



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



اثر توالی لرزه ای نزدیک گسل بر عملکرد لرزه ای قاب مهاربندی واگرا با تیر پیوند قائم ساخته شده از فولاد پر مقاومت

نوید سیاه پلو^{۱*}، سعید منظری^۲، نگار علیزاده بهبهانی^۳

چکیده

قاب مهاربندی شده برون محور، با سختی و شکل پذیری مناسب و محدود کردن آسیب های ورودی ناشی از بارهای جانبی در تیر پیوند جزو سیستم های ساختمانی مطلوب دسته بندی می شوند. بعلاوه با توسعه صنعت فولاد در ایران، استفاده از فولاد پر مقاومت در طراحی سیستم های سازه ای نیازمند تحقیقات بیشتر است. از طرفی وقوع زلزله های اخیر از جمله زلزله کرمانشاه و قهرمان ماراش ترکیه لزوم توجه به توالی لرزه ای را بیش از پیش نشان می دهد. لذا در این مقاله ارزیابی لرزه ای قاب مهاربندی شده واگرا با تیر پیوند قائم، ساخته شده از فولاد پر مقاومت، تحت اثر زلزله های متوالی نزدیک گسل در دو سطح DBE و MCE هدف اصلی می باشد. بدین منظور قاب دو بعدی ۸ طبقه و ۳ دهانه با سیستم خمشی و مهاربند واگرای قائم (با رفتار برشی) از یک مدل طراحی شده سه بعدی استخراج گردید. قاب در برابر ۷ توالی لرزه ای بروش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی شد. پاسخهای ارزیابی شده بشکل متوسط بیشینه زاویه دریفت طبقات، زاویه دریفت ماندگار، زاویه دوران پلاستیک تیر پیوند و انرژی مستهلک شده اعضا انتخاب شدند. نتایج نشان می دهد که اثر توالی لرزه ای در دو سطح خطر انتخابی باعث افزایش قابل ملاحظه پاسخ های انتخاب شده ولی از حیث زاویه دریفت گذرا و ماندگار همچنان قابها دو سطح عملکرد LS (برای DBE) و CP (برای MCE) را تامین کرده اند. از منظر زاویه دوران پلاستیک نیاز تحمیل شده در توالی و در دو سطح انتخابی کمتر از مقدار مجاز ۰/۰۸ برای رفتار برشی است. از حیث جذب انرژی در همه حالت ها بیشترین سهم مربوط به تیر پیوند و کمترین مربوط به مهاربند است. بعلاوه سهم انرژی مستهلک شده در تیر پیوند قائم و در سطح خطر MCE به مراتب بیشتر از DBE است.

واژگان کلیدی:

قاب مهاربندی شده برون محور (واگرا)، تیر پیوند قائم، توالی لرزه ای نزدیک گسل، فولاد پر مقاومت

^{۱*} موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، siahpolo@acecr.ac.ir

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



مقدمه

قرار گیری کشور ایران در پهنه گسلی و رخداد زلزله های شدید و متوالی و از طرفی نبود تاثیر این گونه از حرکات زمین در ضوابط آیین نامه های موجود، یک خلا مطالعاتی محسوب می شود. در این بین اثر توالی لرزه ای بر سازه در یک شرایط بحرانی لرزه ای و مشاهده پاسخ عملکرد آن کمتر در مطالعات قبلی مد نظر بوده است. در نظر نگرفتن این پدیده در آیین نامه های لرزه ای، یک ضعف در طراحی سازه ها خصوصا مناطق لرزه خیز به شمار می رود و پرداختن به نتایج پاسخ سازه به اینگونه زلزله های متوالی در مطالعات، می تواند محققین را مجاب به لحاظ نمودن اثرات این پدیده محتمل و آسیب ساز، در آیین نامه های مربوطه نماید. محمدی جلودار (۱۳۹۴) در پژوهشی با بررسی پاسخ تحلیل های دینامیکی تحت رکورد های توالی لرزه ای، مشخص شد پاسخ سازه ی مذکور تحت رکورد پس لرزه افزایش محسوسی پیدا می کند، و اینکه خصوصیات فرکانسی پس لرزه می تواند بر اندازه آن تاثیر گذار باشد. قدرتی امیری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثر توالی لرزه ای بر پاسخ افزایش یافته قاب های بتن آرمه با و بدون دیوار برشی پرداختند. منظور بررسی اثر توالی لرزه ای بر پاسخ سازه ها پارامترهای بیشینه تقاضای شکل پذیری، جابجایی نسبی بین طبقات و تغییر شکل برشی دیوارها در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که زمین لرزه های با نسبت PGA حالت متوالی به لرزه نخست تا مقدار ۰/۴۶، تأثیر قابل ملاحظه ای بر پاسخ قاب ها ندارند. به ازای مقادیر بالاتر، با افزایش این نسبت، اثر پدیده توالی لرزه ای بر پاسخ قاب ها افزایش می یابد. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه ای سازه های فولادی توسط کرک آبادی و همکاران (۱۴۰۰) ارزیابی شد. نتایج نشان داد، کاهش سرعت موج برشی در خاک، باعث افزایش تقاضای لرزه ای جابه جایی سازه می شود. همچنین اثرگذاری زلزله های متوالی روی اندرکنش خاک و سازه، وابسته به شرایط محتوای فرکانسی زلزله ها است. اما به طور کلی تقاضای جا به جایی در سازه در زلزله های متوالی با نرم تر شدن خاک افزایش داشته است. Farivarrad و Estekanchi (۲۰۲۲) به مطالعه عملکرد لرزه ای ساختمان های در معرض زلزله های چندگانه پرداختند. برای مدل های مورد مطالعه ۳ نمونه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه از قاب های خمشی پروژه SAC انتخاب شد. آنها به این مهم دست یافتند که در یک توالی لرزه ای که دو زلزله با دو شدت متفاوت دارد، وقوع لرزه ی قوی تر در ابتدا، خطر لرزه ای بالاتری را برای سازه محتمل می کند

