

# بررسی عملکرد خستگی کم چرخه در قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر قطری، V شکل و شورن

محسن گرامی<sup>۱\*</sup>، پرشان صداقتی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۹/۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۹/۳]

mgerami@semnan.ac.ir

**چکیده** - تحت بارگذاری تناوبی ممکن است اعضای سازه‌ای در اثر گسیختگی خستگی دچار شکست شوند. بنابراین رفتار فلزات تحت بارگذاری تناوبی یک معیار مهم طراحی محسوب می‌شود. خستگی کم چرخه (کرنش بالا)، به عنوان گسیختگی خستگی در تنش‌های بالا و تعداد چرخه‌های کم در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله عملکرد خستگی کم چرخه از نظر رفتار هیسترتیک و نیز خرابی تجمعی در قاب‌های مهاربندی شده همگرای کمانش ناپذیر قطری، V شکل و شورن (V معکوس) ارزیابی شده است. نتایج، رفتار پایدار هیسترتیک در هر سه قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر را تا لحظه گسیختگی نشان می‌دهند. نتایج نشان دادند که قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر V شکل، به دلیل داشتن عمر خستگی بالاتر و نیز رفتار هیسترتیک مطلوب‌تر، بهترین عملکرد را از نظر ویژگی‌های خستگی در بین دیگر پیکربندی‌های رایج قاب مهاربندی کمانش ناپذیر دارد.

**واژگان کلیدی:** خستگی کم چرخه، قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر، عمر خستگی، استهلاک انرژی

## ۱- مقدمه

خاصی از سیستم CBF است که مانع کمانش مهاربند می‌شود. BRB می‌تواند به عنوان یک میراگر هیسترتیک در نظر گرفته شود [۱]. میراگرهای هیسترتیک بر اساس سازوکار تسلیم به چهار دسته نوع محوری، نوع برشی، نوع خمشی و نوع پیچشی تقسیم بندی می‌شوند. مهاربندهای کمانش ناپذیر به عنوان دستگاه میرایی نوع محوری، چه از نظر اجزاء تشکیل دهنده و چه از نظر کاربردی به عنوان یک سیستم، به طور گسترده‌ای در ساختمان و مهندسی پل مطالعه شده‌اند [۲].

از مزایای مهاربندهای کمانش ناپذیر می‌توان به داشتن سختی جانبی بیشتر و توانایی بالاتر در تأمین الزام دررفت طراحی در قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر (BRBF) نسبت به قاب‌های خمشی (MRF) اشاره کرد. این مهاربندها رفتار هیسترتیک پایدار بدون کمانش و ظرفیت استهلاک انرژی بالا دارند و نیز امکان مدلسازی

المان مهاربند عضو اصلی در سیستم‌های قابی همگرای مهاربندی شده<sup>۱</sup> (CBF) است که در حین زلزله تغییرشکل‌های غیر الاستیک را متحمل می‌شود. این عضو وظیفه تحمل نیروهای محوری رفت و برگشتی را در حین زلزله بر عهده دارد، طوری که ممکن است تسلیم در کشش، کمانش در فشار، و یا گسیختگی در تعداد سیکل‌های مورد انتظار را تجربه کند. اگر مهاربند در سیستم قاب همگرای مهاربندی شده امکان تسلیم هم در کشش و هم در فشار بدون کمانش را داشته باشد، آنگاه بر ضعف سیستم CBF می‌توان غلبه نمود. قاب مهاربندی شده که دارای چنین مهاربندی است، مهاربند کمانش ناپذیر<sup>۲</sup> BRB نامیده می‌شود. بنابراین BRBF نوع

1 Concentric Braced Frame  
2 Buckling-Restrained Brace

برای ساختمان‌های ۶ و ۸ طبقه یکسان به دست آمد. ولی شکل پذیری تجمعی مهاربند در ساختمان ۶ طبقه دارای مقادیر بیشتری بود. دررفت پسماند حدود ۰.۴٪ تا ۰.۶٪ دررفت ماکزیمم به دست آمد [۴].

Uang (2006) و همکاران مطالعه‌ای در ادامه پژوهش Sabelli و همکاران (2003) انجام دادند. قاب‌های خمشی ویژه (SMRF) به ساختمان‌های ۳ و ۶ طبقه به عنوان سیستم دوگانه اضافه شدند. SMRF ها طوری طراحی شده بودند که ۰.۲۵٪ کل برش پایه را تحمل کنند. نتایج نشان داد که قرار دادن SMRF درون BRBF، ماکزیمم نیاز دررفت را حدود ۰.۱۰٪ تا ۰.۱۲٪ کاهش می دهد. همچنین تنش پسماند ۰.۴۶٪ تا ۰.۵۰٪ نسبت به حالت BRBF اولیه کاهش پیدا کرده بود [۵].

Moradi (2013) و همکاران در مطالعه خود عملکرد لرزه ای قاب‌های BRBF و قاب‌های مهاربندی آلیاژ حافظه دار (SMA-BF) را مقایسه کرد. چهار حالت پیکربندی متفاوت مهاربندی شامل قطری، ضربدری در دو طبقه (split-X)، V شکل و V معکوس (شورن) تحت آنالیز دینامیکی افزایش (IDA) و بیست رکورد زمین لرزه متفاوت قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که پاسخ قاب‌های BRBF به مودهای بالاتر کمی حساس است. همچنین مهاربندهای SMA در کاهش دررفت میان طبقه‌ای مؤثر عمل کردند. به علاوه هم BRBF و هم SMA-BF محدودیت‌های دررفت طراحی را ارضاء کردند. بر طبق نتایج پژوهش، قاب‌های SMA-BF به دلیل خاصیت خود شاغولی مهاربندهای آلیاژ حافظه دار، دررفت پسماند بسیار کمی را تجربه کردند و همچنین نسبت به محتوای فرکانسی زلزله ورودی حساسیت بیشتری نشان دادند [۶].

Pham (2013) در پژوهش خود، امکان اضافه کردن ظرفیت خود شاغولی به BRBF ها را با استفاده از مهاربندهای آلیاژ حافظه دار برای بازگشت به حالت اولیه خود بعد از زلزله را بررسی کرد. بدین منظور یک مدل BRBF با سه مهاربند کماتش ناپذیر را با اضافه کردن مهاربندهای SMA در چهار دهانه تقویت نمود. این مدل بهسازی شده ظرفیت باربری جانبی بیشتری از خود نشان داد. همچنین قاب‌های مهاربندی کماتش ناپذیر تقویت شده به وسیله‌ی مهاربندهای SMA عملکرد لرزه‌ای بهتر از جمله دررفت پسماند و دررفت میان طبقه‌ای نسبت به قاب اصلی از خود نشان دادند [۷].

آسان رفتار چرخه‌ای آن‌ها در تحلیل‌های غیرخطی وجود دارد. امکان نصب آسان در سازه از طریق پیچ به ورق اتصال، و همچنین امکان تعویض آسان در صورت خسارت دیدن از زلزله‌های شدید از دیگر مزایای استفاده از BRB است. در صورت استفاده از آن‌ها برای بهسازی معمولاً نیازی به تقویت اعضای سازه‌ای و فونداسیون وجود ندارد [۲].

