

بررسی رفتار دیوار آجری غیر مسلح به کمک تحلیل بارافزون

محمدحسین ثقفی، عضو هیأت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، سمنان

سروش صفاخواه، عضو هیأت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، سمنان

علی خیرالدین، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

دیوارهای برشی آجری می‌باشد که بار سقف از طریق این دیوارها به پی منتقل می‌شود. دیوارهای ساخته شده از مصالح آجری و مانند آن (بلوک بتنی، سنگ، خشت) از مقاومت برشی قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است؛ اما رفتاری به شدت ترد و شکننده دارد و به محض رسیدن به مقاومت نهایی، تحلیل رفته و فرو می‌ریزد که به همین دلیل برای مناطق شدیداً لرزه‌خیز سیستم مناسبی نیست. یک ویژگی مشترک دیوارهای آجری غیرمسلح آن است که تحت شتاب پی، مادام که به حد آستانه نرسیده‌اند، آثار تخریب چندانی در آنها ظاهر نمی‌شود؛ اما به محض عبور از حد آستانه، دیوار شروع به یک حرکت چرخشی حول محور عمود بر دیوار بنام حرکت تلو می‌کند و این حرکت به نوبه خود موجب پیدایش تنشهای خردکننده‌ای در پنجه دیوار می‌شود که نهایتاً به خرابی دیوار می‌انجامد [۱]. جهت بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها تحقیقات متعددی توسط افراد مختلف انجام شده است. گامباروتا و لاگومارسینو [۲] بر اساس ویژگیهای ملات بین آجرها و در نظر گرفتن معادله مشخصه آنها اقدام به تحلیل اجزای محدود و بررسی حرکت جانبی دیوار برشی آجری نموده‌اند. پاسخهای حاصل از این مدل با نتایج آزمایشگاهی حاصل از بارگذاری جانبی بر روی نمونه‌هایی از دیوارهای آجری مقایسه شده است. در ایران نیز در این ارتباط پس از خرابی این نوع سازه‌ها در زلزله‌های اخیر تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. تسنیمی [۳] با انجام آزمایش بر روی چهار نمونه دیوار با مقیاس ۲/۳، دیوارهای باربر آجری را مورد مطالعه قرار داد که در آن ساخت دیوارها بر اساس ضوابط توصیه شده در استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده و بارگذاری آن به صورت اعمال بار جانبی رفت و برگشتی (تناوبی) بود. در این تحقیق رفتار دیوارهای مسلح

ساختمانهای مصالح بنایی غیرمسلح، طیف گسترده‌ای از ساختمانهای موجود در کشور را تشکیل می‌دهد. بررسی آمار مرگ و میر و انهدام در ساختمانها مؤید این مطلب است که، ساختمانهای بنایی، بیشترین صدمات ناشی از زلزله را به خود دیده است. همچنین این ساختمانها رفتار لرزه‌ای مناسبی را از خود نشان ندادند، که علت اصلی آن را می‌توان کمبود شکل‌پذیری مناسب آنها جستجو کرد. تنها عناصر سازه‌ای این‌گونه ساختمانها دیوارهای برشی بنایی می‌باشد که نقش باربری ثقلی و جانبی را بر عهده دارند. در این مقاله، به بررسی پارامترهای مقاومتی مؤثر بر رفتار و مودهای شکست دیوار بنایی غیرمسلح و سپس به معرفی روشهای مختلف مدلسازی عددی، میکرو مدلسازی و ماکرو مدلسازی دیوار بنایی غیرمسلح پرداخته شده است. همچنین به بررسی رفتار داخل صفحه یک دیوار بنایی غیرمسلح (*URM*) تحت اثر توأم بارهای قائم و برش درون صفحه به صورت بارافزون (*Pushover*)، مدلسازی شده به روش ماکرو به کمک نرم‌افزار المان محدود *ANSYS* پرداخته شده است. نتایج عددی به دست آمده از روش المانهای محدود با نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی دیوار بنایی غیرمسلح مقایسه شده و صحت مدلسازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها تأثیر پارامتر مقاومت کششی دیوار بنایی غیرمسلح بر روی رفتار غیرخطی دیوار با استفاده از روش اجزای محدود بررسی گردیده است.

کلیدواژه‌ها: دیوار آجری غیرمسلح، روش المانهای محدود، آسیب‌پذیری، مقاومت کششی، تحلیل بارافزون

۱- مقدمه

در ساختمانهای بنایی، عنصر اصلی باربر ثقلی و جانبی

معیار غیرخطی ویلیام وارنک استفاده شده است. در حالت دوم با توجه به مقاومت پایین کششی و برشی دیوار آجری، شکست برشی از آجر عبور نکرده و تنها از ملات عبور می‌کند که جهت مدلسازی از المانهای تماسی (*contact*) در نرم‌افزار *ANSYS* با رفتار غیرخطی استفاده شده است [۸].

در این مقاله، جهت تحلیل عددی از مدلسازی ماکرو استفاده گردیده که این مدل در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط لورنکو و همکارانش در دانشگاه مینهو ارائه شده است. در این تحقیق، به بررسی رفتار داخل صفحه یک دیوار بنایی غیرمسلح (*URM*) تحت اثر توأم بارهای قائم و برش درون صفحه به صورت بار افزون (*Pushover*)، به کمک نرم‌افزار المان محدود *ANSYS* پرداخته شده است. همچنین تأثیر پارامتر مقاومت کششی بر روی رفتار غیرخطی دیوار بنایی غیرمسلح تحت بار قائم و برش درون صفحه، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مقاومت مشخصه دیوار با مصالح بنایی

مقاومت فشاری و خردشدگی در دیوارهای ساخته شده با مصالح بنایی بستگی به عوامل ذیل دارد:

- ۱- مقاومت فشاری و خردشدگی مصالح بنایی.
- ۲- ترکیب ملات مورد استفاده و سن آن: ملاتهای مختلف در کیفیت و مقاومت دیوار نقش مهمی را دارا می‌باشند. در کل، این موارد بر پایه مواد اصلی مانند سیمان یا ملات آهکی، ملات ترکیب سیمان و آهک، ترکیب آهک و پوزولان یا ملات آهک هیدرولیکی تعریف می‌شوند. ملات گل نیز در برخی نقاط کشور مخصوصاً در مناطق روستایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- ۳- ضخامت کم در مقابل ارتفاع: کاهش ضخامت در مقابل افزایش ارتفاع و طول دیوار باعث افزایش لاغری دیوار گردیده که این افزایش لاغری باعث کاهش مقاومت دیوار خواهد شد.
- ۴- افزایش مقدار خروج از مرکزیت بار محوری دیوار با کاهش مقاومت همراه خواهد بود.

