

# توسعه روش اجزاء مجزا برای تحلیل غیرارتجاعی اعضاء بنایی غیر مسلح

سعید مشیرآبادی<sup>۱</sup>، مسعود سلطانی محمدی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران-مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

msoltani@modares.as.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۰/۲۳]

## چکیده

هدف از این پژوهش توسعه رویکرد ریز مدلسازی بر مبنای روش اجزای مجزا (بلوک صلب و فنر)، برای شبیه‌سازی رفتار داخل صفحه سازه‌های بنایی آجری غیرمسلح است. به منظور ارزیابی ترک‌خوردگی در آجر از فرضیات ترک دو جهته و برای رفتار پس از آن، از ایده روش ترک پخشی ثابت استفاده شده است. همچنین مشخصات فنرهای نرمال و برشی شبیه‌سازی کننده رفتار ملات و اندرکنش مابین آن با آجر، بطور مجزا از هم با ارزیابی میزان بازشدگی ترک و تغییرشکل برشی در سطح ترک تعیین می‌شوند. برای ارزیابی میزان تنش برشی در فنرهای برشی از معیار موهر-کولمب استفاده می‌شود. الگوریتم محاسباتی و نرم‌افزار توسعه یافته، تشریح و مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی حاکی از آن است که برنامه توسعه یافته از قابلیت مناسبی برای ارزیابی رفتار غیرخطی سازه‌های بنایی در مودهای مختلف شکست و الگوهای ترک‌خوردگی برخوردار است.

**واژگان کلیدی:** ریز مدلسازی، روش اجزاء مجزا، روش بلوک صلب و فنر، روش ترک پخشی ثابت، تحلیل غیرخطی، سازه بنایی غیرمسلح

## ۱- مقدمه

دوام، هزینه‌های تعمیر و نگهداری اندک و نیز مقاومت مناسب آنها در برابر آتش‌سوزی باعث شده کماکان استفاده از مصالح بنایی روتق داشته باشد. با این وجود، عدم پیشرفت مناسب قوانین و ضوابط طراحی سازه‌های بنایی در مقایسه با سایر

یکی از قدیمی‌ترین مصالح مورد کاربرد در گستره وسیعی از صنعت ساختمان‌سازی، مصالح بنایی است. زیبایی، استحکام،

در این مطالعه عددی از شیوه ریز مدلسازی با جزئیات ساده‌سازی شده مبتنی بر روش اجزاء مجزا استفاده می‌شود. این روش برای اولین بار توسط کانندال در سال ۱۹۷۱ برای مطالعه سازه‌های سنگی مدل شده به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های صلب، ابداع شده است [3-4]. این روش توسط پژوهشگران مختلفی از جمله پاگنون [5] و آزودو و همکاران [6] برای مدلسازی سازه‌های بنایی بکار گرفته شده که نتایج قابل قبولی را حاصل نموده است. بطور کلی در روش اجزاء مجزا، مدلسازی مصالح سازه‌ای از قبیل بتن و فولاد، آجر و ملات به شیوه ناپیوسته و یا مستقل صورت می‌پذیرد و بیشتر برای برقراری ارتباط مابین آنها از المان‌های تماسی استفاده می‌شود. در این شرایط مسیر انتقال تنش مابین دو مصالح سازه‌ای متفاوت فقط از طریق اندرکنش مابین آنها فراهم می‌شود. اگرچه این روش از کارایی و قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی ترک‌خوردگی و جدا شدن المان‌ها تحت تغییرشکل/تغییر مکان‌های بزرگ در مرحله فروریزش برخوردار است، اما با توجه به وابستگی مدل ترک‌خوردگی و چگونگی گسترش آن به شکل، ابعاد و آرایش المان‌های بکار گرفته شده به همراه هزینه‌های تکرارشونده در محاسباتی آن به دلیل بکارگیری الگوریتم‌های تکرارشونده در فرآیند تحلیل سازه، انتخاب مناسبی در مدلسازی واقعی سیستم‌های سازه‌ای محسوب نمی‌شود. از طرفی با توجه به اعمال فرضیات روش المان مجزا مبنی بر مدلسازی ترک‌خوردگی عضو از اولین گام تحلیل، امکان ارزیابی دقیق رفتار در محدوده تغییرشکل‌های کوچک با پیوستگی کامل مابین مصالح فراهم نمی‌شود [7-9].

