

## بررسی اثر خستگی کم چرخه شدید تحت بار سیکلی در قابهای خمشی فولادی با اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته بروش رشد و بهم پیوستگی حفره ها

محسن قادری<sup>۱</sup>، محسن گرامی<sup>۲\*</sup>، رضا وهدانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

مطالعات انجام شده بر روی اتصالات آسیب دیده در زلزله های اخیر حاکی از آن بود که خسارت به برخی از سازه ها را نمی توان با استفاده از مکانیزمهای رایج شکست توجیه کرد. این مساله مربوط به اثر خستگی کم چرخه شدید (ELCF) ایجاد شده در اتصالات حیاتی سازه و در نتیجه ایجاد شکست در اتصال مورد بررسی بوده است. در سالهای اخیر تلاشهای تحقیقاتی زیادی برای ایجاد روشی جهت پیش بینی شکست ناشی از خستگی کم چرخه شدید و تفسیر مکانیزم شکست در مواد فلزی و اجزا سازه ای انجام شد و میتوان گفت گسیختگی ناشی از خستگی کم چرخه شدید حالت حدی حاکم بر سازه های فلزی در زلزله های شدید می باشد. از طرف دیگر بعد از زلزله نورتریج، استفاده از اتصالات خمشی دارای تیر با مقطع کاهش یافته که در مطالعات آزمایشگاهی، ظرفیت شکل پذیری مناسبی نشان داده بود، سرعت گسترش یافت. اما مطالعات انجام شده بر روی این نوع اتصال، متمرکز بر ظرفیت اتصال بوده است و بحث خستگی کم چرخه شدید و مکانیزم شکست در این نوع اتصال آنچنان مورد توجه قرار نگرفته است. مطالعه حاضر به بررسی اثر خستگی کم چرخه شدید در آسیب های وارده بر اتصالات با تیرهای دارای مقطع کاهش یافته در قاب های فولادی خمشی با استفاده از روش رشد و بهم پیوستگی حفره ها تحت بار سیکلی (CVGM) متمرکز شده است. در این راستا اثرات خستگی کم چرخه شدید در یک مجتمع تجاری ۶ طبقه فولادی خمشی با تیرهای دارای مقطع کاهش یافته مورد مطالعه قرار گرفت. شاخص شروع ترک بروش CVGM در طبقات مختلف نشان میدهد که اگر چه این شاخص در طبقات چهارم و پنجم بیشترین مقدار را دارد ولی از حد شروع ترک فاصله دارد. بعبارت دیگر اتصالات این سازه نسبت به مساله خستگی کم چرخه شدید تحت رکورد اعمال شده مقاوم بوده دچار گسیختگی ناشی از (ELCF) نخواهند شد.

کلمات کلیدی: خستگی کم چرخه شدید، قاب خمشی فلزی، اتصال تیر با مقطع کاهش یافته، زلزله، گسیختگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.127480.1526	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.127480.1526	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۱۳	۱۳۹۷/۰۲/۰۴
محسن گرامی			*نویسنده مسئول:		
mgerami@semnan.ac.ir			پست الکترونیکی:		

## Investigation the effect of extremely low cycle fatigue in steel moment frames with reduced beam section connections

Mohsen Ghaderi<sup>1</sup>, Mohsen Gerami<sup>2\*</sup>, Reza Vahdani<sup>3</sup>

1- Ph.D. student of Civil-Earthquake dep., Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor of Civil-Earthquake dep., Semnan University, Semnan, Iran

3- Assistant Professor of Civil-Earthquake dep., Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

Studies on damaged connections in recent earthquakes have shown that damage to some of the structures cannot be justified by the use of common failure mechanisms. This is due to the extremely low cyclic fatigue created by the critical cycle on the connections, which leads to a failure in the examined connections. In recent years, a lot of research efforts have been made to create a method for predicting a failure due to extremely low cycle fatigue to interpret the failure mechanism in steel materials and structural components. It can be said that the failure is due to the extremely low cycle fatigue state governing the steel structures in severe earthquakes. On the other hand, after the Northridge earthquake, the use of moment connection with reduced beam section, which showed good ductility in laboratory studies, expanded rapidly. But studies on this kind of connection have focused on capacity, and the extremely low cycle fatigue and failure mechanisms in this type of connection have not been considered. The present study focuses on the effect of extremely low cyclic fatigue on damaged connections with reduced beam section beams in moment steel frames. In this regard, the effects of extremely low cyclic fatigue were studied in a 6-story steel moment frame complex with reduced beam sections. Comparison of the indices of start cracking by extremely low cycle fatigue in different floor showed that this index is far from the beginning of the failure. In other words, the connections with reduced beam sections in this structure will not damage by extremely low cycle fatigue.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 24 April 2018

Revise Date: 04 August 2018

Accept Date: 02 October 2018

### Keywords:

Extremely low cycle fatigue

Steel moment frame

Reduced beam section

Connection

Earthquake

Failure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.127480.1526

\*Corresponding author: Mohsen Gerami..

Email address: mgerami@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

یکی از پیامدهای عمده ای زلزله نورث ریج، آسیب گسترده اتصالاتی بود که به صورت جوش یا پیچ در سایت ساخته شده بودند و به عنوان اتصالات پیش از زلزله نورث ریج دسته بندی می شدند. قبل از زلزله نورث ریج، سیستم های قاب خمشی دارای رفتار شکل پذیر تلقی می شد و تصور بر آن بود که در سیکل های بسیار شدید نیز در برابر خستگی مقاوم باشند و در نتیجه خستگی در طراحی قاب های خمشی لحاظ نمی شد. با توجه به رویکرد جدید آیین نامه ها مبنی بر طراحی بروش حالت حدی و همچنین بررسی سطوح عملکردی در طراحی سازه ها، میتوان گفت گسیختگی ناشی از خستگی کم چرخه شدید حالت حدی حاکم بر عملکرد سازه های فلزی در زلزله های شدید می باشد. خستگی کم چرخه شدید با دامنه های کرنش پلاستیک زیاد (چندین برابر کرنش پلاستیک) و تعداد سیکل های بسیار کم (معمولا کمتر از ۱۰ تا ۲۰ سیکل) مشخص می گردد [1]. خستگی کم چرخه شدید<sup>۱</sup> (ELCF) ماهیتی کاملا متفاوت نسبت به خستگی کم چرخه<sup>۲</sup> (LCF) و خستگی پر چرخه<sup>۳</sup> (HCF) دارد. گسیختگی در خستگی پر چرخه در تعداد سیکل های زیاد (بیش از ۱۰<sup>۴</sup>) و تنش کمتر از تنش پلاستیک رخ می دهد و در خستگی کم چرخه گسیختگی در تعداد سیکل متوسط (حدود ۱۰<sup>۲</sup> تا ۱۰<sup>۴</sup>) و تنش در حدود تنش پلاستیک رخ میدهد [1].

