

## بررسی اثر سخت کننده قائم در اتصالات صلب شکاف دار تحت بارهای چرخه‌ای

حمید میرشکار<sup>۱</sup>، سید روح الله موسوی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

### چکیده

بعد از زلزله نورتریج سال ۱۹۹۴ و خرابی سازه‌هایی با سیستم قاب خمشی فولادی به علت عملکرد نامناسب اتصال صلب خمشی و شکست ترد این اتصالات، اتصالات شکاف دار SW به منظور افزایش شکل پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال معرفی شدند، ماهیت این اتصال بر اساس انتقال برش موجود در بال تیر به جان و جلوگیری از شکست ترد اتصال می‌باشد. این اتصال با کاهش افت مقاومت در مقایسه با اتصال صلب جوشی و همچنین افزایش کارایی اتصال به عنوان یک اتصال قابل قبول و مطمئن در سازه‌های قاب خمشی فولادی بکار برده می‌شود. با توجه به کماتش بال‌های تیر و جلوگیری از افت سختی اتصال در سیکل‌های بالاتر در بارگذاری چرخه‌ای، سخت کننده‌های قائمی به بال بالا و پایین تیر جوش داده شد که طبق نتایج بدست آمده از تحلیل و مدل سازی اتصال، وجود این سخت کننده‌ها باعث افزایش سختی اتصال و پایداری بیشتر و افت مقاومت کمتر در سیکل‌های بارگذاری بالاتر می‌باشد و با توجه به اینکه شکل پذیری اتصال شکاف دار همراه با سخت کننده قائم بیشتر از حالت معمول اتصال شکاف دار شد این نتیجه بدست آمد که وجود سخت کننده قائم با طولی برابر با یک و نیم برابر ارتفاع آن، باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال و افزایش شکل پذیری خواهد شد.

کلمات کلیدی: اتصال شکاف دار، سخت کننده، شکل پذیری، سختی، منحنی هیسترزیس، جذب انرژی

| سابقه مقاله:    |            | شناسه دیجیتال:            |               |           |                                |
|-----------------|------------|---------------------------|---------------|-----------|--------------------------------|
| دریافت          | بازنگری    | پذیرش                     | انتشار آنلاین | چاپ       | doi:                           |
| ۱۳۹۶/۹/۰۴       | ۱۳۹۶/۱۲/۰۸ | ۹۷/۰۱/۲۲                  | ۹۷/۰۱/۲۲      | ۱۳۹۸/۶/۱۰ | 10.22065/jsce.2018.108469.1392 |
| *نویسنده مسئول: |            | سید روح الله موسوی        |               |           |                                |
| پست الکترونیکی: |            | s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir |               |           |                                |

# Investigation on using stiffness in Slotted web connection under seismic load

Hamid Mirshekar<sup>1</sup>, Seyed Roohollah Mousavi<sup>\*2</sup>

1-M.S Graduated, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Semnan, Semnan, Iran.

2- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

## ABSTRACT

A lot of moment resisting steel frames were damaged, after Northridge earthquake. In these building, the usual rigid weld connection didn't work properly and fielded. In the rigid weld connections, available Shear force in the flanges and lateral torsional buckling are the main reason for weld fracture. Slotted web connections, by improving many weaknesses present in moment connections were introduced by Seismic Structural Design Associates (SSDA), and has been classified as a special moment connection in the American Institute of Steel Construction (AISC), managed to qualify for the Federal Emergency Management Agency (FEMA) regulations. The Slotted Web connection design rationale that sizes the beam slot length, shear plate, and connection weldments, is based upon successful FEMA/AISC ATC-24 protocol test results and extensive inelastic finite element analyses of the beam and column stress and strain distributions. Incorporated in this rationale, which has been accepted by numerous departments of building and safety, are the UBC and AISC Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specifications and the 1997 AISC Seismic Design Provisions for Steel Buildings and its supplements. In this connection, the separation of beam flanges removes the shear force from beam flange and it causes to transfer it on beam web. This connection is using moment resisting steel frame structure with proper behaviour and good seismic performance. One of disadvantage of this connection is fast buckling of beam flange, to revise this problem in Slotted web connection we add a couple of vertical stiffness up and down the beam flange. Using of these stiffness, not only prevent fast buckling but also increase ductility and seismic performance and when we use these stiffness we will see, the absorbing of energy in hysteric loop will be more than the usual Slotted web connection.

## ARTICLE INFO

### Receive

Date: 25 November 2017

Revise Date: 27 February 2018

Accept Date: 11 April 2018

### Keywords:

Slotted Web connection, stiffness, ductility, hysteresis loop, energy absorbing

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.108469.1392

\*Corresponding author: Seyed Roohollah Mousavi

Email address: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

## ۱- مقدمه

سختی و شکل پذیری اتصالات صلب در سازه‌های قاب خمشی فولادی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد اهمیت این موضوع بعد از زلزله نورتریج سال ۱۹۹۴ بیشتر از قبل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. با توجه به خرابی اکثر سازه‌های فولادی با اتصالات صلب خمشی و طبق بررسی‌های انجام شده بر روی علل خرابی اینگونه از سازه‌ها، مشاهده شد که بیشترین خرابی سازه‌ها از ناحیه اتصال صلب جوشی می‌باشد. طی تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر پیشنهادات مختلفی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش کارایی و شکل پذیری اتصالات صلب ارائه شد. بررسی‌هایی در مورد علل شکست اتصالات صلب در سازه‌های فولادی انجام شد. یکی از دلایل عمده این شکست‌ها و خرابی‌ها وجود نیروی برشی زیاد در بال تیر در محل جوش آن به ستون بود [۱]. نیروی برشی موجود در بال تیر نیز یکی از عوامل اصلی شکست ترد در ناحیه جوش بال تیر به ستون است. وجود این نیرو در بال تیر موجب توزیع غیر یکنواخت تنش و کرنش در طی جوشکاری و ایجاد تنش سه محوری در جوش بال تیر می‌شود. به همین علل محققان شکاف‌هایی در جان تیر را پیشنهاد دادند (اتصال با جان شکاف دار) که موجب شکل پذیرتر شدن و تشکیل مفصل پلاستیک دورتر از اتصال شدند [۲].

