

تأثیر بازشو در رفتار جانبی دیوارهای باربر بنایی آجری با و بدون کلاف

مسعود شفیعی وزنه (کارشناس ارشد)

مهندسین مشاور، اصفهان

فرهاد بهنام فر* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دربی ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۹۹-۹۳

دیوارهای بنایی از قدیمی‌ترین عناصر سازه‌ی باربر ساختمان‌ها هستند. ساختمان‌های بنایی نسبت به سازه‌های دیگر در مقابل زلزله‌های اخیر آسیب‌پذیرتر بوده‌اند. همچنین درصد قابل توجهی از ساختمان‌های موجود را ساختمان‌های بنایی تشکیل می‌دهند. منحنی‌های رفتاری دیوار باربر بنایی، نقش مهمی در بررسی وضعیت ساختمان‌های موجود دارند. یکی از پارامترهای مهم در منحنی رفتاری غیرخطی دیوار بنایی، پارامترهای مربوط به شکل‌پذیری دیوار بنایی است. این مقادیر در دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود (نشریه‌ی ۳۶) برای دیوارهای بدون بازشو ارائه شده است. در نوشتار حاضر، با ارزیابی تأثیر پارامترهایی نظیر موقعیت قرارگیری بازشو در دیوار بنایی در مقاومت جانبی و سختی دیوار، پارامترهای شکل‌پذیری دیوار بنایی با بازشو ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌پذیری دیوار بنایی با کلاف بیشتر از دیوار بدون کلاف است. این در حالی است که دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود، تفاوتی میان مدل‌سازی غیرخطی دیوار با کلاف و دیوار بدون کلاف در این ارتباط قائل نشده است.

واژگان کلیدی: دیوار بنایی، بازشو، شکل‌پذیری، المان محدود، کلاف.

۱. مقدمه

در سال ۱۹۹۷، یک مدل آسبیدی برای منشور بنایی با استفاده از مدل رفتاری چسبندگی و لغزش ملات و شکست در آجر پیشنهاد شده است که در آن دو روش متفاوت برای تجزیه و تحلیل دیوار بنایی ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از توصیف معادلات ملات با فرض شکننده بودن واحدهای آجری، یک مدل ترکیبی براساس یک رویکرد المان محدود توسعه یافته است که کاربرد آن در تحلیل دیوارهای برشی بنایی است.^[۱] مدل‌هایی نیز جهت محاسبه‌ی مقاومت جانبی پایه‌های بنایی تقویت نشده در سال ۲۰۰۵ در نظر گرفته شدند که یک مدل کلی از یک پایه‌ی بنایی تقویت نشده بود که تحت بار خارجی قرار گرفته است. در پژوهش مذکور به طور خاص با توجه به پیش‌بینی الگوی ترک‌خوردگی، مکانیسم شکست و تنش‌های به‌وجود آمده در پایه، پیشینه‌ی مقاومت جانبی پایه‌ی بنایی بررسی شده است.^[۲]

همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۲)، با انجام آزمایش‌هایی بر روی دیوار بنایی آجری به بررسی رفتاری تیرهای هم‌بند بالا بازشو در دیوارهای بنایی پرداخته شده و به منظور برآورد مقاومت نهایی و همچنین مقاومت باقی‌مانده‌ی تیر هم‌بند مصالح بنایی، اقدام به توسعه‌ی مدل‌های ساده‌ی مکانیکی موجود در زمینه‌ی مذکور شده است. لذا بر روی دو نوع دیوار که در یکی از تیر نعل‌درگاه برای حمایت از قسمت بالای بازشو و در دیگری از قوس بنایی کم‌عمق استفاده شده است، انجام شده و با توجه به پیش‌بینی الگوی ترک‌خوردگی، مکانیسم شکست و تنش‌های به‌وجود

ساختمان‌های با مصالح بنایی، ساختمان‌هایی هستند که با آجر، بلوک سیمانی و یا سنگ ساخته می‌شوند و در آن‌ها تمام و یا قسمتی از بارهای قائم توسط دیوارهای با مصالح بنایی تحمل می‌شود. در سال‌های اخیر، ساخت ساختمان‌های مذکور بسیار محدود شده است، با این حال در برخی از مناطق روستایی و گاهی شهری نیز از آن‌ها استفاده می‌شود. سازه‌های با مصالح بنایی به دلیل عدم طراحی در برابر بارهای جانبی، به هنگام وقوع زلزله‌های نه‌چندان قوی، در معرض آسیب‌های جدی قرار دارند. با بررسی سوابق زلزله‌های پیشین و آمار بالای تلفات انسانی در مناطق ذکر شده، ضرورت و اهمیت یافتن راهکارهای عملی برای کمی‌سازی ارزیابی این دسته از ساختمان‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های تحلیلی که رایج‌ترین و سریع‌ترین روش ارزیابی سازه‌ها هستند، در ساختمان‌های مصالح بنایی غالباً نیازمند مطالعات اولیه‌ی زیاد، مدل‌سازی‌های وقت‌گیر و پیچیده با نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی و تجربه‌ی کافی برای تفسیر نتایج آنها هستند که اغلب به‌صورت پایان‌نامه و پژوهش به آن پرداخته شده است و برخلاف سازه‌های فولادی و بتنی، هنوز روش‌های مدل‌سازی کاربردی و قابل استفاده برای مهندسان سازه و زلزله ارائه نشده است. در ادامه، به چند نمونه از آن‌ها اشاره شده است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۰۶/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۰۶/۱۶.