بیشتر انهدام های سازه های فلزی تحت زلزله بر اثر شکست در اعضای اصلی سازه ایجاد میگردد. شکست در سازه های فولادی در طی رخداد زلزله نورث ریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵ باعث شد شروع ترک و شکست ناشی از خستگی کم چرخه شدید بعنوان یکی از عوامل اصلی آسیب های مشاهده شد در زلزله شناخته شود. در زلزله کوبه بیش از ۱۰۰ قاب خمشی بررسی شده دچار ترک شدید و یا شکست در اتصال تیر به ستون شده بود و همچنین بیش از ۳۰ ساختمان دچار انهدام کلی و یا جزیی شده بودند (kuwamura 1997) [2]. امروزه شناخت علت و اثرات شکست کلی و جزئی ناشی از ELCF در سازه ها در اثر رخداد زلزله یکی از نیازهای مهم مهندسی سازه و زلزله محسوب میگردد.

تلاش های تحقیقاتی زیادی برای ایجاد روشی جهت پیش بینی شکست ناشی از خستگی کم چرخه شدید در مواد فلزی و اجزا سازه ای انجام شد. آزمایشاتی جهت بررسی شروع ترک در میل های استوانه ای با تو رفتگی تحت بارگذاری یکنواخت توسط کاوامورا<sup>۴</sup> و همکاران انجام شد [2] و رابطه ای بین دامنه و سیکل شکست در بارگذاری یکنواخت پیشنهاد داده شد [3]. یک سری آزمایشات خستگی کم چرخه شدید بر روی اتصالات تیر به ستون و اتصالات ستون به کف ستون تحت بارگذاری با دامنه یکنواخت توسط ساکانو<sup>۵</sup> و همکاران انجام شد [4]. تاتشی<sup>۶</sup> و همکاران روشی برای تست مقاومت خستگی کم چرخه شدید در متریال پایه و متریال جوش ایجاد نمودند. همچنین برای ارزیابی عمر خستگی کم چرخه شدید؛ مدل مکانیک شکستی پیشنهاد و اعتبار سنجی شد [5]. اخیرا<sup>۷</sup> مدل های تعمیم یافته میکرو مکانیک مانند مدل رشد حفره ها<sup>۸</sup> در بارگذاری یکنواخت [6]؛ و مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری سیکلی<sup>۹</sup> جهت باگذاری سیکلی [7]، برای پیش بینی شروع ترک ایجاد شده است. دقت مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری سیکلی با آزمایشاتی بر روی نمونه های استخوان سگی<sup>۹</sup> و blunt notched فلزی تحت بارگذاری سیکلی مورد ارزیابی قرار گرفت [8]؛ و قابلیت کاربرد آن با انجام آزمایشاتی بر روی اتصال جوشی ستون به بیس پلیت تحت بارگذاری سیکلی نشان داده شد [9,10]. همچنین مدل رشد و بهم پیوستگی حفره ها تحت بار سیکلی برای پیش بینی شکست ناشی از خستگی کم چرخه شدید در ناحیه کمانش موضعی اعضای مهاربند در قاب های فلزی مهاربندی شده بکار رفت [11,12]. بر مبنای این روش، طول ترک جمع شونده بر مبنای تاریخچه های زمانی کرنش و تنش سه محوری (نسبت تنش میانگین به تنش ون میسز<sup>۱۰</sup>) محاسبه میشود.

<sup>1</sup> Extremely Low Cycle Fatigue

<sup>2</sup> Low Cycle Fatigue

<sup>3</sup> High Cycle Fatigue

<sup>4</sup> Kuwamura

<sup>5</sup> Sakano

<sup>6</sup> Tateishi

<sup>7</sup> Void Growth Model

<sup>8</sup> Cyclic Void Growth Model

<sup>9</sup> Dog bone

<sup>10</sup> von mises

از طرف دیگر سازه‌های فولادی مدرن و مقاوم در برابر زمین‌لرزه، به منظور جذب انرژی لرزه‌ای؛ برای تغییرشکلهای غیرخطی بزرگ تحت بارهای تناوبی (چرخه‌ای) طراحی می‌شوند. آسیب سازه‌ای، به عنوان یک مکانیزم ضروری برای جذب انرژی، به منظور اطمینان از ایمنی زندگی تحت رخدادهای بزرگ در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، یک سازه (یا اجزای آن، مانند اتصالات فولادی)، معمولاً کمتر از ۱۰ چرخه‌ی کرنش بزرگ را در طول یک زمین‌لرزه تحمل می‌کند. لذا لازم است اطلاع دقیقی از رفتار غیر خطی اتصالات سازه‌های فلزی ایجاد شود تا از یک طرف اتصال سازه توانایی تحمل دورانهای لازم جهت جذب انرژی زلزله‌های شدید را داشته باشد و از طرف دیگر وقتی اتصال تحت دورانهای شدید و یا همان خستگی کم‌چرخه شدید (ELCF) قرار میگیرد دچار ترک و یا گسیختگی ناشی از این نوع خستگی نگردد. مدل رشد چرخه‌ای حفره (CVGM)، به واسطه‌ی شبیه‌سازی تجمع چرخه‌ای رشد حفرات و ادغام آنها با آسیب پیشرونده برای مصالح دارای حفره‌های میانی، فرآیند خستگی کم‌چرخه شدید ULCF را در بر میگیرند. مدل CVGM، بسطی از مدل رشد حفرات برای بارگذاری چرخه‌ای است که هدف آن، غلبه بر فرآیند رشد حفرات با لحاظ کردن سه‌محوری می‌باشد [8,7]. لذا میتوان از این مدل در جهت ارزیابی پدیده ELCF در اتصالات سازه‌ها استفاده نمود.

