



بررسی اثر دیوار پرکننده بر رفتار ساختمان های با سیستم مهاربند برون محور در زلزله سرپل ذهاب با استفاده از تحلیل غیرخطی

محمدرضا تابش پور^{۱*}، آزاده نوری فرد^۲

۱-دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲-دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

کلمات کلیدی:

مهاربند برون محور

دیوار پرکننده

زلزله سرپل ذهاب

تحلیل غیرخطی

تیر پیوند

خلاصه: مهم‌ترین هدف در طراحی سیستم مهاربند برون محور این است که در زمان زلزله، تنها تیر پیوند جاری شده و سایر اعضا در حالت الاستیک باقی بمانند. در زلزله سرپل ذهاب مشاهده گردید علی‌رغم اینکه قاب‌های دارای مهاربند برون محور طراحی نشده و اشکالات اجرایی زیادی دارند ولی به دلیل آثار مثبت دیوارهای پرکننده سازه پایداری خود را حفظ کرده است. در این پژوهش یکی از ساختمان‌های آسیب دیده در زلزله سرپل ذهاب به صورت یک قاب سه طبقه چهار دهانه، با و بدون دیوار پرکننده تحلیل شده است. در حالتی که دیوار پرکننده به سازه متصل نیست، سه حالت؛ طراحی مهاربند و تیر پیوند طبق آیین نامه، تنها طراحی تیر پیوند طبق آیین نامه و طراحی هیچ یک از مهاربند و تیر پیوند بر اساس آیین نامه مورد بررسی قرار گرفته است و در حالتی که دیوار پرکننده به سازه متصل است، وضعیت سازه موجود که در آن ضوابط آیین نامه در هیچ یک از اعضای مهاربند و تیر پیوند رعایت نگردیده است مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نمودار پوش‌آور هر چهار حالت می‌توان نتیجه گرفت که اتصال دیوار به سازه باعث افزایش شدید سختی، مقاومت و جذب انرژی شده و تا حد زیادی اشکالات مربوط به ضعیف بودن تیر پیوند و مهاربند را جبران کرده است. در این شرایط اگر دیوار پرکننده وجود نمی‌داشت، رفتار لرزه‌ای سازه بحرانی‌تر می‌شد و حتی احتمال فروریزش سازه وجود می‌داشت.

۱- مقدمه

قاب مهاربند برون محور در اواسط دهه ۷۰ میلادی، توسط Roeder و Popov در دانشگاه کالیفرنیا پیشنهاد گردیده است [۱]. اساسی‌ترین و مهم‌ترین مفهوم در طراحی این سیستم در مقابل زلزله این است که جاری شدن و خسارت سازه‌ای باید به طور کلی در تیر رابط محدود شود و سایر اعضا در محدوده الاستیک باقی بمانند [۲ و ۳]، همواره تناسب میان پارامترهای سختی و شکل‌پذیری، دغدغه اصلی مهندسیین طراح بوده است. قاب‌های خمشی، شکل‌پذیری زیاد و سختی کمی دارند در حالی که قاب‌های مهاربندی شده هم محور، سختی زیاد و شکل‌پذیری اندکی دارند. قاب‌های مهاربندی شده برون محور از لحاظ سختی و شکل‌پذیری در حالتی بینابینی قرار داشته، سختی آن‌ها از قاب خمشی و شکل‌پذیری‌شان از سیستم مهاربند هم محور بیشتر است [۴-۶].

برخلاف سیستم دارای مهاربند هم محور، بر هم کنش سیستم دارای مهاربند برون محور با دیوار پرکننده بسیار مهم است. زیرا در صورت وجود

دستک معادل دیوار، توزیع و انتقال نیروی جانبی به صورت محوری، عملکرد برشی تیر رابط را کم‌رنگ می‌کند. در چنین سیستمی کلاً دیوار باید از قاب جدا شود [۷]. اگر چه مطالعات گسترده‌ای در خصوص مهاربند برون محور و دیوار پرکننده انجام شده است ولی مطالعه مهاربندی برون محور با دیوار پرکننده اندک است. Daryan و همکاران در سال ۲۰۰۹، اثر دیوار پرکننده بر روی رفتار قاب مهاربندی شده برون محور را با استفاده از روش المان محدود explicit مطالعه کردند. در این تحقیق به دلیل پیچیدگی مشخصات مکانیکی و هندسی دیوار آجری و اندرکنش بین دیوار و قاب فولادی، مدل‌های اولیه ساخته شد و مساله از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حل شد. سه مدل اولیه شامل دیوار آجری بدون قاب با مهاربند برون محور، قاب با مهاربند برون محور بدون دیوار پرکننده و نهایتاً قاب پر شده با مهاربند برون محور بود. پس از تایید مدل المان محدود، اثر دیوار پرکننده روی مهاربند برون محور مطالعه شد. این بررسی نشان داد وجود دیوار پرکننده به صورت کلی، مقاومت تسلیم و محدوده الاستیک را در منحنی نیرو-جابجه جایی افزایش می‌دهد ولی رفتار پلاستیک قاب به دلیل

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tabeshpour@sharif.edu



شده انجام شده است، تحقیقات مرتبط با مطالعه حاضر در دو بخش مهاربند برون محور و تحلیل غیرخطی دیوار پرکننده مرور شده است. **Ghobarah** و **Ramadan** در پژوهشی در سال ۱۹۹۰، اثر نیروی محوری در عملکرد تیر پیوند در مهاربند برون محور را مطالعه کردند. در این مطالعه رفتار تیر پیوند پس از مرحله الاستیک و عملکرد آن تا شکست با استفاده از مدل المان محدود تحت بار چرخه‌ای بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی گردیده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد زمانی که تیر پیوند تحت نیروی محوری قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری آن بدتر می‌شود. این اثر منفی نیروی محوری برای تیر پیوندی که طول آن نزدیک به طول تیر برشی بحرانی است، بیشتر است [۱۲]. در سال ۲۰۱۲، **Clifton** و همکاران خلاصه‌ای از عملکرد ساختمان‌های دارای مهاربند برون محور در زلزله‌های کرایسچرچ سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ را بررسی کردند. این سری زلزله‌ها اولین حادثه در سطح جهان بود که مهاربندهای برون محور جدید را در محدوده غیرالاستیک قرار داده و ساختمان‌های مهاربند برون محور از ۳ تا ۲۲ طبقه را تحت تاثیر قرار داده است. پاسخ این ساختمان‌ها عموماً بهتر از حد انتظار بوده است [۱۳]. در سال ۲۰۱۲، **Daneshmand** و **Hash-emi** برای مطالعه عملکرد تیر پیوند با طول متوسط و بلند در مهاربند برون محور، ۶۸ تیر پیوند را با روش المان محدود مدل‌سازی کردند. در این تحقیق پیشنهاداتی برای طراحی این نوع تیر پیوند ارائه گردیده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد نسبت لاغری جان و مشخصات سخت‌کننده‌ها پارامترهای مهمی هستند که روی عملکرد تیر پیوند متوسط اثر دارند [۱۴]. **Azad** و **Topkaya** در یک مقاله مروری در سال ۲۰۱۷، تحقیقات مربوط به مهاربند برون محور فولادی را هم در سطح پاسخ اجزا و هم در سطح پاسخ سیستم بررسی کرده‌اند. در سطح پاسخ اجزا، تیر پیوند به عنوان منبع اولیه جذب انرژی در سیستم مهاربند برون محور، نتایج آزمایشگاهی و عددی روی مقاومت، ظرفیت دوران و فرامقاومت تیر پیوند و همچنین اثر نیروی محوری، وجود دال بتنی، جزییات تیر پیوند و اثر مهاربند روی تیر پیوند ارائه گردیده است. در سطح پاسخ سیستم، ویژگی‌های سیستم مهاربند برون محور و مطالعات عددی روی عملکرد لرزه‌ای **EBF** بحث شده است [۲].