DOI: 10.24200/J30.2018.1333

هر یک به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی به روش میکرو اصلاح شده، رویکردی بین دو مدل‌سازی میکرو و ماکرو است که در آن ملات بین بلوک‌های آجری مدل نمی‌شود و ضخامت ملات به ضخامت بلوک آجری اضافه می‌شود. همچنین خصوصیات چسبندگی و مکانیکی بین آجر و ملات به سطوح بلوک‌های آجری، نسبت داده می‌شود. در پژوهش حاضر با استفاده از نتایج آزمایش‌های واقعی انجام شده روی منشورهای بتنی، از مشخصات معادل مصالح دیوار برای مدل‌سازی آن به صورت همگن در چارچوب یک مدل ماکرو استفاده شده است. از همین روی خود به خود اثر مرکب بودن مصالح دیوار و اتصال آجر و ملات در مدل رفتاری دیوار بتنی لحاظ شده است. با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم‌افزار المان محدود Abaqus^[5]، به بررسی مدل‌ها پرداخته شده است.^[6] نمونه‌های انتخاب شده جهت صحت‌سنجی، بانک اطلاعاتی رفتاری مناسبی ارائه کرده‌اند که بهترین گزینه برای مدل‌سازی و ارزیابی دقت مدل‌سازی است. شکل‌های ۱ و ۲، شماتیک کلی از دو نمونه‌ی آزمایشگاهی انتخاب شده جهت صحت‌سنجی است.

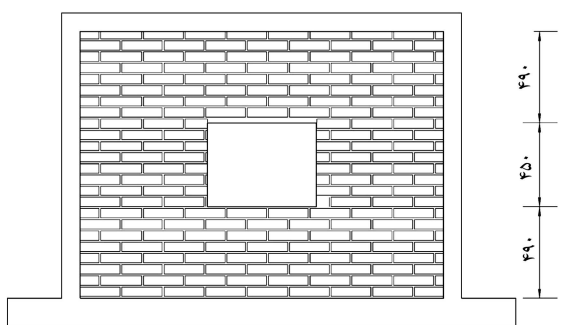
به طور کلی دو مدل‌سازی دیوار بتنی با کلاف و بدون کلاف در نظر گرفته شده است. به همین جهت دو مدل آزمایشگاهی یکی با کلاف بتنی و دیگری بدون کلاف جهت صحت‌سنجی انتخاب شده است. برای مدل کردن دیوار بتنی و کلاف بتنی از المان ۸ وجهی ۲۰ گره‌ی انتگرال کاهش یافته استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی میلگردهای موجود در کلاف بتنی با استفاده از المان یک بعدی دو گره‌ی انجام شده است. برای بررسی تأثیر اندازه‌ی المان‌ها از آنالیز حساسیت و همچنین توجه به بررسی مدل‌های متفاوت، بهترین حالت از نظر دقت و سرعت محاسبات استفاده شده است. برای هماهنگ کردن شرایط تکیه‌گاهی مدل ساخته شده با مدل

آمده در تیر هم‌بند، روابطی جهت تعیین مقاومت تیر هم‌بند بالای باز شو پیشنهاد شده است.^[۳] با یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی دیوارهای بتنی غیرمسلح^[۳] (۲۰۱۴)، نیز اثر وجود و یا عدم وجود بال^۱ (دیوار عمود بر صفحه در انتهای دیوار) تحت بار شبه‌استاتیکی به صورت رفت و برگشتی در دیوارهای مذکور بررسی و گسیختگی هر دیوار با یک زاویه‌ی شکست به دنبال لغزش درز ملات در بال‌های کناری دیوار شروع شده است. وجود بال در دیوار باعث افزایش ظرفیت شکل‌پذیری دیوار تحت بار درون صفحه‌ی شده است. با اندازه‌گیری مقاومت برشی دیوارها، محدوده‌ی برای تعیین محدوده‌ی مقاومت کششی مورب برای مدل‌های تحلیلی ارائه شده است. همچنین برای سختی اولیه‌ی دیوارهای مذکور تخمین‌هایی ارائه شده است که تقریب مناسبی با نتایج تجربی دارد. ظرفیت تغییر مکان دیوار فراتر از جابه‌جایی مؤثر تسلیم دیوار است و مشخص شد که آن‌ها می‌توانند نیروی جانبی درون صفحه‌ی را تا جابه‌جایی نسبی ۰٫۷٪ تحمل کنند. توصیه‌هایی نیز برای یک رابطه‌ی عمومی نیرو - تغییر مکان ارائه شد که سازگار با مطالعات تجربی است و می‌تواند برای دیوارهای بتنی غیرمسلح استفاده شود.^[۴] همچنین با انجام آزمایش‌های دیگری (۲۰۱۴) بر روی نمونه‌هایی که از لحاظ ساختار و از لحاظ مواد تشکیل دهنده شبیه به دیوارهای متداول در ایران بودند، به مطالعه و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده و مدل‌های مذکور پرداخته شد.^[۵] در همان سال، با آزمایش مدل‌های دیگر آزمایشگاهی دیوار بتنی تحت بارهای مختلف و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شدند.^[۶]