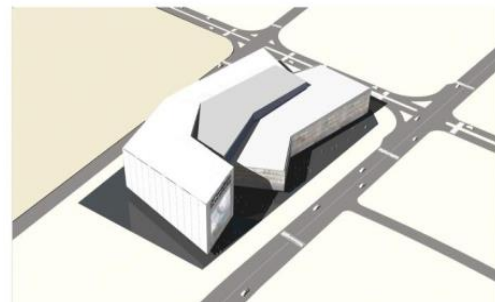
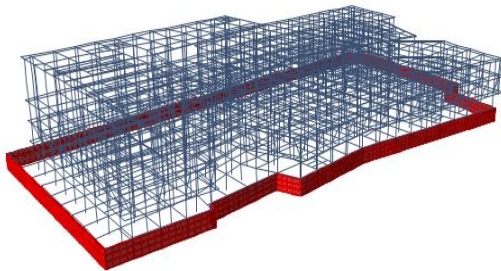
در این پژوهش یک ساختمان تجاری ۶ طبقه داری تیر با مقطع کاهش یافته<sup>۱۱</sup> که بر اساس آیین نامه‌های رایج در سال ۲۰۱۱ طراحی شده است، بطور سه بعدی با استفاده از نرم افزار ETABS 2013 مدل سازی شده است [13]. سپس تحت آنالیز تاریخچه زمانی قرار گرفت. دوران وارده بر هر اتصال تحت رکورد اعمالی بصورت تاریخچه زمانی در هر مد و جمع همه مدها استخراج شده، سپس به مدل سه بعدی ایجاد شده از هر اتصال جهت آنالیز اجزا محدود اعمال می‌شود تا اثر خستگی کم‌چرخه شدید بر اساس مدل رشد حفره‌ها تحت بار سیکلی مشخص گردد. نتایج نشان میدهد اتصالات سازه مورد بررسی تحت رکورد اعمال شده در اثر خستگی کم‌چرخه شدید آسیب نمی‌بیند. عبارت دیگر اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته در این سازه نسبت به مساله خستگی (خستگی کم‌چرخه شدید) تحت رکورد اعمال شده رفتار قابل قبولی نشان میدهند.

## ۲- سازه مورد بررسی

سازه مورد بررسی یک ساختمان تجاری به ابعاد ۱۰۰\*۲۰۰ متر در ۶ طبقه در جزیره کیش ایران می‌باشد. پایین‌ترین کد ارتفاعی ۷٫۴ پایین تر از سطح زمین می‌باشد و بالاترین کد ارتفاعی ۳۰ متر روی زمین می‌باشد. فلز مورد استفاده در پروژه ST-37 می باشد. سازه در پلان نامتقارن می‌باشد و سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی قاب خمشی ویژه می باشد. تمام ستونهای جانبی سازه و دو هسته مرکزی در سازه قاب خمشی ویژه بوده و بقیه اتصالات مفصلی در نظر گرفته شده است.

نوع اتصالات در قاب خمشی ویژه تیر با مقطع کاهش یافته است. در شکل ۱ نمایی سه بعدی از معماری سازه مورد بررسی و سازه مدل شده در نرم افزار ETABS آورده شده است [13].

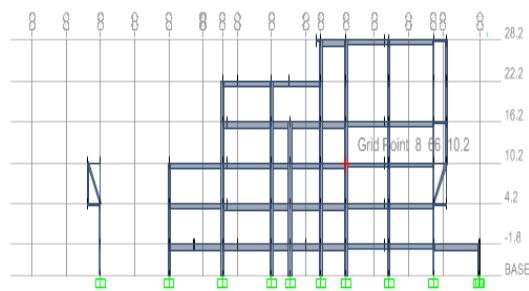
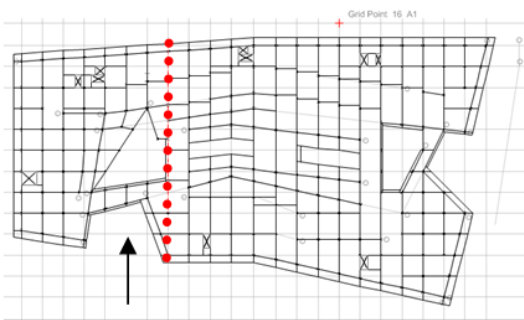
شکل ۱.  
نمایی  
سه  
بعدی از  
سازه  
مدل  
شده  
(سمت)



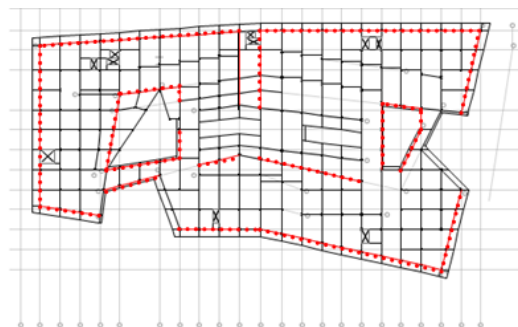
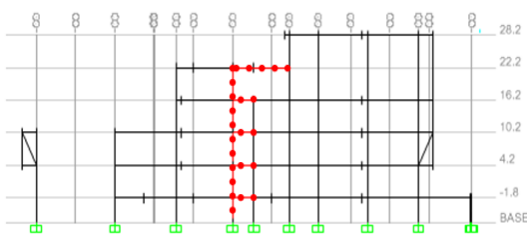
<sup>11</sup> Reduced Beam Section

چپ) و نمای معماری (سمت راست)

جهت بررسی، یکی از قابهای گیردار هسته‌های مرکزی سازه انتخاب شده است. در شکل ۲ موقعیت قاب انتخاب شده در پلان سازه و نمای قاب آورده شده است. جهت بررسی یکی از ستونهای این قاب به همراه تیرهای متصل به آن انتخاب شده است که در شکل ۳ ستون مورد بررسی آورده شده است. همچنین موقعیت قرار گیری قابهای خمشی در پلان سازه در این شکل مشخص شده است.



شکل ۲. موقعیت قاب انتخابی در پلان سازه و جهت اعمال زلزله (سمت چپ) و نمایی از قاب مورد بررسی به (سمت راست)



شکل ۳. ستون و تیرهای مورد بررسی از قاب انتخاب شده (سمت چپ) موقعیت قرار گیری قابهای خمشی در پلان سازه (سمت راست)

### ۳- مکانیزم و تئوری حاکم بر خستگی کم چرخه شدید

سازه‌های فلزی در معرض خستگی کم چرخه شدید کرنشهای پلاستیک بزرگ را در تعداد سیکلهای بسیار کمی (کمتر از ۱۰ تا ۲۰ سیکل) تجربه می‌کنند. خستگی کم چرخه شدید کاملاً متفاوت از خستگی کم چرخه و خستگی پر چرخه می‌باشد که هزاران و میلیونها سیکل را شامل میشوند. در مقایسه با مکانیزمهای خستگی نظیر لغزش<sup>۱۲</sup> و عدم پیوستگی<sup>۱۳</sup>؛ مکانیزمهای غالب در کنترل خستگی کم چرخه شدید بیشتر شبیه مکانیزمهای شکست تحت بارگزاری یکنواخت<sup>۱۴</sup> نظیر رشد حفره‌های میکرو و ادغام آنها<sup>۱۵</sup> می‌باشد. خستگی کم چرخه

<sup>12</sup> Slip

<sup>13</sup> De cohesion

<sup>14</sup> Monotonic

<sup>15</sup> Microvoid growth and coalescence

شدید اندرکنشی است از مکانیزمهای شکست- خستگی که شکست شکل پذیر را تشکیل میدهند و اولین بار توسط کاوامورا<sup>۱۶</sup> [14] به آن اشاره شد و در ادامه توسط کانوینده و دیرلین<sup>۱۷</sup> [7] صحت سنجی گردید. عکسهای سه بعدی از مکانیزم های شکست بسیار ریز نشان میدهد که شکست شکل پذیر در سازه های فلزی معمولاً سه مرحله تشکیل منافذ بسیار ریز؛ رشد منافذ و یکی شدن این منافذ<sup>۱۸</sup> را تجربه می کنند [15].

