

DOI: 10.48303/bese.2024.2033759.1177

## نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

پس از تجربه خسارات زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌ریج و ۱۹۹۵ کوبه، راهکارهای مختلفی برای مقاوم‌سازی اتصالات لرزه‌ای تیر به ستون قاب‌های خمشی به‌عنوان عاملی مهم در پایداری سازه‌ها مطرح گشت. در نظرگیری رفتار اتصالات در مدل‌های غیرخطی می‌تواند نقش مهمی در تعیین پاسخ سازه‌ها داشته باشد؛ بنابراین در این پژوهش، قاب‌های خمشی فولادی ویژه ۵ و ۱۰ طبقه با اتصالات با سطح مقطع کاهش یافته، اتصالات تقویت نشده جوشی و صلب بررسی شده‌اند. برای بررسی در مرحله اول سازه‌ها به‌صورت سه‌بعدی و در نرم‌افزار ETABS 20.3.0 مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند. پارامترهای مختلفی نظیر دوران پلاستیک، تغییر مکان نسبی غیرخطی سازه‌ها و منحنی ظرفیت کنترل شدند. پس از آن یک قاب دوطبقه از هر سازه انتخاب شد و با استفاده از ۱۱ رکورد زلزله تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که اتصالات RBS می‌تواند منجر به بهبود سطح عملکرد مفاصل پلاستیک شود و منحنی صاف در تغییر مکان غیرخطی ایجاد کند. اگرچه عدم رعایت اصول طراحی لرزه‌ای نظیر تیر ضعیف - ستون قوی می‌تواند منجر به تشدید پاسخ و عدم کارایی اتصالات گردد. نظر بر آنکه به‌کارگیری اتصالات RBS می‌تواند تا حدود دو برابر پاسخ را در سازه‌ای ثابت تشدید کند، بایستی توجه ویژه‌ای به کاربری اتصالات در هر سازه و رویکرد مدل‌سازی داشت.

**واژگان کلیدی:** اتصالات RBS، اتصالات WUF-W، تغییر مکان جانبی غیرخطی، قاب خمشی فولادی ویژه، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

## ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های کوتاه و میان مرتبه با در نظرگیری اثر اتصالات صلب، RBS و WUF-W در قاب‌های خمشی ویژه

بهزاد رضایی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

پیام طهرانی

استادیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

بهروز بهنام (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، b.behnam@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

جوش فلز، تنش تسلیم مصالح فولادی و نواحی بحرانی نظیر سوراخ دسترسی با تقاضای کرنش بالا می‌باشد (Bruneau et al., 2011; Brunesi et al., 2015; Kim & Kim, 2009).

پس از آن راهکارهای مختلفی برای مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون از جمله اتصال تقویت نشده جوشی<sup>۴</sup> (WUF-W) مطرح گردید. این اتصال با تأمین جزئیات هندسی و طراحی ویژه منجر به ارتقاء رفتار اتصال می‌شود، اگرچه محل تشکیل مفصل پلاستیک در بر اتصال تیر به ستون و در تیر است. همچنین از دیگر راهکارهای مقاوم‌سازی لرزه‌ای کاربرد

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در قاب‌های خمشی فولادی<sup>۱</sup> به‌عنوان یک سیستم سازه‌ای پر کاربرد، اتصالات خمشی تیر به ستون می‌باشد که عملکرد لرزه‌ای آن در آیین‌نامه‌ها پس از وقوع زلزله‌های نورث‌ریج<sup>۲</sup> و کوبه<sup>۳</sup> ۱۹۹۵، با توجه به خسارات گسترده‌ی موجود در سازه‌های فولادی دو چندان شد (Gioncu, 2013). در سازه‌های قاب خمشی فولادی آسیب‌های متعددی در اتصالات خمشی تیر به ستون نظیر که از شکستگی مربوط به جوش بال پایین در تیرها، ترک‌ها در وجه بالای ستون مشاهده شد که ناشی از جزئیات اتصالات قبل از این زلزله نظیر

انتباهی دارای سختی اولیه بیشتری می‌باشند. نیتون و همکاران (Naughton et al., 2017)، به مطالعه قاب‌های خمشی فولادی ۴، ۸ و ۱۶ طبقه با استفاده از تحلیل پوش‌آور پرداخته‌اند. بر اساس نتایج، به نظر می‌رسد در اثر استفاده از اتصالات با جان کاهش یافته<sup>۹</sup> (RWS)، سازه با افت مقاومت و سختی نسبت به سازه با اتصالات کاملاً صلب همراه است که در سازه بلندمرتبه منجر به افزایش قابل توجه تغییر مکان نسبی در طبقاتی تحتانی می‌شود. اگرچه اتصالات RWS با توجه به منحنی ظرفیت مشابه RBS و ایجاد یک منحنی در یافت غیرخطی بدون تغییرات شدید می‌توانند به‌عنوان رویکردی جایگزین اتصالات RBS استفاده شوند. همچنین، زارع آقبلاغ و قندی (Zare Aghblagh & Ghandi, 2019)، با تحلیل پوش‌آور نشان دادند که مدل‌سازی اتصالات منجر به کاهش تعداد مفاصل پلاستیک، کاهش ظرفیت سازه و تغییر سطح عملکرد مفاصل تیر و ستون می‌شود. زارع آقبلاغ و شکرگزار (Zare Aghblagh & Shokrgozar, 2020)، با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، اهمیت اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های قاب خمشی ویژه با اتصالات با ورق روسری و زیرسری را نشان دادند. تبار و همکاران (Tabar et al., 2022)، نقش استفاده از RWS و RBS به‌عنوان راهکارهای مقاوم‌سازی لرزه‌ای با اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی پیچ شده به ستون را در سازه کوتاه‌مرتبه با فرض نقص در طراحی لرزه‌ای مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش از روش تحلیل دینامیکی فزاینده<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. مطابق نتایج آنها، اتصالات RWS بر اساس پارامترهایی نظیر تغییر مکان جانبی، احتمال فروریزش کمتری نسبت به اتصالات RBS دارند. رضایی و همکاران (Rezaee et al., 2024a & 2024b) نشان دادند که در نظرگیری اتصالات در رفتار غیرخطی منجر به افزایش تعداد مفاصل پلاستیک و تقاضای دورانی می‌شود. علاوه بر آن، به کارگیری اتصالات RBS سطح عملکرد بهتری را در مفاصل پلاستیک رقم می‌زند.

اگرچه مطالعات گسترده‌ای در زمینه رفتار غیرخطی سازه‌ها و اتصالات صورت گرفته است، اما پژوهش‌های اندکی وجود دارند که به بررسی رویکردهای مختلف مدل‌سازی اتصالات

اتصالات با سطح مقطع کاهش یافته<sup>۵</sup> (RBS) می‌باشد. این اتصالات می‌توانند مفاصل پلاستیک را از بر اتصال به سمت دهانه داخلی تیر شیف‌ت دهد و حتی به رعایت اصولی نظیر تیرضعیف-ستون قوی<sup>۶</sup> کمک کنند (Popov et al., 1998; Sofias et al., 2014).

