

ارزیابی عملکرد طاق‌های بنایی سنتی غیر مسلح تحت بارهای جانبی

فرشاد همائی^{۱*}، عرفان وثوقی رهبری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

Email: f.homaei@kgut.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۱۲

چکیده

امروزه حفظ و نگهداری از سازه‌های بنایی در مناطق تاریخی، اهمیت زیادی پیدا کرده است. بخش قابل توجهی از این مسئله ناشی از کاربرد مصالح بنایی غیرمسلح در ساخت بسیاری از این گونه از سازه‌ها است. در کشور ایران، بیشتر بناهای تاریخی نیز با استفاده از مصالح بنایی و با معماری خاص این منطقه احداث شده‌اند. سازه‌های موجود، بیشتر شامل دیوارهای بنایی پیوسته و گاهی با بازشوهای قوسی شکل هستند. در این گونه از دیوارها، سازه شامل دو پایه و یک قوس در بالای آن است. از آنجایی که ایران در منطقه لرزه خیزی واقع شده است، بررسی عملکرد این سازه‌ها در برابر زلزله و بارهای جانبی، اهمیت زیادی دارد. از این رو، در این مقاله، به بررسی عددی رفتار درون صفحه طاق‌های آجری سنتی در مقابل بارهای جانبی پرداخته می‌شود. در این راستا، مدل عددی از نمونه‌ای از طاق‌های موجود (در بازار مسگرهای کرمان)، تحت شدت‌های بار پیش فشرده سازی (ثقلی) مختلف قرار گرفته و سپس، تحت بار افزون و به صورت جانبی (تحلیل پوش‌آور) تحلیل می‌شود و پاسخ نیروی برشی-تغییر مکان آن استخراج می‌شود. سپس نمودار به دست آمده دوخطی شده و بر اساس آن، نقاط عملکردی آن استخراج می‌شوند. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل مشاهده شد که با افزایش شدت بار ثقلی، ظرفیت برشی بیشینه دیوارها نیز افزایش پیدا می‌کند. اما افزایش بیش از حد بار ثقلی منجر به آسیب دیدگی طاق تحت اثر بار ثقلی شده که به موجب آن، سیر افزایشی ظرفیت برشی روند معکوس به خود می‌گیرد. همچنین، الگوی توزیع ترک و خسارت در طاق‌ها کمابیش مشابه هم بوده اما میزان بازشدگی ترک‌ها به شدت از میزان بار ثقلی وارد بر سازه دیوار تأثیر می‌پذیرد.

واژگان کلیدی: دیوارهای بنایی غیر مسلح، طاق بنایی، تحلیل بار افزون جانبی، رفتار درون صفحه، شدت بار پیش فشرده سازی، ظرفیت برشی

۱. مقدمه

موجود، عموماً دیوارهای باربر وظیفه تحمل بارهای ثقلی و جانبی را بر عهده دارند. با توجه به شاخصه معماری این مناطق، بازشوهای بکار رفته در این دیوارها گاهی با فرم طاق قوسی شکل آراسته می‌شود. طاق‌های آجری در بسیاری از

کشور ایران از جمله مناطقی با فرهنگ و تاریخ کهن است. در این منطقه و در بسیاری از شهرهای تاریخی آن، فراوانی سازه‌های بنایی، به وفور به چشم می‌خورد. در سازه‌های بنایی

مناطق ایران از جمله یزد، اصفهان و کرمان دیده می‌شوند که زیبایی ظاهری چشم نوازی دارند. مصالح به کار رفته در بسیاری از این سازه‌ها متشکل از آجر رسی و ملات است. فلات ایران از جمله مناطق لرزه‌خیز بوده که هر ساله چندین زلزله قابل توجه در اقصی نقاط آن رخ می‌دهد. در این بین، سازه‌های بنایی غیرمسلح (از جمله سازه‌های تاریخی) می‌توانند تحت اثر زلزله‌های رخ داده دچار آسیب دیدگی شوند. از این رو، لازم است تا مطالعات جامعی در خصوص چگونگی عملکرد این گونه از سازه‌ها در برابر بارهای جانبی وارد بر آن‌ها صورت پذیرد. در این راستا، مطالعات چندی روی رفتار طاق‌های بنایی غیرمسلح توسط پژوهشگران صورت پذیرفته است.

هولادر و مسیا [1] رفتار برشی درون صفحه‌ای دیوارهای بنایی غیرمسلح را که در آن‌ها طاق با دهانه قوسی نیم‌دایره‌ای وجود داشت، در قالب مدل‌سازی و تحلیل عددی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که هندسه دیوار و بازشوی آن، بر مودهای شکست و ظرفیت مقاومت باربری جانبی دیوارها تأثیر قابل توجهی دارد. کریمی و همکاران [2] در مطالعه‌ای، دو دیوار بنایی بدون بازشو و دیوار بنایی قوسی شکل را تحت بارهای تناوبی چرخه‌ای با هم مقایسه کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، منحنی پاسخ چرخه‌ای دیوار با بازشوی قوسی شکل، باریک‌تر از نمونه دیوار فاقد بازشو بود. همچنین دیوار فاقد بازشو نمایشگر اتلاف انرژی بیشتری نسبت به نمونه با بازشوی قوسی شکل بود. نتایج نشان دهنده ضعف دیوار بنایی با بازشو نسبت به دیوار بنایی بدون بازشو هستند. هوانگ و همکاران [3] در مطالعه‌ای، روابط عددی برای پیش‌بینی ظرفیت جانبی درون صفحه دیوارهای بنایی غیرمسلح دارای بازشو پیشنهاد کردند. در مدل‌های پیشنهادی، آثار بازشوها بر حالت‌های شکست و ظرفیت جانبی دیوارها نشان داده شده است. مشاهده شد که مدل‌ها مبتنی بر اصول الاستیسیته و پلاستیسیته بتن، برای تعیین ظرفیت باربری جانبی درون صفحه دیوارهای بنایی غیر مسلح که توسط حالت‌های مختلف شکست کنترل می‌شود، قابل استفاده هستند. بلقیات و همکاران [4] در یک مطالعه عددی به شبیه‌سازی رفتار

دیوارهای بنایی محصور شده، تحت آنالیز پوش‌آور پرداختند. هدف از این مطالعه پیشنهاد چند مدل تحلیلی و تأکید بر کارایی مدل عددی اتخاذ شده برای شبیه‌سازی رفتار دیوارهای بنایی تحت تحلیل‌های پوش‌آور بود. پیرا و همکاران [5] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار درون صفحه دیوارهای بنایی از طریق انجام آزمایش روی نمونه‌هایی تحت شرایط بارگذاری مختلف و امکان کالیبراسیون مدل‌های عددی غیرخطی پرداختند. مشاهده شد که مدل‌های کالیبره شده امکان مطالعات پارامتریک جامع در مورد هندسه، شرایط مرزی و خواص مکانیکی دیوارهای بنایی را فراهم می‌کنند. فراهانی و همکاران [6] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی مقاوم‌سازی شده به روش هسته مرکز با در نظر گرفتن میله‌های مهارشده و مهارنشده در فونداسیون و پیکربندی‌های مختلف مدل و همچنین اضافه بار و ابعاد میله و قطر حفرات مختلف پرداختند و تأثیر این پارامترها را بر مقاومت برشی درون صفحه، سختی و شکل‌پذیری آن‌ها بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که روابط پیشنهادی می‌تواند مقاومت برشی و سختی دیوارهای مقاوم‌سازی شده را با دقت قابل قبولی نشان دهد.

مطالعات آزمایشگاهی در زمینه رفتار دیوارهای بنایی غیرمسلح دارای بازشوی طاقی شکل نیز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. لورنزو و همکاران [7] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار دیوارهای با بازشوی قوسی شکل دو بعدی و سه بعدی روی میز لرزه‌ای پرداختند. هدف از این کار، بررسی عملکرد طاق‌ها در برابر بار زلزله و همچنین بررسی مطالعاتی که در این خصوص انجام شده است، بود. نیکوروش و سلطانی محمدی [8] یک بررسی آزمایشگاهی و عددی روی رفتار درون صفحه‌ای طاق‌های قوسی، قبل و بعد از مقاوم‌سازی به روش هسته مرکزی ارائه کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار مقاومت جانبی نهایی و بهبود شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای از جمله شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بود. ژانگ و همکاران [9] در مطالعه‌ای به بررسی عددی و آزمایشگاهی منحنی بارگذاری چرخه‌ای دیوارهای بنایی مقاوم‌سازی شده با پنل‌های بتن مسلح با اتصالات مختلف پرداختند. نتایج بهبود شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای شامل مقاومت برشی، سختی و

بازشوی طاق دارای ارتفاع ۶/۳۲۳ متر و طول دهانه ۳/۸۹۰ است.

