

## اثر ابعاد ناحیه برش خورده تیر بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات RBS

نجف‌علی کرمی<sup>۱</sup>، سیدعلی سیدرزاقی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه پیام نور، واحد تهران شمال.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران.

\* Email: arazzaghi@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

### چکیده

اتصال RBS یکی از اتصالات گیردار از پیش تایید شده بوده و برای تامین شکل‌پذیری قاب‌های خمشی فولادی، از آن استفاده می‌شود. در این اتصال یک ناحیه مشخص از بال تیر برش خورده و مقطع در آن ناحیه ضعیف می‌شود تا محل تشکیل مفصل پلاستیک به آن ناحیه منتقل شده و از محل اتصال تیر به ستون دور شود. در نتیجه آن، شکل‌پذیری کافی توسط قاب خمشی برای جذب انرژی و جلوگیری از شکست‌های ترد فراهم می‌شود. در حال حاضر در طراحی اتصالات RBS، تاثیر ابعاد برش خورده RBS بر عملکرد چرخه‌ای المان‌های تیر مورد توجه قرار نمی‌گیرد. اما استفاده از هندسه‌های مختلف RBS برای هر تیر واحد، در مقایسه با مقطع کامل آن، می‌تواند تفاوت‌هایی در رفتار چرخه‌ای اتصالات داشته باشد. به منظور ارزیابی آثار پارامترهای هندسی اتصال RBS بر رفتار چرخه‌ای این اتصالات، یک مطالعه پارامتری بر روی مقاطع فولادی I شکل اروپایی انجام شد. این نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل و منحنی هیستریزس لنگر-دوران برای هر کدام از نمونه‌ها استخراج شد. برای حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی و تحلیل سازه، یک نمونه کار آزمایشگاهی، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و درستی‌آزمایی انجام شد. از هر کدام از منحنی‌های هیستریزس یک منحنی ایده‌آل استخراج و با استفاده از منحنی‌های ایده‌آل، پنج پارامتر شامل لنگر تسلیم موثر ( $M_y$ )، لنگر نقطه مقاومت حداکثر ( $M_c$ )، ظرفیت دوران نهایی ( $\theta_u$ )، شکل‌پذیری ( $\mu$ ) و ظرفیت اتلاف انرژی (EDC) به‌عنوان پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای برای هر یک از نمونه‌ها، استخراج شد. بررسی ارتباط بین ابعاد RBS، ممان اینرسی و مشخصات مقطع برش خورده و کامل نشان داد می‌توان بین این پارامترها و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای رابطه برقرار نمود.

**کلمات کلیدی:** تحلیل المان محدود، شکل‌پذیری، تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)، منحنی هیستریزس، پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای.

### ۱- مقدمه

همچنین معیارهای طراحی لرزه‌ای برای ساختمان‌های جدید ارائه شد. به منظور جلوگیری از شکست‌های ترد در اتصالات قاب‌های خمشی راه‌کارهایی برای اصلاح و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات ارائه، و تعداد زیادی اتصال با عنوان اتصالات گیردار از پیش تایید شده در استانداردهای اروپایی و آمریکایی ارائه شده است که شکل‌پذیری مورد نیاز برای جلوگیری از شکست‌های ترد را تامین می‌کنند. اتصال تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) یکی از این اتصالات می‌باشد که در آن یک ناحیه مشخص از بال تیر برش

زمین‌لرزه‌های نورتریج در سال ۱۹۹۴ و کوبه در سال ۱۹۹۵ باعث ایجاد شکست‌های ترد پیش‌بینی نشده زیادی در اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی شدند. به دنبال عواقب این زمین‌لرزه‌ها، مطالعات و بررسی‌های گسترده‌ای توسط پژوهشگران و سازمان‌های مختلف از قبیل آژانس مدیریت اضطراری فدرال آمریکا (FEMA) در خصوص این شکست‌ها انجام شد. در نتیجه، آیین‌نامه‌هایی برای ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و

ظرفیت جذب انرژی سیستم مهاربندی شامل حلقه، می‌تواند تا حدود ۴۵ درصد بیشتر از ظرفیت جذب انرژی مهاربند هم مرکز معادل باشد [6]. Horton و همکاران در سال ۲۰۲۱ تاثیر ابعاد ناحیه برش خورده تیر با مقطع کاهش یافته را بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات RBS دارای مقاطع فولادی بال پهن آمریکایی بررسی نمودند. برای این کار ۹۰ نمونه اتصال RBS در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و به صورت عددی تحلیل شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، تغییر ابعاد ناحیه برش خورده، تاثیر زیادی در پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای اتصال دارد. این بررسی‌ها نشان می‌دهد عمق ناحیه برش خورده بیشترین تاثیر را نسبت به سایر پارامترها دارد [2]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۲ نمونه‌های مختلف یک سیستم مهاربندی با عضو لوزی شکل مجهز به میراگرهای تسلیم‌شونده را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار داده و میزان شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی آن‌ها را با باهم مقایسه نمودند. ایشان نشان دادند با تغییر در سایز میراگرها می‌توان شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سیستم را بهبود بخشید [7].

در اینجا به منظور ارزیابی آثار پارامترهای هندسی اتصال RBS بر رفتار چرخه‌ای این اتصالات، یک مطالعه پارامتری روی تعدادی نمونه مختلف مقطع فولادی اروپایی انجام می‌شود که فلوچارت انجام کار در شکل (۱) ارائه شده است.

## ۲- هندسه اتصال RBS

در اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته<sup>۱</sup>، عرض بال تیر در نزدیکی محل اتصال آن به ستون به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. نمایی از این اتصال در شکل (۲) و جزئیات آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [8] و ANSI/AISC 358-16 [9]، در ناحیه کاهش یافته تیر محدودیت‌های ارائه شده در روابط (۱) تا (۳) باید تامین شوند. این روابط مقدار مجاز ابعاد برش خورده نسبت به ابعاد مقطع را نشان می‌دهند.

خورده و مقطع در آن ناحیه ضعیف می‌شود تا محل تشکیل مفصل پلاستیک به آن ناحیه منتقل شده و از محل اتصال تیر به ستون دور شود. در نتیجه آن، شکل‌پذیری کافی توسط قاب خمشی برای جذب انرژی و جلوگیری از شکست‌های ترد فراهم می‌شود. با این حال، مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای اتصالات RBS تحت تحریکات زلزله می‌تواند به دلیل رفتار پیچیده غیرخطی آن چالش برانگیز باشد [1]. در حال حاضر در طراحی اتصالات RBS، تاثیر ابعاد برش خورده RBS بر عملکرد چرخه‌ای المان‌های تیر مورد توجه قرار نمی‌گیرد. اما، استفاده از هندسه‌های مختلف RBS برای هر تیر در مقایسه با مقطع کامل آن، می‌تواند تفاوت‌هایی در رفتار چرخه‌ای اتصالات داشته باشد [2].

اولین آزمایش‌ها بارگذاری چرخه‌ای روی اتصالات RBS، ظرفیت چرخشی عالی این اتصالات در مقایسه با اتصالات پیش از نورتریج را نشان می‌دهد [3]. Pachoumis و همکاران در سال ۲۰۰۹ ابتدا اثر ناحیه برش خورده بر عملکرد اتصال را بررسی نموده سپس نشان می‌دهند که هندسه اتصالات RBS بر عملکرد آن‌ها تاثیر می‌گذارد. اتصالات با برش خوردگی بال بیشتر، زودتر دچار کم‌انرژی‌گی بال و جان می‌شوند [4]. Krawinkler در سال ۲۰۱۱ با بررسی آماری یک پایگاه داده جامع شامل نتایج آزمایش تجربی روی اتصالات فولادی، پارامترهای مهمی که بر رفتار چرخه‌ای اتصال تاثیرگذار هستند را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس اطلاعات استنتاج شده از آن مطالعه، روابط تجربی مورد نیاز برای تعیین رفتار اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای، برای اتصالات RBS و اتصالات غیر RBS ارائه شده است [5]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک سیستم مهاربندی جدید مجهز به یک میراگر دایره‌ای را تحت بارگذاری چرخه‌ای مبتنی بر پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار داده و میزان شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی آن‌ها را با عملکرد سیستم‌های بادبندی مرسوم و همچنین دیگر مطالعات مشابه قبلی مقایسه نمودند. ایشان نشان دادند

<sup>1</sup> Reduced Beam Section

شکل ۳. پارامترهای RBS [8]

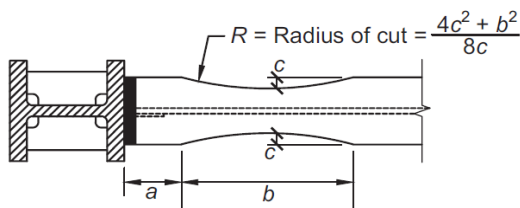


Fig. 3. RBS parameters [8]

$$0.5b_{bf} \leq a \leq 0.75b_{bf} \quad (1)$$

$$0.65d \leq b \leq 0.85 \quad (2)$$

$$0.1b_{bf} \leq c \leq 0.25b_{bf} \quad (3)$$

که در آن  $b_{bf}$  پهنای بال تیر و  $d$  ارتفاع مقطع تیر می‌باشد.  $a, b, c, R$  در شکل (۳) نشان داده شده است.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- مقدمه

به منظور ارزیابی آثار پارامترهای هندسی اتصال RBS بر رفتار چرخه‌ای این اتصالات، نمونه‌های مختلف در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل شده و نتایج استخراج می‌شود. به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی و تحلیل سازه، آزمایش صورت گرفته توسط قاسمیه و همکاران [10] در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است.

