

بررسی تأثیر مشخصات المان مرزی در رفتار دیوارهای برشی بتنی کوتاه

فرهاد محمدی‌دازانی (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

عبدالرضا سروفقدمقدم* (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۱۹-۱۲۷، یادداشت فنی)
دوری ۳۰-۲، شماره ۱/۱، ص. ۱۹-۱۲۷، یادداشت فنی

در این نوشتار، با تحلیل ۳۰ مدل از دیوارهای برشی بتنی کوتاه به بررسی تأثیر متغیرهایی از قبیل نسبت ارتفاع به طول دیوار، میزان بار محوری و به ویژه تأثیر المان مرزی و برخی مشخصات آن از قبیل میزان آرماتور طولی و میزان آرماتور عرضی (محصورشدگی بتن) در رفتار این‌گونه دیوارها پرداخته شده است. پارامترهای پاسخ بررسی شده عبارتند از: مقاومت بیشینه و تغییر شکل نظیر آن و همچنین مود گسیختگی دیوار. نتایج حاصله نشان می‌دهد که المان مرزی با توجه به نسبت ارتفاع به طول دیوار و شرایط طراحی‌اش، تأثیرات متفاوتی از خود نشان می‌دهد. با افزایش آرماتور طولی المان مرزی، تغییر شکل در مقاومت بیشینه در دیوارهای با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵، افزایش و در دیوارهای با نسبت ۱/۰ و ۱/۵، کاهش می‌یابد. این پدیده تابعی از مود گسیختگی دیوار است. در بعضی از موارد تغییر در مشخصات المان مرزی باعث تغییر مود گسیختگی دیوار می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوار برشی کوتاه، تحلیل المان محدود غیرخطی، مود گسیختگی، مقاومت بیشینه، تغییر شکل در مقاومت بیشینه.

۱. مقدمه

نسبت‌های زیاد برای آرماتور طولی المان مرزی یا ابعاد بزرگ برای نواحی انتهایی، با جلوگیری از ایجاد مود گسیختگی خمشی در نمونه‌ها، تمایل داشته‌اند که بیشتر به بررسی رفتار غالب برشی و تأثیر برش بپردازند.^[۲] بنابراین در مطالعات گذشته تلاش برای یافتن راهکارهایی برای بهبود پاسخ لرزه‌یی دیوارهای کوتاه کمتر به چشم می‌خورد. البته، می‌توان به استفاده از آرماتورهای قطری در دیوارهای کوتاه اشاره کرد،^[۳] که امروزه به دلیل مشکلات اجرایی کمتر کاربرد دارند. به علاوه نتایج مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی محصورکردن بتن المان مرزی در دیوارهای با نسبت ارتفاع به طول ۱/۰ و ۱/۵،^[۴] نشان‌دهنده‌ی بهبود نسبی توانایی استهلاک انرژی و شکل‌پذیری تغییرمکان، البته نه به اندازه‌ی دیوارهای بلند است.

با توجه به مطالب ذکرشده و به دلیل کمبود مطالعات پارامتری در خصوص تأثیر المان‌های مرزی در دیوارهای کوتاه، این سؤال پیش می‌آید که استفاده از راهکارهای متداول که برای بهبود پاسخ دیوارهای بلند کاربرد دارند تا چه حد در مورد دیوارهای کوتاه مؤثر هستند. بنابراین در این پژوهش با انتخاب پارامترهای مختلف، به ویژه خصوصیات المان مرزی، تأثیر این پارامترها در رفتار دیوارهای کوتاه بررسی شده است.

با افزایش توانایی نرم‌فزارها در تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن‌آرمه می‌توان با اجتناب از آزمایش‌های پر هزینه، تخمین مناسبی از رفتار سازه‌ها به دست آورد.

از دیوارهای برشی کوتاه در ساختمان‌های کم ارتفاع و مقاوم‌سازی آنها و طبقات پایین ساختمان‌های بلندمرتبه می‌شود. قطعات دیوار شکل‌گرفته به وسیله‌ی بازشوهای در و پنجره نیز رفتاری مشابه دیوارهای برشی کوتاه دارند. برخی پژوهش‌ها، دیوارهای با نسبت ارتفاع به طول کمتر از ۱/۵ را به عنوان دیوارهای برشی کوتاه معرفی کرده‌اند.^[۱] تنش‌های برشی در مقاومت و شکل‌پذیری جانبی این دیوارها تأثیر قابل ملاحظه‌یی دارند. تحلیل سازه‌های بتن‌آرمه با رفتار غالب برشی پیچیده است و ممکن است در این حالت، دیوار رفتار لرزه‌یی مناسبی نداشته باشد. همچنین دیوارهای برشی کوتاه، مودهای گسیختگی متنوعی تحت بارگذاری جانبی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل شناخت بهتر رفتار دیوارهای برشی کوتاه و دست‌یابی به اطلاعات بیشتری که به طراحان در تخمین مناسب رفتار دیوارهای برشی کوتاه کمک کند، مورد توجه بوده است.

در سال ۲۰۰۹ پژوهشگران با جمع‌آوری نتایج ۱۵۰ نمونه‌ی آزمایشگاهی از دیوارهای برشی کوتاه با مقطع مستطیلی و ۲۸۴ نمونه با مقاطع دمبلی شکل و بالدار، یک پایگاه داده‌ی جامع در خصوص آزمایش‌های انجام‌شده بر روی این گونه دیوارها ایجاد کرده‌اند. با بررسی کلیات مطالعه‌های آزمایشگاهی خلاصه‌شده در پایگاه داده‌ی مذکور، این نتیجه حاصل شده است که اکثر پژوهشگران با انتخاب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۱۰/۱۳۹۰، اصلاحیه ۱۹/۱۱/۱۳۹۱، پذیرش ۱۷/۲/۱۳۹۱.

از این رو در این نوشتار با انتخاب نرم افزار VecTor2^[5]، تأثیر پارامترهای مذکور با بررسی نتایج تحلیل ۳۰ مدل از دیوارهای کوتاه بررسی شده است. در ادامه، ابتدا برای اطمینان از صحت مدل سازی ها، نتایج تحلیل چند نمونه آزمایشگاهی با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه و سپس به معرفی ۳۰ مدل مذکور پرداخته و همچنین خصوصیات مدل ها و متغیرهای بررسی شده بیان شده است. مدل ها بر اساس نسبت ارتفاع به طولشان به ۳ دسته تقسیم شده اند. نتایج تحلیل ابتدا برای هر دسته به طور جداگانه ارائه و برخی نکات جالب توجه در تحلیل بیان شده است. پس از آن، برای هر نسبت ارتفاع به طول، نتایج حاصله برای هر متغیر میانگین گیری و با یکدیگر مقایسه شده اند. در انتها نیز، نتیجه گیری و پیشنهاد های مربوطه ارائه شده است.

