

بررسی تاثیر آجرچینی بر روی مقاومت برشی دیوار مصالح بنایی در مقیاس مزو

معصومه سپهری نیا^{۱*}، حسینعلی رحیمی بندرآبادی^۲، بهروز احمدی ندوشن^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استادیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

مصالح بنایی از قدیمی ترین مصالح ساختمانی هستند که در اکثر سازه های تاریخی موجود و بسیاری از سازه های جدید مورد استفاده قرار گرفته اند. در این مطالعه با بهره گیری از مقیاس مزو، به بررسی رفتار دیوار تحت بارگذاری یکنواخت توسط نرم افزار *Abaqus* پرداخته شده است. مهم ترین عامل در تعیین رفتار سازه بنایی درزهای ناپیوستگی است که با عنوان رابط بین واحدها و ملات شناخته می شود. در اکثر مطالعات انجام گرفته پیشین برای مدل سازی المان رابط بین واحد و ملات از المان چسبیده استفاده شده است. در این مطالعه با حذف این المان ها و اختصاص دادن ویژگی های آن ها به سطوح واحدهای بنایی، مشاهده شد که ضمن کاهش حجم محاسبات مورد نیاز، نتایج انطباق خوبی با مطالعات تجربی دارد. یکی دیگر از عوامل مهم در رفتار دیوارهای بنایی، نحوه چیدمان واحدهای بنایی در کنار یکدیگر است. در این مطالعه تاثیر هم پوشانی ردیف های واحدهای بنایی بر روی مقاومت برشی و مد خرابی دیوار مصالح بنایی بررسی شده است. در انتها مشاهده شد که با افزایش هم پوشانی، مقاومت دیوار بنایی افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: سازه بنایی، مدل سازی عددی، مقیاس مزو، المان رابط واحد و ملات، آجرچینی.

*نویسنده مسئول: معصومه سپهری نیا

پست الکترونیکی: msepehri51@gmail.com

۱- مقدمه

مصالح بنایی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی هستند، که در اکثر سازه‌های تاریخی موجود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع سازه‌ها امروزه نیز استفاده گسترده‌ای دارند. با این حال با ظهور فولاد و بتن به‌عنوان مصالح کلیدی در قرن بیستم، توجه کمتری به مصالح بنایی می‌شود. این امر موجب می‌گردد مهندسی سازه در زمان حاضر علم محدودی در مورد مصالح سنتی و روش‌های استفاده از آن‌ها را داشته باشند [۱].

جهت بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بنایی تحقیقات متعددی توسط افراد مختلف در سطح دنیا انجام گرفته است. این تحقیقات شامل انجام آزمایشات متعددی بر روی مقیاس‌های مختلف از سازه‌های بنایی و یا استفاده از برنامه‌های کامپیوتری جهت مدل‌سازی عددی دیوار بنایی می‌باشند. با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن آزمایش‌های لازم، شبیه‌سازی رفتار و توسعه مدل‌های عددی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مناسب در بررسی رفتار سازه‌های بنایی مورد استفاده قرار گیرد.

ویژگی‌های رفتاری مصالح این‌گونه سازه‌ها از قبیل تفاوت خواص مکانیکی آجر و ملات و هم‌چنین پیچیدگی رفتار سطح مشترک ملات و آجر و غیر ایزوتروپ و ناهمگن بودن و هم‌چنین رفتار غیرخطی هندسی و فیزیکی آن‌ها، مدل‌سازی عددی این سازه‌ها را بسیار پیچیده می‌کند. یک مدل‌سازی مناسب برای چنین سیستم‌هایی باید بتواند انواع مکانیزم‌های گسیختگی مصالح را در شرایط مختلف بارگذاری مدل نماید. بنابراین می‌بایست دو نوع رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها و رفتار بلوک‌ها در مدل‌سازی در نظر گرفته شود.

انواع روش‌های محاسباتی مورد استفاده برای ارزیابی رفتار سازه‌های بنایی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را می‌توان در سه گروه تحلیل در مقیاس میکرو، ماکرو و مزو دسته بندی کرد. در این‌جا پیشوند مزو نشان‌دهنده مقیاسی بین مقیاس میکرو و مقیاس ماکرو است [۲].

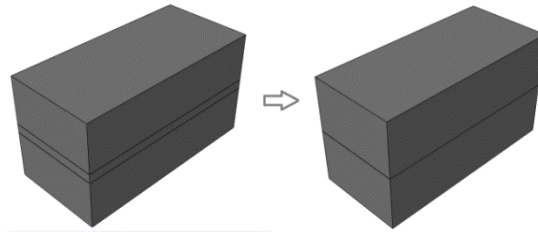
برای تحلیل در مقیاس میکرو، رفتار دقیق سازه اهمیت زیادی دارد و به مسیر ترک‌ها در رفتار غیرخطی اجزا توجه زیادی می‌شود، درحالی‌که در تحلیل مقیاس ماکرو و مزو اجزا، رفتار کلی به‌جای جزئیات اهمیت دارد. روش تحلیل مقیاس مزو و ماکرو با استفاده از برخی فرض‌های ساده کننده بهره‌وری محاسباتی را بهبود می‌بخشد [۲].

