



مقایسه معیارهای موجود برای تجمع خسارت خستگی فرا سیکل پایین در اتصال فولادی با ورق های پوششی

* بهروز بدرخانی آجائی^۱، مهدی قاسمیه^۲

چکیده

خستگی فرا سیکل پایین، رایج ترین حالت خرابی در اتصالات تیر به ستون فولادی ساخته شده بعد از زلزله نورتریج است. در این مقاله، سه معیار تجمع خسارت از نظر قابلیت تشخیص ترک خوردگی ناشی از خستگی فرا سیکل پایین در یک اتصال با ورق های پوششی، مقایسه شده اند. شروع ترک خوردگی نرم برای حالت های مختلف بارگذاری، با استفاده از مدل رشد حفرات چرخه ای و با استفاده از نتایج مدل سازی اجزای محدود اتصال، شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی های انجام شده نشان می دهند که معیار اتلاف انرژی، ترک خوردگی در این اتصال را بهتر از معیارهای دیگر پیش بینی می کند.

کلمات کلیدی

تجمع خسارت، خستگی فراسیکل پایین، اتصال با ورق های پوششی

* ۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، bbadrkhani@yahoo.com

۲. عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، mghassem@ut.ac.ir



نتایج CVGM، شاخص‌های تجمّع خسارت با هم مقایسه شده‌اند.

۲ - شاخص‌های تجمّع خسارت

در این مقاله، قابلیت استفاده از شاخص‌های تجمّع خسارت برای تشخیص ترک‌خوردگی در اتصالات خمشی بررسی شده‌است. سه شاخص تجمّع خسارت به علت سادگی کاربریشان در ارزیابی سازه‌ها انتخاب شده‌اند [۷]. این شاخص‌ها در ذیل ارائه شده‌اند:

الف- شاخص اتلاف انرژی

شاخص اتلاف انرژی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ce} = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{F_y \cdot S_y} \quad (1)$$

که در آن E_i انرژی تلف شده در سیکل i ام، F_y نیروی تسلیم و S_y تغییرشکل تسلیم است.

ب- شاخص تغییرشکل پلاستیک تجمّعی

تغییرشکل پلاستیک تجمّعی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ck} = \sum_{i=1}^N (\mu_{si} - 1)^a \quad (2)$$

که در آن:

$$\mu_{si} = S_i / S_y \quad (3)$$

در رابطه (۳)، μ_{si} شکل‌پذیری، S_i تغییرشکل اعمال شده و S_y تغییرشکل تسلیم است. ضمناً مقدار a را می‌توان $1/6$ در نظر گرفت [۸].

ج- شاخص کار تجمّعی

شاخص کار تجمّعی خسارت را به صورت کار تجمّعی بیان می‌کند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ck} = \sum_{i=1}^N (\mu_{si} - 1) \lambda_i \quad (4)$$

که در آن

$$\lambda_i = F_i / F_y \quad (5)$$

که در آن F_i نیرو در سیکل i ام، F_y نیروی تسلیم و μ_{si} در رابطه (۳) تعریف شده است.