تحت بارگذاری یکنواخت کششی<sup>۱۹</sup>؛ مشخص شده است که شروع شکست شکل پذیر، ناشی از رشد حفره های بسیار ریز و بهم پیوستگی آنها بوده که خود آن ناشی از کرنش پلاستیک و تنش سه محوری وارده بر حفره های ریز می باشد. فرضیه پایه این است که شروع ترک شکل پذیر زمانی خواهد بود که حجم حفره های بسیار ریز به مقدار بحرانی برسد. تحت بارگذاری سیکلی، مکانیزم شکست فقط دو تفاوت با حالت بارگذاری یکنواخت دارد. اول اینکه در بارگذاری یکنواخت کششی رشد حفره های بسیار ریز<sup>۲۰</sup> بصورت پیشرونده خواهد بود در حالیکه در بارگذاری سیکلی بخاطر عکس شدن جهت تنش سه محوری در حالت مثبت و منفی؛ حفره های ریز نیز منبسط و منقبض می شوند [7]. دوم اینکه بعلاوه تجمع یافته بر حفره های ریز موجود در مواد در اثر بارگذاری سیکلی؛ حجم بحرانی حفره های ریز نسبت به حالت بارگذاری یکنواخت کوچکتر شده و ممکن است باعث بهم پیوستگی سریعتر حفره ها و ایجاد شکست سریعتر در ماده گردد [7]. بنابراین مهمترین نکته در یافتن مدل مناسب برای شبیه سازی شکست خستگی کم چرخه شدید آنست که بتوان مکانیزم خسارتی که در آن، مراحل رشد حفره ها و بهم پیوستگی آنها تحت بارگذاری سیکلی و همچنین کاهش اندازه حفره بحرانی لحاظ شده باشد، پیدا نمود.

#### ۴- مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری یکنواخت

بر مبنای تحقیقات ریس و تریسی<sup>۲۱</sup> [16]، هانکوک و مکنزی<sup>۲۲</sup> [17] همچنین کانوینده و همکاران<sup>۲۳</sup> [1]، مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری یکنواخت<sup>۲۴</sup> توسعه یافت. برای یک حفره کروی در یک محیط نامحدود پیوسته، نرخ رشد حفره ها تحت بارگذاری کششی یکنواخت را می توان با رابطه (۱) بیان کرد [18,19]:

$$dr / r = C \exp(1.5T) d \varepsilon_p \quad (1)$$

که  $r$  شعاع لحظه ای حفره کروی می باشد؛  $c$  ثابت متریال می باشد،  $T = \frac{\delta_m}{\delta_e}$  تنش سه محوری می باشد.  $\delta_m$  تنش میانگین و  $\delta_e$  تنش موثر (تنش ون میسز) می باشد.  $d \varepsilon_p = \sqrt{(2/3) d \varepsilon_{ij}^p d \varepsilon_{ij}^p}$  کرنش پلاستیک معادل پله ای می باشد. انتگرال گیری از معادله (۱) رشد کلی حفره ((نسبت شعاع حفره ای لحظه ای به شعاع اولیه)) در طول یک دوره تنش کششی پلاستیک بصورت رابطه (۲) بیان می شود:

$$\ln(r / r_0) = \int_0^{\varepsilon_p} C \exp(1.5T) d \varepsilon_p \quad (2)$$

<sup>16</sup> Kawamura

<sup>17</sup> Kanvinde and Deierlein

<sup>18</sup> microvoid nucleation, growth, coalescence

<sup>19</sup> monotonic tensile

<sup>20</sup> void growth

<sup>21</sup> rice and tracey

<sup>22</sup> hancock and makenzie

<sup>23</sup> kanvinde et al

<sup>24</sup> VGM

با فرض اینکه رشد حفره‌ها؛ مراحل شکست را کنترل می‌کند؛ شکست شکل‌پذیر زمانی شروع می‌شود که نرخ رشد حفره به میزان بحرانی که توسط معادله (۳) تعیین می‌شود، برسد.

$$\ln(r / r_0)^{critical\ monotonic} = \int_0^{\varepsilon_p^{critical}} C \exp(1.5T) d\varepsilon_p \quad (3)$$

کرنش پلاستیک معادل بحرانی در زمان شکست بر اثر یکی شدن حفره‌ها می‌باشد. با تقسیم معادله (۳) بر ثابت متریک  $c$  و نامگذاری آن با عنوان  $\eta_{monotonic}$  رابطه (۴) را خواهیم داشت:

$$\eta_{monotonic} = \frac{\ln(r / r_0)^{critical\ monotonic}}{C} = \int_0^{\varepsilon_p^{critical}} \exp(1.5T) d\varepsilon_p \quad (4)$$

نشان دهنده ظرفیت رشد حفره می‌باشد و با خاصیت سختی مواد که با استفاده از نرخ رشد حفره بحرانی تعیین می‌شود، مشخص می‌شود.

سپس معیار شکست بر مبنای شاخص شکست تحت بار یکنواخت بصورت رابطه (۵) ارائه می‌شود:

$$FI_{monotonic} = \int_0^{\varepsilon_p^{critical}} \exp(1.5T) d\varepsilon_p / \eta_{monotonic} \quad (5)$$

که در آن  $FI_{monotonic}$  نشان دهنده نسبت رشد حفره موجود به ظرفیت رشد حفره می‌باشد. وقتی  $FI_{monotonic}$  از یک بیشتر باشد؛ شروع شکست پیش بینی می‌شود.

## ۵- مدل رشد حفره‌ها تحت بارگذاری سیکلی

برای بارگذاری سیکلی معکوس شونده می‌توان معادله (۱) را بصورت زیر اصلاح نمود [1]:

$$dr / r = \text{sign}(T) C \exp(1.5T) d\varepsilon_p \quad (6)$$

که در آن عبارت  $\text{sign}(T)$  برای در نظر گرفتن جهت تنش سه محوری  $T$  لحاظ شده است.