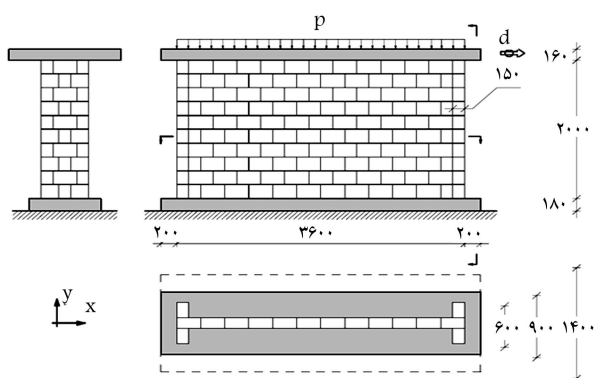
در پژوهش حاضر، با مطالعه بر روی آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده‌ی پژوهشگران پیشین و بررسی روش‌های مدل‌سازی و آنالیز ساختمان‌های مصالح بتنی، سعی در تفسیر کیفی سطح مقاومت و شکل‌پذیری آن‌ها در برابر زلزله به کمک گراف‌ها و منحنی‌های به دست آمده از تحلیل عددی مدل‌ها شده است. در نهایت، با ارائه‌ی پیشنهادهایی، زمینه‌ی مناسب برای ادامه‌ی مطالعاتی از این دست و دست‌یابی به نتایج کمی، جهت برآورد سریع میزان خسارت وارده فراهم شده است. در ادامه، با بیان جزئیات مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی دو نمونه‌ی آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی تحلیل عددی، به تحلیل دیوارهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر پرداخته شده است.

۲. مدل‌سازی عددی

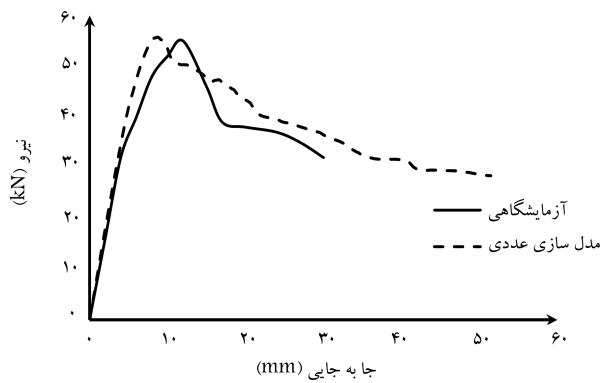
دیوارهای بتنی با کلاف را می‌توان به عنوان یک سازه‌ی ترکیبی ناهمگن متشکل از دو جزء دیوار بتنی غیرمسلح و کلاف بتنی مسلح در نظر گرفت. یک روش مناسب برای تحلیل چنین مسائلی، انتخاب یک روش عددی برای پاسخ به هر بخش به صورت جداگانه و سپس به دست آوردن اثرات ترکیبی اجزاء تشکیل دهنده‌ی سازه با یکدیگر است. بنابراین تجزیه و تحلیل کامل مسئله شامل انتخاب یک روش عددی مناسب، مدل‌سازی هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده با استفاده از قوانین و مدل‌های ساختاری مناسب به صورت جداگانه و مدل‌سازی اندرکنش بین اجزاء تشکیل دهنده در محل‌های مشترک است. سه روش عددی ماکرو^۳، میکرو^۴ و میکرو اصلاح شده^۵ برای مدل‌سازی استفاده شده است. در مدل‌سازی به روش ماکرو، کل سطح آجر و ملات و سطح مشترک آجر و ملات به عنوان یک ماده در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی میکرو، یک روش دقیق محاسباتی است، به صورتی که تمامی اجزاء تشکیل دهنده‌ی دیوار بتنی به صورت مجزا مدل می‌شود و اثرات



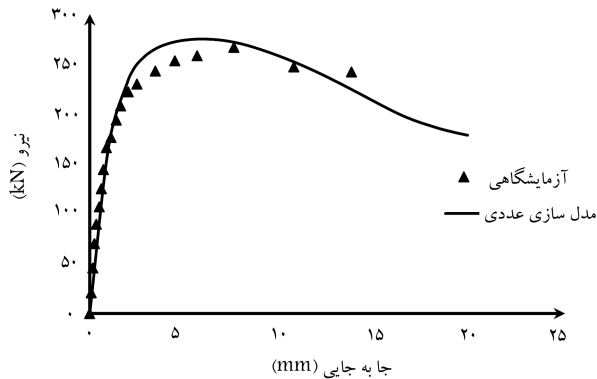
شکل ۱. ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی با کلاف.^[۷]



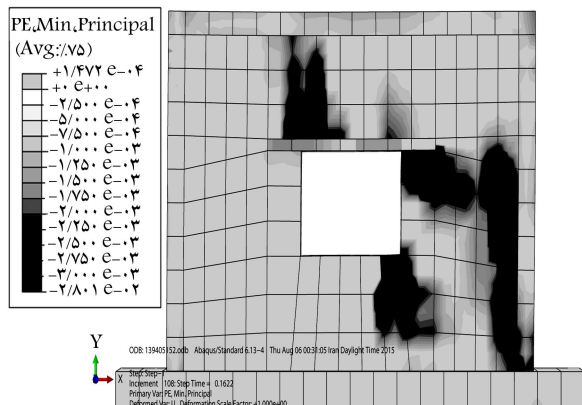
شکل ۲. ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی بدون کلاف.^[۸]



شکل ۳. منحنی نیرو - جابه‌جایی مدل دیوار آزمایشگاهی با کلاف.



شکل ۴. منحنی نیرو - جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی بدون کلاف.



شکل ۵. کرنش خمیری در قسمت آجری نمونه‌ی با کلاف.



شکل ۶. تصویر نمونه با کلاف پس از اتمام آزمایش. [۷]

آزمایشگاهی، تمامی مقادیر تغییر مکان و چرخش در پای هر دو دیوار و جابه‌جایی در راستای عمود بر صفحه در بالای دیوار مقید شده است. بارگذاری نمونه‌ها نیز به صورت اعمال جابه‌جایی افقی به صورت افزایش جابه‌جایی درون صفحه‌ی دیوار است. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل‌های آزمایشگاهی در جدول‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است.

