

مدل سازی اجزای محدود دیوارهای آجری کلافدار ساخته شده بر اساس آیین نامه‌ی زلزله‌ی ایران

ساسان عشقی* (دانشیار)

به‌رنگ صرافی (دکتری)

بزه‌شگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۴۳-۵۱)
دربی ۲-۳، شماره ۱/۲، ص. ۴۳-۵۱

به منظور ارتقاء ضوابط آیین‌نامه‌ی در مورد ساختمان‌های آجری کلافدار، مطالعات بیشتر تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی این سازه‌ها لازم به نظر می‌رسد. در مورد مدل‌سازی اجزای محدود ساختمان‌های آجری کلافدار، مطالعات محدودی در ادبیات فنی موجود است. در این نوشتار، پارامترهای مناسب برای مدل‌سازی اجزای محدود دیوار آجری کلافدار با و بدون بازشو، ارائه می‌شود. این پارامترها را نگارندگان از نتایج آزمایش‌های انجام شده استخراج و ارائه کرده‌اند. نتایج تحلیل نیز با نتایج آزمایش‌های انجام شده مقایسه و صحت سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود ارائه شده، در عین سادگی تخمین خوبی از رفتار دیوار آجری کلافدار ارائه می‌کند؛ و همچنین پارامترهای مدل‌سازی برای دیوارهای ساخته شده بر طبق استاندارد 280° و با مصالح مرسوم در ایران، اختلاف قابل توجهی با پیش‌فرض‌های معمول در سایر نقاط دنیا ندارند.

واژگان کلیدی: ساختمان‌های آجری کلافدار، مدل اجزای محدود، بار جانبی، استاندارد 280° زلزله ایران.

s.eshghi@iiees.ac.ir
b.sarrafi@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

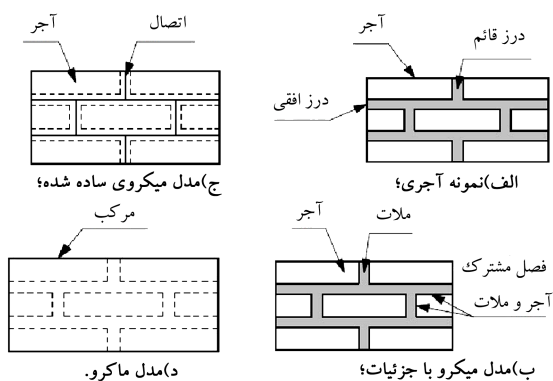
فصل سوم استاندارد 280° ^[۱] و مبحث هشتم از مقررات ملی ایران،^[۲] به این ساختمان‌ها اختصاص یافته است؛ اما ضوابط آنها به صورت کیفی و تجویزی تنظیم شده‌اند. ضوابط غیرانعطاف‌پذیر و سخت‌گیرانه‌ی این استاندارد سبب می‌شود ساختمان‌هایی که بر اساس آن طراحی می‌شوند، دارای دیوارهای فراوان و بازشوهایی اندک باشند. این مسئله به همراه عدم آشنایی کامل مهندسان سازه با این سیستم ساختمانی، که به دلیل اقتصادی، ساده و همگون با محیط زیست بودن در بسیاری از نقاط دنیا رایج است، سبب شده در محیط‌های شهری اقبال به آن کاهش یابد و در محیط‌های روستایی نیز خارج از ضوابط اجرا شوند. با رفع موانع فوق، یعنی با آموزش و اطلاع‌رسانی در مورد عملکرد و خصوصیات سیستم آجری و ارتقاء آیین‌نامه‌ها، طبیعتاً مزایای بارز این سیستم موجب خواهد شد جایگاه خود را در ساخت و ساز کشور باز یابد و عده‌ی زیادی از مزایای آن به عنوان سیستمی ارزان و ایمن بهره‌مند شوند.

جهت اصلاح آیین‌نامه‌ها، توجه به این نکته حائز اهمیت است که امروزه آیین‌نامه‌های پیشرفته‌ی برای طراحی ساختمان‌های آجری کلافدار وجود دارند که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه‌ی مکزیکی (NTCM-۲۰۰۴)^[۳] اشاره کرد که ضوابط آن این امکان را برای طراح فراهم می‌کند که طراحی را بر اساس شرایط موجود انجام دهد؛ ساختمان‌های بلند را با استفاده از این سیستم طرح کند؛ به صورت کمی نه ضابطه‌ی مقاومت سازه را تخمین بزند، و با تعداد دیوارهای کمتر و بازشوهایی مناسب عملکرد لرزه‌ی سازه را نیز بهبود بخشد. اما ساختمان‌های آجری کلافدار،

در صد سال اخیر، ساختمان‌های آجری کلافدار در کنار سیستم‌های آجری غیرمسلح و قاب بتنی مسلح مطرح هستند. ساختمان‌های آجری کلافدار معمولاً در ایران از دیوارهای آجری متشکل از آجرهای رسی و ملات ماسه‌سیمان تشکیل شده‌اند که با کلاف‌های افقی و قائم از چهار طرف محصور می‌شوند. این کلاف‌ها غالباً از بتن مسلح ساخته شده‌اند و می‌توانند در افزایش یکپارچگی، مقاومت، شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی دیوار مشارکت داشته باشند.^[۱] از نظر ظاهری، دیوار آجری کلافدار و میانقاب بتنی مشابه به نظر می‌رسند؛ در حالی که این دو سیستم تفاوت اساسی با یکدیگر دارند. علت اصلی این تفاوت، در ترتیب اجرا در آنهاست؛ به گونه‌ی که روش مقاومت در برابر بارهای ثقلی و جانبی در این دو کاملاً متفاوت است. در ساختمان‌های آجری کلافدار، ابتدا دیوارهای آجری اجرا می‌شوند، سپس کلاف‌های قائم آرماتورگذاری و بتن‌ریزی می‌شوند و در نهایت کلاف افقی تراز سقف اجرا می‌شود. در ساختمان‌های بتنی، قاب شامل تیر و ستون بتنی اجرا می‌شوند و میانقاب بتنی به عنوان عضو غیرسازه‌ی در مراحل بعد اجرا می‌شود. در ساختمان‌های آجری کلافدار، کلاف‌ها برای مقاومت به عنوان قاب خمشی طراحی نمی‌شوند؛ بنابراین میلگردگذاری در آنها ساده است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۵/۱۶، پذیرش ۱۳۹۱/۶/۲۶



شکل ۱. اجزای دیوار آجری و روش‌های مدل‌سازی. [۸]

متفاوتی در مدل‌سازی به روش اجزای محدود به این شرح وجود دارد (شکل ۱):

۱. مدل‌سازی به روش میکرو با جزئیات،
۲. مدل‌سازی به روش میکرو ساده‌شده،
۳. مدل‌سازی ماکرو.

در روش اول یا میکرو با جزئیات، واحدهای بتایی و ملاط به صورت المان‌های مجزا و با ابعاد واقعی در نظر گرفته می‌شوند و در حد فاصل واحد بتایی و ملاط المان حد فاصل غیر پیوسته استفاده می‌شود. در این نوع مدل‌سازی لازم است مدول یانگ، ضریب پواسون و پارامترهای غیرکشسان برای واحد بتایی و ملاط تعریف شود. در حد فاصل بین ملاط و واحد بتایی، المانی تعریف می‌شود که قابلیت لغزش و ترک‌خوردگی دارد و با یک سختی اولیه مجازی تا با محیط پیوسته تداخل نکند. این روش این امکان را فراهم می‌کند که عملکرد توأم واحد بتایی، ملاط و حد فاصل آنها به وضوح بررسی شود.