#### ۳-۲- معرفی رفتار چرخه‌ای

منحنی بار- تغییر مکان (لنگر- دوران) تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی، منحنی هیستریزس نامیده می‌شود. منحنی هیستریزس می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌های دینامیکی سازه، اثرپذیری و چگونگی رفتار سازه هنگام اعمال نیرو به سازه در اختیار بگذارد. ارزیابی انهدام سیستم‌های سازه‌ای نیازمند مدل‌های هیستریزسی می‌باشد که توانایی در نظر گرفتن زوال در اعضای سازه‌ای را دارد. برای ارزیابی رفتار سازه در بازه کامل از حد سرویس‌دهی تا حد فروپاشی سازه، دستیابی و توسعه مدل هیستریزس الزامی می‌باشد [11]. اما استفاده از این منحنی‌ها کار پیچیده‌ای است. این امر با استفاده از منحنی‌های ایده‌آل شده منحنی‌های هیستریزس آسانتر شده

شکل ۱. فلوچارت انجام تحقیق

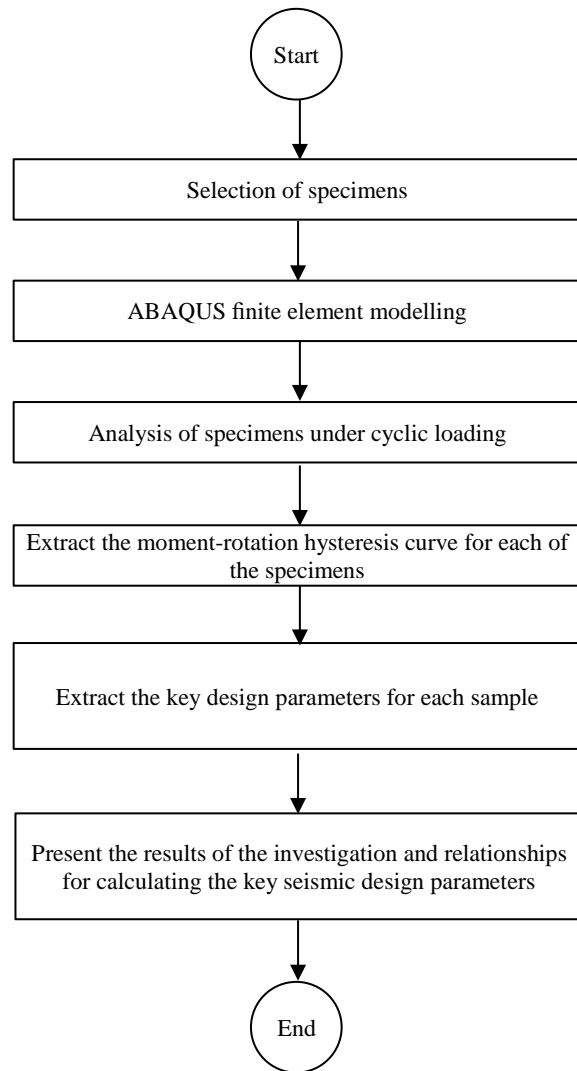


Fig. 1. Research flow chart

شکل ۲. نمایی از اتصال RBS

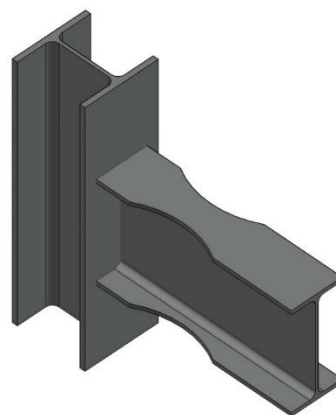


Fig. 2. Schematic view of RBS connection

پلاستیسیته فولاد و آثار سخت‌شوندگی کرنشی ایزوتروپیک و کینماتیک می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از داده‌های رفتاری تک‌محوری فولاد در تحلیل اتصالات تیر به ستون منجر به ایجاد خطاهای قابل توجهی در پاسخ مدل می‌شود [15].

شکل ۴. چگونگی ایده‌آل‌سازی منحنی Backbone [2]

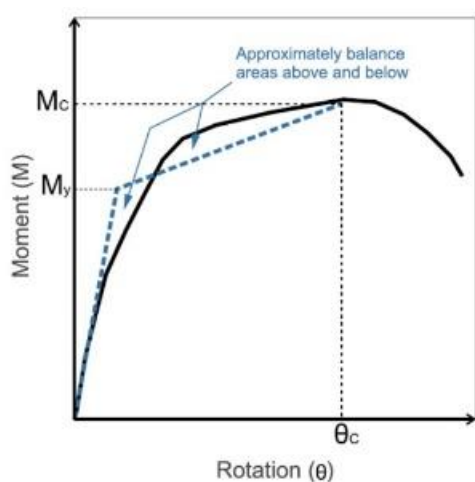


Fig. 4. Idealization of the backbone curve [2]

شکل ۵. مقایسه رفتار تک‌محوری و چرخه‌ای [2]

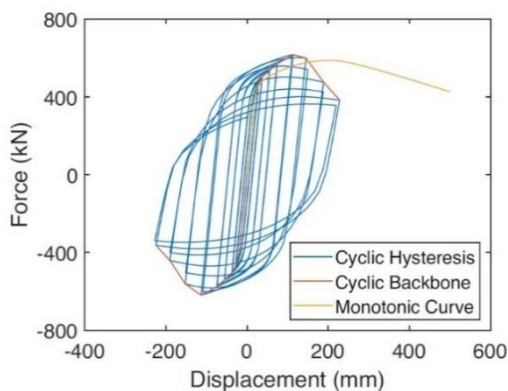


Fig. 5. Comparisons of the monotonic and cyclic behavior [2]

دیلمی و قاسمی اتصال تیر به ستون فولادی از نوع سیمپسون که تحت اثر بار چرخه‌ای قرار گرفته است را با مدل‌های رفتاری مختلف مصالح که شامل مدل الاستیک، پلاستیک کامل، مدل دوخطی با سخت‌شوندگی کینماتیک، مدل چرخه‌ای کافمن، مدل پارامتری آرمسترانگ فردریک با سخت‌شوندگی ترکیبی ایزوتروپیک و کینماتیک می‌باشد، بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند استفاده از مدل رفتاری با سخت‌شوندگی ترکیبی (ایزوتروپیک-کینماتیک) دقیق‌ترین

است. روند ایده‌آل‌سازی منحنی‌های هیستریزس مختلف بوده و پژوهشگران با استفاده از فرضیات خود به انجام این امر پرداخته‌اند [12]. در FEMA 356 منحنی‌های ایده‌آل چندخطی مقاطع بتنی و فولادی موجود است [13].

Horton و همکاران در سال ۲۰۲۱ روشی برای تعیین نقاط مرزی نمودار سه خطی منحنی ایده‌آل ارائه نمودند [2]. این نقاط که عبارتند از  $(\theta_y, M_y)$ ،  $(\theta_c, M_c)$  و  $(\theta_u, M_u)$  به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$M_y$ : با استفاده از منحنی ایده‌آل ارائه شده در FEMA 356 تعیین می‌شود [14]. در این روش از قسمت اول منحنی Backbone برای تعیین نقطه تسلیم استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، سطح بین منحنی Backbone و منحنی ایده‌آل در بالا و پایین منحنی Backbone تقریباً برابر می‌باشد. مطابق شکل (۴) منحنی Backbone حاصل از پوش منحنی‌های هیستریزس می‌باشد که از وصل نمودن نقاط حداکثر این نمودارها بدست می‌آید.

$\theta_y$ : دوران متناظر نقطه لنگر تسلیم موثر می‌باشد.

$M_c$ : بیشترین لنگر بدست آمده از تحلیل المان محدود می‌باشد.

$\theta_c$ : دوران متناظر نقطه مقاومت حداکثر می‌باشد.

$M_u$ : لنگر نهایی بر اساس FEMA350، ۸۰ درصد لنگر نقطه مقاومت حداکثر می‌باشد [14].