در ادامه مرور مختصری بر روی تحقیقاتی که بر روی رفتار غیرخطی دیوار پرکننده با مدل دستک معادل انجام شده، صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۸، **Rodrigues** و همکاران در پژوهشی با استفاده از تحلیل غیرخطی از طریق مدل‌سازی ماکروی دیوار پرکننده رفتار کلی ساختمان‌های با سبک معماری مدرن لیسبون را تحت بار چرخه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در این

رفتار شکننده مصالح بنایی بدتر می‌شود و کل سیستم یک افت مقاومت قابل توجهی را بعد از محدوده خطی خواهد داشت [۸]. تابش پور و نوری فرد در پژوهشی در سال ۲۰۲۰، بر اساس بررسی‌های میدانی ساختمان‌های آسیب دیده در زلزله سرپیل ذهاب مشاهده کردند علی‌رغم اینکه قاب‌های دارای مهاربند برون محور طراحی نشده و اشکالات اجرایی زیادی دارند، سازه‌ها پایداری خود را حفظ کرده است. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی یکی از ساختمان‌های آسیب دیده در زلزله سرپیل ذهاب، رفتار سازه در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده مطالعه شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد وجود دستک قطری دیوار پرکننده موجب کاهش نیروی محوری مهاربندها و کاهش نیروی برشی و لنگر خمشی تیر پیوند می‌شود. دیوار پرکننده همچنین موجب کاهش تغییر مکان، افزایش سختی و کاهش پیوند قاب با مهاربند برون محور می‌گردد. لذا در چنین شرایطی که اشکالات متعددی در طراحی و اجرای تیر پیوند و مهاربند وجود دارد، اتصال دیوار پرکننده به سازه در حفظ پایداری قاب با مهاربندهای برون محور در زلزله سرپیل ذهاب نقش مهمی را ایفا کرده است [۹]. **Khan** و **Rawat** در سال ۲۰۱۶، در تحقیقی از مهاربند برون محور برای کاهش اثر طبقه نرم در قاب بتنی دارای دیوار پرکننده استفاده کردند. در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای مهاربند برون محور برای یک ساختمان هفت طبقه با استفاده از تحلیل پوش‌آور استاتیکی غیرخطی بررسی گردیده است. مطالعه پارامترها شامل شکل مهاربند برون محور، سطح مقطع، میزان خروج از مرکزیت جهت کاهش تقاضای تغییر مکان و احتمال شکست بوده است [۱۰].

در کنار پژوهش‌های اندکی که اثر دیوار پرکننده بر سیستم مهاربند برون محور را مطالعه کرده‌اند، برخی محققین به بررسی تاثیر دیوار پرکننده بر مهاربند هم محور پرداخته‌اند. **Jazany** و همکاران در سال ۲۰۱۳ با مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی، اثر دیوار پرکننده را بر رفتار لرزه‌ای قاب مهاربند هم محور ویژه مطالعه کردند. در این مطالعه سه نمونه شامل قاب دارای مهاربند برون محور با و بدون دیوار پرکننده و یک قاب خمشی دارای دیوار پرکننده تحت نیروی چرخه‌ای آزمایش شدند و به صورت المان محدود تحلیل گردیدند. نتایج این تحقیق نشان داده است وجود دیوار پرکننده، سختی جانبی و ظرفیت باربری سیستم مهاربند هم محور ویژه را افزایش می‌دهد، هر چند بر هم کنش قاب و دیوار موجب افزایش کرنش نیاز و پتانسیل شکست اتصالات می‌شود. نتایج این تحقیق به خوبی با خسارات زلزله بم قابل مقایسه است [۱۱].

در ادامه به دلیل تحقیقات اندکی که روی مهاربند برون محور با دیوار پر

مسلح تحلیل پوش آور شده که نشان می‌دهد دریافت غیر الاستیک ساختمان بهتر شده است [۱۹]. Martinelli و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک روش ساده بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای قاب بتن مسلح پر شده با دیوار آجری پیشنهاد کردند. این روش بر اساس دو تحلیل پوش آور است که بر روی قاب خالی و قاب پر شده انجام می‌شود و یک پارامتر بدون بعد برای مشارکت واقعی دیوار پرکننده در پاسخ جانبی قاب بتن مسلح تعیین می‌شود. این پارامتر برای کاهش تقاضای جابه جایی تعیین شده روی قاب خالی به کار می‌رود و نقطه عملکرد را روی منحنی پوش آور قاب پر شده تعیین می‌کند. در این پژوهش برای مدل‌سازی پاسخ غیرخطی دیوار پرکننده از مدل دستک معادل استفاده شده است [۲۰].

بر اساس بازدیدهای میدانی صورت گرفته پس از زلزله سرپل ذهاب مشاهده شده است علی‌رغم نواقص متعدد در سازه‌های مهاربند برون محور، پایداری سازه حفظ شده است. برخی از این اشکالات به شرح زیر می‌باشد [۲۱]:

۱- استفاده از تیر لانه زنبوری در دهانه مهاربند برون محور

۲- عدم اجرای سخت کننده در تیر پیوند

۳- نداشتن مهار جانبی در بال فشاری تیر

۴- طول زیاد تیر پیوند

۵- کماتش جانبی مهاربند به دلیل عدم کفایت مقطع

۶- اتصال دیوار به سازه مهاربند برون محور

متأسفانه هر چند در آموزش‌های مهندسی، تا حد ممکن ملاحظات و نکات مربوط به طراحی مهاربند برون محور تدریس می‌شود ولی به دلیل عدم آگاهی کافی در جامعه مهندسان مشاور از رفتار دیوارهای پرکننده و لحاظ نکردن آن‌ها در طراحی و عدم توجه به نکات اجرایی، همواره در زلزله‌ها، مودهای شکستی دیده می‌شود که بدون مدل‌سازی هر چند بسیار ساده ساختمان در حیطه غیرخطی نمی‌توان بازخوانی و قرائت خوبی از رفتار لرزه‌ای سازه داشت. با وجود این که این موضوع، فراوان و پرتکرار است لکن مطالعات بسیار کمی در این خصوص در ادبیات مهندسی وجود دارد. نوآوری پژوهش حاضر، در ارائه هشدار و آموزش تحلیل ساده مسائل پرتکرار ساختمان است. بر این اساس هدف از این تحقیق، مطالعه عددی یک نمونه از ساختمان‌های دارای سیستم مهاربند برون محور در زلزله سرپل ذهاب می‌باشد. به این منظور یک قاب سه طبقه چهار دهانه از ساختمان انتخاب شده در شرایط قاب خالی و قاب پر شده به صورت خطی و غیرخطی تحلیل گردیده است.

تحقیق رفتار خمشی غیرخطی اعضای باریک بتن مسلح و اثر دیوارهای پرکننده در پاسخ لرزه‌ای کلی ساختمان به صورت عددی مدل‌سازی شده است [۱۵]. ایشان در سال ۲۰۱۰، یک مدل عددی اصلاح شده برای مدل‌سازی رفتار دیوار پرکننده در برابر نیروی زلزله پیشنهاد کردند. این مدل ارتقا یافته به صورت دستک فشاری دو قطری معادل است که به صورت معمول برای رفتار غیرخطی دیوار در برابر نیروهای چرخه‌ای به کار می‌رود. نتایج اصلی با دو سری آزمایش؛ یک مورد قاب یک طبقه یک دهانه و یک مورد قاب چهار طبقه سه دهانه کالیبره گردیده است [۱۶]. در سال ۲۰۱۲، Torrisi و همکاران یک مدل خلاقانه برای تحلیل غیرخطی سازه بنایی کلاف‌دار و قاب پر شده بتن مسلح پیشنهاد دادند. در این مدل دیوار بنایی با استفاده از شش دستک قطری مدل‌سازی شده و مقاومت محوری دستک‌ها بر اساس یک تئوری شکست عمومی با لحاظ کردن شکست لغزشی-برشی، شکست قطری کششی و شکست فشاری تعیین گردیده است. مزیت اصلی این مدل نه تنها پیش‌بینی سختی و مقاومت سازه بلکه تاثیر دیوار بنایی بر قاب پیرامونی را نیز نشان می‌دهد. همچنین این مدل در تحلیل سازه‌های بزرگ نیز به دلیل سادگی می‌تواند به کار رود [۱۷]. در سال ۲۰۱۲، Uva و همکاران در تحقیقی تحت عنوان نقش مدل‌های دستک معادل در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح پر شده، یک ساختمان بتن مسلح موجود که اطلاعات زیادی در مورد آن از جمله داده‌های آزمایشگاهی موجود است را جهت مطالعه موردی انتخاب و یک قاب آن با هدف بررسی برخی جوانب مهم در خصوص مدل‌سازی دیوار پرکننده در پاسخ سازه‌ای مورد تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی قرار دادند. در این مطالعه، پارامترهای خاصی از جمله؛ عرض دستک، قانون نیرو-جابه جایی دیوار و تعداد دستک‌ها که در تعریف مدل دستک معادل به کار می‌رود، تحلیل حساسیت گردیده است [۱۸]. Sengupta و Adukadukam در سال ۲۰۱۳ در تحقیقی با عنوان روش دستک معادل برای مدل‌سازی دیوار پرکننده در تحلیل غیرخطی ساختمان‌ها، مشخصات یک مفصل محوری غیرخطی را با سطوح عملکرد مناسب پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق ابتدا مناسب بودن دو روش موجود در ادبیات مورد بررسی قرار گرفته و سپس رابطه نیروی محوری غیرخطی در برابر تغییر شکل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات استخراج و منحنی سهموی به صورت سه خطی برای مشخصات مفصل محوری به نحوی که قابل استفاده در نرم‌افزارهای تجاری مهندسی باشد، تبدیل گردیده است. نهایتاً با استفاده از آن دو ساختمان با سیستم قاب بتن



شکل ۱. ساختمان سه طبقه آسیب دیده در زلزله سرپل ذهاب با سیستم مهاربند برون محور (نگارندگان)

1. Damaged three-story building with EBF system in the Sarpol-e Zahab earthquake (Authors)

ساخته شده است. ابعاد سازه و پروفیل‌ها بر اساس بازدید میدانی می‌باشد، هر چند این ابعاد تقریبی است ولی دقت خوبی دارد. ستون‌ها از 2IPE160 به فاصله محور تا محور ۲۰ cm است که با ورق $PL200 \times 10$ به یکدیگر متصل شده‌اند. تیرهای دهانه‌های فاقد مهاربند از IPE180، دهانه‌های دارای مهاربند از IPE200 و مهاربندها از IPE140 می‌باشد.