برای ارزیابی عددی رفتار غیرخطی اتصالات می‌توان از آیین‌نامه‌هایی با رویکرد عملکردی نظیر ASCE41-17 استفاده نمود که با فرض رفتار غیرخطی ارزیابی دقیق‌تری از سازه‌ها را تبیین می‌کنند. در این راستا یکی از راهکارهای موجود، تحلیل استاتیکی غیرخطی<sup>۷</sup> (پوش‌آور) می‌باشد که با در نظرگیری نقطه عملکرد و تغییر مکان هدف می‌تواند رفتار غیرخطی سازه را در سطوح مختلف لرزه‌خیزی و با توجه به هدف ارزیابی بررسی کند. همچنین علاوه بر رویه مذکور، برای ارزیابی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها می‌توان از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی<sup>۸</sup> با در نظرگیری رفتار دینامیکی نیز استفاده نمود. در این رویه، برای افزایش دقت محاسباتی مدل غیرخطی، می‌توان از منحنی‌های موجود مبتنی بر رفتار هیستریزس اتصالات در نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. اگرچه در زمینه اتصالات مختلف، آیین‌نامه‌هایی نظیر ASCE41 پارامترهای متفاوت غیرخطی را برای مدل‌سازی پیشنهاد می‌کنند، اما روابط موجود برای مدل‌های مفصل متمرکز در راهنماهایی نظیر NIST2017، تفاوتی میان رفتار اتصال WUF-W و اتصال صلب (صرف‌نظر از مدل‌سازی اتصال) در نظر نمی‌گیرند. به عبارت دیگر در ادبیات موجود، پارامترهای غیرخطی صرفاً برای دو دسته‌ی تیرهای با اتصالات RBS و تیرهای بدون اتصال RBS دسته‌بندی می‌شوند.

پژوهش‌های متعددی در این زمینه با در نظرگیری معیارهای مختلف پذیرش نظیر در یافت غیرخطی سازه و دوران پلاستیک مفاصل پلاستیک صورت گرفته است. افخمی و کمالی (Afkhani & Kamali, 2017)، به مطالعه رفتار دو اتصال نیمه‌صلب با ورق انتهایی و اتصال با نبشی فوقانی و تحتانی در سازه با استفاده از تحلیل غیرخطی و با توجه به دو توزیع یکنواخت و مثلثی پرداخته‌اند که بر اساس آن، سازه با اتصالات با ورق

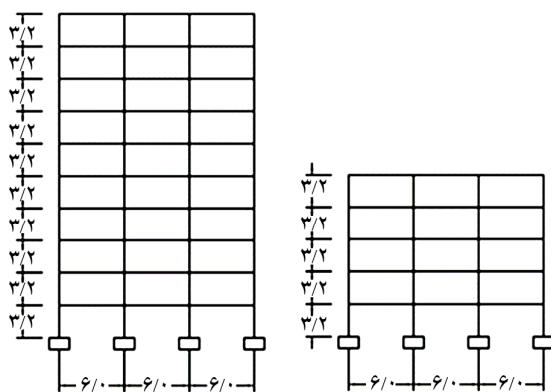
لذا در این پژوهش به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات مختلف خمشی تیر به ستون در سازه‌های کوتاه و میان مرتبه پرداخته شده است. سه اتصال RBS، WUF-W و صلب در پژوهش در نظر گرفته شده‌اند. همچنین چهار سازه ابتدا به صورت سه‌بعدی با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی ارزیابی لرزه‌ای شده‌اند. پس از آن یک قاب دویعدی داخلی از هر ساختمان انتخاب شده و رفتار لرزه‌ای آن با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از ۱۱ رکورد زلزله با مشخصات مختلف بررسی شده است.

## ۲- مشخصات سازه‌ها

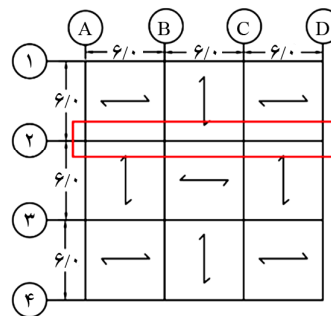
برای ارزیابی سازه‌ها، ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه مسکونی در سان‌فرانسیسکو کالیفرنیا با خاک تیپ C در نظر گرفته شده‌اند. سازه‌ها برای بارهای ثقلی و جانبی مطابق ASCE 7-16 طراحی شده‌اند. اجزای سازه‌ای مطابق AISC 360-16 و AISC 341-16 و اتصالات RBS مطابق AISC 358-16 طراحی شده‌اند. هر سازه به نحوی طراحی شده است که برای در نظرگیری سه اتصال RBS، WUF-W و صلب پاسخگو باشد. همچنین یکی از سازه‌های طبقه بدون رعایت اصل تیرضعیف-ستون قوی در نظر گرفته شده است. سازه‌ها مطابق آیین‌نامه ASCE 7-16 در دسته D طراحی لرزه‌ای قرار دارد و با توجه به مسکونی بودن سازه، از منظر اهمیت در دسته ۲ می‌باشند. در هر دو جهت پلان سازه دارای دهانه‌های ۶ متری است. ارتفاع طبقات نیز ۳/۲ متر فرض شده است. سازه در پلان افقی و قائم سازه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. بار مرده طبقات ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع است. برای بام، بار مرده ۵۰۰ و بار زنده بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. بار دیوارهای پیرامونی نیز ۷۵۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شده است برای تیرها و ستون‌ها از فولاد ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع استفاده شده است. مدول الاستیسیته فولاد  $2 \times 10^6$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع فرض شده است. ضریب پواسون نیز ۰/۳ می‌باشد. مشخصات مقاطع در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

تحت تحلیل‌های مختلف لرزه‌ای سازه پرداخته باشند. در نظرگیری اتصالات مختلف در قاب‌هایی با شکل‌پذیری متفاوت، سطوح لرزه‌خیزی مختلف و میزان رعایت اصول طراحی لرزه‌ای در سازه‌ها، می‌تواند منجر به پاسخ‌های متفاوتی شود. همچنین سؤالات متعددی در زمینه نقش اتصالات در رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی مطرح است. به‌طور مثال، در نظرگیری پارامترهای مختلف مدل‌سازی غیرخطی مطابق آیین‌نامه و یا منحنی‌های هیستریزس آزمایشگاهی تحت تحلیل‌های مختلف چه پاسخی را در سازه رقم می‌زنند؟ یا اینکه عدم رعایت اصول طراحی لرزه‌ای نظیر تیر ضعیف-ستون قوی در قاب‌های خمشی ویژه تا چه حد بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات مؤثر می‌باشد؟

همچنین مطابق آیین‌نامه‌های نیرویی، تغییر مکان جانبی سازه‌ها از جمله قاب خمشی فولادی در بازه خطی به‌عنوان یکی از شاخصه‌های طراحی و بهره‌برداری سازه بایستی کنترل شود. مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی، استفاده از اتصالات RBS با توجه به مشخصات کاهش‌یافته منجر به تشدید دررفت می‌شود، لذا برای کنترل دررفت در یک سازه با اتصال RBS، می‌توان دررفت سازه اولیه را با توجه به مقدار پارامتر c تا ۱۰ درصد بیشتر هم در نظر گرفت؛ بنابراین به نظر می‌رسد که در نظرگیری و استفاده از اتصالاتی نظیر RBS منجر به ضعف در سازه نسبت به تغییر مکان‌های جانبی در بازه تحلیل و طراحی مطابق آیین‌نامه‌های نیرویی می‌شود. اگرچه این پرسش وجود دارد که در نظرگیری اتصالات چه با رویکرد تقویتی و تضعیف چه تأثیری بر تغییر مکان‌های غیرخطی دارد؟ و یا اینکه آیا RBS به‌عنوان یک فیوز لرزه‌ای تا چه حد می‌تواند توزیع و مقادیر دررفت را تغییر دهد؟ چنانچه این موضوع می‌تواند در کنترل تغییر شکل‌های اجزای غیر سازه‌ای مؤثر باشد؛ لذا، برای ارزیابی رفتار غیرخطی سازه با در نظرگیری اتصالات مختلف و تغییر شکل‌های غیرخطی سازه می‌توان از ارزیابی دررفت غیرخطی تحت تحلیل‌های عملکردی نظیر پوش‌آور استفاده نمود. وجود یک منحنی دررفت غیرخطی بدون جهش و ثابت می‌تواند تا حدی به عدم آسیب اجزای غیرسازه‌ای و کنترل آسیب‌های محلی سازه کمک کند.