$\theta_u$ : دوران نهایی مقطع، دورانی است که در آن مقدار لنگر نسبت به بیشینه آن ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

در مطالعه حاضر از این روش برای تعیین منحنی ایده‌آل استفاده شده است.

### ۳-۳- مشخصات مصالح

رفتار مصالح فولادی و به‌طورکلی مصالح شکل‌پذیر تحت اثر بارهای تک‌محوری<sup>۱</sup> و چرخه‌ای با هم متفاوت است. در شکل (۵) تفاوت رفتار تک‌محوری و چرخه‌ای فولاد نشان داده شده است. این تفاوت‌های رفتاری ناشی از

<sup>۱</sup> Monotonic

بارگذاری SAC [10] بر سازه اعمال می‌شود (شکل ۶). بر این اساس انتهای آزاد تیر تحت بار چرخه‌ای فزاینده تا ۰,۰۸ رادیان قرار می‌گیرد. تعداد سیکل‌ها و مقدار جابه‌جایی در هر سیکل در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات بارگذاری در مدل اجزاء محدود

Number of Cycles	Displacement (mm)	Rotation (rad)
6	8.4375	0.00375
6	11.25	0.005
6	16.875	0.0075
4	22.5	0.01
2	33.75	0.015
2	45	0.02
2	67.5	0.03
2	90	0.04
2	112.5	0.05
2	135	0.06
2	157.5	0.07
1	180	0.08

Table 4. Loading properties in the FEM.

شکل ۶. پروتکل بارگذاری SAC

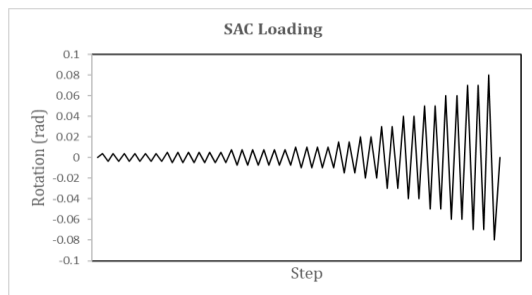


Fig. 6. SAC loading protocol

### ۳-۵- فرضیات مدل‌سازی سازه

از آنجائیکه جابه‌جایی اعمالی به اجزای سازه هنگام هر چرخه به صورت آهسته و تدریجی به آن اعمال می‌شود، از تحلیل استاتیکی و با توجه به مقدار زیاد جابه‌جایی و ایجاد تغییر شکل‌های زیاد و غیرخطی در سازه از تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود. پس تحلیل مورد استفاده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد.

به منظور کاهش زمان محاسبات از المان‌های Shell برای مدل‌سازی اجزای سازه استفاده شده است که می‌تواند به خوبی کماتش موضعی جان و بال تیر را نشان دهند.

اتصالات و نواحی نزدیک محل تشکیل مفصل پلاستیک که مقدار تنش زیاد و احتمال کماتش موضعی اجزای سازه وجود دارد، با مش‌های ریزتر مش‌بندی شده

رفتار چرخه‌ای به ویژه در چرخه‌های با دامنه غیرخطی بالا را ارائه می‌کند که استفاده از این مدل منوط به کالیبره کردن دقیق پارامترهای این مدل می‌باشد. هیچ کدام از مدل‌های مصالح به خوبی این مدل، توانایی شبیه‌سازی رفتار واقعی اتصال مانند افت مقاومت را از خود نشان ندادند [15].

در مطالعه حاضر مصالح فولادی از نوع S275 با سخت شوندهگی ترکیبی در نظر گرفته شده است که با مصالح بکار رفته در نمونه درستی آزمایشی شده هم‌خوانی دارد. مشخصات این نوع فولاد که شامل پارامترهای سخت شوندهگی ترکیبی می‌باشد توسط Paulina Krolo و همکاران [16] تهیه شده است. مشخصات الاستیک مصالح مطابق جدول (۱) و مشخصات پلاستیک مصالح مطابق جدول (۲ و ۳) می‌باشد. پارامترهای ارائه شده در جداول مذکور عبارتند از:

E: مدول الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال

v: ضریب پواسون؛  $F_y$  تنش تسلیم بر حسب

مگاپاسکال

$Q_{\infty}$ : میزان افزایش سطح تسلیم در حالت چرخه اشباع

B: نرخ رسیدن سطح تسلیم به حد اشباع

C و  $\gamma$ : پارامترهای مصالح که با استفاده از آزمایش

کالیبره می‌شوند.

جدول ۱. مشخصات الاستیک فولاد S275

E (MPa)	v	$F_y$ (MPa)
207000	0.3	285

Table 1. Elastic properties of S275 steel

جدول ۲. پارامترهای سخت شوندهگی ایزوتروپیک فولاد S275

$Q_{\infty}$ (MPa)	b
25.6	4.4

Table 2. Isotropic hardening parameters of S275 steel

جدول ۳. پارامترهای سخت شوندهگی کینماتیک فولاد S275

C1 (MPa)	$\gamma_1$	C2 (MPa)	$\gamma_2$	C3 (MPa)	$\gamma_3$
13921	765	4240	52	1573	14

Table 3. Kinematic hardening parameters of S275 steel

### ۳-۴- بارگذاری

بار چرخه‌ای مبتنی بر جابه‌جایی مطابق پروتکل

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (4)$$

۵- ظرفیت اتلاف انرژی<sup>۱</sup> که با EDC نشان داده خواهد شد.

ظرفیت اتلاف انرژی همانگونه که در شکل (۸) نشان داده شده است با سطح زیر نمودار ایده‌آل تخمین زده می‌شود. پس می‌توان این پارامتر را با استفاده از معادله شماره (۵) محاسبه نمود.

$$EDC = \frac{1}{2} \cdot [M_y \cdot \theta_y + (M_y + M_c) \cdot \theta_p + 1.8M_c \cdot \theta_{pc}] \quad (5)$$

شکل ۸. ظرفیت اتلاف انرژی [2]

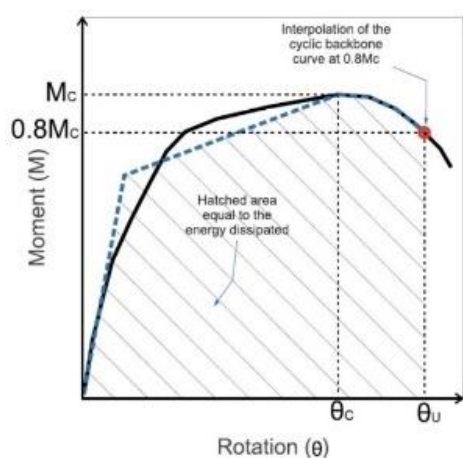


Fig. 8. Energy Dissipated Capacity [2]

#### ۵- درستی آزمایشی

به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی و تحلیل سازه، آزمایش صورت گرفته توسط قاسمیه و همکاران [10] در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در این آزمایش عملکرد لرزه‌ای اتصال RBS به ستون قوطی شکل فولادی، تحت پروتکل‌های مختلف بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفته است که مدل بارگذاری شده با پروتکل بارگذاری SAC برای درستی آزمایشی استفاده شده است.

#### ۱-۵- هندسه مدل

هندسه اتصال در شکل (۹) نشان داده شده است. ابعاد مقطع تیر و ستون در جدول (۵) ارائه شده است. طول تیر ۲۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ستون ۳۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

است تا دقت محاسبات بیشتر شود. در این نواحی از مش با ابعاد ۲۰ میلی‌متر و در سایر نواحی با احتمال کم‌انرژی موضعی کمتر و تنش پایین‌تر، از مش با ابعاد ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است. مقایسه این روش مش‌بندی با روش مش‌بندی یکنواخت ۲۰ میلی‌متر نشان می‌دهد در مش‌بندی غیر یکنواخت، سرعت محاسبات بیشتری باشد و تفاوت معناداری در نتایج وجود ندارد. چگونگی مش‌بندی نمونه‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است.

شکل ۷. مش‌بندی نمونه مدل‌سازی شده

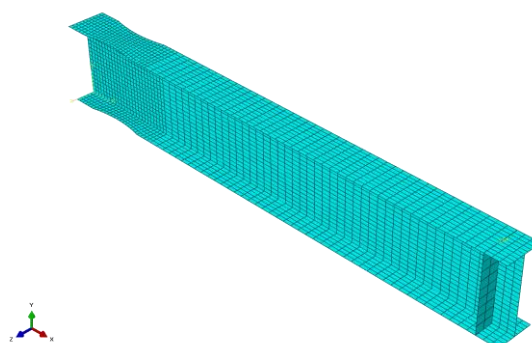


Fig. 7. Modeled specimen meshing

برای کلیه اعضای فولادی از مشخصات مکانیکی فولادی S275 یکسان استفاده شده و از کاهش تنش تسلیم فولاد برای قطعات ضخیم‌تر صرف‌نظر شده است.