شکل ۱. شمای کلی طاق مورد مطالعه

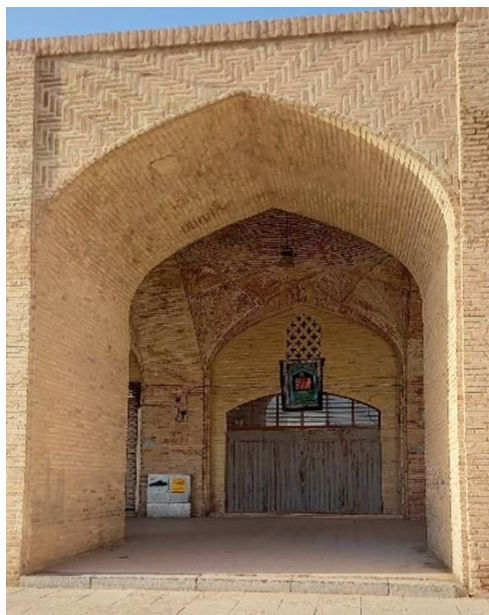


Fig. 1. The view of the studied arch

۳. مدل سازی

برای مدل سازی عددی، ابعاد هندسی طاق مورد مطالعه در نرم افزار STKO وارد شد. در این راستا، از روش میکرو مدلسازی استفاده شد که در آن، هندسه آجر و ملات به صورت جداگانه در مدل عددی مدل می شود (شکل ۲). با توجه به محدودیت برداشت رفتار مصالح از سازه موجود (با توجه به قدمت تاریخی آن) سعی شد تا مشخصات مصالح بکار رفته در مدل عددی به لحاظ جنس مصالح، مشابه مصالح بکار رفته در سازه مورد نظر باشد. در این خصوص، مشخصات مصالح آجر و ملات از مطالعه کاماتا و هکاران [13] استخراج شد (جدول ۱). در مطالعه مذکور، از آجرهای رسی و نیز ملات ماسه آهک با نسبت حجمی ۳ به ۱ برای ساخت و بارگذاری چرخه ای دیوارهای بنایی در یک سازه دو طبقه استفاده شد.

لازم به ذکر است که مرز بین طاق میانی و دو ستون قرار گرفته در دو طرف، اتصال فقط با لایه ملات صورت گرفته است. طبق مشاهدات میدانی که از زیر سازه طاق انجام شد، چینش آجرها در راستای عمود بر صفحه به درستی در امتداد آنچه که

ظرفیت اتلاف انرژی را نشان داد. تارگه و همکاران [10] در یک مطالعه به بررسی آزمایشگاهی رفتار چرخه ای درون صفحه دیوارهای بنایی ساخته شده با آجرهای توخالی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع سازه با آجرهای توخالی به عنوان دیوارهای باربر باید ممنوع شود. پرادهن و همکاران [11] در مطالعه ای به بررسی رفتار خارج از صفحه دیوارهای بنایی تقویت نشده پرداختند. بر اساس این مطالعه، نقاط اصلی که نیازمند آزمایش های بیشتر هستند نیز شناسایی و توصیه شد. شین و همکاران [12] در مطالعه ای به بررسی اثر بخشی روش تقویت تزییق دوغاب فروسیمان به دیوارهای بنایی آسیب دیده پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی در اثر این نوع مقاوم سازی افزایش یافت. مطالعه حاضر، به بررسی عملکرد دیوارهای آجری با بازشوی قوسی شکل، در برابر بارهای جانبی اختصاص یافته است. در این راستا، مدل عددی از یک نمونه از دیوارهای موجود که در بازار مسگرهای کرمان وجود دارد در نرم افزار ایجاد می شود. مدل در ابتدا تحت اثر شدت پیش فشردگی ناشی از بار ثقلی تحلیل شده و سپس تحت اثر الگوی بار جانبی، نمودار نیروی برشی-تغییر مکان بام آن استخراج می شود. به منظور تعیین تأثیر شدت بار ثقلی بر ظرفیت جانبی دیوار، مقادیر بار ثقلی از ۰/۰ مگاپاسکال تا ۰/۲ مگاپاسکال (متناظر با بیشترین شدت قابل تحمل برای دیوار) تغییر داده شد. سپس مدل دوخطی نمودار پوش ظرفیت دیوارها استخراج و در خصوص ظرفیت نیروی برشی و جابه جایی متناظر با آن در نقاط عملکردی مورد نظر، بحث شد. در نهایت، الگوی ترک ها در دیوارها استخراج و مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

۲. معرفی طاق مورد مطالعه

مدل های مورد مطالعه در این مقاله، بر اساس ابعاد هندسی برداشت شده از مجموعه طاق های بنایی در میدان مرکزی بازار مسگرهای شهر کرمان، ایجاد شدند (شکل ۱). مطابق هندسه نمایش داده شده در شکل ۲، دیوار مورد مطالعه دارای ارتفاع ۷/۲۶۶ متر و پهنای کلی ۶/۹۱۰ متر است. در این دیوار،

این راستا، ابتدا مدل عددی تحت اثر بار ثقلی قرار گرفته و سپس به صورت یکنواخت و به صورت جانبی، پوش داده می‌شود. در هر مرحله از اعمال تغییر مکان به قسمت فوقانی دیوار، میزان عکس‌العمل تکیه‌گاهی آن محاسبه شده و بر اساس آن، نمودار ظرفیت نیروی برشی در برابر متوسط تغییر مکان بام آن استخراج می‌شود. لازم به ذکر است که، به منظور ارزیابی تأثیر شدت بار ثقلی وارد بر سازه دیوار و روی ظرفیت جانبی آن، شدت بار ثقلی از صفر مگاپاسکال تا ۰/۲ مگاپاسکال، و با گام افزایشی ۰/۰۵ مگاپاسکال تغییر داده شد.

پس از استخراج منحنی نیروی برشی در برابر متوسط تغییر مکان بام، به منظور کمی‌سازی نتایج، منحنی‌های ظرفیت به دست آمده، با روش پیشنهاد شده توسط تیمازوویچ [14] به صورت دو خطی، تقریب زده شدند (

شکل ۳). مطابق روش پیشنهادی، با مشخص کردن نقطه متناظر با حد ترک خوردگی اولیه دیوار (Δ_{cr} , V_{cr})، شیب خط واصل بین مبدا و نقطه مذکور، سختی مؤثر دیوار (K_e) را به دست می‌دهد:

$$K_e = \frac{V_{cr}}{\Delta_{cr}} \quad (1)$$

همچنین نقطه متناظر با بیشینه ظرفیت برشی دیوار (Δ_{Vmax} , V_{max})، بیشترین مقاومت دیوار و جابه‌جایی متناظر با آن را به دست می‌دهد. در نمودار به دست آمده، نقطه متناظر با (Δ_{max} , $V_{\Delta max}$)، نشان‌دهنده مقاومت نهایی دیوار و جابه‌جایی متناظر با آن (قبل از ناپایداری کلی دیوار) است که در نمودار ایده‌آل شده دوخطی، مقاومت نهایی ایده‌آل با (V_u) نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که، برای دو خطی کردن منحنی پوش، باید مساحت نمودار دو خطی و مساحت نموداری که از تحلیل به دست آمده (A_{env}) با هم یکی شود. در این خصوص، پس از نوشتن تساوی بین روابط مربوط به هر نمودار، مقاومت V_u به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_u = K_e \left(\Delta_{max} - \sqrt{\Delta_{max}^2 - \frac{2A_{env}}{K_e}} \right) \quad (2)$$

همچنین نقطه متناظر با تصویر خط دوم نمودار دو خطی روی نمودار ظرفیت سازه در نقطه متناظر با $0.8V_{max}$ ، جابه‌جایی

در صفحه بیرونی انجام شده است. از این رو احتمال می‌رود که در مرز مذکور نیز در راستای عمود بر صفحه طاق نیز امتداد داشته باشد.

در مدل نرم‌افزاری، مدل طاق به صورت دو بعدی صفحه‌ای و با استفاده از المان‌های چهار گرهی quad با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر و به صورت plane stress مدل‌سازی شدند. پس از ساخت هندسه مدل، شرایط مرزی پای مدل به صورت گیردار کامل در برابر حرکت انتقالی در نظر گرفته شد. همچنین شدت بار ثقلی به صورت بار گسترده یکنواخت در بالای طاق (قسمت بام آن) وارد شد. در نهایت، به منظور انجام تحلیل بار افزون، تغییر مکان جانبی با الگوی باری مشابه نمایش داده شده در شکل ۲ به مدل وارد شد.