از رابطه‌ی هاگنستاد برای مدل کردن بتن کلاف با استفاده از مقادیر موجود در جدول‌های ۱ الی ۴ استفاده شده است. برای مدل کردن رفتار مصالح بنایی از رابطه‌ی پیشنهادی کاتوشیک و همکاران، [۹] استفاده شده است که با آزمایش بر روی ۴۸ نمونه‌ی آزمایشگاهی به دست آمده است. در شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه بین منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی مدل‌های صحت‌سنجی با مدل‌های اجزاء محدود مربوط به هر کدام ارائه شده است.

همان‌گونه که در نمودارها مشخص است، نتایج به دست آمده از تحلیل مدل‌سازی اجزاء محدود، مطابقت خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارند. هر دو مدل‌سازی در ناحیه‌ی خطی منحنی مطابقت بسیار خوبی دارند و رفتار منحنی در نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت جانبی مشابه منحنی حاصل از آزمایش است. وجود اختلاف در ناحیه‌ی غیرخطی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات کامل از منحنی‌های رفتاری مصالح مصرف شده در دیوار مذکور و همچنین استفاده از مدل‌سازی ماکرو که اثرات ملات و فصل مشترک بین ملات و واحدهای آجر به کار رفته در دیوار بنایی در نظر گرفته نمی‌شود، است. شکل‌های ۵ و ۶، الگوی کرنش خمیری و ترک خوردگی دیوارها در قسمت آجری را در لحظه‌ی مقاومت جانبی بیشینه نشان می‌دهد. همچنین

جدول ۱. مشخصات واحد بنایی مصرفی برای دیوار با کلاف. [۷]

نمونه	تعداد آزمایش	مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پراکنندگی (C_u)
ملات	۸	۹٫۶	۰٫۱۲
منشور بنایی	۴	۱٫۸	۰٫۰۸

جدول ۲. مدول کشسانی منشور بنایی دیوار با کلاف. [۷]

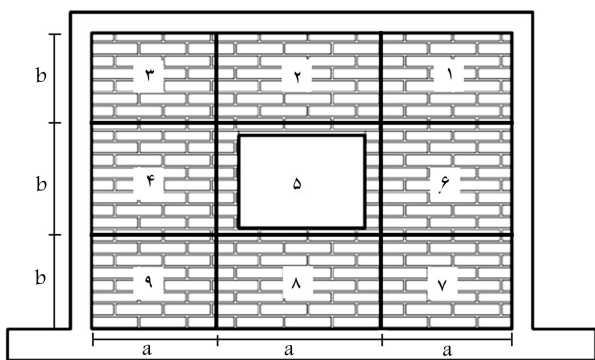
تعداد آزمایش	مدول کشسانی (MPa)
۱	۱۸۱

جدول ۳. مقاومت فشاری اجزاء دیوار بنایی بدون کلاف. [۸]

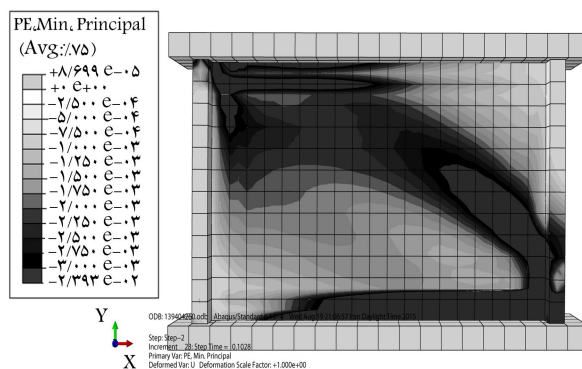
نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
منشور بنایی	۱٫۸۷	۰٫۲۸

جدول ۴. مدول کشسانی منشور بنایی دیوار بدون کلاف. [۸]

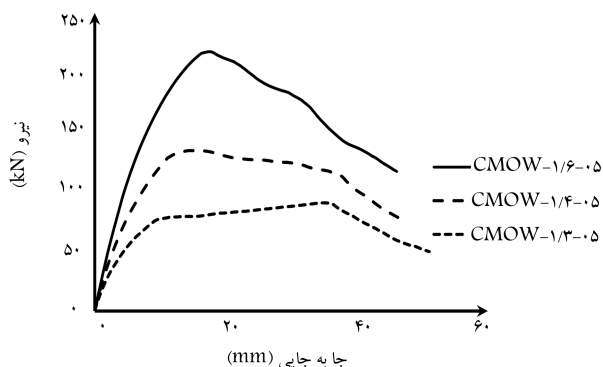
ضریب پواسون	مدول کشسانی (MPa)
۰٫۱۸	۲۴۶۰



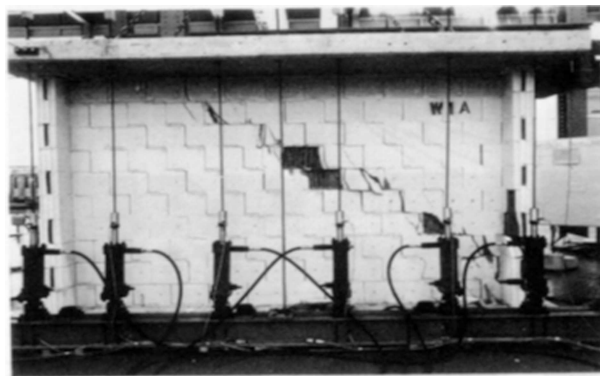
شکل ۹. نحوه شماره‌گذاری ناحیه‌های داخل دیوار بنایی.