در روش دوم یا میکرو ساده‌شده، ابعاد واحدهای بتایی افزایش می‌یابند تا ضخامت ملاط را نیز در بر بگیرند. این واحدها به صورت المان پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. حد فاصل واحد بتایی و ملاط، المان حد فاصل به‌کار می‌رود و رفتار درز ملاط در آن صورت غیر پیوسته متمرکز می‌شود. به عبارت دیگر، هر درز شامل ملاط و دو المان حد فاصل در یک حد فاصل متوسط تجمیع می‌شوند. بدین منظور برای حفظ هندسه لازم است سطح واحدها افزایش داده شود؛ بنابراین، دیوار بتایی به صورت مجموعه‌یی از قطعات کشسان که به‌وسیله خطوط دارای قابلیت لغزش و ترک‌خوردگی محصور شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. البته مقداری از دقت کاسته می‌شود، زیرا اثر پواسون ملاط در نظر گرفته نمی‌شود.

در روش سوم یا ماکرو، واحدهای بتایی، ملاط و حدفاصل واحد بتایی و ملاط مجموعه‌یی پیوسته در نظر گرفته می‌شود و تمایزی بین واحد آجری و درز قائل نمی‌شود. بدین ترتیب مجموعه به صورت یک محیط پیوسته‌ی همگن و غیرهمسان^۱ فرض می‌شود.

یک راهکار مدل‌سازی نمی‌تواند بر راهکار دیگر ترجیح داده شود، زیرا موارد کاربرد هر یک متفاوت است. مدل‌سازی میکرو برای فهم رفتار موضعی سازه‌ی بتایی مناسب است. مدل‌سازی ماکرو در ساختمان‌هایی که از دیوارهای یکپارچه با ابعاد بزرگ تشکیل شده است، به‌طوری که توزیع تنش در طول آن یکنواخت باشد، کاربرد دارد. طبیعتاً مدل‌سازی ماکرو به دلیل نیاز به زمان و حافظه‌ی کمتر و مش‌بندی ساده‌تر کاربردی‌تر است. این روش مدل‌سازی در زمانی که نیاز باشد بین دقت و کارایی تعادل ایجاد شود، ارزشمند خواهد بود.

که در ایران ساخته می‌شوند، نسبت به سیستم مشابه در سایر نقاط جهان دارای تفاوت‌هایی هستند که به دلیل متفاوت بودن روش ساخت، جنس مصالح و جزئیات اجرایی به‌وجود می‌آیند؛ بنابراین، استفاده‌ی مستقیم از معیارهای پذیرش و پارامترهای مدل‌سازی حاصل از سایر مطالعات در سایر نقاط جهان ممکن نخواهد بود. برای تطبیق نتایج مطالعات سایرین با شرایط موجود در ایران لازم است مطالعات تکمیلی انجام شود تا بتوان معیارهای پذیرش دیوارهای آجری کلافدار و پارامترهای مدل‌سازی آنها را به‌دست آورد و مشکلات پیش رو در ساخت این سیستم اقتصادی را به حد زیادی کاهش داد. در این راستا، در سال‌های اخیر مطالعاتی آغاز شده است که می‌توان به این موارد اشاره کرد:

در پژوهشی در سال ۱۳۸۳ رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته، [۵] و آزمایش‌ها بر روی ۴ نمونه‌ی دیوار با مقیاس ۲:۳ انجام شده است. یک نمونه از دیوارها به صورت غیرمسلح به‌منزله‌ی نمونه‌ی شاهد، یک نمونه به‌صورت مسلح و دو نمونه‌ی دیگر به‌صورت کلاف‌بندی‌شده مورد آزمایش قرار گرفتند. بارهای اعمالی شامل بار ثقلی دائم و بار جانبی رفت و برگشتی است.

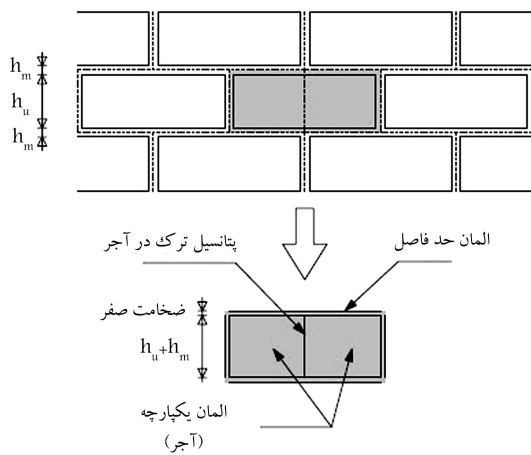
در پژوهش دیگری یک اتاق آجری که در مقیاس واقعی و بر اساس توصیه‌های استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده است، بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار گرفته است. [۶] اتاق مذکور دارای کلاف‌بندی قائم و افقی، و سقفی از نوع طاق ضربی بوده و بازشوهایی با ابعاد متفاوت جهت بررسی اثرات اندازه، هندسه و محل آنها در اطراف آن منظور شده است.

همچنین در پژوهشی دیگر، رفتار لرزه‌یی ساختمان‌های آجری کلاف دار بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران (ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰) مورد بررسی قرار گرفته است. [۷] جهت بررسی رفتار و مدل‌سازی چنین ساختمانی از نرم‌افزار DIANA استفاده شده است. برای این منظور، ۲ نمونه دیوار آجری کلاف‌دار در آزمایشگاه ساخته شد و مورد آزمایش استاتیکی یکنواخت قرار گرفت تا بتوان به کمک نتایج آنها مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار را آزمود.

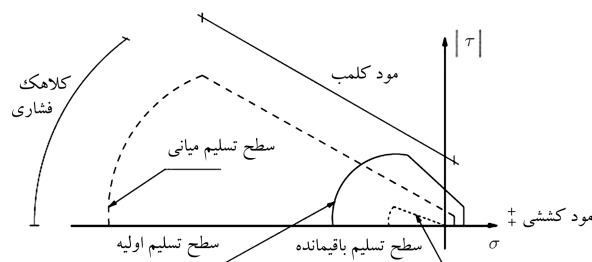
بدیهی است جهت ارتقاء ضوابط آئین‌نامه‌یی لازم است مطالعات تحلیلی دقیق به همراه مطالعات آزمایشگاهی بر روی این سازه‌ها صورت گیرد. به‌طور کلی مدل‌سازی دقیق این سازه‌ها در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. هدف از این مطالعه، بررسی امکان مدل‌سازی دقیق دیوارهای آجری کلاف‌دار متداول در ایران است. جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی از نتایج آزمایش‌هایی که توسط نگارندگان در آزمایشگاه سازه‌ی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام گرفته است، استفاده شده است.

۲. روش‌های مدل‌سازی مصالح بنایی

دیوارهای بتایی از مصالحی ساخته می‌شوند که تحت اثر زلزله می‌توانند به سرعت پیوستگی خود را از دست دهند که دلیل اصلی آن وجود ملاط است که به صورت عاملی ضعیف در بندهای افقی و قائم دیوار قرار دارد. در سال‌های اخیر، روش اجزای محدود با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی دیوارهای آجری گسترش یافته است. روش اجزای محدود غیرخطی قابلیت کاربرد در محیط‌های پیوسته‌ی غیرایزوتروپ یا محیط‌های مجزا را دارد. محدوده‌ی کاربرد این روش از یک محیط کشسان خطی آغاز می‌شود و تا آستانه‌ی فروریزی کامل آن ادامه می‌یابد. بنابراین با این روش می‌توان درک صحیحی از رفتار یک ساختمان آجری غیرمسلح قبل از فروریزی کامل آن به‌دست آورد. بسته به سطح دقت یا سادگی مورد انتظار، راهکارهای



شکل ۳. روش مدل سازی میکرووی ساده شده. [۸]



شکل ۴. مدل المان حد فاصل. [۸]

شکل ۲ د و ۵ را در مدل در نظر گرفت. بنابراین حضور کلاهیک فشاری در سطوح تسلیم یک ضرورت است.