مدل‌سازی میکرو بر مبنای رفتار سنجی هر مصالح در جایگاه خودش است. لذا نحوه قرارگیری هر یک از مصالح در این مدل‌سازی بسیار مهم است. برای مثال در سازه‌های بنایی، نقش آجرها و ملات‌ها و ضخامت‌ها و چگونگی قرارگیری آن‌ها در کنار هم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی در مقیاس واقعی سازه‌های بنایی که شامل تعداد زیادی اجزا و عناصر هستند، استفاده از این روش غیرعملی و غیر واقع‌بینانه می‌باشد [۳].

با توجه به این‌که تعداد زیادی آجر در یک مقطع سازه بنایی وجود دارد، نحوه قرار گرفتن آن‌ها بین ملات‌ها می‌تواند باعث بالا رفتن اشتباه در ایجاد پیوستگی میان اجزا مدل گردد. بنابراین برای کاهش مقدار این خطا، روش ماکرو برای هماهنگ سازی دیوار بنایی غیرمسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش مدل‌سازی در مقیاس ماکرو نیازمند یک ماده همگن به‌عنوان جایگزین آجرها و ملات در یک مقطع از سازه است. ماده همگن معادل می‌تواند ایزوتروپیک یا ارتوتروپیک و ... باشد [۴].

از لحاظ سطح دقت و مقدار محاسبات موردنیاز، مدل‌سازی در مقیاس مزو بین تحلیل در مقیاس میکرو و ماکرو قرار می‌گیرد. در این روش ملات عملاً نقشی نداشته و نقش اصلی را المان حدفاصل (رابط) و المان واحد بنایی ایفا می‌کنند [۵]. به‌علت ضخامت صفر المان حدفاصل در این روش، ابعاد هندسی المان واحد بنایی باید افزایش یابد تا هندسه کلی بدون تغییر باقی بماند (شکل ۱). سختی الاستیک المان حدفاصل می‌تواند با در نظر گرفتن خواص ملات و واحد بنایی محاسبه گردد. این روش به‌دلیل در نظر نگرفتن اثر پواسون در سطح ملات

نسبت به روش میکرو از دقت کمتری برخوردار است، مقایسه نتایج آنالیزهایی که تاکنون بر روی مدل سازی میکرو و مدل سازی مزو صورت گرفته، بیان گر دقت مناسب مقیاس مزو می باشد.



شکل ۱: افزایش ابعاد المان واحد بنایی بعد از حذف ملات.

رفتار دیوارهای بنایی تحت بارگذاری های مختلف اعم از بارگذاری یکنواخت داخل و خارج صفحه، بار زلزله و... به صورت گسترده ای توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. اکثر این تحقیقات روی رفتار دیوار بنایی غیر مسلح متمرکز شده اند، و برخی دیگر نیز به بررسی دیوارهای مسلح و تقویت شده پرداخته اند.

به عنوان مثالی از کارهای اولیه در مدل سازی سازه های بنایی در مقیاس مزو می توان به مدل پیشنهادی پیچ اشاره کرد. دیوار بنایی بررسی شده توسط وی، مجموعه ای از المان های پیوسته آجر الاستیک است. پیچ با در نظر گرفتن المان رابط بین آجرها، سطح تسلیم را فقط برای شکست برشی و کششی تعریف کرده است [۶]. پیچ هم چنین به بررسی رفتار سازه های بنایی تحت بارگذاری متمرکز نیز پرداخته است [۷].

لورنزو از یک مدل رفتاری کامپوزیت برای مدل سازی جامع تر دیوارهای بنایی تحت بارگذاری داخل صفحه استفاده کرده است. این مدل شامل جداسدگی کششی برای شکست کششی، اصطکاک کولمب برای شکست برشی و حالت کلاهدک برای خردشدگی فشاری است. به عبارت دیگر، لورنزو با اضافه کردن کلاهدک فشاری به سطح تسلیم، مدل پیچ را اصلاح کرده است. به این ترتیب خرد شدن آجر نیز در نظر گرفته می شود [۸-۹].

لورنزو و اولیویرا با توسعه مدل ارائه شده توسط لورنزو به بررسی دیوار بنایی تحت بارگذاری چرخه ای داخل صفحه پرداختند [۱۰].

دولت شاهی و عارف با جایگزینی المان های صلب به جای المان های جامد، تعداد درجات آزادی سیستم و حجم محاسبات مورد نیاز را به طور قابل توجه ای کاهش دادند [۲]. از جمله موضوعات دیگری که در زمینه دیوارهای بنایی مورد بررسی قرار گرفته اند، می توان به نحوه رفتار این دیوارها تحت بارگذاری انفجاری اشاره کرد که توسط لورنزو و رفسنجانی و یا وی صورت گرفته است [۱۱-۱۲].

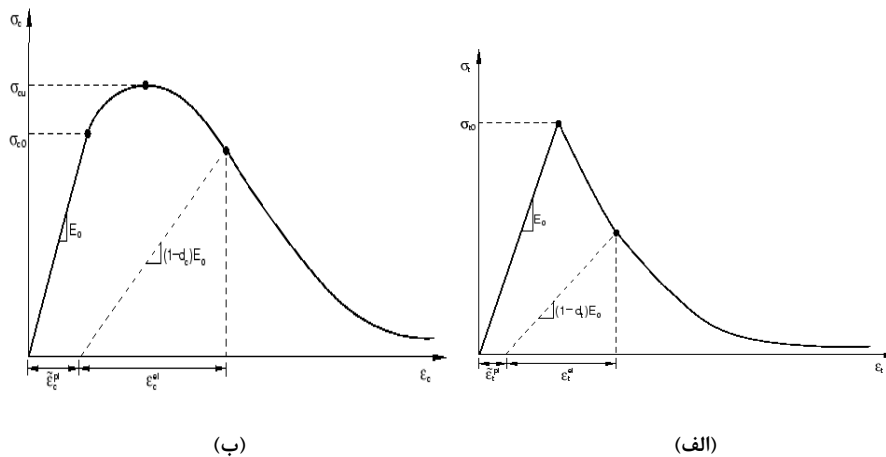
دولت شاهی و عارف با انجام آزمایش هایی به این نتیجه رسیدند که می توان به جای استفاده از مدل کلاهدک فشاری از مدل پلاستیسته خرابی بتن برای مدل سازی واحدهای بنایی استفاده کرد، بنابراین می توان خردشدگی آجر را نیز با این روش مدل کرد [۵]. بولحسنی و هم کاران در تحقیقی جداگانه با استفاده از مقیاس مزو، روی کاربرد مدل پلاستیسته خرابی بتن برای مدل سازی واحدهای بنایی توخالی مطالعه کردند [۱۳].

