

تعیین ویژگی‌های مقاومتی و رفتاری و مدلسازی دیوارهای باربر غیر مسلح بنایی به روش المان مجزا با استفاده از نرم‌افزار 3DEC

مژده دهشیری زاده^۱، حسینعلی رحیمی بندرآبادی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

(دریافت: آبان ۱۳۹۵، پذیرش: بهمن ۱۳۹۵)

چکیده

رفتار مکانیکی سازه‌های مصالح بنایی و به طور خاص سازه‌های آجری، رفتاری ناپیوستار و به شدت تحت تاثیر سطح مشترک بین آجر و ملات است. تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه رفتار برشی سطح مشترک آجر - ملات، بر اساس آزمایش برش مستقیم تعدادی نمونه، جهت مدلسازی رفتار دیوارهای باربر غیر مسلح بنایی در مقابل بارهای برشی و نرمال وارده با استفاده از روش عددی المان مجزا پرداخته است. روش المان مجزا به دلیل قابلیت‌های خاص خود در مدلسازی سازه‌های مصالح بنایی، که تغییر شکل‌ها و مودهای گسیختگی آن به شدت به نقش درزه‌های ملات بستگی دارد، جزو یکی از روش‌های مناسب جهت مدلسازی محیط‌های ناپیوستار به شمار می‌رود. در مدلسازی به روش المان مجزا برای بلوک‌های آجری از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر - کلمب و برای ناپیوستگی‌ها از مدل لغزش کلمب استفاده شده است. متوسط پارامتر سختی برشی و نرمال برای سطح مشترک بین آجر و ملات به ترتیب ۴۲/۸۲ و ۱۲۲/۴۶ مگاپاسکال بر میلی‌متر، چسبندگی سطح مذکور ۰/۷ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک آن ۳۷/۷ درجه به دست آمده است. رابطه بین تنش برشی و جابجایی برشی سطوح مشترک نمونه‌های آجر - ملات، در حالت عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردیده و حداکثر بار اعمالی مجاز بر دیوار باربر غیر مسلح بنایی به روش المان مجزا محاسبه شده است.

کلمات کلیدی

روش المان مجزا، سختی برشی و نرمال، آزمایش برش مستقیم، ملات ماسه - سیمان، آجر فشاری

*عهده‌دار مکاتبات: h_rahimi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه و سابقه موضوع تحقیق

سازه‌های مصالح بنایی در ایران از گذشته تا امروز بخش وسیعی از سازه‌های ما را شامل می‌شوند. بناهای بیشماری در گذشته اعم از آتشکده، مسجد، ساختمان‌های مسکونی و ... از این مصالح ساخته شده‌اند و امروزه نیز علی‌رغم استفاده فراوان از مصالح ساختمانی جدید نظیر بتن مسلح و فولاد، هنوز در برخی از نقاط، مصالح بنایی به عنوان عمده‌ترین مصالح برای ساختمان‌ها رواج دارند. ویژگی بارز سازه‌های مصالح بنایی طبیعت مرکب آنها متشکل از واحدهای بنایی مجزایی است که به وسیله بندهای ملات از یکدیگر جدا شده‌اند.

به طور کلی دو روش اساسی برای مدلسازی عددی سازه‌های مصالح بنایی موجود است؛ ماکرو مدلینگ^۱ و میکرو مدلینگ^۲. مدلسازی در مقیاس ماکرو برای آنالیز سازه‌های بزرگ مصالح بنایی پیشنهاد می‌شود. در این حالت مواد تشکیل دهنده مصالح بنایی به عنوان یک ماده همگن تک فازه که خصوصیات مکانیکی آن میانگین خصوصیات مکانیکی مواد تشکیل دهنده آن است، در نظر گرفته می‌شود. در طول سه دهه گذشته، مدلسازی سازه‌های مصالح بنایی در مقیاس ماکرو با شبیه‌سازی ماده همگن به صورت اورتوتروپیک^۳، با استفاده از روش المان محدود صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۸، لورنسو مقاله‌ای را تحت عنوان "مدل پیوسته برای مصالح بنایی" ارائه داد. در آن مقاله یک معیار تسلیم جدید که مقاومت‌های مختلف را در هر جهت محور ماده در نظر داشته باشد، معرفی شده است. این معیار شکست شامل شکست کششی و فشاری است. در این تحقیق توانایی مدل در بیان رفتار غیر الاستیک مواد ارتوتروپیک نشان داده شده است [۱].

در ارتباط با مدلسازی در مقیاس میکرو، خصوصیات مصالح تشکیل دهنده مصالح بنایی شامل آجر و ملات به طور جداگانه و مجزا وارد مدل تحلیلی شده و این باعث می‌شود که برای مدل کردن به اطلاعات بیشتری نیاز باشد. نکته دیگر این است که مدلسازی در مقیاس میکرو خود به دو روش امکان‌پذیر است.

۱- میکرو مدلینگ جزئی که در آن آجر (خشت یا سنگ و غیره) و ملات به صورت جداگانه و به شکل

المان‌های پیوسته مدل می‌شوند و سطح مشترک آنها به صورت المان‌های ناپیوسته مدل می‌شود.