و غیرمسلح و نیز اثر کلافبندی مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد مصالح بنایی دارای مقاومت کششی و فشاری بسیار پایین است که این امر، سبب رفتار ترد مصالح بنایی در حین اعمال بارهای لرزه‌ای شده و باعث می‌شود مصالح وارد ناحیه پلاستیک نشوند و دچار گسیختگی ترد شوند. این گسیختگی ممکن است از ناحیه ملات و یا آجر و یا لغزش درز مصالح باشد. بعد از گسیختگی مقاومت دیوار آجری به شدت کاسته می‌شود. وجود ساختمانهای بنایی به‌جا مانده از گذشته و یا بناهای تاریخی با ارزش با اشکال متنوع معماری باعث شده که برای بررسی این‌گونه سازه‌ها در زلزله از مدلسازی عددی این ساختمانها استفاده شود. مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار درون صفحه دیوار برشی به صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است. محققین بسیاری به ارائه روشهایی برای مدلسازی دیوارهای آجری به شیوه‌های مختلف پرداخته‌اند. پیچ [۴] از اولین کسانی بود که به مدلسازی عددی آجر کار تحت ترکیب نیروهای درون صفحه به صورت مدلسازی میکرو پرداخت. در مدل وی آجرها رفتار کاملاً خطی دارند و رفتار غیرخطی آجر کار ناشی از رفتار درزهای ملات در نظر گرفته شده است. وی از معیار زوال مور- کلمب جهت مدلسازی درزهای ملات استفاده کرد. لورنکو و روتز [۵] در سال ۱۹۹۶ به ارائه المان تماسی جهت مدلسازی دیوارهای آجری به روش مدلسازی میکرو پرداختند. معیار زوال حاکم در بر درزهای ملات در این روش مدلسازی، ترکیبی از معیار زوال مور- کلمب با معیار حداکثر مقاومت کششی به همراه یک کلاهدک فشاری می‌باشد. علاوه بر آن یک المان تماسی داخلی برای آجر جهت مدلسازی شکست کششی و برشی در واحدهای بنایی استفاده شده است. فعالیتهای کاپوس و همکاران [۶] و جیاردانو و همکاران [۷] به مدلسازی ماکرو ساختمانهای آجری در ابعاد بزرگ در نرم‌افزار *Ansys* و *Abaqus* پرداخته‌اند. ماهری و نجفقلی‌پور حقیقی [۸] به مدلسازی میکرو برای دو حد رفتاری دیوارهای برشی آجری پرداختند. حالت اول دیوار آجری با چسبندگی برشی و کششی قابل توجه که شکست برشی هیچگاه به صورت لغزش در آجر و ملات نمی‌باشد که در این حالت از

شکل پذیری مصالح را تعیین می‌کند. مقادیر مدول ارتجاعی، E و مدول برشی، G به صورت آزمایشگاهی به دست می‌آیند. مدول ارتجاعی به عنوان یک ضریب خطی از آزمایش فشار قائم بر روی یک دیوار بنایی به دست می‌آید. چنانچه به مقادیر به دست آمده از آزمایش برای E دسترسی نباشد، می‌توان از رابطه بین مقاومت فشاری دیوار بنایی، f_{wc} و مدول ارتجاعی E که در زیر آمده است، استفاده نمود [۱۰]:

$$E = 1000f_{wc} \quad (۴)$$

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مقدار واقعی E برای دیوارهای مختلف در محدوده زیر تغییر می‌کند:

$$500f_{wc} < E < 3000f_{wc} \quad (۵)$$

به همین ترتیب مقدار مدول برشی را می‌توان از مقاومت کششی دیوار بنایی، f_{wt} با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$G = 3000f_{wt} \quad (۶)$$

و مقدار واقعی آن برای انواع مختلف دیوارها در محدوده زیر تغییر می‌کند:

$$1000f_{wt} < G < 5000f_{wt} \quad (۷)$$

همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که تغییرات مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری در دیوارهای بنایی مختلف زیاد نیست:

$$0.05f_{wc} < f_{wt} < 0.07f_{wc} \quad (۸)$$

۵- مودهای شکست دیوار بنایی

مودهای شکست یک دیوار بنایی مجزا به دو گروه شکست درون صفحه‌ای و شکست برون صفحه‌ای تقسیم می‌شود. در حالت شکست درون صفحه‌ای معمولاً یکی از مودهای زیر رخ می‌دهد.

۵-۱- شکست برشی

در صورتی که دیوار تحت بار قائم زیاد و نسبت ارتفاع به طول دیوار کمتر از واحد باشد، مطابق شکل (۱-الف) مود شکست برشی رخ می‌دهد. همچنین اگر نسبت ارتفاع به طول بزرگتر از واحد (تقریباً برابر ۲) و مقدار بار قائم بسیار سنگین باشد، باز هم امکان شکست برشی وجود دارد.

۵- مساحت بازشوها در دیوار و بزرگ بودن مقدار بازشو با کاهش مقاومت همراه خواهد بود.

۶- مقاومت کششی و برشی مصالح بنایی عمدتاً بستگی به چسبندگی و اصطکاک سطحی در سطح تماس بین مصالح بنایی و ملات دارد و در کل می‌توان گفت مقدار این مقاومت درصد کوچکی از مقاومت فشاری است. هر چه مقدار نسبت سیمان یا آهک ملات بیشتر شود، درصد مقاومت کششی و برشی آن نیز افزایش خواهد یافت [۹].

۳- سختی دیوار برشی

از آنجا که پهنای دیوار آجری کم و بیش مساوی ارتفاع دیوار و حتی گاهی بیشتر است؛ لذا نمی‌توان جابه‌جایی جانبی دیوار را صرفاً ناشی از خمش دانست، بلکه برش می‌تواند سهم زیادی داشته باشد. جابه‌جایی کل دیوار تحت نیروی P برابر است با:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (۱)$$

که در آن $\delta_1 = \frac{ph^3}{12EI}$ جابه‌جایی خمشی و $\delta_2 = \frac{ph}{1.2AG}$ جابه‌جایی برشی است. h ، A و I به ترتیب ارتفاع، مساحت و ممان اینرسی دیوارند:

$$G = \frac{E}{2.6} \quad \text{مدول برشی} \quad I = \frac{tl^3}{12} = \frac{AL^2}{12} \quad (۲)$$

$$\delta = \frac{ph}{EA} \times \left(\frac{h}{L}\right)^2 + 2.16 \frac{ph}{EA}$$

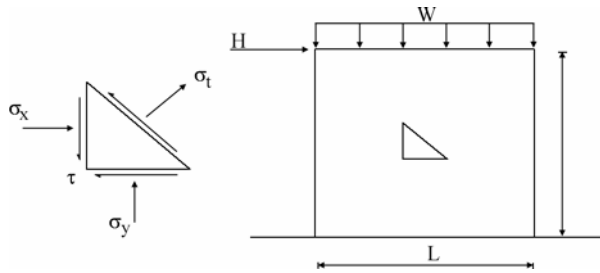
پس سختی دیوار برابر است با [۱]:

