

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

اخیراً استفاده از دیوارهای قفل شونده خشکه چین به عنوان اعضای میانقابی گسترش یافته است. با این حال به دلیل عدم شناخت کافی در مورد این سیستم نوین، ضروری است رفتار آنها تحت تحریک‌های لرزه‌ای بررسی شود. در مقاله حاضر عملکرد لرزه‌ای یک نوع دیوار قفل شونده به نام پوترا با رویکردهای مختلف مطابق با طیف زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ بررسی شده است. به منظور شبیه‌سازی دقیق اتصال خشکه چین از مدل عددی در مقیاس ریز-مدل‌سازی استفاده شده و پس از اعتبارسنجی مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس، ظرفیت لرزه‌ای دیوار به دست آمده است. برای در نظر گرفتن اثر تراز طبقات مختلف، میزان بار پیش فشاری وارد بر دیوارهای بنایی در ترازهای مختلف ساختمان به عنوان سربار در تحلیل‌ها استفاده شده و با در نظر گرفتن طیف خطی و غیرخطی زلزله، ارزیابی دیوارها مبتنی بر جابه‌جایی و نیرو بر اساس ضوابط لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد لرزه‌ای دیوار قفل شونده خشکه چین پوترا وابسته به میزان سربار، تراز طبقه و ضریب رفتار دیوار است؛ به طوری که نتایج ۲۴ عدد تحلیل نشان داد که استفاده از این دیوارها در مناطق با لرزه‌خیزی کم و در ترازهای ارتفاعی مختلف ساختمان‌ها بلامانع بوده، اما استفاده از آنها در سه طبقه آخر برای مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد مجاز نیست.

واژگان کلیدی: دیوار قفل شونده پوترا، اتصال خشکه چین، تحلیل غیرخطی استاتیکی، مقیاس ریز-مدل‌سازی، ظرفیت لرزه‌ای، ضریب رفتار جزء غیرسازه‌ای.

بررسی عملکرد لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای ساختمان با رویکردهای مختلف: دیوار قفل شونده خشکه چین پوترا

نیما مرادی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

مهدی یزدانی (نویسنده مسئول)

دانشیار مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-yazdani@araku.ac.ir

۱- مقدمه

اتصال قفل شونده‌گی شان امکان جابه‌جایی‌های درون صفحه‌ای و خارج از صفحه‌ای در دیوار را نداشته در حالی که برخی دیگر فقط در راستای خارج از صفحه مقید هستند. تاکنون پژوهش‌های متنوعی در خصوص بلوک‌های قفل شونده انجام پذیرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

در سال ۲۰۰۳، آناند و رامامورتی به ارزیابی مدت‌زمان ساخت دیوارهای بنایی ساخته شده از بلوک‌های معمولی و قفل شونده پرداختند و رشد ۸۰ الی ۱۲۰ درصدی راندمان زمان اجرا در دیوارچینی به روش خشکه‌چینی نسبت به آجرکاری معمولی را گزارش دادند (Anand & Ramamurthy, 2003). جفر و همکاران به بررسی تجربی رفتار تماسی درزه‌های خشکه

دیوارهای قفل شونده خشکه چین در سال‌های اخیر به دلیل راندمان بالای سرعت اجرا و کاهش هزینه‌های ساخت مورد استقبال سازندگان واقع شده‌اند. این دیوارها برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰ میلادی در آفریقا، کانادا، هند و خاورمیانه جهت ساخت خانه‌های کوتاه‌مرتبه توسعه یافتند. در دیوارچینی با بلوک‌های قفل شونده استفاده از لایه‌های ملات محدود شده و پیوستگی بین واحدهای بنایی از طریق اتصالات قفل شونده بلوک‌ها به صورت هندسی تأمین می‌شود. همچنین مسلح کردن این دیوارها با آرماتورهای فولادی و تزریق دوغاب در فضاها می‌جوف بلوک‌ها، امکان ساخت دیوارهای قفل شونده مسلح باربر را نیز فراهم نموده است. برخی از این بلوک‌ها به واسطه نوع

روی نمونه‌های بنایی ساخته شده از این بلوک در حالت‌های دوغاب‌ریزی شده و بدون دوغاب پرداختند (Dorji et al., 2023). گول و همکاران (Gul et al., 2023) رفتار مکانیکی آجر قفل‌شونده اکو^۳ را بررسی نمودند و در ادامه با اجرای المان‌های قائم بتنی در طرفین دیوارهای بنایی، رفتار لرزه‌ای آنها را نسبت به حالت محصور نشده با المان‌های قائم مطالعه نمودند. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از المان‌های محصورکننده در طرفین دیوار، ظرفیت جانبی و جابه‌جایی نسبی آن را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

همچنین اکبر و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی روی نمونه‌ای از دیوارهای بنایی قفل‌شونده آسیب‌دیده که با روش سیم‌سیمان^۴ مقاوم‌سازی شده بودند، پرداختند. آنها مشاهده کردند که در این روش مقاوم‌سازی، ظرفیت لرزه‌ای دیوار آسیب‌دیده افزایش می‌یابد (Akbar et al., 2023). شیه و همکاران نیز به بررسی رفتار چرخه‌ای دیوارهای ساخته شده از نوعی بلوک قفل‌شونده پرداختند و مشاهده نمودند که مقاومت برشی و شکل‌پذیری در دیوارهای قفل‌شونده بیشتر از دیوارهای بنایی معمولی بوده و همچنین مود خرابی دیوارهای بنایی معمولی با قفل‌شونده متفاوت است (Xie et al., 2023).

مرادی و همکاران با استفاده از روش عددی به بررسی رفتار لرزه‌ای "بلوک قفل‌شونده پوترا" و توسعه مدل عددی مبتنی بر ریز-مدل‌سازی پرداختند (Moradi, Yazdani, et al., 2024a) (Moradi, Yazdani, et al., 2024b).

علاوه بر بررسی عددی و آزمایشگاهی دیوارهای بنایی، پژوهش‌های بسیاری در زمینه ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بنایی نیز انجام شده است. در میان پژوهش‌های اخیر صورت گرفته در خصوص ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بنایی می‌توان به پژوهش‌های مرادی و همکاران (Moradi, et al., 2024) و یزدانی و زیرکباش (Yazdani & Zirakbash, 2024) اشاره نمود. مرادی و همکاران با به‌کارگیری روش اجزای محدود، ضمن بررسی تأثیر الگوهای مختلف آجرچینی در رفتار درون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی در سازه‌های تاریخی به ارزیابی لرزه‌ای آنها

و مقایسه رفتار منشورهای قفل‌شونده بنایی دوغاب‌ریزی شده و بدون دوغاب پرداختند. نتایج نشان داد که رفتار تماسی یک درزه خشک به‌شدت تحت تأثیر نقایص هندسی در سطوح بلوک است (Jaafar et al., 2006). در سال ۲۰۰۹، کیتینگو (Kintingu, 2009) با توسعه قطعات جدید از آجر قفل‌شونده تانزانین^۱، امکان ساخت دیوارهای بنایی قفل‌شونده با ضخامت‌های یک آجره، یک و یک‌دوم آجره، دو آجره و بیشتر را فراهم نمود. همچنین او با معرفی قطعات زاویه‌دار از آجرهای قفل‌شونده امکان ساخت دیوارهای چند ضلعی و متقاطع را گزارش نمود.

نور و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد خارج از صفحه دیوار قفل‌شونده پوترا^۲ تحت سربار قائم در حالت‌های مسلح‌سازی مختلف با آرماتور و تزریق دوغاب در فضاهای مجوف بلوک‌ها پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که اعمال سربار در دیوار قفل‌شونده پوترا و همچنین تسلیح آن، نقش مهمی در عملکرد خارج از صفحه دیوار دارد (Nor et al., 2011). سفی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی پنج دیوار قفل‌شونده بنایی تحت تنش فشاری قائم و نیروی جانبی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش فشاری قائم، ظرفیت جانبی دیوار افزایش می‌یابد (Safiee et al., 2018).

کاساپولا و همکاران به ارزیابی ظرفیت پیچشی-برشی سطح تماس بین قفل و بدنه اصلی یک بلوک قفل‌شونده پرداختند و از رویکردهای تحلیلی، عددی و تجربی در پژوهش خود استفاده نمودند (Casapulla et al., 2021).