بارهای وارد به سازه بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شده است [۲۲]. سقف طبقات از تیرچه بلوک به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد، با احتساب بارهای ناشی از جزییات معماری، بار مرده سقف طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بام ۶۲۰ کیلوگرم بر متر مربع محاسبه گردیده است. بار معادل تیغه‌های داخلی ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع فرض شده، دیوارهای خارجی از سفال به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر بوده که با احتساب اندود داخل و خارج، بار آن ۲۴۰ کیلوگرم بر متر مربع محاسبه گردیده است.

ضریب زلزله ساختمان بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ به صورت زیر محاسبه شده است [۲۳].

$$A = 0.3 \text{ محل پروژه سرپل ذهاب:}$$

$$I = 1 \text{ کاربری مسکونی:}$$

$$\text{زمین نوع دو: } T_0 = 0.1, \quad T_s = 0.5, \quad S = 1.5$$

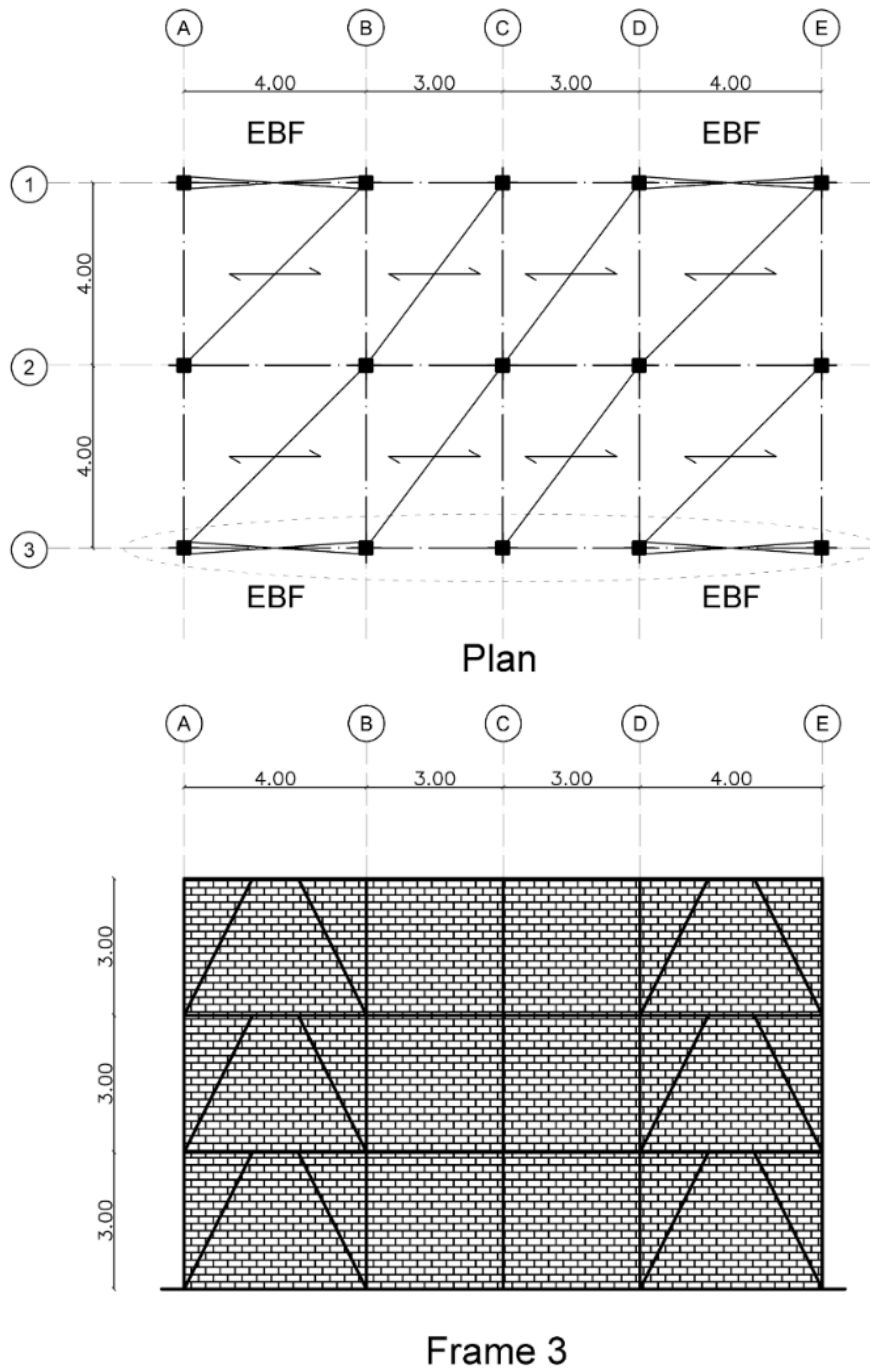
$$\text{سازه قاب ساده فولادی با مهاربند برون محور: } R = 7$$

۲- معرفی ساختمان مورد مطالعه

در این بخش، ویژگی‌های یک ساختمان سه طبقه فولادی با سیستم مهاربند برون محور که در زلزله سرپل ذهاب دچار آسیب شده است معرفی گردیده است (شکل ۱). ساختمان در محله فولادی سرپل ذهاب واقع گردیده و در امتداد عمود بر کوچه دارای سه قاب چهار دهانه است که در قاب‌های ابتدایی و انتهایی، دو دهانه بادبند برون محور اجرا شده است. پلان و نمای یکی از قاب‌های دارای مهاربند برون محور در شکل ۲ نشان داده شده است. در این ساختمان با وجود اینکه طول تیر پیوند کوتاه است ولی به دلیل اشکالات اجرایی سختی کافی را تامین نکرده است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که مهاربندها تحت تاثیر نیروی زلزله کمانش کرده و تغییر شکل برون صفحه بزرگی داده‌اند، تیر پیوند نیز فاقد ورق‌های سخت کننده می‌باشد. اصولاً مهاربند برون محور نباید قبل از تیر پیوند دچار کمانش شود. تیر پیوند و مقاومت فشاری مهاربند با هم سری هستند، هر کدام بشکنند، سیستم سختی نخواهد داشت. در این ساختمان، با شکل‌گیری دستک قطری معادل تحت بار جانبی، دیوارهای پرکننده کمک قابل توجهی در پایداری کلی سازه داشته‌اند.

۳- مدل‌های خطی

جهت تحلیل عددی رفتار ساختمان، مدل دو بعدی یکی از قاب‌ها به صورت ۳ طبقه و ۴ دهانه با لحاظ کردن اثرات سه بعدی در نرم‌افزار Etabs



شکل ۲. پلان و نمای سازه ساختمان (نگارندگان)

Fig. 2. Structural plan and elevation of building (Authors)



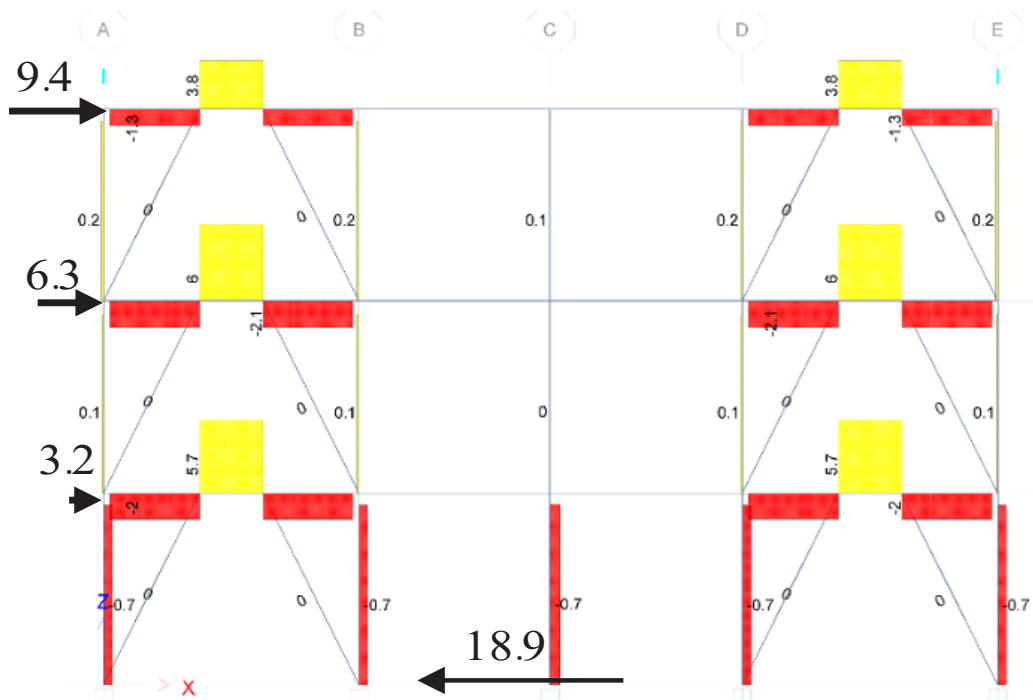
شکل ۳. (بالا) کماتش مهاربند برون محور به صورت برون صفحه، (پایین) عدم اجرای ورق سخت کننده در تیر پیوند (نگارندگان)