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{EA}{h[(h/l)^2 + 2.16]} \quad (۳)$$

۴- مدول ارتجاعی و برشی دیوار مصالح بنایی

مدول الاستیسیته دیوار مصالح بنایی کاملاً به جرم مخصوص و سختی واحد بنایی (در کنار ترکیب با ملات) بستگی دارد. در آجر کاری با وزن مخصوص معادل ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و یا سنگ کاری با وزن مخصوص برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با ملات ماسه-سیمان (نسبت ۶ به ۱) مقدار ۲۰۰۰ مگاپاسکال می‌توان در نظر گرفت [۹]. مقدار مدول ارتجاعی و برشی، قابلیت تغییر

۵-۲- شکست برشی - لغزشی

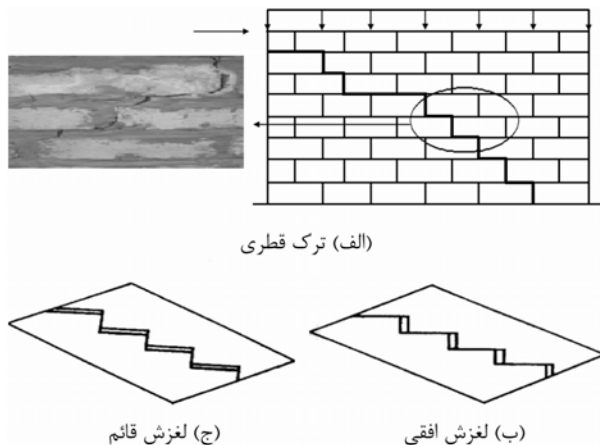


شکل (۲): وضعیت تنشها در المان یک دیوار برشی تحت اثر همزمان نیروهای افقی و قائم [۱].

کششی آجرها برسد شکست آغاز می‌شود. معمولاً آجرها از مقاومت کششی نسبتاً خوبی برخوردارند و این شکست رخ نمی‌دهد، زیرا قبل از آن که σ_t به حد مقاومت آجر نزدیک شود، لغزش برشی روی سطوح افقی یا قائم صورت می‌گیرد. در شرایطی که از آجر سوراخدار و ملات بسیار قوی استفاده شود، مقاومت برشی درزهای افقی و قائم افزایش یافته، شکست روی سطح مایل اتفاق می‌افتد و از میان آجرها می‌گذرد. البته در عمل این حالت کمتر پیش می‌آید.

۸- عوامل تأثیرگذار بر شکست برشی دیوار بنایی

شکست برشی روی یکی از سطوح افقی و قائم اتفاق افتاده، موجب لغزش افقی یا قائم می‌شود. به دلیل تفاوت چشمگیر مقاومت برشی آجرهای فشاری نسبت به ملات، سطوح لغزش همواره از درزهای افقی و قائم می‌گذرد و در هر حال، خواه منشاء شکست لغزش افقی باشد و خواه لغزش قائم، یک ترک قطری در دیوار ایجاد می‌شود، شکل (۳).

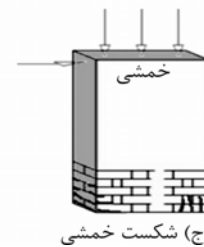
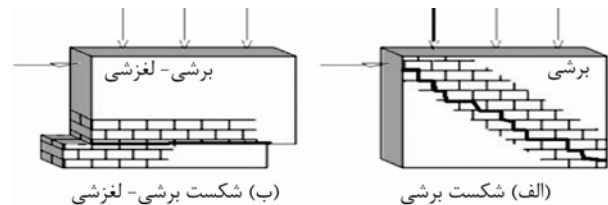


شکل (۳): ترک قطری در دیوار برشی ناشی از لغزش افقی یا قائم [۱].

در صورتی که مقاومت برشی دیوار، اندک و بار جانبی در مقایسه با بار قائم، بزرگ باشد، شکست برشی - لغزشی رخ خواهد داد. در این حالت معمولاً نسبت ارتفاع به طول دیوار $1/5$ به 1 و در حدود 1 به 1 می‌باشد. شکل (۱-ب) این حالت را نشان می‌دهد.

۵-۳- شکست خمشی

در صورتی که مقاومت برشی دیوار به اندازه کافی و نسبت ارتفاع به طول دیوار 2 به 1 باشد، مطابق شکل (۱-ج) شکست خمشی رخ می‌دهد. اگر مقدار بار قائم اندک باشد، در صورت کم بودن مقاومت برشی نیز شکست خمشی رخ می‌دهد [۱۱].



شکل (۱): مودهای شکست درون صفحه‌ای دیوار آجری [۱۱].

۶- بررسی لغزش قائم ناشی از شکست برشی پایه‌های باریک

هنگامی که یک دیوار برشی تحت اثر همزمان نیروی افقی و قائم قرار می‌گیرد، وضعیت تنشها در داخل اجزاء دیوار مطابق شکل (۲)، خواهد بود. ملاحظه می‌شود که سه سطح شکست بالقوه وجود دارد: سطح مایل، سطح افقی و سطح قائم.

۷- شکست کششی

شکست روی سطح مایل از نوع کششی است و از میان خود آجرها می‌گذرد، بنابراین زمانی که σ_t به حد مقاومت

با توجه به رابطه (۱۰)، هر قدر σ_x زیاد شود احتمال وقوع لغزش قائم کم می‌شود و برعکس، با افزایش σ_y احتمال لغزش قائم زیاد شده، لغزش افقی متوقف می‌گردد. برای محیط همگن و در حالت بدون سربار W ، نقطه تعادل لغزشهای افقی و قائم در $\frac{h}{l} = 1$ است، یعنی برای دیوارهای مربع شکل که فقط تحت نیروی افقی باشند پس از صرفنظر کردن از وزن خود دیوار، σ_x و σ_y برابرند. حال اگر در رابطه (۱۰)، چسبندگی τ_0 و ضریب اصطکاک μ در جهتهای افقی و قائم یکسان نباشد نقطه تعادل لغزشهای افقی و قائم غیر از نقطه $\frac{h}{l} = 1$ خواهد بود. این عمدتاً به این دلیل است که کله آجر از دم دیگرش صافتر است و به هنگام چیدن دیوار نیز درزهای افقی تحت فشار قرار می‌گیرند ولی درزهای قائم بدون فشار توسط ملات پر می‌شوند. ضریبهای τ_0 و μ برای درزهای افقی بزرگتر از قائم‌اند و لذا در شرایطی که σ_y و σ_x برابر باشند τ_f برای لغزش افقی بزرگتر از لغزش قائم است. بنابراین برای حالت $\frac{h}{l} = 1$ لغزش قائم غالب خواهد شد. تعیین نقطه تعادل واقعی بین مودهای لغزش افقی و قائم کاری بسیار دشوار و نیازمند تحقیق است. با توجه به نتایج بسیار محدودی که از آزمایشها به دست آمده است، نقطه تعادل این دو مورد در $\frac{h}{l} = 0.8$ پیشنهاد می‌شود. البته باید توجه داشت که نقطه تعادل علاوه بر $\frac{h}{l}$ به نوع آجر و ملات، نحوه چیدن دیوار و مقدار سربار نیز بستگی دارد.