۲- میکرو مدلینگ ساده که در این روش آجرها تا مرکز ملات (افقی و قائم) ادامه داده می‌شوند و به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و رفتار ملات و سطح مشترک آن با آجر در المان‌های ناپیوسته متمرکز می‌شود. در سال ۱۹۹۴، لطفی و شینگ مدل سطح مشترک را برای شکست سازه‌های مصالح بنایی ارائه دادند. در تحقیق ارائه شده توسط ایشان یک مدل بنیادی برای سطوح مشترک متسع شونده پیشنهاد شد. این مدل می‌تواند شروع و گسترش شکست را تحت ترکیب تنش‌های نرمال و برشی در هر دو منطقه کششی- برشی و فشاری- برشی شبیه‌سازی کند [۲]. در سال ۱۹۹۷، لورنسو و راتز مدل سطح مشترک چند سطحی^۴ را برای آنالیز سازه‌های مصالح بنایی ارائه دادند. در مدل ارائه شده، المان‌های تماسی به عنوان سطوحی با پتانسیل شکست در نظر گرفته شده (کلیه خصوصیات غیر الاستیک به المان‌های تماسی نسبت داده شده است) که علاوه بر تمرکز در درزه‌های ملات، در بلوک‌ها نیز به عنوان سطوحی برای ترک‌های محتمل قرار داده شده‌اند. مدل سطح مشترک چند سطحی شامل شکست کششی به عنوان مد اول گسیختگی، پوش گسیختگی کلمب به عنوان مد دوم و کپ فشاری برای شکست در فشار به عنوان مد سوم است که انواع مکانیزم‌های شکست را لحاظ می‌نماید. مدل ارائه شده برای آنالیز یک دیوار برشی مصالح بنایی مورد استفاده قرار گرفته و قادر است بار شکست مشاهده شده در آزمایش‌ها را پیش‌بینی کند و همچنین رفتار را به درستی نشان دهد [۳]. مدل پیشنهادی توسط لورنسو در سال ۲۰۰۲ نیز برای مطالعه رفتار دیوارهای برشی مصالح بنایی بدون ملات مورد استفاده قرار گرفت [۴].

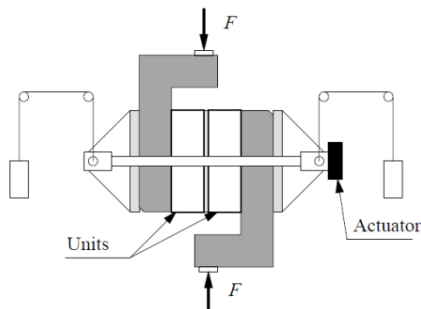
تاکنون، تحقیقات زیادی در رابطه با رفتار سازه‌های مصالح بنایی با استفاده از روش المان مجزا^۵ به عنوان یکی از رویکردهای میکرو مدلینگ ساده شده انجام گرفته است [۵-۸]. این مطالعات نشان می‌دهند که مدلسازی عددی با استفاده از روش‌های مرسوم مکانیک محیط‌های پیوسته مانند روش المان محدود نمی‌توانند به درستی رفتار چنین سازه‌هایی را مورد بررسی و تحلیل قرار دهند. روش‌هایی که اساس آنها مکانیک محیط‌های پیوسته است، نتایج رضایت بخشی ارائه می‌دهند؛ اما عموماً نمی‌توانند

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

که در آن C مقاومت برشی به ازای تنش قائم صفر (مرسوم به چسبندگی برشی) و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است.

یک عامل مهم در تعیین پارامترهای کلمب، یکنواختی توزیع تنش بر روی درزه است. اما با در نظر گرفتن معادلات تعادل مشخص می‌شود که یکنواختی تنش امکان‌پذیر نیست. به علت خروج از مرکزیت بار نسبت به ملات، همواره لنگر بر روی درزه وجود دارد و توزیع تنش محوری غیر یکنواخت است. در عین حال، مقدار تنش محوری باید همواره در طول آزمایش ثابت باشد. این موارد به سختی در آزمایش قابل تحقق است. در سال ۱۹۸۸، اتکینسون در آزمایش‌های خود بر روی برش ملات مقدار ضریب اصطکاک اولیه را بین ۰/۶۴ تا ۰/۶۹۵ و مقدار ضریب اصطکاک پسماند را بین ۰/۶۷۸ تا ۰/۶۹۳ به دست آورد. او همچنین مقدار چسبندگی اولیه را بین ۰/۱۲۷ تا ۰/۲۱۳ و مقدار چسبندگی پسماند را بین ۰/۰۲۳ تا ۰/۰۳۸ تخمین زد [۱۴].

دو نوع از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین مشخصات کلمب، آزمایش برش مستقیم (دوتایی) و آزمایش سه تایی است [۱۵]. در سال ۱۹۹۷، وندر پلویم برای از بین بردن لنگر خمشی بر روی ملات از آزمایش اصلاح شده دوتایی مطابق شکل ۲ استفاده نمود [۱۶].



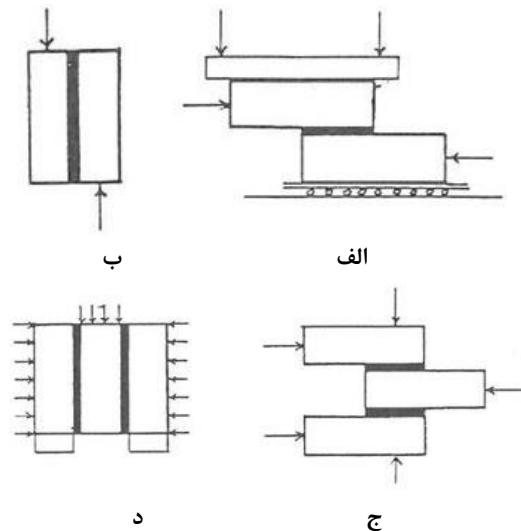
شکل ۲: روش اصلاح شده آزمایش دو تایی [۱۶]

در آزمایش‌های وندر پلویم مقدار ضریب اصطکاک اولیه (قبل از شکست) بین ۰/۷ تا ۱/۲ به دست آمد و مقدار ضریب اصطکاک پسماند (پس از شکست برشی) حدود ۰/۷ تعیین شد. در این تحقیق مقدار چسبندگی بین ۰/۱ مگاپاسکال تا ۱/۸ مگاپاسکال تخمین زده شد [۱۶].

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و مقایسه رفتار برشی سطح مشترک آجر- ملات با استفاده از روش تجربی و روش عددی المان مجزا جهت مدلسازی رفتار داخل صفحه

برای تحلیل‌های عملی سازه‌های بنایی به کار روند. روش‌های مذکور نمی‌توانند مکانیزم قطعات جداشده و رفتار دینامیکی آنها و تاثیرشان بر سایر قسمت‌ها را پیش‌بینی کنند. اگرچه برخی از برنامه‌های المان محدود و تفاضل محدود که شامل المان حد فاصل هستند، این امکان را به کاربر می‌دهند که ناپیوستگی‌های محدودی در مدل در نظر بگیرد؛ اما بیشتر آنها با مواجه شدن با تعداد زیادی ناپیوستگی و یا زمانی که جابجایی‌های بزرگی در امتداد ناپیوستگی‌ها اتفاق می‌افتد، دچار اشکال می‌گردند [۹].