Fig. 3. (Top) buckling of brace in out-of-plan, (Bottom) lack of stiffness in link beam (Authors)



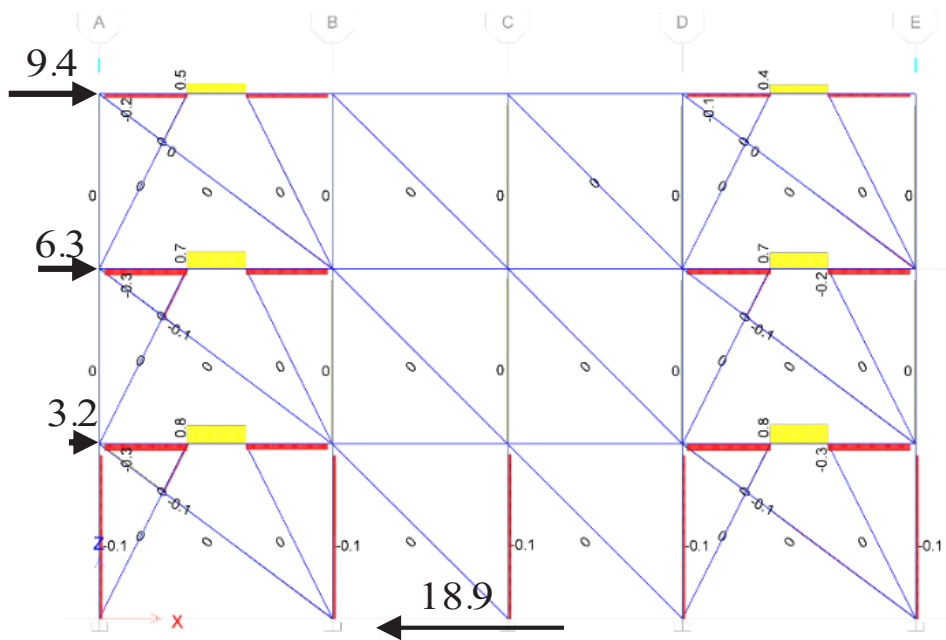
شکل ۴. تحمل بخشی از بار جانبی از بار جانبی از طریق شکل گیری دستک قطری فشاری دیوار پرکننده (نگارندگان)

Fig. 4. Tolerate part of the lateral load by formation of the compression diagonal struts of infill walls (Authors)



شکل ۵. دیاگرام نیروی برشی در قاب با مهاربند برون محور بدون دیوار پرکننده (tonf)

Fig.5. Shear force diagram of EBF without infill walls (tonf)



شکل ۶. دیاگرام نیروی برشی در قاب با مهاربند برون محور با دیوار پرکننده (tonf)

Fig. 6. Shear force diagram of EBF with infill walls (tonf)

جدول ۱. سختی طبقات قاب با مهاربند برون محور در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده

Table 1. Story stiffness of EBF with and without infill walls

	First Story			Second Story			Third Story		
	Δ	F	K	Δ	F	K	Δ	F	K
	cm	tonf	tonf/cm	cm	tonf	tonf/cm	cm	tonf	tonf/cm
EBF	۰/۶۱	۱۸/۹	۳۱	۰/۶۶	۱۵/۷	۲۴	۰/۴۳	۹/۴	۲۲
Infilled EBF	۰/۰۹	۱۸/۹	۲۱۰	۰/۰۸	۱۵/۷	۱۹۶	۰/۰۵	۹/۴	۱۸۸

۴- خروجی تحلیل‌های خطی

در ادامه دیاگرام‌های مربوط به نیروی برشی ناشی از نیروی زلزله قاب با مهاربند برون محور در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده ارائه شده است (شکل‌های ۵ و ۶). میزان تغییر مکان جانبی در شرایط بدون دیوار پرکننده، به ترتیب از طبقه سوم تا اول ۱/۷۰، ۱/۲۷ و ۰/۶۱ سانتی‌متر بوده که در شرایط وجود دیوار پرکننده این میزان به ترتیب به ۰/۲۲، ۰/۱۷ و ۰/۰۹ سانتی‌متر کاهش یافته است. پیوند قاب خالی ۰/۴۶ ثانیه و قاب پر شده ۰/۱۷ ثانیه می‌باشد. جهت محاسبه سختی طبقات در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده، از روش توزیع نیروی زلزله و جابه جایی ناشی از آن استفاده گردیده [۲۵] و نتایج در جدول ۱ و شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود وجود دیوار پرکننده در قاب با مهاربند برون محور موجب افزایش سختی طبقات به ترتیب از طبقه اول تا سوم به میزان ۶/۷، ۸/۲ و ۸/۵ برابر می‌شود.

$$T = 0.05H^{\frac{3}{4}} = 0.05 \times 9^{\frac{3}{4}} = 0.26s \quad (1)$$

$$0.1 < 0.26 < 0.5 \rightarrow T_0 < T < T_s \rightarrow B = S + 1 \rightarrow B = 1.5 + 1 = 2.5 \quad (2)$$

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.3 \times 2.5 \times 1}{7} = 0.11 \quad (3)$$

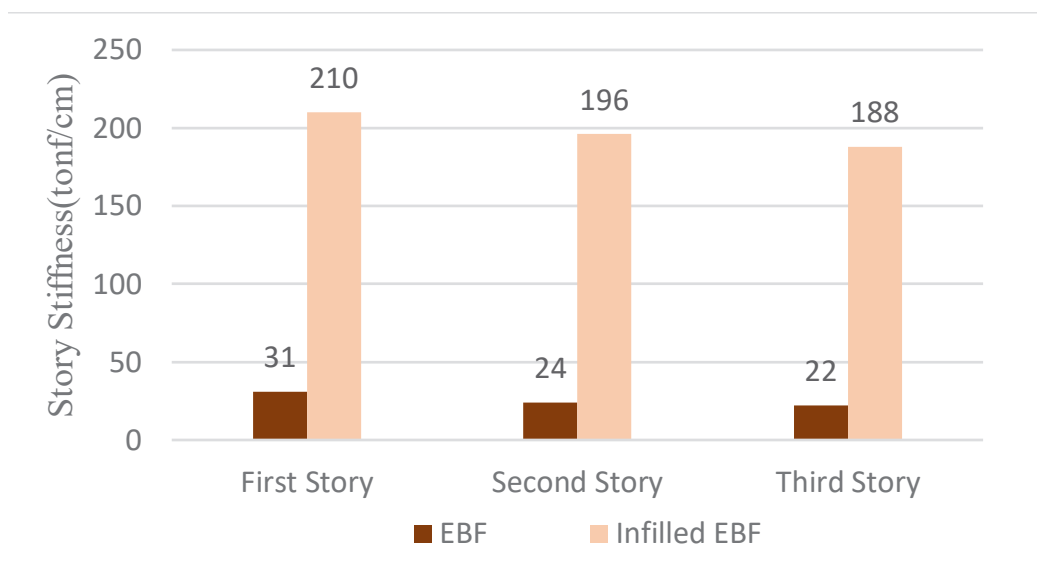
چون یکی از دو قابی که بار جانبی را تحمل می‌کند، به صورت دو بعدی مدل می‌شود و این قاب ۲۵٪ از بار ثقل را تحمل می‌کند، در نتیجه مقدار ضریب زلزله دو برابر مقدار فوق در نظر گرفته شده است.