شکل ۷. کرنش خمیری در قسمت آجری نمونه بدون کلاف.



شکل ۱۰. بررسی تأثیر سطح نسبی بازشو در دیوار بنایی محصور شده با کلاف بتنی و با بازشو.



شکل ۸. تصویر نمونه با کلاف پس از اتمام آزمایش [۸].

شکل‌های ۷ و ۸، الگوی کرنش خمیری و ترک‌خوردگی نمونه‌های اول را پس از اتمام آزمایش نمایش می‌دهد.

در تصاویر ارائه شده مشاهده می‌شود که قسمت‌هایی که کرنش بیشتری نسبت به کرنش بیشینه کششی مصالح بنایی تعریف شده دارند، به رنگ تیره مشخص شده‌اند و در محدوده‌ی ترک‌خوردگی در مدل آزمایشگاهی قرار دارند. ترک‌خوردگی از گوشه‌ی بالای بازشو شروع شده و به گوشه‌ی پایین دیوار رسیده است که این روند نیز در کاتور کرنش خمیری مشاهده می‌شود. از آنجا که سازه از لحاظ هندسی متقارن است، در مدل آزمایشگاهی تحت بار رفت و برگشتی در دو طرف بازشو، ترک‌خوردگی مشابه مشاهده می‌شود. در مدل اجزاء محدود به دلیل وارد کردن بار به صورت یک‌طرفه، فقط یک طرف دیوار تحت کشش به حد تسلیم خود می‌رسد. این موضوع، خود دلیل دیگری جهت اختلاف بین دو منحنی آزمایشگاهی و اجزاء محدود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همانند نمونه‌ی اول، کاتور کرنش خمیری با محدوده‌ی ترک‌خوردگی قسمت آجری در انتهای آزمایش مطابقت خوبی دارد، که نشان‌دهنده‌ی دقت مدل‌سازی اجزاء محدود است.

جدول ۵. ابعاد بازشو بر حسب متر.

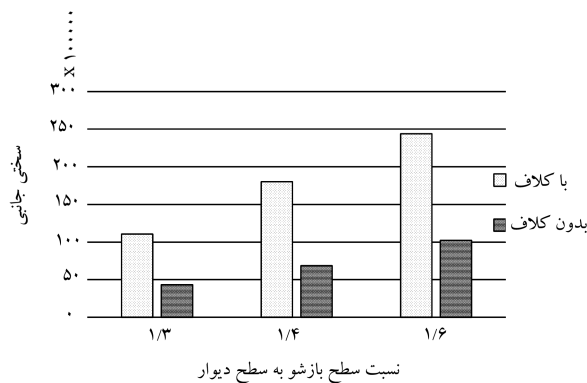
نسبت سطح بازشو به سطح دیوار	طول بازشو (m)	ارتفاع بازشو (m)
$\frac{1}{6}$	۲٫۸۷۷	۱٫۷۳۲
$\frac{1}{4}$	۲٫۵	۱٫۵
$\frac{1}{3}$	۲٫۰۴	۱٫۲۳

۴. نسبت سطح بازشو به سطح دیوار

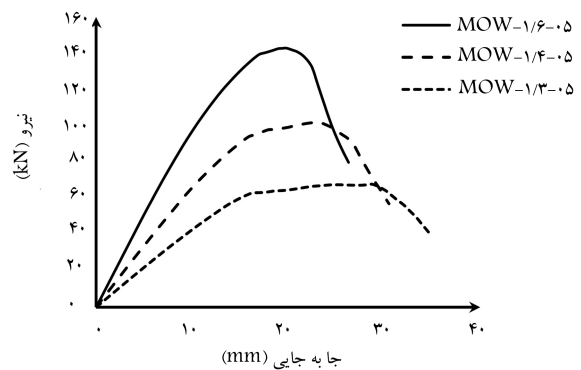
نسبت سطح بازشو به سطح دیوار، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رفتار جانبی دیوار بنایی با بازشو است و جهت بررسی اثر آن، سه مقدار $\frac{1}{6}$ ، $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شده است. ابعاد بازشو متناسب با ابعاد دیوار، مطابق جدول ۵ مد نظر قرار گرفته است. موقعیت بازشو نیز در بررسی حاضر، در مرکز هندسی دیوار قرار داده شده است. مدل‌های موردنظر در بخش کنونی، با نام‌های CMOW - ۱/۳، CMOW - ۱/۴، CMOW - ۱/۶، CMOW - ۱/۴، CMOW - ۱/۳، CMOW - ۱/۶، CMOW - ۱/۴ معرفی شده‌اند. در نام‌گذاری مدل‌ها، حرف C مربوط به محصور بودن دیوار با کلاف، حرف M مربوط به مصالح بنایی دیوار، حرف O مربوط به وجود بازشو در دیوار و حرف W به معنی دیوار باریک است. همچنین قسمت دوم نام‌گذاری، بیان‌گر نسبت سطح بازشو به سطح دیوار است. با توجه به دو شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با کاهش سطح بازشو، مقاومت و سختی دیوار افزایش یافته است. در مورد دیوارهای بدون کلاف، پارامترهای

۳. پارامترهای مورد بررسی

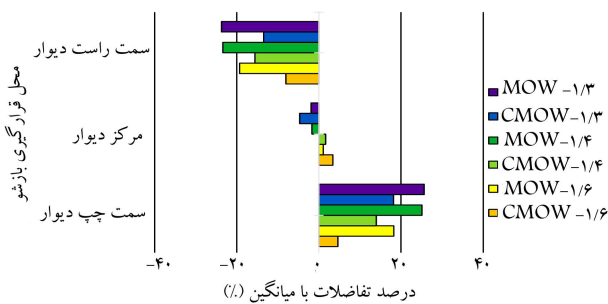
با توجه به گسترده بودن پارامترهای تأثیرگذار در رفتار جانبی دیوار بنایی، در پژوهش حاضر پارامترهای مربوط به نسبت سطح بازشو و دیوار و موقعیت بازشو در دیوار بررسی شده است. جهت بررسی هر نسبت سطح، ۹ حالت قرارگیری بازشو مطابق شکل ۹ در نظر گرفته شده است که هر کدام یک بار با کلاف و یک بار بدون کلاف مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه، هر یک از این پارامترها به صورت مفصل شرح داده شده‌اند.