به همین منظور اتصالات شکاف دار بعد از زلزله نورتریج با جدایی بال تیر و جان آن بوسیله شکاف، توسط سازمان طراحی لرزه‌ای ساختمان (SSDA<sup>۱</sup>) معرفی و ارائه شد [۳]. در اتصالات شکاف دار جدایی بال تیر از جان آن باعث کاهش نیروی برشی موجود در بال تیر می‌شود به طوری که مقدار این نیرو از ۵۰ درصد به ۳ درصد کاهش می‌یابد و علاوه بر آن باعث توزیع یکنواخت تنش و کرنش در بال جوش شده به ستون و کاهش کمانش پیچشی جانبی در طول تیر می‌شود [۴]. طبق تحقیقات محققین وجود سخت کننده در بالا و پایین اتصال باعث جلوگیری از کمانش زودرس بال و همچنین باعث کاهش تنش‌های سه محوری در محل اتصال تیر به ستون می‌شود [۵]. در این تحقیق به بررسی پارامترهای لرزه‌ای اتصال شکاف دار همراه با سخت کننده‌های قائم به صورت مثلثی شکل با ابعاد مختلف و همچنین به صورت تک و جفت که در بال بالا و بال پایین تیر تعبیه شده است، پرداخته خواهد شد.

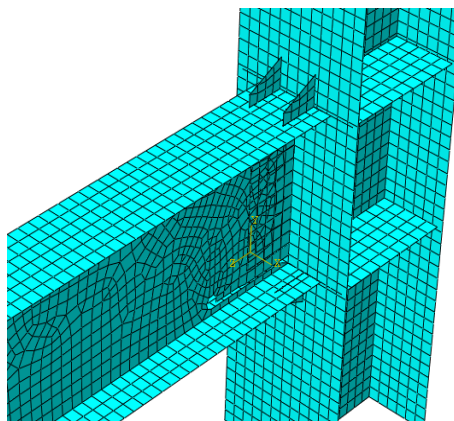
## ۲- مدل سازی به روش اجزای محدود

ویژگی‌های رفتاری واقعی اتصالات تأثیر زیادی بر پاسخ سازه‌ها می‌گذارد در واقع در سیستم‌هایی که دارای اتصالات مفصلی می‌باشند سختی واقعی اتصال به سیستم اجازه می‌دهد تا توزیع لنگر خمشی در تیرها صورت گیرد در حالیکه در سیستم‌های صلب رفتار واقعی اتصالات و انعطاف پذیری که از خود نشان می‌دهند حساسیت سیستم را به اثرات ثانویه افزایش می‌دهد، لذا جهت رسیدن به رفتار واقعی سیستم می‌بایست از نرم افزارهای مناسب موجود استفاده گردد و در مدل سازی، اثرات پارامترها را به گونه‌ای وارد ساخت که رفتار سازه در مدل ساخته شده، مطابقت کافی با رفتار واقعی داشته باشد.

## ۲-۱- شبکه بندی

مدل سازی‌های انجام شده بر روی تمامی اتصالات فوق با نرم افزار Abaqus صورت گرفت این نرم افزار با طیف گسترده‌ای از المان‌های موجود در خود امکان مدل سازی و تحلیل مسائل مهندسی را با دقت قابل قبولی فراهم کرده است. در اینجا جهت مدل کردن صفحات تشکیل دهنده بال و جان تیرها و ستون‌ها از المان S4R استفاده شده است. این المان دارای چهار گره با شش درجه آزادی در هر گره است به طوری که هر گره می‌تواند سه مولفه نیرو و سه مولفه ممان داشته باشد. از قابلیت‌های این المان می‌توان به توانایی اعمال کردن حالات خمیری، خزش، سخت شدگی کرنشی، تغییر شکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ اشاره کرد که برای مدل سازی رفتار فولاد مناسب می‌باشد (شکل ۱).

<sup>1</sup> Seismic Structural Design Associates



شکل ۱- مدل سه بعدی اتصال

## ۲-۲- مشخصات مصالح

جهت مدل سازی مناسب رفتار نمونه، برای مصالح فولادی از فولاد St۳۷ (تنش تسلیم برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال) استفاده شد. از سخت شدگی ترکیبی و معیار تسلیم فون میز برای شبیه سازی تغییر شکل های پلاستیک اجزای اتصال استفاده شد، همچنین ضریب پواسون مواد برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

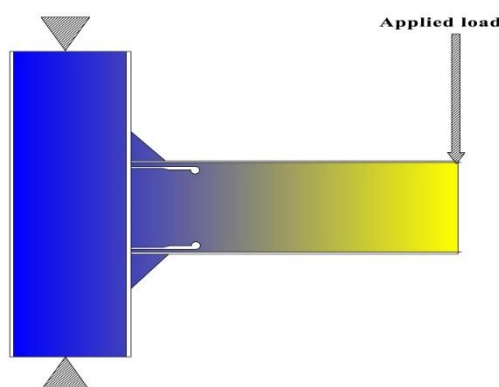
## ۲-۳- الگوی بارگذاری

الگوی بارگذاری طبق توصیه آیین نامه AISC [۶] به صورت جابجایی کنترل<sup>۲</sup> به انتهای طره تیر، وارد شد (جدول ۱). نمونه ها تا ۰/۰۵ رادیان چرخش کلی اتصال بارگذاری شدند.

