

ارزیابی اثر «خستگی کم چرخه» در رفتار لرزه‌ی «اتصال مستقیم تقویت نشده‌ی جوشی» و «اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته» در قاب‌های خمشی فولادی

با هره‌سادات حسینی کالج (کارشناس ارشد)

محسن گرامی* (دانشیار)

محسن قادری (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دربی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۱-۳

پژوهشگران مدت‌ها به موضوع تأثیر خستگی در رفتار سازه‌های فولادی توجه داشته‌اند. با مشاهده‌ی خرابی‌های گسترده‌ی اتصال‌های سازه‌های فولادی پس از زلزله‌ی نورتریج، بررسی موضوع خستگی کم چرخه حائز اهمیت شده است. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار دو اتصال از پیش تأیید شده‌ی اتصال مستقیم تقویت نشده‌ی جوشی و اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته، تحت اثر خستگی کم چرخه بررسی شده و منحنی S-N با روش نستار و نتایج آزمایشگاهی موجود به دست آمده است. چهار سازه با روش تحلیل تاریخی‌ی زمانی خطی، تحلیل و آسیب ناشی از خستگی تجمعی در دو اتصال اخیر با روش تحلیل خستگی پالمگرن - ماینر بررسی شده است. بیشترین مقدار شاخص خستگی تجمعی در اتصال WUF-W در تیرها ۱/۲۹ برابر اتصال RBS و در ستون‌ها ۱/۳۴ بوده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی نیاز به توجه بیشتر به اثر خستگی کم چرخه در اتصال‌های قاب خمشی فولادی، به ویژه در اتصال WUF-W است.

واژگان کلیدی: خستگی کم چرخه، اتصال‌های از پیش تأیید شده، سازه‌های فولادی، زلزله.

b.hosseini733@gmail.com
mgerami@semnan.ac.ir
mohsenghadari57@gmail.com

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی مطالعات

فولاد با ویژگی‌های مناسب برای استفاده در سازه، از جهت نوع رفتار در برابر خستگی ضعیف‌هایی دارد و پژوهشگران به طور گسترده به موضوع خستگی توجه داشته‌اند. کتاب نورمن داوولینگ^۱، یکی از بهترین منابع در زمینه‌ی شناخت مصالح فولادی است. همچنین در کتاب فدریکو مازولانی^۲ و ریکاردو هررا^۳، که در زمینه‌ی رفتار سازه‌های فولادی تحت بار لرزه‌ی است، بحث رفتار اتصال‌ها تحت خستگی مطرح شده است.

مطالعات علم مکانیک شکست به سال ۱۹۲۰ بر می‌گردد، که توسط گریفیت^۴ انجام شده است. در واقع خستگی نوعی از خرابی شکست است و زمانی رخ می‌دهد که ماده تحت بارگذاری سیکلیک قرار بگیرد. به عبارتی ممکن است در بارگذاری چرخه‌ی، اعضاء سازه‌ی پیش از رسیدن به تنش مورد انتظار دچار خرابی شوند. در طول زلزله، اتصال‌های قاب خمشی ممکن است تحت تأثیر خستگی کم چرخه قرار گیرند. اگر چه خرابی تحت خستگی کم چرخه به خوبی مطالعه و در دهه‌های اخیر منتشر شده است، این موضوع به خوبی در کارهای عملی مهندسی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۱۱، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۱۹

DOI:10.24200/J30.2020.54818.2677

سازه و دست‌ورالعمل‌های طراحی لحاظ نشده است. کمیته‌ی لرزه‌شناسی SEAOC و گروه FEMA ۳۵۰، پیشنهاد می‌کنند که مطالعات بیشتری بر روی موضوع خستگی کم چرخه انجام شود. کرلوینکار^۵ خستگی کم چرخه را به عنوان مکانیزم خسارت در اتصال‌های قبل از نورتریج بیان کرده است.^[۲]

پارتریج^۶ (۲۰۰۰) در مطالعه‌ی خود ۱۰ اتصال تیر به ستون را تحت بارگذاری چرخه‌ی ثابت قرار داد و دریافت که خستگی، عامل مهمی در خرابی اتصال‌های پیش از نورتریج بوده است.^[۴]

نوشتار اخیر به همراه انتشارات دیگر توسط پارتریج، آلن^۷، ریچارد^۸ و رادو^۹ به این نتایج دست یافتند که خستگی کم چرخه، عامل خرابی اتصال‌های پیش از نورتریج در طی زلزله‌ی نورتریج بوده است.^[۵]

در سال ۲۰۰۳، سامنر^{۱۰} در رساله‌ی دکتری خود برای تعیین روشی واحد، طراحی اتصال‌های فلنجی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ی را مطالعه کرد و با بررسی جزئیات اتصال، روشی نوین تعیین کرد، که در آیین‌نامه‌های معتبر سازه‌های فولادی سراسر دنیا استفاده شده است.^[۶]

دیلمی و همکاران (۲۰۰۸) نیز رفتار عملکردی اتصال‌های تیر با مقطع کاهش یافته را تحت بارگذاری سیکلیک بررسی کردند. اتصال‌های مذکور قادر به مستهلک کردن

مقدار زیادی انرژی در وقوع زمین‌لرزه هستند. اتصال اخیر، مستعد پیدایش ناپایداری موضعی و جانبی است، که به دنبال آن ظرفیت اتصال کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد اتصال‌های مورد بررسی رفتار خوبی از خود نشان دادند. سه نمونه با و بدون اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته بررسی و تحت بارگذاری تحلیل شدند. ظرفیت هر اتصال و میزان لنگر بیشینه در محل اتصال تیر به ستون به دست آمد. هدف اصلی بررسی رفتار چرخه‌ی تیرها و اثر شکل‌پذیری در ناحیه‌ی دسترسی بوده است. نمونه‌ی بدون اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته در مقایسه با سایر اتصال‌های مورد مطالعه، شکل‌پذیری کمتری از خود نشان داده است.^[۷]

همچنین اشرفی و همکاران (۲۰۰۹)، مطالعاتی بر روی عملکرد اتصال RBS تحت بارگذاری سیکلیک انجام دادند و دریافتند که استفاده از اتصال مذکور در طبقات پایین‌تر، تأثیر عملکردی بهتری نسبت به طبقات بالاتر خواهد داشت.^[۸] کوین و همکاران (۲۰۱۲) هم روشی را جهت تخمین کرنش‌های محلی برای ارزیابی خمستگی کم‌چرخه و خمستگی کم‌چرخه‌ی زیاد ارائه دادند. با این حال، برنامه‌های کاربردی در ساختارهای واقعی برای به کارگیری روش اخیر به دلیل نیاز به مش‌بندی دقیق و ریز در اطراف ناحیه‌ی جوش با مشکل مواجه است. لذا در نوشتار مذکور، یک روش تخمین کرنش مؤثر شکاف از کرنش اسمی ارائه شده است.^[۹] امیری و همکاران (۲۰۱۳) نیز روشی جدید جهت شبیه‌سازی شکست نرم در سازه‌های فولادی در کرنش‌های بزرگ تحت زلزله ارائه کردند، که برای پیش‌بینی شروع ترک در خمستگی کم‌چرخه‌ی زیاد بر اساس مدل‌های میکرومکانیکی توسعه داده شده است. روش مذکور شامل شبیه‌سازی خرابی گام به گام مواد در چارچوب روش اجزاء محدود غیرخطی بوده و بر اساس آن، ابتدا محل ترک شناسایی و سپس مسیر انتشار آن، تعداد چرخه‌های مربوط به شروع ترک و در نهایت شکست نهایی تعیین شده است.^[۱۰]