۹- تحلیل عددی به روش المان محدود

مدلسازی عددی دیوار آجری به طور کلی به دو دسته مدلسازی میکرو (*Micro Modeling*) و مدلسازی ماکرو (*Macro Modeling*) تقسیم می‌شود. دیوار آجری یک ماده مرکب از سه جزء اصلی می‌باشد، آجر، ملات و سطح تماس آجر و ملات، در مدلسازی میکرو هر کدام از اجزاء دیوار آجری به طور جداگانه مدلسازی می‌شوند، شکل (۵-الف). هر چند که مدلسازی در این روش از دقت قابل توجهی برخوردار است، اما از نظر محاسباتی و شیوه مدلسازی بسیار پیچیده است و برای مدلسازی در ابعاد بزرگ کاربردی ندارد. در مدلسازی ماکرو، دیوار آجری به صورت یک ماده هموزن و یکدست، با خواص مکانیکی معادل فرض می‌شود، مدلسازی در این روش

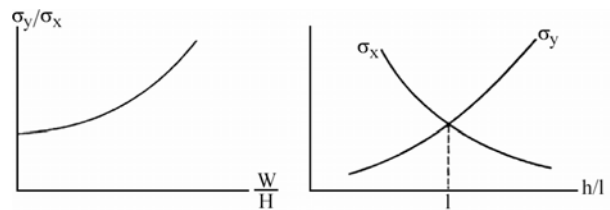
مقاومت برشی مصالح بنایی بستگی به مقاومت فشاری واحد مصالح بنایی (آجر، سنگ، بلوک) دارد. اگر مقاومت ملات بیش از مقاومت اجزاء باشد، در تعیین مقاومت برشی واحد با مصالح بنایی مشخصات ملات، نقش مؤثری خواهد داشت. تنش محوری وارد بر سطح برشی و وضعیت سطح آجر (زبری و تمیزی و ...) نیز نقش مؤثری در مقاومت برشی سطح آجری دارد. گرچه این افزایش تا زمانی که مقاومت فشاری آجر به $2/5$ مگاپاسکال برسد، ادامه خواهد داشت و از آن بیشتر ثابت باقی خواهد ماند. آزمایش فشار- برش انجام شده روی نمونه آجرها نشان می‌دهد که نیروی برشی با کشش، کاهش و با فشار، افزایش پیدا می‌کند. هندری [۱۲] مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری و محاسبه مقاومت جانبی دیوارهای آجری داشته است. این مرور نشان می‌دهد که اکثر محققان برای برآورد مقاومت برشی دیوار از رابطه کولن (کولمب) استفاده نموده‌اند [۱]:

$$H = A\tau_f \text{ آجری دیوار آجری} \quad (9)$$

$$\tau_f = \tau_0 + \mu\sigma_n \text{ تنش برشی شکست} \quad (10)$$

A سطح مقطع دیوار، τ_f تنش چسبندگی ملات، μ ضریب اصطکاک و σ_n تنش قائم در دیوار ناشی از وزن دیوار و سربار است.

مقدار σ_n برای لغزش افقی برابر σ_y و برای لغزش قائم برابر σ_x است. بنابراین σ_x و σ_y از عوامل تقویت جزء در برابر لغزشهای برشی‌اند و مقدار آنها تابعی از ابعاد دیوار و مقدار نیروهای افقی و قائم است. هر قدر نسبت بار قائم به افقی بیشتر باشد $\frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ بیشتر می‌شود. همچنین هر قدر نسبت بعدی دیوار (ارتفاع به طول یا $\frac{h}{l}$) بیشتر شود، $\frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ نیز افزایش می‌یابد. تأثیر این عوامل به طور کیفی در شکل (۴) مشخص شده است.



(ب) تأثیر نیروهای وزن

(الف) تأثیر نسبت بعدی

شکل (۴): تأثیر عوامل مختلف بر σ_x و σ_y [۱].

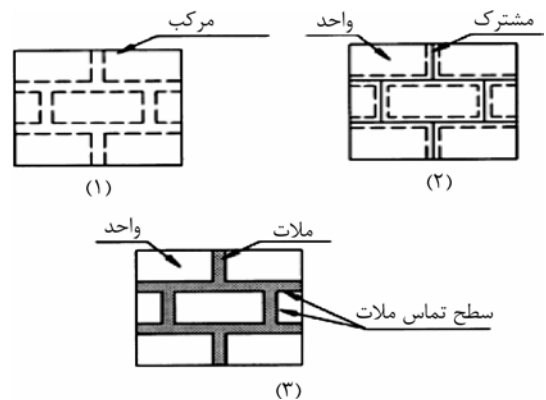
۱۰-۲- دیوار برشی آجری با چسبندگی برشی و کششی قابل توجه سطوح آجر و ملات

یک نمونه دیوار آجری با طول ۱۶۰ سانتیمتر، ارتفاع ۱۴۰ سانتیمتر و ضخامت یک آجر تهیه شده است. آجرها به صورت اشباع با سطح خشک برای ساخت مورد استفاده قرار گرفته، بعد از ساخت نیز نمونه تا ۲۸ روز تحت مراقبت کامل رطوبتی قرار گرفته است. در ضمن ساخت ملات نیز از ماسه ریزدانه با دانه بندی قرار گرفته در محدوده استاندارد *ASTM* استفاده شده است. از این رو چسبندگی سطوح آجر و ملات زیاد بوده و ملات نیز از مقاومت کافی برخوردار است [۸]، که در نتیجه با توجه به چسبندگی و مقاومت مناسب ملات، ترکها از بین آجرها و ملات عبور می کند.

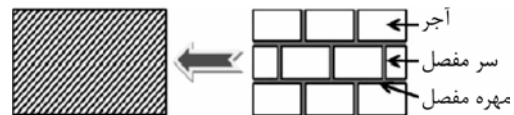
۱۰-۳- سیستم و نحوه انجام آزمایش برش درون صفحه

اجزاء اصلی عبارتند از: قاب عکس العمل، کف مقاوم و جکهای هیدرولیکی افقی و قائم ۳۰ تنی. بارگذاری نیز از طریق دو جک هیدرولیکی افقی و قائم انجام شده است. در حقیقت جک افقی نیروی جانبی درون صفحه را به نمونه اعمال می کند و جک قائم که به طور همزمان کار می کند، دیوار را به رفتار برشی وا می دارد. آزمایش به صورت استاتیکی بارافزون با گامهای بارگذاری حدود ۳ کیلونیوتن انجام گرفته است. همچنین در هر مرحله از بارگذاری تغییرشکلهای نمونه با استفاده از چهار جابه جایی سنج نصب شده بر روی دیوار ثبت شده است، شکل (۶). بارگذاری تا شکست کامل نمونه ادامه یافته و در نهایت از منحنی های نیرو جابه جایی نمونه استخراج شد.