(ب) پلان سازه در ارتفاع



(الف) پلان افقی سازه

شکل (۱): پلان افقی و قائم سازه.

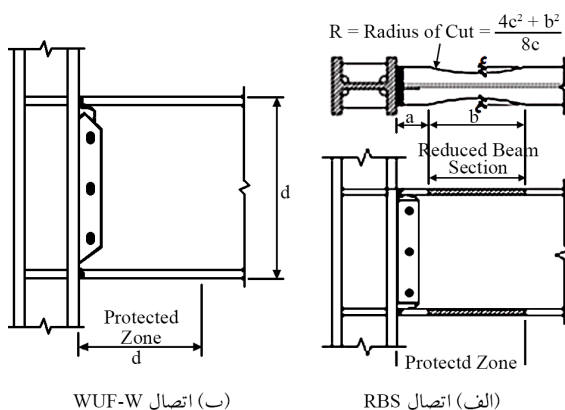
جدول (۲): مقاطع سازه ۱۰ طبقه.

مقاطع ستون	مقاطع تیر	طبقه
BO×450×35	W21×62	۱-۲-۳
BO×400×35	W21×62	۴-۵-۶
BO×400×35	W21×50	۷-۸
BO×300×30	W18×40	۹-۱۰

جدول (۱): مقاطع سازه ۵ طبقه.

مقاطع ستون	مقاطع تیر	طبقه	توضیحات
BO×380×40	W21×50	۱-۲-۳	سازه با رعایت تیر
BO×300×35	W18×40	۴-۵	ضعیف - ستون قوی
BO×300×30	W21×50	۱-۲-۳	سازه بدون رعایت تیر
BO×260×20	W18×40	۴-۵	ضعیف - ستون قوی

صورت می‌گیرد. در ادامه، مشخصات هر بخش به صورت مجزا بررسی شده است.



(ب) اتصال WUF-W

(الف) اتصال RBS

شکل (۲): نمونه اتصالات مطابق AISC 358-16.

### ۳-۱-۳ تحلیل استاتیکی غیرخطی

در بخش تحلیل استاتیکی غیرخطی، در تعریف مفاصل غیرخطی نرم‌افزار برای ستون‌ها، تیرها، اتصالات RBS و اتصالات WUF-W از روابط غیرخطی هر اتصال در آیین‌نامه ASCE41-17

برای طراحی اتصالات از آیین‌نامه AISC358-16 استفاده شده است. اتصالات RBS با توجه به مشخصات هندسی شامل سه پارامتر  $a$  که فاصله ناحیه از بر اتصال و برابر  $0.6$  پهنای بال تیر،  $b$  که طول ناحیه کاهش یافته و برابر  $0.7$  عمق تیر و  $c$  که عرض کاهش یافته و برابر  $0.25$  پهنای بال تیر است به همراه محل تشکیل مفصل پلاستیک Sh، طراحی شده‌اند. اتصالات WUF-W نیز با در نظرگیری ساختار مشخص هندسی استفاده می‌شوند و نیازی به طراحی ندارند. اگرچه به علت وجود ضرایب سخت‌شدگی کرنشی متفاوت متناسب با هر اتصال، سازه با هر اتصال و به صورت مجزا طراحی شده است تا کیفیت کافی را داشته باشد. نمونه اتصالات در شکل (۲) نشان داده شده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا تحلیل استاتیکی خطی بر روی سازه‌های سه‌بعدی صورت گرفته است و پس از آن یک قاب دوبعدی انتخاب شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی یک مدل دوبعدی

**جدول (۳): الگوهای بار تحلیل پوش آور.**

نام الگو	توضیح
PUSH-XP-GHL	الگو بار مود ۱- راستای X در جهت مثبت - ترکیب بار ثقلی بالا
PUSH-XN-GHL	الگو بار مود ۱- راستای X در جهت منفی - ترکیب بار ثقلی بالا
PUSH-XP-GLL	الگو بار مود ۱- راستای X در جهت مثبت- ترکیب بار ثقلی پایین
PUSH-XN-GLL	الگو بار مود ۱- راستای X در جهت منفی- ترکیب بار ثقلی پایین

**۳-۱-۳- تغییر مکان هدف<sup>۱۳</sup>**

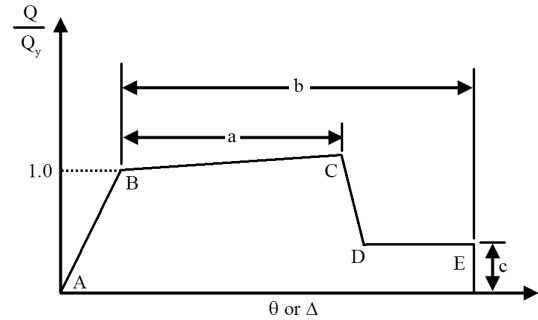
در تحلیل‌های بر اساس عملکرد با توجه به آنکه تحلیل بر اساس تغییر شکل به‌عنوان مرجع آسیب می‌باشد، رفتار سازه بر اساس تغییر مکان هدف ارزیابی می‌شود. این تغییر مکان میزان جابه‌جایی می‌باشد که در طی یک هدف بهسازی با سطح خطر زلزله و سطح عملکرد مشخص، از سازه انتظار عملکرد بیشینه خواهیم داشت. در محاسبه تغییر مکان هدف و نقطه عملکرد روش‌های مختلفی نظیر در آیین‌نامه‌های بین‌المللی نظیر ASCE 41-17 از روش ضرایب استفاده می‌شود. این رویکرد، با استفاده از ضرایبی که تابع رفتار غیرخطی و زوال سازه می‌باشند، حداکثر تغییر مکان طیفی یک سیستم یک‌درجه‌آزادی با فرض پریود مشابه سیستم چند درجه‌آزادی تبدیل به تغییر مکان هدف می‌شود. تغییر مکان هدف در روش ضرایب مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (2)$$

که در آن،  $T_e$  زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان در محدوده رفتار غیرخطی،  $C_0$  ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک‌درجه‌آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه‌آزادی،  $C_1$  ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان غیرارتجاعی سیستم،  $C_2$  ضریب تصحیح برای اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای بر تغییر مکان‌های ناشی از زوال چرخه‌ای و  $S_a$  شتاب طیفی به ازای زمان تناوب اصلی سازه می‌باشد. بدین ترتیب تغییر مکان هدف برای سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه در دو سطح خطر مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه تا

استفاده شده است که نمونه منحنی نیرو- تغییر مکان مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است.

همچنین مطابق این نشریه هدف بهسازی، هدف عملکرد پایه می‌باشد که مطابق آن در زلزله در سطح خطر ۲، عملکرد آستانه فروریزش<sup>۱۱</sup> بایستی ارضا گردد (علاوه بر عملکرد ایمنی جانی<sup>۱۲</sup> در سطح خطر ۱).


**شکل (۳): منحنی نیرو- تغییر مکان المان‌های فولادی در ASCE41-17.**
**۳-۱-۲- توزیع بار جانبی**

اصولاً توزیع بار جانبی بایستی نزدیک به وضعیت سازه در هنگام زلزله باشد. توزیع بارهای جانبی بایستی متناسب با توزیع جرم در صفحه هر دیافراگم باشد. همچنین توزیع قائم این نیروها باید متناسب با شکل مود اصلی ارتعاش در جهت مورد نظر باشد؛ بنابراین در این پژوهش از توزیع بار جانبی متناسب با شکل مود اصلی ارتعاش استفاده شده است که در آیین‌نامه‌های داخلی به توزیع نوع اول شهرت دارد.

برای در نظرگیری این توزیع حد بالا و پایین بارهای ثقلی

می‌بایست مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته شود:

$$Q_{G-High} = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (1)$$

$$Q_{G-Low} = 0.9Q_D$$

توجه شود که  $Q_D$  بار مرده و  $Q_L$  اثر ۲۵ درصد بار زنده غیر کاهش یافته می‌باشد.