ژو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۳)، با استفاده از روش میکرومکانیک شکست، روشی برای بررسی اثر خمستگی کم‌چرخه در اتصال‌های تیر به ستون جوشی ارائه دادند و شاخص شکستگی CVGM^{۱۲} بر اساس تاریخچه‌ی تنش و زمان کرنش محاسبه شد. روش ارائه شده دقت مناسب و معقولی را برای پیش‌بینی شکست خمستگی کم‌چرخه‌ی شدید در اتصال تیر به ستون تحت بارهای چرخه‌ی ناپایدار نشان داده است.^[۱۱]

هانجی^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ی خود اثر خمستگی کم‌چرخه را در اتصال‌های جوشی بررسی کردند و پی به ترک‌های ناشی از خمستگی از قسمت ریشه‌ی جوش اتصال بردند.^[۱۲]

همچنین زامبران^{۱۴} و همکارش (۲۰۱۴)، شاخص خسارت ساختمان را تحت اثر خمستگی کم‌چرخه بررسی کردند.^[۱۳]

در سال ۲۰۱۴ نیز یک مدل ساده‌سازی شده از میلگردهای فولادی برای بارگذاری چرخه‌ی جهت بررسی اثر خمستگی فوق کم‌چرخه توسط مندز^{۱۵} و کاسترو^{۱۶} مطالعه شد، که در آن فولاد تقویت‌کننده، کاهش می‌داوم و مقاومت قابل‌توجهی را تجربه می‌کرد، که در نهایت منجر به نارسایی زودرس ناشی از خمستگی شد. نتایج نشان داد روش جدید ارزیابی سطح تسلیم، اثر سخت‌شدگی چرخه‌ی جنبشی و ایزوتروپیک را نیز می‌تواند لحاظ کند.^[۱۴]

آجای کولکرانی^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۴) با آزمایش دو نمونه تیر با و بدون مقطع کاهش‌یافته، رفتار دو اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته تحت بارگذاری سیکلیک را بررسی کردند. اتصال‌ها به طور گسترده در ایالات متحده، ژاپن و اروپا استفاده می‌شدند. با این حال در هند استفاده نشده بودند. لذا در مطالعه‌ی مذکور، مرابای استفاده از چنین اتصال‌هایی در پروفیل‌های موجود در هند ارزیابی شد و تحلیل و

نتایج نشان دادند که نمونه بدون اتصال تیر با مقطع کاهش‌یافته به دلیل شروع ترک‌ها در ناحیه‌ی جوش بال پایینی ضعیف‌تر عمل کرده است.^[۱۵]

ژو و همکاران (۲۰۱۴)، یک روش کلی برای ارزیابی خمستگی کم‌چرخه در اتصال تیر به ستون ارائه کردند و مطالعات گسترده‌ی در رابطه با شکست و پیش‌بینی خمستگی از جزئیات اتصال با استفاده از مکانیک شکست و روش‌های میکرومکانیک انجام دادند.

به این صورت که با انجام روشی تخمین شکست بر اتصال را تحت بارگذاری یک‌ساخت به بارگذاری چرخه‌ی توسعه‌دادند. آزمایش‌ها بر روی اتصال‌های تیر به ستون نشان داد که ترک‌ها ابتدا از جوش حفزه‌ی دسترسی شروع می‌شوند و تا بال تیر ادامه می‌یابند.^[۱۶]

هان^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه بر روی اتصال‌های WUF-W^{۱۹} به این نکته دست یافتند که با کاهش شیب سوراخ دسترسی، کرنش خمیری کاهش یافته و موجب تأخیر در شروع ترک‌های خمستگی چرخه‌ی پایین در این ناحیه شده است.^[۱۷]

هان و همکاران (۲۰۱۶) نیز در اتصال WUF-W، بهبود هندسه‌ی سوراخ دسترسی جوش در خرابی اتصال برای جلوگیری از شکست را مطالعه کردند و دریافتند که با توجه به هندسه‌ی سوراخ دسترسی، کمترین مقدار کرنش خمیری در ناحیه‌ی اخیر ایجاد شده است.^[۱۸]

کارپیتتری^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۵) برای تعیین عمر خمستگی در ناحیه‌ی چندمحوره‌ی خمستگی کم‌چرخه، تأثیر نسبت پواسون را در نظر گرفتند. نتایج نظری با تغییر مقدار پارامتر مذکور به منظور ارزیابی تأثیر آن در برآورد عمر خمستگی تعیین شده است.^[۱۹]

کاشانی و همکاران (۲۰۱۵)، نیز در کار خود تأثیر کم‌انرژی‌تجاری دامنه‌ی بالا در عمر خمستگی کم‌چرخه را بررسی کردند و با استفاده از تحلیل‌های رگرسیون خطی دریافتند که عمر خمستگی از طول کم‌انرژی و مقاومت تسلیم تأثیر پذیر است.^[۲۰] همچنین در سال ۲۰۱۳ بنویت^{۲۱} و همکاران، تأثیر خمستگی کم‌چرخه در قطعات جوشی و غیرجوشی را بررسی و با استفاده از یک مدل، رشد میکروتک مبتنی بر انرژی را پیشنهاد کردند.^[۲۱]

همچنین در سال ۲۰۱۷، هان و همکاران با مطالعه‌ی اتصال‌های WUF-W نشان دادند رفتار لرزه‌ی اتصال‌های WUF-W به شدت تحت تأثیر دو پارامتر سوراخ دسترسی و شیب و طول قسمت مسطح است. برای برآورد نیاز اتصال‌های WUF-W در قاب خمشی ویژه، با توجه به عمق تیر و ویژگی‌های مصالح، طیف وسیعی از شیب سوراخ دسترسی و طول قسمت مسطح را پیشنهاد کرده‌اند.^[۲۲]

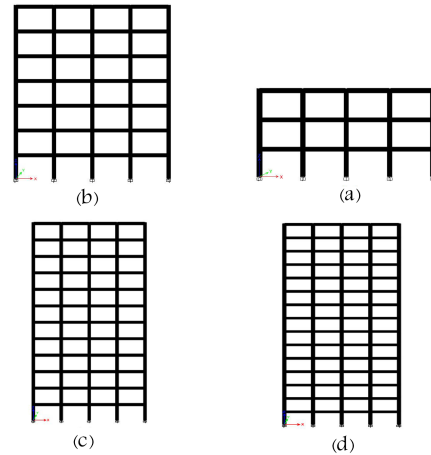
گرامی و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر خمستگی کم‌چرخه در قاب خمشی فولادی با اتصال‌های صلب از پیش تأیید شده‌ی فلنجی را بررسی کردند. روش به کار رفته جهت شمارش چرخه‌ها، روش جریان بارش^{۲۲} بوده است، که در سال ۱۹۶۸ توسط اندو^{۲۳} معرفی و به طور گسترده‌ی در زمینه‌ی شمارش چرخه‌ی خمستگی در مهندسی سازه استفاده شده است.