جدول ۱- الگوی بارگذاری [۶]

|                        |
|------------------------|
| ۶ سیکل @ ۰/۰۰۳۵ رادیان |
| ۶ سیکل @ ۰/۰۰۵ رادیان  |
| ۴ سیکل @ ۰/۰۰۷۵ رادیان |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۱ رادیان   |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۱۵ رادیان  |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۲ رادیان   |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۳ رادیان   |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۴ رادیان   |
| ۲ سیکل @ ۰/۰۵ رادیان   |

<sup>2</sup> Displacement control



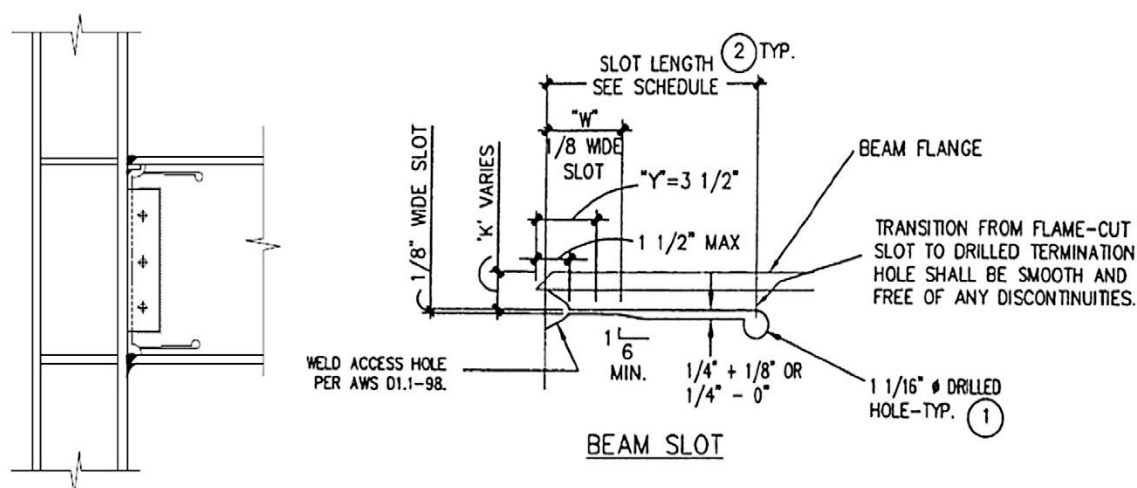
شکل ۲- نیم قاب مدل شده در نرم افزار

### ۳- معرفی مدل ها

مطالعه تحلیلی بر روی اتصال شکافدار همراه شکافی با طول معین در جان تیر به صورت متقارن در نزدیکی بال تیر و تعبیه سخت کننده قائم در هر دو بال بالا و پایین انجام می شود. نمونه ها به صورت یک نیم قاب که شامل یک تیر طره و یک ستون است که از پایین و بالا بصورت مفصلی مدل شده اند، برای مقطع تیر از IPE ۲۷۰ و برای مقطع ستون از IPB ۲۲۰ استفاده شده است (شکل ۲). سخت کننده هایی که در اتصالات شکافدار مورد استفاده قرار گرفت، به این صورت است که ابتدا اتصال شکافدار مدل شده (نمونه S۱) و سپس سخت کننده هایی به شرح جدول (۲) به اتصال اضافه شد. لازم به ذکر است نمونه S۲ همان سخت کننده های مورد استفاده در منبع [۷] می باشد و سخت کننده های دیگری که مورد استفاده قرار گرفت است با توجه به طول ورق برشی موجود در جان تیر در نظر گرفته شده است. در نمونه S۳ سخت کننده با طول و ارتفاعی برابر عرض ورق برشی جان بصورت تک و در نمونه S۴ بصورت دابل است، در نمونه S۵ سخت کننده با طولی برابر با یک و نیم برابر عرض ورق برشی و ارتفاعی برابر عرض ورق برشی جان و بصورت تک و در نمونه S۶ با همین ابعاد بصورت دابل استفاده شده و در نهایت نمونه S۷ سخت کننده با طولی برابر با عرض ورق برشی جان و ارتفاعی برابر یک و نیم برابر عرض ورق برشی جان و بصورت تک و در نمونه S۸ با همین ابعاد بصورت دابل استفاده شده است. طول شکاف مدل شده طبق استاندارد (SSDA) برابر با ۱۳/۵ سانتی متر می باشد، پهنای شکاف از ابتدا تا انتهای ورق برشی ۳/۲ میلیمتر و از انتهای ورق برشی تا آخر شکاف ۶/۴ میلیمتر می باشد. همه ی شکاف های با یک سوراخ به قطر ۲۱ میلی متر در انتهای طول شکاف، ختم می شوند (شکل ۳). ورق برشی با ابعاد ۱۰\*۱۰۰\*۲۳۰ میلی متر در جان تیر نمونه ها مورد استفاده قرار گرفته شد.