الفکیه و الأستا (Al-Fakih & Al-Osta, 2022) در سال ۲۰۲۲ به مطالعه پارامتریکی روی یک نمونه از دیوارهای قفل‌شونده پرداختند. آنها تأثیر مدول الاستیسیته دوغاب و نسبت لاغری نمونه‌های بنایی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد با افزایش نسبت لاغری دیوار، مقاومت دیوار کاهش می‌یابد و با افزایش مدول الاستیسیته دوغاب، مقاومت آن افزایش می‌یابد. دورجی و همکاران در سال ۲۰۲۳ ضمن معرفی نوعی بلوک نیمه‌قفل‌شونده به انجام آزمایش‌های مختلف فشاری و کششی

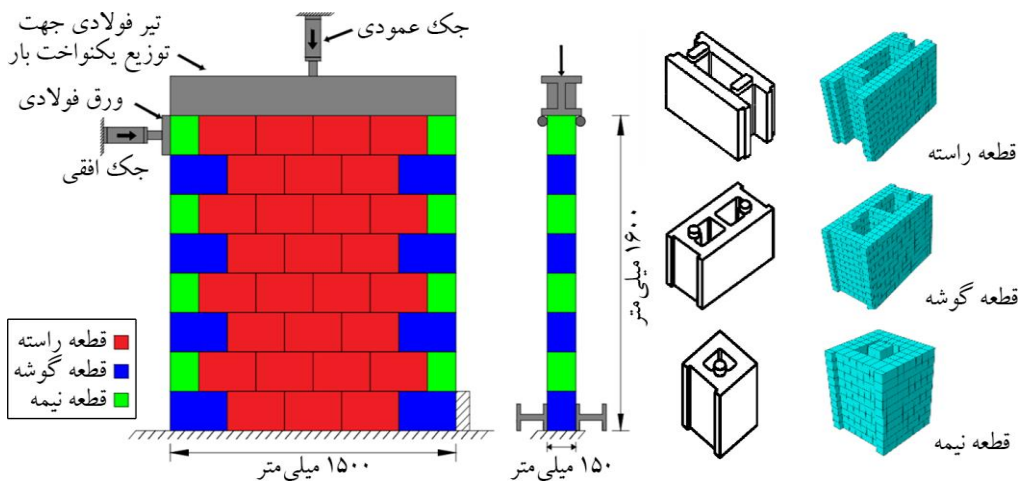
پوترا با رویکرد عددی ریز-مدل‌سازی و استفاده از روش استاتیکی غیرخطی است. سپس در گام بعدی با استفاده از روش‌های مبتنی بر جابه‌جایی و نیرو (ضوابط لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای)، ارزیابی لرزه‌ای دیوار پوترا با در نظر گرفتن طیف خطی و غیرخطی زلزله طرح ۴۷۵ ساله استاندارد ۲۸۰۰ (Standard No. 2800) انجام شده است. در نهایت با مقایسه نیاز لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای مطابق استاندارد ۲۸۰۰، عملکرد لرزه‌ای این سیستم نوین مطابق با ضرایب رفتار استخراج شده جدید بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی عددی دیوار خشکه‌چین قفل‌شونده پوترا از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در روش اجزای محدود برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته از جمله مصالح بنایی می‌توان از سه رویکرد ریز-مدل‌سازی، میان-مدل‌سازی و درشت-مدل‌سازی استفاده نمود که به علت ناپیوستگی و گسستگی شدید در اتصالات خشکه‌چین استفاده از رویکرد ریز-مدل‌سازی می‌تواند تنها رویکرد مناسب باشد. مطابق شکل (۱) بلوک قفل‌شونده پوترا از سه قطعه راسته^۵، نیمه^۶ و گوشه^۷ تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود مدل عددی مطابق با نمونه آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است.

پرداختند و ضرایب امنیت دیوارهای بنایی با الگوهای متنوع آجرچینی را در پهنه‌های مختلف لرزه‌خیزی ایران گزارش نمودند. یزدانی و زیرکباش (Yazdani & Zirakbash, 2024) به بررسی عملکرد درون‌صفحه‌ای پل‌های قوسی بنایی مقاوم‌سازی شده به روش بتن پاششی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. آنها ضمن استخراج منحنی‌های ظرفیت چرخه‌ای این سازه‌های بنایی پر اهمیت در دو حالت مقاوم‌سازی شده و مقاوم‌سازی نشده، تأثیر میزان انرژی جذب‌شده و زوال مصالح را بررسی نمودند. مرادی و همکاران رفتار درون‌صفحه‌ای دیوارهای قفل‌شونده خشکه‌چین با مکانیسم‌های مختلف قفل‌شوندگی را به روش استاتیکی غیرخطی مطالعه نمودند. آنها ضمن استخراج پارامترهای سختی مؤثر، مقاومت نهایی، جابه‌جایی نهایی، میزان انرژی جذب‌شده و ضریب شکل دیوارهای مورد مطالعه و مقایسه آنها با یکدیگر به ارزیابی لرزه‌ای آنها بر مبنای جابه‌جایی مطابق با آیین‌نامه لرزه‌ای ایران پرداختند (Moradi et al., 2025).

با توجه به گسترش کاربرد دیوارهای قفل‌شونده در نقاط مختلف جهان و احتمال جای‌گزینی آنها با سیستم‌های دیوارچینی رایج در ایران و از طرفی قرار گرفتن کشور در یک ناحیه لرزه‌خیز، لزوم بررسی عملکرد لرزه‌ای این دیوارها جهت استفاده در صنعت ساخت‌وساز کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از پژوهش حاضر ابتدا بررسی رفتار درون‌صفحه‌ای یک نمونه دیوار قفل‌شونده خشکه‌چین با نام



شکل (۱): مشخصات مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی دیوار قفل‌شونده خشکه‌چین پوترا (Safiee et al., 2018).

استاتیکی غیرخطی به صورت جانبی و درون صفحه‌ای به همراه تنش قائم یک مگاپاسکال به عنوان سر بار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است به منظور مش بندی قطعات در مدل عددی از المان‌های مرتبه اول هشت گرهی مکعبی (C3D8R) با اندازه ۲ سانتی متر جهت حصول همگرایی استفاده شده است.

در این پژوهش به منظور تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل‌های عددی در نرم افزار آباکوس، از حل گر ضمنی^۹ بهره گرفته شد. حداقل اندازه گام حل گر، $10^{-5} \times 1$ و تعداد تلاش‌های حل گر جهت ارضای معادلات تعادل، ۱۰ مرتبه در نظر گرفته شد. در حل گر ضمنی فرض بر این است در صورتی که اندازه گام حل در حین تحلیل از میزان حداقل تعریف شده برای آن کمتر شود، تأثیر گام‌های بعدی که به مراتب کوچک تر از مقدار حداقل هستند، بر روی نتایج تحلیل بسیار اندک خواهد بود؛ بنابراین نرم افزار به صورت خود کار از چرخه حل خارج می شود و آخرین گام حل گر به عنوان لحظه شکست تلقی می شود. زمان تحلیل مدل عددی در نرم افزار ۱۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد به طوری که در ۱۰ ثانیه ابتدایی تحلیل، بار پیش فشاری به صورت خطی به دیوار وارد شده که در ثانیه دهم به حداکثر مقدار خود (۱ مگاپاسکال) رسیده و تا پایان تحلیل ثابت نگه داشته می شود. سپس بار جانبی از ثانیه دهم به بعد به صورت خطی (با حداکثر طول گام زمانی ۱ ثانیه) به دیوار اعمال شده و تا لحظه واگرایی تحلیل ادامه می یابد. لازم به ذکر است که در نهایت منحنی ظرفیت مدل عددی دیوار پوترا تحت سر بار ۱ مگاپاسکال در ۱۰۹ گام زمانی استخراج شد.

پس از تحلیل دیوار بنایی در نرم افزار آباکوس، مقادیر برش پایه در نقطه مرجع زیرین دیوار و جابه جایی بالای دیوار به عنوان نقطه کنترل استخراج شد و منحنی برش پایه - جابه جایی مطابق شکل (۲) استخراج شد.

با توجه به ضرورت مش بندی بسیار ریز برای مدل سازی دقیق بلوک ها و از طرفی وجود رفتار غیرخطی شدید در محل اتصالات، برای صرفه جویی در هزینه های محاسباتی، رفتار هر بلوک به صورت خطی مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است و تمام مشخصات غیرخطی به اتصال خشکه چین اختصاص داده شده است. در مدل سازی رفتار تماسی در نرم افزار آباکوس از دو روش مبتنی بر المان و سطح استفاده می شود. روش مبتنی بر المان‌های چسبنده^۸ زمانی استفاده می شود که لایه چسبنده (ملات) در مدل عددی در نظر گرفته شده باشد. این در حالی است که روش مبتنی بر سطح زمانی به کار می رود که ضخامت لایه چسبنده (ملات) در دیوار بسیار ناچیز باشد؛ بنابراین در این پژوهش با توجه به عدم حضور ملات در سیستم دیوارهای قفل شونده از رویکرد دوم به همراه در نظر گرفتن یک رفتار تماسی بهره برده شده است به طوری که ضمن تعریف ضرایب سختی قائم، برشی و پیچشی در حالت خطی و حداکثر تنش های قابل تحمل متناظر با آنها، مرز شروع آسیب سطوح تماسی بین واحدهای بنایی مشخص شده است.