۳- مدل رشد چرخه‌ای حفرات

مشاهدات بعد از زلزله نورتریج^۱ نشان داد که گسیختگی ترد علت اصلی خسارات وارد بر اتصالات خمشی ساخته شده قبل از زلزله نورتریج بود [۱]. این مشاهدات باعث ایجاد اتصالات جدید با پرهیز از ایجاد شکاف در سطح فلز و با بهره‌گیری از مصالح با طاقت^۲ بیشتر شد. آزمایشاتی که بر روی اتصالات جدید انجام شدند [۲]-[۵]، نشان دادند که این اتصالات کمتر در معرض وقوع گسیختگی ترد بودند و علت اصلی خسارات وارد بر این اتصالات، خستگی سیکل‌پایین بود. در زمان وقوع یک زلزله، ترک‌های ایجاد شده در اتصالات یک قاب الزاماً باعث گسیختگی کامل اتصالات نمی‌شود؛ هرچند یک پس‌لرزه و یا زلزله بعدی می‌تواند باعث رشد بیشتر این ترک‌ها و در نتیجه گسیختگی کامل اتصالات شود. در عمل، بعد از وقوع هر زلزله شدید، بعضی از اتصالات بازرسی چشمی می‌شوند. با توجه به این که تشخیص ترک‌ها از طریق بازرسی چشمی نیاز به کندن روکاری‌ها و سفت‌کاری‌ها دارد، این روش اقتصادی نیست؛ خصوصاً زمانی که تعداد زیادی اتصال باید بازرسی شوند. علاوه بر این، ترک‌های زیادی با این روش قابل تشخیص نیستند [۲]. بنابراین، با توجه به نیاز موجود برای ارزیابی امنیت سازه‌ها بعد از وقوع زلزله، یک روش محاسباتی برای تشخیص ترک در اتصالات مورد نیاز است. شاخص‌های مختلفی برای محاسبه خسارت تجمّعی در ادبیات فنی معرفی شده‌اند که برای تشخیص گسیختگی کامل اعضای سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف این مقاله، ارزیابی قابلیت سه شاخص تجمّع خسارت در تشخیص ترک‌خوردگی در یک اتصال با ورق‌های پوششی ساخته شده به روش قبل از زلزله نورتریج است. یک مدل اجزای محدود اتصال با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۶] ساخته شده است. ضمناً، مدل رشد چرخه‌ای حفرات^۳ (CVGM) برای شبیه‌سازی ترک‌خوردگی در اتصال استفاده شده است. بر اساس

1. Northridge
2. Toughness
3. Cyclic Void Growth Model



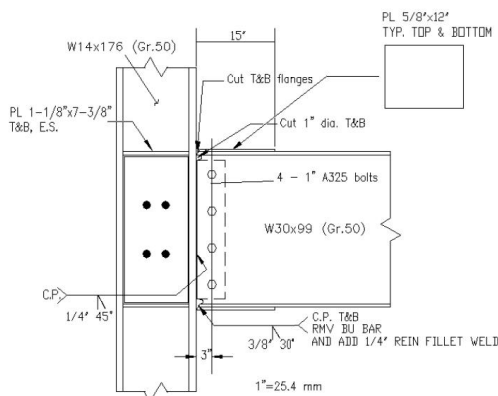
ورق‌های پوششی با استفاده از جوش‌های گوشه طولی و عرضی به بالهای تیر متصل شده‌اند. جان تیر و ورق اتصال جان با جوشهای شیری به بال ستون متصل شده‌اند و ورق اتصال جان به جان تیر پیچ شده است. ورق‌های پیوستگی در هر دو طرف جان ستون قرار گرفته‌اند و یک ورق مضاعف به ضخامت 10 mm برای تقویت چشمه اتصال استفاده شده است. فاصله مرکز محور جک تا سطح خارجی بال ستون 3/4 m است.

ب- مدل اجزای محدود

یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی اتصال با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده است. مدل اجزای محدود از 10468 المان شش‌وجهی هم‌پارامتر مرتبه دوم با انتگرال‌گیری کاهش یافته و 102 المان منشوری هم‌پارامتر مرتبه دوم تشکیل شده است. جوش‌های گوشه با استفاده از المانهای منشوری تعریف شده‌اند و جوشهای شیری با مقید کردن گره‌ها نسبت به هم تعریف شده‌اند. برای تمام فولادها مدول الاستیسیته برابر 200000 MPa نسبت پواسون برابر 0/3 فرض شده است [5]. سخت شوندگی کرنشی ایزوتروپیک در مدل مصالح استفاده شده است. یک رابطه تنش-کرنش سه‌خطی برای تمام مصالح استفاده شده است که پارامترهای آن در مرجع [5] برای تمام فولادها ارائه شده‌اند.