در این پژوهش برای کاهش خطای مدل سازی و حجم محاسبات مورد نیاز، خواص المان های رابط به سطوح در تماس واحدهای بنایی اختصاص داده شده است. برای مدل سازی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. نحوه قرار گرفتن واحدهای بنایی در کنار یکدیگر یا به اصطلاح آجرچینی از مهم ترین موضوعاتی است که کمتر مورد توجه تحقیقات قبلی قرار گرفته است. در این پژوهش با بررسی دو نمونه آرایش مرسوم، تاثیر هم پوشانی ردیف های واحد بنایی نسبت به یکدیگر ارزیابی شده است.

۲- مدل سازی عددی

۲-۱- پلاستیسیته بتن آسیب دیده

در این جا برای شبیه سازی رفتار پلاستیک واحدهای بنایی از پلاستیسیته خرابی بتن آسیب دیده استفاده شده است. این روش برای مدل کردن سازه های بتن مسلح کاربرد دارد، اما می توان از آن برای مدل سازی بتن غیرمسلح و مصالح شبه ترد نیز استفاده کرد. در این روش فرض می شود که ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری ماده دو مکانیزم اصلی شکست هستند. بنابراین برای معرفی رفتار کامل واحد بنایی علاوه بر پارامترهای الاستیک، مقدار عددی زاویه اتساع، خروج از مرکزیت و... و پارامترهای اختصاصی معرف رفتار واحد بنایی در کشش و فشار نیز می بایست برای نرم افزار تعریف گردند (شکل ۲) [۱۴].



شکل ۲: رفتار بتن در برابر بارگذاری تک محوره [۱۴].

۲-۲- رفتار چسبنده مبتنی بر سطح^۲

از مدل چسبنده به طور گسترده ای به منظور مطالعه شکست مصالح مختلف استفاده می شود [۱۵-۱۶]. از این مفهوم می توان برای مواردی که مقاومت رابط و کل سازه مدنظر است، استفاده کرد. المان های چسبنده بین دو سطح قرار می گیرند و در صورت وجود تغییر مکان نسبی، باعث ایجاد تنش روی سطوح می شوند. خاصیت مهم این المان ها این است که می توان صریحا رابطه بین تنش به وجود آمده و تغییر مکان نسبی را تعریف کرد. به علاوه این المان ها دارای قابلیت مدل سازی جداشدگی بین سطوح نیز هستند [۱۴].

سه مدل رفتاری مختلف شامل تنش تک محوره، پیوسته و کشش - جداشدگی را می توان برای المان های چسبنده تعریف کرد. مدل سازی براساس مدل پیوسته برای چسبندگی مناسب است. در این مدل رفتاری، چسب با یک ضخامت محدود در نظر گرفته می شود. هنگامی که ضخامت چسب بسیار ناچیز است از مدل رفتاری کشش - جداشدگی استفاده می شود و هم چنین در موارد خاصی که ضخامت صفر برای چسب در نظر گرفته می شود، نیز می توان از این مدل استفاده کرد [۱۴]. به طور کلی، تاثیر رفتار مصالح چسبنده روی رفتار یک سازه بیشتر از تاثیر رفتار مصالح اطراف می باشد. به طوری که شروع و گسترش خرابی در مصالح چسبنده کنترل کننده رفتار کلی مصالح کامپوزیت از جمله مصالح بنایی است [۱۷].

^۲Surface Based Cohesive Behavior

علاوه بر این، امکان تعریف رفتار تنش - جداسازی برای سطح نیز وجود دارد. این رفتار قابلیت شبیه به المان‌های چسبنده با مدل رفتاری تنش - جداسازی ارائه می‌دهد. با این حال، تعریف رفتار چسبنده مبتنی بر سطح ساده‌تر بوده و امکان شبیه‌سازی طیف وسیعی از اندرکنش‌های چسبنده مانند دو سطح چسبنده که در طول تحلیل در تماس با هم قرار دارند، را فراهم می‌کند.