نتایج نشان داد لزوماً زلزله با بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت، عامل ایجاد عضو بحرانی نیست و ممکن است زلزله با بیشینه‌ی شتاب کمتر، خمستگی بیشتری به دست آورد.^[۲۳]

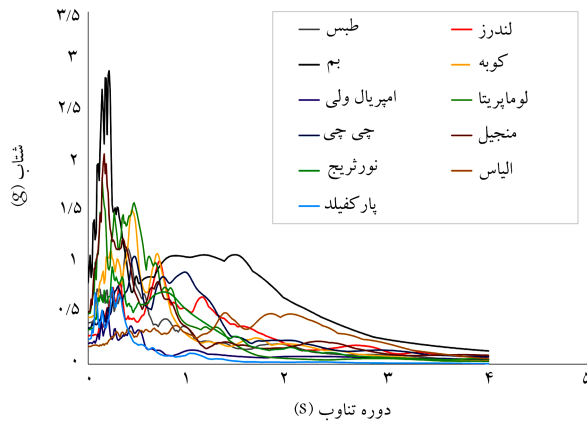
در ادامه، در سال ۲۰۱۸ گرامی و همکاران در مطالعات دیگری یک ساختمان ۷ طبقه با قاب‌های خمشی فولادی با اتصال RBS^{۲۴} را بررسی کردند و دریافتند که پدیده‌ی خمستگی کم‌چرخه و کم‌چرخه‌ی شدید در قاب‌های خمشی فولادی با اتصال RBS تأثیرگذار است و احتیاج به بررسی‌های بیشتری دارد. همچنین در

جدول ۱. شتاب نگاشت های انتخابی.

شتاب نگاشت	بیشینه ی شتاب (برحسب g)	تاریخ وقوع
الیاس	۰٫۱۷۶	۱۹۷۹/۲/۲۸
امپریال ولی	۰٫۲۰۵	۱۹۷۹/۱۰/۱۵
پارکفیلد	۰٫۲۴۷	۲۰۰۴/۹/۲۸
لندرز	۰٫۲۸۴	۱۹۹۲/۶/۲۸
نورثریج	۰٫۳۴۴	۱۹۹۴/۱/۱۷
چی چی	۰٫۳۶	۱۹۹۹/۹/۲۰
طیس	۰٫۴۰۹	۱۹۷۸/۹/۱۶
کوبه	۰٫۴۶۴	۱۹۹۵/۱/۱۶
لوما	۰٫۵	۱۹۸۹/۱۰/۱۸
منجیل	۰٫۵۱۴	۱۹۹۰/۶/۲۰
م	۰٫۸۰۷	۲۰۰۳/۱۲/۲۶



شکل ۱. قاب های مطالعه شده.



شکل ۲. نمودار طیف پاسخ شتاب نگاشت ها.

۲.۲. تحلیل سازه های مطالعه شده

سازه ها به منظور تحلیل و طراحی برای انجام تحلیل تاریخی زمانی، در نرم افزار ETABS مدل سازی شده و به دلیل وجود تقارن، فقط یک قاب از هر سازه مطالعه شده است.

سازه ها تحت تحلیل تاریخی زمانی خطی قرار گرفتند. سپس تاریخی تنش تیرها و ستون ها به دست آمد. مقادیر تنش ها با تقسیم لنگر خمشی ایجاد شده در هر عضو (M) بر مدول ارتجاعی مقطع (S) به دست آمده اند.

۳. نمودار عمر خستگی S-N

تنش های تیرها و ستون ها، دامنه ی هارمونیک ثابتی ندارند. لذا برای بررسی اثر خستگی باید از روش های قابل اعمال به محدوده ی تنش متغیر استفاده شود. در واقع مطالعات مربوط به روش های مختلف بررسی خستگی نشان می دهد می توان از قانون خسارت خطی، که به طور عمده در مهندسی عمران به کار می رود، استفاده کرد. از این رو روش استفاده شده در پژوهش حاضر، روش جامع پالمگرن - ماینر بوده است، که اولین بار توسط پالمگرن^{۲۵} در سال ۱۹۲۴ ارائه شد و سپس در سال ۱۹۴۵ توسط ماینر^{۲۶} گسترش داده شد. در روش پالمگرن - ماینر، آسیب حاصل از هر محدوده ی تنش، یک تابع خطی از تعداد چرخه ها در آن محدوده ی تنش است.

مطالعات دیگری نشان دادند که با کاهش مدت زمان دوام زمین لرزه، عمر خستگی اتصال ها افزایش می یابد.^[۲۳-۲۷]

با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون مطالعات کاملی جهت بررسی اثر خستگی کم چرخه در رفتار لرزه یی اتصال مستقیم تقویت نشده ی جوشی (WUF-W) و اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) و مقایسه ی آنها صورت نگرفته است. لذا در نوشتار حاضر، ابتدا نمودارهای عمر - خستگی اتصال های WUF-W و RBS بر اساس فولاد رایج در ایران (ST۳۷) استخراج و سپس به بررسی رفتار اتصال های اشاره شده پرداخته شده است.

۲. سازه های مطالعه شده

جهت بررسی اثر خستگی در سازه های با ارتفاع کم، متوسط و زیاد، چهار سازه ی فولادی با ارتفاع های متفاوت در نظر گرفته شده است. ساختمان ها، ۳، ۷، ۱۲ و ۱۵ طبقه بودند. طراحی سازه ها طبق روش حالت حدی مقاومت انجام شده است. چهار قاب ۴ دهانه با سیستم مقاوم جانبی، قاب خمشی متوسط، از نوع سازه های مسکونی، خاک نوع IV و در منطقه با خطر نسبی زیاد طراحی شدند. همچنین دهانه ی بحرانی با توجه به بالاتر بودن نسبت تقاضا به ظرفیت تعیین شده است. مقاطع استفاده شده برای طراحی ستون ها از نوع IPB و در تیرها IPE بوده و از اتصال های از پیش تأیید شده ی موجود در آیین نامه (اتصال های WUF-W و RBS) استفاده شده است. بارگذاری و طراحی سازه ها طبق مباحث ۶ و ۱۰ مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ صورت گرفت.^[۲۸-۳۰] در شکل ۱، قاب های مطالعه شده مشاهده می شوند.

جهت به دست آوردن تاریخی تنش ها، سازه ها تحت ۱۱ رکورد زلزله ی مختلف قرار گرفتند. با انجام تحلیل تاریخی زمانی، تاریخی تنش سازه ها به دست آمد (فولاد مصرفی از نوع ST۳۷ بوده است).

۱.۲. مشخصات شتاب نگاشت های استفاده شده

جهت بررسی اثر زلزله های مختلف برای انجام تحلیل ها، ۱۱ شتاب نگاشت مختلف مطابق جدول ۱ و طبق استاندارد ۲۸۰۰، مقیاس سازی و استفاده شده است. طیف پاسخ شتاب نگاشت ها نیز در شکل ۲ مشاهده می شود.