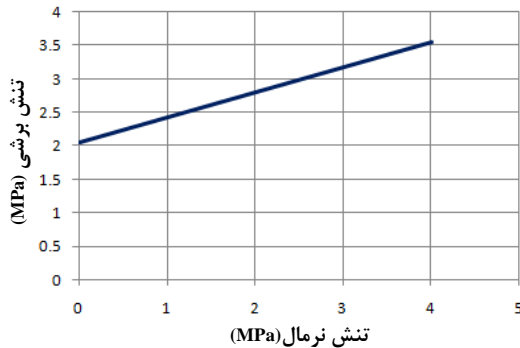
مدلسازی صحیح رفتار سازه‌های مصالح بنایی نیازمند اطلاعات کافی از خواص المان‌های تشکیل دهنده آن است. با توجه به نوع مدلسازی حاضر (مدلسازی به روش المان مجزا) آگاهی از پارامترهای مقاومتی و رفتاری سطوح مشترک بین آجر و ملات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقاومت برشی آجرکاری تاکنون با استفاده از روش‌های مختلفی به دست آمده است. اغلب برنامه‌های آزمایشگاهی جهت اعمال بار برشی را در داخل صفحه آجرکاری و همچنین موازی با درزه‌های افقی در نظر گرفته‌اند. در این برنامه‌ها جهت اعمال بارگذاری محوری فشاری به صورت عمود بر درزه‌های افقی است. شکل ۱ مثال‌هایی از آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد [۱۰-۱۳].



شکل ۱: مثل‌هایی از آزمایشات انجام شده برای تعیین مقاومت برشی آجرکاری (الف) هافمن [۱۰]، (ب) هوپزر [۱۱]، (ج) مان و مولر [۱۲] و (د) اسمیت و کارتر [۱۳]

نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که مقاومت برشی با افزایش تنش محوری فشاری به طور تقریباً خطی ارتباط دارد. به همین دلیل مقاومت برشی درزه‌ها معمولاً با معیار موهر- کلمب به صورت رابطه (۱) سنجیده می‌شود.

مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ماسه-سیمان مطابق با استاندارد ASTM C109 انجام گرفته است [۱۷]. متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ۵/۶ مگاپاسکال به دست آمد.



شکل ۴: نمودار تنش برشی - تنش نرمال نمونه‌های آجری

۲-۳- مقاومت برشی آجر - ملات

آزمایش برش معمولاً به دو روش CNL^v و CNS^v انجام می‌گیرد که در این تحقیق، روش CNL (بار نرمال ثابت) مورد توجه بوده است. شکل ۵ دستگاه آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۵: دستگاه آزمایش برش مستقیم

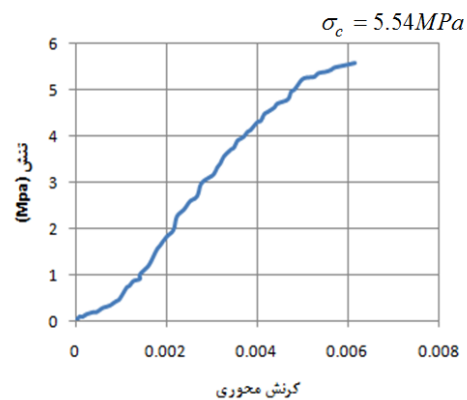
برای انجام این آزمایش در ابتدا نمونه‌های آجر فشاری به سطح مقطع ۷×۵ سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۵ سانتی‌متر بریده شدند و پس از آن ملات ماسه-سیمان مطابق با آنچه در بخش ۲-۲ بیان گردید، آماده شد. در مجموع ۹ نمونه آجر-ملات مطابق با شکل (۶-الف) تهیه شد. پس از قالب‌گیری نمونه‌ها به منظور آماده‌سازی آنها برای قرار گرفتن در جعبه برش دستگاه مذکور، نمونه‌های مورد نظر بارگذاری شدند. بارگذاری در دستگاه برش مستقیم به گونه‌ای است که در ابتدا بار محوری فشاری به صورت یکنواخت و پیوسته عمود بر درزه اعمال می‌شود و در نهایت پس از اعمال بارگذاری محوری، بار افقی یکنواخت

دیوارهای بابر غیر مسلح بنایی و بررسی رفتار آنها در مقابل بارهای برشی و نرمال وارده و محاسبه بار مجاز است. به منظور مدلسازی دقیق رفتار سطح مشترک آجر-ملات، ویژگی‌های مکانیکی آجر و ملات نیز به طور مجزا در آزمایشگاه به دست آمده است.

۲- تعیین ویژگی‌های مکانیکی مصالح

۲-۱- مقاومت تک محوره و سه محوره آجر

آجر مصرفی از نوع آجر فشاری (گری) است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری معمولاً مهم‌ترین ویژگی مصالح نیمه ترد مانند بتن، ملات و مصالح بنایی است؛ لذا برای شناخت نسبی از مشخصات آجر مصرفی، مقاومت فشاری تک‌محوره سه نمونه آجر اندازه‌گیری شد. نمودار شکل ۳ متوسط نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی سه نمونه آجر را نشان می‌دهد.