با توجه به پیشرفت های بوجود آمده در تکنولوژی های ساخت فولاد های ساختمانی و ساخت فولاد با خواص و مقاومت متفاوت و دارای کاربری خاص این امکان را می دهد، که جنس مصالح مختلف در اعضای اصلی سازه مورد بررسی بیشتری قرار گیرد. یکی دیگر از مسائل مهمی که در سازه های فولادی مورد نظر است، لزوم بهره برداری و مرمت سریع سازه پس از زلزله ها و یا استفاده از ایده سازه های با آسیب کم و کنترل شده می باشد. در سیستم های که دارای اعضای فیوز مانند بوده اند، این امکان وجود دارد که آسیب به سایر اعضا را تا حدی بتوان کاهش داد. به نظر می رسد کنترل آسیب در بین سیستم های دارای مهاربند های واگرا در سیستم مهاربند واگرای قائم (V-EBFs) بیشتر از سایر پیکربندی ها باشد. قاب مهاربندی شده واگرا با تیر پیوند قائم، یکی از سیستم های ساختمانی می باشد که دارای خصوصیتی از قاب خمشی و قاب مهاربندی شده همگرا است. این سیستم به طور همزمان دارای شکل پذیری و سختی مناسبی است. تاثیر ترکیب تیر پیوند برشی افقی و قائم (CVH-EBF) را روی رفتار غیر خطی قاب مهاربندی شده برون محور توسط Ziane و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه شد. نتایج نشان داد، تیر پیوند قائم به طور ویژه ای ظرفیت لرزه ای سیستم را بهبود می بخشد و نیروهای داخلی ایجاد شده در سایر اعضا، خصوصا تیر پیوند افقی برشی را کاهش می دهد. Vetr و Ghamari (۲۰۱۹) در تحقیقات آزمایشگاهی و عددی رفتار لرزه ای قاب V-EBFs را مورد بررسی قرار دادند. مدل آزمایشگاهی



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شامل یک قاب ۳ طبقه یک دهانه بوده که تحت بارگذاری چرخه ای قرار داده شد. در هر دو آزمایش مشخص گردید رفتار غیرارتجاعی اصلی سیستم می تواند در تیر پیوند منحصر گردد. آنها برای همگام سازی توزیع نیروی بزرگ برشی در جان تیر پیوند و جلوگیری از خرابی جوش بین تیر پیوند و تیر طبقه، پیشنهاد دادند لنگر انتهایی بالای تیر پیوند به طور مؤثری به یک طراحی الاستیک با لنگر به میزان $0.5Mp$ محدود گردد. Mohsenian و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر استفاده از سیستم مهاربندی شده واگرا با تیر پیوند قائم به عنوان یک روش برای بهسازی قاب‌های خمشی ویژه با (سیستم تیر ضعیف و ستون قوی) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد سیستم بهسازی پیشنهادی به طرز قابل توجهی میزان شکنندگی سیستم قاب خمشی بهسازی شده را کاهش داده است. تصاویر نتایج این تحقیق در قسمت ادبیات فنی آمده است. Mohsenian و همکاران (۲۰۲۱) قاب خمشی بهسازی شده توسط تیر پیوند قائم را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد سیستم مهاربندی با تیر پیوند قائم بر سطح عملکرد و کاهش تغییر مکان نسبی بین طبقات تأثیر قابل توجهی دارد. مشخص شد استفاده از تیر پیوند قائم در سیستم قاب خمشی می تواند بیشینه دریافت طبقات را تا ۶۰ درصد کاهش دهد در حالی که برش پایه را به میزان ۱۷ درصد بالاتر برده است.

بررسی اجمالی سوابق تحقیق نشان می دهد که موضوع تاثیر زلزله های توالی بر قاب فولادی مجهز به تیر پیوند قائم با فولاد پرمقاومت در مطالعات قبل مد نظر نبوده است. از این رو بررسی عملکرد لرزه ای ترکیبی قاب خمشی فولادی دارای مهاربندی واگرا با تیر پیوند قائم که اعضای آن از فولاد با تنش تسلیم بالاتر از فولاد معمولی ساخته شده (فولاد پر مقاومت)، تحت تاثیر زلزله های چندگانه یا متوالی نوآوری مقاله حاضر است. در واقع شناخت رفتار این سیستم تحت زلزله های چندگانه حوزه نزدیک گسل دارای اثر پالس گونه، و میزان خرابی در سیستم، تحت زلزله اصلی و همچنین لرزه اصلی و پس لرزه به صورت توأم هدف اصلی مقاله می باشد. جهت نیل و رسیدن به این مهم، ابتدا یک سازه ۸ طبقه بصورت سه بعدی و با رعایت کلیه ضوابط طراحی لرزه ای طراحی گردید. آنگاه یک قاب دو بعدی از آن استخراج و بکمک نرم افزار Perform3D در برابر ۲ رکورد واقعی توالی لرزه ای و ۵ رکورد مصنوعی توالی لرزه ای تحلیل شدند. پارمترهای نیاز مهندسی از قبیل تغییر مکان نسبی (بیشینه و ماندگار)، زاویه دروان پلاستیک تیر پیوند، نیروی برشی وارد بر طبقات و اندازه انرژی جذب شده مد نظر قرار گرفته اند. این بازتابها برای دو سطح خطر DBE و MCE بررسی شده اند.

معرفی مدل

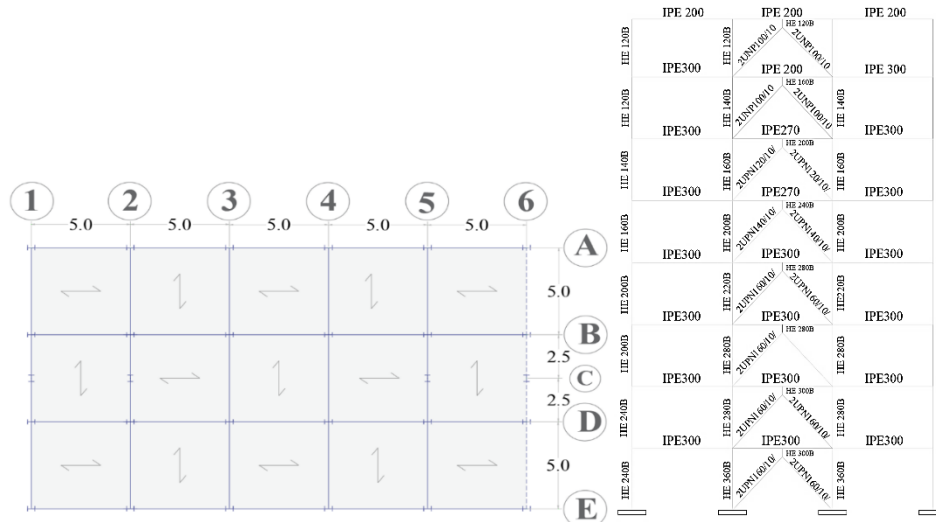
در این مطالعه یک سازه ۸ طبقه بصورت سه بعدی با رعایت کلیه ضوابط طراحی لرزه ای، طراحی شد (شکل ۱). در این راستا ارتفاع طبقات ۳ متر و طبقه آخر ۲/۸ متر در نظر گرفته شده است. تعداد دهانه های سازه در امتد ۳ دهانه در طول ۵ متر و به صورت یکسان پیش بینی شده است که در دهانه های میانی قاب دارای مهاربند واگرا مجهز به تیر پیوند قائم ساخته شده از فولاد پر مقاومت می باشد. طول تیر پیوند به جهت دریافت عملکرد مطلوب تر سیستم، به صورتی که تسلیم برشی رخ دهد (تیر پیوند برشی)، طول کلیه تیرهای پیوند در تمامی قاب ها ۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. برای طراحی تیر پیوند قائم از روابطی که برای پیوند افقی در مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ویراش ۱۴۰۱ آمده است، استفاده شد. در این مقاله با استناد به مقاله (Li et al, 2018) میزان $0/08$ به عنوان حداکثر دوران مجاز تیر پیوند قائم در نظر گرفته شده است. برای طراحی کلیه المان های قاب از فولاد پر مقاومت با تنش تسلیم ۳۴۵ و تنش نهایی ۴۷۰ مگاپاسکال استفاده شد. برای تیرها از مقاطع IPE، برای تیر پیوند و ستون ها از