۲. راستی سنجی نتایج VecTor2

نرم افزار VecTor2، یک نرم افزار تحلیل المان محدود دو بعدی سازه های بتن آرمه است که برای مدل سازی ترک ها از روش ترک پخش شده ی چرخنده^۱ استفاده می کند. در این روش، ترک در هر المان به طور جداگانه اتفاق می افتد و خصوصیات المان قبل و بعد از ترک خوردگی متفاوت است. امتداد ترک ها نیز در حین تحلیل با توجه به شرایط المان و تنش ها و کرنش های آن متغیر است. VecTor2 روند مذکور را با به کارگیری روابط MCFT^۲ در حل سازه انجام می دهد. این روابط به کمک آزمایش المان های بتن آرمه تحت تنش برشی خالص و ترکیب برش و بار محوری توسعه داده شده است. این معادلات در برگیرنده ی روابطی برای مدل سازی مصالح، معادلات تعادل و سازگاری کرنش هاست.^[۶] بتن ترک خورده هنگامی که تحت تنش های دو محوره قرار می گیرد، در مقایسه با بتن تحت فشار تک محوره، مقاومت کمتری از خود نشان می دهد. این پدیده به نرم شوندگی فشاری^۳ معروف است که در MCFT با یک ضریب کاهشدهنده، که تابعی از کرنش کشش بیشینه ی المان است، اعمال می شود. یکی از جنبه های مهم MCFT، مدل کردن تنش های کششی اصلی بتن است. این پدیده در حقیقت سهم بتن در سختی آرماتورها بعد از ترک خوردگی را نشان می دهد، که سخت شدگی کششی^۴ نامیده می شود و تأثیر قابل توجهی در سهم بتن در مقاومت برشی المان بتن مسلح دارد. در MCFT، تنش های کششی در بتن تا رسیدن به تنش ترک خوردگی به صورت خطی افزایش می یابند. بعد از ترک خوردگی نیز با افزایش کرنش کششی اصلی، تنش کششی اصلی کاهش می یابد. میزان این کاهش با کمک رابطه ی تجربی که تابعی از کرنش کششی بیشینه است محاسبه می شود.

در روابط اصلی MCFT، برای آرماتورها یک رابطه ی تنش - کرنش دو خطی استفاده می شود. البته VecTor2 قابلیت لحاظ کردن سخت شوندگی کرنشی را هم برای آرماتورها دارد که در این تحقیق از این قابلیت نرم افزار استفاده شده است. در این حالت پس از رسیدن آرماتور به کرنش شروع سخت شوندگی، مقاومت آن به صورت خطی تا رسیدن به تنش نهایی، که متناظر با کرنش نهایی است، افزایش می یابد. روابط تعادل در MCFT به وسیله ی دایره ی موهر تنش ها بیان می شوند. دایره ی موهر تنش های بتن ترک خورده برابر مجموع دایره ی موهر تنش های آرماتور و بتن است. فرض می شود آرماتورها فقط در جهت خود آرماتور نیروی محوری تحمل می کنند و بنابراین در مقابل تنش های برشی مقاومت نمی کنند. در نتیجه، تنش های بتن در دایره ی موهر برابر است با متناظرشان در دایره ی موهر تنش های بتن مسلح.

در محل ترک ها تنش کششی بتن در جهت محور اصلی به صفر می رسد و تنش قفل و بست سنگدانه ها به پایداری تعادل کمک می کند. به علاوه، تنش های آرماتورها در مقایسه با تنش های متوسط، ممکن است در محل ترک ها بیشتر باشند؛ بنابراین توسعه ی روابطی برای کنترل تنش در محل ترک ها هم ضروری است، که این نیاز با روابط MCFT ارضاء می شود.

اگر چه ترک ها در بتن، پدید آورنده ی غیر یکپارچگی و انفصال هستند؛ کرنش های متوسط در طولی که شامل تعدادی ترک می شود، به عنوان ابزاری مورد توجه قرار گرفته است که می تواند پیوستگی مصالح را در MCFT به نحوی مدل کند. در نتیجه، مشابه همه ی مصالح یکپارچه و پیوسته، سازگاری در بتن مسلح با دایره ی موهر کرنش ها بیان می شود.

مقایسه ی نتایج ۱۰۰ آزمایش المان های بتن آرمه ی موجود در ادبیات فنی با تخمین های MCFT نشان داده است که MCFT مقاومت این المان ها را با نسبت متوسط آزمایش به مقدار حاصل از روابط برابر ۱/۰۱ و ضریب تغییرات ۱۲/۲٪ تخمین زده است.^[۷]

به منظور انجام مطالعات پارامتری با نرم افزار VecTor2 ابتدا باید نتایج آن راستی سنجی شود. برای این منظور ۵ نمونه ی آزمایشگاهی انتخاب و با این نرم افزار مدل سازی شده اند. نمونه های آزمایشگاهی انتخاب شده عبارتند از: نمونه ی WALL^[۸]، نمونه ی U^{۱۰}،^[۹] و نمونه های M^۳ و M^۴.^[۱۰] در انتخاب نمونه ها سعی شده است مودهای مختلف شکست دیوارهای کوتاه شامل کشش قطری (تسلیم آرماتورهای افقی جان) در نمونه ی WALL، خمشی (تسلیم آرماتورهای قائم) در نمونه ی U^{۱۰}، فشار قطری (خردشدگی بتن جان) در نمونه ی SW^{۲۶} و ترکیبی از مودهای فوق در نمونه های M^۳ و M^۴ پوشش داده شود (جدول ۱).

در مدل سازی های علاوه بر راهنمای برنامه ی VecTor2، از توصیه های انجام شده برای مدل سازی المان محدود دیوارهای برشی استفاده شده است.^[۱۱] لازم به ذکر است که تحلیل ها در نسخه ی نمونه ی^۵ نرم افزار انجام شده اند که فقط قابلیت استفاده از پیش فرض های برنامه در مدل سازی مصالح و روش های تحلیل را دارد. در ادامه، جزئیات مدل سازی رایانه یی شرح داده شده است. از این جزئیات هم برای مدل سازی نمونه های آزمایشگاهی و هم مدل های معرفی شده در قسمت های بعدی استفاده شده است. برای تعیین ابعاد المان بندی مناسب برای هر نمونه، تحلیل با کاهش ابعاد المان آقدر ادامه می یابد تا برای یک بُعد مشخص تغییر در نتایج تحلیل ناچیز باشد. این بُعد به عنوان بُعد بهینه برای المان بندی انتخاب شده است. معمولاً نمونه های آزمایشگاهی دارای یک تیر فوقانی برای انتقال بار جانبی از جک ها به نمونه هستند. برای نمونه های آزمایشگاهی انتخاب شده در این تحقیق،

جدول ۱. مشخصات آزمایشگاهی و مود شکست نمونه های انتخاب شده.

نمونه	نسبت ارتفاع به طول	نوع آزمایش	بار محوری (KN)	شرایط مرزی
Wall	۰٫۵	چرخه یی	۰	بدون المان مرزی
U ^{۱۰}	۱٫۰	چرخه یی	۳۰۰	بدون المان مرزی
SW ^{۲۶}	۲٫۰	یکناخت	۰	با المان مرزی
M ^۳	۰٫۶۵	چرخه یی	۱۳۶	بدون المان مرزی
M ^۴	۰٫۶۵	چرخه یی	۷۶	بدون المان مرزی

المان مرزی (محصورشدگی بتن). در جدول ۲ مقادیر و شرایط در نظر گرفته شده برای هر متغیر خلاصه شده است.