۵- مدل‌های غیرخطی

توجه شود که هدف از تحلیل غیرخطی در اینجا به عنوان یک روش جایگزین برای تحلیل‌های خطی در فرآیند طراحی و یا ارزیابی سازه‌های موجود نبوده و به همین دلیل ملاحظات مربوط به همسان‌سازی با طیف و نیز جابه جایی هدف مدنظر نمی‌باشد. هدف از انجام تحلیل غیرخطی، افزایش و تعمیق درک رفتار لرزه‌ای سازه با یک روش ساده و سریع می‌باشد به نحوی که بتوان اثر دیوار پرکننده را تا حد قابل قبولی بازبینی کرد. همچنین با توجه به در نظر گرفتن هر چند ساده رفتار کمانشی اعضای مورب و رفتار با شکل‌پذیری بسیار اندک در دیوار پرکننده بعد از عبور از مرحله خطی، اثر رفتار اعضای مورب و نیز اعضای معادل دیوار بر کلیات رفتار حاکم بر سازه در هر دو مرحله خطی و غیرخطی و دقت در تناسبات مربوط به میزان افت مقاومت‌ها و شکل‌پذیری کمک قابل ملاحظه‌ای در رفتارشناسی سازه می‌کند.

$$V = \frac{1}{2}CW = 2C \times \frac{1}{4}W \rightarrow C = 2 \times 0.11 = 0.22 \quad (4)$$

جهت مدل‌سازی دیوارهای پرکننده، یک دستک قطری فشاری به عرض ۰/۲ قطر دیوار در نظر گرفته شده است و در دهانه‌های دارای مهاربند عرض دستک به ۵۰٪ این مقدار کاهش یافته است [۷]. بر این اساس در دهانه ۳ متری، عرض دستک دیوار ۸۵ سانتی‌متر و در دهانه ۴ متری دارای مهاربند ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. مدول الاستیسیته دیوار با فرض اینکه بلوک سفال به کار رفته در آن در رده مقاومتی متوسط قرار دارد و با لحاظ نمودن تاثیر آندوهای داخلی و خارجی دیوار و محاسبات مربوط به مقطع معادل به میزان ۳۹۲۷ مگاپاسکال و ضخامت معادل ۱۶ سانتی‌متر لحاظ گردیده است [۲۴].



شکل ۷. سختی طبقات قاب با مهاربند برون محور در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده

Fig. 7. Story stiffness of EBF with and without infill walls

که تحت نیروی فشاری، کمانش کلی نمی‌کنند و تیر پیوند دقیقاً همین وضعیت موجود را دارد.

حالت سه: وضع موجود فقط با این تفاوت که دیوار پرکننده از قاب جدا می‌بود.

حالت چهار: وضع موجود یعنی بر خلاف آیین نامه، دیوار پرکننده به قاب چسبیده است و ابعاد اعضای مورب و نیر ابعاد و جزئیات تیر پیوند طراحی و اجرای درستی نشده‌اند.

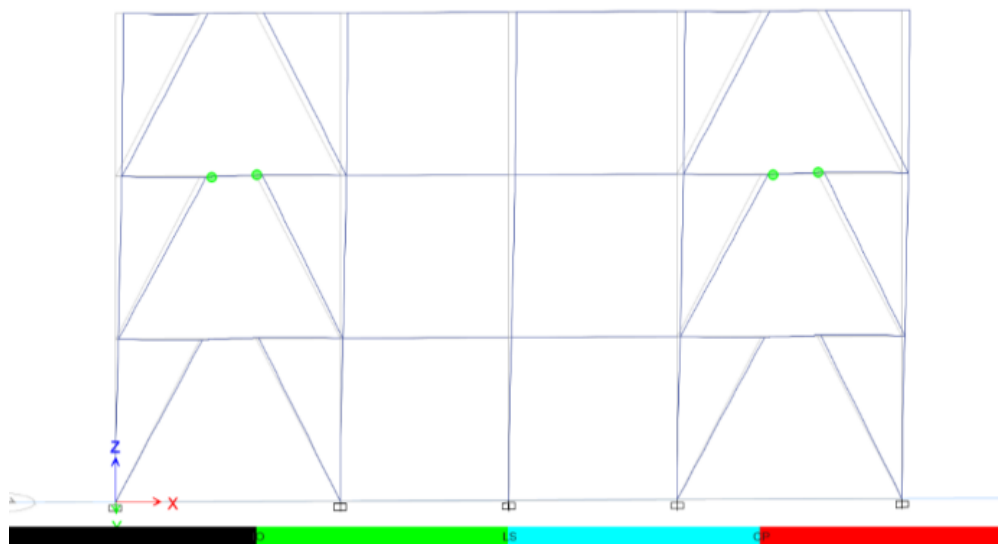
۶- خروجی‌های تحلیل غیرخطی

در این قسمت نتایج تحلیل غیرخطی ارائه شده است. در حالت یک و دو که دیوار از سازه جدا می‌باشد و مهاربندها طبق آیین نامه طراحی شده است، مراحل تشکیل مفصل پلاستیک در شکل‌های ۸ الی ۱۰ ارائه شده است. در شکل ۸ که مربوط به شروع مفاصل پلاستیک است، مفاصل در تیر پیوند طبقه دوم تشکیل شده است. مطابق با دیاگرام برش که در شکل ۵ ارائه شده است، این امر مطابق با انتظار می‌باشد. در شکل ۹، ادامه روند تشکیل مفاصل پلاستیک همچنان در تیر پیوند طبقه دوم بوده و در مرحله بعد مطابق با شکل ۱۰، مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقه اول نیز تشکیل گردیده است.

در صورتی که قرار باشد از تحلیل غیرخطی برای ارزیابی سازه و کافی یا ناکافی بودن برخی از خواص سازه نظیر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری استفاده شود باید مطابق مراجع مناسبی مانند نشریه ۳۶۰ و فم ۳۵۶ اقدامات لازم برای تنظیمات و محاسبات ورودی و اولیه نرم‌افزار را انجام داد. همچنین می‌توان برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای سازه از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده کرد. در این صورت علاوه بر نکات مهم مربوط به انتخاب رکوردهای مناسب و دقت مورد نیاز برای تفسیر نتایج حاصل، باید رفتار چرخه‌ای مصالح بنایی و فولادی را نیز در تحلیل در نظر گرفت و همچنین برخی از حساسیت‌ها را با دقت سنجید.

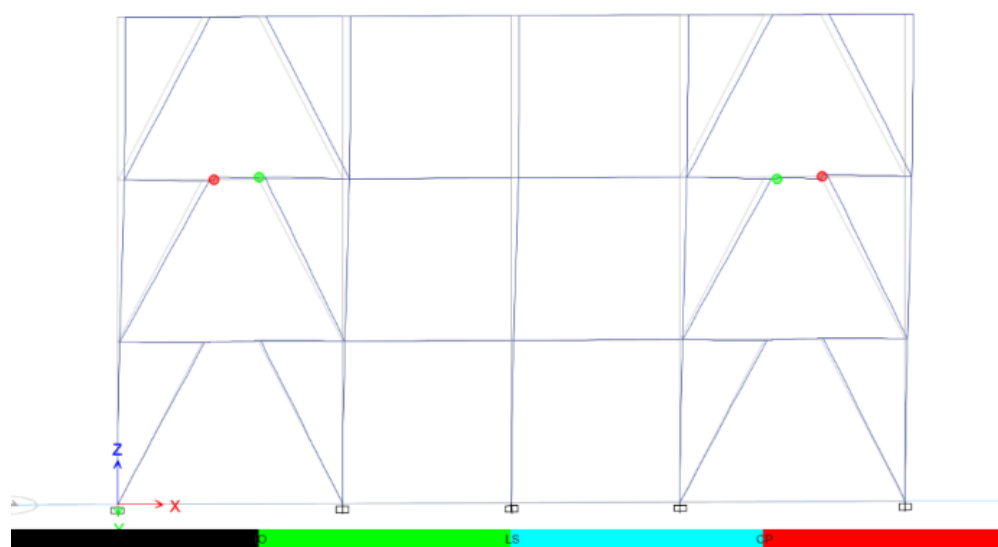
در این قسمت با استفاده از نشریه ۳۶۰ مدل‌سازی مفاصل پلاستیک در دستک‌های فشاری دیوار پرکننده، مهاربندها و نیز مفاصل برشی و خمشی در دو سر تیر پیوند در نرم‌افزار sbatE برای چهار حالت زیر انجام شده است [۲۶]: حالت یک: دیوار از قاب جدا و طراحی اعضای مهاربند و جزئیات همین تیر پیوند مطابق آیین نامه باشد. یعنی ابعاد تیر پیوند همین وضع موجود باشد ولی جان تیر پیوند داری سخت کننده بوده و اعضای مورب مهاربندی دارای ابعادی هستند که تحت نیروی فشاری، کمانش کلی نمی‌کنند.