برای پوش کردن سازه از الگوهای بار جانبی زیر با در نظرگیری حد بالا و پایین بارهای ثقلی و همچنین پیچش تصادفی استفاده می‌شود. الگوهای بار برای دو راستا بایستی تعریف گردد. الگوهای بار برای راستای X در جدول (۳) نشان داده شده است.



#### ۴- نتایج تحلیل

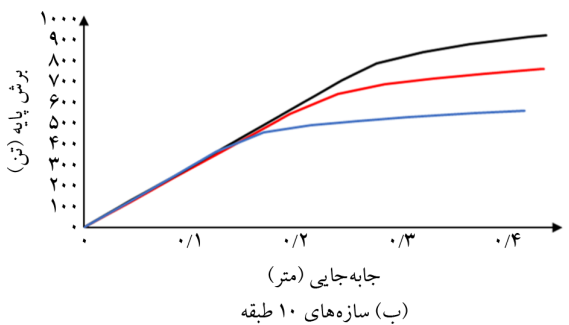
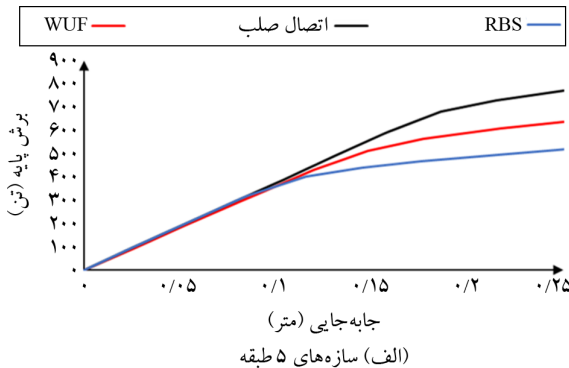
برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها، شاخصه‌های منحنی ظرفیت سازه‌ها، دوران پلاستیک و سطح عملکرد مفاصل پلاستیک کنترل شده‌اند. نتایج در دو بخش تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به صورت زیر ارائه شده‌اند.

##### ۴-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی

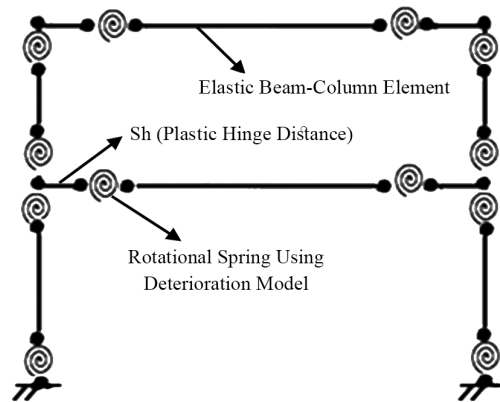
در تحلیل پوش آور، برای ارزیابی و مقایسه مدل‌ها از شاخصه‌های مختلفی استفاده شده است. منحنی ظرفیت (برش پایه- تغییر مکان) سازه و معیارهای پذیرش در سطوح خطر ۱ و ۲ بررسی شده‌اند. با توجه به آنکه رفتار غیرخطی سازه‌ها عمدتاً در سطح خطر ۲ رخ داده است، معیارهای پذیرش نظیر توزیع مفاصل پلاستیک، تغییر مکان جانبی غیرخطی<sup>۱۵</sup> سازه، بیشترین دوران پلاستیک در این سطح خطر ارائه شده‌اند.

##### ۴-۱-۱- منحنی‌های ظرفیت

در شکل (۷)، منحنی‌های ظرفیتی سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه نشان داده شده است. مطابق شکل‌ها به نظر می‌رسد با توجه به

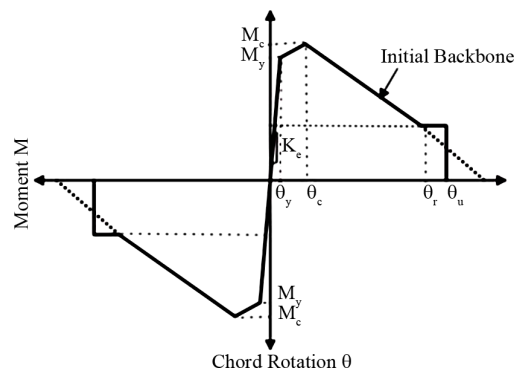


شکل (۷): منحنی‌های ظرفیت سازه‌ها.

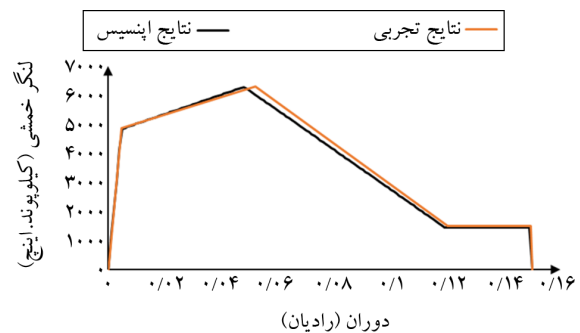


شکل (۴): مدل مفصل متمرکز.

در شکل (۵) مشخص شده برای مصالح نیز از مواد Bilinear از کتابخانه OpenSees استفاده می‌شود. انتقال هندسی تیرها با دستور Linear و ستون‌ها با دستور PDelta در نظر گرفته شده‌اند. برای ارزیابی صحت مدل غیرخطی، صحت‌سنجی عددی مطابق با پژوهش تجربی لیگنوس و همکاران صورت گرفته است. مطابق شکل (۶)، نتایج انطباق خوبی با مدل تست تجربی دارند (Lignos et al., 2016, 2018).



شکل (۵): مشخصات مصالح دو خطی در OpenSees.

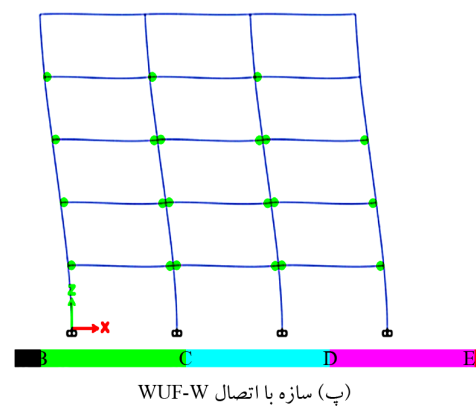
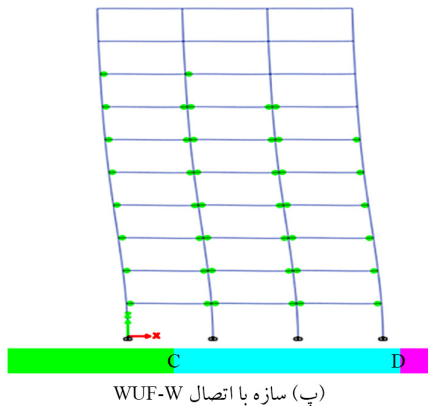
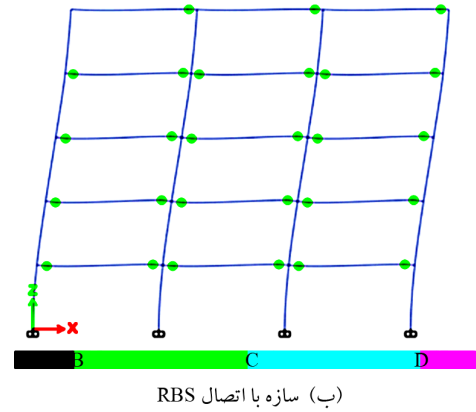
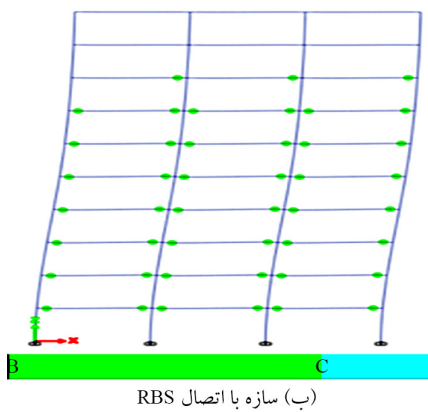
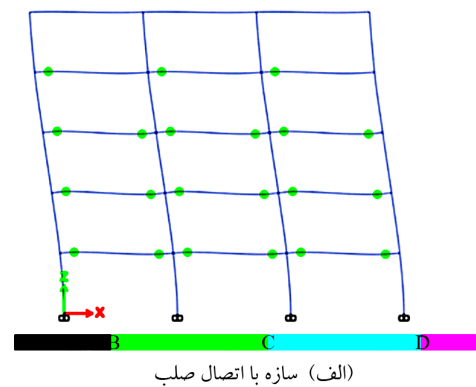
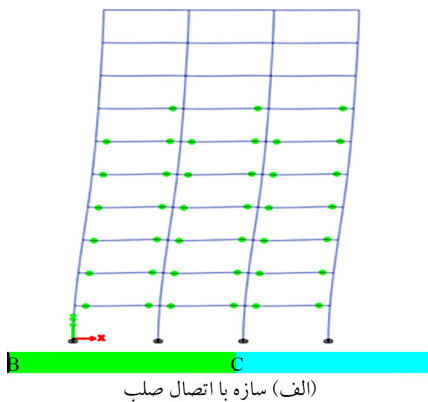