جدول ۱. مشخصات مصالح آجر و ملات

Properties	Symbol	Brick	Mortar
Young Modulus	E [N/mm ²]	6000	300
Poisson's Ratio	ν [-]	0.20	0.20
Uniaxial Tension Strength	σ_t [N/mm ²]	1.22	0.04
Tensile Fracture Energy	Gt [N/mm]	0.05	0.06
Compression Elastic Limit	σ_0 [N/mm ²]	2.0	2.0
Compressive Peak Strength	σ_p [N/mm ²]	6.2	6.2
Compressive Residual Strength	σ_r [N/mm ²]	2.0	1.8
Compressive Fracture Energy	Gc [N/mm]	10.0	50.0
Ultimate Strain	ϵ_p [-]	0.02	0.06

Table 1. Material properties of brick & mortar

شکل ۲. مدل عددی طاق مورد مطالعه و ابعاد هندسی طاق (بر حسب میلی‌متر) و نحوه اعمال بارهای پیش فشردگی ثقلی و جانبی در نرم‌افزار

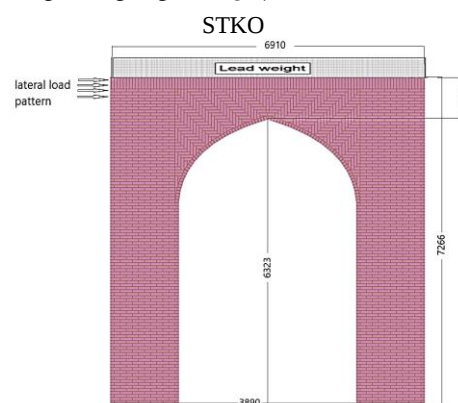


Fig. 2. Numerical model of the studied arch and arch dimensions (in mm), and applying the pre-compression gravity and lateral loads in STKO software

۴. روش تحلیل و ارزیابی

ارزیابی مدل‌های عددی از دیوار بنایی غیرمسلح دارای بازشوی قوسی شکل با استفاده از تحلیل بار افزون صورت می‌پذیرد. در

شکل ۴. نمودار ظرفیت دیوارها در شدت بارهای پیش فشردگی ثقیلی

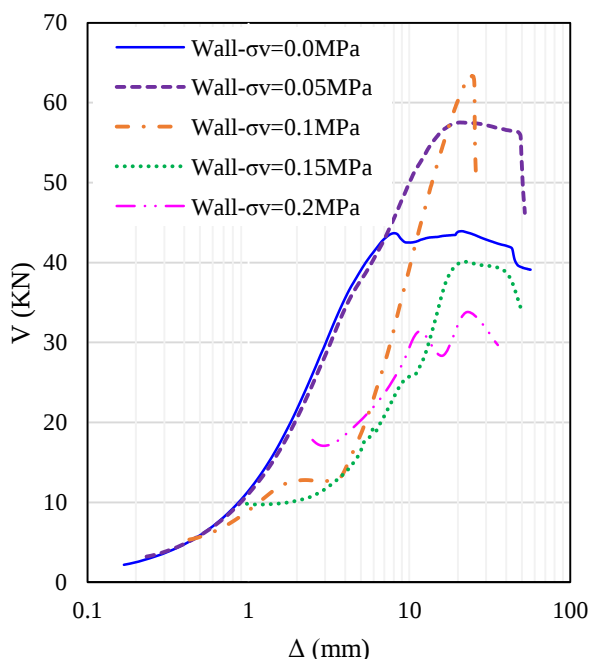


Fig. 4. The capacity curves of the walls for the pre-compression intensity from gravity loads

جدول ۲. مقاومت برشی، سختی مؤثر و ظرفیت شکل پذیری دیوارها

تحت شدت پیش فشردگی مختلف

σ_v (MPa)	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20
V_{max} (MPa)	8.20	17.57	26.62	34.38	18.92
K_e (MPa)	9812.52	6783.67	3825.36	2329.6	3446.31
μ	28.175	6.325	1.64	2.785	3.655

Table 2. Shear capacity, effective stiffness and ductility capacity of walls under various pre-compression intensities

لازم به ذکر است که، با افزایش بار ثقیلی از ۱/۰ مگاپاسکال تا ۲/۰ مگاپاسکال، بخش عمده‌ای از ظرفیت دیوار (به ویژه در قسمت قوس آن) صرف تحمل بار ثقیلی شده و از این رو ظرفیت جانبی آن در مقایسه با سایر حالات کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. اطلاعات کلی مربوط به مقاومت و سختی معادل و همچنین شکل پذیری مربوط به دیوارها تحت بار ثقیلی مختلف در جدول (۲) ارائه شده است که بررسی دقیق‌تر هر کدام از آن‌ها در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

سازه در ظرفیت نهایی آن (Δ_u) را به دست می‌دهد. در نتیجه، مطابق تعریف، ظرفیت شکل‌پذیری دیوار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_u = \frac{\Delta_u}{\Delta_e} \quad (3)$$

که در آن Δ_e معرف جابه‌جایی متناظر با حد تسلیم در منحنی دوخطی است:

$$\Delta_e = \frac{V_u}{K_e} \quad (4)$$

شکل ۳. نمودار ظرفیت دیوار و چگونگی دوخطی سازی آن

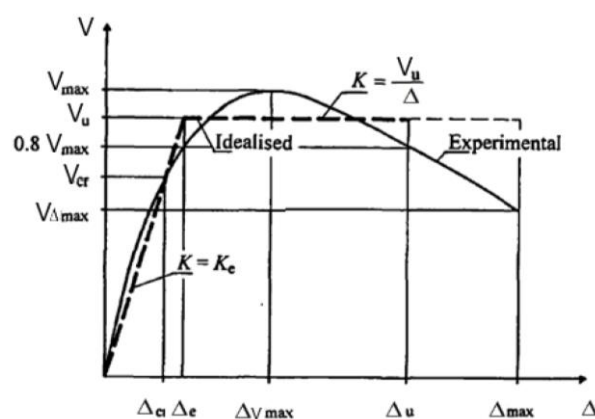


Fig. 3. The capacity curve of the wall and the procedure for bilinearizing it

۵. بحث و بررسی بر روی نتایج

۵-۱- بررسی کلی نمودار برش در برابر تغییر مکان

در شکل ۴، نمودار ظرفیت برشی در برابر متوسط تغییر مکان بام سازه برای دیوارهای مورد مطالعه تحت شدت بارهای ثقیلی مورد نظر، نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که به منظور نمایش بهتر، محور افقی نمودار در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. همان‌گونه که از نمای کلی شکل برمی‌آید، دیوار فاقد بار ثقیلی ($\sigma_v=0.0\text{MPa}$) در مقایسه با سایر دیوارها، جابه‌جایی بیشتری در نقطه بیشینه ظرفیت برشی تجربه کرده است. با این حال، ظرفیت برشی آن نسبت به دیوارهای با شدت بار ثقیلی تا ۱/۰ مگاپاسکال کمتر بوده اما برای بارهای با شدت بیشتر، افزایش یافته است.

۲-۵- مقایسه ظرفیت برشی متناظر با اولین ترک خوردگی دیوارها (V_{cr}) و جابه‌جایی متناظر با آن (Δ_{cr})

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۴، در نقطه‌ای که اولین ترک‌ها تشکیل می‌شوند، مشاهده می‌شود که ظرفیت برشی دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۰۵ و ۰/۱ مگاپاسکال، در حدود ۴۵ درصد بیشتر از ظرفیت برشی دیوار بدون بار ثقلی است. در این حالت، جابه‌جایی متناظر با این نقطه نیز نسبت به جابه‌جایی در دیوار بدون بار ثقلی برای دو دیوار مورد بحث به ترتیب ۹۰ درصد و ۲۷۰ درصد افزایش داشته است. با این حال، بررسی نمودار ظرفیت دیوارها با شدت بار ثقلی بیشتر حاکی از عدم افزایش ظرفیت برشی است. در این راستا، ظرفیت برشی دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۱۵ مگاپاسکال، ۱۲ درصد کمتر از دیوار بدون بار ثقلی است اما جابه‌جایی متناظر با این نقطه نسبت به جابه‌جایی دیوار بدون بار ثقلی حدود ۲۷۰ درصد افزایش داشته است. همچنین برای دیوار با شدت بار ثقلی به اندازه ۰/۲ مگاپاسکال، نسبت ظرفیت برشی در نقطه شروع ترک‌ها نسبت به دیوار بدون بار ثقلی با کاهش ۲۳ درصدی همراه است. که نشان دهنده این است که با افزایش بار ثقلی تا ۰/۱۵ مگاپاسکال، ظرفیت برشی نیز افزایش می‌یابد اما از بار ثقلی ۰/۱۵ مگاپاسکال به بعد روند معکوس دارد.

