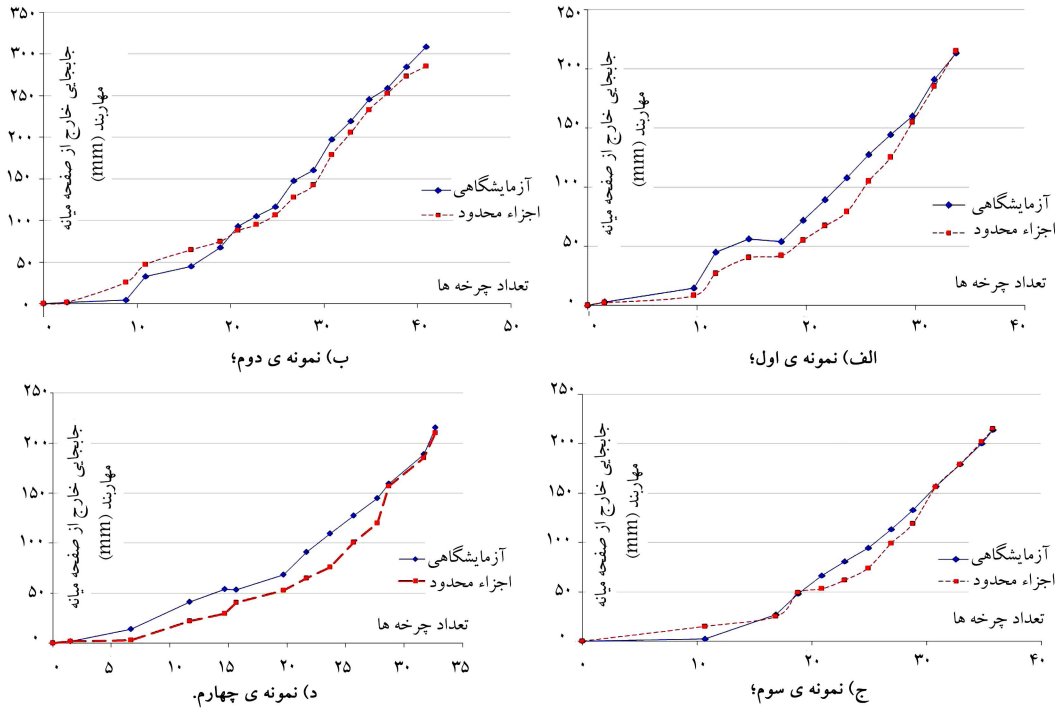
نمونه‌ها	ظرفیت فشاری اسمی مهاربند (kN)		نتایج آزمایشگاهی نسبت به فرض اولیه	ضریب طول مؤثر آزمایشگاهی (K)
	داده‌ی آزمایشگاهی	فرض اولیه		
۱	۸۶/۵	۶۸/۹	۱/۲۵	۰/۸۹
۲	۸۳	۶۶/۹	۱/۲۴	۰/۸۹
۳	۱۴۰/۵	۱۵۶/۷	۰/۹	۰/۵۷
۴	۱۳۱	۱۵۵	۰/۸۴	۰/۶۲

بارگذاری به دست آمده است، که برای هر نمونه این تاریخچه‌ی جابجایی بر حسب تعداد چرخه در شکل ۲۰ ارائه شده است. نمونه‌های با سخت‌کننده در ورق اتصال (نمونه‌های سوم و چهارم) به دلیل ایجاد گیرداری در دو سر اتصال مهاربند، جابجایی خارج از صفحه‌ی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داده‌اند. بر همین اساس، نمونه‌ی دوم بیشترین جابجایی خارج از صفحه را از خود نشان داده است، که علت آن طول مؤثر کمانشی بزرگ‌تر و اتصال مفصلی در دو انتهای عضو مهاری بوده است.