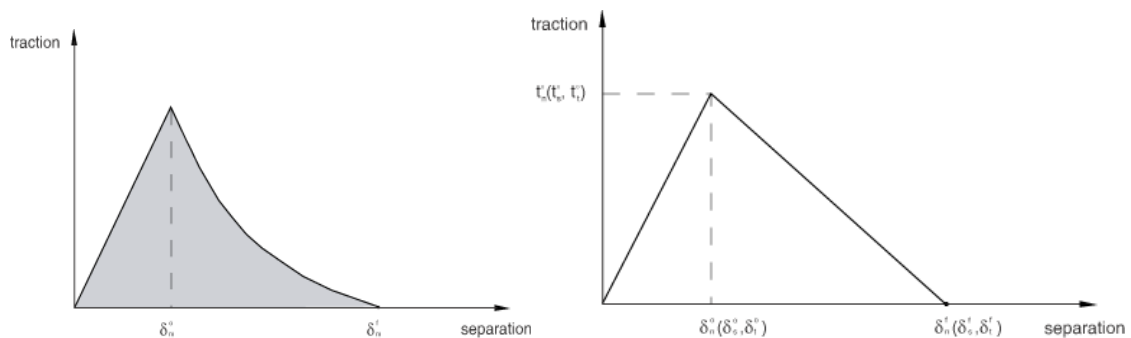
مدل رفتاری تنش-جداسازی موجود در نرم‌افزار آباکوس، رفتار مصالح را قبل از شروع گسیختگی به صورت الاستیک خطی در نظر می‌گیرد. سپس مدل به گسیختگی رسیده و تا خرابی کامل ادامه پیدا می‌کند. رفتار الاستیک به صورت یک ماتریس الاستیک خطی تعریف می‌شود که تنش‌های نرمال و برشی را به جداسازی نرمال و برشی در طول رابط، ربط می‌دهد. این رابطه به صورت زیر [۱۴]:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (1)$$

در رابطه ۱، δ_n ، δ_s و δ_t تغییر مکان‌های نسبی دو سطح به ترتیب در جهت عمود و دو جهت موازی هستند. t_n ، t_s و t_t نیز به ترتیب تنش نرمال و تنش‌های برشی به وجود آمده روی سطح بر اثر تغییر مکان نسبی هستند. در رابطه بالا منظور از ماتریس k ، ماتریس سختی المان رابط است [۱۴]. مقادیر عددی سختی در راستای برشی و نرمال مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود [۸]:

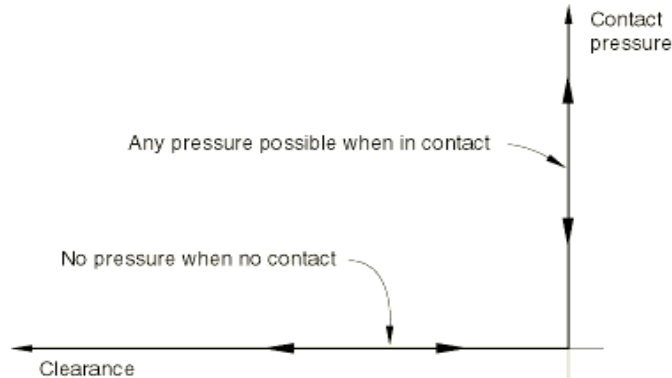
$$k_{nn} = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)}, \quad k_{ss} = k_{tt} = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (2)$$

مدل‌سازی خرابی امکان شبیه‌سازی نزل و شکست احتمالی پیوستگی بین دو سطح چسبنده را فراهم می‌کند. مکانیزم خرابی شامل دو جزء، معیار شروع خرابی و قانون تکامل خرابی است. همان‌طور که در بالا عنوان شد، پاسخ اولیه به صورت خطی فرض می‌شود، با این حال، هنگامی که معیار شروع خرابی فرا می‌رسد، خرابی با توجه به قانون تکامل خرابی که توسط کاربر تعریف شده است، اتفاق می‌افتد (شکل ۳).



شکل ۳: رفتار المان قبل و پس از خرابی [۱۴].

موضوع مهم دیگر در رفتار تنش - جداسازی، نحوه‌ی رفتار سطوح پس از بین رفتن چسبندگی آن‌ها است. این رفتار به صورت رفتار فشاری و اصطکاک مدل‌سازی می‌گردد. مطابق نمودار شکل ۴، هنگامی که سطوح در تماس با یکدیگر نیستند، فشاری بین آن‌ها منتقل نمی‌شود، ولی هنگامی که دو سطح با یکدیگر در تماس هستند، نیروی فشاری می‌تواند بین آن‌ها منتقل گردد. رفتار سطوح در راستای عمودی، به صورت Hard Contact در نظر گرفته می‌شود. یعنی هنگامی که چسبندگی سطوح یا به اصطلاح ملات بین واحدهای بنایی از بین رفت دو سطح هیچ نفوذی در یکدیگر نداشته و رفتاری سخت خواهند داشت [۱۴]. همچنین در راستای برشی فرض می‌شود که تا قبل از شروع کاهش سختی چسبندگی، فقط مدل رفتاری چسبنده فعال بوده و مدل اصطکاک غیرفعال است. هنگامی که کاهش سختی چسبندگی شروع می‌شود، مدل اصطکاک فعال شده و سهمی از تنش برشی را بر عهده می‌گیرد.



شکل ۴: رفتار عمودی تماس [۱۴].

۳-۲- دینامیک صریح

علاوه بر روش مدل سازی سازه بنایی موضوع مهم دیگر در مدل سازی عددی سازه های بنایی انتخاب روش تحلیل است. به طور کلی باتوجه به شرایط موجود می توان از دو روش ضمنی و صریح استفاده کرد. طبق اساسی ترین ویژگی های روش ضمنی، این روش در هر مرحله از زمان برای حل یک سیستم معادلات نیازمند تکرار است. متأسفانه برای مسائل با درجه غیرخطی بالا، مانند یک سازه بنایی، راه حل المان محدود ضمنی اغلب با مشکل هم گرایی مواجهه شده و حل در مراحل اولیه رژیم غیرخطی متوقف می شود. به همین منظور در تحقیقات اخیر، محققین برای حل این مشکل به فرمول بندی صریح و روش حل دینامیکی صریح روی آورده اند.