شکل (۶): نتیجه صحت‌سنجی مدل عددی.

#### ۴-۱-۲- دوران پلاستیک

توزیع مفاصل نیز در شکل‌های (۸) و (۹) مطابق با بحرانی‌ترین پاسخ که الگوی پوش بار ثقلی حد بالا و خروج از محوریت مثبت می‌باشد، نشان داده شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود اتصالات RBS با مشخصات کاهش یافته، زوال بیشتری را تحمیل کرده‌اند اما مفاصل سطح عملکرد بالاتری را با توجه به ظرفیت دورانی بالای آنها نسبت به سایر حالات نشان داده‌اند.

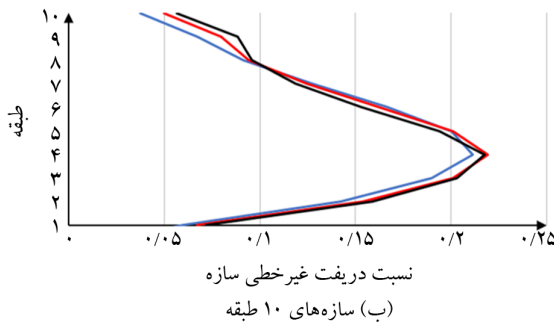
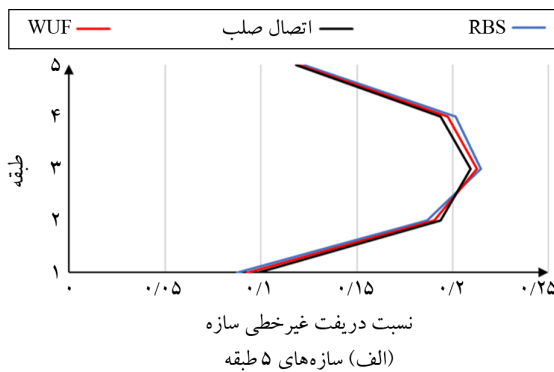
غیرخطی شدن سازه، تفاوت منحنی ظرفیت قابل ملاحظه است و عملاً مدل‌سازی اتصالات کاهش قابل توجه ظرفیت برش پایه سازه را به همراه دارد. این کاهش برای اتصالات RBS با توجه به ظرفیت خمشی کاهش یافته بیشتر بوده است. سازه با اتصالات RBS دارای بیشترین بازه غیرخطی در میان نمونه‌ها می‌باشد که این موضوع مبین عملکرد مناسب اتصالات RBS به‌عنوان یک فیوز لرزه‌ای نسبت به WUF می‌باشد.



شکل (۹): توزیع مفاصل سازه‌های ۱۰ طبقه تحت الگو پوش بار ثقلی حد بالا با خروج از مرکزیت مثبت.

شکل (۸): توزیع مفاصل سازه‌های ۵ طبقه تحت الگوی پوش بار ثقلی حد بالا با خروج از مرکزیت مثبت.

عوض می‌شود و سازه بدون در نظرگیری اتصال با یک جهش بیشترین تغییر مکان جانبی را به خود اختصاص می‌دهد. در میان سازه‌ها با در نظرگیری اتصالات، سازه با WUF دارای دررفت بیشتری در طبقات فوقانی نسبت به سازه با RBS می‌باشد و علاوه بر آن دارای جهش در رویه دررفت است.



شکل (۱۰): دررفت غیر خطی طبقات در سطح خطر ۲ برای سازه ۵ طبقه.

لذا به نظر می‌رسد اگرچه در آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس نیرو و در بازه ارزیابی خطی، اتصالات RBS با کاهش سطح مقاطع، به عنوان عاملی منفی در تغییر مکان جانبی به حساب می‌آیند، اما تحت ارزیابی عملکردی (غیر خطی)، سازه با این اتصالات دارای یک منحنی تغییر مکان جانبی صاف تر نسبت به سایر حالات می‌باشند که این موضوع نشان دهنده رفتار ثابت در تغییر مکان نسبی غیر خطی در طبقات سازه می‌باشد. این موضوع در کاهش آسیب‌های محلی که غالباً در اعضای غیر سازه‌ای در اثر تغییر مکان جانبی طبقات رخ می‌دهد مؤثر است.

#### ۴-۲- تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

در این بخش نتایج بیشترین شاخصه شکل پذیری<sup>۱۷</sup> (تقاضای

بیشترین دوران پلاستیک در سازه‌ها و سطوح عملکرد نیز در جدول (۵) نشان داده شده است. مطابق روند توزیع، مدل‌سازی اتصالات WUF و RBS هر دو منجر به کاهش تعداد مفاصل پلاستیک می‌شود. علاوه بر آن سطوح عملکرد مفاصل نیز تغییر می‌یابد. همان‌طور که مشخص است استفاده از اتصالات RBS سطح عملکرد را از IO-LS به A-IO بهبود داده است (بازه قابلیت خدمت‌رسانی بی‌وقفه<sup>۱۶</sup>). علاوه بر آن، به نظر می‌رسد تیرهای طبقات ۲ و ۳ دارای بیشترین تقاضا و بحرانی‌ترین حالت بوده‌اند. رفتار ستون‌ها در سازه ۵ طبقه خمشی و نظیر تیرها بوده و لذا نیروی محوری نیز به نحوی نیست که شکل پذیری را تحت الشعاع قرار دهد. لذا در ستون‌ها نیز مفاصل پلاستیک تشکیل نمی‌شود.

جدول (۵): بیشینه دوران پلاستیک و سطح عملکرد مفاصل.