۳-۵- مقایسه بیشترین ظرفیت برشی دیوارها (V_{max}) و جابه‌جایی متناظر با آن (Δ_{Vmax})

با مراجعه به نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین ظرفیت برشی دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۰۵ مگاپاسکال به دلیل افزایش بار ثقلی روی سازه، ۳۱ درصد بیشتر از بیشترین ظرفیت برشی دیوار بدون بار ثقلی است و جابه‌جایی متناظر با این نقطه نسبت به جابه‌جایی دیوار بدون بار ثقلی ۱/۶ درصد کاهش یافته است. برای دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۱ مگاپاسکال نیز بیشترین ظرفیت برشی دیوار نسبت به دیوار بدون بار ثقلی ۴۴ درصد افزایش داشته که افزایش قابل ملاحظه‌ای است. همچنین جابه‌جایی متناظر با این نقطه نسبت به دیوار بدون بار ثقلی، با افزایش ۱۳ درصدی همراه است. بیشترین ظرفیت برشی دیوار تحت اثر شدت بار ثقلی ۰/۱۵ مگاپاسکال، ۹

درصد کمتر از ظرفیت مشابه در دیوار بدون بار ثقلی است. با افزایش بار ثقلی روی دیوار به شدت ۰/۲ مگاپاسکال نیز، بیشترین ظرفیت برشی نسبت به دیوار بدون بار ثقلی ۲۳ درصد کاهش یافته است و همچنین نسبت جابه‌جایی متناظر با این نقطه نسبت به جابه‌جایی دیوار بدون بار ثقلی در همین حالت ۸ درصد افزایش یافته است.

۴-۵- مقایسه ظرفیت برشی نهایی دیوارها ($V_{\Delta max}$) و جابه‌جایی متناظر با آن (Δ_{max})

بر اساس نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۴، برای دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۰۵ مگاپاسکال ظرفیت برشی دیوار در حالت نهایی، ۲۱ درصد نسبت به ظرفیت نهایی دیوار بدون بار ثقلی افزایش یافته است که این نسبت برای جابه‌جایی متناظر با این نقطه با کاهش ۵۵ درصدی همراه است. همچنین، برای دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۱ مگاپاسکال نیز، ظرفیت برشی نهایی دیوار نسبت به ظرفیت نهایی برشی دیوار بدون بار ثقلی ۳۳ درصد بیشتر شده است. با این حال، جابه‌جایی متناظر با حالت نهایی ظرفیت برای این دیوار نسبت به جابه‌جایی دیوار بدون بار ثقلی در همین حالت، ۷۷ درصد کاهش یافته است. برای شدت بار ثقلی ۰/۱۵ مگاپاسکال نیز، ظرفیت برشی نهایی نسبت به دیوار بدون بار ثقلی ۱۰ درصد کاهش یافته است. در این حالت، جابه‌جایی متناظر با این نقطه نسبت به جابه‌جایی دیوار بدون بار ثقلی ۵۷ درصد کاهش داشته است. نسبت ظرفیت برشی نهایی برای دیوار با شدت بار ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال نسبت به دیوار بدون بار ثقلی با کاهش ۲۲ درصدی همراه است که این نسبت برای جابه‌جایی‌های متناظر با آن، با کاهش ۷۰ درصدی همراه بوده است. به طور کلی مشاهده می‌شود که سیر افزایش ظرفیت برشی در دیوارهای مورد مطالعه با افزایش بار ثقلی افزایش پیدا می‌کند اما این روال لزوماً همیشه صعودی نبوده بلکه از شدت بار ۰/۱۵ مگاپاسکال به بعد، سیر معکوس گرفته و با افزایش بار ثقلی، ظرفیت برشی کاهش پیدا می‌کند.

این کاهش برای همه دیوارها یکسان نبوده و برای دیوارها با شدت بار ثقلی ۰/۰۵ و ۰/۱ و ۰/۱۵ و ۰/۲ مگاپاسکال به ترتیب ۷۷، ۹۴، ۹۰ و ۸۷ درصد نسبت به دیوار بدون بار ثقلی است. به طور کلی مشاهده می‌شود که با افزایش بار ثقلی روی دیوار ضریب شکل پذیری دیوار کاهش یافته است که این کاهش از بار ثقلی ۰/۱۵ مگاپاسکال به بعد، کمتر است.

۵-۷- بررسی چگونگی توزیع الگوی ترک‌ها

به منظور بررسی توزیع تقاضا و خسارت در دیوارها تحت بارهای جانبی، این بخش به بررسی چگونگی توزیع الگوی ترک‌ها در نقاط عملکردی که در منحنی دو خطی به دست آورده شدند اختصاص می‌یابد. توجه شود که کانتور رنگی ارائه شده در شکل‌ها، میزان بازشدگی ترک‌ها را نمایش می‌دهند که به منظور نمایش بهتر، مقدار بازشدگی صفر (متناظر با رنگ آبی پررنگ) با رنگ سفید جایگزین شده است. این کانتورها لزوماً بیانگر یک شدت بازشدگی ترک در تمامی شکل‌ها نبوده و در هر شکل، مقدار بازشدگی متناظر با دیوار نمایش داده شده در آن شکل را نمایش می‌دهند. اعداد نمایش داده شده روی کانتورها بر حسب میلی‌متر هستند.

الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار بدون بار ثقلی به صورت شکل ۶ است. همانطور که مشاهده می‌شود، اولین ترک‌ها با بیشترین بازشدگی ۰/۰۹۳ میلی‌متر در محدوده ظرفیت برشی ۳۰ کیلونیوتون، ابتدا در قسمت‌های تاج طاق و همچنین قسمت بالایی طاق و محل اعمال جابه‌جایی افقی (بالا سمت چپ) تشکیل شده‌اند.

شکل ۶. الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار فاقد بار پیش فشردگی ثقلی

(در متوسط جابه‌جایی ۳/۱ میلی‌متر در بالای دیوار)

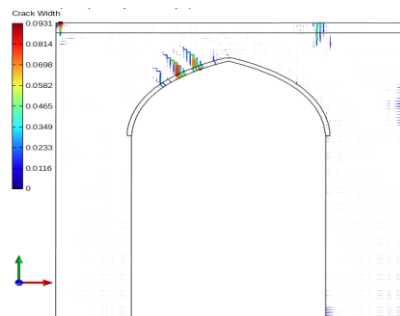


Fig. 6. The distribution pattern of the primary cracks on the wall without pre-compression gravity load (the average displacement of 3.1mm on top of the wall)

۵-۵- بررسی سختی معادل روی نمودار دو خطی

همان‌گونه که در بخش ۴ گفته شد، نمودار ظرفیت دیوارها را می‌توان با روش توضیح داده شده به صورت دوخطی در آورد. در شکل ۵ نمونه‌ای از نمودار دوخطی شده برای دیوار فاقد بار ثقلی نمایش داده شده است.

شکل ۵. نمونه‌ای از نمودار دوخطی شده برای دیوار فاقد بار ثقلی

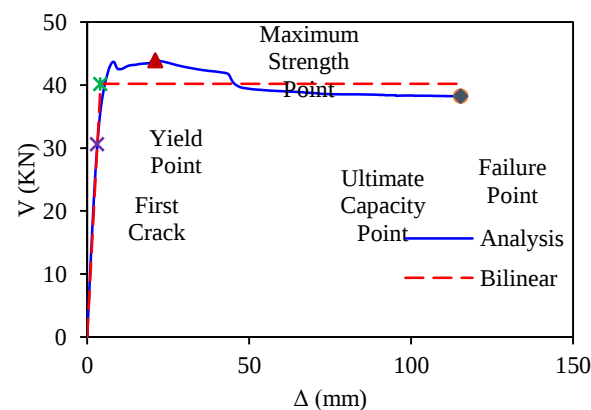


Fig. 5. A sample of bilinear curve for the wall without gravity load

با بررسی سختی معادل در نمودار دوخطی دیوارها، این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش بار ثقلی از صفر تا ۰/۱۵ مگاپاسکال، سختی معادل دیوارها کاهش می‌یابد که این کاهش نسبت به دیوار بدون بار ثقلی، برای دیوارها با بار ثقلی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ مگاپاسکال به ترتیب ۳۱، ۶۱ و ۷۶ درصد است. دلیل این کاهش سختی در دیوارهای با بار ثقلی، آسیب دیدگی بخشی از دیوار و همچنین ایجاد ترک‌هایی بر روی سازه تحت بارهای ثقلی است که این ترک‌ها منجر به کاهش سختی جانبی دیوار به همراه است. برای دیوار با بار ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال نیز این کاهش مشاهده می‌شود اما نسبت به دیوار بدون بار ثقلی حدود ۶۵ درصد است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش بار ثقلی روی دیوار، سختی معادل دیوار کاهش می‌یابد.