مدل اجزای محدود اتصال در اشکال 2 و 3 نشان داده

شده است. یک برنامه کامپیوتری به زبان Fortran



شکل 1- جزئیات اتصال آزمایش شده [5]

بارهای وارد بر سازه‌ها در اثر زلزله، شامل تعداد سیکل‌های کمتری از خستگی سیکل‌پایین متعارف هستند و کرنش‌ها بسیار بیشتر از کرنش تسلیم هستند. این شرایط خستگی فراسیکل‌پایین نامیده می‌شود. مکانیزم‌هایی که باعث خستگی فراسیکل‌پایین می‌شوند از مکانیزم‌هایی که خستگی سیکل‌پایین سنتی را ایجاد می‌کنند متفاوت‌اند [9].

مدل CVGM در مرجع [9] برای شبیه‌سازی ترک خوردگی نرم در حالت خستگی فراسیکل‌پایین معرفی شده است. در این مدل تشکیل ترک به صورت نتیجه رشد و به هم پیوستن حفرات در داخل فلز بیان می‌شود [9].

در این مدل فرض می‌شود که ترک خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که [10]:

$$VGI_{cyclic} > VGI_{cyclic}^{critical} \quad (6)$$

که در آن

$$VGI_{cyclic}^{critical} = VGI_{monotonic}^{critical} e^{(-\lambda \varepsilon_p^{accumulated})} \quad (7)$$

و

$$VGI_{cyclic} = \sum_{tensile\ cycles} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} e^{(|1.5T|)} d\varepsilon_p - \sum_{compressive\ cycles} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} e^{(|1.5T|)} d\varepsilon_p \quad (8)$$

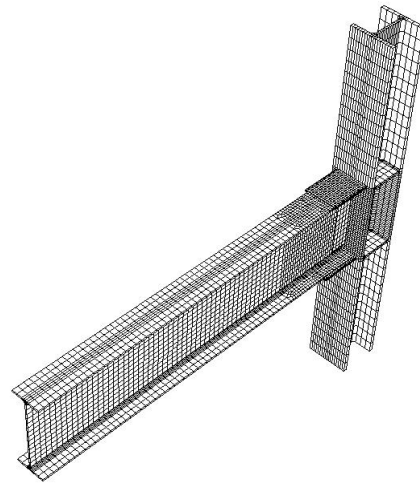
که در آن T نسبت سه‌محوری تنش، $d\varepsilon_p$ نمو کرنش پلاستیک و ε_1 و ε_2 حدود انتگرال‌گیری متناظر با شروع و انتهای هر سیکل هستند. $VGI_{monotonic}^{critical}$ و λ از مشخصات مصالح محسوب می‌شوند که از آزمایشات مصالح به دست می‌آیند و $\varepsilon_p^{accumulated}$ کرنش پلاستیک معادل است که تا آخرین ورود بارگذاری به محدوده کششی محاسبه می‌شود.

4- شبیه‌سازی ترک خوردگی با CVGM

الف- اتصال مورد بررسی

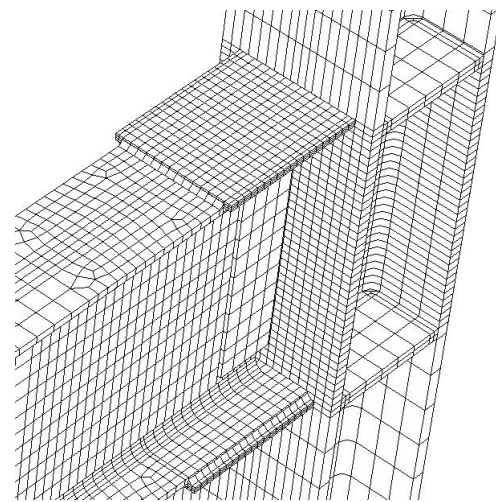
اتصال RC03 که در مرجع [5] آزمایش شده [5]، برای شبیه‌سازی ترک خوردگی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل 1 جزئیات نمونه آزمایش شده نشان داده شده است. اتصال آزمایش شده یک اتصال با ورق‌های پوششی بود که از یک تیر با مقطع W30x99 از جنس فولاد نمره 50 و یک ستون با مقطع W14x176 از جنس فولاد نمره 50 تشکیل شده بود. بالهای تیر و ورق‌های پوششی با استفاده از جوش‌های شیری به بال ستون متصل شده‌اند.