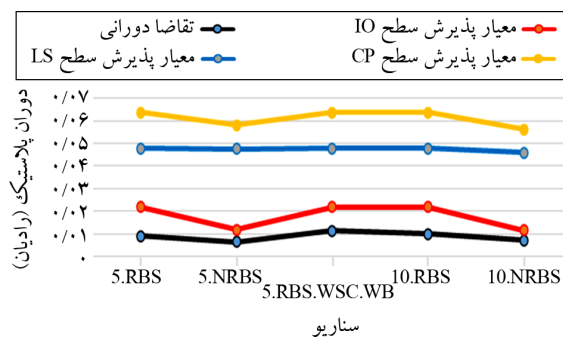
بیشترین دوران پلاستیک - سطح عملکرد	نمونه	سازه‌های ۵ طبقه
A-IO-۰/۰۱۸۹	RBS با اتصال	سازه‌های ۵ طبقه
IO-LS-۰/۰۱۴۹	WUF با اتصال	سازه‌های ۵ طبقه
IO-LS-۰/۰۱۴۸	سازه با اتصال صلب	سازه‌های ۵ طبقه
A-IO-۰/۰۱۸۹	RBS با اتصال	سازه‌های ۱۰ طبقه
IO-LS-۰/۰۱۴۹	WUF با اتصال	سازه‌های ۱۰ طبقه
IO-LS-۰/۰۱۴۸	سازه با اتصال صلب	سازه‌های ۱۰ طبقه

#### ۴-۳- تغییر مکان نسبی غیر خطی

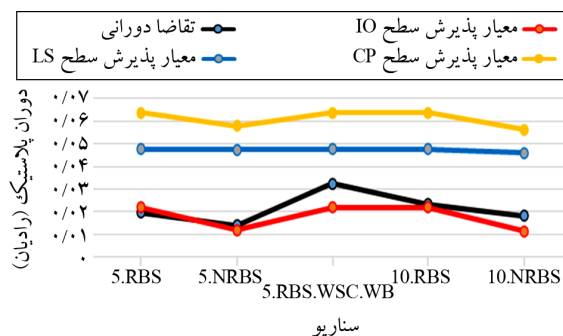
نمودارهای دررفت غیر خطی طبقات در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در سازه کوتاه مرتبه با اتصال صلب، تا طبقه ۲ تفاوت بسیار کم می‌باشد و پس از آن سازه‌هایی با لحاظ کردن اتصالات دارای دررفت بحرانی بیشتری بوده‌اند. سازه با اتصالات RBS دارای بیشترین دررفت در طبقات فوقانی بوده‌اند.

در سازه ۱۰ طبقه بر خلاف سازه ۵ طبقه، تفاوت شاخصه دررفت در طبقات محسوس تر است. در چهار طبقه اول سازه بدون اتصالات دارای دررفت بیشتری می‌باشد که تقریباً با سازه با اتصال WUF منطبق است. در طبقات ۴ الی ۷، سازه‌های با در نظرگیری اتصالات دارای تغییر مکان جانبی بیشتری نسبت به سازه بدون اتصالات می‌باشد. در طبقات فوقانی ۸ الی ۱۰، توزیع

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب سطوح عملکرد مفاصل پلاستیک در حالات میانگین و بیشینه کنترل شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود در حالت میانگین، عملکرد اتصالات RBS با نظیر اتصالات دیگر است و سطوح عملکرد مفاصل تا قبل از IO می‌باشد؛ اما در حالتی که حداکثر پاسخ لرزه‌ای مد نظر قرار گیرد، عدم رعایت اصل تیرضعیف-ستون قوی منجر شده است تا سطح عملکرد از IO عبور کند. لذا به نظر می‌رسد زمانی که RBS عملکرد مناسب و شکل‌پذیر خود را در قاب‌های خمشی ویژه نشان می‌دهد که اصول طراحی لرزه‌ای رعایت شوند. همچنین، اگرچه همه معیارهای پذیرش ارضا شده‌اند اما به نظر می‌رسد رعایت این اصل در سازه‌هایی با RBS که برای سطح IO طراحی می‌شوند، اهمیت بیشتری دارد. در سازه‌های ۱۰ طبقه نیز سطح عملکرد بحرانی‌ترین مفصل پلاستیک برای هر دو نوع اتصال از IO عبور کرده است. اگرچه مطابق نمودار شکل (۱۳)، سازه با اتصالات RBS به علت ظرفیت دورانی بیشتر، بهتر عمل کرده‌اند.

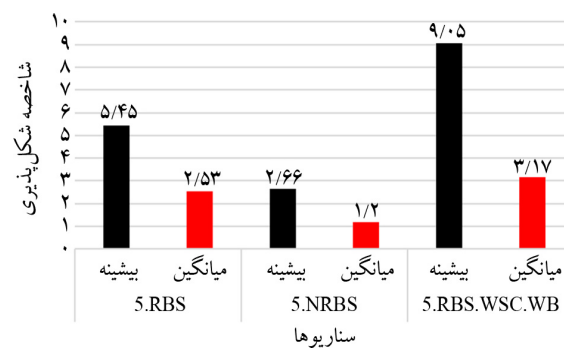


شکل (۱۳): کنترل سطح عملکرد مفاصل پلاستیک در حالت میانگین.

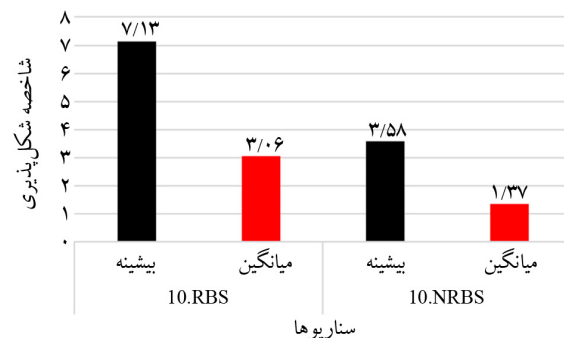


شکل (۱۴): کنترل سطح عملکرد مفاصل پلاستیک در حالت بیشینه.

دورانی به دوران تسلیم) قاب میانی برای سازه‌های با اتصالات RBS و اتصال غیر RBS در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. در این بخش یک‌بار میانگین پاسخ سازه مطابق ضوابط آیین‌نامه و بار دیگر حداکثر پاسخ برای کنترل بحرانی‌ترین سناریو تحت ۱۱ رکورد زلزله کنترل شده‌اند. سناریوهای با اتصال صلب با NRBS نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۱): شاخصه شکل‌پذیری برای سازه‌های ۵ طبقه.



شکل (۱۲): شاخصه شکل‌پذیری برای سازه‌های ۱۰ طبقه.

همچنین WSC.WB نشان‌دهنده‌ی سازه با عدم رعایت تیر ضعیف ستون قوی در طراحی می‌باشد. مطابق نتایج، اگر شاخصه میانگین که معیار پذیرش آیین‌نامه است مد نظر باشد، تفاوت میان RBS و سایر اتصالات زیاد نیست اما در صورتی که بیشینه تقاضا مد نظر باشد، در سازه‌های ۵ طبقه، اتصال RBS تا ۲/۰۵ برابر دوران پلاستیک اتصالات دیگر تشدید می‌کند. عدم رعایت اصل تیر ضعیف-ستون قوی، پاسخ را تا ۳/۴ برابر مقادیر دوران پلاستیک اتصالات صلب تشدید می‌کند.

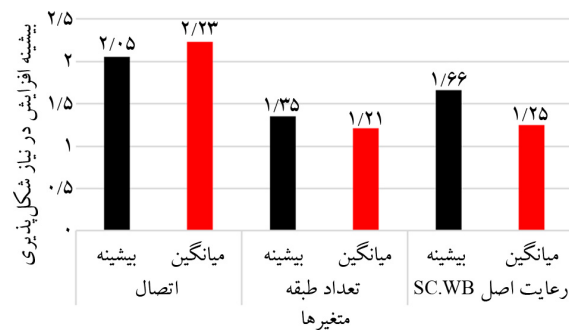
سطح عملکرد آنها در قاب‌های سه‌بعدی در بخش پوش آور، برای مقایسه رفتار سازه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در این بخش از نرم‌افزار ETABS 20.3.0 استفاده شده است. پس از آن یک قاب داخلی سازه‌ها انتخاب شده است و در نرم‌افزار OpenSees به صورت دویبعدی مدل شده است و با استفاده از ۱۱ رکورد زلزله، تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته است. در این بخش با توجه به روابط مدل مفصل متمرکز دو سناریو سازه‌های با اتصالات RBS و بدون آن در نظر گرفته شده است و یک سناریو از سازه‌های ۵ طبقه بدون در نظرگیری اصل تیر ضعیف- ستون قوی کنترل شده است. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر می‌باشند:

- در نظرگیری اتصالات می‌تواند توزیع تغییر مکان نسبی غیرخطی طبقات را تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی تغییر دهد. این تغییر برای سازه‌های کوتاه مرتبه که رفتار غیرخطی کمتر می‌باشد، اندک و برای سازه‌های میان مرتبه که بیشتر تحت اثر زلزله می‌باشند، محسوس می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود در نظرگیری اتصالات نظیر WUF-W می‌تواند میزان جهش در منحنی تغییر مکان را کاهش دهد و حتی بهبود یابد. بحرانی‌ترین میزان جهش در دریافت مربوط به سازه بدون مدل‌سازی اتصالات می‌باشد، نظر به اینکه این موضوع در کنترل آسیب‌های اجزای غیر سازه‌ای مؤثر می‌باشد، توصیه می‌شود نقش اتصالات در کنترل دریافت غیرخطی سازه اثر داده شود.