۵-۶- بررسی ضریب شکل پذیری روی نمودار دو خطی

با مراجعه به نمودار دو خطی دیوارها و بررسی ضریب شکل پذیری برداشت می‌شود که با افزایش شدت بار ثقلی از ۰ به ۰/۲ مگاپاسکال، ضریب شکل پذیری نیز کاهش یافته است.

با افزایش شدت بار ثقلی دیوار به 0.05 مگاپاسکال مشاهده می‌شود که اولین ترک‌ها در محدوده ظرفیت برشی 40 کیلونیوتون، با الگوی نمایش داده شده در شکل ۹، ایجاد می‌شوند. در این حالت، تمرکز ترک‌ها بیشتر در تاج و درز ملات واصل بین طاق و پایه است.

شکل ۹. الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقلی 0.05 مگاپاسکال (در متوسط جابه‌جایی 5.9 میلی‌متر در بالای دیوار)

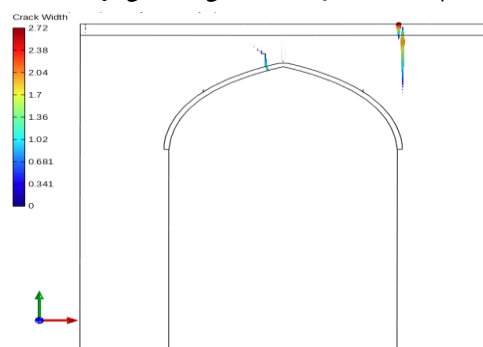


Fig. 9. The distribution pattern of the primary cracks on the wall with 0.05 MPa pre-compression gravity load intensity (the average displacement of 5.9 mm on top of the wall)

در بیشترین ظرفیت برشی دیوار با شدت بار ثقلی 0.05 مگاپاسکال، الگوی توزیع ترک‌ها مطابق شکل ۱۰ است. در این حالت، با افزایش بازشدگی ترک‌ها در موضع‌های قبلی، بیشترین بازشدگی آن‌ها به $17/4$ میلی‌متر می‌رسد که در مقایسه با بازشدگی ترک‌ها در دیوار بدون بار ثقلی، ۲ برابر بیشتر شده است.

شکل ۱۰. الگوی توزیع ترک‌ها در حداکثر ظرفیت برشی دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقلی 0.05 مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی 21.7 میلی‌متر در بالای دیوار)

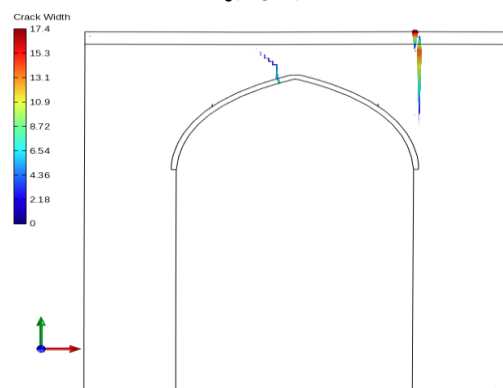


Fig. 10. The distribution pattern of cracks at the maximum shear capacity for the wall with 0.05 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 21.7 mm at the top of the wall)

برای دیوار بدون بار ثقلی در نقطه بیشترین ظرفیت برشی (۴۴ کیلونیوتون)، الگوی توزیع ترک‌ها با بازشدگی حداکثر $8/14$ میلی‌متر بوده است (شکل ۷). که در این مرحله علاوه بر افزایش بازشدگی ترک‌های قبلی، ترک‌هایی را در پایه‌ها نیز مشاهده می‌شود.

شکل ۷. الگوی توزیع ترک‌ها در حداکثر ظرفیت برشی دیوار فاقد بار پیش فشردگی ثقلی (متوسط جابه‌جایی $21/0$ میلی‌متر در بالای دیوار)

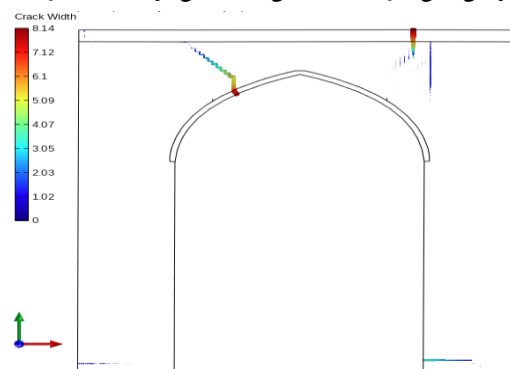


Fig. 7. The distribution pattern of cracks at the maximum shear capacity for the wall without pre-compression gravity load (average displacement of 21.0 mm at the top of the wall)

الگوی توزیع ترک‌ها در حالت ظرفیت برشی نهایی (معادل با 38 کیلونیوتون) با بیشترین بازشدگی $69/9$ میلی‌متر برای دیوار بدون بار ثقلی در شکل ۸ نمایش شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در این حالت، تمرکز ترک‌ها در قسمت‌های تاج طاق و قسمت‌های بالایی و همچنین در پایه‌ها است.

شکل ۸. الگوی توزیع ترک‌ها در ظرفیت برشی نهایی دیوار فاقد بار پیش فشردگی ثقلی (متوسط جابه‌جایی $115/3$ میلی‌متر در بالای دیوار)

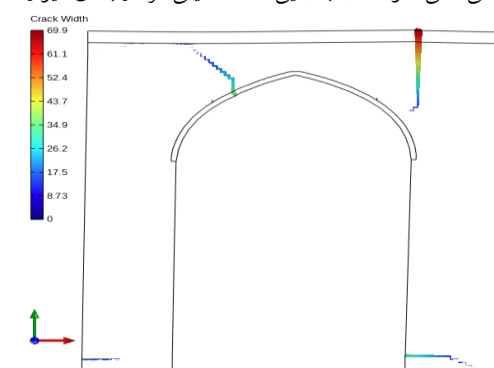


Fig. 8. The distribution pattern of cracks at the ultimate shear capacity of the wall without pre-compression gravity load (average displacement of 115.3 mm at the top of the wall)

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، بیشترین بازشدگی ترک‌ها برای دیوار با بار ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال، در بیشترین ظرفیت برشی (معادل با ۶۳ کیلونیوتون)، در مقایسه با دیوار بدون بار ثقیلی، ۳ برابر بیشتر است. همچنین در نقطه متناظر با ظرفیت برشی نهایی (برش ۵۱ کیلونیوتون)، الگو و میزان باز شدگی ترک‌ها مشابه نقطه متناظر با بیشترین ظرفیت آن است.