#### ۴- تعیین پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای

پنج مورد به‌عنوان پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای از منحنی‌های ایده‌آل استخراج می‌شود. این موارد عبارتند از:

- ۱- لنگر تسلیم موثر که با  $M_y$  نشان داده خواهد شد و چگونگی تعیین آن در بخش ۳-۲ ارائه شد.
- ۲- لنگر نقطه مقاومت حداکثر که با  $M_c$  نشان داده خواهد شد.
- ۳- ظرفیت دوران نهایی که با  $\theta_u$  نشان داده خواهد شد و نحوه تعیین آن در بخش ۳-۲ ارائه شد.
- ۴- شکل‌پذیری که با  $\mu$  نشان داده خواهد شد. بر اساس ASCE 41-17 شکل‌پذیری برابر است با نسبت ظرفیت دوران نهایی به دوران تسلیم [17]. بنابراین:

<sup>1</sup> Energy Dissipated Capacity

شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، شیب شاخه‌های بارگذاری و باربرداری در هر دو نمودار بسیار نزدیک و بین مقادیر بیشینه لنگر در نمودارها اختلاف بسیار ناچیزی وجود دارد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، نمودار پوش منحنی‌های هیستریزس برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در شکل (۱۰) و میزان اختلاف آن‌ها در جدول (۶) ارائه شده است.

شکل ۱۰. مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج آزمایش

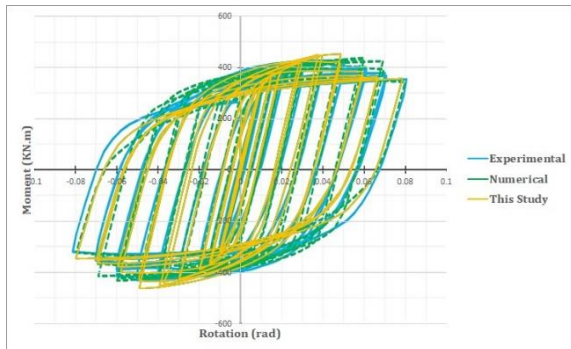


Fig. 10. Comparison of finite element analysis results and test results

شکل ۱۱. مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج آزمایش

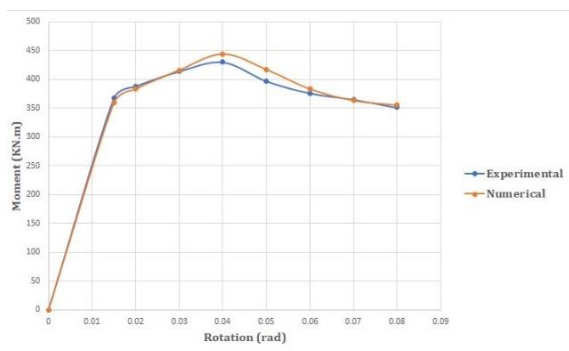


Fig. 11. Comparison of finite element analysis results and test results

جدول ۶. مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج آزمایش

Rotation (rad)	FE models moment (kN.m)	laboratory models moment (kN.m)	Percentage of error (%)
0.015	359	367	2.18
0.02	383	388	1.29
0.03	416	414	0.48
0.04	444	430	3.26
0.05	417	397	5.04
0.06	383	376	1.86
0.07	363	365	0.55
0.08	355	351	1.14

Table 6. Comparison of finite element analysis results and test results

جدول ۵. ابعاد مقطع تیر و ستون در مدل درستی آزمایشی شده

Section	Column	Beam
Section name	300×300×20	PL-G3
Flange width (mm)	300	240
Flange thickness (mm)	20	15
Web thickness (mm)	20	8
Web height (mm)	300	300
Section height (mm)	300	330

Table 5. Geometrical parameters of beam and column in the verified model

شکل ۹. هندسه اتصال درستی آزمایشی شده [10]

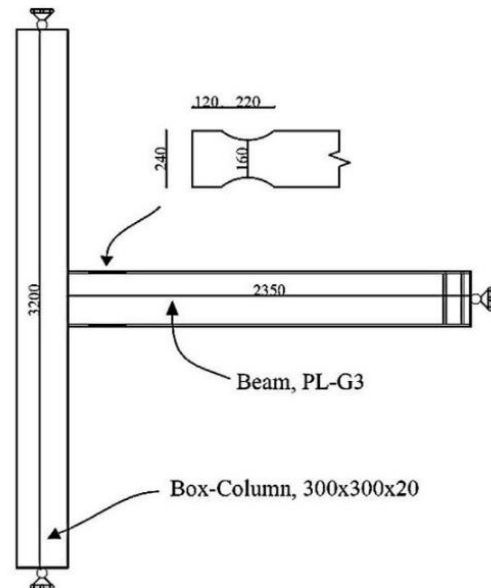


Fig. 9. Geometrical details of the verified model [10]

### ۵-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

مدل انتخابی برای درستی آزمایشی، بر اساس پروتکل SAC بارگذاری شده است. بر این اساس انتهای تیر تحت بارگذاری مبتنی بر جابه‌جایی به صورت چرخه‌ای و فزاینده، قرار می‌گیرد. اتصال تیر به ستون، گیردار و در فواصل ۴۰۰ و ۱۷۰۰ میلی‌متر از بر ستون دارای مهار جانبی می‌باشد. دو سر ستون دارای تکیه‌گاه مفصلی می‌باشد.

### ۵-۳- مدل‌سازی در نرم‌افزار

مدل‌سازی اتصال در نرم‌افزار آباکوس و با لحاظ نمودن کلیه شرایط مورد استفاده در این تحقیق از قبیل مشخصات مصالح، بارگذاری و مش‌بندی، انجام شده است. مقایسه نمودار لنگر- دوران بدست آمده از آزمایش با نمودار بدست آمده از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. همان‌گونه که در

شکل ۱۲. مدل‌سازی تیر در نرم‌افزار آباکوس

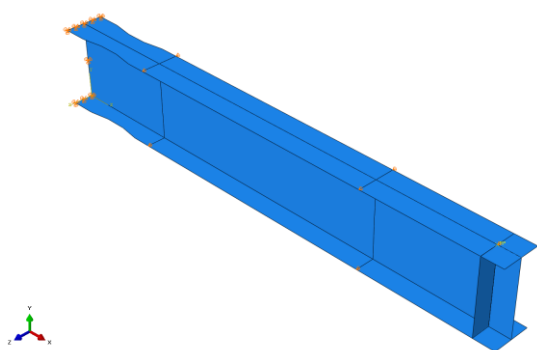


Fig. 12. Beam modeling in Abaqus software

## ۲-۶- مشخصات نمونه‌ها

طول کلیه تیرها ۲۳۵۰ میلی‌متر، برابر با نمونه آزمایشگاهی درستی آزمایی شده در نظر گرفته شده است.

## ۳-۶- بارگذاری و شرایط مرزی

انتهای تیر تحت بارگذاری مبتنی بر جابه‌جایی به‌صورت چرخه‌ای و فزاینده، قرار گرفت. بر اساس ANSI/AISC 358-16 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در دو انتهای تیر، تعبیه مهار جانبی در فاصله بین انتهای ناحیه کاهش یافته تا نصف عمق تیر بعد از آن، الزامی است. پس برای نمونه‌ها در فاصله بین انتهای ناحیه کاهش یافته تا نصف عمق تیر بعد از آن و نیز در فاصله ۱۷۰۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه گیردار، مهار جانبی در نظر گرفته شده است.

## ۷- نتایج

## ۱-۷- نتایج حاصل از تحلیل المان محدود

در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری در قالب نمودارهای لنگر-دوران به همراه منحنی ایده‌آل متناظر آن‌ها، تهیه شد. منحنی‌های هیستریزس و ایده‌آل برای نمونه شماره ۳ از IPE300 در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با استفاده از منحنی‌های ایده‌آل بدست آمده از تحلیل المان محدود، مقادیر هرکدام از پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای برای کلیه نمونه‌ها استخراج شد.