جدول ۲- مشخصات سخت کننده های موجود در اتصالات شکافدار

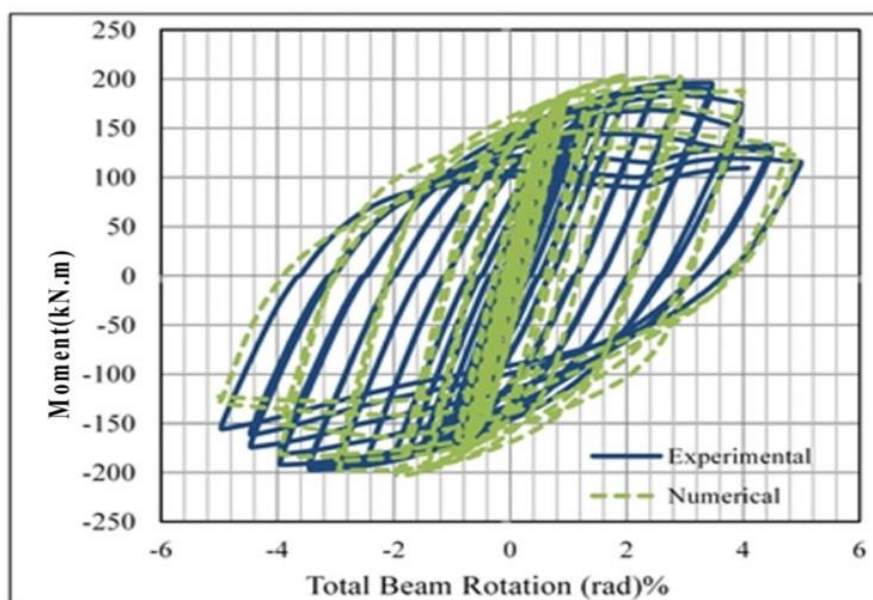
| طول سخت کننده<br>(میلی متر) | ارتفاع سخت کننده<br>(میلی متر) | ضخامت سخت<br>کننده (میلی متر) | نمونه ها |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|
| ۰                           | ۰                              | ۰                             | S۱       |
| ۷۰                          | ۵۰                             | ۶                             | S۲       |
| ۱۰۰                         | ۱۰۰                            | ۶                             | S۳       |
| ۱۰۰                         | ۱۰۰                            | ۶+۶ (دابل)                    | S۴       |
| ۱۰۰                         | ۱۵۰                            | ۶                             | S۵       |
| ۱۰۰                         | ۱۵۰                            | ۶+۶ (دابل)                    | S۶       |
| ۱۵۰                         | ۱۰۰                            | ۶                             | S۷       |
| ۱۵۰                         | ۱۰۰                            | ۶+۶ (دابل)                    | S۸       |



شکل ۳- اتصال صلب خمشی با جان شکافدار SW [۳]

#### ۴- صحت سنجی مدل

به منظور حصول اطمینان از تطابق فرضیات مدل نرم‌افزاری (نوع المان، نحوه المان‌بندی، نوع بارگذاری و ...) با رفتار واقعی، نتایج آزمایشگاهی نمونه اتصال شکافدار موجود از مرجع [۷] انتخاب و همان نمونه توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. منحنی چرخش-لنگر نمونه اتصال شکافدار در حالت بارگذاری چرخه‌ای یک‌نواخت در شکل (۴) آمده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش نیز در شکل (۴) مشاهده می‌شود. مطابق شکل سختی اولیه، حداکثر بار در نقطه تغییر مکان نهایی و رفتار در ناحیه غیرخطی در مدل نرم‌افزاری با نمونه آزمایشگاهی از تطابق مناسبی برخوردار است.



شکل ۴- مقایسه منحنی‌های هیستریزیس در نمونه آزمایشگاهی [۷] و نمونه تحلیل شده توسط نرم‌افزار (S۲)

## ۵- بحث و بررسی نتایج

## ۵-۱ بررسی میزان گیرداری اتصالات

برای بدست آوردن درصد گیرداری اتصالات از مفهوم خط تیر استفاده می‌شود [۸]. برای طبقه بندی اتصالات بر اساس گیرداری ابتدا باید منحنی‌های هیستریزیس (لنگر-دوران) مربوط به هر نمونه را از نتایج تحلیلی بدست آورد و سپس با ترسیم خط تیر مربوطه و پیدا کردن لنگر گیرداری و دوران برای بار حالت نهایی، درصد گیرداری اتصال مورد نظر بدست خواهد آمد [۹]. در ادامه برای یک نمونه از اتصالات میزان گیرداری بدست آورده شده است و در جدول (۳) خلاصه نتایج مربوط به میزان گیرداری اتصالات، آمده است. محاسبه درصد گیرداری نمونه S۱:

$$M_s = S \times f_y = 429 \times 2400 = 1029600 \text{ kg.cm} = 102.9 \text{ kN.m} \quad (۱)$$

و سپس مختصات نقطه متناظر با لنگر نهایی روی محور چرخش بدست خواهد آمد:

$$\theta = \frac{M_s L}{EI} = \frac{1029600 \times 200}{2 \times 10^6 \times 57900} = 0.00177 \quad (۲)$$

و در نهایت درصد گیرداری اتصال مورد نظر طبق رابطه (۳) محاسبه خواهد شد:

$$R = \frac{M_{s1}}{M_{s2}} \times 100 = \frac{51}{102} \times 100 = 50\% \quad (۳)$$