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



HE و برای مهاربند ها از 2UNP استفاده شده است. جزئیات دقیق از روند طراحی اجزا و المان ها را می توان در مرجع - ملاحظه نمود.



شکل ۱. پلان سازه ۸ طبقه نمای قاب ۶ بهمراه جزئیات مقاطع

در این مقاله جهت تحلیل و طراحی قاب ها از قاب پیرامونی شکل-۱ از محور ۶ جهت مدلسازی به صورت دو بعدی از نرم افزار PERFORM-3D استفاده شده است. همچنین در طراحی مدل ها، ضوابط لرزه ای لازم لحاظ شده است و زاویه دریافت طبقات و دوره تناوب سازه به صورت دستی کنترل شده است.

توالی لرزه ای

در این مقاله از زلزله های نزدیک گسل دارای اثر پالس گونه، جهت اجرای تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. شتابنگاشت ها پس از استخراج از پایگاه اطلاعاتی PEER، و مقیاس بندی طبق روش ذکر شده در آیین نامه ۲۸۰۰ استاندارد ایران و ویرایش چهارم، در اجرای تحلیل ها مورد استفاده قرار داده شدند. متداول ترین روش های استفاده از توالی لرزه ای مصنوعی در تحقیقات، (۱) روش تکراری و (۲) روش تصادفی است و پژوهشگران به صورت همزمان از توالی لرزه ای مصنوعی و طبیعی در تحقیقات خود استفاده می کنند (Ruiz- Garcia et al, 2018)، در این مقاله از هر دو نمونه توالی لرزه ای شامل مصنوعی و طبیعی، از ۵ زلزله متوالی به روش تصادفی (مصنوعی) و ۲ زلزله متوالی طبیعی استفاده شده است. در جدول-۱، شماره و نامگذاری توالی های لرزه ای آمده است. رکوردهای شماره ۱ الی ۵ شامل توالی های مصنوعی ساخته شده به روش تصادفی و توالی های شماره ۶ و ۷ توالی های واقعی یا طبیعی مورد استفاده می باشند. برای آنکه بتوان مقایسه ای بین اثر تک لرزه و توالی لرزه ای داشته باشیم، در کلیه تحلیل ها یکبار صرفا رکورد اول (نامگذاری شده با پسوند A) و بار دیگر توالی لرزه ای (نامگذاری شده با پسوند B) به مدل اعمال شده است. کلیه شتاب نگاشت های مصنوعی و واقعی بروش استاندارد ۲۸۰۰ همپایه شده اند که در شکل ۲ نمایش داده شده است. لازم به یادآوری است که در استاندارد ۲۸۰۰ سطح خطر DBE داده شده است و برای تبدیل آن به MCE با استفاده از توصیه نشریه ۳۶۰ فرض شد که شتاب MCE برابر DBE است.

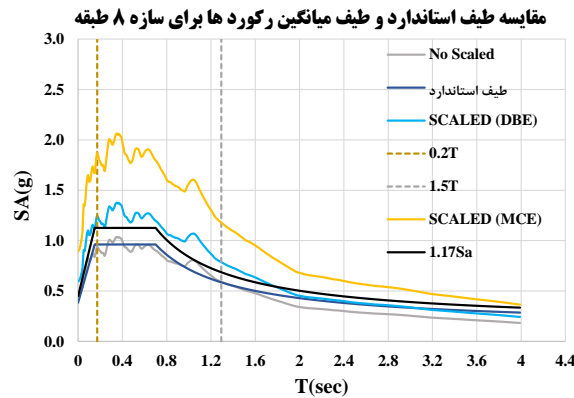


دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



جدول ۱: شماره گذاری و اسامی رکوردهای متوالی (طبیعی و مصنوعی)

ردیف	رکورد	نامگذاری
۱	Imperial Valley 06 - Darfield	Sequence 01
۲	Superstition Hills - Kobe	Sequence 02
۳	Imperial Valley 06 – Loma Prieta	Sequence 03
۴	Coyote Lake - Northridge	Sequence 04
۵	Parkfield - Kocaeli	Sequence 05
۶	Imperial Valley 06 – Imperial Valley 07	Sequence 06
۷	Northridge 01 - Northridge 02	Sequence 07



شکل ۲. مقایسه طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، با طیف میانگین پاسخ شتابنگاشت‌ها

مدل غیرخطی

در این مقاله برای تولید مدل غیرخطی از نرم افزار Perform3D استفاده شده است. نوع تحلیل‌ها تاریخچه زمانی غیرخطی بوده و برای حل معادلات حرکت از روش نیومارک بتا استفاده شده است. در کلیه تحلیل‌ها از میرایی متناسب رایلی با ضریب استهلاک ۵٪ در کلیه مودها استفاده شده است. برای مدل‌سازی تیر پیوند از المان beam استفاده شد. همچنین با توجه به برشی بودن تیر پیوند، یک مفصل برشی در وسط تیر پیوند تعریف گردید (Shayanfar, Rezaeian and Zanganeh 2012). پارامترهای مورد نیاز جهت تعریف مشخصات غیرخطی این مفصل برشی محاسبه و مقادیر a ، b ، c و همچنین مقادیر IO ، LS و CP با استفاده از روابط و حدود موجود در جدول شماره ۳-۵ (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور ۱۳۹۲) استخراج شد. برای مدل‌سازی تیر خمشی از المان Fema Beam استفاده شد. در اینصورت این المان به صورت خودکار مفاصل پلاستیک را برای عضو در نظر خواهد گرفت. برای مدل‌سازی ستون‌ها نیز از المان Fema Column استفاده گردید. برای استخراج پارامترهای غیرخطی ستون، می‌بایست ابتدا نسبت P/P_{CL} ستون‌ها را بدست آورد. در این رابطه، P تقاضای محوری مقطع می‌باشد که از تحلیل استاتیکی خطی بدست می‌آید و P_{CL} ظرفیت محوری کران پایین است که بر اساس رابطه (۱۰.۵) نشریه ۹۲-۳۶۰ برابر با P_n (ظرفیت فشاری اسمی) می‌باشد. این ظرفیت با قرار دادن کران پایین تنش تسلیم بجای F_y و ضریب ϕ برابر ۱ قابل محاسبه است. در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، مهاربند واگرا به همراه تیرها و ستون‌های موجود در دهانه خود، به صورت کنترل شونده توسط نیرو و مدل‌سازی