## ۶- مدل‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر ابعاد و محل ناحیه برش خورده RBS بر رفتار هیستریزس آن، ۴۰ نمونه در نظر گرفته شده است. این ۴۰ نمونه از چهار مقطع IPE400، IPE500 و IPE600 انتخاب شده است که برای هرکدام از این مقاطع ۹ حالت مختلف برش بال تیر و یک حالت مقطع کامل، در نظر گرفته شده است. ابعاد ناحیه برش خورده بر اساس محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای ANSI/AISC 358-16 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان تعیین شده است. در نمونه‌های شماره ۲ تا ۶ پارامترهای  $a$  و  $b$  ثابت و برابر با میانگین حد بالا و پایین آن‌ها می‌باشد. در این نمونه‌ها  $a = 0.625bf$  و  $b = 0.75d$  می‌باشد. در نمونه‌های شماره ۷ و ۸ پارامترهای  $a$  و  $c$  ثابت و برابر با میانگین حد بالا و پایین آن‌ها می‌باشد. در این نمونه‌ها  $a = 0.625bf$  و  $c = 0.175bf$  می‌باشد. در نمونه‌های شماره ۹ و ۱۰ پارامترهای  $c$  و  $b$  ثابت و برابر با میانگین حد بالا و پایین آن‌ها می‌باشد. نمونه‌های با در این نمونه‌ها  $b = 0.75d$  و  $c = 0.175bf$  می‌باشد. ابعاد نمونه‌های مدل‌شده در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷. ابعاد نمونه‌های مدل‌سازی شده

	a/bf	B/d	c/bf
1	Full Section		
2	0.625	0.75	0.1
3	0.625	0.75	0.14
4	0.625	0.75	0.175
5	0.625	0.75	0.215
6	0.625	0.75	0.25
7	0.625	0.65	0.175
8	0.625	0.85	0.175
9	0.5	0.75	0.175
10	0.75	0.75	0.175

Table 7. Geometrical parameters of the specimens

## ۱-۶- هندسه اتصال

به منظور حذف آثار چشمه اتصال و بررسی تأثیر هندسه اتصال RBS بر عملکرد هیستریزس آن، المان تیر به تنهایی و به صورت یک سر گیردار مطابق شکل (۱۲) در نرم‌افزار آباکوس مدل شده است.



شکل ۱۳. منحنی‌های هیستریزیس و ایده‌آل IPE30001

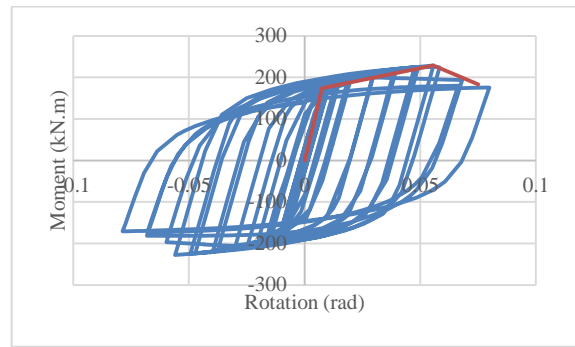


Fig. 13. IPE30001 ideal and hysteresis curves

بررسی داده‌ها و نمودارهای استخراجی نشان می‌دهند:

۱- تاثیر پارامتر  $c$  بر  $My$  بسیار بیشتر از تاثیر پارامترهای  $a$  و  $b$  می‌باشد. با تغییر  $c$  بین دو حد پایین و بالای آن،  $My$  بیش از ۲۰ درصد کاهش یافته است. درحالیکه این مقدار برای پارامترهای  $a$  و  $b$  نزدیک به صفر می‌باشد.

۲- تاثیر پارامتر  $c$  بر  $Mc$  بسیار بیشتر از تاثیر پارامترهای  $a$  و  $b$  می‌باشد. با تغییر  $c$  بین دو حد پایین و بالای آن،  $Mc$  بیش از ۱۷ درصد کاهش یافته است. درحالیکه این مقدار برای پارامترهای  $a$  و  $b$  نزدیک به صفر می‌باشد.

۳- تاثیر پارامتر  $c$  بر  $\theta_u$  کمتر از تاثیر این پارامتر بر لنگرهای تسلیم و بیشینه می‌باشد. اما تاثیر پارامترهای  $a$  و  $b$  بر  $\theta_u$  به مراتب بیشتر از تاثیر آن‌ها بر لنگرهای تسلیم و بیشینه می‌باشد.

۴- با افزایش مقدار  $c$ ، شکل‌پذیری به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما با افزایش مقدار  $a$  و  $b$  شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش مقدار  $c$ ، ظرفیت اتلاف انرژی تا ۱۲ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار  $a$  و  $b$  ظرفیت اتلاف انرژی بین ۳ تا ۴ درصد کاهش می‌یابد.

برای بررسی روند تغییر هر کدام از پارامترهای کلیدی، با تغییر پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  نمودار مربوط به تغییر هر کدام از پارامترها در مقابل نسب‌های بدون بعد  $a/bf$ ،  $b/d$  و  $c/bf$  ترسیم شد. به عنوان نمونه چگونگی تغییر  $My$  با تغییر پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  در شکل (۱۴ - ۱۶) ارائه شده است.

شکل ۱۴. تغییرات لنگر تسلیم موثر در مقابل پارامتر  $a$

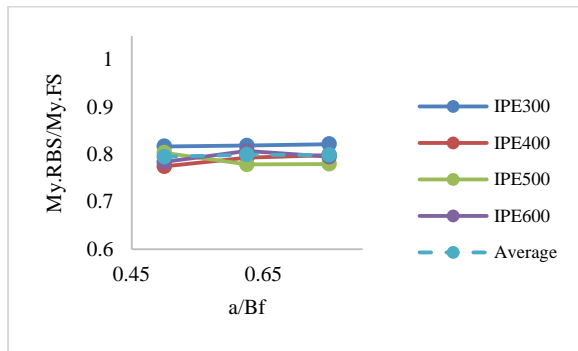


Fig. 14. The variation of normalized yield moment with respect to parameter  $a$

شکل ۱۵. تغییرات لنگر تسلیم موثر در مقابل پارامتر  $b$

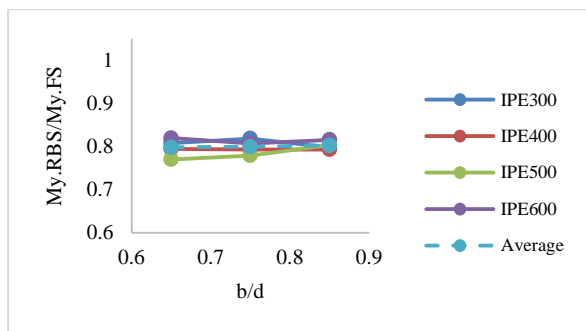


Fig. 15. The variation of normalized yield moment with respect to parameter  $b$

شکل ۱۶. تغییرات لنگر تسلیم موثر در مقابل پارامتر  $c$

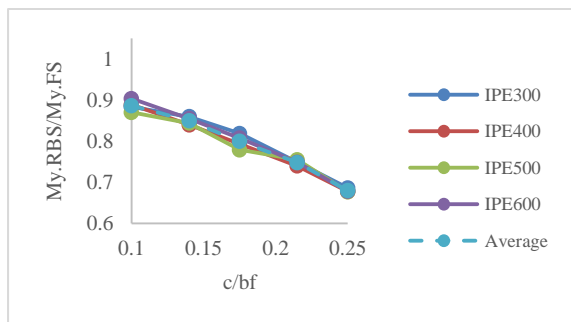
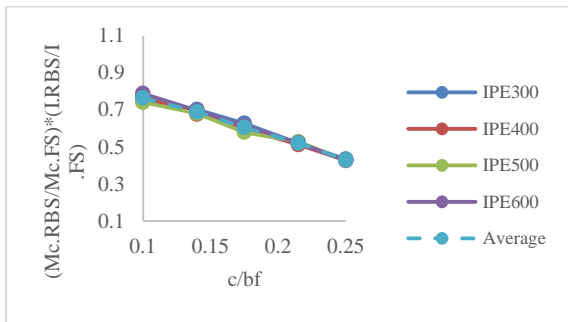
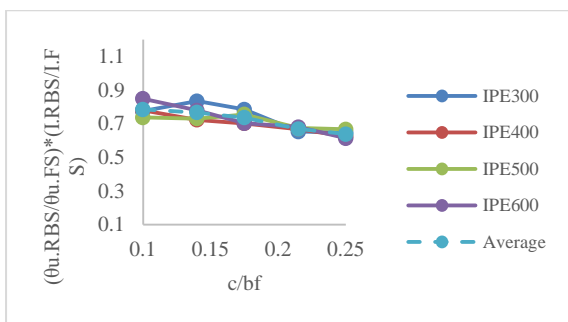
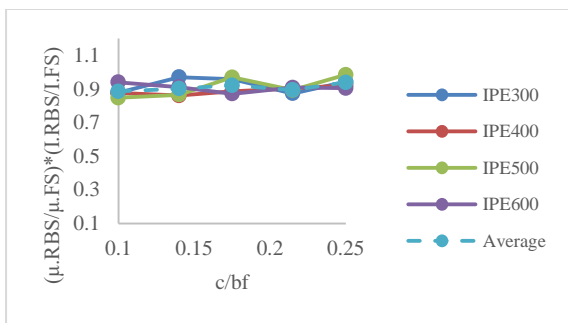
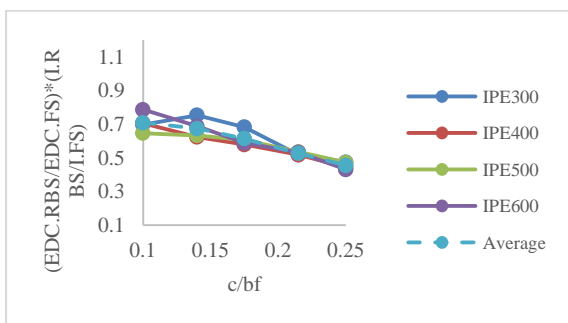


Fig. 16. The variation of normalized yield moment with respect to parameter  $c$

نمودارهای بدست آمده نشان می‌دهد همبستگی کافی بین پارامترهای RBS و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای برای ارائه معادله واحدی که تغییرات پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای در مقابل پارامترهای RBS را نشان دهد، وجود ندارد.