جدول ۳- تعیین میزان گیرداری

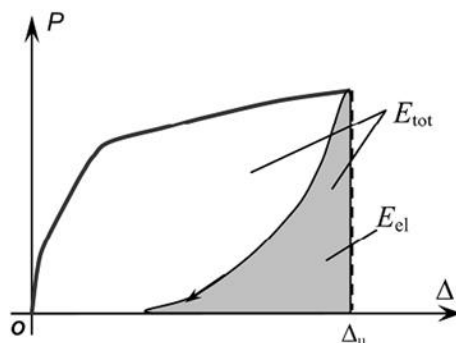
| نمونه | میزان گیرداری % |
|-------|-----------------|
| S۱    | ۵۰              |
| S۲    | ۵۵              |
| S۳    | ۵۲              |
| S۴    | ۵۷              |
| S۵    | ۵۴              |
| S۶    | ۵۹              |
| S۷    | ۵۵              |
| S۸    | ۶۰              |

با توجه به نتایج موجود در جدول (۳) و مقایسه میزان گیرداری در نمونه‌ها، می‌توان دریافت که وجود سخت‌کننده در همه حالات باعث افزایش میزان گیرداری اتصال (به میزان ۲ تا ۶ درصد) می‌شود و همچنین در حالتی که این سخت‌کننده‌ها به صورت دابل در اتصال بکار رود این میزان گیرداری بیشتر از حالت تک سخت‌کننده (به مقدار ۱۰ درصد) خواهد شد و در نهایت این نکته حائز اهمیت است که بیشترین میزان گیرداری اتصال شکافدار با وجود یک جفت سخت‌کننده (نمونه‌های S۸ و S۶) بدست خواهد آمد که می‌توان دریافت ارتفاع و طول سخت‌کننده در تعیین میزان گیرداری از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد و در صورتی که ارتفاع و طول آن برابر باشد یا طول آن یک و نیم برابر ارتفاع آن باشد، بهترین عملکرد در انتقال لنگر خمشی به ستون را از خود نشان می‌دهد.

## ۲-۵- بررسی شکل‌پذیری نمونه‌ها

برای بدست آوردن شکل‌پذیری مدل‌های نرم‌افزاری از شاخص شکل‌پذیری که توسط نامان و جیانگ [۱۰] معرفی شد، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه این شاخص بر پایه مفاهیم جذب انرژی بنا شده است لذا گزینه مناسبی برای بدست آوردن شکل‌پذیری اتصالات مورد نظر می‌باشد. این شکل‌پذیری با رابطه (۴) معرفی شده است:

$$\mu = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (4)$$



شکل ۵- تشریح منحنی بکار رفته در بررسی شکل‌پذیری

در رابطه (۴)،  $E_{tot}$  سطح زیر کل منحنی بارگذاری و  $E_{el}$  سطح زیر منحنی باربرداری است (شکل ۵). با توجه به شاخص معرفی شده شکل‌پذیری نمونه‌ها طبق جدول (۴) بدست آمد. مشاهده شد که شکل‌پذیری در اتصالات شکاف‌دار همراه با سخت‌کننده بین ۷ تا ۱۰ درصد بیشتر از حالت معمولی می‌باشد با تحلیل و مقایسه اعداد موجود در جدول (۴) باید به این نکته اشاره کرد که بیشترین شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌های S۷ و S۸ می‌باشد و در حالت کلی استفاده از یک جفت سخت‌کننده اثر بیشتری را در بهبود عملکرد اتصال خواهد داشت. در اینجا این نکته مهم را می‌توان دست یافت که تعبیه این سخت‌کننده‌ها علاوه بر افزایش سختی در اتصال موجب افزایش شکل‌پذیری نیز می‌شود. یکی از مشاهدات مهم در نمودارهای هیستریزس نمونه‌های دارای سخت‌کننده این است که زوال مقاومت و زوال سختی کمتری نسبت به نمونه بدون سخت‌کننده (S۱) مشاهده می‌شود، که این موضوع از مواردی مهمی می‌باشد که این اتصال شکاف‌دار را می‌توان با یک جفت سخت‌کننده قائم به صورت مطلوب‌تری در سازه به کار برد (شکل ۷).