- در نظرگیری اتصالات RBS در سازه ۱۰ طبقه دارای کمترین دریافت در طبقات تحتانی و فوقانی می‌باشد اما در طبقات میانی میزان دریافت اندکی بیشتر از سایر سناریوها می‌باشد. با این وجود مطابق نمودار تغییر مکان جانبی در طبقات، بر خلاف مدل‌های دیگر، سازه با اتصال RBS در طبقات فوقانی خود دارای جهشی در تغییر مکان جانبی نیست و منحنی ثابت دارد که این موضوع در کنترل آسیب به اجزای غیر سازه‌ای و شرایط بهره‌برداری مؤثر است.

- مطابق نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی، در نظرگیری اتصالات

همچنین شکل (۱۵) حداکثر افزایش در شاخصه نیاز شکل‌پذیری در پاسخ میانگین و بیشینه سازه‌ها را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان بررسی نمود که تغییر هر یک از پارامترهای طراحی اعم از تعداد طبقه، نوع اتصال و رعایت اصول طراحی لرزه‌ای تا چه حد در کاهش یا افزایش پاسخ سازه (در دو حالت میانگین و بیشینه) مؤثر است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوع اتصال تأثیر بیشتری بر تشدید پاسخ دارد. میزان افزایش پاسخ در سازه‌های ۵ طبقه برای حالت میانگین و بیشینه پاسخ، به ترتیب ۲/۰۵ و ۲/۱ و برای سازه‌های ۱۰ طبقه، ۲/۲۳ و ۲ بوده است. پس از آن رعایت اصل تیر ضعیف- ستون قوی بیشترین تأثیر را داشته است. لذا در طراحی سازه‌هایی که در مقابل زلزله حساسیت بیشتری دارند، توجه به اصول طراحی لرزه‌ای و نوع اتصال خمشی نقش مهمی در تعیین رفتار عملکردی قاب خمشی خواهد داشت.



شکل (۱۵): کنترل نسبت دوران‌های پلاستیک سناریوها به یکدیگر.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نقش انواع مختلف اتصالات و مدل‌سازی آنها در ارزیابی عملکردی سازه‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) و دینامیکی غیرخطی پرداخته شده است. سازه‌های منظم ۵ و ۱۰ طبقه قاب خمشی فولادی ویژه واقع در سان‌فرانسیسکو با نوع خاک C مطابق ASCE7-16 در سه سناریو عدم در نظرگیری اتصالات، در نظرگیری اتصالات RBS و WUF به صورت جداگانه طراحی لرزه‌ای شدند و به صورت غیرخطی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. شاخصه‌های مختلفی نظیر منحنی ظرفیت سازه، توزیع مفاصل و

رفتار در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها رقم بزند، لذا در این زمینه نیاز به پژوهش‌های بیشتر برای روابط مفصل متمرکز متناسب با سایر اتصالات می‌باشد.

## References

## مراجع

- Afkhami, V. R., & Kamali, M. T. (2017). Nonlinear static analysis of steel frames with semi rigid beam to column connections using cruciform element. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4), 98-117. doi: 10.22065/jsce.2017.68957.101 (in Persian).
- American Institute of Steel Construction, Inc. (2016). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC Standard 341-16. Reston, IL: AISC.
- American Institute of Steel Construction, Inc. (2016). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC Standard 360-16. Chicago, IL: AISC.
- American Institute of Steel Construction, Inc. (2016). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC Standard 358-16. Chicago, IL: AISC.
- American Society of Civil Engineers, Inc. (2017). Minimum design loads, and associated criteria for buildings and other structures, ASCE/SEI Standard 7-16. Reston, Virginia: ASCE.
- American Society of Civil Engineers, Inc. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI Standard 41-17. Reston, Virginia: ASCE.
- Bruneau, M., Chi-Ming Uang, Sabelli, R. (2011). *Ductile Design of Steel Structures* (2 ed.): McGraw Hill.
- Brunesi, E., Nascimbene, R., & Rassati, G. (2015). Seismic response of MRFs with partially-restrained bolted beam-to-column connections through FE analyses. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 37-49.
- Gioncu, V., and Mazzolani, F. (2013). *Seismic Design of Steel Structures*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kim, T., & Kim, J. (2009). Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1316-1322.

- خمشی در ارزیابی غیرخطی سازه‌ها از یکسو منجر به کاهش منحنی ظرفیت سازه می‌شود و از سوی دیگر تعداد مفاصل پلاستیک را نسبت به مدل‌های بدون در نظرگیری اتصالات خمشی افزایش می‌دهد؛ بنابراین با در نظرگیری اثر اتصالات خمشی در تحلیل‌های عملکردی، می‌توان به دید دقیق‌تری از رفتار سازه رسید. درحالی‌که عدم در نظرگیری اتصالات می‌تواند منجر به پیش‌بینی غیرواقع‌بینانه و دست‌پایین از پاسخ سازه گردد.
- بر اساس نتایج هر دو رویکرد مدل‌سازی و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی، اتصالات RBS توانسته‌اند علیرغم پاسخ بیشتر نسبت به سایر اتصالات، سطح مفاصل پلاستیک را بهبود دهند و یا سطح عملکردی مفاصل پلاستیک آنها مشابه اتصالات صلب باشد. اگرچه مطابق نتایج به نظر می‌رسد که برای فعال‌سازی رفتاری با شکل‌پذیری بالا نظیر اتصالات RBS در کنار قاب‌های ویژه، رعایت اصول طراحی لرزه‌ای نظیر اصل تیر ضعیف-ستون قوی ضروری می‌باشد، چنانچه میزان افزایش در شاخصه شکل‌پذیری در صورت عدم رعایت اصل مذکور، در حالت میانگین و بیشینه پاسخ به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۶۶ می‌باشد.
- تغییر اتصالات بیشترین تأثیر را در تشدید پاسخ سازه‌ها رقم زده است و در حالت میانگین بیشترین افزایش در شاخصه شکل‌پذیری سازه‌ها نسبت ۲/۲۳ برابری دارد. با توجه به این موضوع، استفاده از RBS در سازه‌هایی با حساسیت بیشتر (نظیر مقاطع ضعیف‌تر و یا سازه‌های بلندمرتبه) بایستی با دقت خاصی مد نظر باشد.
- مطابق نتایج، با توجه به اهمیت اتصالات در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، نحوه مدل‌سازی اتصالات می‌تواند از اهمیت خاصی برخوردار باشد. اگرچه روابط آزمایشگاهی موجود در مدل‌های مفصل متمرکز با مدل کردن اثر زوال هیستریزس می‌تواند از دقت قابل توجهی برخوردار باشند، اما بایستی توجه شود که این روابط صرفاً برای دو نوع RBS و غیر RBS ارائه شده است؛ مطابق ارزیابی استاتیکی غیرخطی، استفاده از پارامترهای غیرخطی هر اتصال می‌تواند تفاوت

*Seismology and Earthquake Engineering*, Iran, Tehran, (in Persian).