شکل ۱۲. الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال (در متوسط جابه‌جایی ۱۱/۶ میلی‌متر در بالای دیوار)

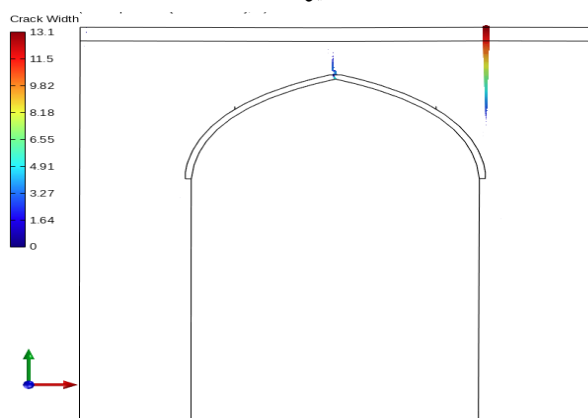


Fig. 12. The distribution pattern of the primary cracks on the wall with 0.1 MPa pre-compression gravity load intensity (the average displacement of 11.6 mm on top of the wall)

شکل ۱۳. الگوی توزیع ترک‌ها در حداکثر ظرفیت برشی دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۲۳/۸ میلی‌متر در بالای دیوار)

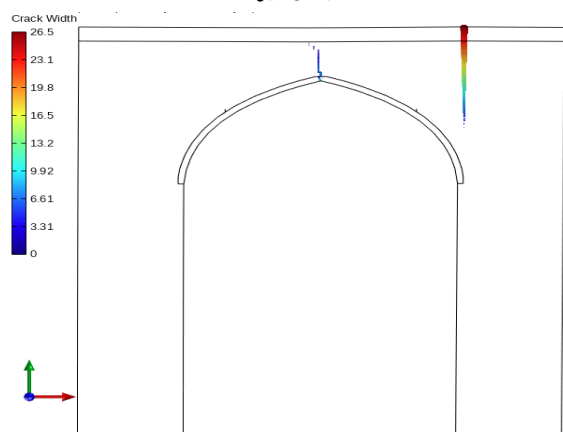


Fig. 13 The distribution pattern of cracks at the maximum shear capacity for the wall with 0.1 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 23.8 mm at the top of the wall)

در نقطه متناظر با ظرفیت برشی نهایی دیوار (برش ۴۶ کیلونیوتون) مشاهده می‌شود (شکل ۱۱). تمرکز ترک‌ها در نقاط تاج طاق و قسمت بالایی طاق است که با افزایش بازشدگی ترک‌ها همراه است. در این حالت نیز بیشترین بازشدگی ترک‌ها به برابر ۴/۸ میلی‌متر می‌رسد.

شکل ۱۱. الگوی توزیع ترک‌ها در ظرفیت برشی نهایی تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۰۵ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۵۲/۲ میلی‌متر در بالای دیوار)

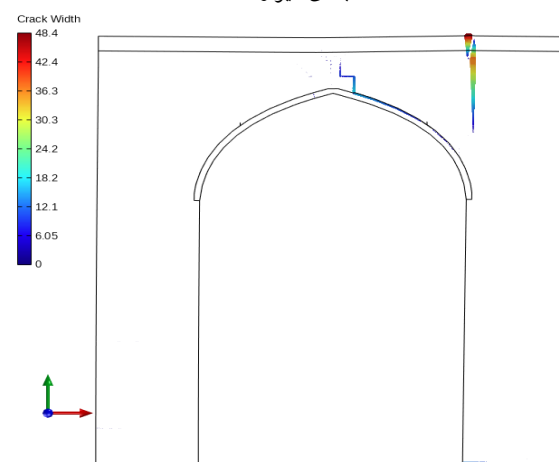


Fig. 11. The distribution pattern of cracks at the ultimate shear capacity of the wall with 0.05 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 52.2 mm at the top of the wall)

همان‌گونه که پیشتر عنوان شد، در دیوار با شدت بار ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال، به دلیل افزایش بار ثقیلی، ظرفیت برشی سازه بیشتر شده اما به دلیل زیاد بودن بار ثقیلی وارد شده به دیوار، سازه با فاصله کمی از بیشترین ظرفیت برشی خود به حالت شکست می‌رسد. در این حالت، سازه اولین ترک‌ها را در ظرفیت برشی بیش از ۴۰ کیلونیوتون تجربه می‌کند و الگوی ترک‌ها مشابه موارد قبلی است (شکل ۱۲). تمرکز اولین ترک‌ها در قسمت طاق و قسمت بالایی سازه ایجاد می‌شوند اما همان‌گونه که در شکل مشخص است، به دلیل افزایش بار ثقیلی روی سازه، بیشترین بازشدگی ترک‌ها در این حالت ۱۳/۱ میلی‌متر بوده که نسبت به بیشترین بازشدگی ترک‌ها در دیوار بدون بار ثقیلی، ۱۴۰ برابر بیشتر است. به همین دلیل، دیوار مورد نظر، علی‌رغم داشتن ظرفیت برشی بیشتر، زودتر به شکست می‌رسد.

همچنین، در بیشترین ظرفیت برشی سازه (که معادل است با ۴۰ کیلونیوتون)، بیشترین بازشدگی ترک‌ها به ۷۲ میلی‌متر می‌رسد که نسبت به حداکثر بازشدگی ترک‌ها در دیوار بدون بار ثقیلی، ۳ برابر شده است. در این حالت، تمرکز ترک‌ها در محل تاج طاق و همچنین قسمت‌های بالایی دو طرف طاق است (شکل ۱۶).

شکل ۱۶. الگوی توزیع ترک‌ها در حداکثر ظرفیت برشی دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱۵ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۲۰/۶ میلی‌متر در بالای دیوار)

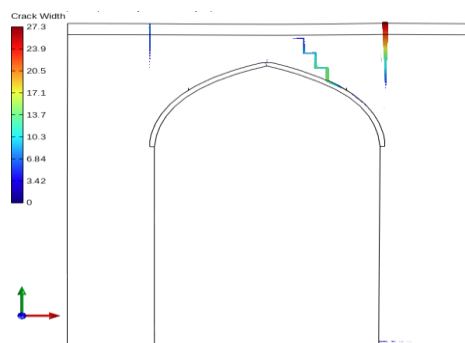


Fig. 16. The distribution pattern of cracks at the maximum shear capacity for the wall with 0.15 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 20.6 mm at the top of the wall)

برای حالت ظرفیت نهایی دیوار (شکل ۱۷)، الگوی ترک‌ها مانند الگوی آن‌ها در حالت حداکثر ظرفیت برشی است، اما با بازشدگی آن‌ها در قسمت تاج طاق بیشتر شده است که در مقایسه با دیوار بدون بار ثقیلی، حداکثر بازشدگی ترک‌ها تقریباً ۱/۲ برابر شده است.

شکل ۱۷. الگوی توزیع ترک‌ها در ظرفیت برشی نهایی تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱۵ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۴۹/۵ میلی‌متر در بالای دیوار)

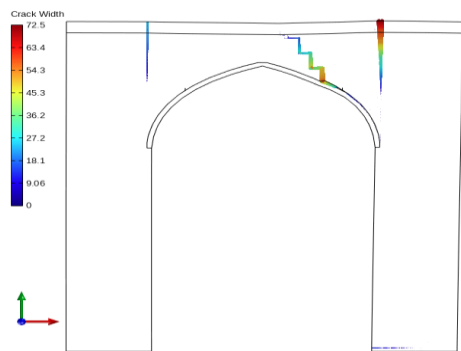


Fig. 17. The distribution pattern of cracks at the ultimate shear capacity for the wall with 0.15 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 49.5 mm at the top of the wall)

شکل ۱۴. الگوی توزیع ترک‌ها در ظرفیت برشی نهایی تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۲۵/۹ میلی‌متر در بالای دیوار)

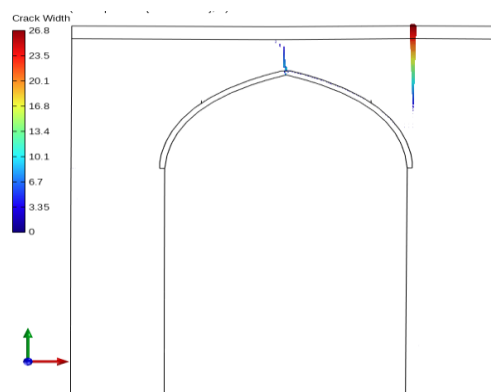


Fig. 14. The distribution pattern of cracks at the ultimate shear capacity for the wall with 0.1 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 25.9 mm at the top of the wall)

لازم به ذکر است که، در حالت پیشینه ظرفیت برشی برای دیوار با شدت بار ثقیلی ۰/۱ مگاپاسکال، به دلیل افزایش بار ثقیلی، فاصله زیادی بین نقطه بیشترین ظرفیت برشی و حالت نهایی ظرفیت وجود ندارد و به همین دلیل الگوی توزیع ترک‌ها در این دو حالت تقریباً نزدیک به هم است. برای بار ثقیلی ۰/۱۵ مگاپاسکال، اولین ترک‌ها (شکل ۱۵) با بیشترین بازشدگی ۱۷۰ برابر دیوار بدون بار ثقیلی رخ می‌دهد. به همین دلیل، سازه قبل از رسیدن به پیشینه ظرفیت برشی خود وارد ناحیه شکست می‌شود و ظرفیت برشی کمتر از سایر حالات بررسی شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵. الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقیلی ۰/۱۵ مگاپاسکال (در متوسط جابه‌جایی ۱۱/۵ میلی‌متر در بالای دیوار)