مهاربندهای کماتش ناپذیر معایبی هم دارند که از جمله آن‌ها می توان به نداشتن سازوکار خود شاغولی و عدم وجود ضوابطی برای بررسی و تشخیص خرابی در مهاربندها اشاره نمود. ویژگی‌های شکل پذیری آن‌ها شدیداً تحت تأثیر نوع مصالح و بخش تسلیم شونده هسته فولادی است. به علاوه به دلیل سختی کم پس از تسلیم، دررفت پسماند زیادی دارند [۲].

Clark (1999) و همکاران عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی فولاد ویژه (SMRF) سه طبقه و قاب مهاربندی کماتش ناپذیر باز طراحی شده (BRBF) را مطالعه کردند. آنها در پژوهش خود BRBF را با توجه به یک قاب مهاربندی و اگر (EBF) با روش بار جانبی معادل طبق آیین نامه UBC بازطراحی کردند. بر طبق نتایج، وزن کل فولاد در BRBF نسبت به SMF حدود ۰.۵۰٪ کاهش پیدا کرده بود. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان داد که BRBF سختی جانبی بیشتر و مقاومت تسلیم کمتری نسبت به SMRF دارد. اضافه مقاومت BRBF نسبت به SMRF بسیار کوچک تر بود. زیرا طراحی SMRF بر مبنای دررفت است، در حالی که طراحی BRBF بر مبنای مقاومت است. نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی دررفت ماکزیمم بام در BRBF حدود ۰.۷۰٪-۰.۵۰٪ قاب SMRF نشان داد [۳].

Sabelli (2003) و همکاران پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کماتش ناپذیر و قاب‌های مهاربندی معمولی در ساختمان‌های ۳ و ۶ طبقه را بررسی کردند. هر دو ساختمان با فرض قرارگیری در لس آنجلس و پیکربندی V معکوس (شورن)، بر طبق روش بار جانبی معادل با ضریب رفتارهای ۶ و ۸ و ضریب اضافه مقاومت ۲ طراحی شده بودند. همچنین وسط دهانه تیرهای متصل به مهاربندها برای نیروی نامتعادل عمودی ناشی از مهاربندها طراحی شده بودند. نتایج حاکی از رفتار بهتر BRBF نسبت به قاب های همگرای مهاربندی معمولی و قاب خمشی بود. همچنین نشان دادند که تغییر ضریب رفتار از ۶ به ۸ پاسخ‌های لرزه‌ای و ماکزیمم دررفت ساختمان را تحت تأثیر قرار نمی دهد. بیشینه شکل پذیری مهاربند

نوع دیگری از خستگی که برای مهندسان سازه و زلزله از اهمیت بسیاری برخوردار است خستگی<sup>۵</sup> ULCF است. تعداد سیکل‌هایی که منجر به شکست خستگی HCF می‌شود در محدوده  $10^6$  تا  $10^8$  قرار دارد. Kanvinde (2004) و همکاران بازه شکست خستگی LCF را بین  $10^0$  تا  $10^{10}$  سیکل و بازه شکست خستگی ULCF را بین  $10^0$  تا  $20$  سیکل در نظر گرفته‌اند [۱۰].

ULCF شکست خستگی در کرنش‌های پلاستیک بسیار بزرگ و تعداد سیکل‌های بسیار کم است. این نوع شکست بیشتر به فرآیند شکست نرم<sup>۶</sup> شباهت دارد و سازوکار به وجود آورنده آن با سازوکاری که منجر به LCF می‌شود تفاوت دارد. ULCF برای این حائز اهمیت است که خستگی که سازه‌ها حین زلزله متحمل می‌شوند معمولاً موجب شکست در تعداد سیکل‌های کمتر از  $10^6$  می‌شود. بنابراین خستگی تجربه شده در اتصالات خمشی را می‌توان ULCF در نظر گرفت. همچنین ورق‌های اتصال در قاب‌های مهاربندی و حتی خود مهاربندها هم ممکن است در اثر ULCF یا شکست نرم گسیخته شوند [۱۱].

عمر خستگی به عنوان تعداد سیکل‌های تنش مورد نیاز برای شروع یک ترک خستگی و رشد کافی آن برای گسیختگی بیان می‌شود. پیش‌بینی عمر خستگی فلزات پیچیده است، زیرا فلزات به تغییرات کوچک در شرایط بارگذاری و تمرکز تنش و فاکتورهای دیگر حساس است [۸].

در حال حاضر دو روش اصلی برای پیش‌بینی عمر خستگی سازه‌ها در دسترس است. یک روش بر اساس مکانیک شکست و تحلیل رشد ترک است. روش دیگر بر پایه منحنی‌های عمر خستگی مواد و یک قانون خستگی تجمعی است. در این روش از منحنی S-N برای HCF و از منحنی  $\epsilon$ -N برای پیش‌بینی عمر خستگی LCF استفاده می‌شود. منحنی  $\epsilon$ -N که منحنی Coffin-Manson هم نامیده می‌شود ابزار اصلی در طراحی خستگی کم چرخه است. قانون Coffin-Manson مطابق با رابطه (۱)، شناخته شده ترین رابطه برای پیش‌بینی گسیختگی خستگی LCF و ULCF است.

$$\Delta \epsilon_p \cdot N^\alpha = C \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\Delta \epsilon_p$  بازه کرنش پلاستیک، N تعداد سیکل‌های اعمال شده قبل از گسیختگی LCF و ULCF،  $\alpha$  و C ثابت‌های ماده

هدف از این پژوهش بررسی رفتار مهاربندهای BRB در قاب‌های مختلف با منظور نمودن اثر خستگی کم چرخه<sup>۱</sup> است. مهاربندهای کمانش ناپذیر در قاب‌ها در نقش میراگرهای هیستریک، در حین زلزله کرنش‌های پلاستیک بزرگی را متحمل می‌شوند. بنابراین لازم است تا این میراگرهای هیستریک از نظر ویژگی‌های خستگی کم چرخه و ظرفیت تغییر شکل پلاستیک ارزیابی شد.

پژوهش‌های گذشته مربوط به عملکرد خستگی مهاربندهای BRB روی المان‌های مهاربند صورت گرفته است. لیکن در این پژوهش عملکرد خستگی کم چرخه روی قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر با آرایش مختلف قطری، V شکل و شورن مطالعه شد.

## ۲- خستگی در فلزات

خستگی تغییر سازه‌ای پیش رونده، موضعی و دائمی است و در فلزاتی که در معرض کرنش‌های تکرار شونده یا نوسانی در تنش‌های اسمی که بیشینه مقدارشان کمتر (در بیشتر مواقع بسیار کمتر) از مقاومت کششی فلز است، رخ می‌دهد [۸]. فرآیند خستگی شامل سه مرحله است:

- خرابی اولیه خستگی که منجر به شروع ترک می‌شود.
  - گسترش ترک به اندازه بحرانی (اندازه‌ای که سطح مقطع ترک نخورده باقیمانده به اندازه ای ضعیف شود که نتواند بار اعمالی را تحمل کند).
  - در نهایت سطح مقطع باقیمانده به صورت ناگهانی گسیخته می‌شود.
- به طور معمول سه نوع خستگی وجود دارد: خستگی پر چرخه<sup>۲</sup> (HCF)، خستگی کم چرخه<sup>۳</sup> (LCF) و خستگی مکانیکی حرارتی<sup>۴</sup> (TMF). تفاوت اصلی میان LCF و HCF منطقه ای از منحنی تنش-کرنش است که تکرار بارها (و تغییر شکل یا کرنش ناشی از آن) در آن اتفاق می‌افتد. HCF با کرنش‌های الاستیک کم دامنه و فرکانس بالا تشخیص داده می‌شود. LCF نوعی از بین رفتن ماده است که با کرنش‌های پلاستیک دامنه بالا و فرکانس پایین توصیف می‌شود [۹].