مطابق با معادله (۶) اگر تنش سه محوری  $T$  مثبت باشد؛ حفره‌ها تحت کرنش پلاستیک گسترش خواهد یافت. عکس آن اگر  $T$  منفی باشد؛ حفره‌ها جمع خواهند شد. مقدار تنش سه محوری و کرنش پلاستیک معادل بر میزان رشد حفره‌ها و یا جمع شدن حفره‌ها تاثیر خواهد داشت.

انتگرال گیری از معادله (۶) در بازه بارگذاری کششی و فشاری تا زمانی که شکست آغاز شود ادامه خواهد داشت. مقدار بحرانی رشد حفره‌های جمع شونده بر اثر کرنشهای سیکلی را میتوان بصورت رابطه (۷) نشان داد :

$$\ln(r / r_0)^{critical\ cyclic} = \sum_{tensile} C_1 \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \exp(|1.5T|) d\varepsilon_p - \sum_{compressive} C_1 \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \exp(|1.5T|) d\varepsilon_p \quad (7)$$

اندازه حفره‌ها در خلال تنش سه محوری مثبت افزایش خواهد یافت و در زمان تنش سه محوری منفی کاهش خواهد یافت. جمع عبارت اول در سمت راست معادله نشان دهنده جمع رشد حفره‌ها در همه سیکلها بر اثر تنش سه محوری مثبت می باشد که نیازمند محاسبه انتگرال در بازه کرنش پلاستیک  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  در شروع و انتهای هر مرحله کششی می باشد. عبارت دوم در سمت راست معادله جمع انقباض حفره‌ها در همه سیکلها بر اثر تنش سه محوری منفی را نشان می دهد. عبارت  $C1, C2$  ثابت‌هایی هستند که برای نشان دادن اختلاف بین نرخ رشد و انقباض حفره‌ها بکار می‌روند.

بخاطر عدم وجود اطلاعات در مورد نرخ رشد و انقباض حفره‌ها فرض می شود  $C1=C2=C$  [1]. با تقسیم معادله (7) بر ثابت

متریال  $C$  و نشان دادن نتیجه با  $\eta_{cyclic}$ ، منجر به معادله (8) خواهد شد:

(8)

$$\eta_{cyclic} = \frac{\ln(r/r_0)_{critical}^{cyclic}}{C} = \sum_{tensile} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(|1.5T|) d\epsilon_p - \sum_{compressive} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(|1.5T|) d\epsilon_p$$

که  $\eta_{cyclic}$  نشان دهنده ظرفیت رشد حفره‌ها در بارگذاری سیکلی می باشد. و با کاهش مقدار متناظر تحت بارگذاری مونوتونیک رابطه (9) بدست می آید.

$$\eta_{cyclic} = \frac{\ln(r/r_0)_{critical}^{cyclic}}{C} = \exp(-\lambda\epsilon_c) \frac{\ln(r/r_0)_{critical}^{monotonic}}{C} = \exp(-\lambda\epsilon_c) \cdot \eta_{monotonic} \quad (9)$$

$\lambda$  ضریبی است که به آسیب پذیری متریال وابسته بوده و با استفاده از تست های سیکلی و مونوتونیک متریال توام با آنالیز اجزا محدود بدست می آید [7].  $\epsilon_c$  متغیر خسارت بوده و بعنوان کرنش پلاستیک معادل حاصل از جمع همه کرنشهای پلاستیک در سیکلهای فشاری تحت بارگذاری اعمالی تعیین می‌شود.

در معاله (9) یک تابع نمایی کاهش<sup>۲۵</sup> جهت کاهش ظرفیتی که از بارگذاری مونوتونیک برای متریال بدست آمده استفاده شده و حاصل استفاده از آن بدست آمدن ظرفیت متریال تحت بارگذاری سیکلی می باشد.

مطابق معادله (8) تقاضای رشد حفره‌ها  $VGD_{CYCLIC}$  تحت بارگذاری سیکلی بصورت رابطه (10) تعیین می شود

$$VGD_{cyclic} = \sum_{tensile} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} EXP(|1.5T|) - \sum_{compressive} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} EXP(|1.5T|) \geq 0 \quad (10)$$

تحت بارگذاری سیکلی  $VGD_{CYCLIC}$  متناوباً افزایش و کاهش خواهد یافت اما از آنجا که حجم منفی حفره معنی نخواهد داشت لذا عبارت  $VGD_{CYCLIC}$  همیشه مثبت خواهد بود. بنابراین وقتی حاصل معادله (10) به زیر صفر کاهش یابد؛ باید مقدار  $VGD_{CYCLIC}$  صفر باقی بماند تا در سیکلهای کششی دوباره مقدار آن به بالای صفر افزایش یابد. مشابه با بارگذاری سیکلی کششی، شکست ELCF تحت

<sup>25</sup> exponential decay



بارگذاری سیکلی زمانی رخ می‌دهد که حجم حفره‌های مورد نیاز  $VGD_{CYCLIC}$  (demand) از ظرفیت حجم حفره‌ها ی رشد یافته  $\eta_{cyclic}$  فراتر رود. به عبارت دیگر  $FI_{cyclic} \geq 1$  شود که  $FI_{cyclic}$  مطابق رابطه (۱۱) می باشد.

$$FI_{cyclic} = \frac{VGD_{cyclic}}{\eta_{cyclic}} \quad (11)$$

بنابراین مدل رشد و بهم پیوستگی حفره‌ها برای پیش بینی شکست ELCF در مواد فلزی که در معرض بارگذاری سیکلی با دامنه بسیار بالا قرار گرفته‌اند بر این مبنا استوار است که رشد حفره‌های مورد تقاضا  $VGD_{CYCLIC}$  افزایش می یابد. و همزمان ظرفیت رشد حفره ها  $\eta_{cyclic}$  بر اثر خسارت تجمعی مواد کاهش می‌یابد [20,21].

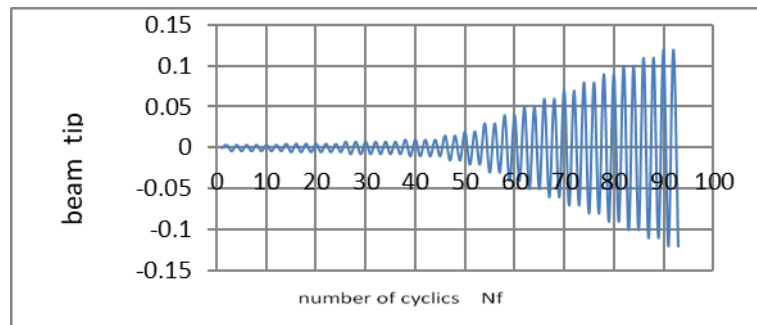
### ۶- صحت سنجی روش خستگی کم‌چرخه شدید در پژوهش انجام شده

جهت ارزیابی امکان بررسی رفتار سازه‌ها در برابر پدیده خستگی کم‌چرخه شدید لرزه‌ای بکمک مدل‌های مکانیک شکست، لازمست یک نمونه اتصال RBS که در آزمایشگاه تحت بارگذاری سیکلی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن تا گسیختگی اتصال موجود باشد؛ انتخاب گردد. سپس اتصال انتخاب شده، میبایست در نرم مدل ABAQUS [23] مدل گردد و معیارهای مدل مکانیک شکست (CVGM) با سابروتین نویسی به نرم افزار وارد گردد تا صحت مدل سازی مدل‌های مکانیک شکست جهت ارزیابی پدیده ELCF مشخص گردد.