۵.۴. شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی و کرنش خمیری متناظر با شروع ترک

برای محاسبه‌ی شکل‌پذیری، نسبت بیشینه‌ی جابجایی پوش منحنی چرخه‌یی نیرو ـ تغییرمکان سیستم در ناحیه‌ی کششی به جابجایی جاری‌شدگی کششی آن محاسبه شده است. مطابق با جدول ۵، این نسبت شکل‌پذیری برای نمونه‌های مختلف بین ۷/۹ تا ۸/۹ به‌دست آمده است. این نسبت‌ها نشان می‌دهند نمونه‌های قاب مهاربندی ویژه، عملکرد مورد انتظار و شکل‌پذیری لازم را به خوبی تأمین کرده‌اند. نمونه‌ی دوم به علت اینکه بیشترین جابجایی را تجربه کرده است، بیشترین شکل‌پذیری را دارد.

میزان استهلاک انرژی در نمونه‌های قاب‌های مهاربندی ویژه تا لحظه‌ی شروع ترک در سیستم نیز در جدول ۵ ارائه شده است. انرژی مستهلک‌شده مساحت تجمعی سطح زیر منحنی‌های چرخه‌یی است. به این ترتیب با افزایش مقاومت و تعداد چرخه‌ها در سیستم، افزایش انرژی مستهلک‌شده در سیستم را خواهیم داشت. به همین علت نمونه‌ی اول، انرژی مستهلک‌شده‌ی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، البته این نمونه در آزمایشگاه پس از شروع ترک (جابجایی ۴۸ میلی‌متر) تا چرخه‌ی جابجایی ۶۴ میلی‌متر کاهش مقاومتی نداشته و بارگذاری شده است،



شکل ۲۰. مقایسه‌ی جابجایی خارج از صفحه‌ی میانه‌ی مهاربند نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی.

جدول ۵. شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و کرنش خمیری معادل در نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی.

نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی	زاویه‌ی دوران نسبی قاب (٪)	شکل‌پذیری (μ)	استهلاک انرژی در انتهای بارگذاری (kN.mm)	کرنش خمیری معادل		
				میانه‌ی مهاربند	گوشه‌ی ورق اتصال	دو انتهای مهاربند
۱	۳٫۲	۸٫۵	۴۵۹۲	۵٫۳	۱٫۱	—
۲	۳٫۶	۸٫۹	۱۴۸۱۱۵	۶٫۶	۱٫۸	—
۳	۳٫۳	۸٫۱	۷۶۵۵۳	۵٫۸	—	۱٫۸
۴	۲٫۸	۷٫۹	۶۷۲۳۶	۵٫۱	—	۲٫۸

ولی در مدل‌سازی تا لحظه‌ی شروع ترک در سیستم بارگذاری ادامه یافته است. در هر حال در مقایسه‌ی استهلاک انرژی سیستم‌ها در چرخه‌های مشابه، نمونه‌های با سخت‌کننده در ورق اتصال به دلیل افزایش مقاومت فشاری سیستم، استهلاک انرژی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. نمونه‌های اول و دوم نیز در چرخه‌های مشابه، استهلاک انرژی تقریباً یکسانی دارند.

کرنش خمیری معادل، معیاری مناسب برای تخمین شروع ترک در نواحی بحرانی سیستم قاب‌های مهاربندی تحت بارگذاری چرخه‌یی است.[۹] نواحی مستعد شروع ترک در نمونه‌های با فاصله‌ی آزاد خمش در ورق اتصال، قسمت‌های میانه‌ی مهاربند و گوشه‌ی ورق اتصال و برای نمونه‌ی با سخت‌کننده در ورق اتصال، قسمت‌های میانه‌ی مهاربند، انتهای اتصال مهاربند به سخت‌کننده و انتهای اتصال مهاربند به ورق اتصال است. در نمونه‌های عددی اعتبارسنجی‌شده، کرنش خمیری معادل در لحظه‌ی ایجاد اولین ترک در نواحی بحرانی برداشت می‌شود. در جدول ۵، کرنش خمیری معادل در میانه‌ی مهاربند، گوشه‌ی ورق اتصال و انتهای مهاربند در چرخه‌ی شروع ترک در مدل‌های عددی ارائه شده است. همچنین در نمونه‌های اول و دوم به علت عدم بروز تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در انتهای مهاربند و در نمونه‌های سوم و چهارم به علت عدم بروز این پدیده در ورق اتصال، کرنش خمیری معادل در این نواحی در جدول ۵ ارائه نشده است.