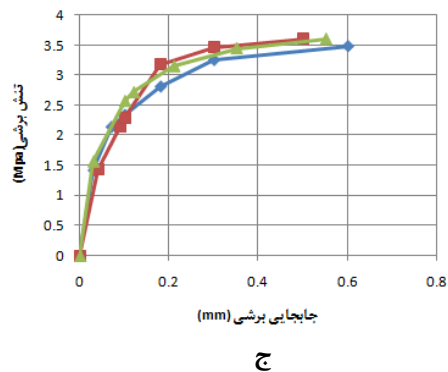
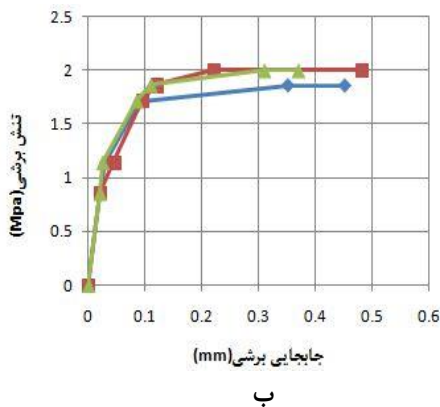
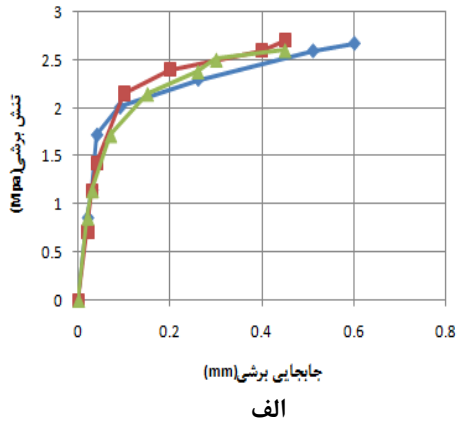
شکل ۳: نمودار تنش - کرنش نمونه‌های آجری

با توجه به اینکه شیب منحنی تنش - کرنش آجر بیانگر مدول الاستیسیته آن است؛ متوسط مدول الاستیسیته برای نمونه‌های آجری ۱۰۵۰ مگاپاسکال تخمین زده شد. نهایتاً با انجام آزمایش مقاومت سه‌محوره، پارامترهای مقاومت برشی آجر تخمین زده شد. مطابق با نمودار شکل ۴ و همچنین رابطه (۲)، چسبندگی آجر ۲/۰۶ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک آن ۲۰/۵۲ درجه به دست آمد.

$$\tau = 2.06 + 0.374\sigma_n \quad (2)$$

۲-۲- مقاومت فشاری ملات ماسه-سیمان

ملات مصرفی، ملات ماسه-سیمان با نسبت حجمی ۱:۵ است. به منظور ساخت ملات مصرفی از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه اردستان استفاده شده است. تعیین



شکل ۷: نمودارهای تنش برشی- جالجایی برشی در حالات مختلف بارگذاری (الف) تنش فشاری ۱/۴۲ مگاپاسکال و (ب) تنش فشاری ۲/۸۴ مگاپاسکال و (ج) تنش فشاری ۴/۲۶ مگاپاسکال

جدول ۱ با در نظر گرفتن شیب اولیه نمودارهای شکل ۷ به عنوان سختی برشی و همچنین رابطه (۳)، متوسط سختی برشی و نرمال درزه را برای هر سه نمونه در سه تنش محوری اعمال شده نشان می‌دهد.

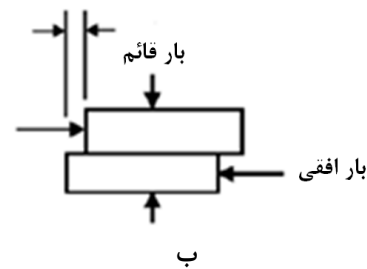
به منظور دستیابی به پارامترهای پلاستیک (چسبندگی C و زاویه اصطکاک ϕ) درزه و با توجه به داده‌های موجود نمودار تنش برشی- تنش قائم نمونه‌های آجر- ملات رسم گردید (شکل ۸).

افزایش شونده به صورت کنترل شده اعمال می‌گردد (شکل ۶-ب). در آزمایش‌های انجام شده، هم‌زمان با افزایش بار افقی، میزان جابجایی افقی (برشی) نیز ثبت گردید. آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ISRM انجام شده است [۱۸].



الف

جالجایی افقی



ب

شکل ۶: (الف) نمونه های آجر - ملات و (ب) نحوه اعمال بار به نمونه های آجر - ملات

۴-۲- نتایج آزمایش برش مستقیم آجر- ملات

شکل ۷ نمودارهای تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، نیروهای قائم وارد شده تنش‌های نرمالی به ترتیب معادل با ۱/۴۲، ۲/۸۴، ۴/۲۶ مگاپاسکال اعمال می‌کنند.

با توجه به تعاریف موجود شیب نمودار تنش برشی- جابجایی برشی، بیانگر ضریب برشی درزه (سختی برشی درزه) k_s است. نیک‌عادت و یاراحمدی باقی رابطه (۳) را برای تخمین سختی نرمال درزه k_n با استفاده از سختی برشی k_s آن ارائه کردند [۱۹].

$$k_n = 2.86 k_s \quad (۳)$$

در روش المان مجزا محیط درزه‌دار به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا ارائه می‌شود، به عبارتی ناپیوستگی‌ها به صورت سطوح مشترکی بین بلوک‌های در تماس با هم دیده می‌شوند و به جای یک المان خاص، ناپیوستگی‌ها به عنوان شرایط مرزی بین بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بلوک‌های انعطاف‌پذیر خود به المان‌های چهاروجهی تفاضل محدود تقسیم می‌شوند که بر اساس روابط خطی یا غیر خطی تنش- کرنش رفتار می‌کنند. برای مدلسازی اندرکنش بین بلوک‌ها، فرض می‌شود که بلوک‌ها از طریق فنرهای ارتجاعی نرمال و برشی (عمود و مماس بر سطح درزه) به یکدیگر متصل شده‌اند و حرکت نسبی بین درزه‌ها در دو جهت نرمال و برشی از روابط نیرو- تغییر مکان خاصی (برحسب مدل رفتاری) تبعیت می‌کند. نرم‌افزار 3DEC این امکان را به کاربر می‌دهد تا از مدل‌های رفتاری از پیش تعیین شده‌ای برای بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها استفاده کند [۹].

۳-۱- مدلسازی عددی نمونه‌های آزمایشگاهی

در این بخش نمونه‌های آزمایشگاهی آجر- ملات با استفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار 3DEC مدلسازی شدند (شکل ۱۰- الف).

برای بلوک‌های آجر از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر- کلمب استفاده می‌گردد. پوش گسیختگی مدل موهر- کلمب در 3DEC مطابق با رابطه‌های (۵) و (۶)، شامل سطح شکست خطی مطابق با معیار شکست برشی موهر- کلمب است [۲۱].