در این جدول، h ارتفاع دیوار، l طول افقی دیوار، f'_c مقاومت فشاری مشخصه ی بتن، و A_g مساحت مقطع دیوار است. در ادامه، برای مقادیر و شرایط در نظر گرفته شده برای متغیرها توضیحاتی ارائه شده است.

با انتخاب ۳ مقدار برای (h/l) سعی شده است تا جنبه های مختلف شکست در این دیوارها پوشش داده و بررسی شود. این متغیر، متغیر اصلی دسته بندی مدل هاست. 3° مدل ساخته شده با عناوین $m1$ تا $m3^\circ$ نام گذاری شده اند، که مدل های $m1$ تا $m1^\circ$ دارای $h/l=0.5$ ، مدل های $m11$ تا $m2^\circ$ دارای $h/l=1.0$ و مدل های $m21$ تا $m3^\circ$ دارای $h/l=1.5$ هستند.

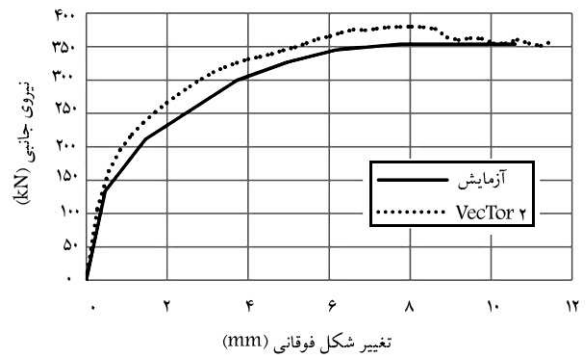
در مقایسه های انجام شده برای بررسی تأثیر متغیر ایجاد المان مرزی، دیوارهایی بدون آرما توری طولی المان مرزی با دیوارهایی با ساده ترین حالت المان مرزی (با بتن محصورنشده و آرما توری طولی ۱٪) مقایسه شده اند. منظور از بدون آرما توری طولی المان مرزی این است که آرما تورهایی قائم جان در تمام مقطع دیوار به طور یکنواخت پخش شده اند و میلگرد قائم اضافه ای در دو انتهای مقطع دیوار وجود ندارد. هدف از این مقایسه دستیابی به یک دید کلی در خصوص ایجاد المان مرزی در این دیوارهاست.

در برخی پژوهش ها، پارامترهای مدل سازی دیوارهای با رفتار غالب برشی تابعی از میزان بار محوری است^[۱] و در آنها قید شده است که اگر بار محوری از مقدار $A_g \leq 0.05 f'_c$ افزایش یابد، باید میزان دررفت تا قبل از شروع افت مقاومت را از ۱٪ به ۰.۷۵٪ کاهش داد. به همین دلیل در این تحقیق با انتخاب دو مقدار ۰ و $A_g \leq 0.05 f'_c$ برای بار محوری و مقایسه ای نتایج آن، تأثیر این پارامتر در پاسخ نمونه ها بررسی شده است.

دلیل انتخاب مقدار ۱٪ برای آرما توری طولی المان مرزی این است که در دیوارهای برشی با طراحی صحیح برای ملاحظات اجرایی و شکل پذیری مناسب، میزان آرما توری طولی المان مرزی معمولاً حدود ۱٪ انتخاب می شود. میزان ۳٪ نیز به این دلیل انتخاب شده است که طراحان معمولاً بیشینه درصد آرما توری طولی در دیوارها را حدود ۳٪ در نظر می گیرند.

در المان های مرزی تعریف شده در این تحقیق دو حالت برای آرما تورهایی عرضی المان مرزی وجود دارد، یک حالت این است که همان آرما تورهایی افقی جان در المان مرزی امتداد یابند که در این حالت بتن المان مرزی محصورنشده باقی می ماند، و یک حالت هم خاموت گذاری المان مرزی به گونه ای است که ضوابط ویژه مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمانی ایران^[۱۲] پوشش داده شوند. در این حالت نرم افزار VecTor2 محصورشدگی بتن را به طور خودکار بر اساس میزان آرما توری محصورکننده لحاظ می کند.

با توجه به توضیحات فوق و براساس مندرجات جدول ۲، خصوصیات هر مدل بر اساس نام آن در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر متغیرهای معرفی شده، مدل ها



شکل ۱. مقایسه ی منحنی نیرو-تغییر شکل نمونه ی $U1.0$ حاصل از آزمایش کوانگ و هو^[۴] با منحنی حاصل از تحلیل.

تیر فوقانی در مدل سازی لحاظ و بار جانبی به انتهای تیر به صورت متمرکز اعمال شده است. گره های وجه پایینی دیوار هم برای نمونه های آزمایشگاهی و هم برای مدل های فرضی فقط در برابر انتقال مقید شده اند. از مدل سازی فونداسیون نمونه های آزمایشگاهی صرف نظر شده است. چون مدل های فرضی فاقد تیر فوقانی هستند، بار جانبی به صورت گسترده روی گره های وجه فوقانی مدل ها اعمال شده است. نوع تحلیل انجام شده، تحلیل استاتیکی غیرخطی یکنواخت است.

برای مثال، نتیجه ی تحلیل نمونه ی $U1.0$ در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل نمودار حاصل از تحلیل، همخوانی مناسبی با نمودار آزمایش دارد. مود گسیختگی این نمونه ی تسلیم، آرما تورهایی قائم است. نقطه ی افت مقاومت در نمودار تحلیل، نزدیک به نقطه ی آغاز تسلیم کامل در نمودار آزمایش و نمودار تحلیل بالاتر از نمودار آزمایش قرار گرفته است. نسبت مقاومت بیشینه محاسبه شده و تغییر شکل نظیر آن به مقدار حاصل از آزمایش به ترتیب برابر 1.07 و 1.03 به دست آمده است.

به طور کلی پس از بررسی نتایج تحلیل تمام نمونه های آزمایشگاهی معرفی شده، نرم افزار VecTor2 مقاومت نمونه های فوق را به طور میانگین برابر ۹۶٪ مقدار حاصل از آزمایش و تغییر شکل در مقاومت بیشینه را به طور میانگین برابر ۹۲٪ مقدار حاصل از آزمایش به دست داده است. این نتیجه حاکی از آن است که برای مطالعات پارامتری که در قسمت بعدی به آن پرداخته خواهد شد، دقت نرم افزار VecTor2 برای انجام تحلیل ها مناسب است.

۳. متغیرها، پارامترهای پاسخ و معرفی مدل ها

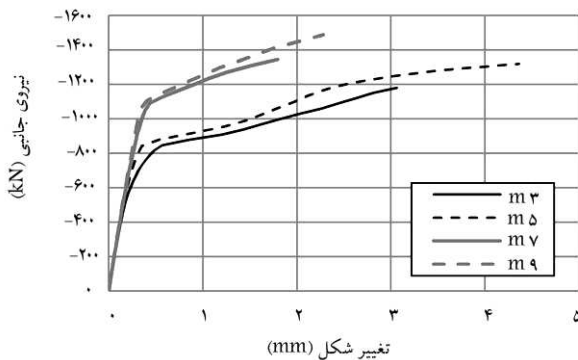
متغیرهای در نظر گرفته شده عبارتند از: نسبت ارتفاع به طول دیوار (h/l)، ایجاد المان مرزی، میزان بار محوری، میزان آرما توری طولی المان مرزی و میزان آرما توری عرضی

جدول ۲. معرفی متغیرهای مطالعه شده و شرایط آنها.