روش حل صریح، یک روش دینامیکی است، در واقع به منظور مدل سازی وقایع با سرعت بالا که در آنها اینرسی نقش غالب را در حل دارد، توسعه یافته است. روش حل دینامیکی صریح برای کارآمد شدن تحلیل، بازه های زمانی کوچک زیادی را در نظر می گیرد. این روش از اپراتور تفاضل مرکزی صریح مشتق شده است. اپراتور تفاضل مرکزی صریح، معادله تعادل دینامیکی را در آغاز افزایش t برآورد می کند. برای پیشبرد مسیر حل، شتاب در زمان t ، سرعت در زمان $t + \Delta t/2$ و جابجایی در زمان $t + \Delta t$ محاسبه می شوند. نتایج به دست آمده از این شیوه زمانی صحیح و پایدار خواهد بود که Δt در نظر گرفته شده به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند روند تغییر سرعت و شتاب در گره ها را دنبال کند. بنابراین برای ایجاد شرایط پایداری از پارامتری با عنوان حد پایداری استفاده شده است. حد پایداری در لغت به معنی بالاترین فرکانس در سیستم تعریف می شود. حد پایداری را می توان براساس بالاترین مقدار ویژه، ω_{max} به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\Delta t_{(Stable)} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (3)$$

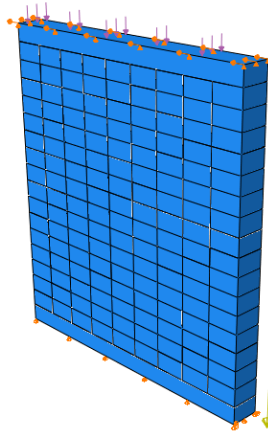
باتوجه به این که Abaqus/Explicit همیشه یک مقدار کوچکی از میرایی را به شکل ویسکوزیته حجمی برای کنترل نوسان های با فرکانس بالا در نظر می گیرد. می توان حد پایداری را به صورت زیر تعریف کرد.

$$\Delta t_{(Stable)} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right) \quad (4)$$

در رابطه بالا ξ به عنوان بخشی از میرایی بحرانی در حالت بالاترین فرکانس است. برخلاف شهود معمول مهندسی، تعریف میرایی باعث کاهش حد پایداری می شود.

۳- اعتبار سنجی عددی

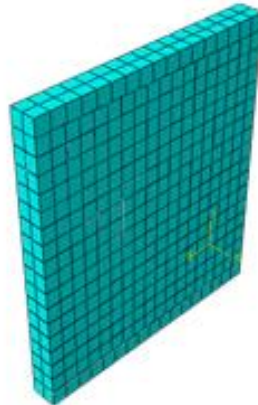
به منظور اعتبار سنجی نحوه مدل سازی ذکر شده، به بررسی دیوار بنایی عنوان شده در کار آزمایشگاهی رایمیکر و ورملتفورت [۱۸]- [۱۹] پرداخته شده است. ابعاد هندسی دیوار بررسی شده با نسبت عرض به ارتفاع نزدیک واحد، ۹۹۰×۱۱۱۶ میلی متر مربع است. این دیوار از ۱۶ ردیف آجر رسی با ابعاد $۲۱۰ \times ۱۰ \times ۵۲$ و ملات با ضخامت ۱۰ میلی متر تشکیل شده است. با توجه به این که در این مدل سازی ملات حذف شده و المان رابط صفر ضخامت در نظر گرفته شده است، برای حفظ نسبت عرض به ارتفاع، ابعاد آجر در دو راستای طول و ضخامت در دو جهت منبسط می شود. بنابراین ابعاد آجر مدل شده در نرم افزار $۲۲۰ \times ۱۰ \times ۶۲$ است. برای اعمال شرایط تکیه گاهی و همچنین برای ایجاد شرایط تیر صلب در بالای دیوار، دو تیر بتنی با ضخامتی برابر با آجرها در بالا و پایین دیوار در نظر گرفته می شود. نمایی از دیوار و شرایط تکیه گاهی و بارگذاری اعمال شده در شکل ۵ آورده شده است. مدل سازی های انجام شده شامل سه گام هستند. در گام اول بارگذاری عمودی به تیر بالایی اعمال می شود. سپس با ثابت شدن بارگذاری عمودی، جابجایی تیر بالا در راستای عمودی مقید می شود. در نهایت در مرحله آخر جابجایی افقی کنترل شده به صورت یکنواخت به دیوار اعمال می گردد. لازم به ذکر است که در مرحله اعمال بارگذاری فشاری، نیروی ناشی از وزن سازه با عنوان نیروی گرانش نیز برای نمونه در نظر گرفته می شود.



شکل ۵: نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری.

برای مش بندی بلوک های آجری از المان $C3D8R$ استفاده شده است. اندازه المان های آجری در این مدل سازی $۶ \times ۶ \times ۶ \text{ cm}^3$ انتخاب شده است. نمایی از شبکه بندی دیوار مورد نظر در شکل ۶ آمده است.

با توجه به این که برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل سازی صورت گرفته از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی های گذشته استفاده می شود، بنابراین خواص مصالح نیز مشابه با کارهای پیشین است (جدول ۱ و ۲) لازم به ذکر است که دسترسی کامل به خواص مصالح به کار برده شده در آزمایش های مختلف مقدور نبود.