- 1 Low-Cycle Fatigue
- 2 High Cycle Fatigue
- 3 Low Cycle Fatigue
- 4 Thermal Mechanical Fatigue

5 Ultra-Low Cycle Fatigue

6 Ductile Fracture

از طریق سیکل‌های پایدار تسلیم کشش - فشار انرژی را مستهلک می‌کنند شکل (۲).

در این سیستم نیاز به فراهم آوردن یک سطح لغزش یا لایه ناپیوستگی<sup>۴</sup> بین هسته فلزی و بتن محصور کننده وجود دارد و هدف این است که نیروی مهاربندی فقط به وسیله هسته فولادی تحمل شود. به منظور اینکه نیروی محوری فشاری و برش به وسیله هسته فولادی به پوشش بتنی انتقال پیدا نکند، لایه‌ای نازک از ماده‌ای مخصوص در سطح مشترک بتن و فولاد قرار داده می‌شود. این لایه با جلوگیری از اصطکاک بین بتن و هسته، نیروی ناشی از تغییر شکل جانبی هسته فولادی را به صورت یک بار گسترده عرضی به بتن منتقل می‌کند [۳].

Clark (1999) و همکاران آزمایش‌هایی را در مقیاس واقعی روی قاب مهاربندی<sup>۵</sup> UBF به منظور طراحی و اجرای اولین ساختمان در ایالات متحده با استفاده از BRB در دانشگاه برکلی انجام دادند [۳]. علاوه بر آزمایش نمونه‌ها تحت پروتکل‌های بارگذاری SAC<sup>۶</sup> و رکوردهای شبیه سازی شده زمین لرزه، آزمایش‌ها خستگی کم چرخه با بارگذاری دامنه ثابت نیز انجام شدند. دریافت هدف طبقه ۳٪ و کرنش مانند مهاربند تقریباً ۲٪ در نظر گرفته شد. تمامی نمونه‌ها رفتار هیسترتیک پایداری را از خود نشان دادند. آزمایش خستگی کم چرخه با کرنش محوری ۲٪ روی نمونه ۲، توانایی تحمل ۱۷ سیکل را از قبل گسیختگی هسته فولادی مطابق شکل (۳) نشان داد. مهاربند رفتار چرخه‌ای بسیار پایداری را بدون هیچ کاهشی در مقاومت و سختی برای همه سیکل‌ها تا لحظه گسیختگی نشان داده است.

شکل (۱) شماتیک مهاربند کمانش ناپذیر unbonded [۳]

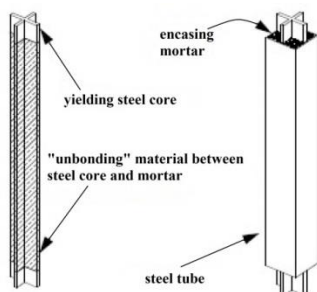


Figure (1) Concept of a type of buckling-restrained brace (Clark et al. 1999)

هستند. رابطه Coffin-Manson برای پیش‌بینی عمر خستگی ULCF نیز استفاده می‌شود، ولی پژوهش‌های گذشته نشان داده اند که این رابطه عمر خستگی فلزات را بالاتر از نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند [۱۲]. پژوهشگران روش‌ها و مدل‌های بسیاری را برای تعیین عمر خستگی ارائه داده‌اند. یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها به نام<sup>۱</sup> CVGM برای پیش‌بینی شروع ترک به وسیله Kanvinde و همکاران پیشنهاد شده است [۱۰].

قانون خستگی تجمعی ماینر<sup>۲</sup> یکی از روش‌های تخمین عمر خستگی قطعات است. بر اساس تئوری ماینر، شکست در اثر خستگی زمانی رخ می‌دهد که نسبت تعداد سیکل‌های تنش اعمالی به سیکل‌هایی که در همان مقدار تنش پدیده شکست اتفاق می‌افتد برابر با یک شود [۱۳]. این معیار که معمولاً با D نشان داده می‌شود در رابطه (۲) بیان شده است و برابر است با مجموع نسبت تعداد سیکل‌های تنش اعمالی به تعداد سیکل‌هایی که تحت تنش مورد نظر پدیده شکست اتفاق می‌افتد.

$$D = \sum_{i=1}^k \left( \frac{n_i}{N_i} \right) = 1.0 \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $n_i$  تعداد سیکل بارگذاری در تنش  $i$  ام بوده، و  $N_i$  تعداد سیکل بارگذاری است که در مقدار تنش  $i$  ام پدیده شکست رخ می‌دهد. K تعداد تنش‌های در نظر گرفته شده در تحلیل است.

### ۳- مهاربند کمانش ناپذیر نچسبیده و آزمایش‌های خستگی انجام شده روی BRB

مهاربند کمانش ناپذیر نچسبیده<sup>۳</sup> از انواع مهاربندهای BRB است که به وسیله شرکت Nippon Steel Corporation تولید می‌شود. این مهاربند شامل یک هسته فولادی است که به وسیله یک لوله فولادی پر شده با بتن پوشیده شده است (شکل ۱). هسته فولادی بار محوری را تحمل می‌کند، در حالی که لوله خارجی به وسیله بتن برای هسته قید جانبی ایجاد کرده و از کمانش کلی جلوگیری می‌کند. مبنای اصلی عملکرد این مهاربند جلوگیری از وقوع کمانش هسته فولادی به منظور امکان وقوع پدیده تسلیم فشاری در آن و در نتیجه امکان جذب انرژی در این عضو از سازه است. این مهاربندها

4 unbonding material

5 Unbonded Braced Frame

6 SAC joint venture (a partnership of: Structural Engineering Association of California, Applied Technology Council)

1 Cyclic Void Growth Model

2 Miner's rule

3 Unbonded buckling restrained brace

حالتی که زاویه دریفت معادل طبقه  $\frac{1}{100}$  باشد، تعداد سیکل‌هایی که منجر به گسیختگی ماده می‌شود حدود ۲۰۰ سیکل و در حالت استفاده از ضریب اصلاح شکل برای نمونه‌ها حدود ۳۰ سیکل است. این نتایج اثباتی بر ویژگی‌های خستگی خوب این مهاربندها از نظر ظرفیت تغییر شکل پلاستیک تجمعی است. همچنین نشان دادند که ویژگی‌های خستگی مهاربند نچسبیده با کماتش موضعی هسته مهاربند کاهش پیدا می‌کند. همچنین رابطه‌ای را با در نظر گرفتن تمرکز تنش برای ترسیم منحنی خستگی و تعیین عمر خستگی ارائه دادند. طبق مشاهده آزمایش‌ها، تحت دامنه‌های کرنش تقریباً یکسان، هسته فولادی به شکل — نسبت به هسته فولادی با شکل + عملکرد خستگی بهتری را از خود نشان داد. همچنین مشاهده شد نمونه‌هایی که تحت دامنه‌های کرنش بالاتری قرار داشتند، جوانه زنی و رشد ترک سریعتری را تجربه کردند (گسیختگی خستگی کم چرخه).