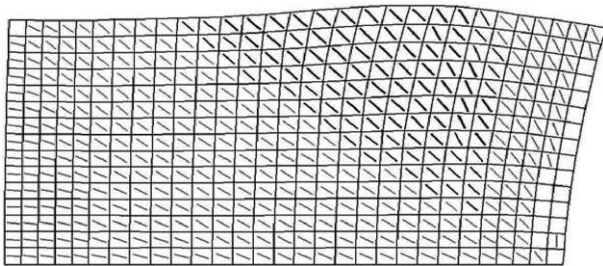
مقادیر و شرایط در نظر گرفته برای متغیر			متغیر
۱	۰.۵	۱.۵	نسبت ارتفاع به طول دیوار (h/l)
بدون آرما توری طولی المان مرزی	المان مرزی با آرما توری طولی ۱٪ و بتن محصورنشده	صفر	ایجاد المان مرزی (قراردادن آرما توری قائم (خمش) در دو انتهای مقطع عرضی دیوار)
۱٪	۰.۷۵	۳٪	بار محوری
المان مرزی محصورنشده	المان مرزی محصورنشده	المان مرزی محصورنشده	آرما توری طولی (قائم) المان مرزی
			آرما توری عرضی (افقی) المان مرزی (محصورشدگی بتن)

جدول ۳. خصوصیات مدل‌ها بر اساس نام هر مدل.

ردیف	نام مدل			المان مرزی	بار محوری	آرماتور طولی المان مرزی (%)	محصورشدگی بتن المان مرزی
	h/l	۱/۵	۱/۰				
۱	m۱	m۱۱	m۲۱	ندارد	۰	—	—
۲	m۲	m۱۲	m۲۲	ندارد	$0.5 f'_c A_g$	—	—
۳	m۳	m۱۳	m۲۳	دارد	۰	۱	محصورنشده
۴	m۴	m۱۴	m۲۴	دارد	۰	۱	محصورشده
۵	m۵	m۱۵	m۲۵	دارد	۰	۳	محصورنشده
۶	m۶	m۱۶	m۲۶	دارد	۰	۳	محصورشده
۷	m۷	m۱۷	m۲۷	دارد	$0.5 f'_c A_g$	۱	محصورنشده
۸	m۸	m۱۸	m۲۸	دارد	$0.5 f'_c A_g$	۱	محصور شده
۹	m۹	m۱۹	m۲۹	دارد	$0.5 f'_c A_g$	۳	محصور نشده
۱۰	m۱۰	m۲۰	m۳۰	دارد	$0.5 f'_c A_g$	۳	محصور شده



شکل ۲. مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییرشکل مدل m۳ (آرماتور طولی المان مرزی ۱٪) با مدل m۵ (آرماتور طولی المان مرزی ۳٪) و مدل m۷ با مدل m۹.



شکل ۳. نمای دیوار مدل m۵ (آرماتور طولی المان مرزی ۳٪) در لحظه‌ی رسیدن به مقاومت بیشینه.

همان‌گونه که از نمودار شکل ۲ مشخص است، افزایش آرماتور طولی در المان مرزی از ۱٪ به ۳٪ باعث افزایش جزئی مقاومت و افزایش شکل‌پذیری شده است.

این پدیده به دلیل قوی‌تر شدن المان مرزی است. المان مرزی قوی‌تر، گسترش ترک‌های کشش قطری را محدودتر می‌کند و ترک‌های جان به المان مرزی گسترش نمی‌یابند. در این حالت دیوار مانند یک سازه‌ی خرابایی به تحمل نیرو و تغییرشکل ادامه می‌دهد و در نتیجه مقاومت و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد؛ همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، ترک‌های با عرض بیشتر در المان مرزی گسترش نیافته‌اند.

جدول ۴. خصوصیات ثابت مدل‌های ساخته‌شده.

۳ m	طول افقی مدل‌ها (l)
۰/۴۵ m	عرض (طول افقی) المان‌های مرزی
۰/۲ m	ضخامت جان و المان‌های مرزی
۲۶ MPa	مقاومت فشاری بتن
۳۹۰ MPa	تنش تسلیم آرماتورها
۵۹۰ MPa	تنش نهایی آرماتورها
2×10^5 MPa	مدول کشسانی فولاد
٪۰/۵	میزان آرماتور افقی جان
٪۰/۵	میزان آرماتور قائم جان

دارای خصوصیات مشترک و ثابتی هستند که این خصوصیات در جدول ۴ خلاصه شده است.

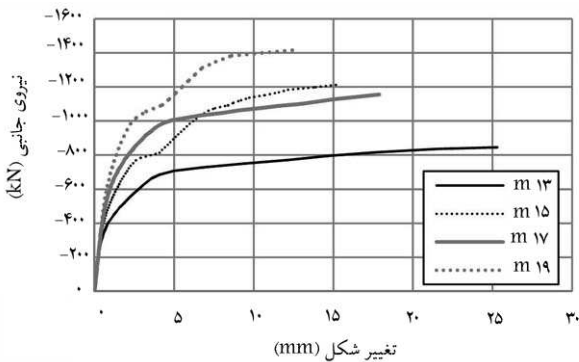
۴. نتایج تحلیل

مدل‌های معرفی‌شده، تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت تحلیل غیرخطی شدند. بار جانبی به طور یکنواخت روی گره‌های وجه فوقانی دیوار توزیع شده و در حین تحلیل با گام‌های ثابت از مقدار ۰ تا مقدار بیشینه افزایش یافته است. بار ثقلی نیز مشابه بار جانبی اعمال شده است؛ با این تفاوت که در آغاز تحلیل و قبل از اعمال بار جانبی تمامی بار ثقلی روی دیوار اعمال شده است. پارامترهای پاسخ عبارت‌اند از مقاومت بیشینه و تغییرشکل نظیر آن و حالت شکست دیوار. از این پس در این نوشتار منظور از عبارت تغییرشکل، مقدار نظیر آن در مقاومت بیشینه و منظور از عبارت شکل‌پذیری، شکل‌پذیری تغییرمکان در جابجایی نظیر مقاومت بیشینه‌ی دیوار است. تغییرشکل محاسبه‌شده، تغییرشکل وسط ضلع فوقانی مدل‌هاست. نتایج تحلیل در جدول ۵ برای تمام مدل‌ها نشان داده شده است.

در قسمت‌های بعدی مطالعات آماری بر روی نتایج حاصله انجام و در این قسمت نیز به ذکر برخی نکات قابل توجه در مورد نتایج تحلیل‌ها پرداخته شده است. در مورد تأثیر افزایش آرماتور طولی المان مرزی در حالت $h/l = 0.5$

جدول ۵. حالت شکست، مقاومت بیشینه و تغییرشکل در مقاومت بیشینه، حاصل از تحلیل.