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_2 N_\theta + 2C\sqrt{N_\theta} \quad (5)$$

$$f^t = \sigma_2 - \sigma^t \quad (6)$$

که در آن θ زاویه اصطکاک داخلی، C چسبندگی و σ^t مقاومت کششی ماده است. N_θ نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$N_\theta = \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (7)$$

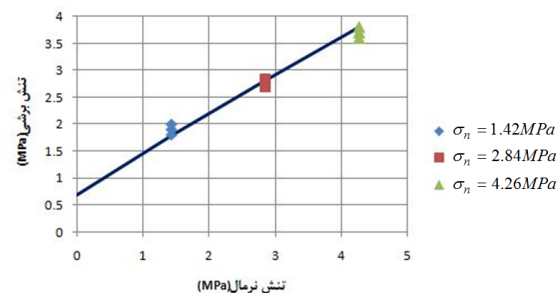
مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی‌ها، مدل لغزش کلمب است. در این مدل شکست کششی و برشی هر دو مورد توجه قرار گرفته و همچنین اتساع^۱ درزه نیز لحاظ شده است. مطابق با آنچه که پیش از این بیان شد، برای مدلسازی رفتار ناپیوستگی‌ها (درزه‌ها) در سازه‌های بنایی متشکل از واحدهای بنایی و بندهای ملات، در نظر گرفتن دو نوع سختی (سختی برشی k_s و سختی

جدول ۱: پارامترهای الاستیک درزه

k_n (MPa/mm)	k_s (MPa/mm)	σ_n (MPa)
۱۲۲/۵۵	۴۲/۸۵	۱/۴۲
۱۱۵/۷۱	۴۰/۴۶	۲/۸۴
۱۲۹/۱۳	۴۵/۱۵	۴/۲۸
۱۲۲/۴۶	۴۲/۸۲	میانگین

منظور از تنش برشی، تنش برشی حداکثر نمونه‌ها و یا به عبارت دیگر تنش برشی نمونه‌ها در لحظه حرکت است. مطابق با نمودار نمودار شکل ۸ و همچنین رابطه (۴)، چسبندگی سطح مذکور ۰/۷ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک آن ۳۷/۷ درجه به دست آمد.

$$\tau = 0.7 + 0.774\sigma_n \quad (4)$$



شکل ۸: نمودار تنش برشی- تنش نرمال

۳-۲ مدلسازی عددی به روش المان مجزا

همانطور که پیش از این نیز توضیح داده شد، روش المان مجزا روشی مناسب برای مسائلی است که در آن بخش قابل ملاحظه‌ای از تغییر شکل‌ها ناشی از حرکت نسبی بلوک‌ها است. این روش در سال‌های اخیر، در کنار روش اجزا محدود برای تحلیل سازه‌های مصالح بنایی به کار گرفته شده و از خود دقت خوبی نشان داده است.

فرمول‌بندی و توسعه روش المان مجزا که نخستین بار توسط کاندال ارائه گردید [۲۰]. در ابتدا به منظور مدلسازی دوبعدی یک توده‌سنگ درزه‌دار تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی ایجاد شد. در سال ۱۹۸۳، توسعه مدل سه‌بعدی با ترکیب روابط و فرمول‌ها در قالب یک برنامه کامپیوتری با عنوان 3DEC صورت‌بندی شد که شامل هر دو نوع بلوک صلب و انعطاف‌پذیر که توسط درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها مجزا گشته‌اند، است.

$$F_{mac}^s = CA_c + F_n \tan \phi \quad (9)$$

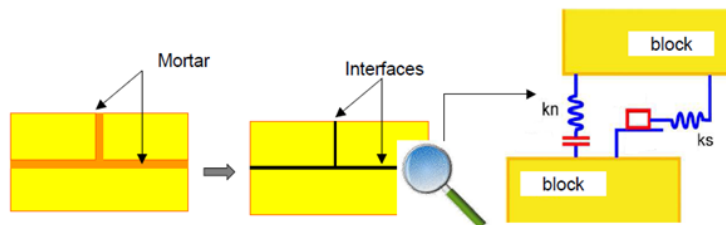
که در آن C مقاومت برشی و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، ویژگی‌های الاستیک و پلاستیک مصالح استفاده شده در مدل‌سازی در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

نرمال (k_n) الزامی است (شکل ۹). لذا رفتار درزه در محدوده الاستیک توسط این دو نوع سختی کنترل می‌گردد. برای درزه بکر نیروی کششی نرمال به مقدار به دست آمده از رابطه (۸) محدود می‌گردد [۲۱].

$$T_{max} = -TA_c \quad (8)$$

که در آن T مقاومت کششی درزه است. بیشینه نیروی برشی مجاز از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.



شکل ۹: مدل‌سازی اندرکنش بین بلوکی در روش المان مجزا

جدول ۲: ویژگی‌های آجر و درزه

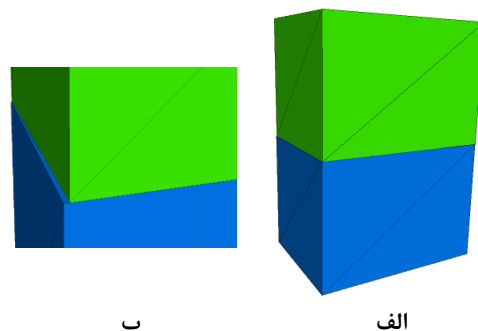
آجر						درزه			
ν	E (MPa)	f_t (MPa)	C (MPa)	$\tan \phi$	$\tan \phi$	f_t (MPa)	C (MPa)	$\tan \phi$	$\tan \phi$
۰/۱۵	۱۰۵۰	۰/۵۴	۲/۰۶	۰/۳۷۴	۰	۰/۳۳۸	۰/۷	۰/۷۷۴	۰

۳-۱-۱- مدل‌سازی نتایج عددی و آزمایشگاهی

نمودارهای شکل ۱۱ نتایج مدل‌سازی‌های عددی را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌دهند. مقدار خطای $NRMSE^1$ برای مدل‌های عددی در مقایسه با میانگین نتایج آزمایشگاهی در تنش‌های فشاری ۱/۴۲، ۲/۸۴ و ۴/۲۶ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۰۹۷، ۰/۰۹۸۷ و ۰/۱۰۲ است.