لذا آسیب خستگی نهایی مطابق رابطه‌ی ۱ به صورت تمام آسیب‌های ناشی از سطوح تنش مختلف است:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

که در آن:

n_i : تعداد چرخه‌ها در تراز تنش i (از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی)؛

N_i : تعداد چرخه‌های مربوط به خرابی در تراز تنش i (از نمودار S-N).

طبق قانون پالمگرن - ماینر، شکست ناشی از خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که مجموع عمر خستگی کسرهای طبق رابطه به مقدار ۱ برسد. در مطالعه‌ی حاضر، نسبت $\frac{n_i}{N_i}$ شاخص خستگی تجمعی نامیده شده است.

۱.۳. ضریب تمرکز تنش

دو اتصال WUF-W و RBS در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی و یک بار منفرد نیز در انتهای تیر وارد شد. نوع المان در نرم‌افزار، از نوع solid در نظر گرفته شده است. متریال در نرم‌افزار دو خطی و جهت لحاظ کردن آثار جوش، قید tie استفاده شده است. تحلیل‌های استاتیکی خطی بر روی اتصال‌ها انجام شد. هدف به دست آوردن ضریب تمرکز تنش مربوط به هندسه‌ی جزئیات اتصال‌ها بوده است. این ضریب که با عنوان SCF در پژوهش حاضر بیان می‌شود، به صورت نسبت بیشینه‌ی تنش مشاهده شده ناشی از آنالیزهای اجزاء محدود به بیشینه‌ی تنش خمشی در تیر محاسبه شده است. ضریب تمرکز تنش جهت تبدیل نتایج آزمایش یک نوع اتصال به نوعی دیگر از اتصال‌ها از طریق نسبت ضریب SCF دو اتصال استفاده می‌شود. شکل ۳، مدل اجزاء محدود دو اتصال WUF-W و RBS و شکل ۴، کانتورهای تنش را در آباکوس نشان می‌دهد.

با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل، در اتصال RBS مقدار SCF ناشی از هندسه‌ی اتصال برابر ۱٫۲۵ و در اتصال WUF-W برابر ۱٫۵ و SCF ناشی از جوش نیز برابر ۲٫۴ محاسبه شده است. در نتیجه، SCF در ناحیه‌ی چرخه‌ی زیاد می‌تواند به این صورت نوشته شود:

$$SCF(RBS) = ۱٫۲۵ * ۲٫۴ = ۳$$

$$SCF(WUF - W) = ۱٫۵ * ۲٫۴ = ۳٫۶$$

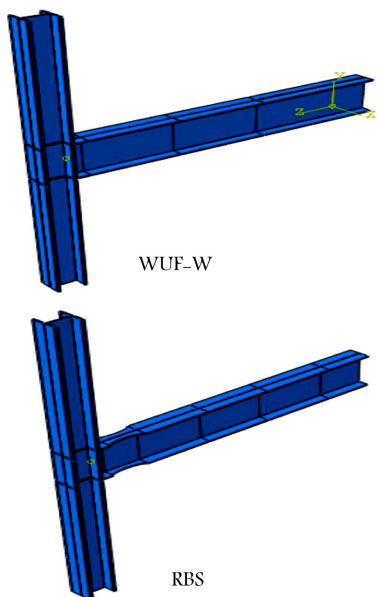
در قسمت پُرچرخه با استفاده از نمودارهای موجود در کارنستار^{۲۷} و همچنین ضریب تمرکز تنش به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود، نمودار عمر خستگی S-N به دست آمد.

چول هو^{۲۸} و همکاران (۲۰۰۴)، در کار خود به بررسی رفتار چرخه‌ی اتصال RBS پرداختند. نتایج این کار برای توسعه‌ی نمودار S-N در ناحیه‌ی کم‌چرخه استفاده شده است.^[۲۹]

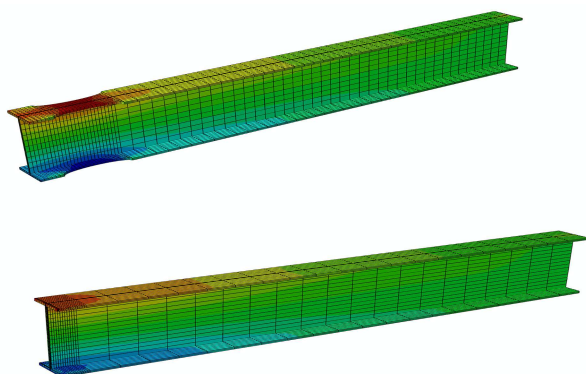
برای اتصال WUF-W در ناحیه‌ی کم‌چرخه، نوشتار هان و همکاران،^[۱۷] استفاده شده است. با استفاده از نمودار نستار و ضریب تمرکز تنش برای هر اتصال و همچنین نتایج مطالعات نمودار S-N برای دو اتصال WUF-W و RBS به دست آمده است. در روابط ۲ و ۳، فرمول‌های حاصل از منحنی‌های S-N ارائه شده است:

$$S = ۴۰۵۲٫۶ N^{-۰٫۱۲۳}; S > ۴۲۷٫۴۶; (N < ۶۸۰۰۰۰۰)$$

$$S = ۷۲۱۶۰ N^{-۰٫۲۲۶}; S < ۴۲۷٫۴۶; (N > ۶۸۰۰۰۰۰) \quad (2)$$



شکل ۳. مدل اجزاء محدود دو اتصال مطالعه شده‌ی WUF-W و RBS.



شکل ۴. کانتور تنش دو اتصال مطالعه شده‌ی WUF-W و RBS.

(ب) اتصال RBS

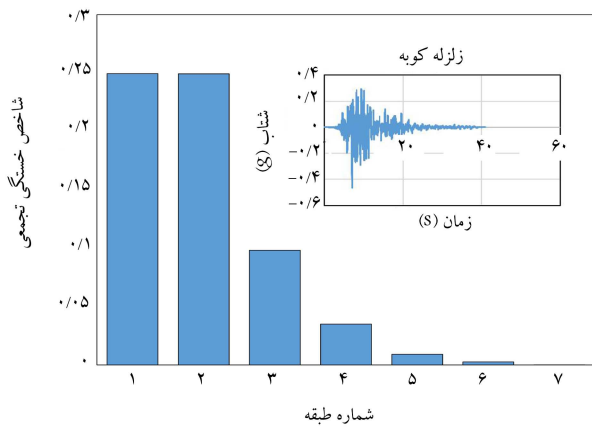
$$S = ۴۰۷۳٫۵ N^{-۰٫۱۲۹}; S > ۵۵۱٫۰۶; (N < ۵۴۲۸۰۰۹)$$

$$S = ۴۰۷۳٫۵ N^{-۰٫۲۲۲}; S < ۵۵۱٫۰۶; (N > ۵۴۲۸۰۰۹) \quad (3)$$

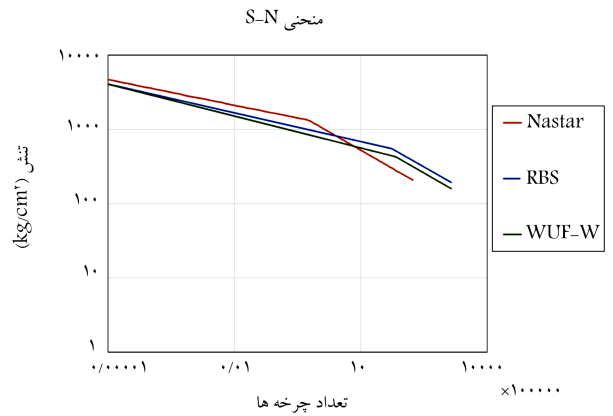
که در آنها، N تعداد سیکل‌های خرابی و S تنش بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. در شکل ۵، منحنی‌های S-N به دست آمده مشاهده می‌شود.