طبقه‌های اتصال تحت بارگذاری نشان داده شده است [۵]. در این شکل نمودار نیرو-جابجایی بین طبقه‌های به دست آمده از تحلیل اجزای محدود با نمودار به دست آمده از آزمایش مقایسه شده است. بارگذاری در تحلیل اجزای محدود تا سیکل‌های زاویه جابجایی بین طبقه‌های ۰/۰۴ ادامه داده شده است زیرا ترک‌خوردگی در آزمایش در این سیکل‌ها مشاهده شده است [۵]. در شکل ۵، انطباق خوبی بین نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود دیده می‌شود.



شکل ۲- مدل اجزای محدود اتصال

در شکل ۶، توزیع کمیت VGI_{cyclic} برای بارگذاری SAC Basic نشان داده شده است. در این شکل، نقطه حداکثر VGI_{cyclic} به رنگ قرمز ظاهر شده است که محل ترک‌خوردگی که با CVGM پیش‌بینی می‌شود را نشان می‌دهد. پیش‌بینی محل ترک‌خوردگی انطباق خوبی با نتیجه آزمایش [۵] که در شکل ۷ نشان داده شده است (بال پایینی تیر، محل اتصال جان به بال تیر) دارد. در شکل ۸، نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{critical}$ برای بارگذاری SAC Basic، برای محل ترک‌خوردگی نشان داده شده است. لحظه ترک‌خوردگی با تقاطع این دو منحنی تعیین می‌شود. با استفاده از این شکل، ترک‌خوردگی در دومین سیکل زاویه جابجایی بین طبقه‌های ۰/۰۴ پیش‌بینی می‌شود که با نتیجه آزمایش [۵] انطباق دارد. شبیه‌سازی ترک‌خوردگی برای سایر بارگذاری‌ها به همین روش انجام شده است. در اشکال ۹ تا ۱۲، نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{critical}$ برای سایر بارگذاری‌ها رسم شده‌اند.



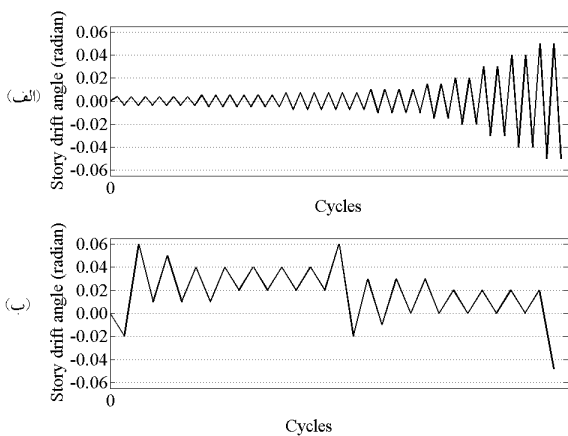
شکل ۳- مش‌بندی اتصال در ناحیه ریزش‌دگی مش

برای محاسبه متغیرهای CVGM همراه با مدل اجزای محدود استفاده شده است. $VGI_{monotonic}$ و λ به ترتیب برابر ۲/۸ و ۰/۱۱ در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر از آزمایش بر روی نمونه‌های گرفته شده از یک پروفیل W از جنس فولاد نمره ۵۰ به دست آمده‌اند [۹].

ج- شبیه‌سازی ترک‌خوردگی

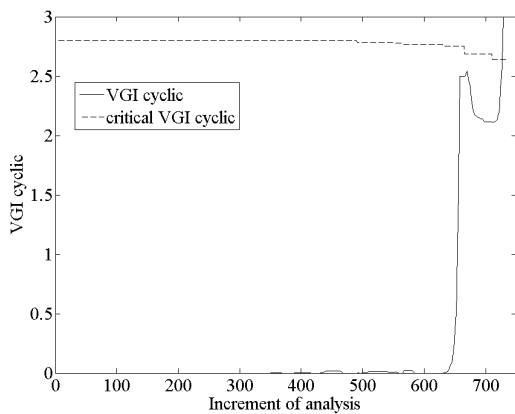
پروتکل‌های بارگذاری SAC Basic و SAC Nearfault [۱۱] که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند و بارگذاری‌های با دامنه ثابت ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ رادیان زاویه جابجایی بین طبقه‌های به مدل اجزای محدود اتصال اعمال شدند. در اینجا نتایج تحلیل اجزای محدود برای بارگذاری‌های مختلف به‌طور خلاصه توضیح داده شده است.