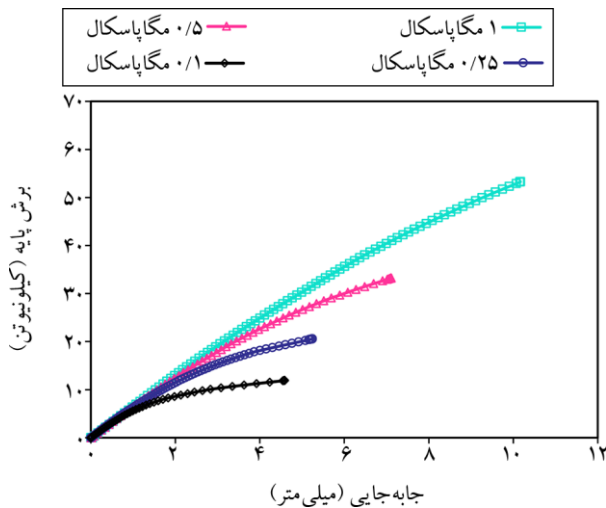
جدول (۱): خصوصیات مکانیکی بلوک قفل شونده پوترا.

چکالی (تن بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
۲	۸	۰/۲

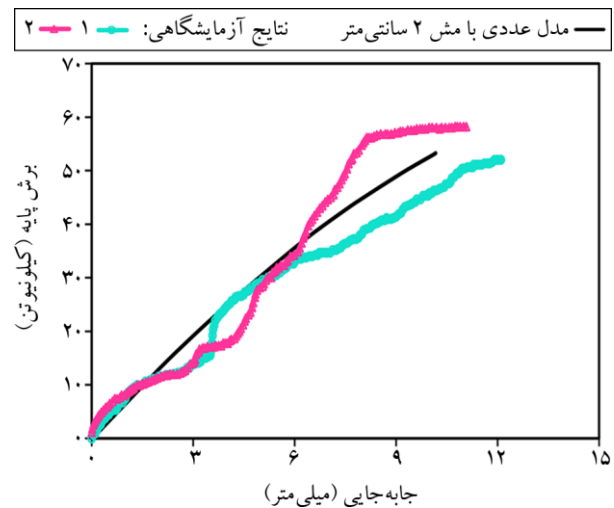
خصوصیات تماسی درزهای خشک بین واحدهای بنایی نیز در مدل اولیه مطابق با مشخصات پژوهش دُران و همکاران (Doran et al., 2022) در نظر گرفته شد و بعد از به هنگام سازی مدل عددی، مشخصات نهایی اتصالات خشکه چین در جدول (۲) ارائه شده است. در ادامه جهت اعمال شرایط مرزی، سطح زیرین دیوار به صورت گیردار مقید شد. همچنین تحلیل از نوع

جدول (۲): خصوصیات تماسی مربوط به اتصال خشکه چین در مدل عددی.

سختی نرمال (مگاپاسکال بر متر)	سختی برشی (گینگا پاسکال بر متر)	سختی پیچشی (گینگا پاسکال بر متر)	آسیب نرمال (مگاپاسکال)	آسیب برشی لغزشی (مگاپاسکال)	آسیب برشی پیچشی (مگاپاسکال)	ضریب اصطکاک	رفتار نرمال	انرژی شکست (J)
۰/۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۱	سخت	۱



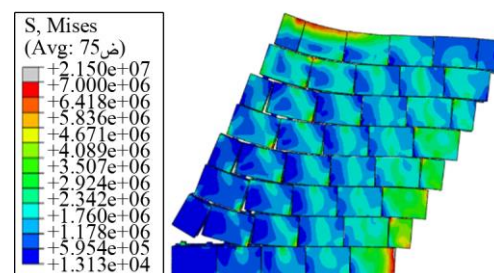
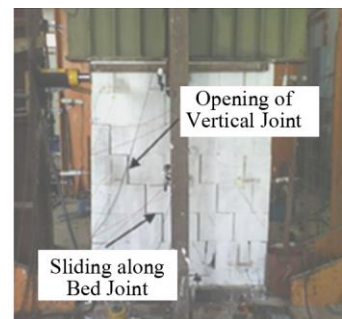
شکل (۴): مقایسه نمودار برش پایه-جاب‌جایی دیوارهای قفل‌شونده پوترا تحت سربارهای مختلف.



شکل (۲): مقایسه نمودار برش پایه-جاب‌جایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای سربار یک مگاپاسکال.

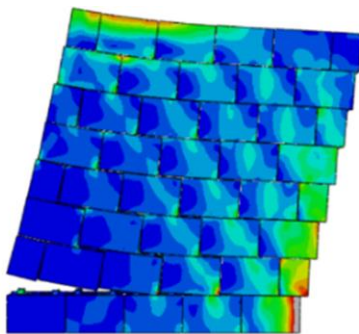
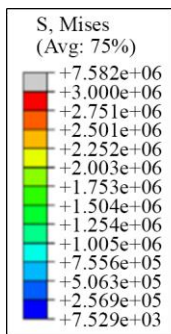
میزان بار پیش‌فشاری وارد بر دیوارهای بنایی در ترازهای مختلف ساختمان به دست آمده است. بنابراین در پژوهش حاضر با اعمال هم‌زمان سربارهای ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مگاپاسکال و نیروی جانبی درون‌صفحه‌ای به مدل عددی، منحنی‌های ظرفیت مطابق با شکل (۴) و مود خرابی دیوارها مطابق با شکل (۵) استخراج شد. همان‌طور که از نتایج مشخص است میزان سربار با جاب‌جایی و ظرفیت نهایی دیوار ارتباط مستقیم دارد. با مقایسه حالت‌های خرابی مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود به دلیل عدم وجود ملات، چسبندگی بین واحدهای بنایی وجود نداشته و پایداری دیوار در دو راستای درون و خارج از صفحه از طریق اتصالات قفل‌شونده هندسی بلوک‌ها تأمین می‌شود؛ که این اتصالات قفل‌شونده در سطوح فوقانی بلوک‌های پوترا دارای ضخامتی معادل ۲ سانتی‌متر بوده که با اعمال بار درون‌صفحه‌ای به دیوار و افزایش آن، بلوک‌های قفل‌شونده به راحتی دچار بلندشدگی و لغزش روی یکدیگر می‌شوند. لذا در سربارهای کم، نوع شکست دیوار به صورت خمشی (گهواره‌ای) بوده و با افزایش میزان سربار، رشد تنش و اصطکاک بین واحدهای بنایی در دیوار، نوع شکست به حالت برشی-لغزشی متمایل شده است. از طرفی دیگر با افزایش میزان سربار، علی‌رغم افزایش ظرفیت نیرویی و جاب‌جایی، شکل‌پذیری دیوار پوترا کاهش یافته است.

همچنین مود خرابی دیوار نیز مطابق شکل (۳) ارائه شده است که تطابق مناسبی با مشاهدات آزمایشگاهی دارد. با توجه به منحنی برش پایه-جاب‌جایی و الگوی خرابی به دست آمده می‌توان از اعتبار مدل عددی استخراج‌شده اطمینان حاصل نمود.

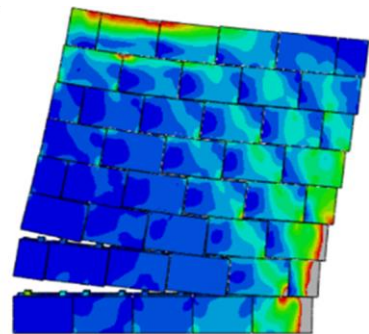
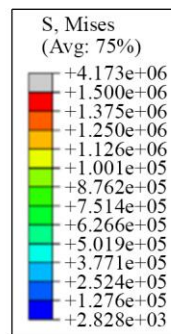


شکل (۳): مقایسه مود خرابی مدل آزمایشگاهی و عددی برای سربار یک مگاپاسکال بر حسب پاسکال (با مقیاس ۷۰ برابر بزرگ‌نمایی).

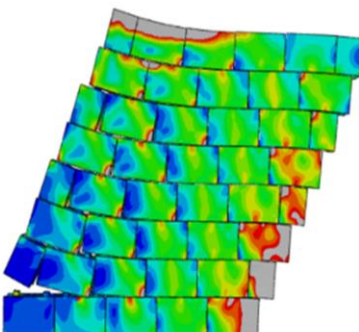
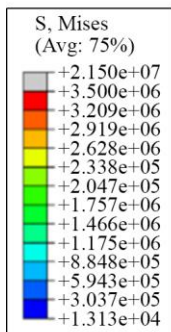
با توجه به اتصالات خشکه‌چین بلوک‌های قفل‌شونده، ظرفیت باربری دیوارهای قفل‌شونده کاملاً وابسته به میزان سربار و پیش‌فشار اولیه است. مطابق پژوهش (Gul et al., 2023; Xie et al., 2023)،



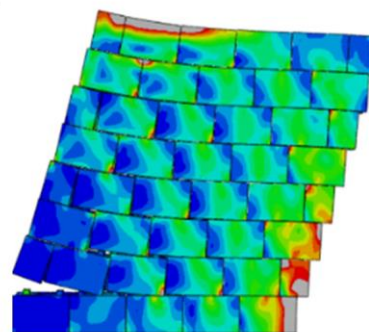
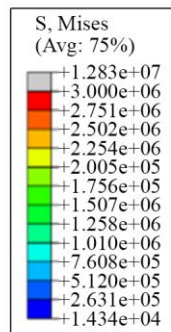
(ب) سربار ۰/۲۵ مگاپاسکال



(الف) سربار ۰/۱ مگاپاسکال



(ت) سربار ۱ مگاپاسکال



(پ) سربار ۰/۵ مگاپاسکال

شکل (۵): مقایسه کانتورهای تنش ون میسر (پاسکال) و مودهای خرابی مدل عددی دیوار پوترا برای سربارهای مختلف با ۶۰ برابر بزرگ‌نمایی.