۲.۳. روش شمارش تعداد چرخه

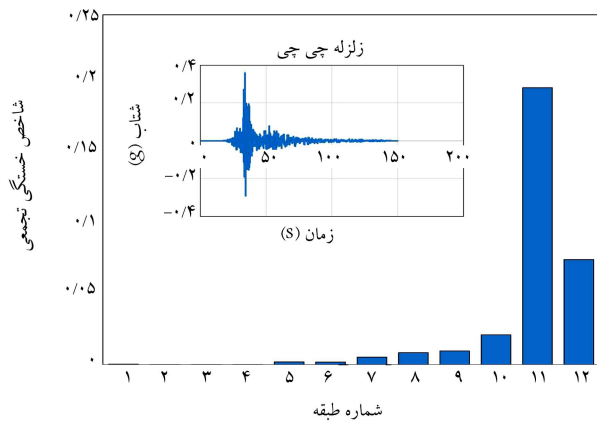
با توجه به این‌که تاریخچه‌ی تنش در تیرها و ستون‌ها پیچیده است، جهت تبدیل دامنه‌ی تنش‌های نامنظم به مقدار ثابت معادل از روش شمارش چرخه استفاده می‌شود. نتایج تاریخچه‌ی تنش تیرها و ستون‌ها وارد نرم‌افزار متلب^{۲۹} شده و با استفاده از کد موجود برای روش جریان بارش، نتایج جریان بارش تیرها و ستون‌ها به دست آمد. در شکل ۶، نمونه‌ی از جریان بارش مربوط به تیر بحرانی مشاهده می‌شود.



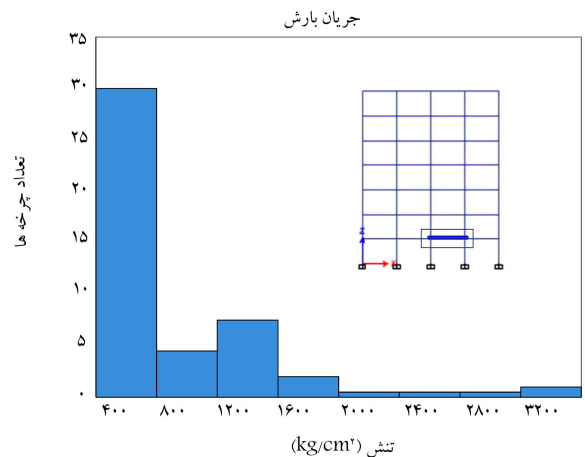
شکل ۷. مقادیر خستگی تجمعی تیرها - سازی ۷ طبقه در اتصال WUF-W.



شکل ۵. منحنی S-N دو اتصال WUF-W و RBS.



شکل ۸. مقادیر خستگی تجمعی ستون‌ها - سازی ۷ طبقه در اتصال WUF-W.



شکل ۶. جریان بارش تیر طبقه اول سازی ۷ طبقه (زلزله کوبه).

در جدول ۲، مقادیر حاصل از تحلیل خستگی تجمعی در ستون‌های سازی ۱۲ طبقه تحت زلزله چی چی در اتصال WUF-W ارائه شده است. مقدار شاخص خستگی در ستون طبقه یازدهم از سایر طبقات بیشتر بوده است، که علت آن را می‌توان اثر مودهای بالاتر و همچنین بیشتر بودن تنش در نمودارهای جریان بارش در طبقه یازدهم نسبت به سایر طبقات دانست.

۱.۴. مقایسه‌ی مقادیر شاخص خستگی تیر بحرانی در سازی ۷ طبقه در اتصال WUF-W

با توجه به این‌که تیر طبقه اول در سازی ۷ طبقه بحرانی است، در این قسمت مقادیر شاخص خستگی تجمعی در تیر طبقه اول در سازی ۷ طبقه تحت زلزله‌های مختلف مقایسه شده است، تا تأثیر شتاب‌نگاشت‌های مختلف ارزیابی شود. در شکل ۹، نمودارهای مقایسه‌ی شاخص خستگی تجمعی تیر بحرانی سازی ۷ طبقه مشاهده می‌شود.

تأثیر شتاب‌نگاشت‌های مختلف در تیر طبقه اول سازی ۷ طبقه ناچیز بوده و دو زلزله کوبه و ایستگاه الیاس، بالاترین آسیب خستگی را ایجاد کرده‌اند.

۲.۴. مقایسه‌ی مقادیر شاخص خستگی ستون بحرانی در سازی ۱۲ طبقه در اتصال WUF-W

ستون طبقه یازدهم در سازی ۱۲ طبقه، بحرانی شده است. لذا برای مقایسه‌ی

۴. تحلیل خستگی تجمعی

تحلیل خستگی تجمعی با استفاده از قانون پالمگرن - ماینر انجام می‌شود، که مطابق آن، برای هر سازه و تحت زلزله‌های مختلف با استفاده از نتایج موجود از جریان بارش، تعداد سیکل‌ها (m_i) و نیز با استفاده از روابط حاصل از منحنی‌های S-N، مقادیر N_i به دست آمده‌اند. در هر بازه تنش طبقه رابطه پالمگرن - ماینر با تقسیم مجموع تعداد سیکل‌های m_i بر N_i ، مقادیر شاخص خستگی تجمعی به دست می‌آید.

در شکل‌های ۷ و ۸، نمودارهای شاخص خستگی تجمعی مربوط به تیر و ستون بحرانی به ترتیب در سازی ۷ و ۱۲ طبقه نشان داده شده‌اند. با مقایسه‌ی شاخص خستگی تجمعی در تیر طبقه اول سازی ۷ طبقه تحت زلزله کوبه پیشینه بوده است، که مربوط به اتصال WUF-W است.

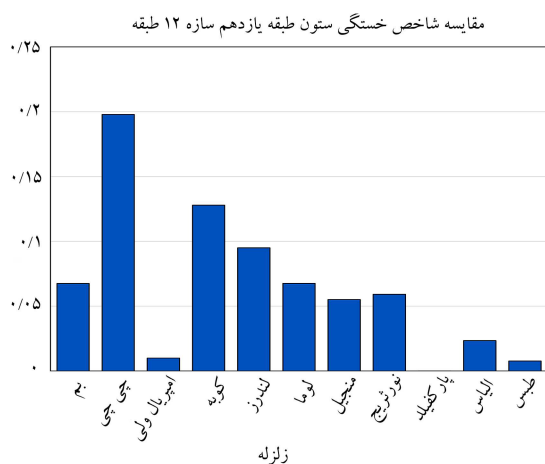
همچنین شاخص خستگی تجمعی در ستون طبقه یازدهم سازی ۱۲ طبقه در اتصال WUF-W تحت زلزله چی چی، مقدار پیشینه گزارش شده است. در سازی ۷ طبقه، مقادیر شاخص خستگی تجمعی در تیرهای طبقه‌های اول و دوم از سایر طبقات بیشتر بوده است، که می‌تواند به دلیل بالاتر بودن تنش در طبقات اول و دوم طبق نمودار جریان بارش باشد.