(Tsai & Lai (2002) تأثیر ماده ناپیوستگی را روی رفتار چرخه‌ای مهاربندهای BRB مطالعه کردند [۱۵]. همچنین برای کاهش اندازه اتصال و اجرای ساده‌تر، مهاربندهای کماتش ناپذیر دو لوله‌ای<sup>۱</sup> را معرفی کردند. هر مهاربند از دو قسمت یکسان تشکیل شده است. هر قسمت شامل یک هسته فولادی است. رفتار هیسترتیک یک نمونه BRB دو لوله‌ای تحت آزمایش خستگی کم چرخه در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل (۴) رفتار هیسترتیک double-tube BRB تحت آزمایش خستگی کم چرخه و گسیختگی در سیکل ۲۶۳، Tsai & Lai (2002) [۱۵]

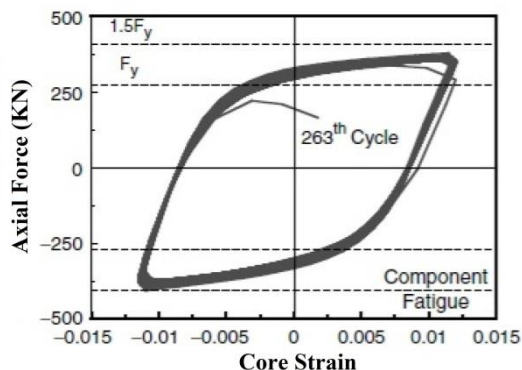


Figure (4) Typical hysteretic response of double-tube BRB (Tsai & Lai 2002)

شکل (۲) رفتار نیرو- تغییر مکان مهاربند کماتش ناپذیر [۳]

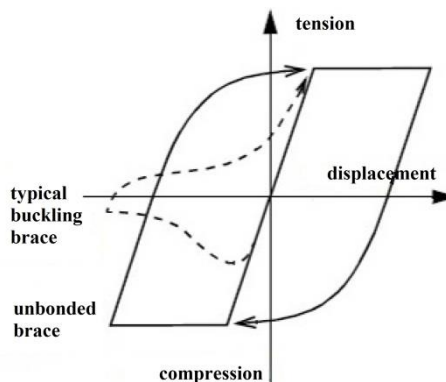


Figure (2) Force-displacement behavior of conventional brace versus BRB (Clark et al. 1999)

شکل (۳) رفتار هیسترتیک مهاربند نمونه T-2 تحت آزمایش خستگی کم

چرخه Clark et al. (1999) [۳]

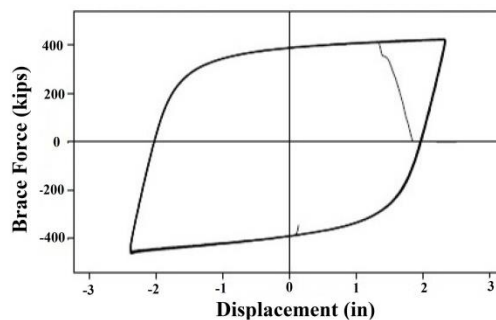


Figure (3) Hysteretic behavior of BRB specimen T-2 during low-cycle fatigue test (Clark et al. 1999)

(Nakamura (2000) و همکاران عملکرد مهاربندهای نچسبیده را به عنوان میراگرهای هیسترتیک با انجام آزمایش‌های خستگی روی مقیاس واقعی مهاربندها را مطالعه کردند [۱۴]. پنج تیپ مهاربند نچسبیده با شکل و سایز تقریباً یکسان تحت آزمایش قرار گرفتند. سه نوع فولاد برای هسته میراگرها شامل فولاد نورد شده سازه‌های ساختمانی مطابق آیین‌نامه ژاپن (JIS SN400B)، و دو نوع فولاد با حد تسلیم پایین مطابق با آیین‌نامه شرکت (BT- Nippon (BT-LYP100, BT-LYP235) در نظر گرفته شدند. برای دو نمونه آزمایش به دلیل داشتن بخش کوتاهتری برای تغییر شکل پلاستیک به منظور افزایش سختی محوری (حدود  $\frac{1}{3}$  بقیه نمونه‌ها)، از ضریب اصلاح شکل استفاده شد. این ضریب با عنوان ضریب تمرکز  $\alpha$  برای اصلاح شکل نمونه‌ها تعریف شده که برابر با نسبت میانگین طول بخش تحت کرنش به طول هسته بوده و برای نمونه‌های گفته شده برابر ۳٫۱ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها نشان دادند در

Wang (2012) و همکاران در پژوهش خود با مطالعه آزمایشگاهی و عددی، به بررسی آثار متوقف کننده‌ها<sup>۱</sup> روی ویژگی‌های خستگی کم چرخه مهاربندهای BRB برای توسعه مهاربندهای کماتش ناپذیر با عملکرد بالا<sup>۲</sup> (HPBRB) که در مهندسی پل کاربرد دارد، پرداختند [۱۸]. متوقف کننده‌ها از لغزش سیستم ممانعت کننده از کماتش نسبت به هسته مهاربند جلوگیری می‌کنند. بر طبق نتایج آزمایش‌های مهاربندهای BRB با متوقف کننده‌ها، نسبت به مهاربندهای بدون متوقف کننده از عملکرد خستگی کم چرخه بالاتری برخوردار بودند.

شکل (۵) تاریخچه تغییر مکان خستگی کم چرخه شامل ۱۵ سیکل (بالا)، حلقه‌های نیرو-تغییر مکان برای نمونه ۹۹-۲ (پایین). مهاربند رفتار پایداری را بدون هیچ نشانه‌ای از زوال تا سیکل پانزدهم که شکست رخ می‌دهد، از خود نشان می‌دهد [۱۶] Black et al. (2002)

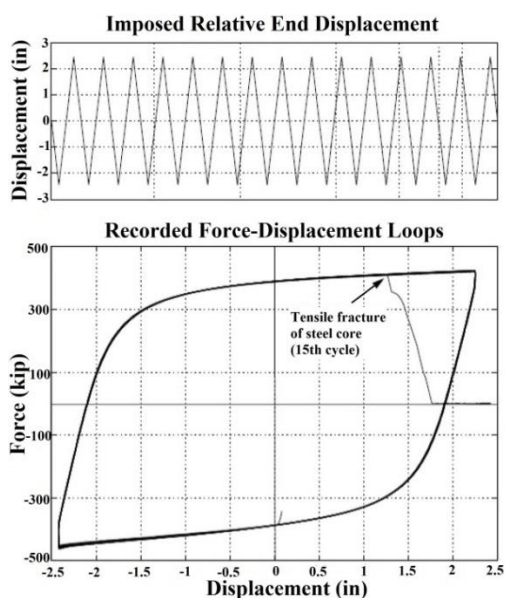


Figure (5) Low-cycle fatigue displacement history consisting of 15 cycles (top) and recorded force-displacement loops of Specimen 99-2 (Black et al. 2002)

در این پژوهش، ضمن درستی آزمایش‌ها Black (2002) و همکاران، برای بررسی تأثیر هندسه سازه قاب مهاربندی شده کماتش ناپذیر بر عملکرد خستگی کم چرخه آن، سه قاب مهاربندی شده همگرای کماتش ناپذیر قطری، V شکل و شورن بررسی شدند. این سه قاب مهاربندی شده کماتش ناپذیر از نظر رفتار هیسترتیک و عمر خستگی کم چرخه با یکدیگر مقایسه کردند.