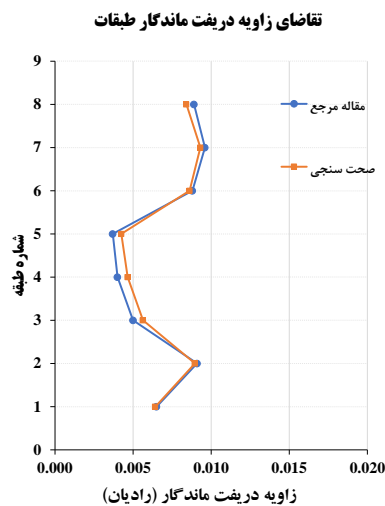
دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



می شود تا نیروها بدون کمانش مهاربندها به تیر پیوند منتقل شوند و تیر پیوند با کمانش مهاربند از بین نرود. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، خصوصیات غیرخطی المان ها می بایست از نتایج آزمایشگاهی تعیین شوند. در این مقاله نیز، با استفاده از اطلاعات مندرج در نشریه ۹۲-۳۶۰، به مدلسازی مهاربندهای برون محور صورت پذیرفت. در این قسمت پارامترهای مدلسازی به دو دسته فشاری و کششی تقسیم می گردند (توکلی و مرادی ۱۳۹۸).

صحت سنجی

به منظور اطمینان از صحت و دقت مدلسازی مدل غیرخطی، از مطالعه Vetr و Ghamari (۲۰۱۹) استفاده شد. در شکل ۳ مقایسه زاویه دررفت ماندگار بین مقاله مرجع و مدل عددی مقاله حاضر نمایش داده شده است. بررسی شکل ۳ نشان می دهد که نتیجه بدست آمده از مدل سازی قاب مورد نظر در نرم افزار PERFORM-3D از حیث شکل و دقت به نتیجه مقاله مرجع بسیار نزدیک می باشد.



شکل ۳. مقایسه مقادیر بدست آمده از صحت سنجی با مقاله Vetr و Ghamari (۲۰۱۹)

بحث و بررسی

بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات (IDR_{max})

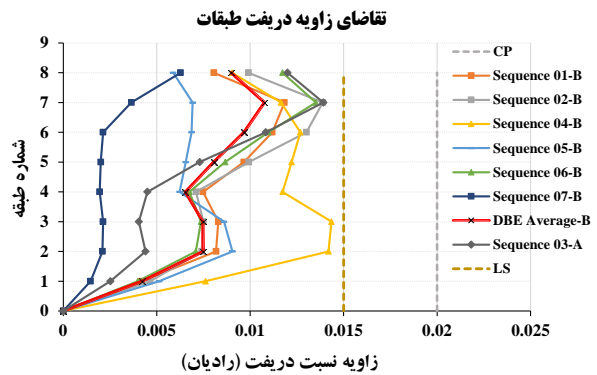
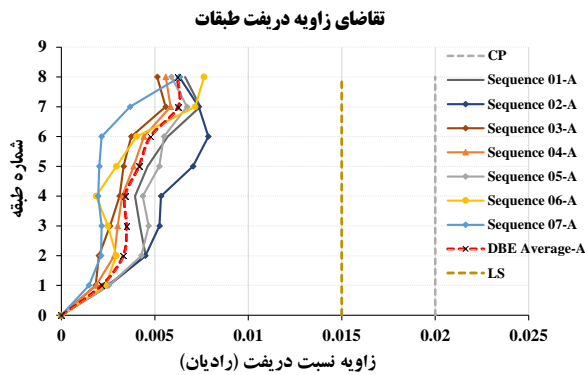
یکی از پارامترهای تقاضای مهندسی که در همه آیین نامه های لرزه ای مد نظر قرار می گیرد، بیشینه دررفت گذرای بین طبقه ای است که معمولاً در سطح LS و برای زلزله DBE بسته به تعداد طبقات سازه به ۰/۰۲۵ یا ۰/۰۲ ارتفاع طبقه محدود می شود. در این مطالعه با استفاده از جدول CI-3 دستورالعمل FEMA356 مقادیر دررفت گذرای متناظر با سطح عملکرد CP و LS برای قاب مهاربندی و اگر به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۱۵ انتخاب شده اند. این پارامتر در دو حالت زلزله تک و توالی لرزه ای و در دو سطح خطر DBE و MCE در شکل ۴ بررسی شده است. مطابق شکل الف-۴ و در حالت زلزله تک (Sequence A) در سطح DBE اندازه دررفت در طبقات پنجم تا هفتم بیشترین مقدار را دارد که البته تا سطح LS بسیار فاصله دارد. پس از ورود زلزله دوم



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران

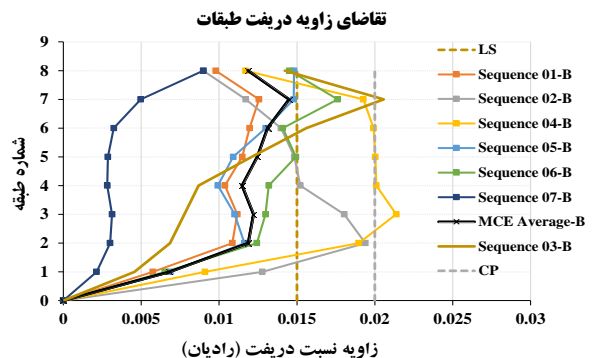
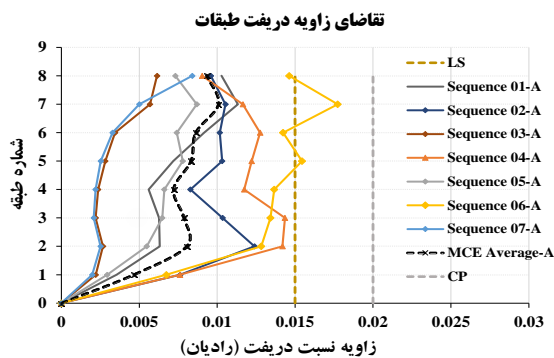