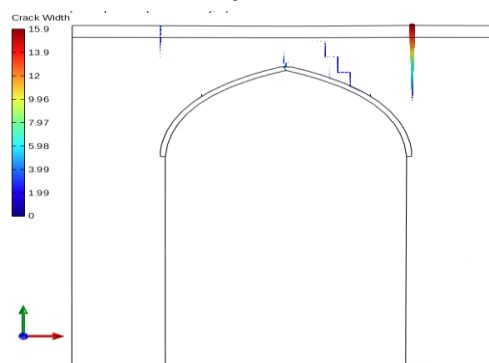


Fig. 15. The distribution pattern of the primary cracks on the wall with 0.15 MPa pre-compression gravity load intensity (the average displacement of 11.5 mm on top of the wall)

برای دیوار با بار ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال، بیشترین بازشدگی اولین ترک‌ها ۶۷ برابر حالت دیوار بدون بار ثقلی است (شکل ۱۸). در نقطه متناظر با بیشترین ظرفیت برشی دیوار شکل ۱۹)، حداکثر بازشدگی ترک‌ها به ۸/۱۴ میلی‌متر رسیده است. همچنین در حالت ظرفیت نهایی، تمرکز ترک‌ها روی طاق بسیار بیشتر شده و با افزایش بازشدگی در دو طرف بالایی طاق همراه است. در این حالت حداکثر بازشدگی ترک‌ها ۱۹ میلی‌متر مشاهده می‌شود (شکل ۲۰).

لازم به ذکر است الگوی ترک‌های ایجاد شده در پایه‌ها (جرزها) و در نقطه متناظر با بیشینه ظرفیت برشی دیوارها، نمایشگر چگونگی توزیع تنش‌های ناشی از جابه‌جایی جانبی دیوار است. به بیان بهتر، با توجه به ضعف مصالح بنایی در کشش، بازشدگی ترک‌ها عموماً در سمت کششی پایه‌ها بوده و در سمت فشاری آن‌ها، ترکی مشاهده نمی‌شود. این مسئله نیز در قسمت طاق نیز قابل توجیه بوده و الگوی بازشدگی ترک‌ها متناسب با تمرکز تنش‌های کششی در مصالح این ناحیه است.

۸-۵- مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات مشابه و خسارت در طاق‌های موجود در اثر زلزله

به منظور ارزیابی درستی نتایج به دست آمده در این مطالعه، نتایج به دست آمده از مطالعات مشابه روی طاق‌ها و چگونگی توزیع خسارت در آن‌ها در این بخش ارائه می‌شود.

نیکوروش و سلطانی و محمدی [۸] در یک بررسی آزمایشگاهی روی رفتار درون صفحه‌ای طاق‌های قوسی، مشاهده کردند که توزیع ترک‌ها و خسارات بیشتر در قسمت تاج قوس و نیز در درزهای ملات پایه‌های دو سمت طاق متمرکز شده است. همچنین، در مطالعه میدانی صورت گرفته توسط پریشادو و همکاران [۱۵] از یک کلیسای ساخته شده با مصالح بنایی غیر مسلح پس از زلزله ۸/۲ ریشتری در سال ۲۰۱۷ میلادی در مکزیک، حکایت از تمرکز ترک‌های آسیب دیدگی در قسمت تاج دیوارها دارد.

شکل ۱۸. الگوی توزیع اولین ترک‌ها در دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال (در متوسط جابه‌جایی ۶/۷ میلی‌متر در بالای دیوار)

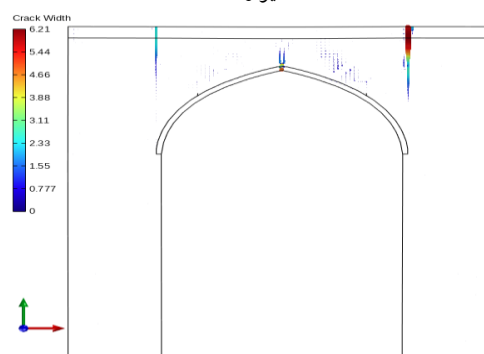


Fig. 18. The distribution pattern of the primary cracks on the wall with 0.2 MPa pre-compression gravity load intensity (the average displacement of 6.7 mm on top of the wall)

شکل ۱۹. الگوی توزیع ترک‌ها در حداکثر ظرفیت برشی دیوار تحت شدت بار پیش فشردگی ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۲۲/۸ میلی‌متر در بالای دیوار)

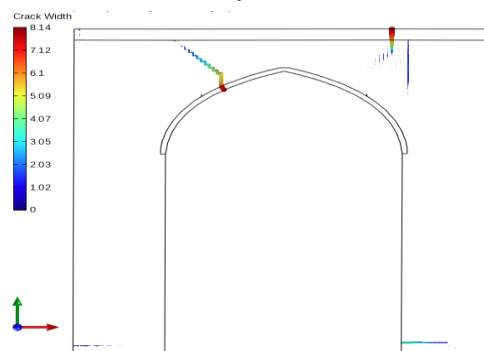


Fig. 19. The distribution pattern of cracks at the maximum shear capacity for the wall with 0.2 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 22.8 mm at the top of the wall)

شکل ۲۰. الگوی توزیع ترک‌ها در ظرفیت برشی نهایی تحت شدت بار پیش فشردگی ثقلی ۰/۲ مگاپاسکال (متوسط جابه‌جایی ۳۵/۷ میلی‌متر در بالای دیوار)

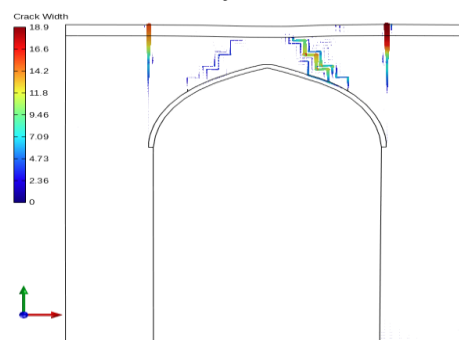


Fig. 20. The distribution pattern of cracks at the ultimate shear capacity state for the wall with 0.2 MPa pre-compression gravity load intensity (average displacement of 35.7 mm at the top of the wall)

۶. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، به بررسی عملکرد طاق‌های بنایی سستی غیرمسلح تحت بارهای جانبی پرداخته شد. در این راستا، یک طاق از بازار مسگرهای کرمان انتخاب شده و پس از مدلسازی در نرم افزار STKO، تحت آنالیز پوش اور و با شدت بارهای ثقلی متفاوت قرار گرفت و بر اساس نتایجی که از تحلیل به دست آمد، در خصوص نقاط متناظر با ظرفیت سازه بحث و بررسی صورت پذیرفت. بر اساس نتایج حاصله، موارد زیر به عنوان جمع‌بندی نهایی گزارش می‌شوند:

- مشاهده می‌شود که با افزایش شدت بار ثقلی، ظرفیت برشی بیشینه دیوارها نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش نسبت به دیوار با شدت بار صفر تا شدت بار ثقلی $0/1$ مگاپاسکال دیده می‌شود. با این حال، از شدت بار ثقلی $0/15$ مگاپاسکال به بعد به دلیل آسیب دیدگی طاق تحت اثر بار ثقلی زیاد در همان ابتدای تحلیل، این سیر افزایشی ظرفیت برشی روند معکوس به خود می‌گیرد.

- با افزایش بار ثقلی روی دیوار، جابه‌جایی متناظر با ظرفیت برشی اولین ترک‌ها افزایش یافته به طوریکه این افزایش تا 270 درصد نیز مشاهده شده است. با این حال، جابه‌جایی متناظر با بیشترین ظرفیت برشی و همچنین جابه‌جایی متناظر با حالت نهایی ظرفیت برشی از قاعده خاصی پیروی نمی‌کند و در شدت بارهای ثقلی متفاوت، مقادیر متغیری به دست می‌دهند.

- با افزایش بار ثقلی روی دیوار، سختی معادل دیوار کاهش می‌یابد. این کاهش برای طاق مورد مطالعه تا 76 درصد نسبت به طاق بدون بار ثقلی نیز مشاهده می‌شود.

- با افزایش بار ثقلی روی دیوار، ضریب شکل پذیری دیوار کاهش یافته است که این کاهش از شدت بار ثقلی صفر تا شدت بار $0/1$ مگاپاسکال، به 94 درصد می‌رسد و از شدت بار ثقلی $0/15$ مگاپاسکال تا $0/2$ به 87 درصد محدود شده است. بنابر این نتیجه می‌شود که ضریب شکل پذیری با افزایش بار ثقلی روی دیوار کاهش می‌یابد و این کاهش از بار ثقلی $0/15$ مگاپاسکال به بعد کمتر است.