ساده بوده و حجم محاسبات نیز بسیار کمتر از مدلسازی میکرو می باشد. (شکل ۵-ب).



شکل (۵-الف): مدل میکرو دیوار آجری.

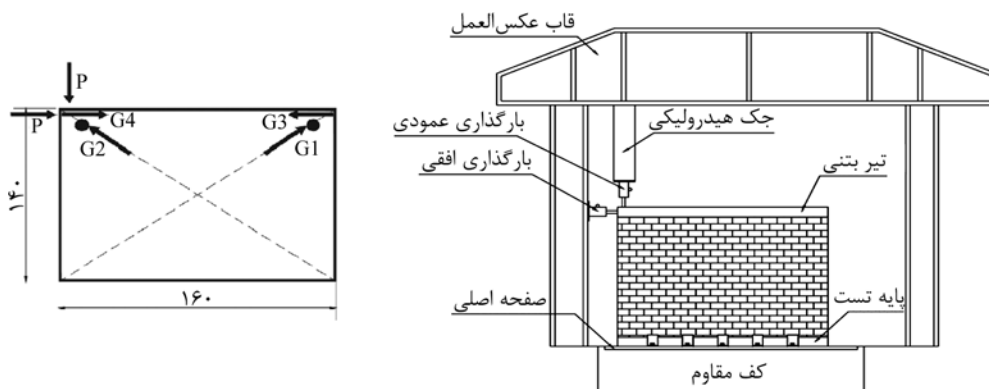


شکل (۵-ب): مدل ماکرو دیوار آجری.

۱۰-۱- ارزیابی صحت مدلسازی

۱۰-۱-۱- آزمایش برش درون صفحه دیوار آجری

جهت بررسی صحت مدلسازی نیاز است که یک نمونه دیوار تحت آزمایش عملی قرار گرفته و همان دیوار به عنوان یک مثال توسط روش ارائه شده مدلسازی گردیده و صحت روش تحلیل و مدلسازی با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، نمونه آزمایشگاهی تست شده با مقیاس ۲ به ۱ که در دانشگاه شیراز توسط دکتر محمودرضا ماهری و محمدمیر نجفقلی پور حقیقی انجام شده بود، مورد بررسی قرار گرفت [۸].



شکل (۶): سیستم و نحوه انجام آزمایش برش درون صفحه و موقعیت جابه جایی سنجهای قطری و جانبی [۸].

جدول (1): پارامترهای مقاومتی و رفتاری استفاده در آزمایش [۸].

مقدار	پارامتر
۱۱	مقاومت فشاری آجر (مگاپاسکال)
۱/۱	مقاومت کششی آجر (مگاپاسکال)
۳۴	مقاومت فشاری ملات (مگاپاسکال)
۴/۴	مقاومت کششی ملات (مگاپاسکال)
۷۵۰۰	مدول الاستیسیته آجر (مگاپاسکال)
۱۲۰۰۰	مدول الاستیسیته ملات (مگاپاسکال)

۱۱- مدلسازی دیوار بنایی غیر مسلح

جهت بررسی در این مقاله از مدلسازی ماکرو استفاده شده است. مدلسازی دیوار بنایی غیر مسلح (*URM*) به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار *ANSYS* مدلسازی شده است. در تمام نمونه‌ها یک تیر بتنی (مطابق با تحقیقات آزمایشگاهی) در بالای دیوار برای توزیع نیرو به کل سطح مقطع دیوار مدل شده است.

برای مدلسازی دیوار بنایی غیرمسلح، از المان سه‌بعدی

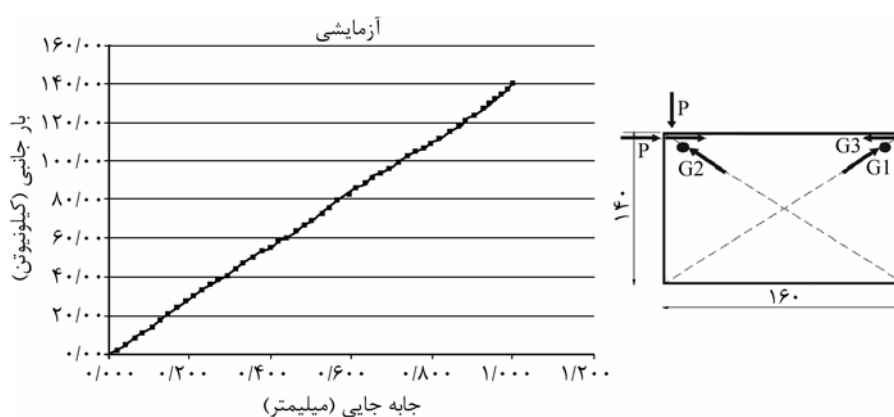
آزمایش تا شکست کامل نهایی نمونه ادامه پیدا می‌کند. در شکل (۷)، نحوه ایجاد شکست برشی که به صورت ترک قطری در نمونه می‌باشد، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود در این حالت ترک قطری به طور کامل از آجر و ملات عبور کرده و هیچ‌گونه لغزشی بین سطح آجر و ملات دیده نشده است. علت این امر چسبندگی زیاد سطوح آجر و ملات و مقاومت کافی ملات بوده است. به این ترتیب نتایج این آزمایش جهت کالیبره کردن و صحت کار مدلسازی در این تحقیق استفاده می‌شود.

همچنین منحنی نیرو- جابه‌جایی مربوط به جابه‌جایی- سنج‌های مختلف استخراج شده‌اند که منحنی‌های مربوط به دو جابه‌جایی سنج قطری و جانبی در شکل (۸)، نشان داده شده است.

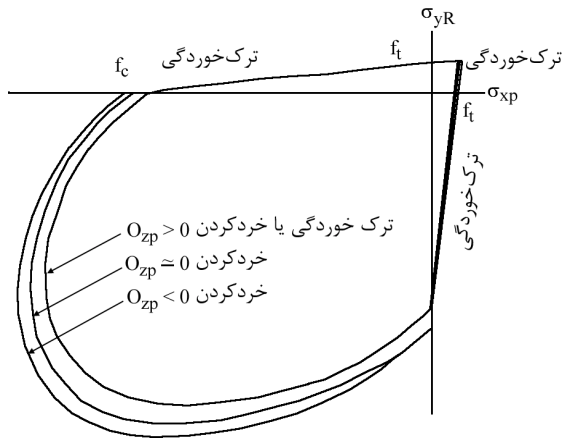
پارامترهای مقاومتی و رفتاری مصالح مورد استفاده در آزمایش که از آزمایش‌های انجام شده برای مصالح طبق استاندارد *ASTM* [۱۳] به دست آمده‌اند، در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۷): شرایط بارگذاری و شکست دیوار برشی آجری [۸].