Black. (2002) و همکاران آزمایش‌هایی روی اجزاء مهاربند کماتش ناپذیر در ایالات متحده در دانشگاه برکلی انجام دادند [۱۶]. در گزارش این آزمایش‌ها، روابطی برای آنالیز پایداری این مهاربندها در برابر کماتش خمشی کلی، کماتش هسته داخلی در مودهای بالاتر و کماتش پلاستیک پیچشی هسته داخلی ارائه شده است. در نتایج این آزمایش‌ها به مزایای استفاده از مهاربندهای کماتش ناپذیر از جمله اضافه مقاومت، استهلاک انرژی و شکل پذیری اشاره شده است، و به عنوان جایگزین کارآمد و مؤثری برای سیستم‌های باربر جانبی معمول معرفی شده‌اند. همچنین مهاربند کماتش ناپذیر در آزمایش خستگی کم چرخه رفتار هیسترتیک بسیار پایداری را تا لحظه گسیختگی نشان داده است. یک مرحله از این آزمایش‌ها که روی سه نمونه صورت گرفت، شامل آزمایش‌ها تناوبی توصیه شده به وسیله SAC برای اتصالات خمشی جوش شده فولادی است که به تاریخچه بارگذاری پایه ای SAC اشاره دارد. اولین پارامتری که در آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفت، تغییر مکان محوری سیکلی مهاربند (کرنش) بوده است، که این مقادیر طوری تعیین شدند که متناظر با نسبت‌های دررفت میان طبقه‌ای مشخصی مطابق با تاریخچه بارگذاری SAC باشند. برای نمونه ۹۹-۲، تاریخچه بارگذاری SAC شامل سیکل‌های جابه‌جایی کاملاً معکوس در دامنه (in) ۲،۴۴، برای آزمایش خستگی کم چرخه استفاده شده است (متناظر با دررفت طبقه ای ۳ درصد). رفتار نیرو-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش خستگی کم چرخه انجام شده روی نمونه ۹۹-۲ در شکل (۵) نشان داده شده است. مهاربند رفتار هیسترتیک بسیار پایداری برای همه سیکل‌ها تا لحظه گسیختگی نشان داده است. گسیختگی در نیمه دوم سیکل پانزدهم در لحظه شکست هسته فولادی داخل بتن رخ داده است. بیشینه نیروی فشاری کمی از بیشینه نیروی کششی بالاتر است. برای این آزمایش بیشینه نیروی فشاری ۴۴۶،۸ kips در مقایسه با بیشینه نیروی کششی ۴۱۶،۵ kips با تفاوت ۷،۳ درصد نسبت به هم به دست آمده‌اند.

Usami (2011) و همکاران آزمایش‌ها خستگی کم چرخه برای بررسی عمر خستگی مهاربندهای BRB انجام دادند [۱۷]. تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری با دامنه‌های ثابت و متغیر، عملکرد خستگی خوبی را از خود نشان دادند. ولی آزمایش‌ها مقایسه‌ای نشان دادند که فاصله میان اعضای پر کننده و عضو باربر، عملکرد خستگی BRB را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

1 Stopper

2 High-Performance Buckling Restrained Brace

## ۴- مدل‌سازی و درستی آزمایشی

مدل یک شمارنده سیکل جریان بارشی<sup>۲</sup> برای مسیریابی دامنه کرنش اعمال شده است. این شمارنده سیکل در هماهنگی با یک مدل تجمعی کرنش خطی (قانون ماینر)، بر اساس رابطه لگاریتمی Coffin-Manson برای در نظر گرفتن گسیختگی خستگی کم چرخه استفاده شده است. این ماده در اطراف ماده دیگری قرار می‌گیرد و روی رابطه تنش-کرنش یا نیرو-تغییر مکان آن ماده تأثیر نمی‌گذارد [۲۷ و ۲۸].

در شکل (۷) مقایسه‌ای میان نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از مدل‌سازی تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی انجام شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود گسیختگی در سیکل بیستم اتفاق افتاده است. مقادیر به دست آمده مربوط به بیشینه نیروی فشاری و کششی در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی خستگی کم چرخه مربوط به نمونه ۲-۹۹ در مرجع [۱۶]، در جدول (۱) خلاصه شده است. مقایسه رفتار هیسترتیک و بیشینه نیروی فشاری و کششی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل‌سازی مهاربند کمانش ناپذیر همراه با رفتار خستگی کم چرخه در نرم‌افزار OpenSees نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است. مانند نتایج آزمایشگاهی بیشینه نیروی فشاری بیشتر از بیشینه نیروی کششی به دست آمده است. در شکل (۸) نمودار خرابی تجمعی المان قابل مشاهده است. هنگامی که مقدار خرابی تجمعی در ماده به عدد ۱ برسد، بدین معنی است که ماده به طور کامل از بین رفته و دیگر تنشی تحمل نمی‌کند.

شکل (۷) مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان خستگی کم چرخه در مهاربند کمانش ناپذیر با رفتار مدل آزمایشگاهی [۱۶]

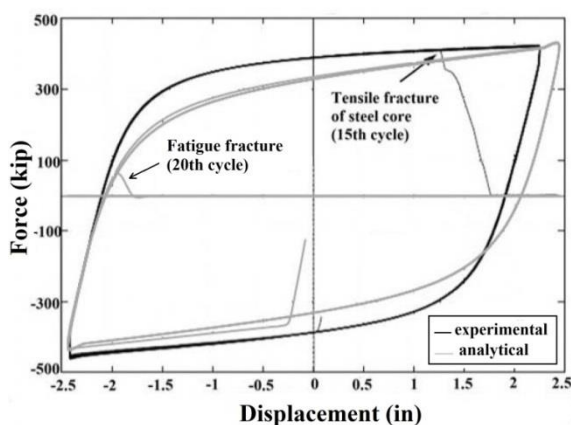


Figure (7) Comparison between the low-cycle fatigue force-displacement behavior of BRB in this study with the experimental study of (Black et al. 2002)

در آیین‌نامه AISC 2005 مدل هیسترتیک دوخطی نیرو-تغییر مکان برای BRB مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است. در این نمودار  $\omega$  فاکتور تنظیم مقاومت کششی و محاسبه اضافه مقاومت است. پارامترهای مورد نیاز در این نمودار از آزمایش‌ها به دست می‌آیند [۱۹].