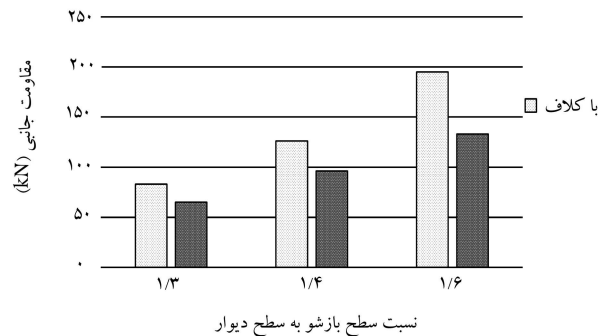
شکل ۱۳. تاثیر نسبت سطح بازشو به سطح دیوار در سختی جانبی دیوار.



شکل ۱۱. بررسی تاثیر سطح نسبی بازشو در دیوار بنایی بدون کلاف و با بازشو.



شکل ۱۴. تاثیر فاصله‌ی بازشو از بر دیوار در مقاومت جانبی دیوار بنایی.



شکل ۱۲. تاثیر نسبت سطح بازشو به سطح دیوار در مقاومت جانبی دیوار.

به صورت متقارن در ۳ ارتفاع مختلف درون دیوار تغییر داده شده و سپس میانگین مقاومت جانبی در هر سمت دیوار و تفاضل آن‌ها با میانگین مقاومت جانبی بین ۹ حالت قرارگیری بازشو درون دیوار محاسبه شده است (شکل ۱۴).

مطابق شکل ۱۴، در تمامی حالت‌های با کلاف و بدون کلاف با نسبت سطح‌های متفاوت، درصد تفاضل‌های مقاومت جانبی با میانگین مقاومت جانبی نسبت به مرکز دیوار متقارن است و اختلاف قابل ملاحظه‌ی با مقاومت در حالتی که بازشو در مرکز دیوار قرار دارد، وجود دارد.

۶. فاصله‌ی قائم بازشو از بالای دیوار

جهت ارزیابی تاثیر فاصله‌ی قائم بازشو از بالای دیوار در رفتار جانبی دیوار بنایی، فاصله‌ی قائم بازشو از بالای دیوار به صورت متقارن تغییر داده شده است. این تغییرات در دو طرف دیوار به صورت قرینه نسبت به مرکز دیوار انجام شده است. لذا میانگین مقاومت جانبی در هر سمت دیوار و تفاضل آن با میانگین مقاومت جانبی بین ۹ حالت قرارگیری بازشو درون دیوار محاسبه شده است (شکل ۱۵).

نتایج نشان می‌دهد، اگرچه در تمامی حالت‌های با کلاف و بدون کلاف با نسبت سطح‌های متفاوت، درصد تفاضل‌های مقاومت جانبی با میانگین مقاومت جانبی نسبت به مرکز دیوار متقارن است، اما اختلاف قابل ملاحظه‌ی با مقاومت در حالتی که بازشو در مرکز دیوار قرار دارد، وجود ندارد. با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵، می‌توان گفت که فاصله‌ی افقی بازشو از بر دیوار، تاثیر بیشتری در مقاومت جانبی دیوار نسبت به فاصله‌ی قائم بازشو از بالای دیوار دارد.

مربوط به تغییر شکل کاهش یافته است که این مسئله در رابطه با دیوارهای با کلاف کمتر مشاهده می‌شود. همچنین استفاده از کلاف، تاثیر بسیار خوبی در شکل‌پذیری و افزایش مقاومت جانبی و نیز افزایش سختی دیوار با بازشو دارد، به طوری که در بیشتر حالات، بیشتر از ۵۰٪ مقاومت دیوار افزایش یافته است. در ادامه، تاثیر نسبت سطح بازشو به سطح دیوار در مقاومت جانبی، سختی جانبی، و شکل‌پذیری دیوار بنایی با بازشو ارزیابی شده است (شکل ۱۲).

مطابق مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان^[۱۱] بیشترین مقدار نسبت مساحت بازشو به مساحت دیوار بنایی برابر $\frac{1}{4}$ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱۲، با کاهش نسبت سطح بازشو به سطح دیوار مقاومت جانبی افزایش یافته و میزان افزایش مقاومت جانبی در حالت کلاف‌دار بیشتر از حالت بدون کلاف است. به همین دلیل، به دنبال کاهش نسبت سطح بازشو به سطح دیوار، شاهد افزایش اختلاف مقاومت بین دیوار با کلاف و بدون کلاف هستیم. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از کلاف تاثیر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت دیوارهایی که نسبت سطح بازشوی بزرگ دارند، ندارد و برای مقاوم‌سازی آن‌ها باید از راه‌حل‌های دیگر برای افزایش مقاومت جانبی استفاده کرد (شکل ۱۳). مطابق شکل ۱۳، وجود و یا عدم وجود کلاف در سختی جانبی بسیار مؤثر است و سختی جانبی را بیشتر از ۱۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین با کاهش مساحت بازشو، همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، سختی افزایش یافته است.