در این پژوهش جهت اطمینان از روش مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری سیکلی جهت بررسی خستگی کم‌چرخه شدید در اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته قابهای خمشی فلزی، اتصال مورد آزمایش در مقاله لی و همکاران [22] با استفاده از نرم افزار ABAQUS [23] مدل سازی شده و با استفاده از سابروتین UVARM، پارامترهای مدل رشد حفره ها تحت بارگذاری سیکلی بدست آمدند. مقادیر  $\eta_{monotonic}$  برای تیرهای کاهش یافته بر اساس تحقیقات میر و کانونده [9,10] به ترتیب برابر ۱،۲۵ و ۲،۵ انتخاب گردید. مشخصات تیر و ستون در اتصال مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. نمودار بار وارده بر سازه مدل شده در نرم افزار ABAQUS مطابق آزمایش لی و همکاران بر اساس بارگذاری SAC و بصورت شکل ۴ می باشد.

جدول ۱- مشخصات تیر و ستون در اتصال RBS در تحقیق لی و همکاران {۲۲}

شماره	نمونه	عضو**	ابعاد عضو mm	متریال	تنش تسلیم MPA	تنش نهایی MPA	مشخصات ناحیه کاهش یافته*			
							a	b	c	c/b <sub>f</sub>
3	SPECIMEN 3	BEAM h*b*t*s	950*424*24*43	A992	345	424	212.7	762	104.7	0.13
		COLUMN (box) h*b*t*s	914*610*50*50	A572-GR.50	420	490				



شکل ۴- بارگزاری SAC

بر اساس نتایج لی و همکاران گسیختگی در سیکل اول دررفت ۶٪ ایجاد خواهد شد شکل ۵. در نتایج خروجی نرم افزار ABAQUS نیز در انتهای سیکل اول دررفت ۶٪ مقدار FICYCLIC از یک فراتر رفته یعنی گسیختگی حادث می شود شکل ۶. در نمودار ۷ مقدار FICYCLIC نمایش داده شده است که دقیقاً در سیکل اول دررفت ۶٪ از یک فراتر می رود. در شکل ۷ مشخص است که در سیکل ۶۷ که انتهای سیکل اول دررفت ۶٪ است مقدار VGD<sub>CYCLIC</sub> از  $\eta_{cyclic}$  فراتر رفته که نمایانگر شروع شکست می باشد.

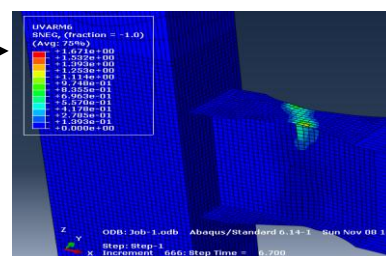
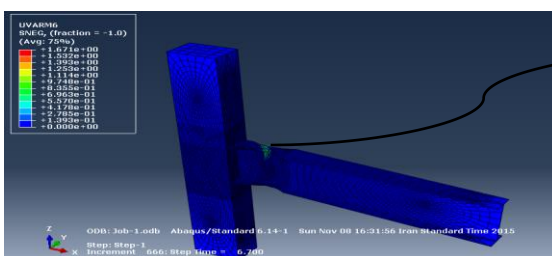


(ب)

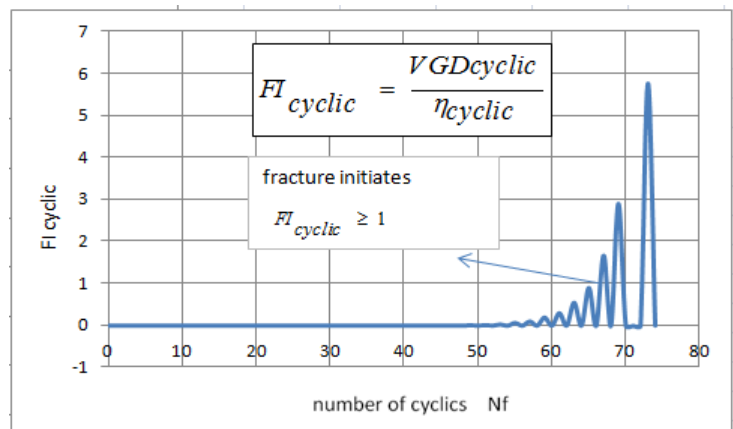
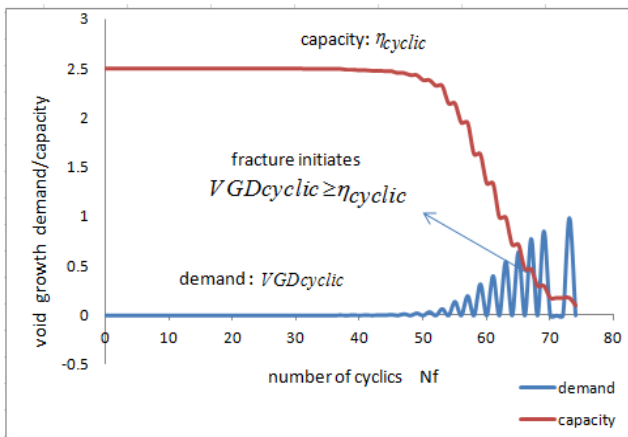


(الف)

شکل ۵- (الف) اتصال RBS در دررفت ۶٪ - (ب) شکست در بال فوقانی در سیکل اول دررفت ۶٪



شکل ۶- گسیختگی در سیکل اول دررفت ۶٪



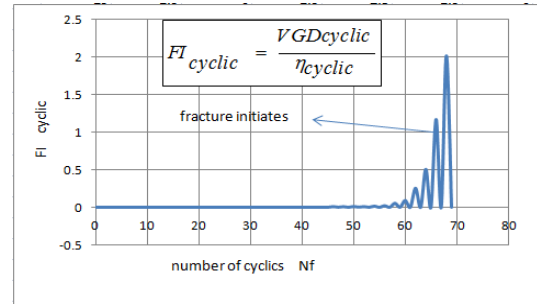
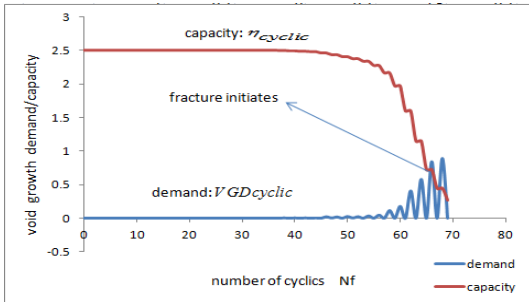
شکل ۷- سمت راست سمت راست مقدار FICYCLIC و نمودار (سمت چپ مقادیر  $\eta_{cyclic}$  و VGDCYCLIC