با توجه به تنوع روش‌های عددی مبتنی بر اجزاء مجزا، روش بلوک صلب و فنر بعنوان روشی مطرح است که از قابلیت مناسبی برای ارزیابی رفتار سازه‌ها در وضعیت اعمال تغییرشکل‌های بزرگ به همراه مزیت تعداد درجات آزادی پایین‌تر و به تبع آن هزینه محاسباتی کمتر نسبت به سایر روش‌ها، برخوردار است. تاگل و مگرو [10] با استفاده از مفاهیم روش بلوک صلب و فنر در سال ۱۹۹۶ روشی با عنوان المان کاربردی را پیشنهاد نموده‌اند که در آن مدلسازی پیوسته عضو با بکارگیری مفاهیم روش ترک‌خوردگی مجزا صورت

سازه‌ها، که به دلیل فقدان بینش لازم بر رفتار پیچیده مصالح بنایی است، مانع از توسعه استانداردها و ضوابط طراحی مهندسی برای آنها شده است.

به منظور شبیه‌سازی رفتار سازه‌های بنایی، مطابق شکل (۱) دو رویکرد عمده مدلسازی شامل ریز مدلسازی (مدل ناهمگن) و درشت مدلسازی (مدل همگن) مطرح است که البته بسته به میزان دقت پاسخ مورد انتظار و سهولت مدلسازی می‌توان معایب و مزایایی برای هر یک از روش‌ها برشمرد [1-2]. بطور کلی در روش ریز مدلسازی به دلیل دقت مناسب پاسخ‌ها، وضعیت وقوع خرابی و مسیر گسیختگی بطور دقیق‌تری تعیین می‌شود، اما با توجه به مشخصات و جزئیات مورد نیاز، این روش بعنوان یک روش پیچیده مطرح است.

شکل ۱. روش‌های مدلسازی سازه‌های بنایی آجری [2]

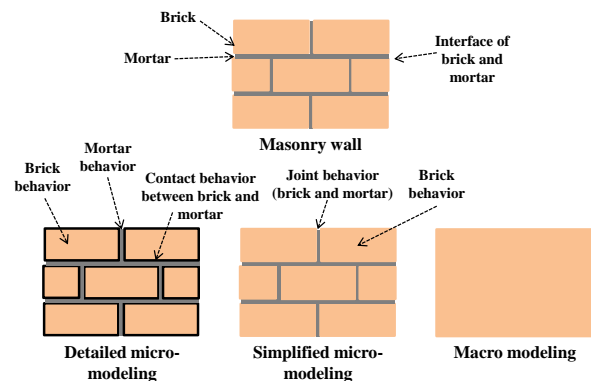


Fig. 1. Modeling approaches of brick masonry structures [2]

در شیوه ریز مدلسازی دو طبقه‌بندی کلی شامل روش ریز مدلسازی با جزئیات ساده‌سازی شده و ریز مدلسازی با جزئیات کامل مطرح هستند (شکل ۱). در روش ریز مدلسازی با جزئیات ساده‌سازی شده (مورد نظر این مطالعه عددی)، به منظور اجتناب از مدلسازی مجزای ملات و سطح اتصال آن با آجر، از المان آجر با ابعاد بزرگتر از شرایط واقعی آن (شامل ابعاد آجر به همراه ملات پیرامونی آن) استفاده می‌شود. بنابراین در این روش نیاز است که در موقعیت ملات، مشخصات رفتاری توأم آجر و ملات (رفتار بنایی) تخصیص یابد.

## ۲- روش بلوک صلب و فنر

در روش بلوک صلب و فنر با بکارگیری مفاهیم حاکم بر وقوع ترک خوردگی عضو در حد فاصل بین بلوک‌ها، هر عضو سازه‌ای به تعدادی از بلوک‌های صلب منفرد تقسیم می‌شود و برای اتصال بلوک‌ها از فنرهای نرمال و برشی در سطوح تماس آنها استفاده می‌شود. بطور کلی مشخصات مصالح به همراه مدل‌های رفتاری آنها به فنرهای اتصالی اختصاص می‌یابد که در نتیجه آن هر فنر منفرد می‌تواند معرف مشخصات مصالح تشکیل دهنده عضو از قبیل بتن، فولاد، آجر، ملات و یا سایر مصالح باشد [13-15].