در شکل ۵، نمودار هیستریزس نیرو-جابجایی بین

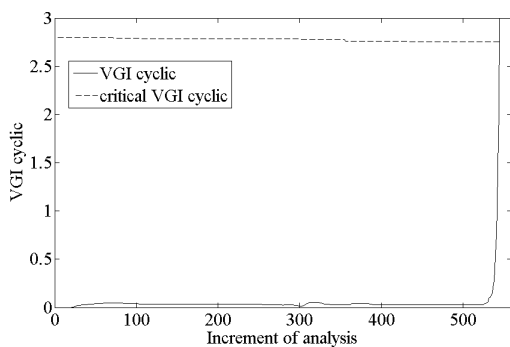


شکل ۴- پروتکل‌های بارگذاری SAC، (الف) پروتکل بارگذاری SAC Basic، (ب) پروتکل بارگذاری SAC Nearfault

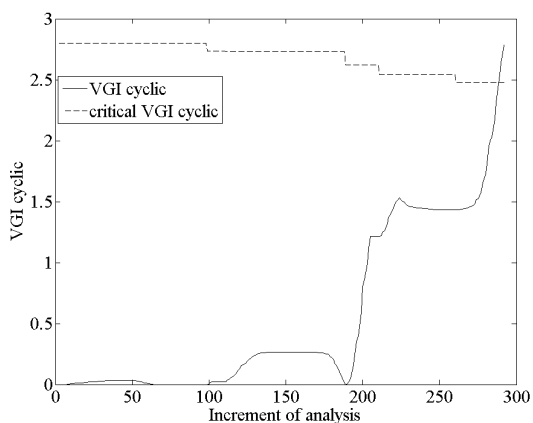




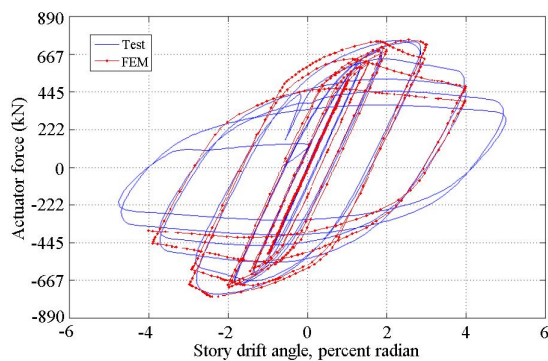
شکل ۸- نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{cyclic}^{critical}$ برای بارگذاری SAC Basic



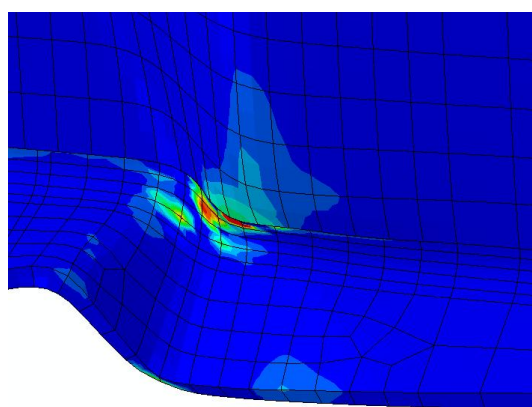
شکل ۹- نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{cyclic}^{critical}$ برای بارگذاری SAC Near-fault



شکل ۱۰- نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{cyclic}^{critical}$ برای بارگذاری با دامنه ثابت ۰/۰۵ رادیان جابجایی بین طبقه‌ای