مطابق با نمودارهای شکل ۱۱ پیک نمودار در حالت عددی و آزمایشگاهی تقریباً یکسان بوده و اختلاف مشاهده شده در نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی در ارتباط با جابجایی، متناظر با نقطه پیک نمودار و روند تسلیم درزه است. در حالت واقعی با افزایش تنش برشی دندانه‌های زبری سطح مشترک بین آجر و ملات به تدریج شکسته می‌شوند و جابجایی‌ها در یک فرآیند نرم شونده افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که تاثیر زبری سطح مشترک بین آجر و ملات در مدل عددی موهر-کلمب در محیط نرم‌افزاری 3DEC لحاظ نشده است. لذا همان طور که انتظار می‌رود جابجایی‌ها در یک نقطه تسلیم واضح رخ می‌دهد. جدول ۳ مقدار تنش برشی بیشینه را در حالت

در مدل‌سازی حاضر، پس از اعمال بار محوری فشاری در مرز بالایی نمونه و عمود بر درزه افقی، به منظور شبیه‌سازی شرایط برش مستقیم برای نمونه‌ها در محیط نرم‌افزاری 3DEC، اعمال بارگذاری جانبی به صورت جابجایی در واحد زمان و یا سرعت انجام گرفت [۲۱]. جابجایی مرز بالایی در طول آزمایش به نحوی کنترل می‌شود که تنها با قادر بودن به حرکت در راستای افق، شرایط برش مستقیم را برای نمونه فراهم شود. شکل ۱۰-ب جابجایی نمونه آجر-ملات را پس از بارگذاری برشی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: (الف) مدل‌سازی آجر-ملات در نرم‌افزار 3DEC و (ب) جابجایی نمونه آجر روی ملات

۳-۲- مدلسازی عددی رفتار داخل صفحه دیوارهای باربر غیر مسلح بنایی

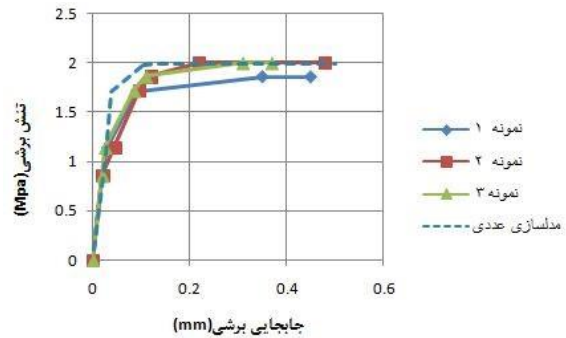
در اغلب سازه‌های آجری دیوارها به دلیل ناکارآمدی در شکل‌پذیری و ضعف مقاومت برشی یا خمشی، آسیب پذیرترین اعضا هستند. در این بخش، به بررسی رفتار دیوار باربر غیر مسلح بنایی در برابر بارهای برشی و نرمال وارده با استفاده از خواص مکانیکی به دست آمده برای آجر و ملات (جدول‌های ۱ و ۲) پرداخته خواهد شد.

مطابق با شکل ۱۲، نمونه‌های مورد بررسی دیوارهای بنایی به ابعاد $1000 \times 1000 \times 100$ mm³ متشکل از ۲۰ ردیف آجر است. ابعاد بلوک‌ها $50 \times 100 \times 200$ mm³ و ضخامت ملات ۱۰ میلی‌متر فرض شده است. به منظور ایجاد شرایط مناسب تکیه‌گاهی و انتقال صحیح بارهای اعمالی به دیوار، دو عدد تیر صلب مطابق با شکل ۱۲ در بالا و پایین دیوار در نظر گرفته شده است. در مدلسازی به روش المان مجزا با نرم‌افزار 3DEC، بندهای ملات از مدل حذف می‌گردند و رفتار آنها به ناپیوستگی‌ها نسبت داده می‌شود. به منظور حفظ هندسه کلی مدل، با حذف ملات، ابعاد بلوک‌ها افزایش داده می‌شود. مدل‌های رفتاری در نظر گرفته شده برای بلوک‌های آجری و ناپیوستگی‌ها به ترتیب مدل الاستو پلاستیک موهر-کلمب (رابطه‌های (۵) تا (۷)) و مدل لغزش کلمب (رابطه‌های (۸) و (۹)) است. بارگذاری اعمالی به گونه‌ای است که دیوارها در ابتدا تحت تنش فشاری قرار گرفته و پس از به تعادل رسیدن مدل تحت تنش وارده، بارگذاری جانبی به صورت کنترل شده اعمال می‌گردد. جابجایی مرز بالایی به نحوی کنترل می‌شود که تیر بالایی تنها با قادر به حرکت بودن در راستای افق، شرایط برش مستقیم را برای نمونه فراهم کند. نیروهای قائم وارده، تنش‌های نرمالی به ترتیب معادل با ۱/۴۲ مگاپاسکال، ۲/۸۴ مگاپاسکال و ۴/۲۶ مگاپاسکال اعمال می‌کنند. شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی دیوار بنایی غیر مسلح را تحت بار برشی و نرمال وارده نشان می‌دهد.