Sofias, C., Kalfas, C., & Pachoumis, D. (2014). Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, 59, 320-329.

Tabar, A. M., Alonso-Rodriguez, A., & Tsavdaridis, K. D. (2022). Building retrofit with reduced web (RWS) and beam (RBS) section limited-ductility connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 197, 107459.

Zare Aghblagh, M., & Ghandi, E. (2019). Nonlinear static analysis of steel moment-resisting frames considering beam-column connections effects based on performance. Paper presented at the 10<sup>th</sup> National Conference on Steel & Structure, Iran, Tehran (in Persian).

Zare Aghblagh, M., & Rahman Shokrgozar, H. (2020). An investigating into the effect of various modeling parameters on the behavior of special steel moment frames. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(1), 287-302. doi: 10.22060/ceej.2018.14671.5713 (in Persian).

### واژه‌نامه

Steel Moment Frames	۱- قاب‌های خمشی فولادی
Northridge	۲- نورث‌ریج
Kobe	۳- کوبه
WUF-W	۴- اتصالات تقویت نشده جوشی
RBS	۵- اتصالات با سطح مقطع کاهش یافته
Strong Column-Weak Beam	۶- تیر ضعیف- ستون قوی
Nonlinear Static Analysis- Pushover	۷- تحلیل استاتیکی غیر خطی
Nonlinear Dynamic (Time History) Analysis	۸- تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی) غیر خطی
RWS	۹- اتصالات با سطح جان کاهش یافته
Incremental Dynamic Analysis	۱۰- تحلیل دینامیکی فزاینده
Collapse Prevention (CP)	۱۱- سطح عملکرد آستانه فروریزش
Life Safety (LS)	۱۲- سطح عملکرد ایمنی جانی
Target Displacement	۱۳- تغییر مکان هدف

Lignos, D., Hartloper, A. R., Elkady, A. M. A., Hamburger, R., & Deierlein, G. (2018). Revised ASCE-41 modeling recommendations for moment-resisting frame systems. Paper presented at the *Proceedings of the 11<sup>th</sup> US National Conference on Earthquake Engineering (11NCEE)*.

Lignos, D. G., Cravero, J., & Elkady, A. (2016). *Experimental Investigation of the Hysteretic Behavior of Wide-Flange Steel Columns under High Axial Load and Lateral Drift Demands*.

Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, 137(11), 1291-1302.

Naughton, D. T., Tsavdaridis, K. D., Maraveas, C., & Nicolaou, A. (2017). Pushover analysis of steel seismic resistant Frames with reduced Web section and reduced Beam section connections. *Frontiers in Built Environment*, 3, 59.

NIST (2017). *Guidelines for Nonlinear Structural Analysis for Design of Buildings: Part II a – Steel Moment Frames*, GCR 17-917-46v2. Redwood, California, Applied Technology Council.

McKenna, F. (2011). OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58-66.

Popov, E. P., Yang, T.-S., & Chang, S.-P. (1998). Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake. *Engineering Structures*, 20(12), 1030-1038.

Rezaee, B., Tehrani, P., & Behnam, B. (2024a). Evaluation of nonlinear drift in steel moment frames considering the effect of rigid, RBS, and WUF-W connections. Paper presented at the 9<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Iran, Tehran (in Persian).

Rezaee, B., Tehrani, P., & Behnam, B. (2024b). Evaluation of the effect of modeling RBS, WUF-W, and rigid beam-to-column connections in the performance-based assessment of steel moment frames. Paper presented at the 9<sup>th</sup> International Conference on

Concentrated Hinge Model	۱۴- مدل مفصل متمرکز
Nonlinear Drift	۱۵- تغییر مکان جانبی غیر خطی
Immediate Occupancy (IO)	۱۶- سطح عملکرد قابلیت خدمت رسانی بی وقفه
Ductility Index	۱۷- شاخصه شکل پذیری

## Evaluation of the Seismic Behavior of Low and Mid-Rise Structures, Considering the Effect of Rigid, RBS, and WUF-W Connections in Special Moment Frames

Behzad Rezaee<sup>1</sup>, Payam Tehrani<sup>2</sup> and Behrouz Behnam<sup>3\*</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran,

\*Corresponding Author, email: b.behnam@aut.ac.ir

After experiencing the damages caused by the 1994 Northridge and 1995 Kobe earthquakes, several solutions were proposed to strengthen the seismic beam-to-column connections of moment frames, which are considered a crucial factor in the stability of structures. The behavior of connections in nonlinear models can greatly influence the response of structures. Several studies have investigated the nonlinear behavior of structures and the impact of connections. However, there is limited research on diverse connection modeling under different structural analysis methods. Analyzing connections in frames with varying ductility, seismicity levels, and adherence to seismic design principles can lead to diverse results. The importance of connections in the seismic performance of moment frames prompts questions: How do different nonlinear modeling parameters, compliance with regulations, or laboratory hysteresis curves in various analyses affect structures? To what extent does neglecting seismic design principles, such as the strong column-weak beam concept in special moment frames, affect connection seismic performance?

According to the linear evaluation approach, force-based regulations often view RBS connections as amplifying drift. An unresolved question is the impact of these connections, using strengthening and weakening methods, on non-linear lateral displacements. Additionally, how much can RBS serve as a seismic fuse, altering drift distribution and values? This factor might aid in managing non-structural component deformation. Thus, assessing non-linear structural behavior through various connections and deformations can utilize non-linear drift evaluation in performance-based analyses like pushover. A non-linear drift curve, devoid of sudden shifts, could help prevent non-structural component damage.

In this study, the seismic performance of different beam-to-column moment connections in low- and mid-rise structures is investigated. Three types of connections, including RBS, WUF-W, and rigid connections, are analyzed in 5- and 10-story buildings. Initially, 3D models were evaluated using nonlinear static analysis following the ASCE41-17 guidelines. Criteria such as capacity curve, nonlinear drift, plastic rotation, and the performance of plastic hinges are scrutinized. Subsequently, a two-dimensional internal frame of each building is selected for further seismic investigation through nonlinear dynamic analysis using 11 earthquake records with varying characteristics. A 5-story structure is specifically examined to evaluate the impact of the strong column-weak beam principle on connection and frame effectiveness. The modeling includes hysteresis deterioration based on laboratory data, with the ductility demand index serving as a critical control criterion. After assessing the average structural responses in accordance with regulations, the most critical scenario is identified among the 11 earthquake records. Moreover, the amplification of plastic rotation is monitored by considering the increase in the ductility demand index as a measure to identify design parameters affecting structural behavior. The results show that incorporating connections into performance-based assessment can yield more conservative outcomes and alter the non-linear drift distribution. Applying RBS connections has notably decreased abrupt changes in the drift curve, consequently mitigating local damage risks, particularly crucial for mid-rise structures. Furthermore, RBS connections have enhanced plastic hinge performance up to IO-LS levels consistently across analyses. The findings highlight the importance of implementing seismic design principles like the strong column-weak beam concept to facilitate ductile behavior through mechanisms such as RBS connections and special frames.

Neglecting this principle in the results can lead to reduced plastic hinge performance and increased structural response. The ductility demand index escalates by 1.25 and 1.66 on average and in peak response mode, respectively, when this principle is not adhered to.

The change of connections has significantly impacted the response of the structures. On average, the ductility demand index of the structures has increased by 2.23 times. Considering this, it's important to give special consideration to the use of RBS in structures that are more sensitive, such as those with smaller sections or high-rise structures.

**Keywords:** RBS Connections, WUF-W Connections, Nonlinear Drift, Special Steel Moment Frames, Nonlinear Static Analysis, Nonlinear Dynamic Analysis.