با فرض اتصال سری اجزاء و توزیع یکنواخت تنش در واحد بتایی و ملات، مؤلفه های سختی کشسان قائم و افقی المان حد فاصل به ترتیب به صورت رابطه ی ۱ به دست می آیند:

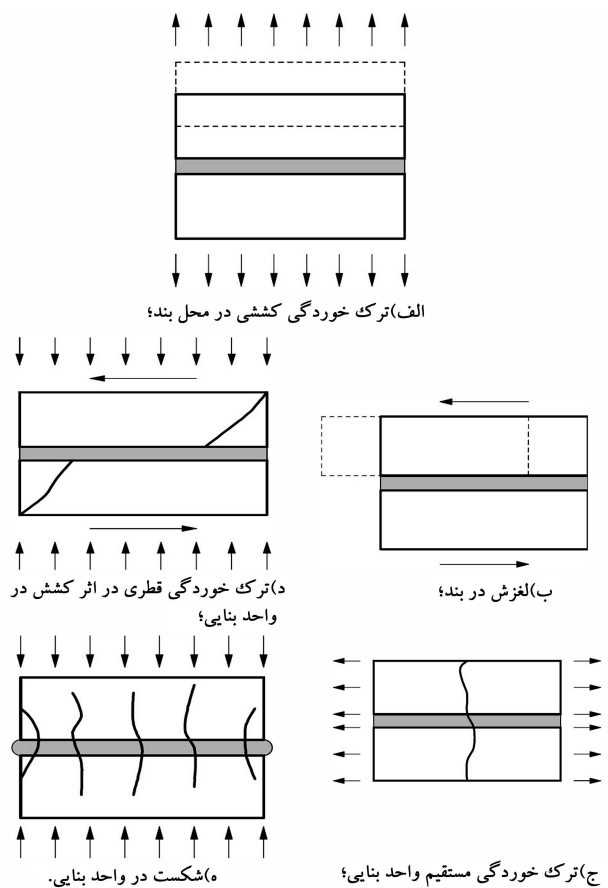
$$k_n = \frac{E_u E_m}{h(E_u - E_m)} \quad k_s = \frac{G_u G_m}{h(G_u - G_m)} \quad (1)$$

در رابطه ی ۱، E_u و E_m مدول یانگ؛ و G_u و G_m مدول برشی به ترتیب برای واحد بتایی و ملات، و h_m ضخامت واقعی درز ملات است. مدل رفتاری المان حد فاصل (مشابه شکل ۴) یک کلاهیک فشاری را شامل می شود که رفتار غیرخطی مصالح بتایی در فشار در آن متمرکز شده است.

۲.۲. مدل سازی ماکرو

در تحلیل های مهندسی و کاربردی ساختمان های آجری غیرمسلح، به وجود اطلاعات در مورد اندرکنش بین ملات و واحدهای بتایی نیازی نیست؛ زیرا بررسی رفتار سازه به صورت کلی مد نظر است. در چنین تحلیل هایی، ماده ی تشکیل دهنده ی دیوار آجری به صورت یک ماده ی غیرهمسان در نظر گرفته می شود؛ که در آن رابطه ی بین تنش متوسط و کرنش متوسط برقرار شده است. یک مدل ماکروی کامل باید شامل ماده ی غیرهمسان باشد، که در آن مقاومت کششی و فشاری تابع راستای اعمال بار باشد؛ تا بتوان خواص غیرکشسان متفاوتی را در راستای محورهای ماده در نظر گرفت.

معیار تسلیم برای کشش، بر مبنای ایجاد ترک در ماده است؛ حال آنکه معیار تسلیم برای فشار بر مبنای ایجاد له شدگی در ماده است. بنابراین می توان، مانند



شکل ۲. مکانیسم های شکست در کارهای بتایی. [۸]

۱.۲. مدل سازی میکرو

یک مدل سازی دقیق برای یک بنای آجری باید شامل انواع مکانیزم های گسیختگی مصالح باشد. مطابق شکل ۲ مکانیزم های گسیختگی آجر و ملات در اتصال با یکدیگر به این شرح هستند:

- الف) ترک خوردگی در محل ملات در اثر کشش مستقیم؛
- ب) لغزش در بندهای افقی و قائم در اثر وجود تنش برشی و ناچیز بودن تنش قائم؛
- ج) ترک خوردگی در محل واحدهای بتایی در اثر کشش مستقیم؛
- د) ترک کششی قطری در واحدهای بتایی در اثر حضور تنش های فشاری و برشی؛
- ه) ترک خوردگی کششی در واحد بتایی در اثر تنش فشاری به مقدار زیاد که باعث انبساط و خردشدگی ملات بین واحدها می شود.

واضح است که در مورد مکانیزم های شکست «الف» و «ب» شکست در ملات، در «ج» شکست در واحدهای بتایی و در «د» و «ه» شکست در ملات و واحدهای بتایی توأم به وجود می آید. یک روش برای در نظر گرفتن کلیه ی مکانیزم های شکست این است که خرابی در بندها متمرکز شود و در صورت لزوم قابلیت ترک کششی قائم مانند شکل ۳ در وسط واحدهای بتایی قرار گیرد. معیار گسیختگی حد فاصل باید شامل تمام مکانیزم های ذکر شده به جز ترک کششی در واحد بتایی شوند. با محدود کردن ترکیب تنش فشاری/ برشی می توان ترک خوردگی مایل واحد بتایی در اثر کشش و شکست در واحد بتایی، مکانیزم های شکست نشان داده شده در

می‌شود و منحنی نیرو - تغییرمکان حاصل‌شده با پوش نمودار چرخه‌یی حاصل از آزمایش مقایسه می‌شود. برای پیش‌بینی ناحیه‌ی ترک‌خورده در مصالح آجری، با توجه به اینکه مدل مورد استفاده یک مدل غیرهمسان در محدوده‌ی کشسان و خمیری است، فرض شده است ترک‌خوردگی در جهت عمود بر کرنش خمیری اصلی کششی به‌وجود می‌آید و پهنای ناحیه‌ی ترک‌خورده نیز متناسب با محدوده‌ی کرنش خمیری معادل کششی است.^[۸]

از میان مجموعه‌ی ۷ نمونه دیوار آجری کلافدار، که تحت بار جانبی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند،^[۱۰] دو نمونه جهت مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. انتخاب این دو نمونه به این علت بوده است که بیشترین اطلاعات در مورد مشخصات مصالح مورد استفاده در آنها از طریق آزمایش‌های موفق مصالح به‌دست آمده است و بنابراین نتایج مستدل‌تری از نتایج تحلیل آنها به‌دست خواهد آمد.