در شکل ۸، نتایج مقادیر خستگی تجمعی ستون‌های سازی ۱۲ طبقه مشاهده می‌شود.

جدول ۲. تحلیل خستگی تجمعی در ستون‌های سازه‌ی ۱۲ طبقه.

تعداد چرخه‌ها (N_i)							
۴۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰	۲۴۰۰	۲۸۰۰	۳۲۰۰
۸۳۳۶۲۵۴	۸۴۹۳۳,۱	۴۹۸۵,۰۵	۶۶۶,۷۶۴	۱۴۰,۰۴۹	۳۹,۱۳۵	۱۳,۳۱۷	۵,۲۳۴۴۱

طبقه	مود	تعداد چرخه‌ها (n_i)								Sum(n_i/N_i)
		۴۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰	۲۴۰۰	۲۸۰۰	۳۲۰۰	
۱	همه مودها	۸۸	۳	۱,۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۳۴۶۷۷۸
۲	همه مودها	۷۲	۰,۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۰۴۵۲۴
۳	همه مودها	۱۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۰۱۲۱۵
۴	همه مودها	۱۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۰۱۴۳۹
۵	همه مودها	۶۳,۵	۵,۵	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۱۹۷۳۳۵۴
۶	همه مودها	۷۱,۵	۳,۵	۱,۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۱۸۵۰۴۶۶
۷	همه مودها	۵۹	۵,۵	۱	۱	۰,۵	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۵۳۴۲۳۹۵
۸	همه مودها	۴۵,۵	۵	۳	۰,۵	۱	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۸۵۵۶۳۷۸
۹	همه مودها	۴۸,۵	۵,۵	۲	۱,۵	۱	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۹۸۶۱۸۰۶
۱۰	همه مودها	۶۰	۷	۳	۰,۵	۱	۰,۵	۰	۰	۰,۰۰۰۲۱۱۳۵۷۹۵۲
۱۱	همه مودها	۸۶	۶	۳,۵	۲	۱,۵	۰,۵	۱	۰,۵	۰,۱۹۷۸۸۳۱۸۵
۱۲	همه مودها	۱۰۸	۵,۵	۱,۵	۳	۱	۱	۰,۵	۰	۰,۷۵۱۱۶۸۸۲

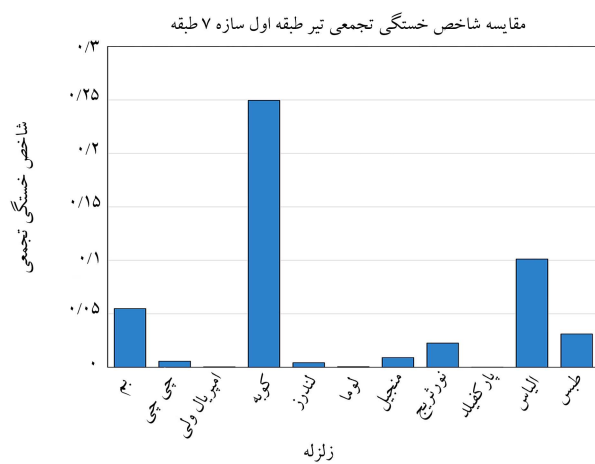


شکل ۱۰. مقادیر شاخص خستگی تجمعی ستون طبقه‌ی یازدهم سازه‌ی ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های مختلف.

۱۲ طبقه، در اتصال‌های مطالعه شده داشته‌اند. در واقع طیف پاسخ شتاب زلزله‌های اخیر نیز نمایانگر موضوع اشاره شده است.

۳.۴. نتایج جامع تحلیل خستگی تجمعی

با انجام تحلیل‌های خستگی تجمعی در سازه‌های مطالعه شده، این نتایج در ادامه ارائه شده است. با مقایسه‌ی مقادیر شاخص خستگی تجمعی مشاهده می‌شود که تیر طبقه‌ی اول سازه‌ی ۷ طبقه تحت زلزله‌ی کوبه بیشینه بوده است، که مربوط به



شکل ۹. مقادیر شاخص خستگی تجمعی تیر طبقه‌ی اول - سازه‌ی ۷ طبقه تحت زلزله‌های مختلف.

اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف بر ستون طبقه‌ی یازدهم سازه‌ی ۱۲ طبقه، شکل ۱۰ ارائه شده است.

نتایج نمودار نشان می‌دهد که بیشینه‌ی آسیب خستگی در ستون طبقه‌ی یازدهم سازه‌ی ۱۲ طبقه، مربوط به زلزله‌ی چی‌چی است. همچنین مقدار محاسبه شده‌ی عمر مصرف شده‌ی اتصال تحت زلزله‌ی کوبه، ۱۲,۷۹٪ است. با توجه به طیف پاسخ شتاب‌نگاشت زلزله‌ها نیز نتایج اخیر قابل انتظار بوده است. دو زلزله‌ی امپریال ولی و پارکفیلد تقریباً تأثیر بسیار ناچیزی در ستون‌های سازه‌ی

تیر طبقه اول در سازه ۷ طبقه تحت زلزله کوبه، بحرانی بوده و با میزان شاخص خستگی ۲۴/۹۵٪، بیشترین آسیب را متحمل شده است.

ب) نتایج تحلیل خستگی تجمعی در ستون‌های بحرانی

در سازه ۳ طبقه در هر دو اتصال ستون طبقه دوم نیز تحت زلزله چی چی، بیشینه میزان خستگی تجمعی مشاهده می‌شود. در سازه ۷ طبقه نیز زلزله چی چی، بیشترین شاخص خستگی را در ستون طبقه هفتم ایجاد کرده است. ستون طبقه یازدهم سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله چی چی بحرانی بوده و در آن نیز، اتصال RBS بهتر عمل کرده است.

در سازه ۱۵ طبقه زلزله نورث ریج بر ستون طبقه یازدهم در هر دو اتصال WUF-W و RBS، بیشینه مقدار خستگی تجمعی را ایجاد کرده است. شاخص مذکور در اتصال WUF-W، مقدار ۱/۴۴ برابر اتصال RBS است.

در ستون‌ها، ستون طبقه یازدهم سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله چی چی با مقدار ۱۹/۷۹٪، بیشترین میزان شاخص خستگی تجمعی را به خود اختصاص داده است.

با توجه به این‌که در سازه‌های مورد مطالعه در ستون‌ها میزان شاخص خستگی تجمعی در ستون‌های طبقات آخر به میزان بیشینه است، می‌توان علت را آثار مودهای بالاتر در سازه‌ها نسبت به مودهای اول دانست.