حالت دو: دیوار از قاب جدا و اعضای مورب مهاربندی دارای ابعادی هستند



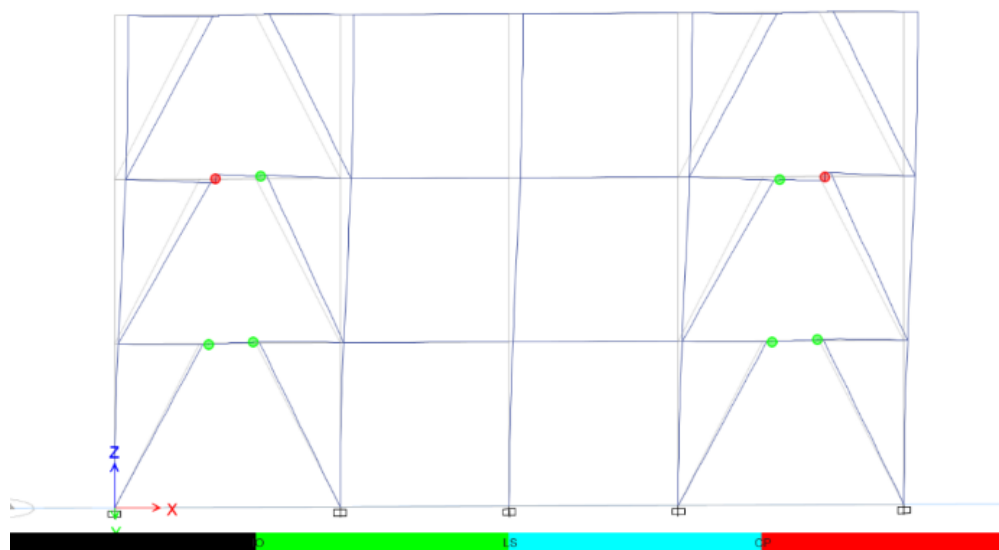
شکل ۸. شروع مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقه دوم (حالت یک و دو)

Fig. 8. Start of plastic hinges in link beam of the second story (Case 1, 2)



شکل ۹. ادامه روند مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقه دوم (حالت یک و دو)

Fig.9. Continuation of process of plastic hinges in link beam of the second story (Case 1, 2)



شکل ۱۰. ادامه روند مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقه دوم و ایجاد مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقه اول (حالت یک و دو)

Fig.10. Continuation of process of plastic hinges in link beam of the second story and formation of plastic hinges in the first story (Case 1, 2)

است. مطابق نمودار حالت ۳ مشاهده می‌شود که اگر به درستی دیوار از قاب جدا می‌شد، رفتار لرزه‌ای سازه بسیار ضعیف‌تر از وضع موجود بود و تقریباً مقدار انرژی لرزه‌ای جذب شده کمتر از یک-سوم می‌شد.

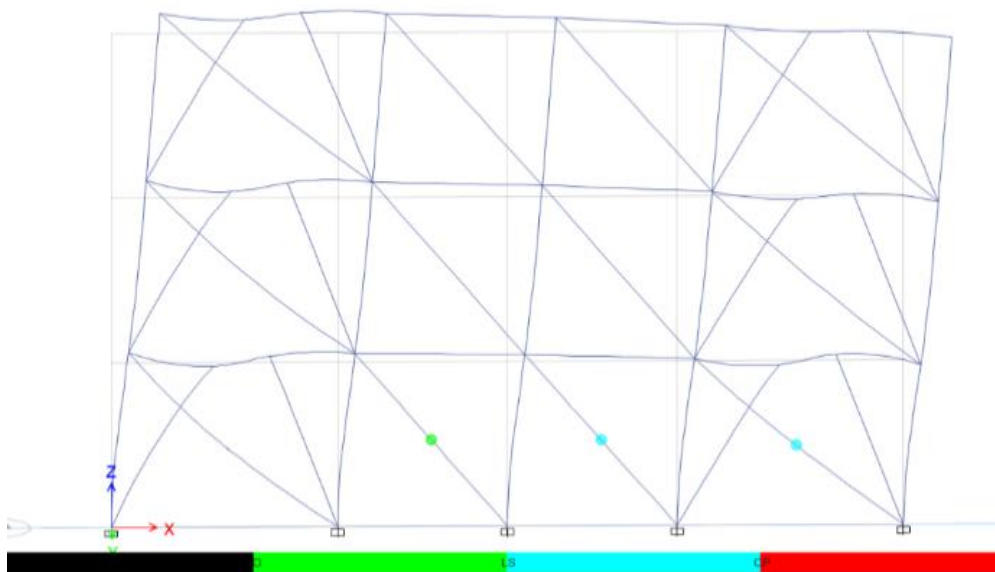
به منظور بازبینی نتایج متناظر تحلیل خطی که در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است با تحلیل غیرخطی در شکل ۱۵، سختی سازه در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده بر اساس محاسبات خطی به صورت نسبت مجموع نیروی جانبی وارد بر سازه (برش پایه) به جابه جایی بام محاسبه شده است. این مقدار با سختی اولیه منحنی پوش آور که نتیجه تحلیل غیرخطی سازه می‌باشد، مقایسه گردیده است. جهت محاسبه شیب بخش اولیه منحنی پوش آور، جابه جایی قاب خالی (حالت‌های یک، دو و سه) در نقطه نیروی ۷۷ تن و برای قاب پر شده (حالت چهار) در نقطه نیروی ۶۵ تن مبنای محاسبات قرار گرفته است. بر اساس محاسبات صورت گرفته نتایج تحلیل خطی و غیرخطی همخوانی خوبی دارد (جدول ۲).

$$K = \frac{\sum F}{\sum \Delta} = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3} \quad (5)$$

نتیجه تحلیل غیرخطی سازه در حالت چهار که دیوار پرکننده به سازه متصل است در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ ارائه شده است. در این حالت، مطابق با شکل ۱۱، نخست مفاصل پلاستیک محوری در دیوارهای پرکننده طبقه اول شکل گرفته است و طبق شکل ۱۲ به سرعت توسعه یافته است. بعد از حذف دیوارهای پرکننده از سیستم مقاوم جانبی، مفاصل پلاستیک در مهاربندهای طبقه اول تشکیل گردیده است (شکل ۱۳) و در ادامه با حذف دیوارهای پرکننده و روند توسعه مفاصل پلاستیک مهاربندهای طبقه اول، این طبقه مکانیزم شده است (شکل ۱۴).

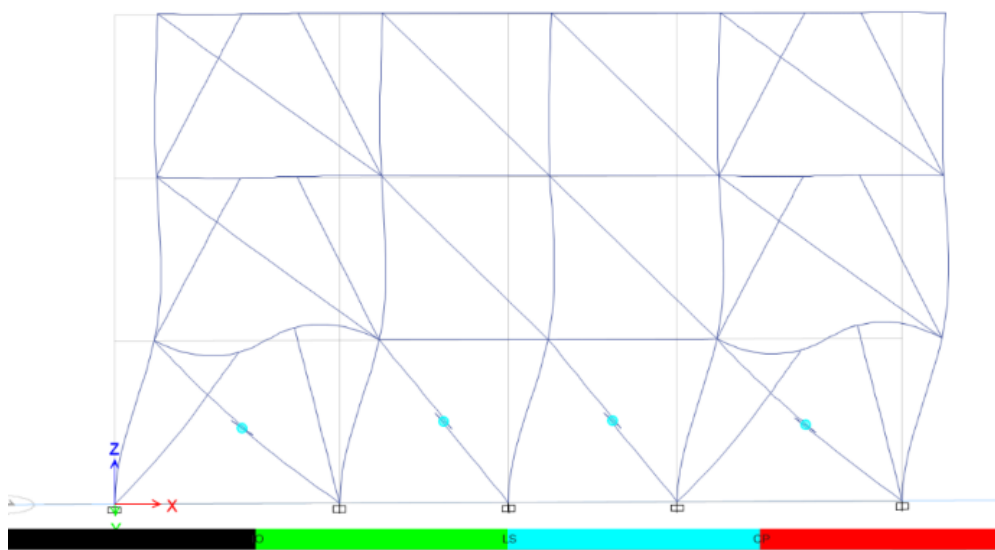
در حالت چهار، قبل از شکست دیوارهای پرکننده، عمده نیروی جانبی زلزله توسط دیوارهای پرکننده تحمل می‌شود و بعد شکست دیوارهای پرکننده در طبقه اول، این نیرو به مهاربندها منتقل گردیده است. بر این اساس در سیکل‌های اولیه زلزله به دلیل مشارکت دیوارهای پرکننده، عملاً نواقص مربوط به مهاربندها مشکلی را برای سازه به همراه نخواهد داشت.