#### ۷-۲- معادلات تخمین پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای

بر اساس نتایج ارائه شده در قسمت قبل، پارامتر  $c$  بیشترین تاثیر را بر پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای دارد. با ضرب کردن

شکل ۱۸. تغییرات  $(Mc.RBS/Mc.FS)*(I.RBS/I.FS)$  در مقابل  $c/bf$ Fig. 18. Variation of  $(Mc.RBS/Mc.FS)*(I.RBS/I.FS)$  with respect to  $c/bf$ شکل ۱۹. تغییرات  $(\theta u.RBS/\theta u.FS)*(I.RBS/I.FS)$  در مقابل  $c/bf$ Fig. 19. Variation of  $(\theta u.RBS/\theta u.FS)*(I.RBS/I.FS)$  with respect to  $c/bf$ شکل ۲۰. تغییرات  $(\mu.RBS/\mu.FS)*(I.RBS/I.FS)$  در مقابل  $c/bf$ Fig. 20. Variation of  $(\mu.RBS/\mu.FS)*(I.RBS/I.FS)$  with respect to  $c/bf$ شکل ۲۱. تغییرات  $(EDC.RBS/EDC.FS)*(I.RBS/I.FS)$  در مقابل  $c/bf$ Fig. 21. Variation of  $(EDC.RBS/EDC.FS)*(I.RBS/I.FS)$  with respect to  $c/bf$ 

مقادیر نرمال شده پارامترهای کلیدی در ممان اینرسی نرمال شده مقطع RBS می‌توان رابطه بین این مقادیر و پارامتر  $c/bf$  را تعریف نمود. شکل (۱۷ تا ۲۱) نمودار پارامتر کلیدی نرمال شده ضرب در ممان اینرسی نرمال شده در مقابل پارامتر  $c/bf$  را نشان می‌دهد. رابطه مذکور در معادله شماره (۶) ارائه شده است.

$$\frac{KDP_{RBS}}{KDP_{FS}} \cdot \frac{I_{RBS}}{I_{FS}} = \alpha_{c1} \cdot \left(\frac{c}{bf}\right) + \alpha_{c2} \quad (6)$$

که در آن

$KDP_{RBS}$ : پارامتر کلیدی مقطع RBS

$KDP_{FS}$ : پارامتر کلیدی مقطع کامل

$I_{RBS}$ : ممان اینرسی مقطع RBS

$I_{FS}$ : ممان اینرسی مقطع کامل می‌باشد.

$\alpha_{c1}$  و  $\alpha_{c2}$ : ضرایب معادله درجه یک

برای محاسبه ضرایب ثابت  $\alpha_{c1}$  و  $\alpha_{c2}$  با توجه به اینکه

کلیه محورهای افقی و قائم نمودارها بدون بعد هستند، ابتدا

داده‌های مربوط به نمودار Average که میانگین داده‌ها می‌باشد

استخراج می‌شود. سپس با کمک نرم‌افزار MATLAB ضرایب

رابطه (۶) با استفاده از داده‌های نمودار Average استخراج

می‌شود. این ضرایب در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸. ضرایب معادله شماره (۶)

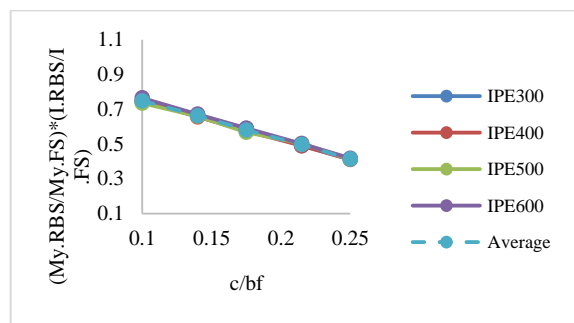
	My	Mc	$\theta u$	$\mu$	EDC
$\alpha_{c1}$	-2.225	-2.235	-1.044	0.259	-1.743
$\alpha_{c2}$	0.972	0.995	0.902	0.862	0.902

Table 8. Coefficients for Eqs. (6)

معادله شماره (۶) رابطه بین پارامتر  $c$  و پارامترهای

کلیدی طراحی لرزه‌ای را ارائه می‌کند. این رابطه بر اساس

مقادیر مختلف  $c$  و مقدار متوسط  $a$  و  $b$  بدست آمده است.

شکل ۱۷. تغییرات  $(My.RBS/My.FS)*(I.RBS/I.FS)$  در مقابل  $c/bf$ Fig. 17. Variation of  $(My.RBS/My.FS)*(I.RBS/I.FS)$  with respect to  $c/bf$

شکل ۲۳. تغییرات  $Mc.RBS/Mc.m$  در مقابل  $b/d$

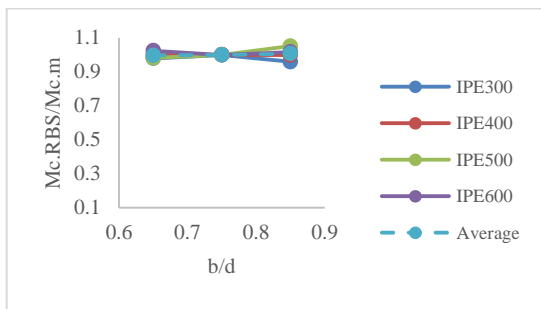


Fig. 23. Variation of  $Mc.RBS/Mc.m$  with respect to  $b/d$

شکل ۲۴. تغییرات  $\theta_u.RBS/\theta_u.m$  در مقابل  $b/d$

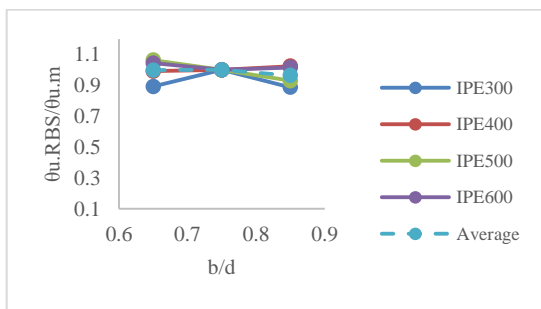


Fig. 24. Variation of  $\theta_u.RBS/\theta_u.m$  with respect to  $b/d$

شکل ۲۵. تغییرات  $\mu.RBS/\mu.m$  در مقابل  $b/d$

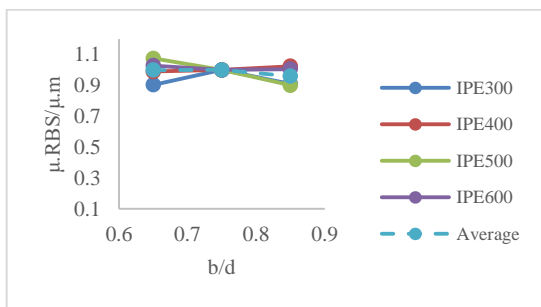


Fig. 25. Variation of  $\mu.RBS/\mu.m$  with respect to  $b/d$

شکل ۲۶. تغییرات  $EDC.RBS/EDC.m$  در مقابل  $b/d$

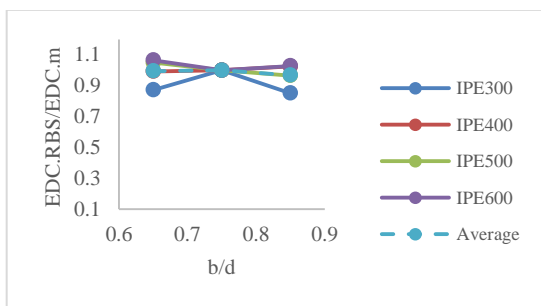


Fig. 26. Variation of  $EDC.RBS/EDC.m$  with respect to  $b/d$

برای بررسی روند تغییرات پارامترهای کلیدی، در مقابل پارامتر  $a$ ، پارامترهای  $c$  و  $b$  ثابت و برابر با