شکل (۶) رفتار ایده آل دوخطی نیرو-تغییر مکان هیسترتیک برای مهاربند کمانش ناپذیر (AISC Seismic Provisions 2005) [۱۹]

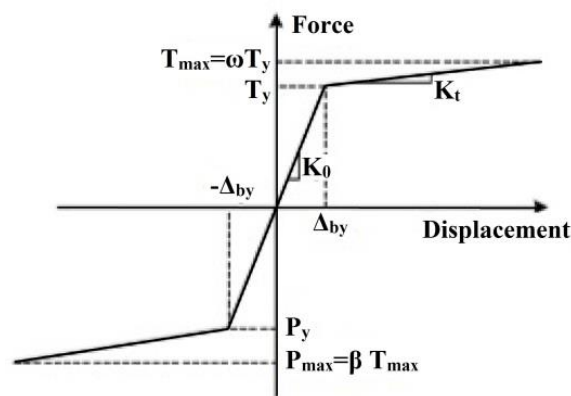


Figure (6) Bilinear ideal force-displacement behavior of BRB (AISC Seismic Provisions 2005)

در این پژوهش، برای مدل‌سازی مهاربند کمانش ناپذیر از المان Truss و مدل مصالح Steel02 در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. این مدل مصالح بر مبنای مدل Menegotto-Pinto با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک تعریف شده است و لازم است پارامترهایی همچون مقاومت تسلیم، مدول الاستیسیته و نسبت سخت‌شوندگی کرنشی تعریف شوند [۲۰].

با توجه به مشخصات نمونه ۲-۹۹ در مرجع [۱۶]، تنش تسلیم ۶۰،۷ ksi، سطح مقطع  $6 \text{ in}^2$  و مدول الاستیسیته ۲۹۰۰۰ ksi در نظر گرفته شده است. در پژوهش‌های گذشته برای مدل‌سازی مهاربند BRB نسبت سخت‌شوندگی کرنشی برابر با ۰،۰۲ لحاظ شده است [۲۱ و ۲۲]. پژوهش‌هایی هم در ارتباط با تأثیر مقدار نسبت سخت‌شوندگی کرنشی در دررفت پسماند قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر و نیز آثار  $P-\Delta$  صورت گرفته است [۲۳ و ۲۴].

پدیده خستگی کم چرخه نیز در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از مدل Fatigue Material شبیه‌سازی شده است [۲۵ و ۲۶]. در این

در این پژوهش با توجه اطلاعاتی که از ویژگی‌های خستگی مهاربندهای BRB به دست آمده است، سعی بر این است تا ویژگی‌هایی چون عمر خستگی برای پیکربندی‌های رایج قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر بررسی شود. بدین ترتیب می‌توان عملکرد این قاب‌ها را با توجه به ویژگی‌های خستگی‌شان با یکدیگر مقایسه نمود.

در بخش درستی آزمایشی، رفتار خستگی کم چرخه مهاربند کمانش ناپذیر تنها به صورت یک المان بررسی شد. در این بخش برای بررسی اثر خستگی کم چرخه در قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر، سه نوع قاب همگرای مهاربندی شده کمانش ناپذیر با مهاربندهای قطری، V شکل و شورن مطابق شکل (۹) در نظر گرفته شده‌اند. بارگذاری و مساحت المان مهاربند کمانش ناپذیر مانند کار آزمایشگاهی در مرجع [۱۶] در نظر گرفته شده است و اتصال مهاربندها به قاب صلب فرض شده است. مشخصات قاب‌ها در جدول (۲) قابل مشاهده است.

شکل‌های (۱۰، ۱۱ و ۱۲) منحنی نیرو-تغییر مکان و نمودار خرابی تجمعی المان مهاربندی کمانش ناپذیر را در اثر خستگی کم چرخه، در سه قاب مختلف نشان می‌دهند. همان‌گونه که انتظار می‌رفت هر سه قاب رفتار هیستریک پایداری را تا لحظه گسیختگی خستگی از خود نشان داده‌اند. نتایج بررسی سه نوع قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر در جدول (۳) خلاصه شده است.

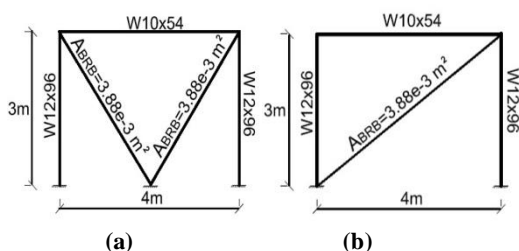
جدول (۲) مشخصات قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر

|             |                          |
|-------------|--------------------------|
| beam        | W10x54                   |
| column      | W12x96                   |
| area of BRB | 0.0038 (m <sup>2</sup> ) |
| span length | 4 (m)                    |
| height      | 3 (m)                    |

Table (2) general properties of BRBFs

شکل (۹) قاب‌های همگرای مهاربندی شده کمانش ناپذیر (BRBF). (الف)

قطری، (ب) V شکل، (پ) شورن



شکل (۸) نمودار خرابی تجمعی BRB برای تعیین سیکل گسیختگی جهت درستی آزمایشی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۶]

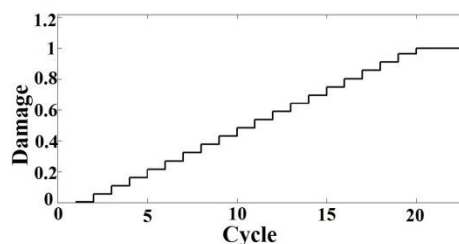


Figure (8) Accumulated damage of BRB for determining the cycle of fracture in order to verify with the results of the experimental study of (Black et al. 2002)

### ۵- مقایسه عملکرد خستگی کم چرخه در قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر قطری، V شکل و شورن

قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر به عنوان سیستم‌های باربر جانبی برای کاربردهای لرزه‌ای بسیار امیدوار کننده ظاهر شده‌اند. نتایج معمولاً رفتار هیستریک پایدار به همراه عمر خستگی کم چرخه بسیار خوبی را نشان داده‌اند. همچنین به تازگی در مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان در سال ۱۳۹۲ این سیستم مهاربندی به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی به متن آیین‌نامه اضافه شده است. به دلیل اینکه در مهاربندهای BRB هیچ کاهش در سختی و مقاومت وجود ندارد و مقاومت کششی و فشاری در آن‌ها تقریباً یکسان است، استفاده از BRB در قاب مهاربندی کمانش ناپذیر به فرم قطری تک مجاز است. قاب‌های V شکل و V معکوس (شورن) هم به دلیل امکان تعبیه بازشو بسیار استفاده می‌شوند [۲۹].