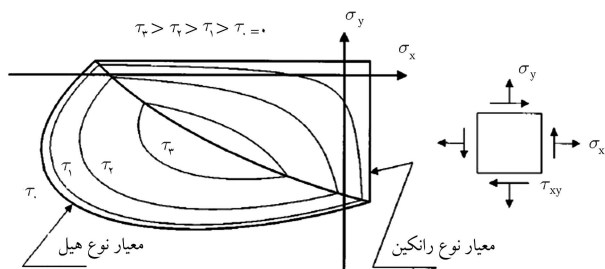
برای مدل‌سازی کلاف‌های افقی و قائم و بخش آجری دیوارها از المان‌های ۸ گرهی CQ۱۶M استفاده شده است. این المان همان‌طور که در شکل ۶ الف دیده می‌شود، یک المان چهارضلعی هشت گرهی و تنش مسطح است. با استفاده از این المان در مقایسه با المان ۴ گرهی، هم در کل مدل تعداد گره‌های کمتری خواهیم داشت و هم به دلیل توابع شکلش، انتظار دقت بیشتری از آن می‌رود. برای مدل‌سازی المان حد فاصل بین کلاف‌های بتن مسلح و دیوار آجری از المان ۶ گرهی CL۱۲I استفاده شده است. این المان یک المان حد فاصل است، که مطابق شکل ۶ ب در حالت دو بعدی بین دو خط قرار می‌گیرد.

۱.۲.۳. نمونه‌ی اول

نمونه‌ی اول، یک دیوار کلافدار توپر است. این نمونه، مدل ۱:۲ دیواری است که بر اساس ضوابط ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران ساخته شده است. سرباری برابر ۲ تن در متر طول، معادل تقریبی بار دو سقف که از دو جهت بر روی دیوار قرار گرفته‌اند، بر دیوار اعمال شده است.

نمونه‌ی آزمایشگاهی با مقیاس مشابه با نام CMSW-۰۴ در آزمایشگاه سازه‌ی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ساخته شده و تحت بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفته است. ضمناً یک سری آزمایش‌ها جهت تعیین مشخصات مصالح شامل آجرهای توپر رسی (استاندارد ملی شماره‌ی ۷ ایران)، ملات (ASTM C-۱۰۹)، منشور آجری فشاری (ASTM-C ۱۳۱۴) و بتن (ASTM C-۳۹) انجام شده است. در این نمونه، ملات با نسبت اختلاط حجمی ماسه به سیمان ۱:۶ به‌کار گرفته شده و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مصالح در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

آزمایش یکی از نمونه‌های منشوری به ارتفاع ۵ آجر و به ابعاد ۱۰۶ × ۱۸۰ × ۲۲۰ میلی‌متر در دستگاه یونیورسال با ثبت متناوب نیرو و تغییرمکان انجام شده است. بدین ترتیب شیب اولیه‌ی منحنی نیرو - تغییرمکان به‌دست‌آمده، نمایانگر مدول کشسانی آجرکاری است. به دلیل محدودیت‌های موجود، فقط آزمایش یک نمونه به این



شکل ۵. سطوح تسلیم پیشنهادشده برای دیوار بتایی تحت تنش داخل صفحه.^[۹]

شکل ۵، جهت نشان‌دادن نحوه‌ی رفتار محوری در فشار از معیار نوع هیل^۲ و برای کشش از معیار نوع رانکین^۳ استفاده کرد. این معیار متشکل از مفهوم خمیری به همراه ابزار جهت نشان‌دادن رفتار غیرهمسان ماده است که شامل رفتار سخت‌شونده یا نرم‌شونده در راستای هر یک از محورهای ماده است. این معیار برای مدل‌سازی مصالح غیرهمسان تحت تنش داخل صفحه مناسب است که در آن از فرمولاسیون مصالح نیمه‌شکننده‌ی همسان برای رفتار محوری استفاده شده است.

۳. مدل‌سازی دیوار آجری کلافدار

۱.۳. نرم‌افزارهای مدل‌سازی

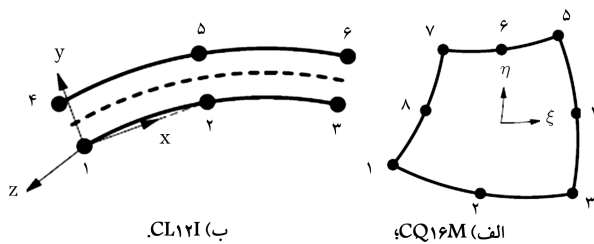
برای مدل‌سازی اجزای محدود دیوارهای آجری کلافدار مورد مطالعه، گزینه‌هایی مانند DIANA و ABAQUS قابل بررسی هستند. این نرم‌افزارها دارای قابلیت مدل‌سازی نسبتاً ساده‌ی مصالح هستند و انواع مختلفی از المان‌های مدل‌سازی و همچنین مصالح پیش‌فرض را شامل می‌شوند. خصوصیت دیگر آنها برخورداری از ابزارهای نسبتاً ساده و کارآمد برای ارتباط با کاربر هستند، به گونه‌یی که امکان مدل‌سازی و تحلیل را به خوبی در دسترس کاربر قرار می‌دهند. در نهایت، نرم‌افزار DIANA به این دلایل جهت مدل‌سازی اجزای محدود انتخاب شد:

- داشتن المان‌های متعدد و مدل‌های مناسب جهت مدل‌سازی مصالح شکننده؛
- داشتن مدل‌های متعدد مدل‌سازی ترک‌خوردگی در بتن (که در همین فصل به آن اشاره قرار خواهد شد)؛
- داشتن امکانات ویژه جهت مدل‌سازی مصالح آجری به هر دو روش میکرو و ماکرو.

به عنوان نقطه‌ی ضعف این نرم‌افزار می‌توان به محیط ارتباطی آن با کاربر اشاره کرد. تعریف هندسه‌ی مدل و اختصاص مشخصات به المان‌ها در محیط نرم‌افزار به کندی انجام می‌گیرد، زیرا این محیط مجهز به ابزارهای نوین ترسیم و بازبینی نیست. به همین علت روند مدل‌سازی در آن روندی کند و زمان‌بر است. آخرین نسخه‌ی موجود DIANA v.۹٫۳، جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۳. مدل‌سازی

جهت مدل‌سازی به روش میکرو، محدوده‌ی زیادی از پارامترها شامل پارامترهای مدل‌سازی کشسان و غیرکشسان آجر و ملات باید در دسترس باشد و آزمایش‌های مصالح مخصوص به هرکدام انجام شود. لذا با توجه به محدودیت‌های موجود در انجام آزمایش‌های دقیق مصالح، روش مدل‌سازی ماکرو در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمناً با توجه به اینکه مطالعات جدی بر روی رفتار رفت و برگشتی مصالح آجری متداول در کشور صورت نگرفته است، تحلیل تحت بار یک‌طرفه انجام



شکل ۶. توپوگرافی المان‌ها.^[۱۱]

جدول ۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری آجر، ملات، بتن و منشور آجری.

نمونه	تعداد	مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پراکندگی (Cv)
آجر	۱۰	۶٫۵۴	۰٫۱
ملات	۸	۵٫۹	۰٫۰۹
بتن	۱۶	۱۹٫۶	۰٫۴
منشور آجری	۳	۱٫۵	۰٫۱

جدول ۶. پارامترهای کشسان مورد نیاز برای مدل سازی بتن.

ν	E (MPa)
۰٫۲	۲۲۳۶۰

جدول ۷. پارامترهای غیرکشسان مورد نیاز برای مدل سازی بتن.

G_f^I (MPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)
۰٫۱	۰٫۲	۲۰

جدول ۲. نتایج آزمایش تعیین مدول کشسانی.

تعداد	مدول کشسانی (MPa)
۱	۱۶۱

جدول ۳. پارامترهای کشسان مورد نیاز برای مدل سازی ماکروی بخش آجری.