(Sequence B)، در شکل ب-۴ در طبقات دوم تا هفتم افزایش دررفت دیده می شود. در برخی از توالی های لرزه ای مصنوعی (توالی ۲ تا ۴ جدول ۱) و توالی طبیعی (توالی ۶ جدول ۱)، دررفت به سطح عملکرد LS بسیار نزدیک شده است، ولی همچنان بیشینه میانگین توالی ها کمی بیشتر از ۰/۰۱ می باشد، که در محدوده ایمن از LS قرار می گیرد. بنابراین توالی لرزه ای در سطح DBE متوسط بیشینه دررفت را افزایش داده اما همچنان سطح عملکرد LS تامین شده است. در شکل ج-۴ و در سطح خطر MCE، زلزله منفرد (Sequence A) توانسته است به تنهایی در برخی موارد سازه را به LS نزدیک نماید و در زلزله طبیعی (توالی ۶ جدول ۱) عبور از این سطح مشاهده می گردد. اما همچنان متوسط بیشینه تک رویدادها سطح عملکرد LS را تامین کرده است. پس از اعمال زلزله دوم و در سطح خطر MCE، برخی توالی ها (مثلا توالی ۴) سطح CP را لمس کرده اند اما همچنان متوسط IDR_{max} کمتر از سطح عملکرد CP است.



(الف) زلزله منفرد-DBE

(ب) توالی لرزه ای-DBE



(ج) زلزله منفرد-MCE

(د) توالی لرزه ای-MCE

شکل ۴. زاویه دررفت برای دو سطح خطر MCE و DBE متناظر با زلزله های منفرد و توالی لرزه ای سازه S8VEBF-H

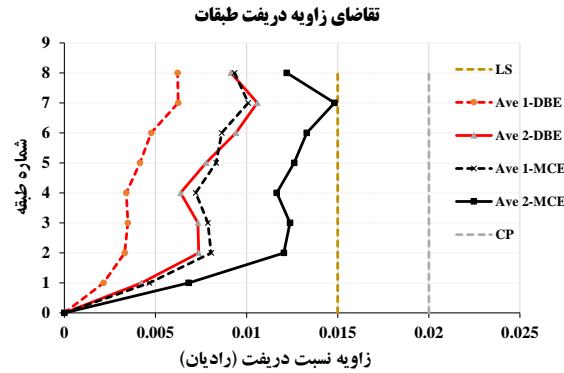
برای مقایسه دقیق تر، متوسط زاویه دررفت گذرا در دو سطح DBE و MCE و در دو حالت تک لرزه (Ave 1) و توالی (Ave 2) در شکل ۵ نمایش داده شده است. بررسی شکل ۵ نشان می دهد که در سطح DBE، متوسط IDR_{max} حاصل از توالی نسبت به



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



تک زلزله به ۶۹ درصد افزایش داشته است در حالی که این افزایش برای MCE، ۴۷ درصد برآورد گردید. ضمن آنکه همچنان در هر دو حالت سطوح عملکرد LS و CP تامین شده اند.

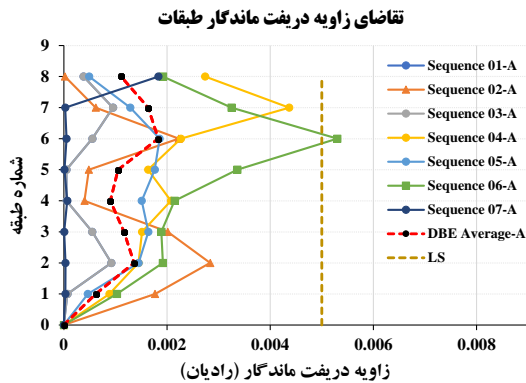


شکل ۵. مقایسه متوسط نسبت زاویه دررفت در دو سطح خطر MCE و DBE برای حالت زلزله منفرد و توالی لرزه‌ای سازه

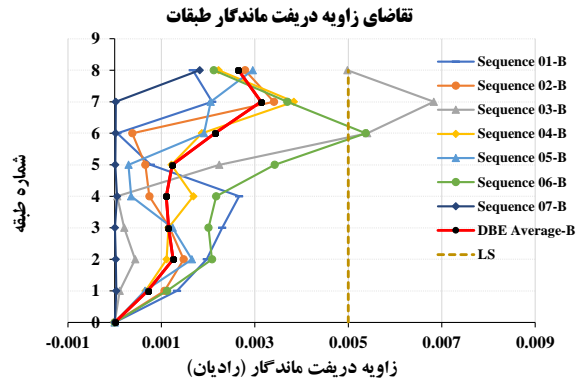
زاویه دررفت ماندگار (RIDR)

زاویه دررفت ماندگار یکی دیگر از شاخص‌هایی است که ارزیابی سطح خسارت وارد بر سازه مد نظر قرار می‌گیرد. در این مطالعه با استفاده از جدول C1-3 دستورالعمل FEMA356 مقادیر دررفت ماندگار متناظر با سطح عملکرد LS ۰/۰۰۵ انتخاب شد. در حالت تک لرزه (Sequence A) و در سطح عملکرد DBE به غیر از دو زلزله (Imperial Vally 06/Coyote Lake) در طبقه ۶ و ۷ و (Superstition hills) در طبقه ۲، دررفت ماندگار در مابقی زلزله‌ها زیر ۰/۰۰۲ است (شکل الف-۶). در شکل ب-۶، مشاهده شد با ورود زلزله دوم در سطح DBE در توالی مصنوعی ۳ و ۶ سازه از سطح LS عبور کرده است اما میانگین RIDR همچنان در سطح عملکرد LS قرار دارد.

با ورود تک زلزله‌ها به سازه در سطح خطر MCE در شکل ج-۶ نتایج نشان می‌دهد رکوردها تغییر چشمگیری نداشته و به میزان کمی نسبت به تک زلزله‌ها در سطح خطر DBE افزایش دررفت ماندگار رخ داده است. در شکل د-۶ مشاهده شد به مانند سطح DBE در MCE دو توالی مصنوعی (توالی ۳ و ۴ جدول ۱) سازه را از LS عبور داده اند.