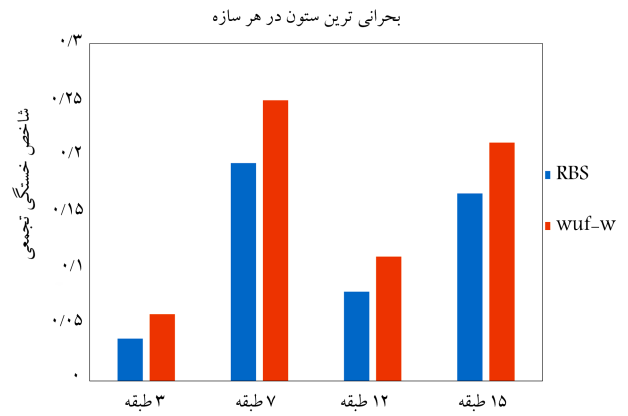
میزان بیشینه شاخص خستگی در تیرها در هر دو اتصال و تحت زلزله‌های مختلف، در تیر طبقه اول سازه ۷ طبقه بوده است، که در اتصال WUF-W، ۱/۲۹ برابر اتصال RBS است. شاخص خستگی تحت زلزله کوبه، بحرانی بوده است؛ بنابراین انتظار می‌رود ساختمان‌هایی در محدوده ارتقاعی ذکر شده، تحت زلزله‌هایی مشابه با زلزله کوبه، آسیب‌پذیر باشند.

میزان بیشینه شاخص خستگی در ستون‌ها در هر دو اتصال و تحت زلزله‌های مختلف، در ستون طبقه یازدهم مشاهده می‌شود، که در اتصال WUF-W، ۱/۳۴ برابر اتصال RBS بوده است. همچنین با توجه به این‌که شاخص خستگی تحت زلزله چی چی بحرانی بوده است، می‌توان نتیجه گرفت سازه‌های بلندمرتبه تا حدود ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های با مشخصات مشابه زلزله چی چی، آسیب و خرابی ناشی از خستگی از خود نشان می‌دهند.

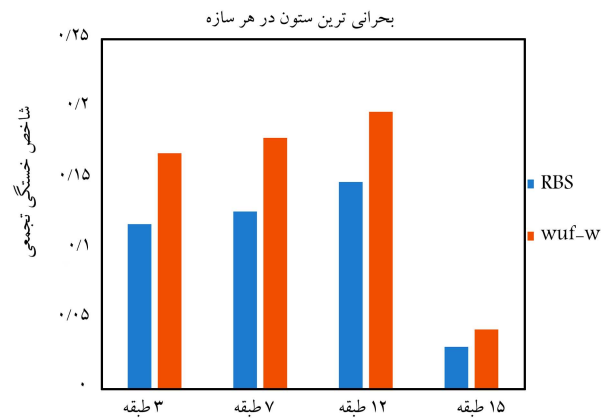
۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر خستگی کم‌چرخه در ۴ سازه با اتصال‌های WUF-W و RBS با ارتفاع‌ها و زلزله‌های مختلف بررسی شده است. با تعیین شاخص خستگی تجمعی، نتایج حاصل در تیرها و ستون‌های سازه‌ها و همچنین مقایسه عملکرد سازه‌ها نسبت به هم صورت گرفته و این نتایج به دست آمده است:

- با مقایسه نتایج تحلیل‌های خستگی به وضوح مشخص است در تمامی سازه‌ها، اتصال RBS عملکرد بهتری نسبت به اتصال WUF-W داشته است.
- برای تیر بحرانی سازه‌ها، بیشینه مقدار شاخص خستگی برای سازه ۳ طبقه، ۵۹٪ به دست آمده است، که با افزایش ارتفاع سازه تا مقدار ۲۴٪ (۳۰٪) افزایش یافته است. مقادیر اخیر برای ستون بحرانی در سازه ۱۵ طبقه، ۴۲٪ بوده است، که در سایر سازه‌ها تا مقدار ۱۹۷٪ (۳۷٪) نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی بحرانی ترین تیر در هر سازه در دو اتصال WUF-W و RBS.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی بحرانی ترین ستون در هر سازه در دو اتصال WUF-W و RBS.

اتصال WUF-W است. در شکل ۱۱، بحرانی ترین تیر در هر سازه تحت زلزله چی چی بیشینه اثر را داشته است، مشاهده می‌شود. در شکل ۱۲، بحرانی ترین ستون در هر سازه تحت زلزله کوبه بیشینه اثر را داشته است، مشاهده می‌شود. نتایج جامع تحلیل خستگی به این شرح است:

الف) نتایج تحلیل خستگی تجمعی در تیرهای بحرانی

در سازه ۳ طبقه، تیر طبقه اول در اتصال WUF-W، بیشترین شاخص خستگی را داشته، که تحت زلزله چی چی بوده است. همچنین نتایج در سازه ۷ طبقه حاکی از آن است که زلزله کوبه، بیشترین تأثیر را در تیر طبقه اول در هر دو اتصال گذاشته است.

بررسی نمودارهای تحلیل سازه ۱۲ طبقه نشان می‌دهد زلزله چی چی، بیشینه شاخص خستگی تجمعی را در تیر طبقه ششم در اتصال WUF-W و زلزله بی، بیشینه مقدار خستگی تجمعی را در تیر طبقه دوم در اتصال RBS ایجاد کرده است.

با بررسی نتایج تحلیل‌های خستگی بر سازه ۱۵ طبقه مشاهده می‌شود که تیر طبقه سوم در هر دو اتصال WUF-W و RBS تحت زلزله بی بیشترین میزان شاخص خستگی تجمعی را داشته است. با توجه به طیف پاسخ شتاب زلزله بی هم نیز این نتیجه قابل انتظار بوده است.

- با توجه رعایت اصل تیر ضعیف - ستون قوی در طراحی، مقادیر شاخص خستگی تیرها نسبت به ستون‌ها بیشتر است. بنابراین سختی اعضاء سازه می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش خرابی ناشی از خستگی در زلزله ایفا کند.
- نتایج حاصل از تحلیل‌های خستگی جمعی مستقیماً تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌ها نیستند. به این معنی که لزوماً زلزله با بیشترین شتاب، اثر بیشینه نداشته است. تأثیر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی چی‌چی با توجه به بیشینه‌ی شتاب کمتر نشان می‌دهد که علت این امر را می‌توان مدت دوام زلزله برشمرد.
- بالا بودن میزان شاخص خستگی در ستون‌های طبقات آخر سازه‌ها، نشان‌دهنده‌ی اثر موده‌های بالاتر در سازه‌هاست.
- با استفاده از نتایج تحلیل‌های خستگی کم‌چرخه، عمر باقی‌مانده‌ی خستگی تخمین زده می‌شود؛ لذا در زلزله‌های پیایی می‌توان به آن توجه کرد.
- خستگی کم‌چرخه، نقش مهمی در آسیب‌های ناشی از زلزله در هر ۴ سازه داشته و لازم است در آیین‌نامه‌های طراحی به آن توجه بیشتری شود. همچنین با توجه به عملکرد دو اتصال WUF-W و RBS، نیاز به توجه بیشتری به بحث خستگی در آیین‌نامه‌ها به ویژه نسبت به اتصال WUF-W است.