ϕ_i به ترتیب جرم مؤثر و مؤلفه بردار شکل متناظر با مود λ_m برای هر درجه آزادی است. همچنین فرکانس مود اول درون‌صفحه‌ای دیوار و جرم مؤثر آن به ترتیب برابر $121/73$ هرتز و $312/71$ کیلوگرم استخراج شد.

جهت ارزیابی عملکرد دیوار قفل‌شونده پوترا تحت سربارهای مختلف، پارامترهای مقاومت تسلیم (V_y)، جابه‌جایی تسلیم (δ_y)، مقاومت نهایی (V_u)، جابه‌جایی نهایی (δ_m)، سختی جانبی مؤثر (K_e)، شکل‌پذیری (μ) و انرژی مستهلک‌شده (E_d)، مطابق جدول (۳) از منحنی‌های دو خطی استخراج شده است. همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است با افزایش میزان سربار در دیوار قفل‌شونده پوترا، سختی جانبی مؤثر، مقاومت نهایی، جابه‌جایی نهایی و میزان انرژی مستهلک‌شده افزایش یافته است، درحالی‌که میزان شکل‌پذیری دیوارها با افزایش بار پیش‌فشاری کاهش یافته است. در نهایت منحنی‌های ظرفیت سیستم یک‌درجه آزادی دیوار بر اساس سربارهای مختلف به همراه منحنی‌های دوخطی مطابق شکل (۶) به دست آمده است (Magenes & Calvi, 1997).

همچنین نتایج نشان می‌دهد که درصد افزایش مقاومت دیوار پوترا با افزایش سربار بسیار بیشتر از درصد افزایش جابه‌جایی دیوار است، به طوری که با افزایش دو برابری سربار حداکثر مقاومت و جابه‌جایی به طور متوسط ۶۰ و ۳۸ درصد افزایش یافته‌اند.

۳- ارزیابی لرزه‌ای

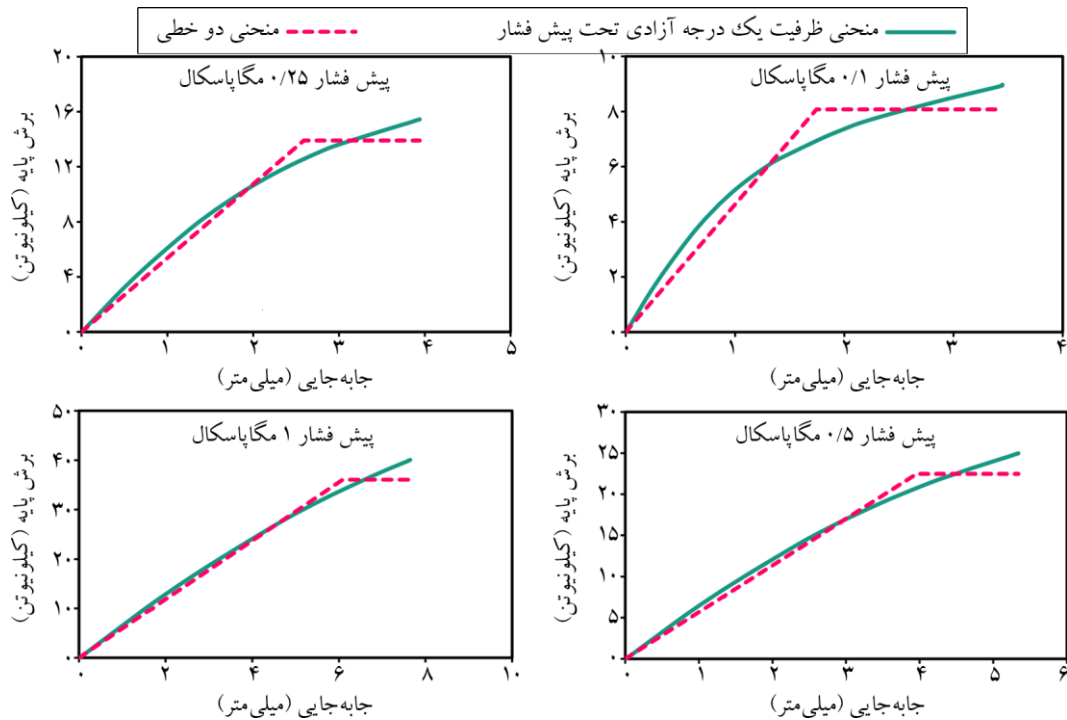
در این بخش از دو رویکرد مبتنی بر جابه‌جایی (استفاده از طیف تقاضا) و رویکرد مبتنی بر نیرو (استفاده از روابط اجزای غیر سازه‌ای استاندارد ۲۸۰۰) به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده خشکه‌چین پوترا استفاده شده است.

۳-۱- طیف تقاضا

در این روش ابتدا تحلیل مودال جهت تبدیل منحنی‌های ظرفیت سیستم چند درجه آزادی به سیستم یک‌درجه آزادی مطابق رابطه $\Gamma = \sum m_i \phi_i / \sum m_i \phi_i^2$ انجام شد که مقدار $\Gamma = 1/33$ به دست آمد. لازم به ذکر است در این رابطه m_i و

جدول (۳): ویژگی‌های فیزیکی مربوط به منحنی‌های ظرفیت دیوار پوترا تحت سربارهای مختلف.

نمونه	K_e (کیلو نیوتن بر میلی متر)	δ_y (میلی متر)	V_y (کیلو نیوتن)	δ_m (میلی متر)	V_u (کیلو نیوتن)	μ (کیلو نیوتن در میلی متر)	E_D
دیوار با سربار ۰/۱ مگاپاسکال	۴/۶۳	۱/۷۴	۸/۰۸	۳/۴۵	۸/۹۷	۱/۹۸	۲۱/۱۵
دیوار با سربار ۰/۲۵ مگاپاسکال	۵/۳۶	۲/۵۹	۱۳/۹۱	۳/۹۴	۱۵/۴۵	۱/۵۲	۳۷/۵۹
دیوار با سربار ۰/۵ مگاپاسکال	۵/۶۷	۳/۹۶	۲۲/۴۸	۵/۳۴	۲۴/۹۸	۱/۳۵	۷۷/۰۴
دیوار با سربار ۱ مگاپاسکال	۵/۹۲	۶/۰۹	۳۶/۰۵	۷/۶۴	۴۰/۰۶	۱/۲۶	۱۶۸/۹۷



شکل (۶): منحنی‌های ظرفیت و دوخطی دیوار پوترا تحت سربارهای مختلف برای سیستم یک درجه آزادی.

قفل‌شونده بدیهی است که ضریب شکل‌پذیری این نوع دیوارها بسیار کم است، با این حال در این مطالعه مطابق با پژوهش اکبر و همکاران (Akbar et al., 2023) طیف غیرخطی زلزله طرح به دست آمده است. در این روش از ضریب شکل‌پذیری جهت استخراج ضریب اصلاح پاسخ (R_{μ}) استفاده شده است که تحت تأثیر میزان انرژی جذب‌شده توسط سازه و تغییرشکل‌های غیرخطی در آن است و برای غیرخطی نمودن منحنی تقاضا به کار می‌رود. این ضریب مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$R_{\mu} = \sqrt{2\mu - 1} \quad (1)$$

در ادامه منحنی‌های ظرفیت سیستم یک درجه آزادی دیوار قفل‌شونده پوترا تحت سربارهای مختلف در کنار طیف خطی و

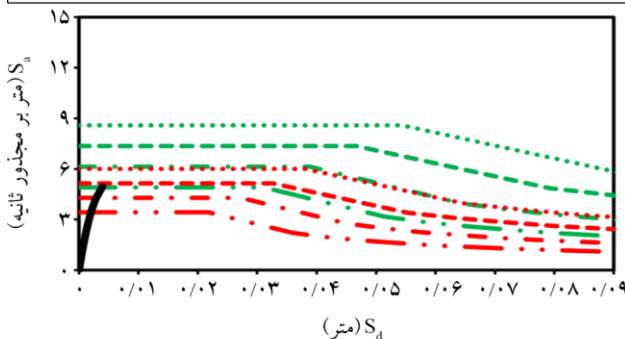
مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ (Standard No. 2800)، کشور ایران به چهار ناحیه مختلف با خطرهای لرزه‌خیزی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شده است که به ترتیب معرف حداکثر شتاب‌های g ۰/۲، g ۰/۲۵، g ۰/۳ و g ۰/۳۵ هستند. همچنین مطابق با این آیین‌نامه، چهار نوع خاک بر مبنای میزان سرعت موج برشی در زمین در نظر گرفته شده است به طوری که خاک‌های نوع اول و چهارم به ترتیب به عنوان سخت‌ترین و سست‌ترین خاک تعریف می‌شوند. در این پژوهش از طیف خطی زلزله طرح برای هر چهار ناحیه زلزله‌خیز کشور با در نظر گرفتن خاک‌های تپ دوم و سوم به عنوان سطوح تقاضا استفاده شده است. همچنین مطابق با رفتار و مکانیسم خرابی دیوارهای

جدول (۴) محاسبه و گزارش شده است. لازم به ذکر است در شکل‌های (۷) و (۸) جهت تبدیل برش پایه به شتاب از پژوهش (Gul et al., 2023) جهت محاسبه وزن طبقه استفاده شده است.