$h/l = 1/5$				$h/l = 1/0$				$h/l = 0/5$			
تغییرشکل در مقاومت بیشینه (mm)	مقاومت بیشینه (KN)	حالت شکست	مدل	تغییرشکل در مقاومت بیشینه (mm)	مقاومت بیشینه (KN)	حالت شکست	مدل	تغییرشکل در مقاومت بیشینه (mm)	مقاومت بیشینه (KN)	حالت شکست	مدل
۵۳٫۵	۴۵۸٫۲	خمشی	m۲۱	۲۷٫۴۷	۷۲۲	خمشی	m۱۱	۴٫۲	۱۱۱۱	ترکیب خمشی و کشش قطری	m۱
۴۷٫۴	۶۶۱٫۱	خمشی	m۲۲	۲۱٫۱۹	۹۷۶	خمشی	m۱۲	۱٫۸۸	۱۳۷۷	کشش قطری	m۲
۴۶٫۲	۵۵۳٫۳	خمشی	m۲۳	۲۵٫۲۹	۸۴۶	خمشی	m۱۳	۳٫۰۶	۱۱۷۹	کشش قطری	m۳
۵۱٫۳	۵۶۷	خمشی	m۲۴	۳۰٫۰۶	۹۰۶٫۹	خمشی	m۱۴	۳٫۳۴	۱۲۱۵	کشش قطری	m۴
۲۶٫۵۱	۹۵۱٫۸	خمشی	m۲۵	۱۵٫۴۱	۱۲۱۴٫۷	کشش قطری	m۱۵	۴٫۳۶	۱۳۱۸	کشش قطری	m۵
۳۸٫۸	۹۸۷٫۳	خمشی	m۲۶	۱۵٫۲	۱۲۰۵	کشش قطری	m۱۶	۴٫۳	۱۳۲۵	کشش قطری	m۶
۳۲٫۳	۷۵۷٫۴	خمشی	m۲۷	۱۷٫۹	۱۱۵۵٫۶	خمشی	m۱۷	۱٫۷۹	۱۳۴۶	کشش قطری	m۷
۴۲٫۷	۷۸۱٫۹	خمشی	m۲۸	۲۳٫۶	۱۲۴۴	خمشی	m۱۸	۲٫۲۶	۱۴۳۹	کشش قطری	m۸
۲۱٫۵	۱۱۴۴	خمشی	m۲۹	۱۲٫۸	۱۴۱۸	کشش قطری	m۱۹	۲٫۲۸	۱۴۸۹	کشش قطری	m۹
۳۱٫۲	۱۱۷۹٫۹	خمشی	m۳۰	۱۴٫۸۸	۱۴۲۷	کشش قطری	m۲۰	۲٫۳۷	۱۵۲۲	کشش قطری	m۱۰

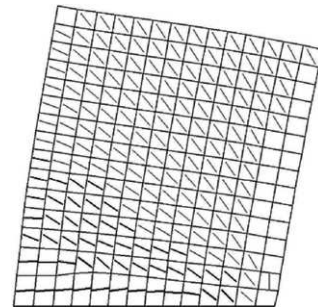


شکل ۶. مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییرشکل مدل m۱۳ (آرماتور طولی المان مرزی ۱٪) با مدل m۱۷ (۳٪) و مدل m۱۹ (۱٪) (آرماتور طولی المان مرزی ۳٪).

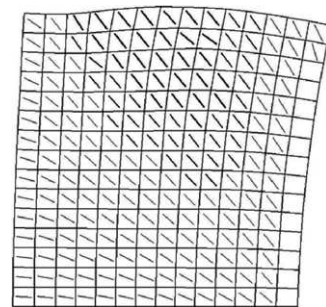
خمشی افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که دیوار قبل از رسیدن به مقاومت خمشی به مقاومت برشی خود برسد.

در این میان دو موضوع قابل بحث است: اولاً افزایش آرماتور طولی باعث تغییر در مود گسیختگی می‌شود. همان‌گونه که از نمودار نیرو-تغییرشکل مدل‌های m۱۵ و m۱۹ (شکل ۶) مشخص است تغییر مود خرابی دیوار باعث افزایش مقاومت نهایی دیوار شده است. به بیان دیگر، روند افزایش مقاومت دیوار تغییر کرده است و نمودارها دارای دو قسمت مجزا هستند، که علت آن این است که آغاز ترک‌ها که با توجه به زاویه‌ی آنها (شکل ۵)، ترک‌های خمشی در المان مرزی هستند؛ نوید غالب بودن رفتار خمشی در دیوارها را می‌دهد. اما با بازشدن ترک‌های قطری در جان دیوار، آرماتورهای افقی که تا قبل از بازشدن ترک‌ها در حالت کشسان بودند، کنترل‌کننده‌ی رفتار دیوار هستند و به مرور تسلیم می‌شوند. این موضوع باعث افزایش مقاومت نهایی دیوار شده است، اما شکل‌پذیری را نیز کاهش داده است.

نکته‌ی دوم این است که به طور مسلم یک حالت تعادل^۶ بین تغییر مود خرابی از حالت شکست خمشی به کشش قطری برای میزان آرماتور طولی المان مرزی وجود



شکل ۴. نمای دیوار مدل m۱۳ (آرماتور طولی المان مرزی ۱٪) در لحظه‌ی رسیدن به مقاومت بیشینه با مود گسیختگی خمشی.



شکل ۵. نمای دیوار مدل m۱۵ (آرماتور طولی المان مرزی ۳٪) در لحظه‌ی رسیدن به مقاومت بیشینه با مود گسیختگی کشش قطری.

جالب توجه است که در دیوارهای برشی لاغر، افزایش آرماتور طولی المان مرزی باعث کاهش شکل‌پذیری می‌شود که در اینجا نتیجه‌ی عکس حاصل شده است. در حالت $h/l = 1/0$ ، افزایش میزان آرماتور طولی از ۱ به ۳ درصد در مدل‌ها باعث تغییر در مود گسیختگی نمونه‌ها از خمشی به کشش قطری شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

علت این پدیده این است که با افزایش میزان آرماتور طولی المان مرزی، مقاومت

دارد، به این معنی که حالت خرابی خمشی و کشش قطری همزمان اتفاق می افتند. بنابراین به ازای درصدی مشخص برای آرماتور طولی المان مرزی که در مدل های با $h/l=1/5$ در این تحقیق بین ۱ تا ۳ درصد است، حالت تعادل مود خرابی به دست می آید. با توجه به اینکه بهتر است رفتار غالب در شکست دیوارهای برشی کوتاه، خمشی (تسلیم آرماتورهای قائم) باشد؛ به دست آوردن راهی برای محاسبه میزان آرماتور طولی مذکور در حالت تعادل، می تواند موضوعی مناسب برای ادامه ی تحقیقات باشد.

۵. مقایسه ی نتایج

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مدل ها، در این قسمت تأثیر هر متغیر در مقاومت بیشینه و تغییر شکل نظیر آن، در هر حالت h/l میانگین گیری و مقادیر حاصل با یکدیگر مقایسه می شوند.