پانویس‌ها

1. Norman E. Dowling
 2. Federico M. Mazzolani
 3. Ricardo Herrera
 4. Griffith
 5. Krawinkler
 6. Partridge
 7. Allen
 8. Richard
 9. Radau
 10. Sumner
 11. Zhou
 12. cyclic void growth model
 13. Hanji
 14. Zambrano
 15. Mendes
 16. Castro
 17. Ajay Kulkarni
 18. Han
 19. welded unreinforced flange-welded web
 20. Carpinteri
 21. Benoit
 22. rainflow
 23. Endo
 24. reduce beam section
 25. Palmgren
 26. Miner
 27. Nastar
 28. Cheol-Ho
 29. MATLAB
-
- ### منابع (References)
1. Dowling, N.E. "Mechanical behavior of materials: engineering methods for Deformation, Fracture, and Fatigue", *Pearson* (2012).
 2. Mazzolani, F. and Gioncu, V. "Behaviour of steel structures in seismic areas", *CRC Press* (2014).
 3. Nastar, N. "The effect of higher modes on earthquake fatigue damage to steel moment frames", *Ph.D. Thesis, North Carolina State University, U.S* (2008).
 4. Partridge, J., Paterson, S. and Richard, R. "Low cycle fatigue tests and fracture analyses of bolted-welded seismic moment frame connections", *In STESSA 2000, 3rd International Conference*, pp. 21-24 (2000).
 5. Partridge, J.E., Paterson, S.R. and Richard, R.M. "ATC-24 cumulative damage tests and fracture analyses of bolted-welded seismic moment frame connections", *Forensic Engineering*, **2003**, pp. 142-157 (2003).
 6. Sumner, E.A. "Unified design of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading", *Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University* (2003).
 7. Deylami, A. and Moslehi Tabar, A. "Experimental study on the key issues affecting cyclic behaviour of reduced beam section moment connections", *Proc. Of 14th World Conference on Earthquake Engineering (14 WCCE)*, Beijing, China (2008).
 8. Ashrafi, Y., Rafezy, B. and Howson, W.P. "Evaluation of the performance of reduced beam section (RBS) connections in steel moment frames subjected to cyclic loading", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, **2**, pp. 1-3 (2009).
 9. Saiprasertkit, K., Hanji, T. and Miki, Ch. "Local strain estimation method for low-and high-cycle fatigue strength evaluation", *International Journal of Fatigue*, **40**, pp. 1-6 (2012).
 10. Amiri, H., Aghakouchak, A., Shahbeyk, S. and et al. "Finite element simulation of ultra low cycle fatigue cracking in steel structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **89**, pp. 175-184 (2013).
 11. Zhou, H., Wang, Y., Shi, Y. and et al. "Extremely low cycle fatigue prediction of steel beam-to-column connection by using a micro-mechanics based fracture model", *International Journal of Fatigue*, **48**, pp. 90-100 (2013).
 12. Hanji, T., Park, J.-E. and Tateishi, K. "Low cycle fatigue assessments of corner welded joints based on local strain approach", *International Journal of Steel Structures*, **14**(3), pp. 579-587 (2014).
 13. Zambrano, A. and Foti, D. "Damage indices evaluation for seismic resistant structures subjected to low-cycle fa-

- tigue phenomena”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **78**, pp. 106-117 (2014).
14. Mendes, L.A. and Castro, L.M. “A simplified reinforcing steel model suitable for cyclic loading including ultra-low-cycle fatigue effects”, *Engineering Structures*, **68**, pp. 155-164 (2014).
 15. Swati, A.K. and Gaurang, V. “Study of steel moment connection with and without reduced beam section”, *Case Studies in Structural Engineering*, **1**, pp. 26-31 (2014).
 16. Zhou, H., Wang, Y., Yang, L. and et al. “Seismic low-cycle fatigue evaluation of welded beam-to-column connections in steel moment frames through global-local analysis”, *International Journal of Fatigue*, **64**, pp. 97-113 (2014).
 17. Han, S.W., Moon, K.H. and Jung, J. “Cyclic performance of welded unreinforced flange-welded web moment connections”, *Earthquake Spectra*, **30**(4), pp. 1663-1681 (2014).
 18. Han, S.W., Jung, J. and Ha, S.J. “Seismic performance of WUF-W moment connections according to access hole geometries”, *Earthquake Spectra*, **32**(2), pp. 909-926 (2016).
 19. Carpinteri, A., Ronchei, C., Scorza, D. and et al. “Fatigue life estimation for multiaxial low-cycle fatigue regime: the influence of the effective poisson ratio value”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **79**, pp. 77-83 (2015).
 20. Kashani, M.M., Barmi, A.K. and Malinova, V.S. “Influence of inelastic buckling on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars”, *Construction and Building Materials*, **94**, pp. 644-655 (2015).
 21. Benoit, A., Rémeu, L., Köster, A. and et al. “Experimental investigation of the behavior and the low cycle fatigue life of a welded structure”, *Materials Science and Engineering: A*, **595**, pp. 64-76 (2014).
 22. Han, S.W. and Kim, N.H. “Permissible parameter ranges of access hole geometries for WUF-W connections”, *Earthquake Spectra*, **33**(2), pp. 687-707 (2017).
 23. Gerami, M., Zarei, A. and Ghaderi, M. “Effect of low cycle fatigue on steel moment frames with prequalified rigid connections (bolted unstiffened and stiffened extended end-plate moment connections)”, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **6**(3), pp. 149-162, (In Persian) (2018) .
 24. Ghaderi, M., Gerami, M. and Vahdani, R. “A comparison of seismic low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue on steel moment frames with reduced beam section connection (RBS)”, *International Journal of Fatigue*, **119**, pp. 139-149 (2019).
 25. Ghaderi, M., Gerami, M. and Vahdani, R. “ “Estimated untimated capacity of RBS connections under monotonic and cyclic load using ductile fracture mechanism”, *Sharif Journal Civil Engineering*, **36.2**(1), pp.143-152, Spring (2020).
 26. Ghaderi, M., Gerami, M. and Vahdani, R. “Investigating the effect of extremely low cycle fatigue in steel moment frame with reduced beam section connections”, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **7**(34), pp.5-19, Summer (2020).
 27. Mirzahosseini, M., Gerami, M. and Borhani, A. “Seismic investigation of low cycle cumulative fatigue in steel bending frame joints”, *Iranian Society of Steel Structures*, **11**(17), pp.25-34, (in persian) (2014).
 28. Topic 6 National Building Regulations, “Loads on the building”, *Ministry of Roads and Urban Development, Department of Housing National Regulatory Office* (2012) (in persian).
 29. Topic 10 National Building Regulations, “Design and implementation of steel buildings”, *Ministry of Roads and Urban Development, Department of Housing National Regulatory Office* (2012) (in persian).
 30. Standard No. 2800, *Iranian Code of Practice for Deismic Resistant Design of Buildings*, Standard no.2800 (4th edition) (in persian) (2013).
 31. Lee, C.-H., Jeon, S.-W., Kim, J.-H. and et al. “Seismic performance of reduced beam section steel moment connections: effects of panel zone strength and beam web connection method”, *In 13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-6 (2004).