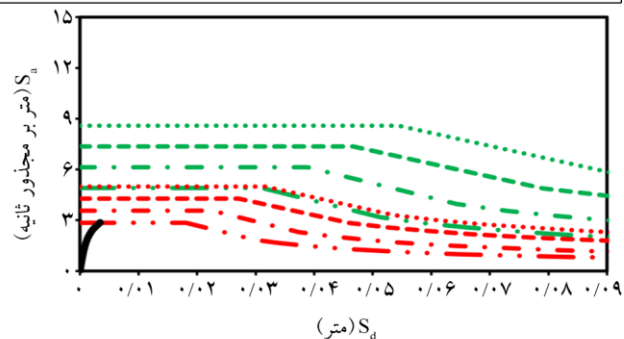
غیرخطی زلزله طرح مطابق شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شده است و در نهایت مقادیر ضرایب امنیت دیوارها از تقسیم حداکثر جابه‌جایی طیفی دیوار در منحنی ظرفیت به جابه‌جایی نقطه برخورد منحنی ظرفیت با منحنی تقاضا (طیف) طبق

جدول (۴): ضرایب امنیت برای دیوار قفل‌شونده پوترا برای طیف خطی و غیرخطی.

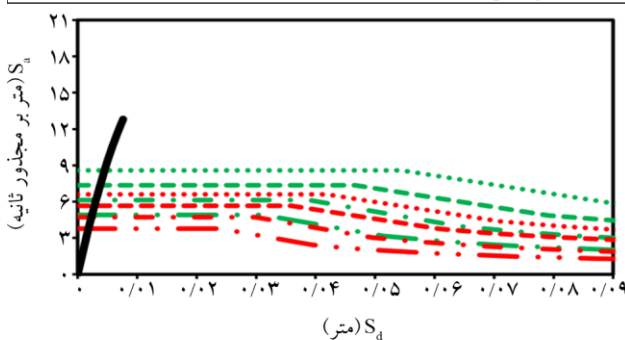
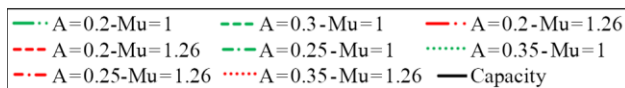
طیف	سربار			خاک نوع دوم					
	مگا پاسکال	A=0/۲g	A=0/۲۵g	A=0/۳g	A=0/۳۵g	A=0/۲g	A=0/۲۵g	A=0/۳g	A=0/۳۵g
خطی	0/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
	0/۲۵	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
	0/۵	۲/۰۳	۱/۵۱	۱/۱۵	<۱	۱/۸	۱/۳۲	<۱	<۱
	۱	۳/۱۸	۲/۴۶	۲/۰۱	۱/۷	۲/۸۳	۲/۲۳	۱/۸۱	۱/۵
	0/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
غیر خطی	0/۲۵	۱/۹۴	۱/۳۶	<۱	<۱	۱/۷۱	۱/۰۹	<۱	<۱
	0/۵	۲/۷۴	۲/۱۴	۱/۶۷	۱/۳۷	۲/۴۸	۱/۸۸	۱/۴۸	۱/۱۷
	۱	۴/۱۷	۳/۳۲	۲/۷	۲/۲۸	۳/۸۲	۳	۲/۴۶	۲/۰۶



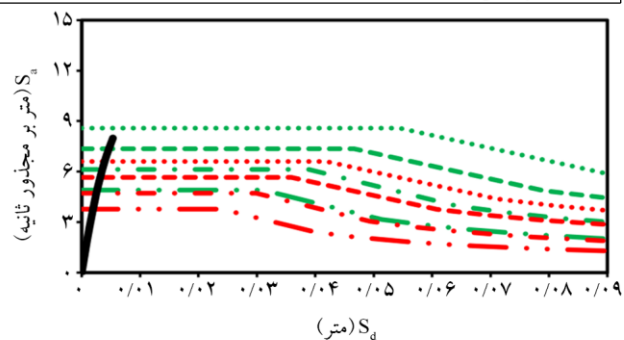
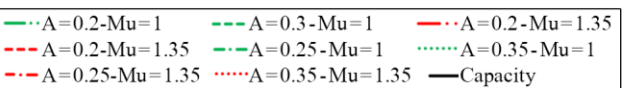
(ب) سربار 0/۲۵ مگا پاسکال



(الف) سربار 0/۱ مگا پاسکال

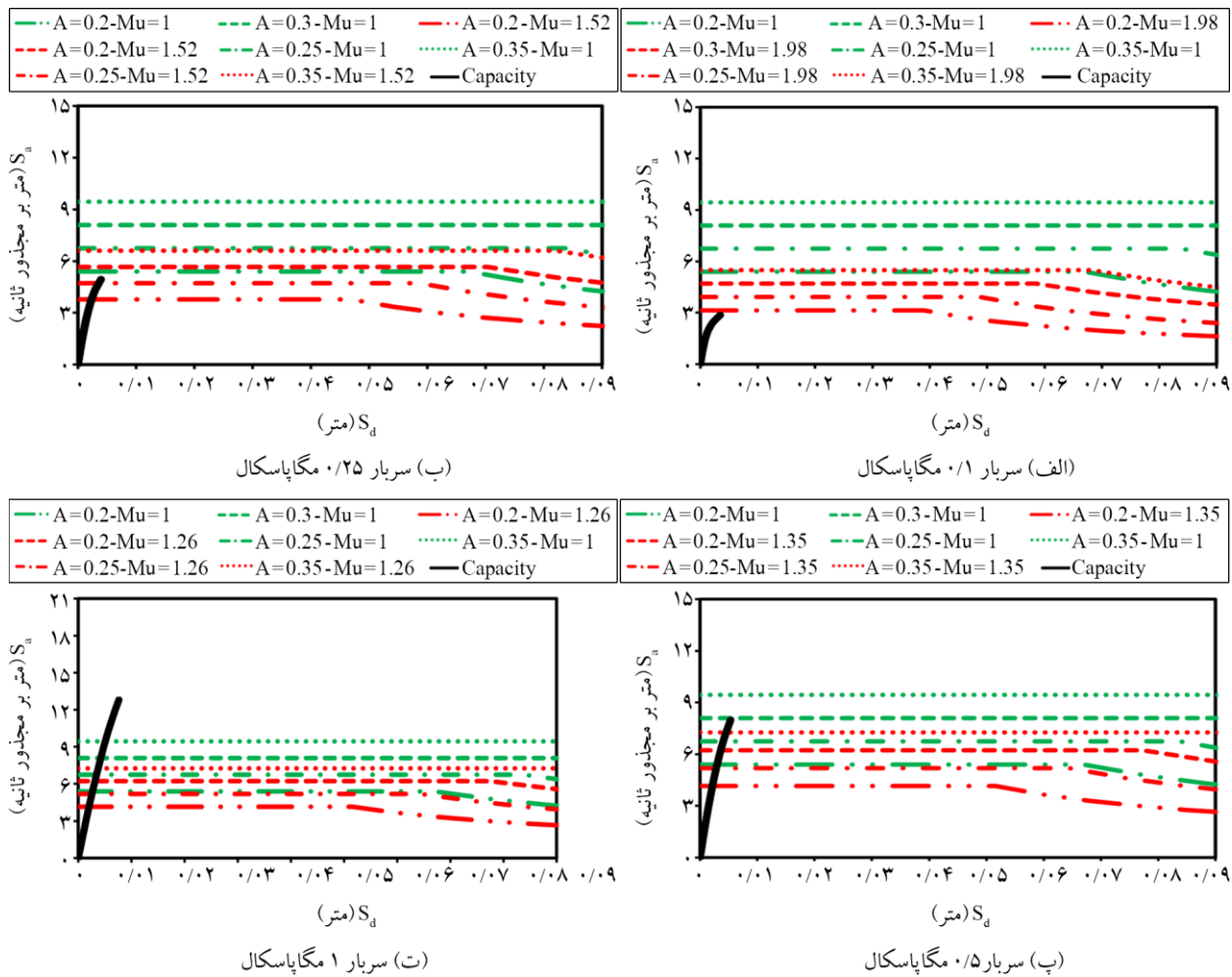


(ت) سربار ۱ مگا پاسکال



(پ) سربار 0/۵ مگا پاسکال

شکل (۷): ارزیابی لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده پوترا بر اساس طیف خطی و غیرخطی زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ و خاک نوع II.