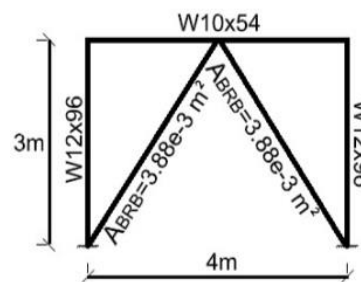
جدول (۱) مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش آزمایشگاهی مرجع [۱۶]

|   | experimental results | this study | percentage difference |
|---|----------------------|------------|-----------------------|
| (kips)  |                      |            |                       |
| maximum compressive force                                     | 446.8                | 431.2      | 3.6%                  |
| (kips)  |                      |            |                       |
| maximum tension force   | 416.5                | 425.2      | 2.1%                  |
| difference between the maximum tension and compression forces | 7.3%                 | 1.4%       | —                     |
| Number of cycles up to failure                                | 15                   | 20         | —                     |

Table (1) Comparison between the results of this study and the experimental study of Black et al. (2002)



کششی و همچنین بیشترین مساحت زیر منحنی هیستریزس نیز در قاب مهاربندی شده V شکل به دست آمده است. بنابراین قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر V شکل از نظر ویژگی‌های خستگی دارای بهترین عملکرد نسبت به دو پیکربندی رایج دیگر BRBF است.



(c)

Figure (9) Buckling-restrained braced frames investigated in this study, (a) diagonal BRBF, (b) V-shaped BRBF, (c) chevron BRBF

شکل (۱۲) نتایج بررسی خستگی کم چرخه در BRBF شورن، منحنی نیرو-تغییر مکان (راست)، نمودار خرابی تجمعی (چپ).

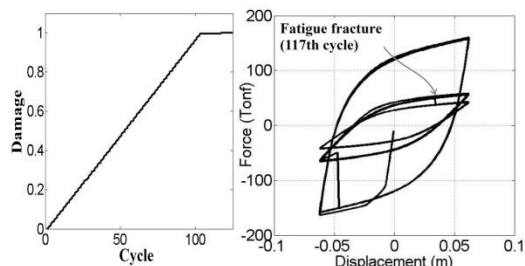


Figure (12) Low-cycle fatigue performance of the chevron BRBF, force-displacement behavior (right), accumulated damage (left)

جدول (۳) نتایج به دست آمده از بررسی عملکرد خستگی کم چرخه در سه قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر

|                                  | diagonal BRBF | V-shaped BRBF | chevron BRBF |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| (kips) maximum compressive force | 140.2         | 176           | 163.2        |
| (kips) maximum tension force     | 136.1         | 173.3         | 160.4        |
| number of cycles up to failure   | 99            | 118           | 117          |

Table (3) results of the investigation of the low-cycle fatigue performances of BRBFs

## ۷- نتایج

علاوه بر رفتار هیستریتیک پایدار مهاربند کمانش ناپذیر و بیشتر بودن مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی که در پژوهش‌های گذشته نیز به آنها اشاره شده است، نتایج حاصل از بررسی خصوصیات خستگی کم چرخه در قاب‌های مهاربندی شده کمانش ناپذیر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- بر طبق نتایج آزمایش خستگی کم چرخه روی مهاربند کمانش ناپذیر (Black et. al (2002)، عمر خستگی ۱۵ سیکل به دست آمده است. بنابراین این شکست خستگی از نوع ULCF است. مدلسازی تحلیلی در این پژوهش با استفاده از رابطه Coffin-Manson عمر

شکل (۱۰) نتایج بررسی خستگی کم چرخه در BRBF قطری، منحنی نیرو-تغییر مکان (راست)، نمودار خرابی تجمعی (چپ).

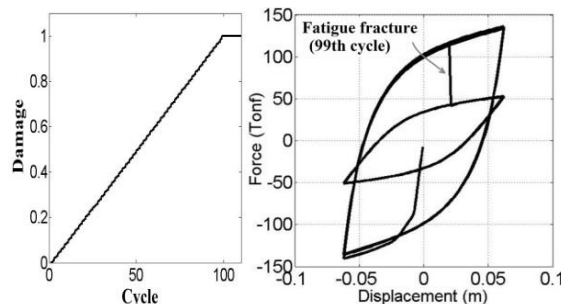


Figure (10) Low-cycle fatigue performance of the diagonal BRBF, force-displacement behavior (right), accumulated damage (left)

شکل (۱۱) نتایج بررسی خستگی کم چرخه در V-BRBF شکل، منحنی نیرو-تغییر مکان (راست)، نمودار خرابی تجمعی (چپ).

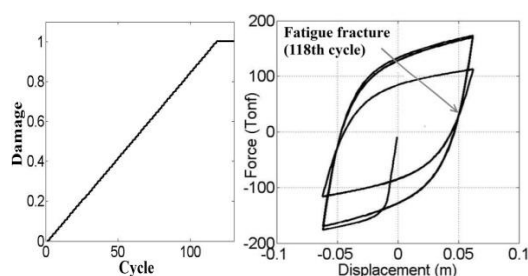


Figure (11) Low-cycle fatigue performance of the V-shaped BRBF, force-displacement behavior (right), accumulated damage (left)

با توجه به جدول (۳)، همان گونه که انتظار می‌رفت در هر سه قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر، بیشینه نیروی فشاری کمی بیشتر از بیشینه نیروی کششی به دست آمده است. تعداد سیکل گسیختگی در قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر V-شکل، بیشتر از دو قاب دیگر به دست آمده است. این بدین معنی است که قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر V شکل نسبت به دو قاب دیگر از عمر خستگی کم چرخه بالاتری برخوردار است. همچنین بیشینه نیروی فشاری و

with the Barcelona plastic damage model and a new isotropic hardening law. *International Journal of Fatigue*, 73, 1132–142.

[13] Toudashki H. H. & Motalebi A. 2007 Investigation of the material 's fatigue life based on the Miner's rule. 15<sup>th</sup> international annual conference on Mechanical Engineering (ISME), Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, (In Persian).

[14] Nakamura H., Maeda Y., Sasaki T., Wada A., Takeuchi T., Nakata Y. & Iwata M. 2000 *Fatigue properties of practical-scale unbonded braces*, Nippon Steel Technical Report No. 82, Japan.

[15] Tsai K. C. & Lai J. W. 2002 A study of buckling restrained seismic braced frame. *Structural Engineering*, 17(2), 3–32, (In Chinese).

[16] Black C. J., Markis N. & Aiken I. 2002 *Component testing, stability analysis and characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces*, PEER Report 2002/8, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Berkeley, California, USA.

[17] Usami T., Wang C. & Funayama J. 2011 Low-Cycle Fatigue Tests of a Type of Buckling Restrained Braces. *Procedia Engineering*, 14, 956-964.

[18] Wang C., Usami T. & Funayama J. 2012 Evaluating the influence of stoppers on the low-cycle fatigue properties of high-performance buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 41, 167-176.

[19] *Seismic provisions for structural steel buildings*, 2005 American Institute of Steel Construction Inc. (AISC), Chicago, USA.

[20] Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H. & Fenves G.L. 2006 *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, Berkeley, California, USA.

[21] Tremblay R., Poncet L., Bolduc P., Neville R. & DeVall R. 2004 Testing and design of buckling restrained braces for Canadian application. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2893, Vancouver, BC, Canada.

[22] Shemshadian M. E., Vafaei D., Zahrai S. M. & Vafaei J. 2010 Forward directivity and fling step effects on the controlling parameters of the buckling restrained braced frame. 5<sup>th</sup> national congress of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, (In Persian).

[23] Abdollahzadeh G. R., Farzi-Bashir H. & Banihashemi M. R. 2014 Seismic Retrofitting of Steel Frames With Buckling Restrained and Ordinary Concentrically Bracing Systems with Various Strain Hardening and Slenderness Ratios. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2(2), 20-31.