شکل ۵- نمودارهای نیرو- جابجایی بین طبقه‌ای اتصال تحت بارگذاری SAC basic به دست آمده از آزمایش و تحلیل اجزای محدود



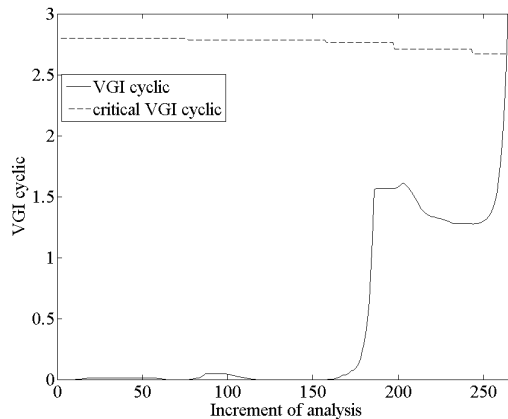
شکل ۶- توزیع VGI_{cyclic} برای بارگذاری SAC Basic



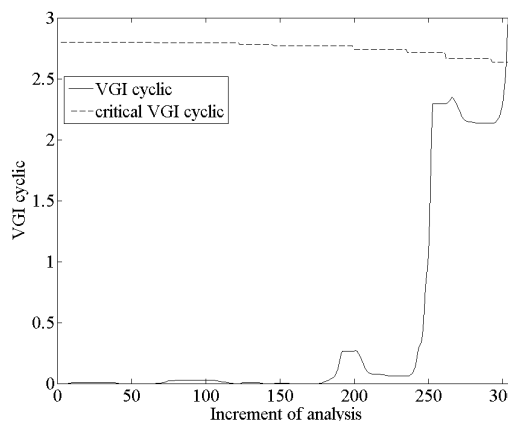
شکل ۷- محل شروع گسیختگی در آزمایش [۵]

در لحظه ترک خوردگی محاسبه شده‌اند در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با در نظر نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشاهده می‌شود که شاخص اتلاف انرژی و شاخص کار تجمعی برای پیش‌بینی ترک خوردگی قابل استفاده‌ترند زیرا هر دو شاخص برای بارگذاری‌های مختلف مقادیر تقریباً ثابتی به دست می‌دهند. انحراف از معیارهای محاسبه شده برای این شاخص‌ها مؤید این مسأله هستند.

اشکال ۱۳ و ۱۴ انرژی وارد شده به اتصال برای بارگذاری‌های SAC Basic و SAC Nearfault را نشان می‌دهند. همان طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، در بارگذاری SAC Basic در طول سیکل‌های با دامنه کمتر از زاویه جابجایی بین طبقه‌های ۰/۱۳ یعنی قبل از نمو ۳۰۰، منحنی انرژی وارد شده، در انتهای هر سیکل به صفر برمی‌گردد. دلیل این مسأله این است که در طول این سیکل‌ها، اتصال در محدوده الاستیک است. هرچند همان طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، در بارگذاری SAC Nearfault سیکل‌های با دامنه ۰/۱ متناظر با نمونه‌های ۱۶۲ تا ۲۴۸ و ۴۴۷ تا ۵۲۰ در اتلاف انرژی مشارکت غیرصفر دارند و دلیل این مسأله تسلیم و کماتش در سیکل‌های با دامنه بزرگتر قبلی است.



شکل ۱۱- نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{critical}$ برای بارگذاری با دامنه ثابت ۰/۰۴ رادیان جابجایی بین طبقه‌های



شکل ۱۲- نمودارهای VGI_{cyclic} و $VGI_{critical}$ برای بارگذاری با دامنه ثابت ۰/۰۳ رادیان جابجایی بین طبقه‌های

۵- مقایسه شاخص‌های خسارت

بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی CVGM، شاخص‌های خسارت توصیف شده در بخش ۲ با هم مقایسه شده‌اند. منظور از این کار تعیین شاخصی است که به بهترین وجه لحظه ترک خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. نیروی اعمال شده از طرف جک و جابجایی بازوی جک به عنوان نیرو و تغییرشکل در روابط ۱ و ۳ و ۵ جایگذاری شده‌اند. نیروی تسلیم ۷۴۶/۶ kN و تغییرشکل تسلیم ۰/۰۴۸ m از آزمایش به دست آمده‌اند [۵]. مقدار a در رابطه (۲) طبق پیشنهاد [۸] برابر ۱/۶ فرض شده است. مقدار شاخص‌های خرابی که برای بارگذاری‌های مختلف