شکل (۸): ارزیابی لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده پوترا بر اساس طیف خطی و غیرخطی زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ و خاک نوع III.

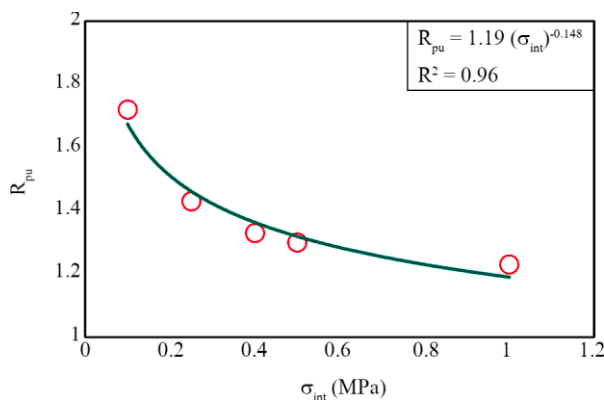
بدین منظور برای در نظر گرفتن وزن یک طبقه از ساختمان با دیوارهای پیرامونی، مقدار آن ۱۰ برابر وزن دیوار پوترا فرض شده است. همان‌طور که از جدول (۴) مشخص است، ضرایب امنیت کوچک‌تر از یک با رنگ خاکستری مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده پوترا، تنها تحت سربار ۱ مگاپاسکال در کلیه مناطق لرزه‌خیز مورد قبول است. همچنین عملکرد لرزه‌ای این دیوار در مناطق با خطر لرزه‌خیزی کم با اعمال حداقل سربار ۰/۵ مگاپاسکال مورد پذیرش است. در سایر موارد این دیوار عملکرد مناسبی ندارد مگر آنکه میزان سربار قائم در بالای دیوار افزایش یابد و یا آنکه دیوار مسلح شود.

بنابراین با توجه به اینکه در پژوهش حاضر قاب ساختمانی به صورت مستقیم مدل‌سازی نشده است، اثرات غیرمستقیم آن شامل تراز طبقاتی جهت محاسبه برش پایه استفاده شده است. این نیرو جانبی (V_{pu}) بر اساس نسبت شتاب پایه ساختگاه (A)، وزن جزء غیر سازه‌ای (W_p)، ضریب شتاب طیفی ($S+1$)، ضریب اهمیت جزء غیر سازه‌ای (I_p)، ارتفاع ساختمان (H)، ارتفاع مرکز جرم جزء غیر سازه‌ای از تراز پایه ساختمان (Z)، ضریب بزرگنمایی (a_p) و رفتار جزء غیر سازه‌ای (R_{pu}) متغیر

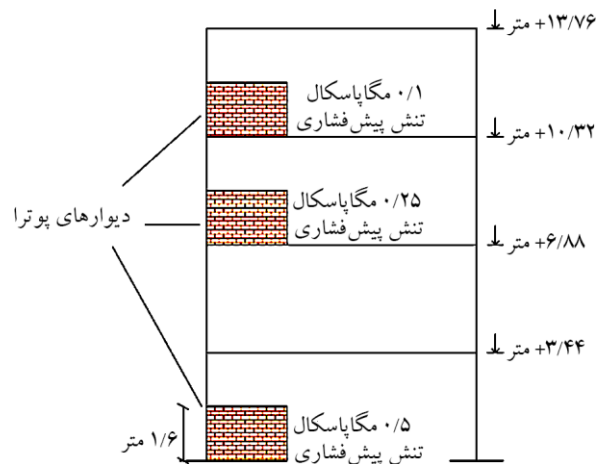
۳-۲- ظرفیت لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای

در این بخش مطابق با آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰

ساختمان چهار طبقه با ارتفاع طبقاتی مطابق با پژوهش گول و همکاران (Gul et al., 2023)، میزان برش پایه در ترازهای مختلف با فرض $I_p = a_p = 1$ و اعمال سربارها به وزن جزء غیر سازه‌ای محاسبه شده است و در جداول (۵) و (۶) گزارش شده است. در ادامه چنانچه نیاز لرزه‌ای دیوار مطابق استاندارد ۲۸۰۰ از ظرفیت لرزه‌ای محاسبه شده مطابق با بخش دوم (شکل (۴)) کمتر باشد، عملکرد آن مطلوب تلقی شده است.



شکل (۹): تغییرات ضریب رفتار جزء غیر سازه‌ای پوترا.



شکل (۱۰): موقعیت دیوار پوترا در ساختمان چهار طبقه.

۳-۳- بحث و مقایسه نتایج

به ازای سربارهای ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ مگاپاسکال که مطابق با سربار یک ساختمان چهار طبقه متداول است و همچنین برای خاک نوع دو و سه استاندارد ۲۸۰۰، در مجموع ۲۴ حالت برای همه لرزه‌خیزی‌ها بررسی شد و مطابق جداول (۴)، (۵) و (۶) نتایج زیر به دست آمد:

بوده و مطابق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود. همچنین مقدار برش پایه (V_{pu}) نباید از مقدار ($V_{pu(min)}$) کمتر و نیازی نیست بیشتر از ($V_{pu(max)}$) در نظر گرفته شود.

$$V_{pu} = \frac{0.4a_p A(S+1)I_p W_p}{R_{pu}} \left(1 + 2 \frac{Z}{H}\right) \quad (2)$$

$$V_{pu(min)} = 0.3a_p A(S+1)I_p W_p \quad (3)$$

$$V_{pu(max)} = 1.6a_p A(S+1)I_p W_p \quad (4)$$

لازم به ذکر است که ضریب رفتار جزء غیر سازه‌ای (R_{pu})

در استاندارد ۲۸۰۰ برای دیوار غیر مسلح بنایی برابر ۱/۵ و برای انواع دیگر دیوار و تیغه‌ها برابر ۲/۵ پیشنهاد شده است. از آنجایی که بلوک‌های قفل شونده خشکه‌چین در ساخت دیوارها تاکنون در ایران استفاده نشده است، ابتدا ضریب رفتار مناسب برای این نوع دیوار مطابق پژوهش‌های پیشین استخراج شده است (Dehghani & Mousavi, 2016). ضریب رفتار (R_{pu}) مطابق با

رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$R_{pu} = \Omega \times R_{\mu} \quad (5)$$

که در آن Ω ضریب اضافه مقاومت و R_{μ} همان ضریب اصلاح پاسخ است. مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ برای دیوارهای بنایی $\Omega = 1$ است. بنابراین مقدار $R_{pu} = R_{\mu}$ استخراج شده و در شکل (۹) ارائه شده است.

بر اساس ضرایب رفتار استخراج شده می‌توان نتیجه گرفت که ضریب رفتار جزء غیر سازه‌ای دیوار پوترا با افزایش سربار (σ_{int}) کاهش می‌یابد و بنابراین پیشنهاد یک عدد ثابت برای محاسبه ضریب رفتار آنها صحیح نیست و بهتر است ضرایب رفتار آنها بر اساس تراز طبقاتی دیوار و مقدار سربار محاسبه شود.

مطابق شکل (۹)، رابطه (۶) برای محاسبه ضریب رفتار دیوار خشکه‌چین قفل شونده پوترا پیشنهاد می‌شود:

$$R_{pu} = \frac{1.19}{(\sigma_{int})^{0.148}} \quad (6)$$

که در آن باید ضریب رفتار در محدوده $1/8 < R_{pu} < 1/2$ باشد. در ادامه مطابق شکل (۱۰)، ضمن در نظر گرفتن یک

جدول (۵): ارزیابی ظرفیت دیوار قفل‌شونده پوترا در ترازهای ارتفاعی مختلف یک ساختمان چهار طبقه (خاک نوع دوم).