۱.۵. ایجاد المان مرزی

یادآوری می شود که در بررسی اثر این متغیر، مدل های بدون آرماتور طولی المان مرزی با مدل های دارای المان مرزی با آرماتور طولی ۱٪ و بتن محصور نشده مقایسه شده اند. برای مثال در حالت $h/l=0/5$ مدل $m1$ با مدل $m3$ و مدل $m2$ با مدل $m7$ مقایسه شده اند. مطابق جدول ۶، ایجاد المان مرزی در حالت $h/l=0/5$ باعث افزایش دو درصدی مقاومت شده است. با افزایش میزان h/l ، تأثیر این متغیر افزایش می یابد، به طوری که در حالت $h/l=1$ به میزان ۱۸٪ و در حالت $h/l=1/5$ به میزان ۱۶٪ به طور میانگین باعث افزایش مقاومت می شود.

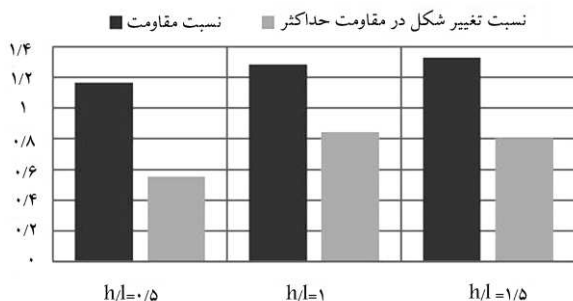
با توجه به جدول ۶ و نمودار شکل ۷، جالب توجه است که ایجاد المان مرزی با آرماتور طولی ۱٪ و بتن محصور نشده در همه ی حالت ها باعث کاهش در تغییر

شکل متناظر با مقاومت بیشینه شده است. این کاهش برای $h/l=0/5$ برابر ۱۶٪، $h/l=1$ برابر ۱۲٪، و $h/l=1/5$ برابر ۲۳٪ است.

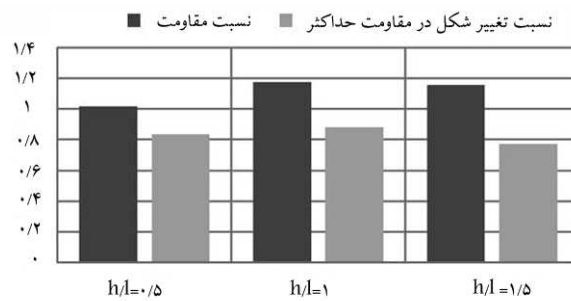
علت این موضوع این است که با اضافه کردن المان مرزی، مقاومت خمشی دیوار افزایش یافته و در نتیجه تأثیر تلاش های برشی در تعیین رفتار دیوار بیشتر شده است. در حقیقت افزایش تنش برشی منجر به تبدیل ترک های خمشی به ترک های خمشی-برشی می شود و این موضوع باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در راستای قطری به دلیل پدیده ی نرم شوندگی فشاری و افزایش فشار در پنجه ی دیوار به دلیل عملکرد قطری بتن ناشی از نیروی برشی می شود. این عوامل دست به دست هم می دهند و باعث می شود که بتن پنجه، در حالتی که تغییر شکل جانبی دیوار کمتر است، به کرنش نهایی برسد و در نتیجه شکل پذیری دیوار کاهش یابد.

۲.۵. بار محوری

با مشاهده ی جدول ۷ و نمودار شکل ۸ که میانگین تأثیر بار محوری در مقاومت و تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل ها را در هر حالت h/l نشان می دهند، این نتیجه به دست آمده است که بار محوری در تمام حالت ها تأثیر مشابهی از خود بر جای گذاشته است. یعنی در تمام نمونه ها باعث افزایش مقاومت و کاهش تغییر شکل در مقاومت بیشینه شده است. جالب توجه است که با افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار، افزایش بار محوری تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت دیوار از خود نشان می دهد. افزایش بار محوری از صفر به $0/5 f'c A_g$ باعث افزایش مقاومتی برابر ۱۷، ۲۹ و ۳۳ درصد و کاهش تغییر شکل در مقاومت بیشینه برابر ۴۴، ۱۵ و ۱۹ درصد به ترتیب برای $h/l=0/5$ ، $h/l=1$ و $h/l=1/5$ شده است. مشاهده می شود که تأثیر بار محوری در کاهش تغییر شکل در مقاومت بیشینه در رفتار غالب برشی (مود خرابی کشش قطری) بیشتر از رفتار غالب خمشی است. علت این پدیده تمایل بیشتر دیوار به لغزش در امتداد ترک های قطری به دلیل حضور بار محوری است.



شکل ۸. مقایسه ی میانگین نسبت مقاومت و تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل های با بار محوری به مدل های بدون بار محوری.



شکل ۷. مقایسه ی میانگین نسبت مقاومت و تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل های با المان مرزی (آرماتور طولی ۱٪ و بتن محصور نشده) به مدل های بدون المان مرزی.

جدول ۶. میانگین تأثیر ایجاد المان مرزی بر مقاومت و تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل ها.

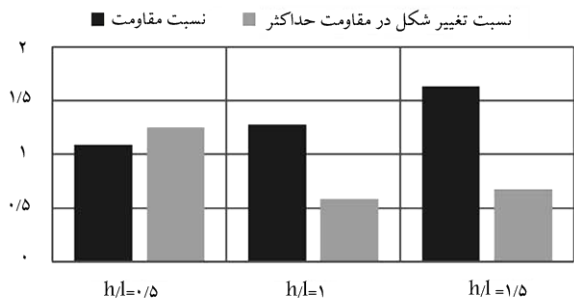
ردیف	h/l	میانگین نسبت مقاومت مدل ها با المان مرزی (آرماتور طولی ۱٪ و بتن محصور نشده) به مقاومت مدل ها بدون المان مرزی	میانگین نسبت تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل ها با المان مرزی (آرماتور طولی ۱٪ و بتن محصور نشده) به تغییر شکل در مقاومت بیشینه ی مدل ها بدون المان مرزی
۱	۰/۵	۱/۰۲	۰/۸۴
۲	۱/۰	۱/۱۸	۰/۸۸
۳	۱/۵	۱/۱۶	۰/۷۷

جدول ۷. میانگین تأثیر بار محوری بر مقاومت و تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها.

ردیف	h/l	میانگین نسبت مقاومت مدل‌ها با بار محوری به مقاومت مدل‌ها بدون بار محوری	میانگین نسبت تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها با بار محوری به تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها بدون بار محوری
۱	۰٫۵	۱٫۱۷	۰٫۵۶
۲	۱٫۰	۱٫۲۹	۰٫۸۵
۳	۱٫۵	۱٫۳۳	۰٫۸۱

جدول ۸. میانگین تأثیر آرما تور طولی المان مرزی بر مقاومت و تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها.

ردیف	h/l	میانگین نسبت مقاومت مدل‌ها با آرما تور طولی المان مرزی ۳٪ به مقاومت مدل‌ها با آرما تور طولی المان مرزی ۱٪	میانگین نسبت تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها با آرما تور طولی المان مرزی ۳٪ به تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌ها با آرما تور طولی المان مرزی ۱٪
۱	۰٫۵	۱٫۰۹	۱٫۲۶
۲	۱٫۰	۱٫۲۸	۰٫۵۹
۳	۱٫۵	۱٫۶۴	۰٫۶۸



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نسبت مقاومت و تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌های با المان مرزی محصورشده به مدل‌های با المان مرزی محصورنشده.