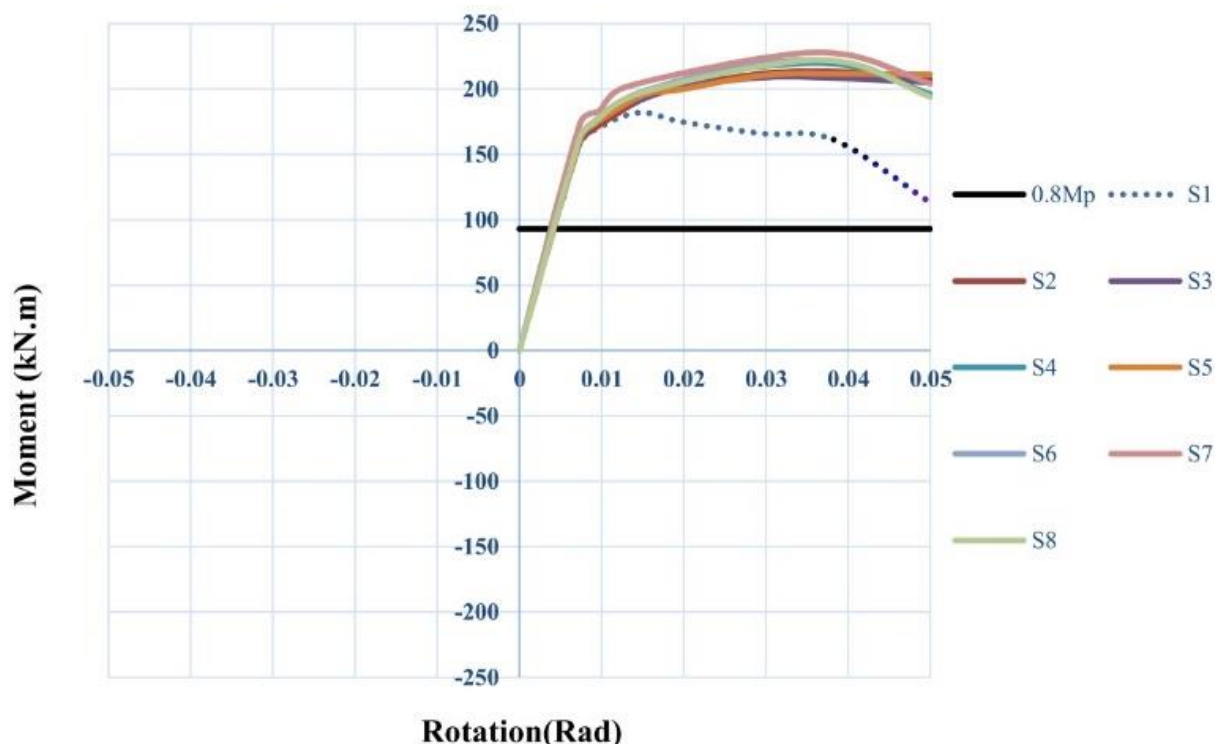
جدول ۴- اعداد شکل‌پذیری اتصالات

| نمونه‌ها | شکل‌پذیری ( $\mu$ ) | $\frac{\mu}{\mu_{S1}}$ |
|----------|---------------------|------------------------|
| S۱       | ۲/۷۷۷               | ۱                      |
| S۲       | ۳/۰۰۸               | ۱/۰۸۲                  |
| S۳       | ۲/۹۷۷               | ۱/۰۷۲                  |
| S۴       | ۳/۰۱۹۴              | ۱/۰۸۷                  |
| S۵       | ۲/۹۹۱               | ۱/۰۷۷                  |
| S۶       | ۳/۰۴۸               | ۱/۰۹۸                  |
| S۷       | ۳/۰۶۳               | ۱/۱۰۳                  |
| S۸       | ۳/۰۴۸               | ۱/۰۹۷                  |