## ۷- بررسی اثر خستگی کم چرخه شدید در اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته انتخابی

جهت بررسی اثر خستگی کم چرخه در اتصالات سازه ۶ طبقه مورد بحث، ابتدا شروع ترک در یکی از اتصالات را تحت بارگذاری SAC بدست آورده تا ظرفیت اتصال در خستگی کم چرخه شدید مشخص گردد. مشخصات تیر و ستونها در قاب انتخابی مورد بررسی در طبقات مختلف در جدول ۲ آورده شده است. اتصال طبقه ۵ جهت بدست آوردن ظرفیت اتصال انتخاب گردید. از سابروتین UVARM جهت استخراج مقدار  $FI_{cyclic}$  استفاده می شود. مقدار  $\lambda$  و  $\eta_{monotonic}$  مترئال ST-37 بترتیب برابر ۱ و ۲٫۵ انتخاب گردید [24]. در شکل ۸ مقدار  $FI_{cyclic}$  در اتصال طبقه ۵ آورده شده است و مشخص می گردد در سیکل اول دریافت ۶٪ ترک گسیختگی در مقطع کاهش یافته ایجاد می گردد. در شکل ۹ نقطه شروع ترک بر اساس مقادیر  $\eta_{cyclic}$  و VGDCYCLIC نشان داده شده است. نمودارها نشان می دهند اتصال به گونه ای طراحی شده که ظرفیت مناسبی در برابر پدیده خستگی کم چرخه شدید از خود نشان میدهد.

جدول ۲- مشخصات تیر و ستون در اتصال RBS در طبقات مختلف

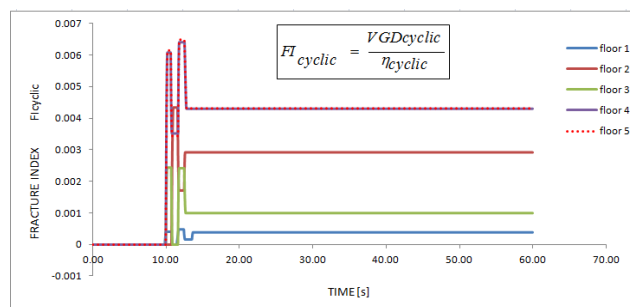
شماره	نمونه	عضو**	ابعاد عضو mm	مترئال	تنش تسلیم MPA	تنش نهایی MPA	مشخصات ناحیه کاهش یافته*			
							a	b	c	c/b <sub>f</sub>
1	FLOOR 1-2-3-5	BEAM h*b*t*s	400*350*20*30	St-37	235	335	262.5	395	52.5	0.13
		COLUMN h*b*t*s	400*350*12*30	St-37	235	335				
2	FLOOR 4	BEAM h*b*t*s	400*350*12*25	St-37	235	335	262.5	395	52.5	0.13
		COLUMN h*b*t*s	400*350*12*30	St-37	235	335				



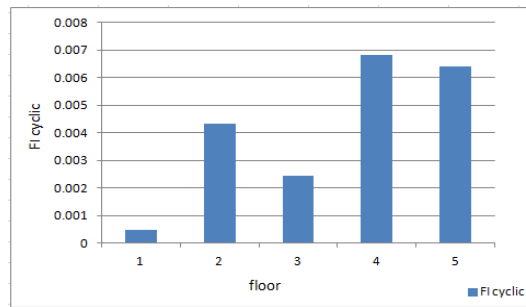
شکل ۹. مقادیر  $\eta_{cyclic}$  و  $VGD_{CYCLIC}$  در طبقه ۵

شکل ۸. مقدار  $FI_{CYCLIC}$  در طبقه ۵

در ادامه جهت بررسی اثر خستگی کم چرخه شدید تحت رکورد زلزله نورث ریج؛ سازه تحت رکورد نورث ریج آنالیز گشت؛ سپس جهت بررسی خستگی کم چرخه شدید در اتصالات طبقه اول تا پنجم؛ تاریخچه دوران حاصل از رکورد نورث ریج در قاب سه بعدی در هر اتصال از نرم افزار ETABS استخراج شده و بعنوان تاریخچه دوران در اتصال؛ به مدل سه بعدی اجزا محدود در نرم افزار ABAQUS اعمال می-شود. از سابروتین UVARM جهت استخراج مقدار  $FI_{CYCLIC}$  استفاده می شود. مقدار  $\lambda$  و  $\eta_{monotonic}$  متریکال ST-37 از مقاله [24] بترتیب برابر ۱ و ۲،۵ انتخاب گردید. در شکل ۱۰ مقادیر  $FI_{CYCLIC}$  در اتصال هر طبقه نسبت به زمان در زلزله نورث ریج آورده شده است. از شکل ۱۱ مشخص است که شاخص شروع ترک بسیار کمتر از ۱ می باشد یعنی هیچیک از اتصالات RBS مورد بررسی تحت رکورد زلزله نورث ریج آسیبی در اثر خستگی کم چرخه شدید متحمل نمی شوند. با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می شود که اندیس خستگی کم چرخه شدید تحت اثر مودهای بالاتر می باشد. بطوریکه طبقه ۴ بالاترین اندیس خستگی کم چرخه شدید را نشان می دهد و بعد از آن به ترتیب اندیس مربوط به طبقه ۵ و ۲ می باشد که ناشی از اثر مودهای بالاتر در خستگی کم چرخه شدید می باشد.



شکل ۱۰. اندیس  $FI_{CYCLIC}$  در اتصال طبقات در طول زلزله



شکل ۱۱. اندیس FI CYCLIC در اتصال طبقات

## ۸- نتیجه گیری

مبنای طراحی مدرن مقاوم به زلزله بر شکل پذیری سازه جهت جذب انرژی زلزله استوار می‌باشد. این مساله بویژه در سازه‌های فلزی مانند قابهای مقاوم خمشی که مد غالب جذب انرژی در آنها؛ تغییر مکانهای سیکلی غیر الاستیک بزرگ در ناحیه مفصل پلاستیک می باشد؛ کاملاً حاکم می باشد. علاوه بر این، یک سازه (یا اجزای آن، مانند اتصالات فولادی)، معمولاً کمتر از ۱۰ چرخه‌ی کرنش بزرگ را در طول یک زمین‌لرزه تحمل می‌کند. این تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ در حین زلزله که باعث پدیده خستگی کم‌چرخه شدید یا ULCF میشود بکمک مدل‌های مکانیک شکست شکل‌پذیر ارزیابی میگردد.