شکل ۶: شبکه بندی دیوار مصالح بنایی

با بررسی مد خرابی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی گذشته، مشاهده می‌شود که در میانه آجر نیز ترک‌هایی ایجاد شده است. به همین منظور در وسط بلوک‌های آجری درزهایی عمودی در نظر گرفته شده است. درزهایی عمودی که با عنوان ترک بالقوه شناخته می‌شوند رفتاری مشابه المان‌های رابط داشته و خواص آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی واحد بنایی

چگالی ρ	مدول الاستیسیته E	ضریب پواسون ν	مقاومت فشاری f_c
1850 kg/m^3	$16/7 \text{ Gpa}$	$0/15$	$10/5 \text{ Mpa}$

جدول ۲: مشخصات مکانیکی المان رابط و ملات

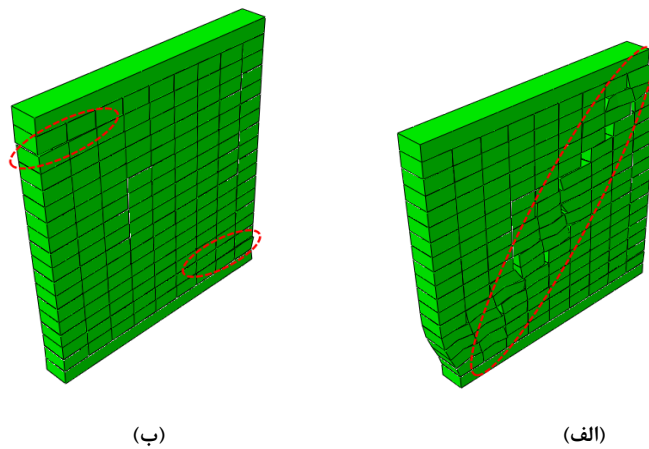
رفتار چسبنده		رفتار نرمال		رفتار مماسی					
رفتار کشش-جداشدگی		رفتار کشش-جداشدگی		رفتار کشش-جداشدگی					
تکامل خرابی	شروع خرابی	G_{II}^f	G_I^f	C	f_t	k_{tt}	k_{ss}	k_{mm}	$\mu = \tan \phi$
$0/125 \text{ Nmm/mm}^2$	$0/018$	$0/35$	$0/25$	36	36	82	Hard Contact	$0/75$	

جدول ۳: مشخصات مکانیکی درز عمودی بالقوه

رفتار چسبنده		رفتار نرمال		رفتار مماسی					
رفتار کشش-جداشدگی		رفتار کشش-جداشدگی		رفتار کشش-جداشدگی					
تکامل خرابی	شروع خرابی	G_{II}^f	G_I^f	C	f_t	k_{tt}	k_{ss}	k_{mm}	$\mu = \tan \phi$
$0/55 \text{ Nmm/mm}^2$	$0/08$	$2/8$	2	1000	1000	1000	Hard Contact	$0/75$	

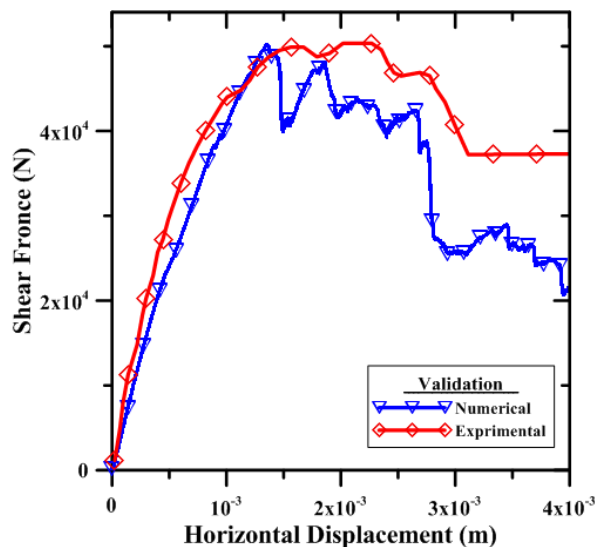
مقدار بارگذاری عمودی وارده $0/3$ نیوتن بر میلی‌متر مربع و جابجایی افقی اعمال شده نیز برابر 4 میلی‌متر است. مد خرابی و نمودار نیروی برشی در مقابل جابجایی افقی در شکل‌های زیر آمده است. ابتدا دو ترک کششی افقی در پایین و بالای دیوار تشکیل می‌شود (شکل ۷-الف). سپس یک ترک پله‌ای در قطر دیوار گسترش می‌یابد. لازم به ذکر است که، این ترک از وسط دیوار شروع شده و با ادامه روند

بارگذاری در دو جهت قطری گسترش می‌یابد. در نهایت مکانیزم خرابی با خردشدگی پنجه و کامل شدن ترک قطری همراه است (شکل ۷-ب).



شکل ۷: الف) تشکیل ترک کششی افقی در بالا و پایین دیوار، ب) مد خرابی نهایی دیوار پس از اعمال جابجایی.

در شکل ۸ نمودار حاصل از مدلسازی عددی با نمودار تحقیقات آزمایشگاهی مقایسه شده است، مشاهده می‌شود که نتایج از انطباق خوبی برخوردارند.



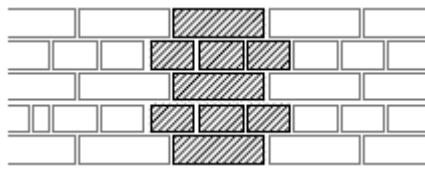
شکل ۸: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی.