برای اعمال تاثیر پارامتر  $b$  بر معادله شماره (۶)، اینبار پارامترهای  $a$  و  $c$  ثابت و برابر با میانگین حد بالا و پایین آنها ( $a = 0.625bf$  و  $c = 0.175bf$ ) فرض می‌شود. نمونه‌های با شماره ۴، ۷ و ۸ دارای این شرایط می‌باشند. در اینجا مقدار پارامتر کلیدی طراحی لرزه‌ای به مقدار این پارامتر برای نمونه با  $c$  متوسط نرمال می‌شود. در شکل (۲۲ تا ۲۶) نمودار پارامترهای کلیدی نرمال شده در مقابل  $b/d$  ارائه شده است. برای برازش بهترین خط گذرنده از نقطه میانی و با نزدیکترین فاصله از نقاط ابتدایی و انتهایی هر نمودار از معادله شماره (۷) استفاده می‌شود.

$$\frac{KDP_{RBS}}{KDP_m} = \alpha_b \cdot \left( \frac{b}{d} - 0.75 \right) + 1 \quad (7)$$

که در آن

$KDP_{RBS}$ : پارامتر کلیدی مقطع RBS

$KDP_m$ : پارامتر کلیدی مقطع با  $c$  متوسط

$\alpha_b$ : ضریب معادله درجه یک

ضریب  $\alpha_b$  با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از روش بکار رفته برای تعیین ضرایب  $\alpha_{c1}$  و  $\alpha_{c2}$  تعیین می‌شود. این ضریب در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹. ضرایب معادله شماره (۷)

	$M_y$	$Mc$	$\theta_u$	$\mu$	EDC
$\alpha_b$	0.029	0.049	-0.169	-0.197	-0.137

Table 9. Coefficients for Eqs. (7)

معادله شماره (۷) رابطه بین پارامتر  $b$  و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای را ارائه می‌کند. این رابطه بر اساس مقادیر مختلف  $b$  و مقدار متوسط  $a$  و  $c$  بدست آمده است.

شکل ۲۲. تغییرات  $M_y.RBS/M_y.m$  در مقابل  $b/d$

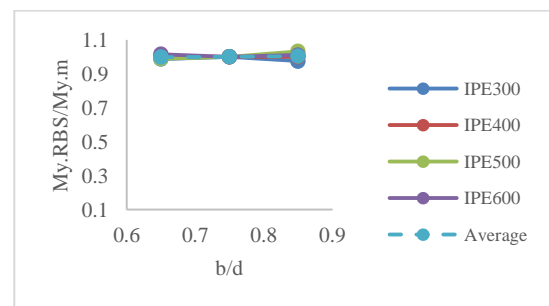


Fig. 22. Variation of  $M_y.RBS/M_y.m$  with respect to  $b/d$

شکل ۲۸. تغییرات  $Mc.RBS/Mc.m$  در مقابل  $a/b_f$

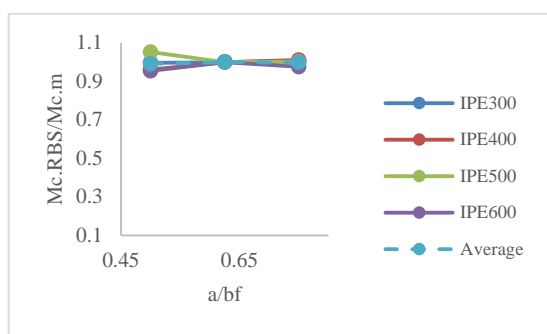


Fig. 28. Variation of  $Mc.RBS/Mc.m$  with respect to  $a/b_f$

شکل ۲۹. تغییرات  $\theta_u.RBS/\theta_u.m$  در مقابل  $a/b_f$

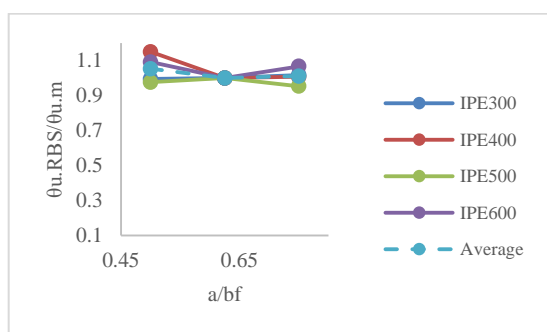


Fig. 29. Variation of  $\theta_u.RBS/\theta_u.m$  with respect to  $a/b_f$

شکل ۳۰. تغییرات  $\mu.RBS/\mu.m$  در مقابل  $a/b_f$

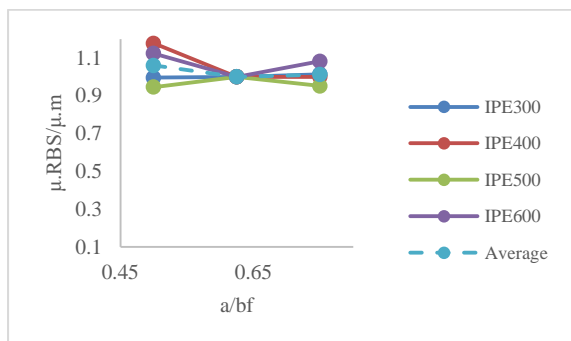


Fig. 30. Variation of  $\mu.RBS/\mu.m$  with respect to  $a/b_f$

شکل ۳۱. تغییرات  $EDC.RBS/EDC.m$  در مقابل  $a/b_f$

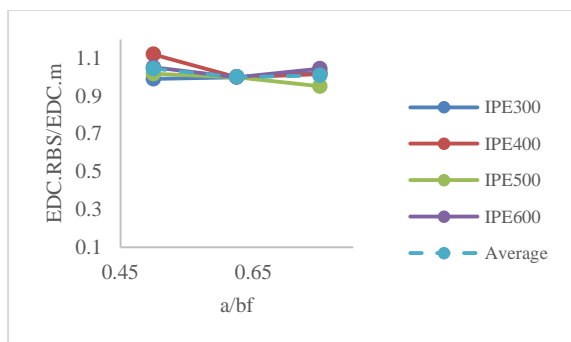


Fig. 31. Variation of  $EDC.RBS/EDC.m$  with respect to  $a/b_f$

میانگین حد بالا و پایین آن‌ها می‌باشد. نمونه‌های با شماره ۴، ۹ و ۱۰ دارای این شرایط می‌باشند. در این نمونه‌ها  $b = 0.75d$  و  $c = 0.175bf$  می‌باشد. در اینجا مقدار پارامتر کلیدی طراحی لرزه‌ای به مقدار این پارامتر برای نمونه با  $c$  متوسط نرمال می‌شود. در شکل (۲۷ تا ۳۱) نمودار پارامترهای کلیدی نرمال شده در مقابل  $a/b_f$  ارائه شده است. برای برآزش بهترین خط گذرنده از نقطه میانی و با نزدیکترین فاصله از نقاط ابتدایی و انتهایی هر نمودار از معادله شماره (۸) استفاده می‌شود.

$$\frac{KDP_{RBS}}{KDP_m} = \alpha_a \cdot \left( \frac{a}{b_f} - 0.625 \right) + 1 \quad (8)$$

که در آن

$KDP_{RBS}$ : پارامتر کلیدی مقطع RBS

$KDP_m$ : پارامتر کلیدی مقطع با  $c$  متوسط

$\alpha_a$ : ضریب معادله درجه یک

ضریب  $\alpha_a$  با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از روش بکار رفته برای تعیین ضرایب  $\alpha_b$  تعیین می‌گردد. این ضریب در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰. ضرایب معادله شماره (۸)

	$My$	$Mc$	$\theta_u$	$\mu$	EDC
$\alpha_a$	0.019	0.030	-0.168	-0.195	-0.143

Table 10. Coefficients for Eqs. (8)

معادله شماره (۸) رابطه بین پارامتر  $a$  و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای را ارائه می‌کند. این رابطه بر اساس مقادیر مختلف  $a$  و مقدار متوسط  $b$  و  $c$  بدست آمده است.

شکل ۲۷. تغییرات  $My.RBS/My.m$  در مقابل  $a/b_f$

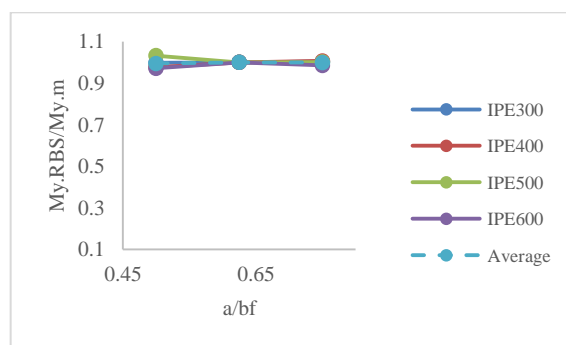


Fig. 27. Variation of  $My.RBS/My.m$  with respect to  $a/b_f$

می‌توان بین این پارامترها و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای رابطه برقرار نمود. این ارتباط در قالب یک معادله واحد ارائه شد که اثر کلیه پارامترهای فوق در آن لحاظ شده است. با استفاده از معادله بدست آمده می‌توان مقدار هر یک از پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای را بر اساس ابعاد و مشخصات هندسی مقطع و ابعاد ناحیه برش خورده آن، محاسبه نمود.