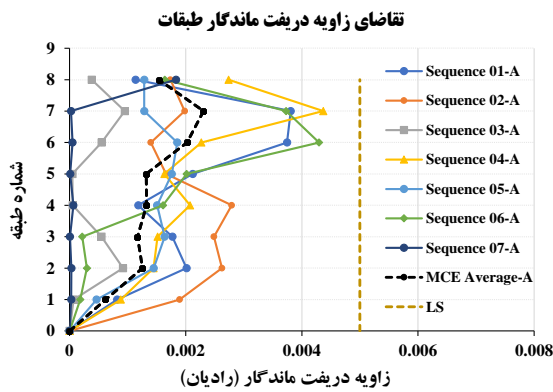
الف) زلزله منفرد - DBE



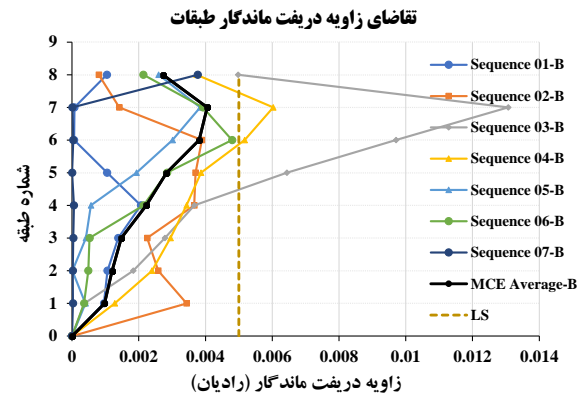
ب) توالی لرزه‌ای - DBE



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



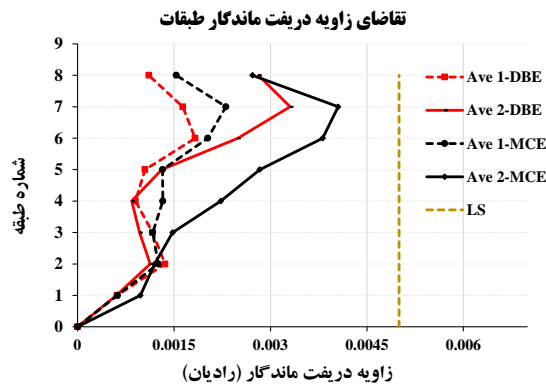
(ج) زلزله منفرد - MCE



(د) توالی لرزه ای - MCE

شکل ۶: توزیع RIDR در دو سطح خطر MCE و DBE متناظر با زلزله‌های منفرد و توالی لرزه‌ای

برای مقایسه دقیق تر، RIDR در دو سطح MCE و DBE و در دو حالت تک لرزه (Ave 1) و توالی (Ave 2) در شکل ۷ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۷، RIDR در سطح خطر MCE نسبت به DBE در طبقات بالاتر افزایش یافته است (بدلیل افزایش درجه غیرخطی شدن سازه). همچنین متوسط RIDR در زلزله های متوالی نسبت به زلزله های تک در سطح DBE ۸۰ درصد و در سطح خطر MCE ۷۵ درصد افزایش یافته است. ضمن آنکه همچنان در هر دو حالت سطح عملکرد LS تامین شده اند.



شکل ۷: مقایسه متوسط RIDR در دو سطح خطر MCE و DBE برای زلزله منفرد و توالی لرزه‌ای

زاویه دوران تیر پیوند

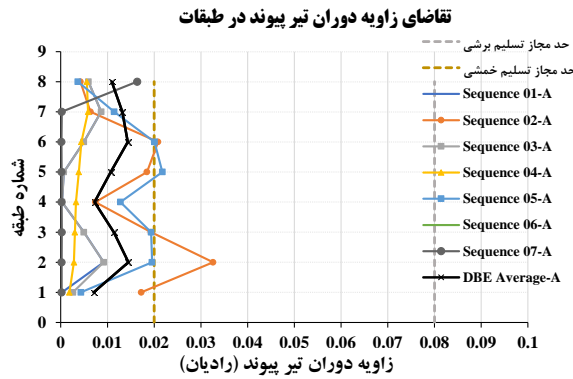
در تیر پیوند با رفتار برشی و خمشی، بیشینه دوران پلاستیک تیر پیوند (γ_p) به ترتیب به ۰/۰۸ رادیان و ۰/۰۲ رادیان محدود می شود (مبحث ۱۰، ۱۴۰۱). در ادامه این پارامتر برای سازه در دو سطح خطر DBE و MCE و دو حالت تک لرزه و توالی بررسی و ارزیابی شده است. بررسی شکل الف-۸ در سطح خطر DBE و برای تک لرزه نشان می دهد عمدتاً نیاز γ_p تیر پیوند ۰/۰۲ و کمتر از آن برآورده شده و متوسط آن همواره کمتر از ۰/۰۲ رادیان است. در حالت توالی لرزه ای و براساس شکل ب-۸ مشخص شد شرایط سازه نسبت به تک زلزله متفاوت و مقادیر نیاز γ_p تقریباً در تمام زلزله ها از حد مجاز تسلیم خمشی رد شده و توالی لرزه ای مصنوعی ۴ نیز در طبقات دوم و سوم این مقدار از حد مجاز تسلیم برشی نیز عبور کرده است اگر همچنان متوسط γ_p از ۰/۰۸



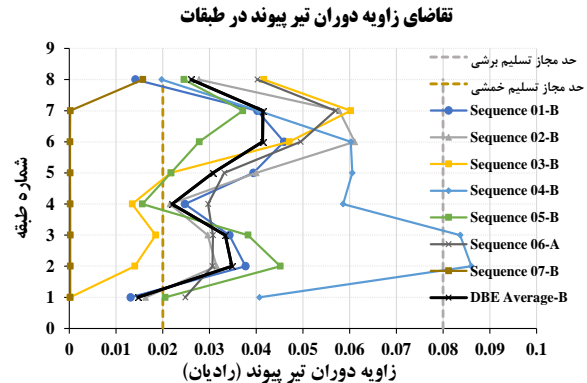
دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



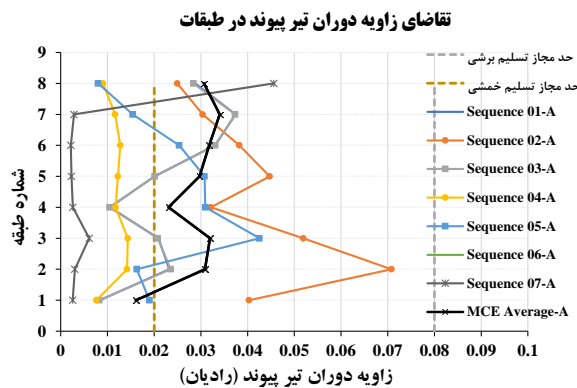
کمتر است. شکل ج-۸ نشان داد در تک لرزه و در سطح MCE زاویه دوران تیر پیوند برای اکثر زلزله ها بر خلاف سطح خطر DBE از حد مجاز تسلیم خمشی عبور کرده است (هم هریک از زلزله ها و هم متوسط نتایج). با اعمال توالی در سطح MCE، مطابق شکل د-۸، مشاهده شد برخی توالی ها توانسته اند دوران مجاز برشی را پشت سر بگذرانند ضمن آنکه متوسط γ_p کمتر از ۰/۰۸ قرار دارد.