[24] Daylami M. & Mahdavi-pour A. M. 2013 Probabilistic assessment of strain hardening ratio on BRBFs residual drift demand", *The 13<sup>th</sup> East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Sapporo, Japan.

[25] Salmanpour A. H. & Arbabi F. 2011 Study of Seismic Behavior of Buckling Restrained Braced Frames. *Modares Civil Engineering Journal*, 10(2), 105-122, (In Persian).

[26] Hosseini S. M., Kenarangi H. & Fanaei N. 2014 *Application of OpenSees software in modeling and analysis of structures*, Azadeh publication, (In Persian).

[27] Lopez W. A. & Sabelli R. 2004 *Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames*, Structural Steel Educational Council, Steel Tips.

خستگی را ۲۰ سیکل تخمین زده است. بنابراین رابطه Coffin-

Manson عمر خستگی ULCF را دست بالا تخمین می‌زند.

• هر سه قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر قطری، V شکل و شورن

رفتار هیسترتیک پایداری را تا لحظه گسیختگی خستگی از خود

نشان دادند.

• قاب مهاربندی شده کمانش ناپذیر V شکل، عملکرد خستگی کم

چرخه مطلوب‌تری چه از نظر رفتار هیسترتیک و چه از نظر عمر

خستگی، نسبت به قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر قطری و شورن

داشته است.

## References

## ۸- مراجع

[1] Uang C. M. & Nakashima M. 2004 Steel buckling-restrained braced frames. (Chapter 16) In: *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*, Y. Bozorgnia & V. V. Bertero (eds.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

[2] Calado L., Proenca J. M., Pano A., Nsieri E., Rutenbrg A. & Levy R. 2006 Buckling-Restrained Braces. *PROHITECH WP5 Innovative Materials and Techniques*. 4th general meeting in Istanbul (Turkey) on 6th–7th April 2006.

[3] Clark P., Aiken I., Kasai K., Ko E. & Kimura I. 1999 Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, *Proceedings of the 68th Annual Convention*, Structural Engineers Association of California Santa Barbara, California, USA.

[4] Sabelli R., Mahin S. A. & Chang C. 2003 Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 25(5), 655–666.

[5] Uang C. M. & Kiggins S. 2006 Reducing Residual Drift of Buckling-Restrained Braced Frames as a dual system. *Engineering Structures*, 28(11), 1525-1532.

[6] Moradi S., Alam M. S. & Asgarian B. 2013 Incremental Dynamic Analysis of Steel Frames Equipped with NiTi Shape Memory Alloy Braces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(18), 1406-1425.

[7] Pham H. V. 2013 *Performance-based assessment of Buckling-Restrained Braced Steel Frames retrofitted by self-centering Shape Memory Alloy Braces*, Master's thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA.

[8] Boardman B. 1990 Fatigue Resistance of Steels. In: *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, R. Steiner (ed.), ASM International, USA, pp. 673-688.

[9] Deluca D. P. 2001 Understanding Fatigue, *ASME International Gas Turbine Institute*, USA, 41(1) 7-10.

[10] Kanvinde A. M. & Deierlein G. G. 2004 *Micromechanical simulation of earthquake induced fracture in steel structures*. Technical Report 145, John A. Blume, Earthquake Engineering Center, Stanford University, California, USA.

[11] Kanvinde A. M. & Deierlein G. G. 2005 Continuum Based Micro-Models for Ultra Low Cycle Fatigue Crack Initiation in Steel Structures, Structures Congress, Newyork, USA, *ASCE* pp. 1-11

[12] Martinez X., Oller S., Barbu L. G., Barbat A. H. & de Jesus A. M. P. 2015 Analysis of Ultra Low Cycle Fatigue problems

# Investigation of low cycle fatigue performance of diagonal, V-shaped and chevron buckling restrained braced frames

M.Gerami<sup>\*1</sup>, P. Sedaghati<sup>2</sup>

1- Associate Prof., Civil Eng., Faculty of Civil Eng., Semnan University

2- PHD Student, Earthquake Eng., Faculty of Civil Eng., Semnan University

mgerami@semnan.ac.ir

## Abstract:

Based on ASTM E1823 standard, fatigue phenomenon is the process of permanent, progressive and localized structural change which occurs to a material point subjected to strains and stresses of variable amplitudes which produce cracks that leads to total failure after a certain number of cycles.

During an earthquake, fatigue failure can occur at loads much lower than tensile or yield strengths of material. Therefore material behavior under cyclic loading is an important design criterion.

Fatigue data are obtained from the experiments and are shown in S-N curves which represent stress or strain amplitude versus number of cycles. All fatigue ranges can be included generally in three categories. Ultra Low Cycle Fatigue (ULCF), Low Cycle Fatigue (LCF), and High Cycle Fatigue (HCF). HCF is recognized with low strain amplitude and high frequency, and LCF is a material deterioration which is described as high plastic strain amplitude and low frequency. ULCF involves a few cycles (less than 20) of large plastic strains. ULCF is of great importance for structural and earthquake engineers, because fatigue failure in structural members occurs generally in less than 10 cycles during a seismic event. Fatigue fracture in moment connections, or gusset plates and brace members are examples for ULCF or ductile fracture.

Fatigue life is expressed as the total number of stress cycles required for a fatigue crack to initiate and grow large enough to produce fatigue failure. Currently, two major methods are available for fatigue life prediction of structures. One type is based on material fatigue life curves (e.g., S-N curves or  $\epsilon$ -N curves) and a damage accumulation rule. The other is based on the fracture mechanics and crack growth analysis.

The Manson-Coffin law is the most widely used procedure to predict material failure under LCF and ULCF. But last researches showed that Manson-Coffin relation overestimates the fatigue life in ULCF domain.

Miner's rule is one of the most widely used cumulative damage models for failures caused by fatigue.

The rainflow method is a method for counting fatigue cycles from a time history. The counting of each load cycle and the relative damage produced must be done with extreme accuracy and care. Rainflow counting has been shown to be most effective. The rainflow method allows the application of Miner's rule in order to assess the fatigue life of a structure.

In this paper low cycle fatigue performance of restrained buckling braced frames with diagonal, V-shaped and chevron configurations are investigated. Previous researches and experimental tests' results of BRBs usually show very stable hysteresis behavior with an excellent low cycle fatigue life.

In this study for modeling the low cycle fatigue phenomenon, the "fatigue material" model in OpenSees is used. The fatigue material uses a modified rainflow cycle counting algorithm to accumulate damage in a material using Miner's Rule. Once the Fatigue material model reaches a damage level of 1.0, the force (or stress) of the material becomes zero and the material is destructed completely.

By obtaining the hysteretic loops and also the cumulative damage charts of diagonal, V-shaped and chevron buckling restrained braced frames, the hysteretic behavior and fatigue life of them are evaluated. Buckling restrained braces in three configurations of concentrically braced frames, exhibited stable hysteretic behavior up to failure. Considering area of the hysteretic loops and low cycle fatigue life, V-shaped buckling restrained braced frame showed better low cycle fatigue performance.

**Keywords:** Low Cycle Fatigue, Buckling Restrained Braced Frame, Energy Dissipation, Fatigue Life