۵. فاصله‌ی افقی بازشو از بر دیوار

در بخش کنونی، تاثیر فاصله‌ی افقی بازشو از بر دیوار، در رفتار جانبی دیوار بنایی ارزیابی شده است. به همین منظور، در تحلیل مدل‌ها فاصله‌ی افقی از بر بازشو

جدول ۷. خلاصه‌ی تحلیل داده‌های آماری مربوط به پارامترهای تغییر شکل.

d		e	
بدون کلاف	با کلاف	بدون کلاف	با کلاف
۴۵٫۰۳	۱۶۷٫۳۱	۳۴٫۰۳	۲۶٫۱۰
واریانس داده‌ها (σ^2)			
۶٫۷۱	۱۲٫۹۳	۵٫۸۳	۵٫۱۱
انحراف معیار (σ)			

جهت تعیین پارامترهای مربوط به تغییر شکل، سه گروه مدل با نسبت بازشویهای $\frac{1}{6}$ ، $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شده است که هر یک از گروه‌های مذکور به همراه جابه‌جایی بازشو درون دیوار، ۹ حالت مختلف را به وجود آورده است که تمامی آن‌ها یک بار برای دیوار با کلاف بتنی و یک بار برای دیوار بدون کلاف محاسبه شده است.

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین توضیح داده شده است، جهت محاسبه‌ی پارامتر e که همان بیشترین جابه‌جایی اعمال شده به دیوار است، باید مقدار تنش پس‌ماند هر منحنی نیرو - جابه‌جایی محاسبه شود. از آنجا که در آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵۶ و نشریه‌ی ۳۶۰ از مقدار ۶۰٪ مقاومت جانبی دیوار به‌عنوان تنش پس‌ماند استفاده شده است،^[۱۲،۱۱] لذا برای مقدار پارامتر تنش پس‌ماند دیوار (c) همان مقدار ۰٫۶ مد نظر قرار گرفته است. با توجه به جدول ۷، پراکندگی پارامترهای موردنظر کم است و می‌توان از میانگین مقادیر حاصل از تحلیل عددی انجام شده استفاده کرد.

جهت محاسبه‌ی پراکندگی داده‌ها، ابتدا باید واریانس هر یک از مقادیر مربوط به پارامترهای e و d را محاسبه کرد. در جدول ۷، پراکندگی هر گروه به‌صورت مجزا با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

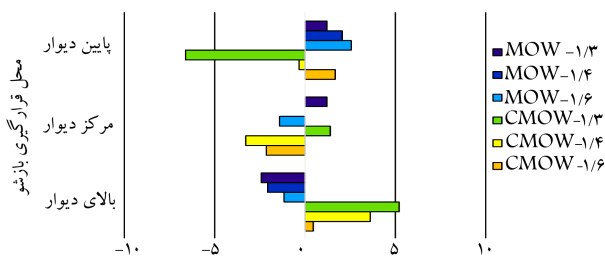
$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (1)$$

جهت تعیین پراکندگی یک جامعه‌ی آماری، یکی از شاخص‌های مهم پراکندگی منحنی نرمال است؛ که در آن مشخص می‌شود که چند درصد داده‌ها در فاصله‌ی بین مرکز میانگین و به فاصله‌ی یک انحراف معیار قرار دارند. با توجه به پراکندگی هر یک از بازه‌های تعریف شده در جدول ۸، می‌توان میانگین هر یک از پارامترها در فاصله‌ی بین مرکز میانگین کل و به طول یک انحراف معیار از میانگین را محاسبه کرد.

با توجه به اینکه ارتفاع دیوار مورد تحلیل برابر ۳ متر است، مقادیر میانگین محاسبه‌شده در جدول ۸ بر ارتفاع دیوار تقسیم و سپس جابه‌جایی نسبی و مقادیر پارامترهای تغییر شکل جهت مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای بتنی با بازشو محاسبه شده است (جدول ۹). مطابق جدول ۹ می‌توان گفت که شکل‌پذیری دیوارهای بتنی با کلاف بیشتر از شکل‌پذیری دیوار بتنی بدون کلاف است. این در حالی است که دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود، تفاوتی میان مدل‌سازی دیوار با کلاف و مدل‌سازی دیوار بدون کلاف قائل نشده است.^[۱۱]

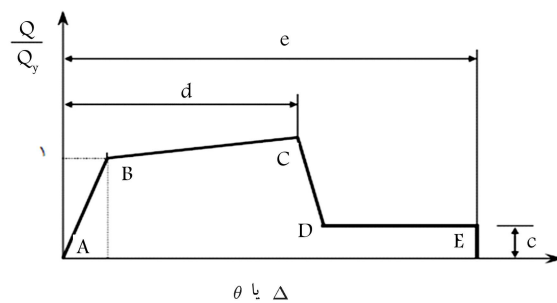
۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار جانبی دیوار باربر بتنی با بازشو مطالعه و تأثیر مشخصات هندسی بازشو در رفتار جانبی آن ارزیابی شده است. مقادیر اصلاح‌شده‌ی نیز برای مدل‌سازی غیرخطی دیوار بتنی بازشودار ارائه شده است. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این موارد اشاره کرد:



درصد تفاضلات با میانگین (%)

شکل ۱۵. تاثیر فاصله‌ی قائم بازشو از بالای دیوار در مقاومت جانبی.