### ۵-۳- طبقه بندی اتصالات بر اساس معیار شکل پذیری 0/8 مگاپاسکال

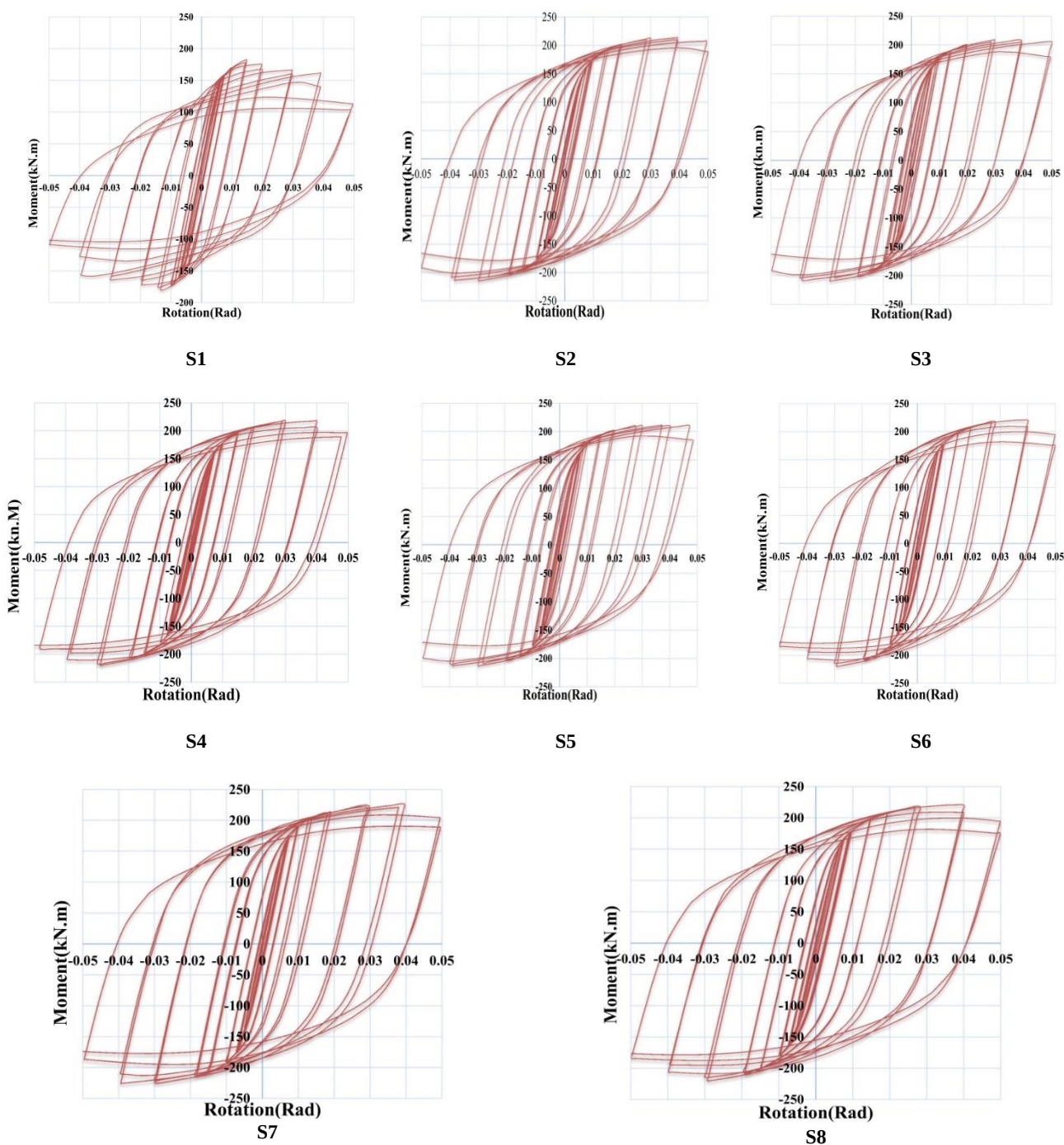
طبق تعاریف آیین نامه لرزه‌ای AISC [6] اتصالی که بتواند ۸۰ درصد لنگر پلاستیک معادل تیر را تا ۰/۰۴ رادیان چرخش کلی اتصال تحمل کند، آن اتصال از شکل پذیری کافی برخوردار است و می‌توان آن را در قاب‌های خمشی ویژه بکار برد. در بررسی منحنی‌های پوش مربوط به نمونه‌ها (شکل ۶) می‌توان دریافت که همه نمونه‌ها از شکل‌پذیری قابل قبول برخوردار هستند و می‌توانند به عنوان یک اتصال مناسب در قاب‌های خمشی ویژه بکار برده شوند. با توجه به شکل (۶) نتیجه گرفته می‌شود که نمونه S۱ که اتصال شکافدار معمولی می‌باشد از افت سختی و کاهش مقاومت در سیکل‌های بالا برخوردار است که این مسئله با استفاده از سخت کننده‌ها برطرف گردیده شد.