شکل ۲۱. الگوی توزیع ترک‌ها در مطالعه آزمایشگاهی یک طاق بنایی [۸]

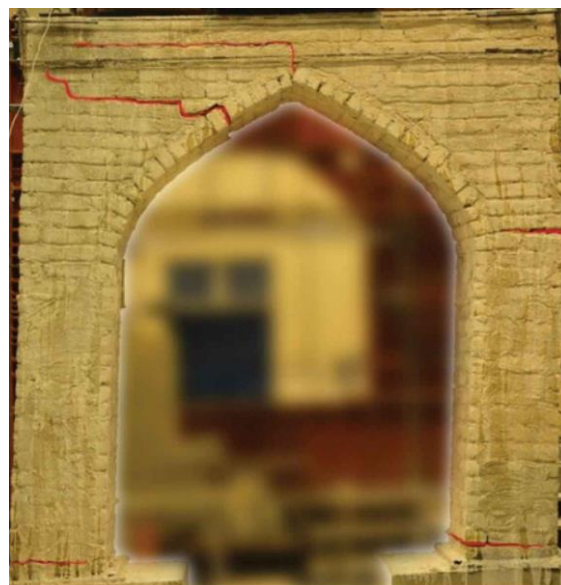


Fig. 21. The distribution pattern of cracks from an experimental investigation of a masonry arch[۸]

شکل ۲۲. الگوی توزیع ترک‌ها در مشاهدات میدانی طاق‌های بنایی پس از

زلزله [۱۵]



Fig. 21. The distribution pattern of cracks in the field observation of masonry arches after earthquake[۱۵]

numerical and analytical approach. *Construction and Building Materials*. 2021;271:121548.

[۶]Farahani EM, Yekrangnia M, Rezaie M, Bento R. Seismic behavior of masonry walls retrofitted by centercore technique: A numerical study. *Construction and Building Materials*. 2021;267:120382.

[۷]Bianchini N, Gaetani A, Mendes N, Lourenço PB. Experimental Behaviour of Masonry: Static and Dynamic Behaviour of Arches and Vaults. In: Milani G, Sarhosis V, editors. *From Corbel Arches to Double Curvature Vaults: Analysis, Conservation and Restoration of Architectural Heritage Masonry Structures*. Cham: Springer International Publishing; 2022. p. 79-121.

[۸]Nikooravesh M, Soltani M. Experimental and analytical investigation of seismic behavior of centercore-retrofitted masonry walls. *Engineering Structures*. 2021;244.

[۹]Xu W, Zhang T, Chen X, Miao Q, Wang S, Du D. Experimental and numerical investigation on the seismic performance of masonry walls reinforced by PC panels. *Journal of Building Engineering*. 2022;58:105049.

[۱۰]Tarque N, Manchego A, Lovón H, Blondet M, Varum H. Experimental in-plane behaviour and drift-based fragility assessment of typical Peruvian confined masonry walls. *Construction and Building Materials*. 2022;341:127893.

[۱۱]Pradhan B, Zizzo M, Sarhosis V, Cavaleri L. Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry infill walls: Review of the experimental studies and analysis of the influencing parameters. *Structures*. 2021;33:4387-406.

[۱۲]Xin R, Ma P. Experimental investigation on the in-plane seismic performance of damaged masonry walls repaired with grout-injected ferrocement overlay. *Construction and Building Materials*. 2021;282:122565.

[۱۳]Camata G, Marano C, Sepe V, Spacone E, Siano R, Petracca M et al. Validation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls. *Engineering Structures*. 2022;253:113755.

[۱۴]Tomazevic M. *Earthquake-resistant design of masonry buildings*: World Scientific; 1999.

[۱۵]Preciado A, Peña F, Colmenero Fonseca F, Silva C. Damage description and schematic crack propagation in Colonial Churches and old masonry buildings by the 2017 Puebla-Morelos earthquakes ($M_w = 8.2$ and 7.1). *Engineering Failure Analysis*. 2022;141:106706.

• الگوی توزیع ترک و خسارت در طاق‌ها کمابیش مشابه هم بوده اما میزان بازشدگی ترک‌ها به شدت از میزان بار ثقلی وارد بر سازه دیوار تأثیر می‌پذیرد.

لازم به ذکر است در این مطالعه، مشخصات مصالح به دلایل محدودیت‌های موجود در نمونه برداری و آزمایش، از کار کاماتا و همکاران برداشته شده است. متغیر مورد بحث در این مطالعه، بیشتر تأثیر شدت بار ثقلی روی رفتار دیوارهای طاقی شکل است. با توجه به اینکه مصالح بکار رفته در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه با هم یکسان بوده، مقایسه صورت گرفته قابل قبول است؛ هرچند که، شاید نتوان مقادیر عددی به دست آمده را مستقیماً به ظرفیت دیوارهای موجود در بازار ارتباط داد.

از این رو، توصیه می‌شود که در مطالعات آینده، با انجام آزمایش‌های استاندارد و با اولویت آزمایش‌های غیرمخرب در راستای تعیین این مشخصات و نیز انجام تحلیل‌های حساسیت، روی تأثیر این مشخصات در پارمترهای رفتاری طاق استفاده شود.

۲. منابع و مراجع

[۱]Howlader MK, Masia MJ, Griffith MC. Numerical analysis and parametric study of unreinforced masonry walls with arch openings under lateral in-plane loading. *Engineering Structures*. 2020;208:110337.

[۲]Karimi AH, Karimi MS, Kheyroddin A, Shahkarami AA. Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of An Infilled Masonry Wall Compared to An Arched Masonry Wall. *Structures*. 2016;8:144-53.

[۳]Hwang S-H, Kim S, Yang K-H. In-plane lateral load transfer capacity of unreinforced masonry walls considering presence of openings. *Journal of Building Engineering*. 2022;47:103868.

[۴]Belghiat C, Plassiard J-P, Messabhia A, Plé O, Guenfoud M. Analytical and numerical study of double-panel confined masonry walls. *Journal of Building Engineering*. 2021;39:1023.۲۲

[۵]Pereira JM, Correia AA, Lourenço PB. In-plane behaviour of rubble stone masonry walls: Experimental,

Performance assessment of unreinforced masonry arched walls under the action of lateral loading

Farshad Homaei*1, Erfan Vosoughi Rahbari2

1- Assistant professor, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, f.homaei@kgut.ac.ir (Corresponding Author)

2- M.Sc. student, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, e.vosoughi@student.kgut.ac.ir

Abstract

In today's, the preservation and maintenance of masonry structures in historical areas have become very important. A significant part of this issue is rooted in the use of non-reinforced construction materials in the building of such structures. In Iran, most of the historical buildings were built using masonry materials. The buildings were designed according to the special architecture of this region. The existing structures mostly consist of masonry walls as well as some openings with arched configurations. In these types of walls, the wall consists of two piers and an arch on top of them. Since Iran is located in a highly seismic zone, investigating the performance of these types of structures is essential under the action of earthquakes and lateral loadings. Therefore, in this paper, a numerical investigation is accomplished on the in-plane behavior of traditional brick arches under the action of lateral loads. To this end, the numerical model of a sample of an existing arch (in Kerman's Mesgari bazaar) was considered. The model was developed on STKO software. In this regard, the nonlinear response of bricks and mortar joints was simulated by using the DamageTC3D material. As well, the geometry of the wall was constructed with four-node plane-stress elements. The lateral capacity of the wall was assessed under the action of gravity loads. To this end, the wall was analyzed under gravity loads with intensities of 0.0 to 0.2 MPa. Next, it was pushed laterally through the pushover analysis and the shear force-displacement capacity curve of the wall was obtained. Through a specific procedure, the obtained capacity curves were estimated with a bilinear graph. By using this graph, the performance points corresponding to the wall's capacity were extracted and a complete discussion was made regarding the shear capacity and the corresponding displacement to each performance point. Based on the obtained results from the analysis, it was observed that with an increase in the intensity of the applied gravity load, the maximum shear capacity of the walls increases. However, a higher increase in gravity load intensity (over a specific limit) would cause more damage to the arch which leads to a smaller shear capacity. Also, it is observed that the distribution of cracks and their pattern along the walls follow a similar outline. However, crack widths are affected strongly by the intensity of the applied gravity load on the wall.

Keywords: Unreinforced masonry walls (URM), Masonry arches, Pushover analysis, In-plane behavior, Pre-compression load, Shear capacity