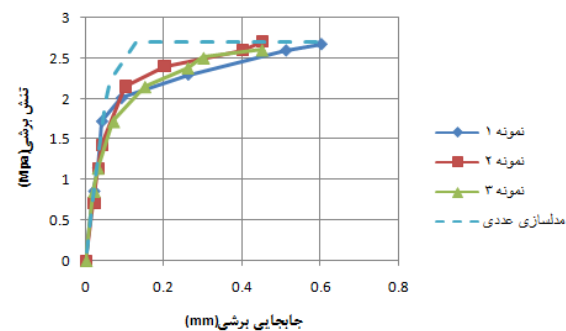
جدول ۳: مقایسه تنش برشی بیشینه نمونه‌های آجر-ملات در حالت عددی و آزمایشگاهی

σ_n (MPa)	تنش برشی (المان مجزا) (MPa)	تنش برشی (آزمایشگاهی) (MPa)	تنش برشی (المان مجزا) تنش برشی (آزمایشگاهی)
۱/۴۲	۱/۹۹	۱/۹۲	۱/۰۳
۲/۸۴	۲/۷	۲/۷	۱
۴/۲۸	۳/۴۳	۳/۶	۰/۹۵

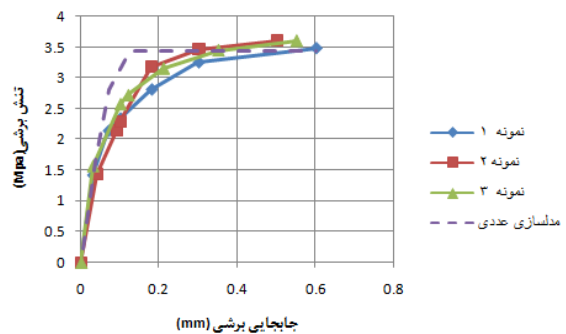
عددی و آزمایشگاهی در تنش‌های فشاری مختلف مورد مقایسه قرار می‌دهد.



الف

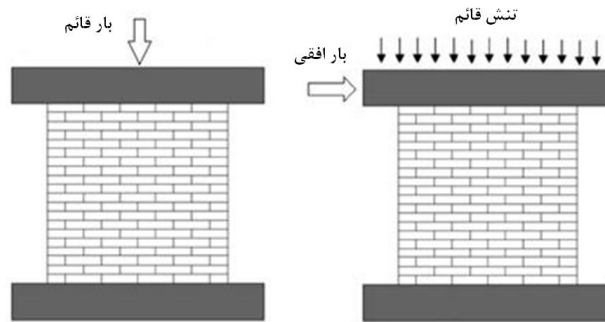


ب

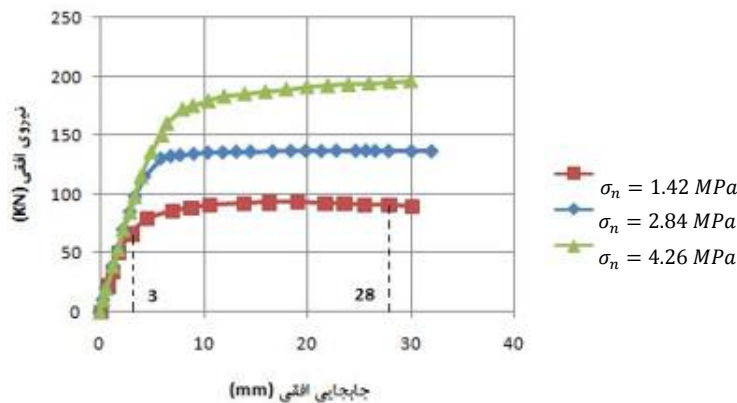


ج

شکل ۱۱: نمودارهای تنش برشی-جابجایی برشی در حالات مختلف بارگذاری و مقایسه نتایج با نتایج مدلسازی عددی (الف) تنش فشاری ۱/۴۲ مگاپاسکال و (ب) تنش فشاری ۲/۸۴ مگاپاسکال و (ج) تنش فشاری ۴/۲۶ مگاپاسکال



شکل ۱۲: شکل شماتیک بارگذاری قائم و افقی



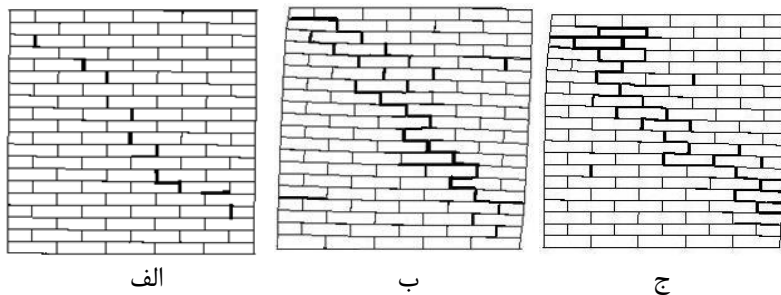
شکل ۱۳: نمودار نیرو-جابجایی دیوار باربر غیر مسلح در حالات مختلف بارگذاری قائم

شکل ۱۴ مسیر پیشروی ترک را در دیوار بنایی غیر مسلح تحت تنش فشاری ۱/۴۲ مگاپاسکال و ۲/۸۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج بررسی دیوار بنایی غیر مسلح با بارگذاری قائم متفاوت

بار افقی نهایی (KN)	σ_n (MPa)
۹۳	۱/۴۲
۱۳۶	۲/۸۴
۱۹۶	۴/۲۶

نتایج حاصل از این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش میزان تنش فشاری، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و ظرفیت باربری جانبی دیوار افزایش یافته و همچنین رفتار خزشی دیوار به تدریج به رفتار سخت شوندگی تبدیل می‌شود. نتایج جدول ۴ تاثیر میزان افزایش تنش فشاری بر روی ظرفیت باربری جانبی دیوار را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴، با افزایش تنش فشاری در مرز بالایی دیوار به میزان تقریبی ۱/۴ مگاپاسکال، ظرفیت باربری جانبی دیوار حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴: نحوه پیشروی ترک در دیوار بنایی غیر مسلح (الف) تنش فشاری ۱/۴۲ مگاپاسکال، جابجایی ۳ میلی‌متر و (ب) تنش فشاری ۱/۴۲ مگاپاسکال، جابجایی ۲۸ میلی‌متر و (ج) تنش فشاری ۲/۸۴ مگاپاسکال، جابجایی ۲۸ میلی‌متر

سطح مشترک بین آجر و ملات را با تقریب خوبی پیش‌بینی کند.