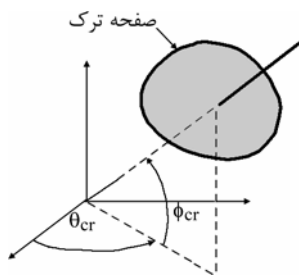
شکل (۸): منحنی‌های مربوط به دو جابه‌جایی سنج قطری و جانبی [۸].



شکل (۱۰): معیار زوال William & Warnke ماده بتن در نرم افزار ANSYS [۱۴]

مجموعه‌ای از ترک لحاظ شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، ترکها به وسیله ترکیبی از یک زاویه θ در صفحه xy و Φ در فضای سه بعدی تعریف گردیده‌اند. مزایای اصلی نوار ترک (ترک پیوسته) در مقابل ترک گسسته عبارتند از:

- ۱- نیاز نیست تا محل و جهت صفحات ترک از قبل پیش‌بینی و یا تعیین گردد.
- ۲- هندسه اصلی مش المان محدود در طی ترک-خوردگی حفظ می‌گردد.

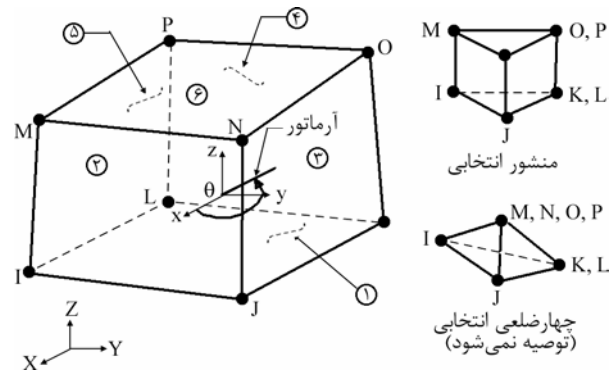


شکل (۱۱): صفحه ترک [۱۴].

۱۱-۲- مدل ترک خوردگی

سختی المان در جهت بارگذاری کششی به سرعت به سمت صفر میل می‌کند؛ در حالی که در جهت موازی ترک، به علت وجود اصطکاک امکان انتقال بار وجود دارد و مقاومت فوق بستگی به زبری نوع مصالح و فاصله درز دارد. بروز ترک ممکن است بر اساس تنشها یا کرنشهای ماکزیمم بیان شود، به نحوی که اگر تنش و کرنش از حدی بیشتر شود ترک در المان بوجود می‌آید. در مدل ترک Solid 65، مدل ترک خوردگی هنوز

ایزوپارامتریک Solid 65 که یک المان شش وجهی هشت گره‌ای با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره، مصالح دارای قابلیت ترک در تنشهای کششی و شکست در تنشهای فشاری در سه جهت متعامد و نیز تغییرشکل‌های پلاستیک و خزش می‌باشد. امکان مسلح نمودن در هر سه امتداد با فولاد یا سایر مواد توسط کاربر امکان‌پذیر است. دیوار یک ماده ایزوتروپیک با مصالح معادل که دارای خواص الاستیک کلی پانل بنایی است، مدل می‌شود، شکل (۹).

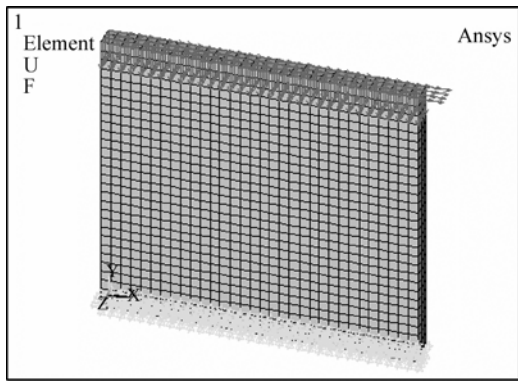


شکل (۹): المان Solid 65 [۱۴].

برای پارامترهای پلاستیک از معیار بتن (Concrete)، استفاده می‌شود. ماده بتن در نرم‌افزار ANSYS که توانایی مدل‌سازی رفتار مواد ترد را دارا می‌باشد، استفاده شده است. عملکرد این نوع ماده در نرم‌افزار ANSYS بر اساس معیار زوال William & Warnke می‌باشد. به این ترتیب که اگر تنش کششی از مقاومت کششی ماده فراتر رود ماده ترک خورده، و اگر ترکیب تنشهای موجود از مقاومت فشاری ماده فراتر رود خوردگی در ماده در سه جهت متعامد و نیز تغییرشکل‌های پلاستیک و خزش رخ می‌دهد. رفتار غیرخطی شامل ترک و شکست و کاهش سختی در اثر ایجاد ترک، خزش و پلاستیسیته می‌باشد، شکل (۱۰).

۱۱-۱- الگوی ترک خوردگی

امکان ترک خوردگی در سه جهت متعامد در هر نقطه گره‌ای وجود دارد. امکان وقوع ترک در یک صفحه وجود داشته و اگر تنشهای بعدی مماس به سطح ترک به حد کافی بزرگ باشند، ترک دومی و یا سومی ایجاد می‌گردد. ترک به‌گونه‌ای مدل می‌شود که به صورت نواری شامل

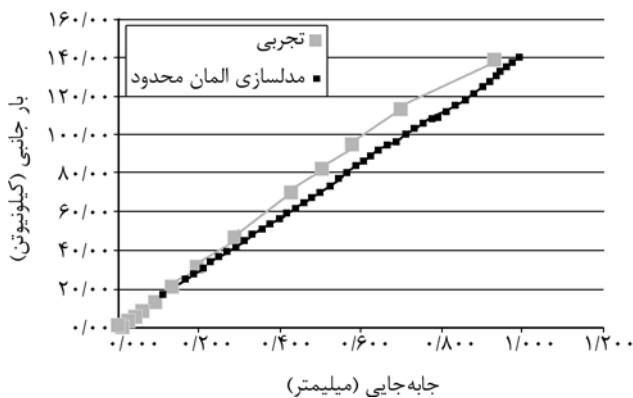


شکل (۱۲): مدل المان محدود دیوار بنایی و نحوه بارگذاری.