کرنش خمیری معادل در میانه‌ی مهاربند برای تمامی نمونه‌ها تقریباً یکسان است. در ضمن در نمونه‌های سوم و چهارم میزان کرنش خمیری معادل در دو انتهای مهاربند به مراتب کمتر از این کرنش در میانه‌ی مهاربند است، که بیانگر کم‌بودن احتمال بروز ترک و شکست در این نواحی است. ضمناً در خصوص مقادیر کرنش خمیری معادل در گوشه‌ی ورق اتصال در نمونه‌های اول و دوم باید یادآوری کرد که به دلیل بروز این مقادیر کرنش خمیری در ناحیه‌ی جوش ورق اتصال به تیر و ستون، اعداد مستقیماً با اعداد کرنش خمیری معادل در مهاربند قابل مقایسه نیستند. زیرا در نواحی حرارت‌دیده ناشی از جوشکاری، شکست در مقادیر پائین‌تر کرنش معادل محتمل است. لیکن مقایسه‌ی دو عدد در نمونه‌های اول و دوم مبین اعداد بزرگ‌تر در نمونه‌ی دوم است. لذا همان‌طور که در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ توصیه شده است،[۹] برای تأخیر شروع ترک در این نوع ورق‌های اتصال لازم است جوش اتصال گوشه‌ی ورق اتصال تقویت شود.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل‌های عددی در قسمت پیشین، این موارد قابل استنتاج است:

- نمونه‌های قاب مهاربندی ویژه، عملکرد مورد انتظار تغییرشکل غیرارتجاعی، شکل‌پذیری لازم و استهلاک انرژی بالا را به خوبی تأمین کرده‌اند.
- در نمونه‌های با فاصله‌ی آزاد خمش در ورق اتصال، جابجایی خارج از صفحه‌ی زیادی تا ۴ برابر جابجایی متناظر افقی قاب در میانه‌ی مهاربند ایجاد شده است. در این نمونه‌ها تغییرشکل غیرارتجاعی گوشه‌ی ورق اتصال، عامل شروع ترک است.
- در قاب‌های مهاربندی با ورق مستطیلی با فاصله‌ی آزاد، خمش بیضی‌گون طراحی‌شده به روش طراحی بهینه، کاهش ابعاد ورق اتصال و افزایش طول مؤثر کمانشی مهاربند نسبت به روش طراحی ورق اتصال با فاصله‌ی آزاد خمش مستقیم میسر است. در این سیستم، ناحیه‌ی ورق اتصال دچار اعوجاج درکشش و فشار می‌شود و به همین دلیل باید در طراحی به این روش، بُعد جوش اتصال ورق اتصال به تیر و ستون بزرگ‌تر طراحی شود. همچنین در نمونه‌ی آزمایشی این نوع قاب، کمانش موضعی در میانه‌ی مهاربند در چرخه با جابجایی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها ایجاد شده است.
- انتهای مهارهای طرح‌شده با تأمین فاصله‌ی آزاد خمش، کاملاً مفصلی عمل نمی‌کنند. سختی ورق‌های اتصال باعث می‌شود ضریب طول مؤثر برای مهاربند در این نوع سیستم‌ها در حدود ۱۰٪ کمتر از ۱ باشد.
- در نمونه‌های با ورق اتصال دارای سخت‌کننده، ورق‌های اتصال کوچک‌تری به‌دست می‌آید، که در سازه‌های بلند با افزایش نیروی جانبی به اقتصاد طرح کمک می‌کنند. در این نمونه‌ها به دلیل طول مؤثر کم و گیرداری دو سر مهاربند، مقاومت فشاری کمانشی مهاربند بسیار بالاتر است. عملکرد شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در این سیستم‌ها نیز بسیار مطلوب است. در واقع با گیردارکردن دو سر اتصال مهاربند توسط سخت‌کننده‌ها، ۳ مفصل خمشی یکی در میانه‌ی مهاربند و دو عدد در دو انتهای مهاربند در لبه‌ی سخت‌کننده ایجاد می‌شود. گیرداری دو سر اتصال مهاربند در نمونه‌های سوم و چهارم باعث تمرکز تنش و کرنش غیرارتجاعی میانه‌ی مهاربند و کمانش موضعی زودتر نسبت به نمونه‌های دو سر مفصل شده است. در حالت ایده‌آل بیشترین ظرفیت اتلاف انرژی این نوع سیستم‌ها ایجاد ۳ مفصل خمشی هم‌زمان در مهاربند است. این نمونه‌ها با ایجاد گیرداری زیاد در دو انتهای مهاربند ضمن افزایش مقاومت فشاری سیستم و شکل‌پذیری بالا، استهلاک انرژی بالایی دارند.
- در این پژوهش در اتصال تیر به ستون از جفت ورق در جان تیر استفاده شده است. با افزایش جابجایی‌ها این اتصال در عمل مفصلی عمل نکرده و این موضوع به همراه وجود ورق‌های اتصال مهاربند باعث افزایش مقاومت سیستم شده است، که خود موجب افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم نیز شده است.