در بررسی رفتار دیوار بنایی غیر مسلح تحت بار برشی و نرمال وارده، نتایج حاصل از نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش تنش فشاری در مرز بالایی دیوار به میزان تقریبی ۱/۴ مگاپاسکال، ظرفیت باربری جانبی دیوار حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Lourenço, P. B., Rots, J. G. and Blaauwendraad, J. (1998). Continuum model for masonry : parameter estimation and validation. *Journal of Structural Engineering*, 124(6), 642-652.
- [2] Lotfi, H. R. and Shing, P. B. (1994). Interface model applied to fracture of masonry structures. *Journal of Structural Engineering*, 120(1), 63-80.
- [3] Lourenço, P. B. and Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(7), 660-668.
- [4] Lourenço, P. B., Oliveira, D. V., Roca, P. and Orduña, A. (2005). Dry joint stone masonry walls subjected to in-Plane combined loading. *Journal of Structural Engineering*, 131(11), 1665-1673.
- [5] Azevedo, J. O., Sinraian, G. and Lemos, J. V. (2000). Seismic behavior of blocky masonry structures. *earthquake spectra*, 16(2), 337-365.
- [6] Brookes, C. L. and Mehrkar-Asl, S. (2002). Numerical modeling of reinforced masonry to enhance seismic resistance. 11th Conference on Strengthening and Retrofitting of Structures.
- [7] Lemos, J. V. (2007). Discrete element modeling of masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2), 190-213.
- [8] Sinraian, G. E. and Azevedo, J. J. (1998). Numerical simulation of the seismic behavior of stone and brick masonry structures. 11th European Conference on Earthquake Engineering.
- [9] Halabian, A. M., Mirshahzadeh, L. and Hashemol-Hosseini, H. (2014). Non-Linear behavior of unreinforced masonry walls with different iranian traditional brick-work. *engineering failure analysis*, 44, 46-65.
- [10] Huizer, A. (1976). An Evaluation of compression prism, shear bond, and bending bond control tests for clay brick masonry. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 3(3), 402-408.

مطابق با شکل ۱۴، شکست دیوار از نوع شکست برشی است. به دلیل تفاوت چشمگیر مقاومت برشی آجرهای فشاری و نسبت به ملات، سطوح لغزش همواره از درزهای افقی و قائم می‌گذرد و در هر حال خواه منشأ شکست لغزش افقی و خواه لغزش قائم، یک ترک قطری در دیوار ایجاد می‌شود. توسعه ترک قطری در میانه دیوار موجب فروپاشی کامل دیوار می‌شود.

۴- نتیجه گیری

بررسی مکانیزم شکست در سازه‌های مصالح بنایی به دلیل وجود دو ماده ترد با خواص ذاتی مجزا، پدیده نسبتاً پیچیده‌ای است. رفتار مکانیکی این قبیل سازه‌ها به شدت تحت تاثیر رفتار سطح مشترک بین آجر و ملات است. از این رو تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه رفتار برشی سطح مشترک آجر- ملات با استفاده از روش تجربی و روش عددی المان مجزا جهت مدلسازی دیوارهای باربر غیر مسلح بنایی و بررسی رفتار آنها در مقابل بارهای برشی و نرمال وارده، پرداخته است. مدلسازی عددی نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق، با استفاده از روش المان مجزا در محیط نرم‌افزاری 3DEC انجام گرفته است. در مدلسازی به روش المان مجزا برای بلوک‌های آجری از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر- کلمب و برای ناپیوستگی‌ها از مدل لغزش کلمب استفاده شده است. متوسط پارامتر سختی برشی و نرمال برای سطح مشترک بین آجر و ملات به ترتیب ۴۲/۸۲ و ۱۲۲/۴۶ مگاپاسکال بر میلی‌متر، چسبندگی سطح مذکور ۰/۷ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک آن ۳۷/۷ درجه تخمین زده شده است.

شیب اولیه نمودارهای تنش برشی- جابجایی برشی و همچنین مقدار حداکثر تنش برشی در حالت عددی و آزمایشگاهی از انطباق خوبی برخوردار است؛ این در حالی است که روند تسلیم درزه در حالت عددی و آزمایشگاهی به دلیل عدم توانایی مدل لغزش کلمب در لحاظ کردن زبری سطوح مشترک بین آجر و ملات، تا حدودی با یکدیگر متفاوت است.

مقایسه نمودارهای تنش برشی- جابجایی برشی در حالت عددی و آزمایشگاهی، در تنش‌های مختلف فشاری، نشان می‌دهد که روش اجزا مجزا قادر است رفتار برشی

- [16] Van der Pluijm, R. (1997). Non-Linear behaviour of masonry under tension. Heron-English Edition, 42, 25-54.
- [17] American Society for Testing and Material. (2013). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube specimens). ASTM C109.
- [18] Brown, E. (1981). Rock characterization, testing & monitoring: ISRM Suggested Methods.
- [19] Nikadat, N. and Yarahmadi, A. (2014). "Estimating Joint Normal and Shear Stiffness Coefficient Using Statistical Methods." Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering 3(6): 93-103 (In Persian).
- [20] Cundall, P. A. (2013). A Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In Proc Symp Rock Fracture (ISRM). Nancy.
- [21] Itasca consulting group. Inc. 3DEC manual.
- [11] Hofmann, P. and Stockl, S. (1986). Tests on the shear-bond behaviour in the bed-Joints of masonry. Masonry Int, 9, 1.
- [12] Mann, W. and Muller, H. (1982). Failure of shear-stressed masonry. In Proc Br Ceram Soc, 30, 223.
- [13] Smith, B. and Carter, C. (1971). Hypothesis of shear failure of brickwork. Journal of the Structural Division, 97(4), 1055-1062.
- [14] Atkinson, R., Kingsley, G., Saeb, S., Amadei, B. and Sture, S. (1988). Laboratory and in situ study of the shear strength of masonry bed joints. Brick and Block Masonry London, Elsevier Applied Science, 1, 261-271.
- [15] Hobbs, B. and Roman, H. (1988). Shear behaviour of mortar joints in brickwork subjected to non-uniform compressive stress.

¹ Macro-modeling

² Macro-modeling

³ Orthotropic

⁴ Multisurface interface model

⁵ Discrete Element Method

⁶ Constant normal load

⁷ Constant normal stiffness

⁸ Dilation

⁹ Normalized root-mean-square deviation