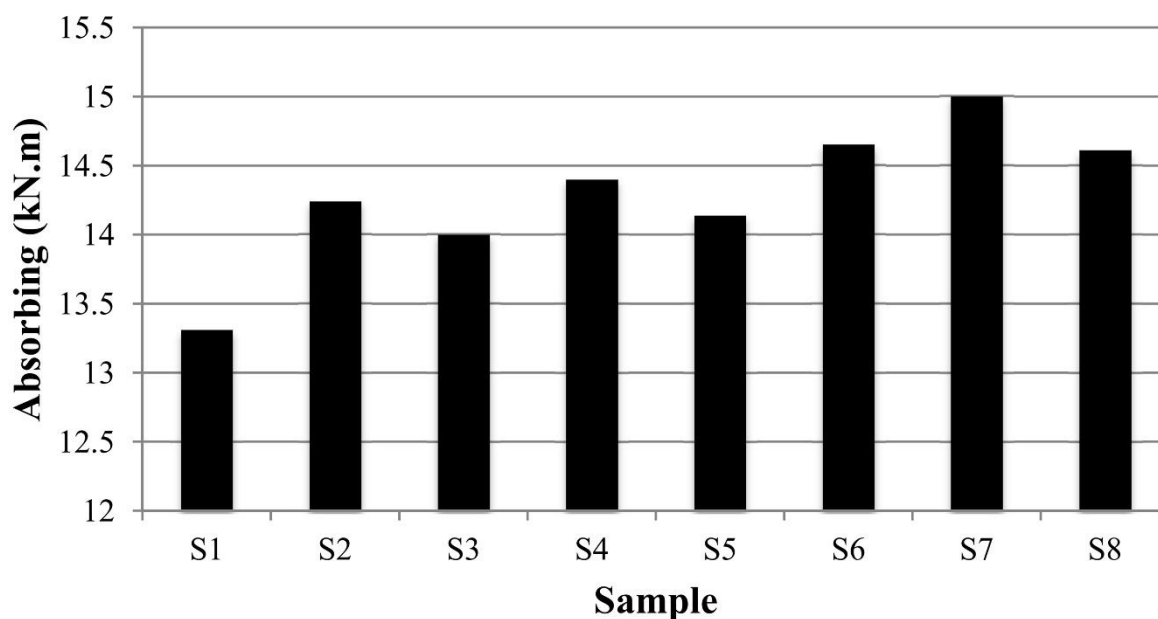
شکل ۶- پوش منحنی‌های هیستریزس

### ۵-۴ توانایی استهلاک انرژی

منحنی‌های هیستریزس مربوط به اتصال ترکیبی در شکل (۷) آورده شده است. طبق تعریف ظرفیت استهلاک انرژی توسط اتصال برابر با سطح اشغال شده زیر منحنی هیستریزس می‌باشد (شکل ۷). در شکل (۸) مقدار جذب انرژی برای هر نمونه آورده شده است که با مقایسه این نمودارها و محاسبه ظرفیت اتلاف انرژی (سطح زیر منحنی هیستریزس) مشاهده می‌شود که جذب انرژی در نمونه S۷، ۱۵/۱ کیلو نیوتن متر می‌باشد که بیشترین جذب انرژی را دارد و همچنین باید به نمونه S۸ و S۶ اشاره کرد که با جذب انرژی بیشتر (نمونه S۶ مقدار ۱۴/۹۱ و نمونه S۸ مقدار ۱۴/۶۱ کیلو نیوتن متر) از دیگر نمونه‌ها، دارای گیرداری بهتر و شکل‌پذیری قابل قبولی می‌باشد. لازم به ذکر است که جذب انرژی توسط اتصال، در نمونه‌هایی که از سخت کننده دابل استفاده شد نسبت به نمونه‌های با سخت کننده تک، مقدار بیشتری داشت. دو نمونه S۶ و S۸ نیز از جذب انرژی خوبی برخوردار هستند که با مقایسه دیگر پارامترهای این دو نمونه می‌توان به این نتیجه پی برد که نمونه S۸ در تمام موارد عملکرد بهتری از خود نشان داده است.



شکل ۷- منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌ها



شکل ۸- مقدار جذب انرژی در نمونه‌ها

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

با آزمایشات و تحلیل‌های فراوانی که بر روی اتصال شکافدار صورت گرفت این اتصالات مورد تأیید قرار گرفته شد و به صورت گسترده‌ای نیز در ساختمان‌ها بکار برده شد. علت وجود شکاف در جان تیر در اتصال شکافدار دور کردن تمرکز تنش و کمتر کردن نیروی برشی در محل اتصال بال تیر به جان ستون بود و وجود حفره‌ای در جان تیر باعث دور شدن تمرکز تنش، جلوگیری از شکست ترد و انتقال مفصل پلاستیک از نزدیکی ستون به سمت ناحیه میانی تیر شد. در این تحقیق به بررسی اثر وجود سخت کننده‌های قائم در بالا و پایین بال‌های تیر پرداخته شد، که این سخت کننده‌ها با مشخصات و ابعاد مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت، که طی این تحقیق نتایج زیر از آن بدست آمد:

- اتصال شکافدار موجب دور کردن مفصل پلاستیک و کاهش نیروی برشی در بال تیر می‌شود.
- وجود سخت کننده قائم باعث افزایش درصد گیرداری اتصال به میزان ۱۰ درصد و بدون افت در مقاومت و سختی خواهد شد.
- بر خلاف آنچه انتظار می‌رفت وجود سخت کننده نه تنها باعث کاهش شکل پذیری نشد بلکه باعث افزایش شکل پذیری اتصال به میزان ۷ تا ۱۰ درصد در اتصال شد.
- جذب انرژی در اتصال شکافدار همراه با سخت کننده بیشتر از حالت معمولی آن شد که این امر باعث استهلاک بیشتر نیروی زلزله خواهد شد.
- سخت کننده قائم باعث جلوگیری از کمانش زودرس بال‌های تیر خواهد شد.
- استفاده از سخت کننده قائم به صورت دابل در اتصال باعث عملکرد بهتری نسبت به اتصالات شکافدار بدون سخت کننده یا با سخت کننده تک، خواهد شد.
- نمونه S8 با دو سخت کننده قائم با طولی یک و نیم برابر عرض آن، بهترین عملکرد لرزه‌ای را بین نمونه‌ها دارد.

با توجه به نتایج بدست آمده فوق می توان از رضایت بخش بودن استفاده از سخت کننده قائم به صورت دابل و همچنین به بهبود عملکرد لرزه ای و کارایی اتصال اشاره کرد.

## مراجع

- [1] Mele, E. Sarno, L. De Luca, A. (2004). Seismic Behaviour of Perimeter and Spatial Steel Frames. Journal of Earthquake Engineering, 8(3), p. 457-496.
- [2] Allen, J. Richard, R. Partridge, J. (1998). Seismic connection designs for new and existing steel moment frame structures. Journal of Constructional Steel Research, 46(1-3), p. 454-462.
- [3] Seismic Structural Design Associates (SSDA). (1998). Beam slott connection design manual. Laguna Niguel, California.
- [4] FEMA (2000b). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington. DC.
- [5] Ghaffari, F. Vetr, M.G. (2014). The Importance Of Beam Web Weld Shear Strain Reduction In Slotted Web Exclusive Connection With Change Of Shear Strength Of The Panel Zone Through Experimental studies. SCRO Research Annual Report, 2, pp. 108-115.
- [6] AISC 358-10, American Institute of Steel Construction. (2010). Seismic Provisions For Structural Steel Buildings. Chicago. Illinois.
- [7] Adlparvar, M. Vetr, M.G. and GHaffari, F. (2017). The Importance of Panel Zone Shear Strength on Seismic Behavior of Improved Slotted-web Beam Connections. International Journal of Steel Structures, 17(1), pp. 1-12.
- [8] کافی، م. ع. طریقی، پ. (۱۳۹۵). بررسی استفاده از ورق های لچکی به عنوان ورق های پیوستگی ستون قوطی در اتصالات از پیش تایید شده جوشی تحت بارگذاری چرخه ای. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۳(۴)، ص ۱۲۰ تا ۱۳۸.
- [9] دیلمی، ا. قلی پور، م. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی اتصال خمشی اصلاح شده تیر به ستون دابل. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی، ۴۵(۶)، ص ۶۴۳ تا ۶۵۷.
- [10] Naaman, A. E. Jeong, S. M. (1999). Structural Ductility of Concrete Beams Pre-stressed with FRP Tendons, Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Proceeding of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), London, UK, p. 379-385.