در ادامه نمودار پوش آور چهار حالت بررسی شده در شکل ۱۵ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اتصال دیوار به سیستم سازه باعث افزایش شدید سختی و مقاومت و جذب انرژی شده است به نحوی که وجود دیوار تا حد زیادی اشکالات مربوط به ضعیف بودن تیر پیوند و مهاربند را جبران کرده



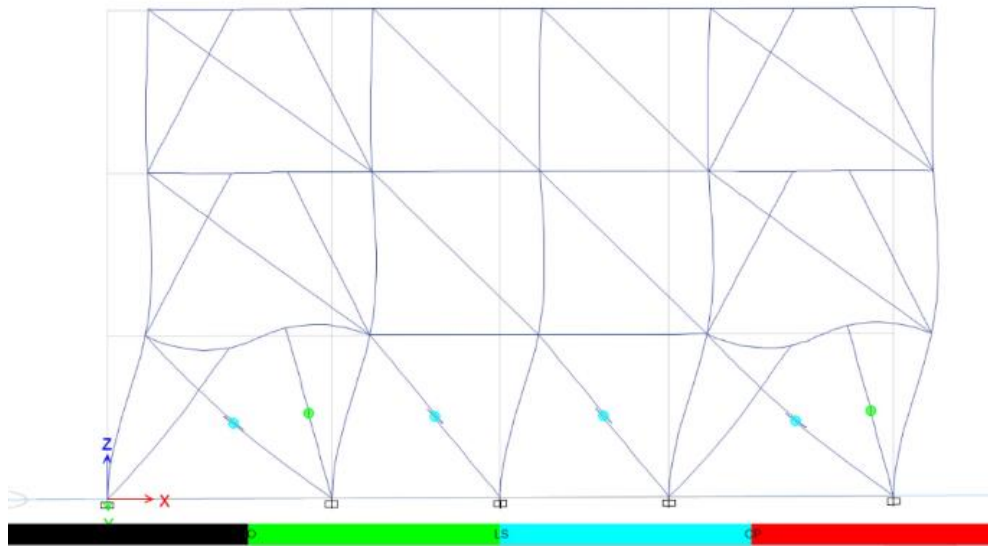
شکل ۱۱. ایجاد سریع مفاصل پلاستیک محوری در دیوارهای پرکننده طبقه اول (حالت چهارم)

Fig.11. Rapid formation of axial plastic hinges in infill walls of the first story (Case 4)



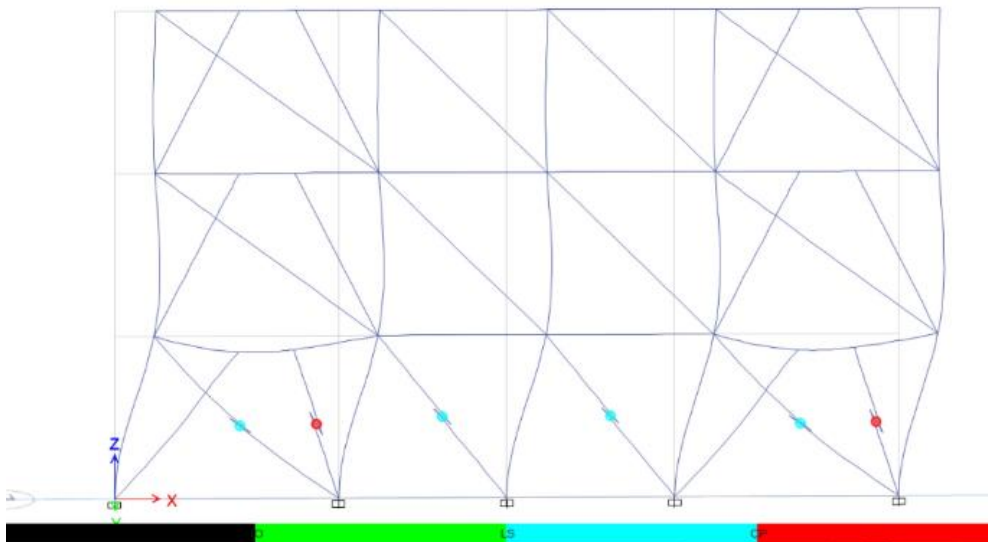
شکل ۱۲. توسعه سریع مفاصل پلاستیک محوری در دیوارهای پرکننده طبقه اول (حالت چهارم)

Fig. 12. Rapid development of axial plastic hinges in infill walls of the first story (Case 4)



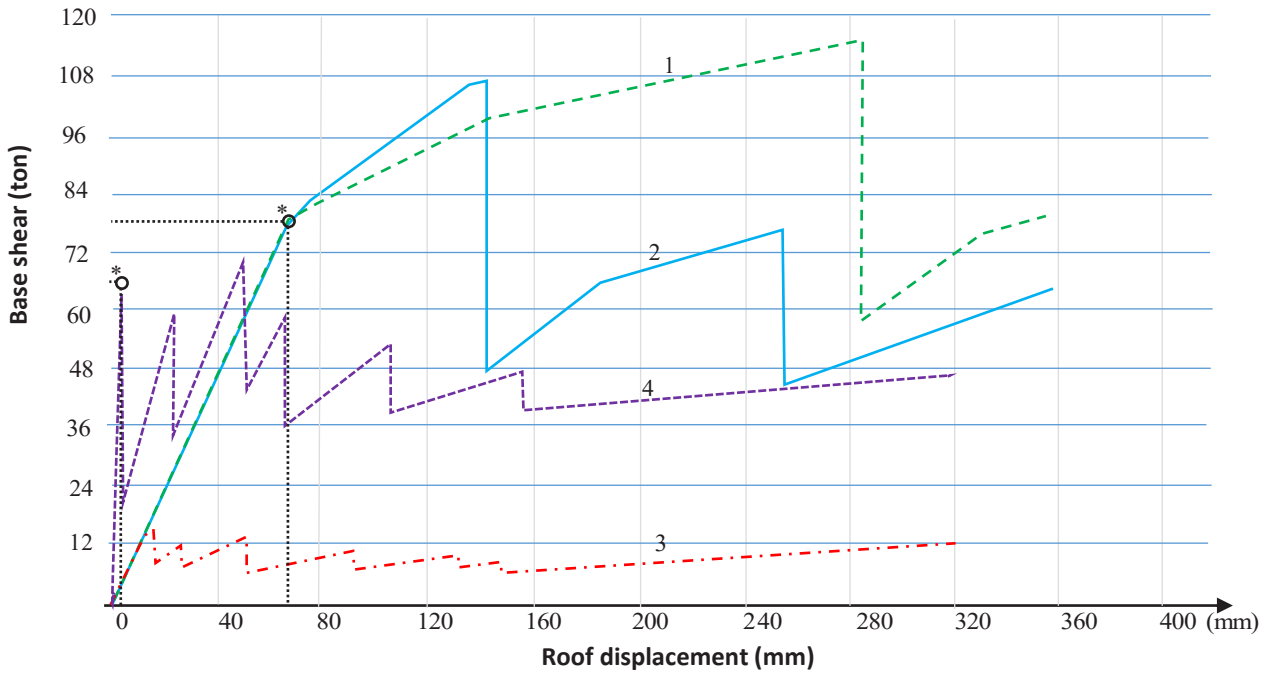
شکل ۱۳. تشکیل مفاصل پلاستیک در مهاربندها بعد از حذف دستک های فشاری معادل دیوار (حالت چهار)

Fig. 13. Formation of plastic hinges in braces after removing of equivalent compression struts of infill walls (Case 4)



شکل ۱۴. مکانیزم شدن طبقه اول در ادامه روند توسعه مفاصل پلاستیک در مهاربندها (حالت چهار)

Fig. 14. Mechanism in the first story following the development of plastic hinges in braces (Case 4)



شکل ۱۵. نمودار پوش‌آور قاب با مهاربند برون محور و دیوار پرکننده در چهار حالت

Fig. 15. Pushover diagram of EBF and infill wall for four cases

جدول ۲. سختی اولیه قاب با مهاربند برون محور در دو حالت با و بدون دیوار پرکننده بر اساس تحلیل خطی و غیرخطی

Table 2. Initial stiffness of EBF with and without infill wall based on linear and nonlinear analyses

	Linear analysis			Nonlinear analysis		
	$\sum F$	$\sum \Delta$	Gradient	F^*	Δ^*	Gradient
	tonf	cm	$\frac{\text{tonf}}{\text{cm}}$	tonf	cm	$\frac{\text{tonf}}{\text{cm}}$
EBF	۱۸/۹	۱/۷	۱۱	۷۷	۷	۱۱
Infilled EBF	۱۸/۹	۰/۲۲	۸۶	۶۵	۰/۷۵	۸۶

در نتیجه پیوند قاب ۲/۷ برابر کاهش یابد. بر اساس تحلیل پوش‌آور، در حالت یک و دو که دیوار از سازه جدا می‌باشد و مهاربندها طبق آیین نامه طراحی شده است، مفاصل پلاستیک از تیر پیوند طبقه دوم شروع می‌شود و در مراحل بعدی در تیر پیوند طبقه اول تشکیل می‌شود، این امر مطابق با دیاگرام برش طبق انتظار است و نتایج تحلیل خطی و غیرخطی بر هم منطبق است. در حالت چهار که دیوار پرکننده به سازه متصل است نخست مفاصل پلاستیک محوری

۷- بحث

تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد وجود دستک قطری دیوار پرکننده موجب می‌شود نیروی برشی در تیر پیوند کاهشی معادل ۷ تا ۸/۵ برابر را تجربه کند که این اتفاق با فلسفه طراحی قاب با مهاربند برون محور در تضاد است. همچنین دیوار پرکننده موجب می‌شود تغییر مکان جانبی به میزان ۶/۷ تا ۷/۷ برابر کاهش یابد، سختی طبقات بین ۶/۷ الی ۸/۵ برابر افزایش یابد و

طراحی قاب با مهاربند برون محور حاصل نمی‌گردد.