ν	E (MPa)
۰٫۱۵	۱۶۱

جدول ۴. پارامترهای غیرکشسان مورد نیاز برای مدل سازی ماکروی بخش آجری (در کشش).

G_{fy}	G_{fx}	α	f_{ty} (MPa)	f_{tx} (MPa)
(Nmm/mm ²)	(Nmm/mm ²)			
۰٫۰۴	۰٫۰۴	۱	۰٫۲	۰٫۲

از ادبیات فنی [۱۲۸] برداشت شده‌اند و در مدل سازی نمونه‌های آزمایش مصالح صحت‌سنجی شده‌اند.

نرم‌شوندگی مدل هوردیچ در کشش^۴ و مدل سخت‌شوندگی ایده‌آل در فشار^۵ برای مدل سازی کلاف‌های بتنی انتخاب شده‌اند. جدول‌های ۶ و ۷، پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی بتن را نشان می‌دهند.

که در این جداول، f_c مقاومت فشاری استوانه‌یی بتن، f_t مقاومت کششی بتن، و G_f^I انرژی شکست مود اول است. منحنی پوش به‌دست‌آمده از تحلیل در بخش بعد ارائه و با نتایج آزمایش مقایسه شده است.

۲.۲.۳. نمونه‌ی دوم

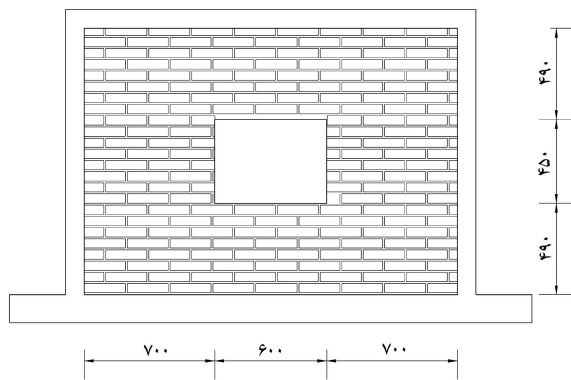
جهت بررسی امکان مدل سازی دیوار با بازشو، دیواری با ابعاد و مصالح مشابه نمونه‌ی اول با یک بازشوی مرکزی به عنوان بازشوی پنجره مدل سازی و تحلیل شده است، که ابعاد آن در شکل ۷ نشان داده شده است. تفاوت دیگر این نمونه با نمونه‌ی اول در ملات به‌کاررفته در دیوارچینی است. در این نمونه، ملات با نسبت اختلاط حجمی ماسه به سیمان ۱:۴ به‌کار گرفته شده است.

نمونه‌ی آزمایشگاهی با مقیاس مشابه با نام CMOW-۰۱ در آزمایشگاه سازی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ساخته شده و تحت بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفته است. یک سری آزمایش‌ها جهت تعیین مشخصات مصالح این دیوار شامل ملات (ASTM C-۱۰۹)، منشور آجری فشاری (ASTM-C-۱۳۱۴) و آزمایش فشار قطری (ASTM E ۵۱۹) انجام

ترتیب ممکن شد. درستی نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از این آزمایش با مقایسه‌ی شیب اولیه‌ی نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل از تحلیل نمونه‌ی دیوار با نتیجه‌ی آزمایش صحت‌سنجی شده است. به‌علاوه با مدل سازی اجرای محدود این نمونه و تطبیق نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل از تحلیل با آزمایش، پارامترهای مدل سازی مصالح در فشار نیز به‌دست آمده است.

بر اساس این نتایج و همچنین با استفاده از آزمایش‌های مصالح^[۱۲] که در همان آزمایشگاه صورت گرفته^[۱۳] که از مصالح مشابهی استفاده کرده است و همچنین ادبیات فنی، پارامترهای لازم جهت مدل سازی ماکروی دیوار آجری و کلاف بتنی استخراج شده است. این پارامترها در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند.

که در این جدول‌ها، E مدول کشسانی از شیب نمودار نیرو-تغییرمکان آزمایش فشاری منشور اول به‌دست آمده است، G_{fcx} و G_{fcy} انرژی شکست ناشی از فشار در راستاهای x ، y و f_{cx} و f_{cy} مقاومت فشاری در راستاهای x و y بر اساس نتایج مدل سازی منشور اول در فشار به‌دست آمده‌اند. f_{tx} و f_{ty} مقاومت کششی و G_{fx} و G_{fy} انرژی شکست ناشی از کشش به ترتیب در راستاهای x و y از نتایج مدل سازی این نمونه و همچنین گزارش^[۱۳] که از مصالح مشابهی استفاده کرده‌اند، به‌دست آمده‌اند. کرنش خمیری معادل مقاومت فشاری بیشینه از نتایج آزمایش^[۱۲] برداشت شده است. پارامترهای ν ضریب پواسون، α ضریب تأثیر توزیع تنش برشی بر گسیختگی کششی، β ضریب کنترل‌کننده‌ی اندرکش بین مقادیر تنش قائم در گسیختگی فشاری و γ ضریب تأثیر توزیع تنش برشی بر گسیختگی فشاری



شکل ۷. ابعاد دیوار و بازشوی درون آن (واحدها بر اساس mm).

جدول ۵. پارامترهای غیرکشسان مورد نیاز برای مدل سازی ماکروی بخش آجری (در فشار).

κ_p	G_{fcy} (Nmm/mm ²)	G_{fcx} (Nmm/mm ²)	γ	β	f_{my} (MPa)	f_{mx} (MPa)
۰٫۰۰۰۶۴۵	۰٫۴	۰٫۴	۳	-۱	۲٫۱	۲٫۱

جدول ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری آجر، ملات، بتن و منشور آجری.

نمونه	تعداد	مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پراکندگی (Cv)
ملات	۸	۹٫۶	۰٫۱۲
منشور آجری	۴	۱٫۸	۰٫۰۸

جدول ۹. نتایج آزمایش تعیین مدول کشسانی.

تعداد	مدول کشسانی (MPa)
۱	۱۸۱

جدول ۱۰. پارامترهای کشسان مورد نیاز برای مدل‌سازی ماکروی بخش آجری.

v	مدول کشسانی (MPa)
۰٫۲	۱۸۱

جدول ۱۱. پارامترهای غیرکشسان مورد نیاز برای مدل‌سازی ماکروی بخش آجری (در کشش).

f_{tx} (MPa)	f_{ty} (MPa)	α	G_{fx} (Nmm/mm ²)	G_{fy} (Nmm/mm ²)
۰٫۵۳	۰٫۵۳	۱	۰٫۱۵	۰٫۱۵

گرفته است. جدول‌های ۸ و ۹ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهند. آزمایش یکی از نمونه‌های منشوری به ارتفاع ۵ آجر و به ابعاد $106 \times 180 \times 210$ میلی‌متر در دستگاه یونیورسال با ثبت متناوب نیرو و تغییرمکان انجام شد. بدین ترتیب شیب اولیه منحنی نیرو-تغییرمکان به دست آمده، نمایانگر مدول کشسانی آجرکاری است. به دلیل محدودیت‌های موجود، فقط آزمایش یک نمونه به این ترتیب ممکن شد. درستی نتیجه‌ی به دست آمده از این آزمایش با مقایسه‌ی شیب اولیه‌ی نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل از تحلیل نمونه‌ی دیوار با نتیجه‌ی آزمایش صحت‌سنجی شده است. با مدل‌سازی اجزای محدود این نمونه و تطبیق نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل از تحلیل با آزمایش، پارامترهای مدل‌سازی مصالح در فشار نیز به دست آمده است. به علاوه با مدل‌سازی آزمایش فشار قطری و تطبیق نمودار نیرو-تغییرمکان آن با نتیجه‌ی آزمایش، پارامترهای مدل‌سازی مصالح در کشش نیز به دست آمده است. به دلیل سختی انجام این آزمایش با امکانات موجود، فقط یک آزمایش موفق از این نمونه به دست آمد.

پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی ماکروی دیوارکه براساس نتایج فوق و همچنین با استفاده از آزمایش‌های مصالح^[۱۲] که در همان آزمایشگاه صورت گرفته است، به دست آمده و در جدول‌های ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده‌اند.

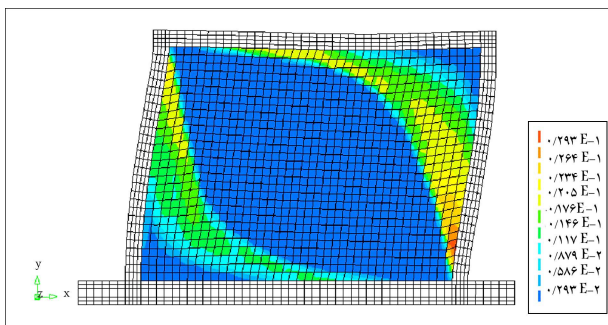
که در این جدول‌ها، E مدول کشسانی از شیب نمودار نیرو-تغییرمکان آزمایش فشاری منشور دوم به دست آمده است، $G_{f_{cy}}$ و $G_{f_{cx}}$ انرژی شکست ناشی از فشار در راستاهای x و y ، f_{cy} و f_{cx} مقاومت فشاری در راستاهای x و y براساس نتایج مدل‌سازی منشور دوم در فشار به دست آمده‌اند. f_{ty} و f_{tx} مقاومت کششی، و G_{fy} و G_{fx} انرژی شکست ناشی از کشش به ترتیب در راستاهای x و y از نتایج مدل‌سازی نمونه‌ی منشور تحت فشار قطری به دست آمده‌اند. K_p کرنش خمیری معادل مقاومت فشاری بیشینه از نتایج آزمایش^[۱۲] برداشت شده است. پارامترهای v ضریب پواسون، α ضریب تأثیر توزیع تنش برشی بر گسیختگی کششی، β ضریب کنترل‌کننده‌ی اندرکشش بین مقادیر تنش قائم در گسیختگی فشاری و γ

ضریب تأثیر توزیع تنش برشی در گسیختگی فشاری از ادبیات فنی^[۱۳] برداشت شده‌اند و در مدل‌سازی نمونه‌های آزمایش مصالح صحت‌سنجی شده‌اند. منحنی پوش به دست آمده از تحلیل در بخش بعد ارائه و با نتایج آزمایش مقایسه شده است.

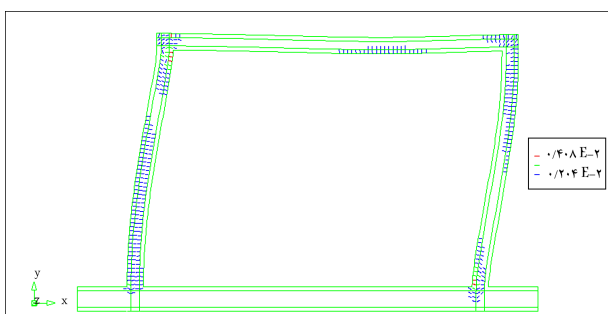
۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیل و آزمایش

۴.۱. نمونه‌ی اول

نتیجه‌ی تحلیل دیوار، CMSW-۰۴، در قالب کرنش خمیری که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی الگوی ترک‌خوردگی در بخش آجری باشد، در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین الگوی ترک‌خوردگی در بخش بتنی یا کلاف‌ها نیز در شکل ۹ دیده می‌شود. شکل ۱۰ تصویر نمونه‌ی اول را پس از اتمام آزمایش تحت بار جانبی رفت و برگشتی نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نشان می‌دهد شکل ترک‌ها و زاویه‌ی انتشار حاصل از آزمایش در بخش آجری تشابه خوبی با نتایج آزمایش دارد. تفاوت در محل ترک افقی در نیمه‌ی فوقانی بخش آجری وجود دارد که در نمونه‌ی آزمایشگاهی این ترک عرضی چند رج پایین‌تر از محلی که تحلیل نشان می‌دهد، شکل گرفته است. در شکل ۱۱ پوش نمودار پسماند این نمونه به همراه نمودار حاصل از تحلیل تحت نیروی یک‌طرفه نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، دو نمودار در بخش ابتدایی و انتهایی بر یکدیگر منطبق‌اند. فقط در بخش میانی این دو حد مدل تحلیلی یک جهت‌ی قادر نیست چرخه‌های رفت و برگشتی را دنبال کند. به‌طور کلی به دلیل زیادبودن بار قائم وارده در این نمونه، سختی اولیه در این نمونه بیشتر و انرژی شکست نیز بالاتر است. به همین علت شکست نمودار و افت آن با تأخیر صورت می‌گیرد. به نظر می‌رسد این امر به علت لغزش رج‌های آجر بر روی درز افقی در رفت و برگشت چرخه‌ها باشد.



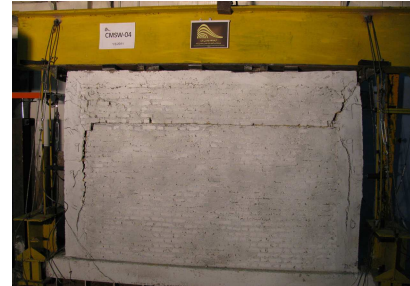
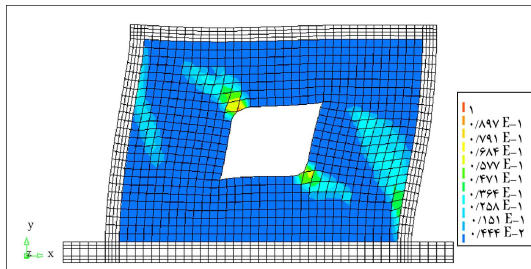
شکل ۸. کرنش خمیری یا الگوی ترک‌خوردگی در بخش آجری نمونه‌ی اول (CMSW-۰۴) بر اساس نتایج تحلیل.



شکل ۹. الگوی ترک‌خوردگی در بخش بتنی نمونه‌ی اول (CMSW-۰۴) بر اساس نتایج تحلیل.

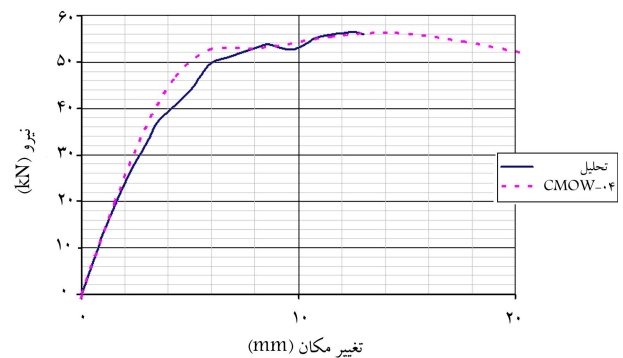
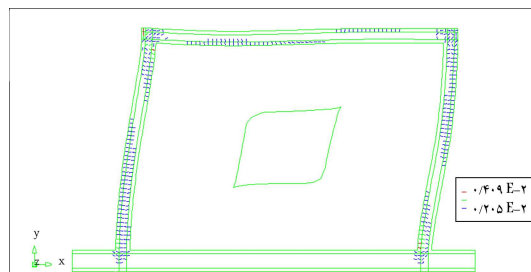
جدول ۱۲. پارامترهای غیرکشسان مورد نیاز برای مدل سازی ماکروی بخش آجری (در فشار).