۴- بررسی تاثیر نحوه آجرچینی بر روی مقاومت دیوار مصالح بنایی

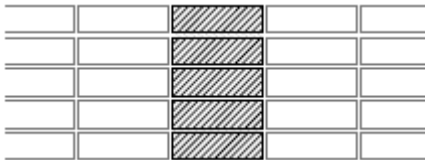
یکی از مسائل مهم در رفتار سازه‌های بنایی نحوه چینش آجرها در کنار یکدیگر است. نحوه چیدمان آجرها در کنار یکدیگر و یا به اصطلاح آجرچینی بر روی مقاومت و مد خرابی دیوار مصالح بنایی تاثیر می‌گذارد. دلایل این ادعا را می‌توان در متفاوت بودن مقاومت ملات و آجر و همچنین متفاوت بودن مقاومت آجر در دو راستای طولی و عرضی جستجو کرد. با توجه به این که با تغییر چیدمان آجرها، درزهای ملات جابجا می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار داشت که مد خرابی حاکم بر دیوار بنایی نیز تغییر می‌کند.

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر بررسی نحوه چینش واحدهای بنایی در کنار یکدیگر، دو دیوار با ضخامت ۲۰ سانتی متری با آجرچینی متفاوت بررسی شده است. در دیوار با آرایش انگلیسی، ردیف‌های متوالی واحدهای بنایی نسبت به یکدیگر هم‌پوشانی کافی دارند

(شکل ۹)، درحالی که در دیوار با چینش انباشته، همان طور که در شکل ۱۰ مشخص است ردیف های دیوار فاقد هم پوشانی هستند، و همین مورد باعث می شود که درزهای عمودی ملات روی هم قرار گیرند.

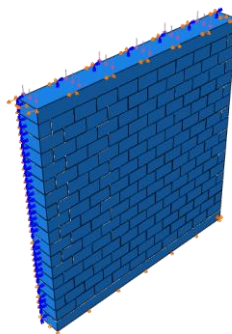


شکل ۹: آجرچینی انگلیسی.



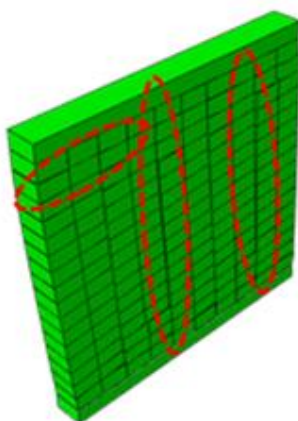
شکل ۱۰: آجرچینی انباشته.

خواص مکانیکی مصالح مشابه خواص ارائه شده در جدول ۱ تا ۳ می باشد. لازم به ذکر است که به دلیل تقارن دیوارها در راستای ضخامت، نصف ضخامت دیوار مدلسازی شده است. با مدل کردن نصف ضخامت دیوار انتظار می رود که به علت کاهش المان ها و هم چنین درجات آزادی، حجم محاسبات کاهش یافته و نتایج از دقت بالاتری برخوردار باشند. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه نیز پشت دیوار مقید شده است (شکل ۱۱).

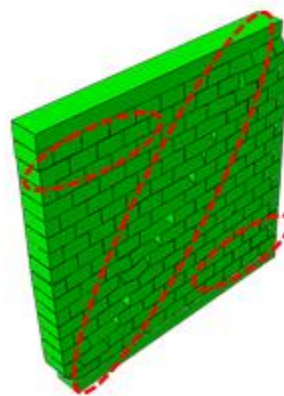


شکل ۱۱: مدل ارائه شده برای آجرچینی انگلیسی.

در ادامه مدهای خرابی و نمودار نیروی برشی در مقابل جابجایی افقی دو دیوار بررسی شده است (اشکال ۱۲ و ۱۳).



(ب)

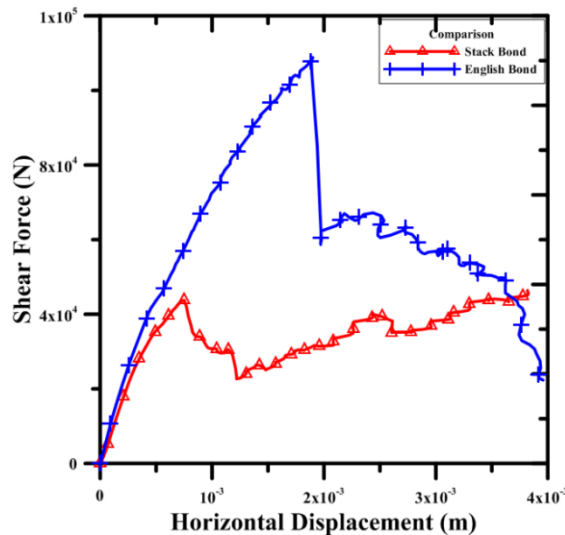


(الف)

شکل ۱۲: مد خرابی دیوار بنایی، (الف) پیوند انگلیسی، (ب) پیوند انباشته.

مشاهده می‌شود که در دیوار با آجرچینی انگلیسی، به دلیل هم‌پوشانی واحدهای بنایی، ترک پله‌ای در قطر دیوار به وجود آمده و دیوار از مقاومت برشی بالاتری نسبت به دیوار با آرایش انباشته برخوردار است.