شکل ۱۶. منحنی رفتاری غیرخطی سازه.^[۱۱]

جدول ۶. پارامترهای مدل‌سازی برای روش‌های غیرخطی.^[۸]

پارامترهای مدل‌سازی			مود شکست	برشی لغزشی بدون کلاف
نسبت تنش پس‌ماند	تغییر شکل	نسبت تنش پس‌ماند		
c(%)	d(%)	e(%)		
۰٫۶	۰٫۴	۰٫۸	با کلاف	گهواره‌یی بدون کلاف
۰٫۶	$0.4 \frac{h_{eff}}{L_{eff}}$	$0.8 \frac{h_{eff}}{L_{eff}}$	با کلاف	

۷. پارامترهای مربوط به شکل‌پذیری دیوار بتنی با بازشو

در آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵۶ و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود، ۳ پارامتر مهم e، d و c برای منحنی رفتاری نیرو - جابه‌جایی (شکل ۱۶) در نظر گرفته شده است (جدول ۶). پارامترهای مربوط به منحنی مذکور، جهت تخمین حدود رفتاری دیوارهای بتنی استفاده شده است.^[۱۱،۸] در ادامه، مقادیر پیشنهادی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی مربوط به شکل‌پذیری دیوارهای بتنی با بازشو ارائه شده است که می‌تواند برای مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای مذکور استفاده شود.

با توجه به جدول ۶ می‌توان گفت که برخلاف انتظار بدیهی، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی تفاوتی میان دیوارهای بتنی با کلاف و بدون کلاف در مدل‌سازی برای روش‌های غیرخطی قائل نشده است. در همین راستا، در نوشتار حاضر سعی شده است مدل واقع‌بینانه‌تری برای تحلیل غیرخطی دیوارهای بتنی ارائه شود.

جدول ۸. پراکنندگی مربوط به پارامترهای تغییر شکل.

d		e		
$\bar{x} \pm 2\sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm 2\sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$	
۹۳	۷۴	۹۶	۶۷	با کلاف
۸۹	۶۳	۹۶	۵۹	بدون کلاف
۵۳٫۴۴	۵۳٫۰۶	۳۰٫۷۹	۳۲٫۳۲	با کلاف
۳۴٫۰۴	۳۶٫۰۹	۲۶٫۶۱	۲۶٫۵۰	بدون کلاف

درصد حضور داده‌ها در محدوده‌ی تعیین شده (%)

میانگین داده‌ها در محدوده‌ی تعیین شده (mm)

- جدول ۹. پارامترهای مدل‌سازی تغییر شکل پیشنهادی برای روش‌های غیرخطی.
۱. با کاهش سطح نسبت سطح بازشو به سطح دیوار شکل‌پذیری دیوار کاهش می‌یابد.
۲. میزان کاهش شکل‌پذیری در دیوار بدون کلاف به مراتب بیشتر از میزان کاهش شکل‌پذیری در دیوار با کلاف است.
۳. استفاده از کلاف، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت دیوارهای با نسبت سطح بازشوی بزرگ ندارد.
۴. تغییر در فاصله‌ی قائم بازشو نسبت به بالای دیوار، تأثیر کمتری نسبت به تغییر فاصله‌ی افقی بازشو از بر دیوار دارد.
۵. با جابه‌جا کردن بازشو در راستای افقی و قائم، مقدار مقاومت جانبی دیوار نسبت به مرکز دیوار به صورت متقارن تغییر می‌کند.
۶. شکل‌پذیری دیوار بنایی با کلاف بیشتر از دیوار بدون کلاف است.

دیوار بنایی با بازشو	c(%)	d(%)	e(%)
با کلاف	۰٫۰۶	۱٫۷۷	۱٫۰۸
بدون کلاف	۰٫۰۶	۱٫۲۰	۰٫۸۸

پانویس‌ها

1. flange
2. drift
3. macromodeling
4. extensive micromodeling
5. simplified micromodeling

منابع (References)

- Gambarotta, L. and Lagomarsino, S. "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: The mortar joint model and its applications", *Earthquake Eng. Struct.*, **26**(7), pp. 423-439 (1997).
- Yi, T., Moon, F.L., Leon, R.T. and Kahn, L.F. "Effective pier model for the nonlinear In-plane analysis of individual URM piers", *The Masonry Society Journal*, **23**(1), pp.21-35 (2005).
- Beyer, K. "Peak and residual strengths of brick masonry spandrels", *Engineering Structures*, **41**, pp. 533-547 (2012).
- Russell, A., Elwood, K. and Ingham, J. "Lateral force-displacement response of unreinforced masonry walls with flanges", *J. Struct. Eng.*, **140**(4), pp. 1-12 (2014).
- Abaqus Analysis User Manual*, Version6.14, Providence, RI, USA (2014).
- Behnamfar, F. and Afshari, M. "Collapse analysis and strengthening of stone arch bridges against earthquake", *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, **7**(1), pp. 1-25 (2014).
- Sarrafi, B. and Eshghi, S., "Experimental study on lateral strength of confined masonry walls", 15th World Conference Earthquake Engineering, Lisboa (2012).
- Ganz, H.R. and Thurlimann, B. "Tests on masonry walls under normal and shear loading", Rep. No. 7502-4, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (In German) (1984).
- Kaushik, H.B., Rai, D.C. and Jain, S.K. "Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression", *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**(9), pp. 728-739 (2007).
- Section VIII National Building Regulations (Persian), *Design and Construction of the Masonry Building*, National Building Regulations Office, Edited (2013).
- Regulations for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Document 360, *President Deputy of Planning and Strategic Inspection*, 2nd Ed. (2013).
- FEMA356, *Seismic Rehabilitation Prestandard*, Federal Emergency Management Agency (2000).