شکل ۹. مقایسه‌ی میانگین نسبت مقاومت و تغییرشکل در مقاومت بیشینه‌ی مدل‌های با آرما تور طولی ۳٪ به مدل‌های با آرما تور طولی ۱٪.

۳.۵. آرما تور طولی المان مرزی

این پارامتر تأثیرات متفاوتی در رفتار دیوارها در حالت‌های مختلف نسبت ارتفاع به طول دیوار بر جای گذاشته است. همان‌گونه که از جدول ۸ و نمودار شکل ۹ مشخص است، این پارامتر در تمام حالت‌ها باعث افزایش مقاومت شده است؛ به گونه‌یی که ۹٪ در حالت $h/l=0.5$ ، ۲۸٪ در حالت $h/l=1.0$ و ۶۴٪ در حالت $h/l=1.5$ به طور میانگین به مقاومت نمونه‌ها افزوده شده است. با افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار تأثیر آرما تور طولی المان مرزی در افزایش مقاومت دیوار افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش تأثیر خمش در رفتار غالب دیوار با افزایش نسبت h/l و در نتیجه مؤثرتر واقع شدن آرما تورهای طولی در ایجاد مقاومت جانبی برای دیوار است. همان‌طور که ذکر شد، حالت شکست دیوارهای با $h/l=1.0$ با افزایش آرما تور طولی از ۱٪ به ۳٪ تغییر یافته است، به این صورت که خرابی خمشی به کشش قطری تبدیل شده است. این موضوع توجیهی است برای کاهش قابل توجه تغییرشکل در مقاومت بیشینه برای این حالت به میزان ۴۱٪. در حالت $h/l=1.5$ با کاهش تغییرشکل در مقاومت بیشینه به طور میانگین برابر ۳۲٪ روبرو هستیم. اما برخلاف انتظار در حالت $h/l=0.5$ با افزایش آرما تور طولی المان مرزی، با افزایش ۲۶

درصدی تغییرشکل در مقاومت بیشینه مواجه می‌شویم. دلیل این پدیده به دلیل حالت شکست دیوارهاست که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد.

۴.۵. محصورشدگی بتن المان مرزی

این پارامتر تأثیر اندکی در مقاومت مدل‌ها از خود نشان داده است، به طوری که با توجه به جدول ۹ افزایش در مقاومت برابر ۳، ۴ و ۴ درصد به ترتیب در حالت $h/l=0.5$ ، $h/l=1.0$ و $h/l=1.5$ نسبت به مدل‌های بدون المان مرزی محصورشده مشاهده می‌شود.

تأثیر این پارامتر در تغییرشکل متناظر با مقاومت بیشینه، با افزایش نسبت ارتفاع به طول افزایش می‌یابد. افزایش ۹ درصدی در حالت $h/l=0.5$ ، ۱۶ درصدی در حالت $h/l=1.0$ و ۳۴ درصدی در حالت $h/l=1.5$ گواه این مطلب است. همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش تأثیر خمش در رفتار دیوار، تأثیر مثبت محصورکردن بتن المان مرزی نیز افزایش می‌یابد. این موضوع به وضوح در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۹. میانگین تأثیر محصورکردن بتن المان مرزی بر مقاومت و تغییرشکل در مقاومت پیشبینه‌ی مدل‌ها.

ردیف	h/l	میانگین نسبت مقاومت مدل‌ها با المان مرزی محصورشده به مقاومت مدل‌ها با المان مرزی محصورنشده	میانگین نسبت تغییرشکل در مقاومت پیشبینه‌ی مدل‌ها با المان مرزی محصورشده به تغییرشکل در مقاومت پیشبینه‌ی مدل‌ها با المان مرزی محصورنشده
۱	۰٫۵	۱٫۰۳	۱٫۰۹
۲	۱٫۰	۱٫۰۴	۱٫۱۶
۳	۱٫۵	۱٫۰۴	۱٫۳۴

۶. نتیجه‌گیری

پس از بررسی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها می‌توان اهم نتایج حاصله را به این شرح بیان کرد:

با تمرکز روی برخی جنبه‌ها که تاکنون کمتر به آنها پرداخته شده است و با کمک نتایج تحلیل‌های صورت‌گرفته، شناخت کامل‌تری نسبت به عملکرد دیوارهای برشی کوتاه به دست آید، تا در به کار بردن آنها به‌عنوان عضوی از سازه که در تحمل بارهای لرزه‌یی مشارکت می‌کنند، بتوان با دید بازتری عمل کرد. با توجه به نیازهایی که به تحقیق بیشتر در برخی زمینه‌ها احساس می‌شود، در ادامه پیشنهادهایی مطرح شده است:

۱. همان‌گونه که از شکل ۳ و شکل ۵ مشخص است، ترک‌های قطری در وجه فوقانی دیوارهایی که مود گسیختگی آنها کشش قطری است، پخش شده‌اند. اگر فرض شود روی وجه فوقانی مدل‌هایی که مود گسیختگی آنها کشش قطری است، یک تیر اضافه شود؛ به دلیل محدودشدن گسترش و بازشدن ترک‌های کششی قطری با این تیر ممکن است مقاومت، شکل‌پذیری، و حتی مود گسیختگی دیوار تغییر کند. این تذکر لازم است که در نمونه‌های آزمایشگاهی برای انتقال بار جانبی از جک‌ها به دیوار، معمولاً یک تیر فوقانی قوی روی دیوارها اجرا می‌شود. در ساخت و سازه‌های واقعی، دال سقف یا امتداد آرماتورهای تیرهای کناری دیوار در وجه فوقانی آن، نقش تیر فوقانی را اجرا می‌کنند که مسلماً نسبت به تیرهای فوقانی اجراشده در نمونه‌های آزمایشگاهی ضعیف‌تر هستند. این مطلب نشان‌دهنده‌ی وجود تفاوت بین شرایط آزمایشگاهی و شرایط واقعی است. تغییر در خصوصیات تیر فوقانی مثل ابعاد و میزان آرماتورها می‌تواند در رفتار دیوارهای برشی کوتاه با مود گسیختگی کشش قطری تأثیرگذار باشد. تأثیر این موضوع در روابط موجود برای محاسبه‌ی مقاومت برشی دیوارهای کوتاه به چشم نمی‌خورد. به همین دلیل بررسی اثر خصوصیات تیر فوقانی در رفتار دیوارهای برشی کوتاه برای تحقیقات بیشتر مناسب به نظر می‌رسد، که این مطلب نیز قبلاً توسط برخی از پژوهشگران پیشنهاد شده است.^[۱۳] با توجه به نتایج حاصله در این نوشتار در مورد دیوارهای با مود گسیختگی کشش قطری و توزیع ترک‌های قطری در وجه فوقانی دیوار، لزوم پرداختن به این موضوع بیشتر مشخص می‌شود.