نکته قابل توجه در نمودار شکل ۱۳، افزایش مقاومت برشی آجرچینی انباشته بعد از رسیدن به مقدار حداقل است. با افزایش جابجایی وارده، درزهای واحدهای بنایی جابجا شده و ردیف‌ها نسبت به هم هم‌پوشانی پیدا می‌کنند، و این اتفاق باعث افزایش مقاومت دیوار در جابجایی بالاتر می‌شود.



شکل ۱۳: مقایسه مقاومت برشی آجرچینی انگلیسی با انباشته.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش نحوه مدل‌سازی عددی دیوار بنایی به روش مزو بررسی گردیده است. در این مدل‌سازی برای مدل کردن خرابی واحدهای بنایی، رفتار پلاستیک برای آن‌ها لحاظ شده است. هم‌چنین به منظور شبیه‌سازی شکست کششی و برشی در درزها، مدل رفتاری چسبنده برای المان‌های رابط و درزهای بالقوه تعریف شده است. بنابراین امکان شبیه‌سازی تمام مکانیزم‌های خرابی برای مدل‌سازی مدنظر قرار گرفته است. با این روش می‌توان گفت در مدل در نظر گرفته شده، شروع خرابی از مفاصل رابط و درزهای بالقوه عمودی وسط واحدهای بنایی بوده و با خردشدگی واحدهای بنایی تکمیل می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت رفتار دیوار قبل از خرابی توسط ویژگی‌های المان رابط و درزهای بالقوه کنترل می‌شود. درحالی‌که با شروع خرابی ویژگی‌های پلاستیک واحدهای بنایی نیز در نحوه رفتار دیوار سهیم می‌شوند. استفاده از مدل رفتاری چسبنده مبتنی بر سطح منجر به کاهش حجم محاسبات مورد نیاز شده است. درحالی‌که با مقایسه نتایج مقاومت برشی و هم‌چنین مد خرابی دیوار با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که این رفتار از دقت مناسبی برخوردار است. در این پژوهش هم‌چنین اثر هم‌پوشانی ردیف‌های واحدهای بنایی نسبت به یک‌دیگر نیز بررسی و مشاهده شد که با افزایش این هم‌پوشانی مقاومت برشی دیوار بالا می‌رود. هم‌چنین مد شکست دیوار به حالت شکست برشی یعنی ترک خوردگی پله‌ای در قطر دیوار تبدیل می‌شود.

مراجع

- [۱] طایفی نصرآبادی، ع.، رشیدی مهرآبادی، م. (۱۳۸۷)، "روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های بنایی و خشتی در برابر زلزله"، مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، سال ۱، شماره ۲.
- [2] Dolatshahi, K. M., & Aref, A. J. (2011), "Two-dimensional computational framework of meso-scale rigid and line interface elements for masonry structures", *Engineering Structures*, 33(12), 3657-3667.
- [۳] حجازی، م.، قمری، م. (۱۳۹۱)، "بررسی دو روش مدل‌سازی ماکرو و میکرو در سازه‌های بنایی"، اولین کنفرانس ملی بنای ماندگار، مشهد مقدس.
- [4] Korany, Y., and EL-Haggar, S. (1997), "Mechanics and modeling of URM structures", *The Masonry Society Journal*, Vol. 19, No. 1, PP. 97-106.

- [5] Aref, A. J., & Dolatshahi, K. M. (2013), "A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures", *Computers & Structures*, 120, 9-23.
- [6] Ali, S. S., & Page, A. W. (1988), "Finite element model for masonry subjected to concentrated loads", *Journal of structural engineering*, 114(8), 1761-1784.
- [7] Page, A. W. (1978), "Finite element model for masonry", *Journal of the Structural Division*, 104(8), 1267-1285.
- [8] Lourenço, P. B. (1996), "Computational strategies for masonry structures", TU Delft, Delft University of Technology.
- [9] Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (1997), "Multisurface interface model for analysis of masonry structures", *Journal of engineering mechanics*, 123(7), 660-668.
- [10] Oliveira, D. V., & Lourenço, P. B. (2004), "Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements", *Computers & structures*, 82(17), 1451-1461.
- [11] Rafsanjani, S. H., Lourenço, P. B., & Peixinho, N. (2015), "Dynamic interface model for masonry walls subjected to high strain rate out-of-plane loads", *International Journal of Impact Engineering*, 76, 28-37.
- [12] Wei, X., & Stewart, M. G. (2010), "Model validation and parametric study on the blast response of unreinforced brick masonry walls", *International journal of impact engineering*, 37(11), 1150-1159.
- [13] Bolhassani, M., Hamid, A. A., Lau, A. C., & Moon, F. (2015), "Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages", *Construction and Building Materials*, 83, 159-173.
- [14] Abaqus Ins. ABAQUS Analysis user Manual, Version 6.12.
- [15] Dugdale, D. S. (1960), "Yielding of steel sheets containing slits", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100-104.
- [16] Barenblatt, G. I. (1962), "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture", *Advances in applied mechanics*, 7(1), 55-129.
- [17] Needleman, A. (1987), "A continuum model for void nucleation by inclusion debonding", *Journal of applied mechanics*, 54(3), 525-531.
- [18] Raijmakers, T. M. J. (1992), "Deformation controlled tests in masonry shear walls", report B-92-1156.
- [19] Vermeltfoort, A. T., & Raijmakers, T. M. J. (1993), "Deformation controlled tests in masonry shear walls, Part 2", *Eindhoven University of Technology*: Delft, The Netherlands.