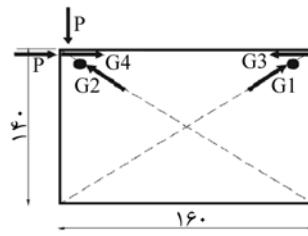
پیوسته فرض می‌شود و به جای در نظر گرفتن ترک خاص، تعدادی نامحدود ترک موازی با آن در نظر گرفته می‌شود. رفتار بتن قبل از ترک ایزوتروپیک بوده و بعد از به وجود آمدن ترک در المان رفتار ارتوتروپیک خواهد داشت. یکی از محورهای اصلی المان در جهت موازی با ترک قرار می‌گیرد و روابط دیفرانسیلی جدید برای تعادل و سازگاری المان حاکم می‌شود. رفتار المان بعد از ایجاد اولین ترک خوردگی نیز مهم بوده و به نحوه بارگذاری و سطوح بارگذاری و سطوح ترک ارتباط دارد به طوری که ممکن است یک ترک بسته شده و قابلیت انتقال بار در جهات فشاری و مماسی ترک فراهم شود. همچنین با تغییر جهت تنشهای اصلی ممکن است فرمهای مختلفی برای ترکهای بعدی در بتن به وجود آید. حضور ترک در نقاط انتگرال گیری المان *Solid 65* به صورت اصلاح رابطه تنش- کرنش با در نظرگیری مصالح در امتداد عمود بر سطح ترک در جهت کششی و کاهش در مقاومت برشی با اعمال ضرایب کاهشدهنده برشی برای مقاطع مرکب مورد بحث، به خصوص در بارگذاری لرزه‌ای زیاد است. با توجه به شکل (۱۲)، اندازه سائز المان ۵ سانتیمتر و تعداد مجموع المانها ۲ هزار و ۸۰ المان و تعداد گره‌ها در مجموع ۴ هزار و ۹۲ گره می‌باشد. جهت بارگذاری ثقلی ناشی از وزن سقف، فشاری در حدود ۰/۷ مگاپاسکال به دیوار وارد می‌شود که جهت اعمال این فشار قائم، نیروی معادل این فشار در مدت زمان بسیار کوتاهی (۰/۰۱ ثانیه) بر روی گره‌های بالای دیوار قرار داده می‌شود. پس از حل شدن توسط نرم‌افزار، در مرحله بعد نیروی جانبی را به صورت افزایشی در بالای دیوار و بر روی ۱۳۲ گره، به صورت تدریجی و مرحله‌ای

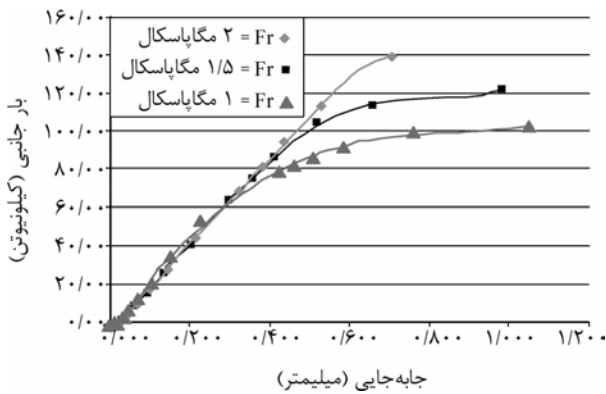
جدول (۲): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی.

تغییر مکان نهایی (میلیمتر)		بار نهایی (کیلو نیوتن)	
نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج عددی	نتایج آزمایشگاهی
۰/۹۴۱	۱/۰۰۰	۱۳۹	۱۴۰



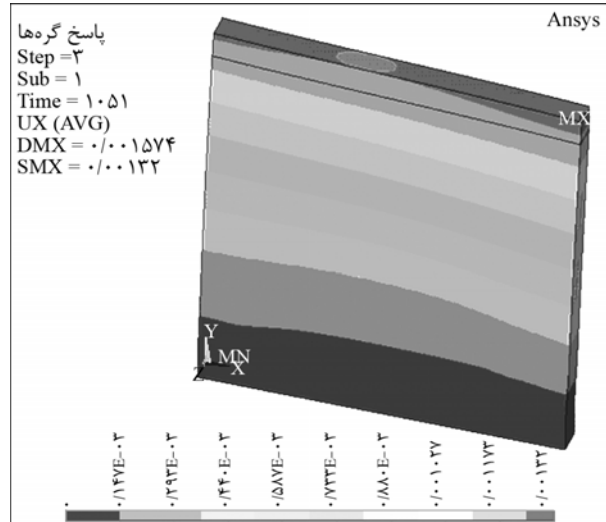
شکل (۱۳): نمودار بار جانبی کل - تغییر مکان گره G3 [۱۵].



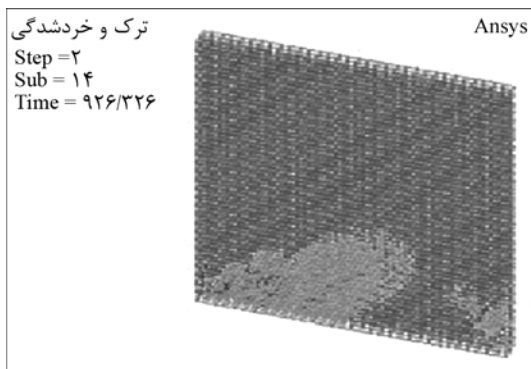


شکل (۱۵): نمودار بار تغییر مکان دیوار بنایی غیر مسلح با مقاومت‌های کششی متفاوت.

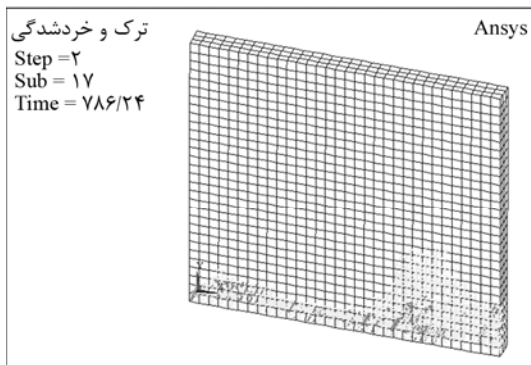
کانتور جابه‌جایی راستای X در شکل (۱۴) نشان می‌دهد، حداکثر جابه‌جایی در بار نهایی ۱۳۹ کیلونیوتن مربوط به بالای دیوار به میزان ۱/۳۲ میلیمتر، حداقل جابه‌جایی به محل تکیه‌گاه به میزان صفر و جابه‌جایی گره مشخص $G3$ برابر ۰/۹۴۱ میلیمتر می‌باشد.



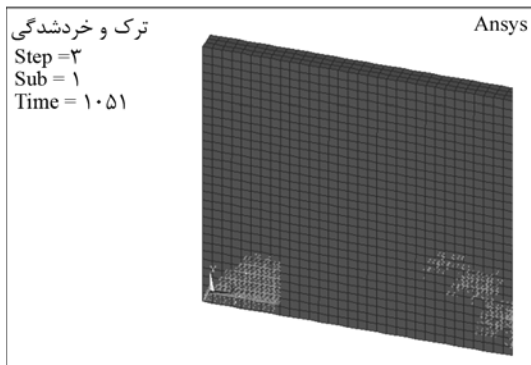
شکل (۱۴): جابه‌جایی در راستای $(UX)X$ در بار نهایی ۱۳۹ کیلونیوتن جک.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۶): ترک خوردگی در بار نهایی با مقاومت کششی الف) ۱/۵ مگاپاسکال، ب) ۱ مگاپاسکال و ج) ۲ مگاپاسکال.