κ_p	G_{fcy} (Nmm/mm ²)	G_{fcw} (Nmm/mm ²)	γ	β	f_{my} (MPa)	f_{mw} (MPa)
۰٫۰۰۰۰۶۴۵	۰٫۵	۰٫۵	۳	-۱	۲٫۵	۲٫۵



شکل ۱۲. کرنش خمیری یا الگوی ترک خوردگی در بخش آجری نمونه دوم (CMOW-۰۱) بر اساس نتایج تحلیل.

شکل ۱۰. تصویر نمونه اول (CMSW-۰۴) پس از گسترش ترک‌ها.



شکل ۱۳. الگوی ترک خوردگی در بخش بتنی نمونه دوم (CMOW-۰۱) بر اساس نتایج تحلیل.

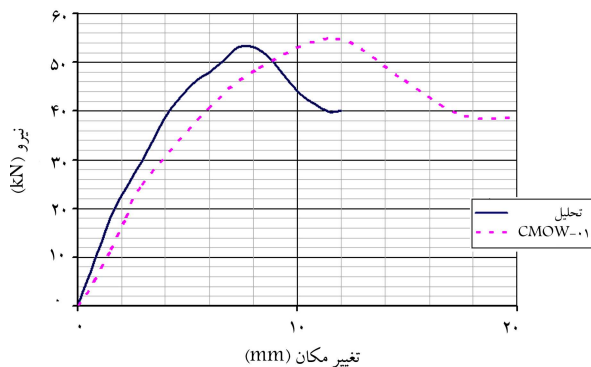
شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتیجه‌ی تحلیل با پوش منحنی پسماند نمونه اول (CMSW-۰۴).



۲.۴. نمونه‌ی دوم

شکل ۱۴. تصویر نمونه دوم (CMOW-۰۱) پس از گسترش ترک‌ها.

نتیجه‌ی تحلیل دیوار در قالب کرنش خمیری که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی الگوی ترک خوردگی در بخش آجری باشد، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین الگوی ترک خوردگی در بخش بتنی یا کلاف‌ها نیز در شکل ۱۳ دیده می‌شود. شکل ۱۴، تصویر این نمونه را پس از اتمام آزمایش تحت بار جانبی رفت و برگشتی نشان می‌دهد. شکل ترک‌ها و زاویه‌ی انتشار آنها تشابه خوبی با نتایج آزمایش دارد. در نمونه‌ی آزمایشگاهی نیز اولین ترک‌ها از گوشه‌ی بازشو آغاز شده و به سمت گوشه‌ی متناظر پانل آجری امتداد پیدا کرده است. پس از آن نیز ترک‌هایی بین گوشه‌های مقابل شروع به گسترش کرده‌اند. به عبارت دیگر، از گوشه‌ی پایینی بخش آجری به گوشه‌ی بالایی بازشو و از گوشه‌ی بالایی بخش آجری به گوشه‌ی پایینی بازشو. امتداد این ترک‌ها نیز مانند ترک‌های اولیه در شکل ۱۲ نتیجه‌ی تحلیل دیده می‌شوند. در شکل ۱۵، پوش نمودار پسماند این نمونه به همراه نمودار حاصل از تحلیل تحت نیروی یکطرفه نشان داده شده است. مقایسه‌ی نمودارها نشان می‌دهد سختی اولیه، چنانچه معمولاً در مقایسه‌ی نتایج تحلیل و آزمایش دیده می‌شود، در تحلیل بیش از آزمایش است. دلیل این مسئله تغییر شکل‌های کشسان سیستم بارگذاری و میزان کمی لغی در نقاط اعمال بار است، که به‌طور طبیعی در نمونه‌های آزمایشگاهی وجود دارد؛ اما در مدل‌سازی منظور نمی‌شوند. بدین ترتیب تغییر مکان متناظر با بیشینه‌ی مقاومت جانبی نیز در تحلیل، کمتر از مقدار آن در آزمایش است.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی نتیجه‌ی تحلیل با پوش منحنی پسماند نمونه دوم (CMOW-۰۱).

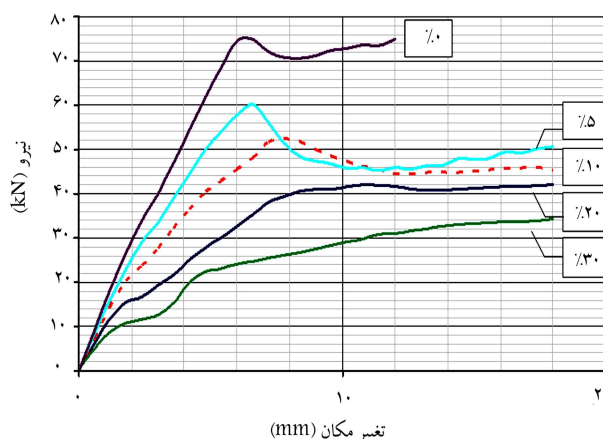
۵. مطالعه‌ی پارامتریک

برای تحقیق میزان اثر سطح بازشو در مقاومت جانبی دیوار، نسبت سطح بازشو به سطح دیوار در دیوار ۱ CMOW-۰ برابر ۱۰٪ است، در حالت ۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ و همچنین در حالت بدون بازشو تحلیل شده است. اثر این تغییرات در نمودار نیرو-تغییرمکان دیوار در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود با افزایش سطح بازشو، سختی و بیشینه‌ی مقاومت نمونه‌ها کاهش یافته است. در ضمن در نسبت‌های ۲۰٪ و ۳۰٪ فرم نمودار نیز تغییر کرده است، به گونه‌ی که فاقد قله‌ی بیشینه‌ی مقاومت جانبی هستند.^[۱۵] رابطه‌ی ۲ را برای میزان اثر بازشو در مقاومت جانبی دیوارهای کلافدار ارائه می‌دهد که در آن β نسبت سطح بازشو به سطح دیوار آجری، V_{max} مقاومت جانبی دیوار بدون بازشو و V_{max}^o مقاومت جانبی دیوار با بازشو است.

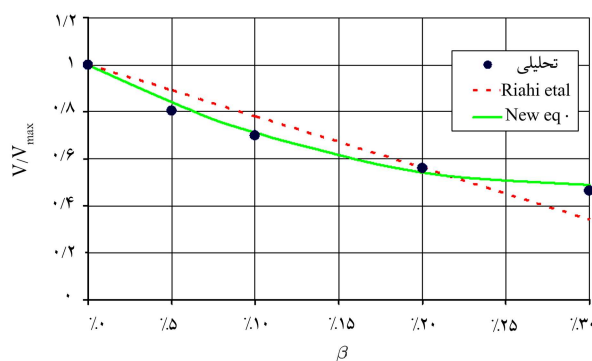
$$V_{max}^o/V_{max} = -2/2\beta + 1 \quad (2)$$

نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از رابطه‌ی ۱ به همراه نتایج تحلیل در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. میزان ضریب همبستگی این دو سری از نتایج (R^2) برابر ۰٫۹۲ است که برای مقاصد مهندسی قابل قبول ارزیابی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، یک رابطه‌ی درجه‌ی ۲ به شکل رابطه‌ی ۳ قابل برازش است. میزان ضریب همبستگی نتایج به‌دست‌آمده از این رابطه و نتایج تحلیل برابر ۰٫۹۹ است.

$$V_{max}^o/V_{max} = 6\beta^2 - 3/5\beta + 1 \quad (3)$$



شکل ۱۶. مقایسه‌ی نتیجه تحلیل با پوش منحنی پسماند نمونه‌ی دوم (CMOW-۰۱).