۲. در خصوص تأثیر پاسخ فونداسیون در پاسخ لرزه‌یی دیوارهای لاغر مطالعات زیادی انجام شده است. در دیوارهای برشی کوتاه با توجه به مودهای گسیختگی متنوعی که به وقوع می‌پیوندد، پاسخ فونداسیون این دیوارها در برابر بارهای زلزله نیز متنوع خواهد بود. برای مثال در توزیع نیروها زیر پی، نیروهای برشی نقش بیشتری خواهند داشت. تأثیر حرکت گهواره‌یی^۷ فونداسیون در رفتار لرزه‌یی، استهلاک انرژی و مود گسیختگی دیوار کوتاه با دیوار لاغر متفاوت است. در مطالعات انجام‌شده در این نوشتار مدل‌ها به صورت یک المان سازه‌یی تنها مدل شدند و اندرکنش آنها با سایر المان‌ها و به خصوص فونداسیون و خاک زیر آن لحاظ نشد. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع و مطالعات کمتری که در این زمینه صورت گرفته است، پیشنهاد می‌شود مطالعاتی نیز در خصوص تأثیر اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه در رفتار دیوارهای برشی کوتاه و همچنین تأثیر انواع پی‌ها مثل پی‌های سطحی و یا استفاده از شمع انجام شود.

۱. در دیوارهای با $h/l = 0.5$ افزایش آرماتور طولی المان مرزی از 1% به 3% باعث افزایش تغییرشکل در مقاومت پیشبینه (شکل‌پذیری) دیوارها شده است. این موضوع با مشاهده‌های موجود برای دیوارهای لاغر در تناقض است. علت این پدیده را می‌توان در مود گسیختگی دیوار (کشش قطری) یافت. با افزایش آرماتور طولی المان مرزی و در نتیجه قوی‌تر شدن آن، گسترش ترک‌های قطری محدود شده و در نتیجه شکل‌پذیری افزایش یافته است. پس در مود گسیختگی کشش قطری می‌توان با افزایش آرماتور طولی در المان مرزی تا حدودی شکل‌پذیری دیوار را افزایش داد.

۲. در دیوارهای با $h/l = 1.0$ افزایش آرماتور طولی المان مرزی از 1% به 3% درصد باعث تغییر در مود گسیختگی دیوار از خمشی به کشش قطری شده است. دلیل این موضوع افزایش تأثیر تنش‌های برشی در رفتار دیوار به دلیل افزایش مقاومت خمشی است. این پدیده باعث افزایش مقاومت و کاهش تغییرشکل در مقاومت پیشبینه‌ی دیوار شده است. محاسبه‌ی میزان آرماتور طولی المان مرزی که به ازای آن مود گسیختگی دیوار تغییر می‌کند (در اینجا بین 1% تا 3% درصد) می‌تواند موضوعی شایسته برای ادامه‌ی تحقیقات باشد.

۳. به طور کلی در مورد تأثیر المان‌های مرزی در مدل‌های ساخته‌شده در این تحقیق می‌توان گفت در دیوارهای با $h/l = 0.5$ (مود گسیختگی کشش قطری) استفاده از المان‌های مرزی قوی (آرماتور طولی 3%) می‌تواند با افزایش شکل‌پذیری دیوار به بهبود پاسخ آن کمک کند. در دیوارهای با $h/l = 1.0$ ، المان‌های مرزی باعث کاهش شکل‌پذیری دیوار شدند و افزایش مقاومت قابل توجهی نیز به همراه نداشتند. پس در این دیوارها استفاده از المان‌های مرزی برای بهبود پاسخ لرزه‌یی مناسب نیست. در دیوارهای با $h/l = 1.5$ المان‌های مرزی علی‌رغم کاهش شکل‌پذیری باعث افزایش قابل توجه مقاومت دیوار شدند. پس در این دیوارها استفاده از المان مرزی به‌عنوان گزینه‌یی که می‌تواند با افزایش مقاومت دیوار و همچنین افزایش سطح زیر منحنی نیرو - تغییرشکل به بهبود پاسخ لرزه‌یی آن کمک کند، قابل قبول است.

۴. افزایش بار محوری باعث کاهش قابل توجه شکل‌پذیری در مود گسیختگی کشش قطری ($h/l = 0.5$) شده است در حالی که در مود گسیختگی تسلیم آرماتورهای قائم (خمشی) تأثیر بار محوری در کاهش شکل‌پذیری کمتر است.

در این نوشتار، با مدل‌سازی 30° مدل دیوار برشی کوتاه، به بررسی تأثیر برخی متغیرها در رفتار این دیوارها پرداخته شده است. نتایج حاصله حاکی از این مطلب است که این دیوارها بسته به میزان نسبت ارتفاع به طولشان پاسخ‌های متنوعی به برخی از متغیرها مثل میزان آرماتور طولی المان مرزی از خود نشان می‌دهند. در این نوشتار سعی شد

پانوشتها

1. smeared rotating crack approach
2. modified compression field theory
3. compression softening
4. tension stiffening
5. demo
6. balance
7. rocking

منابع (References)

1. Elwood, K.J., Matamoros, A. and etal., *Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions*, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER Center) (2007).
2. Gulec, C. and Whittaker, A. "Performance based assessment and design of squat concrete shear walls", Technical Report MCEER-09-0010 (15 September 2009).
3. Paulay, T. and Priestly, M.J.N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley, New York (NY) (1992).
4. Kuang, J.S. and Ho, Y.B. "Seismic behavior and ductility of squat reinforced concrete shear walls with non-seismic detailing", *ACI Structural Journal*, **105**(2), pp. 225-231 (2008).
5. Wong, P.S. and Vecchio, F.J. "VecTor2 and formworks user's manual", Department of Civil Engineering, Univ. of Toronto, Canada (2002).
6. Vecchio, F.J. and Collins, M.D. "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, **83**(2), pp. 219-231 (1986).
7. Bentz, E.C., Vecchio, F.J. and Collins, M.P. "Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements", *ACI Structural Journal*, **103**(4), pp. 614-624 (2006).
8. Wirandianta, S. and Saatciuglu, M. "Tests of squat shear walls under lateral load reversal", *Proceedings, the 3rd US Conference on Earthquake Engineering*, Charleston, South Carolina, USA (1986).
9. Lefas, I.D., Kotsovos, M.D. and Ambraseys, N.N. "Behavior of reinforced concrete structural walls: Strength, deformation characteristics and failure mechanism", *ACI Structural Journal*, **87**(1), pp. 23-31 (1990).
10. Greifenhagen, C. "Seismic behavior of lightly reinforced concrete squat shear walls", PhD thesis, Lausanne EPFL, Switzerland (2006).
11. Palermo, D. and Vecchio, F.J. "Simulation of cyclically loaded concrete structures based on the finite-element method", *Journal of Structural Engineering*, **133**(5), pp.728-738 (1 May 2007).
12. Ministry of Housing and Urban Development, "Iranian national building code, part 9:concrete structures", (In Persain) (2006).
13. Esfandiari, A. "Shear strength of structural concrete members using a uniform shear element approach", PhD Thesis, University of British Columbia, Canada (2009).