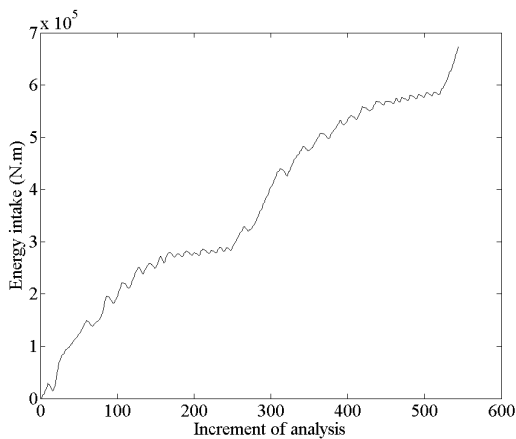
جدول (۱): شاخص‌های خسارت محاسبه شده در لحظه ترک خوردگی

شاخص	شاخص	شاخص	بارگذاری
کار تجمعی	تغییر شکل پلاستیک تجمعی	اتلاف انرژی	SAC Basic
۶/۴۵	۹/۶۰	۲۰/۸۷	SAC Near-Fault
۵/۳۸	۸/۸۷	۱۸/۹۰	دامنه ثابت، زاویه جابجایی بین طبقه‌ای ۰/۰۵
۶/۲۷	۱۵/۰۷	۱۹/۴۲	دامنه ثابت، زاویه جابجایی بین طبقه‌ای ۰/۰۴
۵/۲۴	۹/۰۵	۱۵/۹۱	دامنه ثابت، زاویه جابجایی بین طبقه‌ای ۰/۰۳
۵/۱۷	۷/۱۱	۱۷/۷۰	میانگین
۵/۷۰	۹/۹۴	۱۸/۵۶	انحراف معیار
۰/۱۱	۰/۳۰	۰/۱۰	

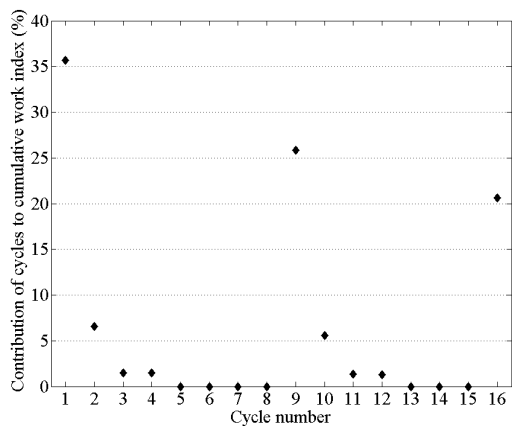
در شکل ۱۵، مشارکت هر سیکل در شاخص کار تجمعی برای بارگذاری SAC Nearfault نشان داده شده است. برای سیکل‌های با دامنه کمتر از جابجایی بین طبقه‌ای تسلیم، مقدار شکل پذیری μ_{si} کمتر از ۱ می‌شود که باعث منفی شدن عبارت $\lambda_i(\mu_{si}-1)$ در رابطه (۴) می‌شود و بنابراین این عبارت برای این سیکل‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این شاخص توانایی در نظر گرفتن تأثیر سیکل‌های کوچک بعد از سیکل‌های بزرگتر را ندارد.