پژوهش انجام شده؛ یک مطالعه جامع از اثرات خستگی کم چرخه شدید ناشی از زلزله احتمالی، بر روی یک ساختمان تجاری ۶ طبقه با پلان نامنظم و سیستم مقاوم خمشی ویژه با تیرهای دارای مقطع کاهش یافته بوده است. در این پژوهش جهت بررسی اثر خستگی کم‌چرخه شدید از مدل رشد حفره ها تحت بار سیکلی (CVGM) استفاده شد و تاریخچه دوران حاصل از اعمال رکورد زلزله نورث ریج به سازه؛ به مدل سه بعدی اجزا محدود اعمال گشت تا اندیس شروع شکست تحت اثر خستگی کم‌چرخه شدید بدست آید. نتایج نشان می‌دهند که:

- شروع ترک گسیختگی ناشی از خستگی کم‌چرخه شدید در اتصالات تحت بارگذاری SAC در سیکل اول دریافت ۶٪ ایجاد می‌شود که نشان میدهد اتصالات RBS رفتار مناسبی در ELCF از خود نشان میدهد.
- در اتصالات RBS؛ تحت رکورد زلزله نورث ریج؛ خستگی کم‌چرخه شدید حاکم نمی‌باشد اما اثرات مودهای بالاتر در برآورد میزان آسیب ناشی از خستگی کم چرخه شدید تاثیرگذار است .
- اتصالات RBS (که در آنالیزهای تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار بسیار مناسبی را در زلزله‌ها از خود نشان داده اند)؛ در اثر خستگی کم‌چرخه شدید ناشی از زلزله، رفتار مناسبی را نشان می‌دهند. ولی انجام مطالعات آزمایشگاهی برای تدقیق عمر خستگی و ظرفیت پیش از شروع ترک ناشی از خستگی کم چرخه شدید در این اتصالات و اتصالات دیگر از پیش تایید شده ضروری بنظر میرسد .
- خستگی کم چرخه شدید زمانی تاثیرگذار خواهد بود که اتصال وارد ناحیه غیر خطی شود و تا زمانی که سازه رفتار خطی نشان میدهد اندیس ELCF کمتر از حد شکست خواهد بود.

## مراجع

- [1] Kanvinde, AM. Deierlein, GG. (2004). *Micromechanical simulation of earthquake induced fracture in steel structures*. Blume Center TR 145. Stanford University, Stanford, CA.
- [2] Kuwamura, H. Yamamoto, K. (1997). *Ductile crack as trigger of brittle fractures in steel*. J Struct Eng;123(6):729–35.
- [3] Kuwamura, H. Takagi N. (2004). *Similitude law of prefracture hysteresis of steel members*. J Struct Eng;130(5):752–61.
- [4] Sakano, M. Wahab, MA. (2001). *Extremely low cycle (ELC) fatigue cracking behaviour in steel bridge rigid frame piers*. J Mater Process Technol;118(1–3):36–9.
- [5] Tateishi, K. Hanji, T. Minami, K. (2007). *A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel*. Int J Fatigue;29(5):887–96.
- [6] Kanvinde, AM. Deierlein, GG. (2006). *Void growth model and stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels*. J Struct Eng;132(12):1907–18.
- [7] Kanvinde, AM. Deierlein, GG. (2007). *Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue*. J Struct Eng;133(6):701–12
- [8] Kanvinde, AM. Deierlein, GG. (2008). *Validation of cyclic void growth model for fracture initiation in blunt notch and dogbone steel specimens*. J Struct Eng;134(9):1528–37.
- [9] Myers, AT. Kanvinde, AM. Deierlein, GG. et al. (2009). *Effect of weld details on the ductility of steel column baseplate connections*. J Construct Steel Res;65(6):1366–73.
- [10] Myers, AT. Deierlein, GG. Kanvinde, AM. (2009). *Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments*. Blume Center TR 170. Stanford University, Stanford, CA.
- [11] Fell, BV. Kanvinde, AM. Deierlein, GG. (2010). *Large-scale testing and simulation of earthquake induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling*. Blume Center TR172. Stanford University, Stanford, CA.
- [12] Huang, YL. Mahin, SA. (2010). *Simulating the inelastic seismic behavior of steel braced frames including the effects of low-cycle fatigue*. PEER, Report 2010/104. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [13] ETABS 2013 PLUS. (2013). Computer and structures, Inc.
- [14] Kuwamura, H. Yamamoto, K. (1997). *Ductile crack as trigger of brittle fractures in steel*. J Struct Eng;123(6):729–35.
- [15] Anderson, TL. (2005). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005.
- [16] Rice, JR. Tracey, DM. (1969). *On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*. J Mech Phys Solids;17(3):201–17.
- [17] Hancock, JW. Mackenzie, AC. (1976). *On the mechanics of ductile failure in high strength steel subjected to multi-axial stress-states*. J Mech Phys Solids;24(3):147–69.
- [18] Nip, KH. Gardner, L. Davies, CM. et al. (2010). *Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel*. J Construct Steel Res;66(1):96–110.
- [19] Wang, YQ. Zhou, H. Shi, YJ. et al. (2011). *Fracture prediction of welded steel connections using traditional fracture mechanics and calibrated micromechanics based models*. Int J Steel Struct;11(3):351–66.
- [20] Zhou, H. et al. (2013). *Extremely low cycle fatigue prediction of steel beam-to-column connection by using a micro-mechanics based fracture model*. International Journal of Fatigue 48 (2013) 90–100.
- [21] Zhou, H. et al. (2014). *Seismic low-cycle fatigue evaluation of welded beam-to-column connections in steel moment frames through global-local analysis*. International Journal of Fatigue 64 (2014) 97–113.

- [22] Lee, P. Garai, R. Ozkula, G. ( 2014). *Issues on using welded built-up box columns in steel special moment frames* , Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering July 21-25, 2014, Anchorage, Alaska.
- [23] ABAQUS. (2014). *Standard user's manual version 14.1*. Providence, RI: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.
- [24] Tehranizadeh, M. Deylami, A. Gholami, M. Moazemi, H. (2012). *Validation of Cyclic Void Growth Model for Fracture Initiation in the Flange Plate Connection Between Beam and Box Column*. 15wcee, USBOA 2012.