۵- با توجه به آثار جدی مثبت و منفی دیوارهای پرکننده لازم است علاوه بر پیش‌بینی ضوابط متناسب و جامع برای آن‌ها در استانداردهای ساختمانی، در سرفصل‌های آموزشی دانشگاهی نیز به طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [1] C. W. Roeder, E. P. Popov, Eccentrically braced steel frames for earthquakes, *Journal of the Structural Division*, 104(3) (1978) 391-412.
- [2] S. K. Azad, C. Topkaya., A review of research on steel eccentrically braced frames, *Journal of constructional steel research*, 128 (2017) 53-73.
- [3] M. Adlparvar, Optimized analysis and design of the link beam with eccentrically braced frame, *Journal of Modeling in Engineering*, 22 (2010) 69-81 (In Persian).
- [4] K. D. Hjelmstad, E. P. Popov, Characteristics of eccentrically braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 110(2) (1984) 340-353.
- [5] J. O. Malley, E. P. Popov, Shear links in eccentrically braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 110(9) (1984) 2275-2295.
- [6] R. Montuori, E. Nistri, V. Piluso, Theory of plastic mechanism control for MRF-EBF dual systems: Closed form solution, *Engineering Structures*, 118 (2016) 287-306.
- [7] M. R. Tabeshpour, Interpretation of Standard No 2800, 4th Edition, Volume II; Consideration of infill wall, Banae Danesh Press, Tehran, Iran, 2016 (In Persian).
- [8] A. S. Daryan, M. Ziaei, A. Golafshar, A. Pirmoz, M. A. Assareh, A study of the effect of infilled brick walls on behavior of eccentrically braced frames using explicit finite elements method, *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 2(1) (2009) 96-104.
- [9] M. R. Tabeshpour, A. Noorifard, Behavior of building with eccentrically braced frame and infill wall in the Sarpol-E Zahab earthquake, *Civil Infrastructure Researches*, 6(1) (2020) 29-40.

در دیوارهای پرکننده طبقه اول شکل می‌گیرد. بعد از حذف دیوارهای پرکننده از سیستم مقاوم جانبی، مفاصل پلاستیک در مهاربندهای طبقه اول تشکیل گردیده و در ادامه با حذف دیوارهای پرکننده و روند توسعه مفاصل پلاستیک در مهاربندهای طبقه اول، این طبقه مکانیزم می‌گردد. دیاگرام نیروی محوری و نیروی برشی در این حالت، قبل و بعد از شکست دیوارهای پرکننده نشان می‌دهد عمده نیروی جانبی زلزله توسط دیوارهای پرکننده تحمل می‌شود و بعد از شکست دیوارهای پرکننده در طبقه اول، این نیرو به مهاربندها منتقل می‌گردد. بر این اساس در سیکل‌های اولیه زلزله به دلیل مشارکت دیوارهای پرکننده، عملاً نواقص مربوط به مهاربندها مشکلی را برای سازه به همراه نخواهد داشت. دیاگرام برش قبل از شکست دیوارهای پرکننده نشان می‌دهد، مقادیر نیروی برشی در تیر پیوند کم بوده و این امر با فلسفه طراحی مهاربند برون محور در تضاد است، با حذف دیوارهای پرکننده، نیروی برشی در تیر پیوند افزایش حدود سه برابری را تجربه می‌کند.

بر اساس نمودار پوش‌آور هر چهار حالت می‌توان نتیجه گرفت که اتصال دیوار به سازه باعث افزایش شدید سختی، مقاومت و جذب انرژی شده و تا حد زیادی اشکالات مربوط به ضعیف بودن تیر پیوند و مهاربند را جبران کرده است. در این شرایط اگر دیوار پرکننده وجود نمی‌داشت، رفتار لرزه‌ای سازه بحرانی‌تر می‌شد و حتی احتمال فروریزش سازه وجود می‌داشت.

۸- نتیجه‌گیری

۱- با مدل‌سازی ساده و سریع ماکرو برای تحلیل غیرخطی یک ساختمان دارای مهاربند برون محور و دیوار پرکننده در زلزله سرپل، همخوانی و تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل و رخدادهای میدانی مشاهده شد. این امر به معنای آن است که حتی با تحلیل‌های غیرخطی کم هزینه نیز می‌توان تا حد زیادی رفتار واقعی سازه در زلزله را پیش‌بینی کرد.

۲- دیوار پرکننده علاوه بر قاب‌های خمشی، بر رفتار لرزه‌ای سیستم مهاربند برون محور نیز اثر قابل ملاحظه‌ای دارد.

۳- در شرایطی که اشکالاتی در طراحی و اجرای قاب با مهاربند برون محور وجود دارد، اتصال دیوار پرکننده به سازه مطلوب است.

۴- برای قاب با مهاربند برون محوری که به درستی برای بار زلزله طراحی شده است، چسباندن دیوار پرکننده به قاب باعث اختلال در رفتار شکل‌پذیر مطلوب این سیستم سازه‌ای می‌شود زیرا وجود دیوار پرکننده و شکل‌گیری دستک معادل موجب کاهش نیروی برشی در تیر پیوند گردیده و مانع از جذب نیروی جانبی در این بخش و جاری شدن تیر پیوند می‌شود لذا هدف اصلی از

- infilled RC buildings, *Engineering Structures*, 42 (2012), 83-94.
- [19] A. Adukadukam, A. K. Sengupta, Equivalent Strut Method for the Modelling of Masonry Infill Walls in the Nonlinear Static Analysis of Buildings, *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 94(2) (2013) 99-108.
- [20] E. Martinelli, C. Lima, G. De Stefano, A simplified procedure for Nonlinear Static analysis of masonry infilled RC frames, *Engineering Structures*, 101 (2015) 591-608.
- [21] M. R. Tabeshpour, A. Noorifard, Nonlinear analysis of eccentrically braced steel frame with infill walls in the Sarpol-e Zahab earthquake, 10th National Conference on Steel & Structure, Tehran, Iran, (2019) (In Persian).
- [22] Iranian national building code, part 6. Design loads for buildings, Ministry of roads and urban development , Islamic Republic of Iran, Tehran, Iran, 2013 (In Persian).
- [23] Standard No 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 3th Edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 2006 (In Persian).
- [24] A. Noorifard, M. R. Tabeshpour, Determining the modulus of elasticity of infill walls constructed by common materials in Iran for engineering applications, *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, 20(1) (2017) 25-35 (In Persian).
- [25] M. R. Tabeshpour, A. Noorifard, Comparing calculation methods of storey stiffness to control provision of soft storey in seismic codes, *Earthquakes and Structures*, 11(1) (2016) 1-23.
- [26] Instruction for seismic rehabilitation of existing buildings, No. 360, First revision, Office of deputy for strategic supervision, Department of technical affairs, Vice presidency for strategic planning and supervision, Tehran, Iran, 2014 (In Persian).
- [10] R. A. Jazany, I. Hajirasouliha, H. Farshchi, Influence of masonry infill on the seismic performance of concentrically braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 88 (2013) 150-163.
- [11] D. Khan, A. Rawat, Nonlinear seismic analysis of masonry infill RC buildings with eccentric bracings at soft storey level, *Procedia engineering*, 161(2016) 9-17.
- [12] A. Ghobarah, T. Ramadan, Effect of axial forces on the performance of links in eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, 12(2) (1990) 106-113.
- [13] G. C. Clifton, H. Nashid, G. Ferguson, M. Hodgson, C. Seal, M. Bruneau, G.A. MacRae, S. Gardiner, Performance of eccentrically braced framed buildings in the Christchurch earthquake series of 2010/2011, In 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal (2012).
- [14] A. Daneshmand, B. H. Hashemi, Performance of intermediate and long links in eccentrically braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012) 167-176.
- [15] H. Rodrigues, H. Varum, A. Costa, A non-linear masonry infill macro-model to represent the global behaviour of buildings under cyclic loading, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 4(2) (2008) 123-135.
- [16] H. Rodrigues, H. Varum, A. Costa, Simplified macro-model for infill masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, 14(3) (2010) 390-416.
- [17] G. S. Torrisi, F. J. Crisafulli, A. Pavese, An innovative model for the in-plane nonlinear analysis of confined masonry and infilled frame structures, In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, (2012) 24-28.
- [18] G. Uva, D. Raffaele, F. Porco, A. Fiore, On the role of equivalent strut models in the seismic assessment of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Tabeshpour, A. Noorifard, Investigating the effect of infill walls on the behavior of building with eccentrically braced frame in the Sarpol-e Zahab earthquake through nonlinear analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 1133-1150.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19274.7121](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19274.7121)