میزان سربار	مشخصات ساختگاه	A	S+1	W_p (kN)	R_{pu}	Z/H	V_{pu} (kN)	V_{pu} (min) (kN)	V_{pu} (max) (kN)	V (kN)	عملکرد
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۷/۸۱	۳/۸۴	۲۰/۵۰	۱۱/۹۴	قابل قبول
۰/۱	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۹/۷۶	۴/۸۱	۲۵/۶۳	۱۱/۹۴	قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۱۱/۷۱	۵/۷۷	۳۰/۷۵	۱۱/۹۴	قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۱۳/۶۶	۶/۷۳	۳۵/۸۸	۱۱/۹۴	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۱۷/۶۱	۸/۹۱	۴۷/۵۰	۲۰/۵۵	قابل قبول
۰/۲۵	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۲۲/۰۱	۱۱/۱۳	۵۹/۳۸	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۲۶/۴۱	۱۳/۳۶	۷۱/۲۵	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۳۰/۸۱	۱۵/۵۹	۸۳/۱۳	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۱۹/۸۵	۱۷/۳۴	۹۲/۵۰	۳۳/۲۲	قابل قبول
۰/۵	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۲۴/۸۲	۲۱/۶۸	۱۱۵/۶۳	۳۳/۲۲	قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۲۹/۷۸	۲۶/۰۲	۱۳۸/۷۵	۳۳/۲۲	قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۳۴/۷۴	۳۰/۳۵	۱۶۱/۸۸	۳۳/۲۲	غیر قابل قبول

جدول (۶): ارزیابی ظرفیت دیوار قفل‌شونده پوترا در ترازهای ارتفاعی مختلف یک ساختمان چهار طبقه (خاک نوع سوم).

میزان سربار	مشخصات ساختگاه	A	S+1	W_p (kN)	R_{pu}	Z/H	V_{pu} (kN)	V_{pu} (min) (kN)	V_{pu} (max) (kN)	V (kN)	عملکرد
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۷۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۸/۵۹	۴/۲۳	۲۲/۵۵	۱۱/۹۴	قابل قبول
۰/۱	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۷۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۱۰/۷۴	۵/۲۹	۲۸/۱۹	۱۱/۹۴	قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۷۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۱۲/۸۸	۶/۳۴	۳۳/۸۳	۱۱/۹۴	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۷۵	۲۵/۶۳	۱/۷۲	۰/۸۱	۱۵/۰۳	۷/۴۰	۳۹/۴۷	۱۱/۹۴	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۷۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۱۹/۳۷	۹/۸۰	۵۲/۲۵	۲۰/۵۵	قابل قبول
۰/۲۵	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۷۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۲۴/۲۱	۱۲/۲۵	۶۵/۳۱	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۷۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۲۹/۰۵	۱۴/۷۰	۷۸/۳۸	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۷۵	۵۹/۳۸	۱/۴۳	۰/۵۶	۳۳/۸۹	۱۷/۱۵	۹۱/۴۴	۲۰/۵۵	غیر قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی کم	۰/۲	۲/۷۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۲۱/۸۴	۱۹/۰۸	۱۰۱/۷۵	۳۳/۲۲	قابل قبول
۰/۵	خطر لرزه‌خیزی متوسط	۰/۲۵	۲/۷۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۲۷/۳۰	۲۳/۸۵	۱۲۷/۱۹	۳۳/۲۲	قابل قبول
مگاپاسکال	خطر لرزه‌خیزی زیاد	۰/۳	۲/۷۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۳۲/۷۶	۲۸/۶۲	۱۵۲/۶۳	۳۳/۲۲	قابل قبول
	خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد	۰/۳۵	۲/۷۵	۱۱۵/۶۳	۱/۳	۰/۰۵۸	۳۸/۲۲	۳۳/۳۹	۱۷۸/۰۷	۳۳/۲۲	غیر قابل قبول

برای هر دو خاک در حالت لرزه‌خیزی کم و سربار ۰/۵ مگاپاسکال برای همه حالت‌ها به جز خطر لرزه‌خیزی بالا.

به ازای سربار ۰/۵ مگاپاسکال که برای ساختمان‌هایی است که حداقل سه طبقه روی آن قرار دارد، استفاده از دیوار قفل‌شونده پوترا در همه مناطق لرزه‌خیز به جز خیلی زیاد بلامانع است.

به ازای سربار ۰/۲۵ مگاپاسکال که برای ساختمان‌هایی است

مطابق با روش مبتنی بر جابه‌جایی برای طیف غیرخطی ۱۲ حالت از ۲۴ حالت قابل قبول تلقی شد.

مطابق با روش مبتنی بر نیرو ۱۳ حالت از ۲۴ حالت قابل قبول تلقی شد.

تنها هشت حالت از ۲۴ حالت ممکن توانسته‌اند با استفاده از هر دو روش مبتنی بر جابه‌جایی و نیرو قابل قبول تلقی شوند.

این هشت حالت عبارت است از سربار ۰/۲۵ مگاپاسکال

نوع جزء غیر سازه‌ای صحیح نیست و برای این منظور یک رابطه برای محاسبه ضریب رفتار آن پیشنهاد شد. همچنین عملکرد لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده پوترا به شدت وابسته به میزان سربار و طیف طرح است به طوری که استفاده از این دیوارها در کلیه مناطق لرزه‌خیز ایران با اعمال سربار حداقل ۱ مگاپاسکال بلامانع است. بنابراین با توجه به بالا بودن مقدار سربار ۱ مگاپاسکال، ساخت دیوار بنایی قفل‌شونده خشکه‌چین پوترا در حالت غیرمسلح فقط برای مناطق با لرزه‌خیزی کم و در ترازهای ارتفاعی مختلف ساختمان‌های رایج (به جز طبقه آخر) توصیه می‌شود. همچنین در صورتی که حداقل سه طبقه ساختمان بر روی دیوار ساخته شود، استفاده از این نوع دیوارها برای همه مناطق به جز مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد توصیه می‌شود. در نهایت استفاده از این نوع دیوارها در ساختمان‌های کوتاه توصیه نمی‌شود اما برای ساختمان‌های میان‌مرتبه در طبقات پایین و برای ساختمان‌های بلند در طبقات پایین و میانی استفاده از این دیوار بلامانع به نظر می‌رسد.

References

مراجع

- Akbar, S., Gul, A., Khan, I. U., Haseeb, M., Shahzada, K., Khan, S. W., & Ahmad, N. (2023). Experimental assessment of retrofitted damaged mortarless dry stacked interlocking masonry walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, 108117. doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108117
- Al-Fakih, A., & Al-Osta, M. (2022). Finite element analysis of rubberized concrete interlocking masonry under vertical loading. *Materials*, 15, 2858. doi: 10.3390/ma15082858
- Anand, K.B., & Ramamurthy, K. (2003). Laboratory-based productivity study on alternative masonry systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3), 237-242. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:3(237)
- Casapulla, C., Mousavian, E., Argiento, L., Ceraldi, C., & Bagi, K. (2021). Torsion-shear behaviour at the interfaces of rigid interlocking blocks in masonry assemblages: Experimental investigation and analytical approaches. *Materials and Structures*, 54, Article 134.

که حداقل یک طبقه روی آن قرار دارد، استفاده از دیوار قفل‌شونده پوترا فقط در مناطقی با لرزه‌خیزی کم بلامانع است. - استفاده از دیوار قفل‌شونده پوترا برای طبقه آخر مجاز نیست. - برای محاسبه ضریب رفتار دیوار قفل‌شونده پوترا از رابطه $R_{pu} = 1.19 / (\sigma_{int})^{0.148}$ استفاده شود که در آن $1/8 < R_{pu} < 1/2$. عملکرد دیوار قفل‌شونده پوترا با ابعاد مورد مطالعه در مناطق با لرزه‌خیزی کم در تمامی طبقات ساختمان می‌تواند بلامانع باشد. این در حالی است که در مناطق با خطر لرزه‌خیزی متوسط و زیاد ایران، استفاده از دیوار قفل‌شونده پوترا تنها در طبقات اول پیشنهاد شده و در طبقات بالاتر عملکرد آن مورد قبول نیست. این موضوع بار دیگر اهمیت میزان سربار در عملکرد لرزه‌ای دیوار قفل‌شونده پوترا را بیان می‌نماید. به عبارت دیگر هرچه دیوار پوترا در طبقات بالاتری از ساختمان قرار گیرد به علت کم شدن میزان سربار، ظرفیت آن کاهش می‌یابد و به نظر می‌رسد استفاده از این دیوارها در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد و خیلی زیاد و همچنین در دو طبقه آخر به صورت غیرمسلح مناسب نیست.

۴- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر دیوارهای بنایی قفل‌شونده خشکه‌چین از جمله پوترا به علت سرعت بالای اجرا، کاهش هزینه‌های ساخت و عدم نیاز به نیروی متخصص؛ به عنوان جای‌گزینی مناسب برای دیوارهای بنایی بوده و برای این منظور استفاده از آنها با استقبال فراوانی در نقاط مختلف جهان مواجه شده است. با توجه به لرزه‌خیزی بالای کشور ایران، بررسی رفتار این نوع دیوار جهت استفاده در صنعت ساخت‌وساز بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین در این پژوهش به ارزیابی لرزه‌ای نوعی دیوار قفل‌شونده با نام پوترا تحت سربارهای مختلف با رویکردهای مبتنی بر جابه‌جایی با طیف غیرخطی و با رویکرد مبتنی بر نیرو مطابق ضوابط اجزای غیر سازه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ برای زلزله ۴۷۵ ساله پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که ضریب رفتار دیوار پوترا با افزایش سربار کاهش یافته و استفاده از یک ضریب رفتار ثابت برای این

ing; SEE9, Tehran, Iran.