پانوشت‌ها

1. cyclic
2. monotonic loading
3. shell
4. CJP
5. fillet weld
6. merge
7. nonlinear geometry
8. imperfection
9. actual protocol
10. equivalent plastic strain
11. gauge length
12. nonlinear kinematic hardening
13. Von Mises
14. out of plane

منابع (References)

1. AISC/ANSI Standard 341-05, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction Inc. (2010).
2. Astaneh, A. "Cyclic behavior of double angle bracing members with end gusset plates", The University of Michigan, Report No. UMEE 82R7, pp. 249-256 (1982).
3. Astaneh-Asl, A. and Goel, S.C. "Cyclic in-plane buckling of double angle bracing", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **110**(9), pp. 2036-2055 (1984).
4. Astaneh-Asl, A., Goel, S. and Hanson, R.D. "Cyclic out-of-plane buckling of double angle bracing", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **111**(5), pp. 1135-1153 (1985).
5. Astaneh-Asl, A., *Seismic Design And Behavior of Gusset Plates*, California 94507, Steel Tips, Structural Steel And Educatnion Council (1998).
6. Herman, D.J. " Further improvements on and understanding of special concentrically braced frame systems", MSc Thesis, University of Washington (2007).
7. Powell, J.A. "Evaluation of special concentrically braced frames for improved seismic performance and constructability", MSc Thesis, University of Washington (2010).
8. Yoo, J.H., Roeder, C.W. and Lehman, D.E. "Analytical performance simulation of special concentrically braced frames", *Journal of Structural Engineering*, **134**(6), pp. 881-889 (2008).
9. Yoo, J.H. "Analytical investigation on the seismic performance of special concentrically braced frames", Phd Thesis, Washington, seattle, Seattle (2006).
10. Yoo, J.H., Roeder, C.W. and Lehman, D.E. "Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames", *Journal of Constructional Steel Research,* **64**, pp. 607-623 (2008).
11. Aslani, F. "Experimental and analytical study of the inelastic behavior of double angle bracing members under severe cyclic loading", Research Report UMCE 89-5, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Arbor, Michigan (1989).
12. Fooladvand, A.R. "Exprimental and numerical study of ductility of steel braces considerating detail of gusset plate", MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (2013).
13. ATC-24, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structure*, Applied Technology Council (1992).
14. ASTM-E8-04, *Test Methods for TensionTesting of Metallic Materials*, An American National Standard American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No. T68 (2003).
15. Abaqus Analysis User's Manual, III (2009).
16. Alipour, M. and Aghakouchak, A.A. "Numerical analysis of the nonlinear performance of concentrically braced frames under cyclic loading", *Int. J. of Steel Structures,* **13**(3), pp. 401-419 (2013).