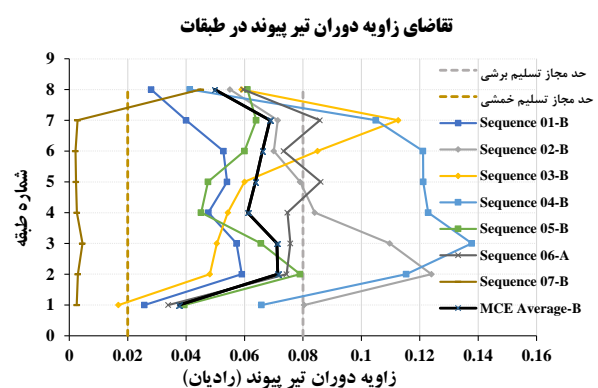
DBE (الف) زلزله منفرد - DBE



DBE (ب) توالی لرزه‌ای - DBE



DBE (ج) زلزله منفرد - DBE



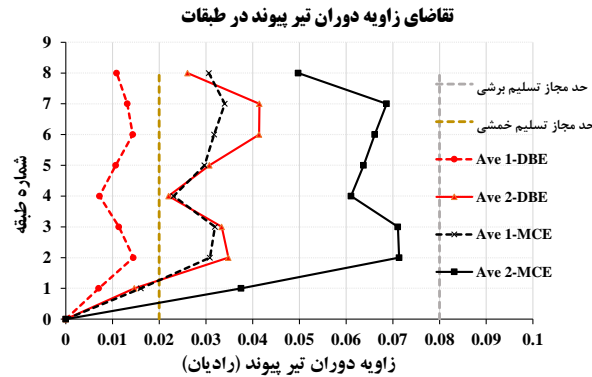
DBE (د) توالی لرزه‌ای - DBE

شکل ۸: زاویه دوران تیر پیوند برای دو سطح خطر MCE و DBE متناظر با زلزله‌های منفرد و توالی لرزه‌ای

از آنجای که طول تیر پیوند در این مطالعه به گونه ای انتخاب شده تا رفتار آن برشی باشد، در شکل ۹ متوسط زاویه دوران پلاستیک تیر پیوند برای دو سطح DBE و MCE و در دو حالت تک لرزه (Ave 1) و توالی (Ave 2) نمایش داده شده است. بررسی این تصویر نشان می دهد میانگین γ_p تیر پیوند برای قاب مورد مطالعه و سطوح خطر DBE و MCE در دو حالت تک و توالی لرزه ای در محدوده مجاز (کمتر از ۰/۰۸ رادیان) قرار دارد. علاوه بر آن در سطح خطر DBE توالی لرزه ای توانسته اند به طور میانگین ۱۸۸ درصد زاویه دوران بیشینه در سازه را نسبت به تک لرزه افزایش دهند که این رقم در سطح خطر MCE ۱۰۹ درصد محاسبه شده است..



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران

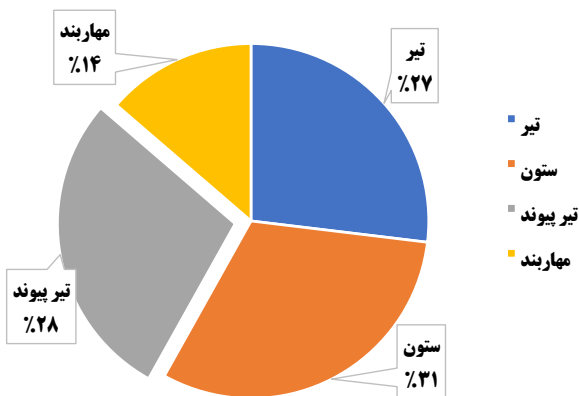


شکل ۹: مقایسه متوسط زاویه دوران تیر پیوند در دو سطح خطر DBE و MCE برای حالت زلزله منفرد و توالی لرزه‌ای

سهم اعضا از جذب انرژی

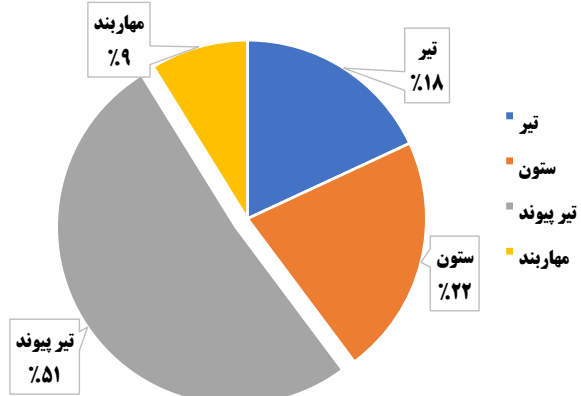
از منظر انرژی جذب شده توسط هر یک از المان‌های باربرجانبی این انتظار وجود دارد که بیشترین جذب انرژی در المان پیوند صورت پذیرد. برای بررسی این موضوع در این مرحله انرژی مستهلک شده در اعضاء از نوع ویسکوز، به صورت نمودارهای دایره ای قرار در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. هدف از این بخش تأثیر توالی لرزه ای در توزیع انرژی دریافتی در هر عضو و در هر سطح خطر می باشد. بررسی شکل ۱۰-الف و ب نشان می دهد، در هر دو حالت تک و توالی لرزه ای و در سطح خطر MCE بیشترین سهم انرژی مستهلک شده مربوط به تیر پیوند است. ضمناً سهم انرژی جذب شده تیر پیوند در حالت توالی حدوداً ۲ برابر تک لرزه است و در نتیجه از سهم ستون کم شده است. بطور مشابه و در سطح MCE نیز سهم تیر پیوند در هر دو حالت تک و توالی نسبت به بقیه المان‌ها بیشتر است. در حال توالی لرزه ای و سطح MCE، ۶۹٪ انرژی مستهلک شده از آن تیرپیوند است که حدوداً ۱/۴ برابر مقدار متناظر در تک لرزه است. ضمناً در کلیه حالت کمترین سطح استهلاک انرژی به مهاربند تعلق دارد.