۱۲- بررسی تأثیر مقاومت کششی دیوار بر رفتار دیوار آجری

جهت بررسی تأثیر این پارامتر با سه مقدار مختلف مقاومت نهایی کششی تک محوره f_r ، منحنی بار تغییر مکان و نیز ترک‌های ایجاد شده در سه حالت با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

در این حالت دیوار کالیبره شده با مقاومت کششی ۲ مگاپاسکال را با تغییر مقاومت تک محوره کششی آن مورد بررسی قرار می‌دهیم. هدف بررسی تأثیر مقاومت کششی بر روی دیوار آجری غیر مسلح می‌باشد. به همین منظور به آنالیز غیرخطی دیوار کالیبره شده، با مقاومت‌های کششی ۱ و ۱/۵ مگاپاسکال پرداخته شد. در این آنالیزها تمام خصوصیات دیوار ثابت بوده و تنها به تغییر مقاومت کششی بین مدل‌ها پرداخته شده است. نتایج این آنالیز شامل ترک و منحنی بار تغییر مکان در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آورده شده است.

برابر ۱۳۹ کیلونیوتن است. همچنین تغییرمکان نهایی در مدل آزمایشگاهی برابر ۱ میلیمتر به دست آمده، در حالی که این مقدار در مدل تحلیلی برابر ۰/۹۴۱ میلیمتر می‌باشد و نشان می‌دهد مدل تحلیلی نسبت به مدل آزمایشگاهی سخت‌تر است.

۲- از مقایسه آنالیزها و اطلاعات مربوط به مدل آزمایشگاهی نتیجه گرفته می‌شود که برنامه اجزای محدود می‌تواند برای شبیه‌سازی منحنی بار تغییرمکان شامل بخش الاستیک، شروع ترک خوردگی، ترکهای برشی و خردشدگی دیوار آجری مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، تعیین بار نهایی مشکل می‌باشد؛ زیرا توسط قانون سخت‌شوندگی، معیارهای همگرایی و روش تکرار مورد استفاده تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

۳- افزایش مقاومت کششی دیوار سبب افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوار در حدود ۱۵ درصد و افزایش سختی دیوار بنایی می‌شود. همچنین سبب کاهش تغییرمکان نهایی دیوار و کاهش شکل‌پذیری در حدود ۳۷ درصد می‌شود.

۱۴- مراجع

۱. مقدم، حسن (۱۳۸۷). طرح لرزه‌ای ساختمانهای آجری، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، چاپ پنجم.
2. Gambarotta, L. and Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part I: the mortar joint model and its application, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(4), 423-439.
۳. تسنیمی، عباسعلی (۱۳۸۳). رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات و مسکن، نشریه گ-۴۰۴.
4. Page, A.W. (1978). Finite element model for masonry, *Journal of the Structural Division, ASCE, ST8*, 1267-1285.
5. Lourenco, B.P. and Rots, J.G. (1997). Multi-surface interface model for analysis of masonry

نتایج جدول (۳) تأثیر پارامتر مقاومت کششی بر روی بار نهایی جانبی و شکل‌پذیری دیوار آجری را نشان می‌دهد که افزایش مقاومت کششی دیوار سبب افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوار در حدود ۱۵ درصد و افزایش سختی دیوار بنایی می‌شود. همچنین سبب کاهش تغییرمکان نهایی دیوار و کاهش شکل‌پذیری در حدود ۳۷ درصد می‌شود.

جدول (۳): نتایج بررسی دیوار بنایی غیرمسلح با مقاومت کششی متفاوت.

تغییرمکان نهایی (میلیمتر)	بار نهایی (کیلونیوتن)	مدل عددی
۱/۴	۱۰۴	دیوار آجری با مقاومت کششی ۱ مگاپاسکال
۱/۳۱	۱۲۲	دیوار آجری با مقاومت کششی ۱/۵ مگاپاسکال
۰/۹۴۱	۱۳۹	دیوار آجری با مقاومت کششی ۲ مگاپاسکال

همان‌طور که از نتایج مشخص است، با افزایش مقاومت کششی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری جانبی، سبب کاهش ترک‌خوردگی می‌شود. به عبارتی سبب سخت‌تر شدن دیوار آجری، کاهش ترک‌خوردگی و افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوار می‌گردد.

۱۳- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- ۱- منحنی کار عددی سخت‌تر از منحنی آزمایشگاهی شده است و از لحاظ ظرفیت باربری دارای ۰/۱۷۲٪ خطای ناشی از کالیبراسیون مدل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار ANSYS در مقابل نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش دکتر ماهری در دانشگاه شیراز و ۹۹/۲۸٪ دقت و از لحاظ تغییرمکان نهایی دارای ۵/۹٪ خطا و ۹۴/۱٪ هم دقت برخوردار است که در کل مدل عددی و آزمایشگاهی از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. مقایسه دو منحنی تحلیلی و تجربی حاکی از آن است که بار نهایی مدل آزمایشگاهی برابر ۱۴۰ کیلونیوتن است، در حالی که بار نهایی در مدل تحلیلی

- Construction of Stone and Brick – Masonry Buildings, **3**, United Nations Industrial Development Organization, Vienna.
۱۱. تابش پور، محمدرضا و گل افشانی، علی اکبر (۱۳۸۴).
مودهای شکست سازه‌های آجری، دومین کنگره ملی
مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت.
12. Hendry, W.H. (1981). *Structural brickwork*, MacMillan Press.
13. ASTM Standards in Building Codes (1999). E519-81, 36th Edition.
14. ANSYS Inc. (2005). ANSYS User Manual, Revision 9, SAS IP, Houston.
15. Kheyroddin, A., Saghafi, M.H., and Saghafi, S., (2010). Strengthening of historical masonry building with fiber reinforced polymers (FRP), *Advanced Materials Research*, **133-134**, 903-910, Trans. Tech. Publication, Switzerland, Index by ISI.
- structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 660-668.
6. Kappos, A.J., Penelis, G.G., and Dracopoulos, C.G. (2002). Evaluation simplified models for lateral load analysis of unreinforced masonry buildings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 890-897.
7. Giordano, A., Mele, E., and Luca, A. (2002). Modeling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study, *Engineering Structures*, 1057-1069.
۸. ماهری، محمودرضا و نجفقلی پور حقیقی، محمدامیر (۱۳۸۷). روشی برای مدلسازی دیوار آجری با استفاده از نرم افزار ANSYS، چهارمین کنگره مهندسی عمران دانشگاه تهران.
۹. وطنی اسکویی، اصغر (۱۳۸۶). زلزله و ساختمانهای متعارف، گزارش، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی.
10. Building Construction under Seismic Conditions in the Balkan Region (1984). Design and