۶- نتیجه گیری

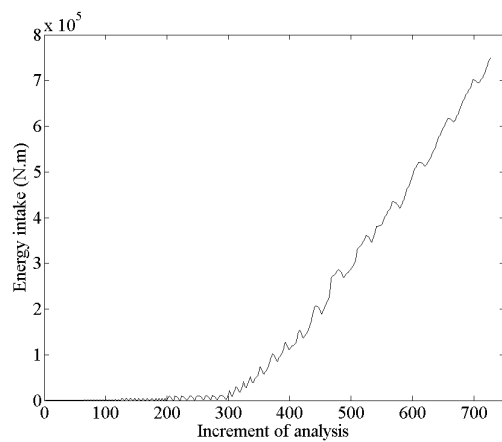
در این مقاله، یک مدل اجزای محدود از یک اتصال با ورق‌های پوششی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده است. مدل CVGM برای شبیه‌سازی ترک خوردگی در



شکل ۱۴- انرژی وارد شده به اتصال در بارگذاری SAC Nearfault



شکل ۱۵- مشارکت هر سیکل در شاخص کار تجمعی در بارگذاری SAC Nearfault



شکل ۱۳- انرژی وارد شده به اتصال در بارگذاری SAC Basic



سازی‌ها نشان داد که شاخص اتلاف انرژی پیش‌بینی بهتری برای ترک‌خوردگی اتصال انجام می‌دهد. شاخص تغییرشکل پلاستیک تجمعی پراکندگی بیشتری نسبت به دو شاخص دیگر نشان می‌دهد که وابستگی این شاخص به بارگذاری را نشان می‌دهد. شاخص کار تجمعی اثر سیکل-های کوچک بعد از سیکل‌های بزرگتر را نشان نمی‌دهد.

اتصال استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش انطباق خوبی به صورت پیش‌بینی محلّ و لحظه ترک‌خوردگی نشان داد.

قابلیت استفاده از سه شاخص خسارت برای تشخیص ترک‌خوردگی در اتصال بررسی شده است. این شاخص-های خسارت، بر اساس نتایج شبیه‌سازی CVGM برای پنج بارگذاری مختلف با هم مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه-

۷- مراجع

- [6] ABAQUS, (1998), User's Manual, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.
- [7] C. A. Castiglioni, and R. Pucinotti, "Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 4, pp. 751-765.
- [8] H. Krawinkler, and M. Zohrei, "Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions," *Comput. Struct.*, vol. 16, no. 1-4, pp. 531-541, Apr. 1983.
- [9] A. M. Kanvinde, and G. G. Deierlein, "Micromechanical simulation of earthquake induced fracture in steel structures," *Technical Rep. No 145*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., Stanford, California.
- [10] A. M. Kanvinde, and G. G. Deierlein, "Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue," *J. Eng. Mech. - ASCE*, vol. 133, no. 6, pp. 701-712, June 2007.
- [11] H. Krawinkler, A. Gupta, R. Medina, and N. Luco, "Development of loading histories for testing of steel beam-to-column assemblies," *Technical Rep.*, Department of Civil and Env. Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- [1] E. J. Kaufmann, J. W. Fisher, R.M. Di Julio Jr., and J. L. Gross, "Failure analysis of welded steel moment frames damaged in the northridge earthquake," NISTIR 5944, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [2] J. Iyama, and J. M. Ricles, "Prediction of fatigue life of welded beam-to-column connections under earthquake loading," *J. Struct. Eng. - ASCE*, vol. 135, no. 12, pp. 1472-1480, Dec. 2009.
- [3] X. Zhang, J. M. Ricles, L. W. Lu, and J.W. Fisher, "Analytical and experimental studies on seismic behavior of deep column-to-beam welded reduced beam section moment connections," in *Proc. 13th world Conf. Earthq. Eng.*, Vancouver, B.C., 2004, paper No. 1599.
- [4] J. M. Ricles, X. Zhang, J. W. Fisher, and L. W. Lu, "Seismic performance of deep column-to-beam welded reduced beam section moment connections," in *Proc. 5th Conf. Connections in Steel Structures.*, Amsterdam, 2004, pp. 211-222.
- [5] T. Kim, A. S. Whittaker, A. S. J. Gilani, V. V. Bertero, and S. M. Takhirov, "Cover-plate and flange-plate reinforced steel moment-resisting connections," Pacific Earthquake Engineering Research Center, Technical Report, Sept. 2000.