#### ۹- مراجع

- [1] Horton T., Hajirasouliha I., Davison B., Ozdemir Z. and Abuzayed I. (2021). Development of more accurate cyclic hysteretic models to represent RBS connections. *Engineering Structures* 245 (2021) 112899
- [2] Horton T., Hajirasouliha I., Davison, B. and Ozdemir Z. (2021). More efficient design of reduced beam sections (RBS) for maximum seismic performance. *Journal of Constructional Steel Research* 183 (2021) 106728
- [3] Engelhardt M. and Sabol T. (1997) Seismic-resistant steel moment connections: developments since the 1994 Northridge earthquake, *Progr. Struct. Eng. Mater.* 1 (1) 68-77.
- [4] Pachoumis D. T., Galoussis E. G., Kalfas C. N. and Christitsas A. D. (2009). Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: experimental analysis and FEM simulation, *Eng. Struct.* 31 (1) 216-223.
- [5] Lignos DG. And Krawinkler H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *J Struct Eng* 2011;137(11):1291-302.
- [6] Pachideh Gh., Gholhaki M. and Kafi M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *Structures* 28 (2020) 467-481
- [7] Pachideh, Gh., Gholhaki M. and Kafi M. (2022) Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 1003-1006.
- [8] Tenth Code of Iran National Building Regulations 2000 (In Persian).
- [9] AISC 358-16 (2016). Prequalified connections

در معادله شماره (۶ تا ۸) تاثیر هر یک از پارامترهای RBS بر پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای ارائه شد. با ضرب این معادلات در یکدیگر می‌توان نسبت پارامتر طراحی لرزه‌ای مورد نظر به پارامتر طراحی لرزه‌ای مقطع کامل را تخمین زد.

$$\frac{KDP_{RBS}}{KDP_{FS}} \cdot \frac{I_{RBS}}{I_{FS}} = \left[ \alpha_{c1} \cdot \left( \frac{c}{b_f} \right) + \alpha_{c2} \right] \cdot \left[ \alpha_b \cdot \left( \frac{b}{d} - 0.75 \right) + 1 \right] \cdot \left[ \alpha_a \cdot \left( \frac{a}{b_f} - 0.625 \right) + 1 \right] \quad (9)$$

معادله شماره (۹) و جدول (۱۱) را می‌توان برای پیش بینی چگونگی تأثیر پارامترهای RBS بر پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای در مقایسه با مقاطع کامل استفاده کرد.

جدول ۱۱. ضرایب معادله شماره (۹)

	My	Mc	θu	μ	EDC
ac1	-2.225	-2.235	-1.044	0.259	-1.743
ac2	0.972	0.995	0.902	0.862	0.902
ab	0.029	0.049	-0.169	-0.197	-0.137
aa	0.019	0.030	-0.168	-0.195	-0.143

Table 11. Coefficients for Eqs. (9)

#### ۸- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مدل سازی، تحلیل المان محدود و بررسی داده‌ها و نمودارها به اختصار عبارتست از:

- ۱- از بین پارامترهای RBS مقدار c بیشترین تاثیر را روی پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای دارد. اثر a و b روی لنگرها نزدیک به صفر و قابل چشم پوشی می‌باشد. اثر a و b روی ظرفیت دوران نهایی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی کمتر از پنج درصد می‌باشد.
- ۲- بررسی نمودارهای تغییرات پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای در مقابل تغییرات ابعاد RBS نشان می‌دهد همبستگی کافی بین پارامترهای RBS و پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای برای ارائه معادله واحدی که تغییرات پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای در مقابل پارامترهای RBS را نشان دهد، وجود ندارد.
- ۳- بررسی ارتباط بین ابعاد RBS، ممان اینرسی و مشخصات مقطع برش خورده و کامل نشان می‌دهد

- Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency.
- [14] FEMA 350 (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-frame Buildings, Federal Emergency Management Agency.
- [15] Deylami A. and Ghasemi P. (2019). Investigation of the effect of different steel material constitutive models on the Simpson Strong-Tie connection. The 10th National Conference On Steel & Structure, Olympic Hotel International Convention Center, 2018. (In Persian)
- [16] Krolo P., Grandi C. and Smolcic Z. (2016). Experimental and Numerical Study of Mild Steel Behaviour under Cyclic Loading with Variable Strain Ranges, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2016, Article ID 7863010.
- [17] ASCE 41-17 (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers.
- for special and intermediate moment frames for seismic applications, American Institute of Steel Construction.
- [10] Ghassemieh M., Hassani S. and Mirghaderi S.R. (2021). Cyclic dependency assessment of RBS moment connection in box-column, Journal of Constructional Steel Research 177 (2021) 106472.
- [11] Sharifi M., Mohammadamri A. and Ansari-poor M. (2018). Introducing types of cyclic behaviors and deteriorating models. Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World, Iran-Tabriz, 2018. (In Persian)
- [12] Zaherbin P. and Shayanfar M. (2021). Evaluation of Behavior and Characteristics of Concrete Filled Tubes. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Structural Engineering. Iran University of Science and Technology. School of Civil Engineering. (In Persian)
- [13] FEMA 356 (2000). Prestandard and

# The effect of beam cutting dimensions on the seismic performance of RBS connections

Najaf Ali Karami<sup>1</sup>, Seyed Ali Seyed Razzagi<sup>2\*</sup>

1. Master of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Payame Noor University, Tehran, Iran.

\* Email: arazzaghi@pnu.ac.ir

Received: 2024/01/23

Accepted: 2024/07/10

## Abstract

Reduced Beam Section (RBS) connections are extensively used within seismic resistant steel moment frames in order to deal with the risk of brittle fractures in the connections, absorbing seismic energy through yielding and protect columns from damage. In this connection, at specific locations the beams flanges are trimmed back to provide weakened sections, in order to shift the plastic deformations away from beam-column connections and into the beam. Consequently, adequate ductility is provided by the frame to absorb the seismic energy and avoid the risk of brittle fractures occurring. The seismic performance of steel structures has been studied widely by many researchers. In general, the results of these studies indicate the good capability of RBS connections achieving these targets. In a reduced beam section (RBS) moment connection, in the region adjacent to the beam-to-column connection, a part of the beam flanges is trimmed selectively. Yielding and hinge formation are intended to take place primarily in the reduced section of the beam. Currently, in the design of RBS connections, the effect of RBS cutting parameters on the cyclic performance of the beam elements are not taken into account. However, using different RBS geometries for any beam with different sections can have different results in cyclic performance of the connections. In order to evaluate the effects of geometric parameters of RBS connection on the cyclic behavior of these connections, a parametric study is carried out on forty different European I-shaped steel cross-section specimens. These specimens are analyzed using ABAQUS finite element software under cyclic loading and the moment-rotation hysteresis curve was extracted for each of the specimens. In order to validate the FE model, a full-scale beam-column sub-assemblies were modelled in the general finite element (FE) software ABAQUS. An ideal curve was extracted from each of the hysteresis curves and using the curves, five parameters including Yield Moment ( $M_y$ ), Peak Moment ( $M_c$ ), Ultimate Rotation ( $\theta_u$ ), Ductility ( $\mu$ ) and Energy Dissipated Capacity (EDC) were extracted as the key design parameters for each sample. Variation of the above-mentioned seismic design parameters in respect to the changes of RBS dimensions are analyzed. The results clearly illustrate that geometric features  $c$  do have most effect on the moment parameters. The parameters  $a$  and  $b$  have very little influence on moments which can be considered negligible, whereas these parameters have a small effect on the ultimate rotation, ductility and energy dissipated capacity. Increasing the value of  $c$  between its lower and upper limits, reduces the  $M_y$  more than 20% and  $M_c$  more than 17%. The effect of the distance of the cut area from the column face ( $a$ ) and the length of the cut area ( $b$ ) on the moment is close to zero and can be ignored. The effect of  $a$  and  $b$  on the ultimate rotation, ductility and energy dissipated capacity is less than five percent. However, the parameter  $c$  has significant influence over all the five seismic design parameters considered. Investigating the graphs of the variation of the key seismic design parameters respect to the changes of RBS dimensions shows that there is not enough correlation between the RBS parameters and the key seismic design parameters to propose a single equation between the key seismic design parameters and RBS parameters. Investigating the relationship between RBS dimensions, moment of inertia of RBS and full section characteristics showed that a relationship can be established between these parameters and the key seismic design parameters. At the end, the results of the investigation and relationships for calculating the key seismic design parameters were presented. This relationship was presented as a single equation, which includes the effect of all the above parameters. Using the obtained equation, the value of each of the key seismic design parameters can be calculated based on the dimensions and geometric characteristics of the section and the beam cutting dimensions.

**Keywords:** Finite Element Analysis, Ductility, Reduced Beam Sections (RBS), Hysteresis Curve, key seismic design parameters.