Moradi, N., Yazdani, M., & Hashemi, S. J. (2024b). Seismic assessment of Putra interlocking masonry wall using pushover analysis. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering; SEE9*, Tehran, Iran.

Moradi, N., Yazdani, M., Janbozorgi, F., & Hashemi, S. J. (2024). In-plane seismic performance of historical masonry walls with various brick bond patterns using micro-modeling approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(6), 4863-4876. doi: 10.1007/s42107-024-01085-x

Nor, N. A., Jaafar, M., & Alwathaf, A. (2011). Structural behavior of mortarless interlocking load bearing hollow block wall panel under out-of-plane loading. *Advances in Structural Engineering*, 14, 1185. doi: 10.1260/1369-4332.14.6.1185

Safiee, N. A., Mohd Nasir, N. A., Ashour, A. F., & Abu Bakar, N. (2018). Behaviour of interlocking mortarless hollow block walls under in-plane loading. *Australian Journal of Structural Engineering*, 19(2), 87-95. doi: 10.1080/13287982.2018.1433489

Standard No. 2800, t. e. *Interpretation of "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Building (Standard No. 2800, 4th Edition)"*.

Xie, G., Zhang, X., Hao, H., Shi, T., Cui, L., & Thomas, J. (2023). Behaviour of reinforced mortarless interlocking brick wall under cyclic loading. *Engineering Structures*, 283, 115890. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115890

Yazdani, M., & Zirakbash, M. (2024). Assessment of masonry arch bridges retrofitted by sprayed concrete under in-plane cyclic loading. *Structural Monitoring and Maintenance*, 11, 57-70. doi: 10.12989/smm.2024.11.1.057

doi: 10.1617/s11527-021-01721-x

Dehghani, E., & Mousavi, S. O. (2016). Study of the modification factor of concrete bridges with Elastomeric Rubber Bearing (ERB) and Lead Rubber Bearing (LRB). *Civil Infrastructure Researches*, 2(1), 13-24. doi: 10.22091/cer.2015.750

Doran, B., Karslioglu, M., Aslan, Z., & Vatansever, C. (2022). Experimental and numerical investigation of unreinforced masonry walls with and without opening. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-22. doi: 10.1080/15583058.2022.2080611

Dorji, S., Derakhshan, H., Thambiratnam, D. P., Zahra, T., & Mohyeddin, A. (2023). Behaviour and material properties of versaloc semi-interlocking mortarless masonry. *Materials and Structures*, 56(1), 17. doi: 10.1617/s11527-023-02102-2

Gul, A., Alam, B., Khan, I. U., Shah, S. A. A., Khan, S. W., & Shahzada, K. (2023). Improving seismic capacity of dry stacked interlocking masonry structure through confinement at corners. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107710. doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107710

Jaafar, M., Alwathaf, A., Thanoon, W., Noorzai, J., & Abdulkadir, M. (2006). Behaviour of interlocking mortarless block masonry. *Construction Materials*, 159, 111-117. doi: 10.1680/coma.2006.159.3.111

Kintingu, S. H. (2009). *Design of Interlocking Bricks for Enhanced Wall Construction, Flexibility, Alignment Accuracy and Load Bearing*. University of Warwick. <https://books.google.com/books?id=AD8XjwEACAAJ>

Magenes, G., & Calvi, G. M. (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(11), 1091-1112. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1091::AID-EQE693>3.0.CO;2-6

Moradi, N., Yazdani, M., & Hashemi, S. (2025). Numerical study of the seismic performance of interlocking mortarless masonry walls using the nonlinear static method. *Structural Engineering and Mechanics*, 93, 147-164. doi: 10.12989/sem.2025.93.2.147

Moradi, N., Yazdani, M., & Hashemi, S. J. (2024a). Nonlinear static analysis of Putra interlocking masonry wall using micro-modeling approach. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineer-*

واژه‌نامه

Tanzanian	۱- تانزانین
Putra	۲- پوترا
Eco	۳- اکو
Ferrocement	۴- سیم‌سیمان
Stretcher	۵- راسته
Half	۶- نیمه
Corner	۷- گوشه

۸- المان چسبندگی Cohesive Element
 ۹- حل گر ضمنی Implicit Solver

فهرست علائم

t	زمان:
Δt	نمو زمان:
Γ	ضریب تبدیل سیستم چند درجه آزادی به یک درجه آزادی:
m_i	جرم مؤثر هر گره متناظر با مود i ام:
ϕ_i	مؤلفه بردار شکل متناظر با مود i ام:
V_y	مقاومت تسلیم:
δ_y	جابه جایی تسلیم:
V_u	مقاومت نهایی:
δ_m	جابه جایی نهایی:
K_e	سختی جانبی مؤثر:
μ	شکل پذیری:
E_D	انرژی مستهلک شده:
R_μ	ضریب اصلاح پاسخ:
V_{pu}	نیروی جانبی زلزله:
A	نسبت شتاب پایه ساختگاه:
W_p	وزن جزء غیر سازه‌ای:
S+I	ضریب شتاب طیفی:
I_p	ضریب اهمیت جزء غیر سازه‌ای:
H	ارتفاع ساختمان:
Z	ارتفاع مرکز جرم جزء غیر سازه‌ای از تراز پایه ساختمان:
a_p	ضریب بزرگنمایی:
R_{pu}	ضریب رفتار جزء غیر سازه‌ای:
$V_{pu}(\min)$	حداقل نیروی جانبی زلزله:
$V_{pu}(\max)$	حداکثر نیروی جانبی زلزله:
Ω	ضریب اضافه مقاومت:

Seismic Performance Assessment of Non-Structural Components by Different Approaches: Putra Interlocking Mortarless Wall

Nima Moradi¹ and Mahdi Yazdani^{2*}

1. M.Sc. Graduate of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
2. Associate Professor of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran, *Corresponding Author, email: m-yazdani@araku.ac.ir

In recent years, interlocking mortarless masonry walls have been extensively implemented in different parts of the world as internal or external walls in buildings. Not only the interlocking system of these walls accelerates the speed of construction due to the self-aligning feature of bricks/blocks and the elimination of mortar layers but also reduces the need for skilled masons. These exceptional characteristics of interlocking walls have made them cost-effective and eco-friendly and led them to be a suitable replacement for typical masonry walls. Since the seismic performance of the interlocking systems has not been investigated sufficiently by researchers, studying and analyzing their behavior under seismic excitations is extremely vital for future construction. In this research, the seismic performance of an interlocking wall called “Putra” has been evaluated based on different approaches and using a 475-year return period earthquake spectrum of Standard 2800. Numerical three-dimensional micro-scale modeling has been utilized for accurate simulation of mortarless joints and interlocking blocks. After the validation process of numerical modeling in the ABAQUS finite element package, the in-plane load-carrying capacity of interlocking masonry walls subjected to combined vertical and lateral loadings has been conducted using nonlinear static analysis.

To consider the effect of different story levels, the amount of pre-compressive loads that are applied to masonry walls in different story levels of typical buildings has been considered as dead loads in the analyses (0.5 MPa for the first story, 0.25 MPa for the third story, and 0.1 MPa for the fourth story). The effective stiffness, ultimate strength, maximum displacement, dissipated energy, and ductility factor of the Putra interlocking wall under different vertical loads have been derived from bilinear graphs and discussed. Moreover, since the behavior factor of interlocking walls has not been evaluated in studies so far, the behavior factor of the Putra wall has been derived under different vertical loads for further calculations. Then, based on the Iranian seismic design code for non-structural components of buildings, the seismic performance of walls has been conducted using the elastic and inelastic spectra through the displacement-based and force-based methods. It was observed that according to the displacement-based method, 12 out of 24 cases were acceptable for construction, whereas according to the force-based method, 13 out of 24 cases were confirmed, and overall, only 8 cases got the acceptance for both methods. Results demonstrated that the seismic performance of interlocking mortarless walls strongly depends on the intensity of vertical load and inelastic response spectra. It also revealed that the interlocking Putra wall can be constructed in different seismic areas of Iran under 1 MPa pre-compressive stress. Since the 1 MPa vertical load is generally intense, it is recommended to use unreinforced Putra interlocking mortarless masonry walls in different story levels of a typical building (except the last story) in low seismicity areas of Iran. Additionally, the Putra interlocking walls can be constructed in different parts of Iran except in very-high seismic regions, provided that a three-story building has to be constructed on the story where the Putra interlocking walls have been situated. Totally, it is not recommended to use these walls in low-rise buildings; however, it seems that they can be utilized in lower stories of mid-rise buildings or in lower and middle stories of high-rise buildings.

Keywords: Interlocking Putra Wall; Mortarless Joint; Nonlinear Static Analysis; Micro-Scale Modeling; Seismic Capacity; Non-Structural Component Behavior.