توزیع انرژی زلزله در اعضاء



الف) زلزله منفرد-DBE

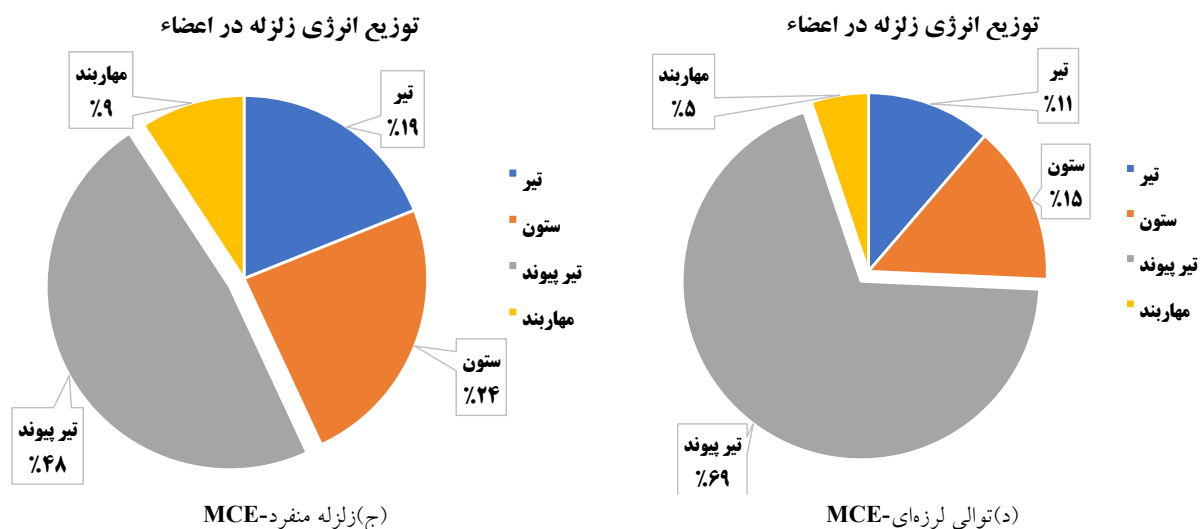
توزیع انرژی زلزله در اعضاء



ب) توالی لرزه‌ای-DBE



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۱۰: سهم انرژی جذب شده اعضا برای دو سطح خطر MCE و DBE متناظر با زلزله‌های منفرد و توالی لرزه‌ای

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله اثر توالی لرزه ای زلزله های حوزه نزدیک گسل بر قاب مهاربندی شده برون محور با تیر پیوند قائم، ساخته شده از فولاد پر مقاومت ارزیابی گردید. قاب مورد نظر یک قاب سه دهانه است بعنوان نماینده قابهای امتداد Y یک سازه ۸ طبقه سه بعدی انتخاب شده است. بدین منظور سازه ۸ طبقه براساس آخرین ویرایش مبحث ۱۰ و با رعایت کلیه ضوابط طراحی لرزه ای، بر مبنای رفتار برشی طراحی گردید. در ادامه قاب مورد نظر در برابر ۷ توالی لرزه ای شامل ۲ مورد از زلزله های متوالی (طبیعی) و ۵ زلزله متوالی ساخته شده به روش تصادفی (مصنوعی) پس از همپایه سازی به روش آیین نامه ای استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد که از همواره بیشینه زاویه دررفت طبقات حاصل از توالی لرزه ای در دو سطح خطر DBE و MCE از تک لرزه بزرگتر می باشد. اما متوسط IRDmax در اثر توالی لرزه ای ها در دو سطح خطر مورد نظر سطح عملکرد LS و CP را تامین کرده اند. از نظر زاویه دررفت ماندگاز نیز همواره اثر توالی لرزه ای مضاعف کننده بوده و بیشینه این پارامتر در سطح خطر MCE بزرگتر از DBE است اما در این حالت نیز معیار LS تامین شده است. مطالعه زاویه دوران پلاستیک در دو حالت تک و توالی نشان داد که توالی می تواند متوسط زاویه دوران پلاستیک را بشدت افزایش دهد اما این افزایش همواره کمتر از حداکثر زاویه دوران مجاز تیرپیوند با رفتار برشی (۰/۰۸) برآورد گردید. از حیث انرژی مستهلک شده نیز بیشترین سهم مربوط به تیرپیوند قائم و کمترین سهم به مهاربند تعلق دارد. ضمناً انرژی مستهلک شده در توالی لرزه ای در تیر پیوند بیشتر از تک لرزه بوده و با تغییر سطح خطر از DBE به MCE مشارکت تیر پیوند در استهلاک انرژی ورودی به مراتب افزایش می یابد. بنابراین تیرپیوند قائم بعنوان یک المان شکلپذیر می تواند نقش قابل توجهی در جذب و استهلاک انرژی داشته و تحت اثر تک و توالی لرزه ای و در هر دو سطح خطر انتخابی توانسته است سطوح عملکرد LS و CP را تامین نماید.



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



منابع

- ۱- محمدی جلودار، سید محمدعلی. ۱۳۹۴. «ارزیابی تاثیر پس لرزه به همراه زلزله سی اصلی بر روی رفتار قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط.» پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان.
- ۲- قدرتی امیری، غلامرضا، حامد رجایی لک، و الهام رجبی. ۱۳۹۷. «اثر توالی لرزه ای بر پاسخ افزایش یافته قاب های بتن آرمه با و بدون دیوار برشی» نشریه مهندسی عمران امیرکبیر (۴): ۸۴۵-۸۵۴.
- ۳- کرک آبادی، علیرضا، محمدایمان خداکریمی، و مصطفی فرجیان. ۱۴۰۰. «بررسی رفتار لرزه ای قاب فولادی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه تحت زلزله های متوالی.» مهندسی سازه و ساخت ۸(۴)، ۶۶-۸۶.
- ۴- وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان. ۱۴۰۱. طرح و اجرای ساختمان های فولادی (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان). تهران. توسعه نشر ایران.
- ۵- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۲. «نشریه ۳۶۰- دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود». سازمان برنامه و بودجه.
- ۶- توکلی، حمیدرضا، و مجید مرادی. ۱۳۹۸. «مدلسازی و تحلیل غیرخطی با استفاده از نرم افزار PERFORM-3D» تهران. فدک ایساتیس.
- 7-Farivarrad, A H, H E Estekanchi. 2022. "Seismic Performance Assessment of SMRF Structures Subjected to Mainshock-Aftershock Seismic Sequences by Endurance Time Method" Journal of Earthquake Engineering, 26(7): 3281-3299.
- 8-Ziane, L, D, Kerdal. and A, Seghir. 2019. "Effect of Combined Vertical and Horizontal Shear Links on Nonlinear Behavior of Eccentrically Braced Frames." Asian Journal of Civil Engineering, 20(3): 421-43
- 9-Vetr, M. A, Ghamari. 2019. "Experimentally and Analytically Study on Eccentrically Braced Frame with Vertical Shear Links." The Structural Design of Tall and Special Buildings 28.(۵)
- 10-Mohsenian, V. R, Filizadeh. I, Hajirasouliha. And R, Garcia 2021. "Seismic Performance Assessment of Eccentrically Braced Steel Frames with Energy-Absorbing Links under Sequential Earthquakes" Journal of Building Engineering 33(2021): 101576.
- 11-Mohsenian, V. R, Filizadeh. Z, Ozdemir. And I, Hajirasouliha 2020. "Seismic Performance Evaluation of Deficient Steel Moment-Resisting Frames Retrofitted by Vertical Link Elements" Paper presented at the Structures 26: 724-736.
- 12-FEMA 356. 2000. Federal Emergency Management Agency. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, DC. 2000.