شکل ۱۷. تأثیر بازشو بر مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلافدار.

۶. نتیجه‌گیری

توجه به روش‌های تحلیل و طراحی ساختمان‌های آجری کلافدار و ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی آنها در این سال‌ها در ایران متناسب با اهمیت و کاربرد آنها نبوده است. تغییرات کم در ضوابط موجود در آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران نسبت به اولین ویرایش‌های آن مؤید این امر است. جهت ارتقاء ضوابط آیین‌نامه‌ی در مورد ساختمان‌های آجری کلافدار، مطالعات بیشتر تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی این سازه‌ها با توجه به مصالح و روش‌های ساخت معمول در ایران لازم به نظر می‌رسد. برای نیل به این هدف در اختیارداشتن مدل دقیق که از طریق آزمایش‌های لازم پشتیبانی شده باشد و بتواند رفتار سازه را با دقت خوبی پیش‌بینی کند، ضروری است.

این مطالعه، پارامترهای مدل‌سازی مناسب جهت مدل‌سازی ماکرو، دو نمونه‌ی دیوار آجری کلافدار، که توسط مصالح معمول در ایران و بر طبق استاندارد ۲۸۰ ایران ساخته شده‌اند، را ارائه می‌کند. این پارامترها بر اساس نتایج آزمایش‌های مصالح و همچنین آزمایش‌های نمونه‌های دیوار در مقیاس ۱:۲ به‌دست آمده و صحت‌سنجی شده‌اند. همچنین این نتایج به‌دست آمده است:

۱. مدل اجزای محدود ماکرو^[۹] در صورت تعریف مناسب پارامترهای مدل‌سازی می‌تواند تخمین مناسبی از رفتار دیوارهای آجری کلافدار ارائه دهد.

۲. مطابق شکل ۱۷، مدل اجزای محدود سختی اولیه‌ی بیشتری را نسبت به مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۳. به‌کارگیری ملات با نسبت حجمی ماسه به سیمان ۱:۴ نسبت به سیمان ۱:۶، مقاومت فشاری نمونه‌های ملات و همچنین منشور آجری را ۲۰٪ افزایش داده است. این تغییر تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت جانبی دیوار داشته است، به گونه‌ی که با وجود بازشوی پنجره و کاهش سربار قائم، مقاومت جانبی دیوار ثابت مانده است.

۴. مطالعه‌ی اثر سطح نسبی بازشو در مقاومت جانبی دیوار نشان داد که رابطه‌ی ساده‌ی ۲،^[۱۶] ضریب همبستگی ۰٫۹۲ با نتایج به‌دست‌آمده دارد. همچنین رابطه‌ی ۳ (درجه‌ی ۲) ارائه‌شده با نتایج این تحقیق هماهنگی بیشتری دارد.

۵. مدول کشسانی بخش آجری را می‌توان به کمک رابطه‌ی ۴ تخمین زد:

$$E_m = 10^6 f_m \quad (4)$$

این میزان به‌طور قابل ملاحظه‌ی کمتر از مقادیر معمول در ادبیات فنی است. برای نمونه، آیین‌نامه‌ی مکزیک،^[۲] این مقادیر را پیشنهاد می‌کند (رابطه‌ی ۵):

$$35^6 f_m \leq E_m \leq 80^6 f_m \quad (5)$$

۶. آیین‌نامه‌ی مکزیک،^[۴] برای مقاومت کششی با نوع ملات و آجر مورد استفاده در نمونه‌ی اول عدد ۰٫۳ مگاپاسکال را پیشنهاد می‌کند که نتیجه‌ی به‌دست‌آمده برابر ۰٫۲ است.

نتایج ۵ و ۶ بر این نکته تأکید می‌کنند که ضوابط آیین‌نامه‌ی سایر کشورها مانند مشخصات پیش‌فرض برای مشخصات مصالح و به‌طریق اولی روابط پیشنهادی برای تعیین مقاومت جانبی و تغییرمکان‌های نسبی، برای ساختمان‌های کلافدار ساخته‌شده در ایران مستقیماً قابل استفاده نیست؛ زیرا مصالحی با مشخصات متفاوت دارند. لذا ضروری است مطالعات مستقل در این باب صورت گیرد. مدل اجزای محدود پیشنهادشده می‌تواند در کنار نتایج آزمایش‌ها، ابزار مناسبی جهت مطالعات بیشتر برای ارتقاء آیین‌نامه‌های مرتبط در ایران باشد.

پانوشته‌ها

1. anisotropic
2. Hill
3. Rankine
4. Hordijk softening in tension
5. Ideal in compression

منابع (References)

1. Svetlana, B., *Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction*, Kanpur, India, NICEE (2007).
2. Building and Housing Research Center, Iranian Code of practice for seismic resistant design of buildings, standard no.2800-05, 3rd edition, BHRC publication, (In Persain) (2005).
3. Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part8:Design and construction of Masonry Buildings, (In Persain) (2005).
4. NTCM-2004, *Complementary Technical Norms for the Design and Construction of Masonry Structures*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Mexico (2004).
5. Tasnimi, A.A, Behavior of Brick walls Recommended by Iranian standard 2800, publication No.R-404, BHRC publication (In Persain) (2003).
6. Kazemi, M.T., Hoseinzadeh Asl, M., Bakhshi, A. and Rahimzadeh Rofooei, F. "Shaking table study of a full-scale single storey confined brick masonry building", *Scientia Iranica Transaction A*, **17**(3), pp. 184-193 (2010).
7. Pourazin, K., Seismic behavior of confined masonry buildings constructed based on Iranian seismic code (Standard 2800) Ph.D. thesis, Ihees, (In Persain) (2008).
8. Lourenco, P.B., *Computational Strategies for Masonry Structures*, Delft University press, Delft (1996).
9. Lourenco, P.B., Borst, R. and Rots, J.G. "A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials", *Int. J. NUMER. METH. ENGG.*, **40**(21), pp. 4033-4057 (1997).
10. Sarrafi, B. and Eshghi, S., "Behavior of clay brick confined Masonry walls under cyclic loads," *The masonry Society (TMS) Journal*, **30**(1) (In Persain)(2012).
11. Witte, F.C. and Kikstra, W.P., *DIANA-Finite Element Analysis, User's Manual Release 9-Material Library*, TNO DIANA BV (2005).
12. Eshghi, S. and Pourazin, K. "In-plane behavior of confined masonry walls - with and without opening", *International Journal of Civil Engineering*, **7**(1), pp. 49-60 (2009).
13. Khanmohammadi, M., Nahvinia, M.A., Marefat, M.S. and Behnam, H. "Experimental investigation of cyclic behavior of confined masonry walls with weak shear strength", *Proc. of 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)* (2011).
14. Pourazin, K. and Eshghi, S. "In-plane behavior of a confined masonry wall", *TMS Journal*, **27**(1), pp. 21-34 (2009).
15. Tomazevic, M., *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, Imperial College Press (1999).
16. Riahi, Z., Elwood, K.J. and Alcocer, S.M. "Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **135**(6), pp. 644-654 (2009).