با توجه به فرض وقوع ترک خوردگی عضو در حد فاصل بین بلوک‌ها، موقعیت و مدل رفتاری اعمالی در فنرهای اتصال بلوک‌ها از اهمیت وافر برای ارزیابی رفتار کلی عضو شبیه‌سازی شده برخوردار است. با تعیین نیرو و تغییر مکان اعمالی در فنرهای پیرامون بلوک‌های مفروض، امکان ارزیابی تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در محدوده کنترلی آنها و همچنین عملاً امکان انتقال تنش از بلوکی به بلوک مجاور خود فراهم می‌شود. بنابراین هر فنر متصل به بلوک بیانگر میزان تنش و تغییر شکل اعمالی در حجم مشخصی از بلوک‌های اتصالی است (شکل ۲).

مطابق با شکل (۲)، در اعضاء بنایی، می‌توان واحد بنایی را شامل فقط یک بلوک صلب در راستای عرضی و چهار بلوک با دو جنس متفاوت فنر مابین آنها در راستای افقی در نظر گرفت (منحنی نقطه‌چین بسته) که در حقیقت شبیه‌سازی کننده دو رج آجر کامل و ملات در شرایط واقعی است. با توجه به تعریف واحد بنایی در این شرایط، مشخصات فنرهای مربوطه به ترتیب باید شبیه‌سازی کننده رفتار آجر و ملات باشند. بنابراین باید مشخصات رفتاری هر کدام از مصالح آجر و ملات تعیین و به فنرهای مربوطه اعمال شود. سختی هر کدام از جفت فنرها شامل فنرهای برشی و نرمال که معرف مشخصات مصالح بکار گرفته شده شامل آجر و یا ملات است، از رابطه (۱) قابل ارزیابی است.

می‌پذیرد. اگر چه این روش از کارایی مناسبی در ارزیابی ظرفیت و رفتار سازه‌ها در مراحل مختلف برخوردار است، اما میزان تقریبات پاسخ سازه تحت تغییر شکل‌های اعمالی با توجه به فرضیات آن نسبت به سایر روش‌های عددی، کماکان چشمگیر است [11]. مالمو و همکاران [12]، با استفاده از روش المان کاربردی توسعه یافته در نرم‌افزار ELS و با ارائه روابط اصلاحی برای تعیین مشخصات فنرهای شبیه‌سازی کننده رفتار آجر و ملات، به ارزیابی رفتار چرخه‌ای داخل صفحه دیوارهای بنایی غیرمسلح پرداختند. مطابق با فرضیات اصلی روش المان کاربردی، ارزیابی مشخصات فنرهای برشی و نرمال بطور مستقل و مجزا از هم صورت می‌پذیرد. بنابراین در این حالت آثار اندرکنش تنش‌های محوری و برشی و نرم‌شدگی رفتار فشاری تحت آثار ترک خوردگی قطری به شکل مناسب منظور نمی‌شود. این مسائل باعث شده تا در این پژوهش با بکارگیری روش المان مجزا شامل بلوک صلب و فنر و اصلاح فرضیات مدلسازی آن بر مبنای مفاهیم روش ترک پخشی، در راستای هر چه دقیق‌تر نمودن ارزیابی پاسخ‌ها و رفتار سازه‌های بنایی اقدام شود. برای این منظور هر واحد بنایی در هر ردیف شامل دو آجر و ملات مابین آنها با چهار بلوک صلب و فنرهای متصل به مشخصات مصالح ملات و آجر شبیه‌سازی می‌شوند که مشخصات فنرهای نرمال و برشی معرف رفتار ملات با توجه به اندرکنش بین آنها تعیین می‌شود و مشخصات فنرهای نرمال و برشی معرف رفتار آجر با بکارگیری مفاهیم روش ترک پخشی ارزیابی می‌شوند. بنابراین علاوه بر امکان وقوع و گسترش ترک خوردگی در فنرهای شبیه‌سازی کننده ملات (جدایش و لغزش بلوک‌ها)، در فنرهای شبیه‌سازی کننده آجر هم، امکان شبیه‌سازی ترک‌های دو جهته با توجه به فرضیات این مطالعه عددی فراهم می‌شود. با اعمال این شرایط، امکان ارزیابی رفتار غیرخطی سازه‌های بنایی و همچنین مودهای مختلف خرابی واقعی آنها فراهم می‌شود و از طرفی با توجه به فرضیات روش ترک پخشی و سرعت مناسب الگوریتم آن در ارزیابی رفتار پس از ترک خوردگی عضو، مزیت روش بلوک صلب و فنر شامل مدلسازی با تعداد درجات آزادی کمتر و هزینه‌های محاسباتی اندک، کماکان محفوظ است.

شکل ۲. دیوار بنایی آجری به همراه نمای شماتیک مدلسازی عددی هر واحد بنایی

توسعه روش اجزاء مجزا برای تحلیل غیرارتجاعی اجزاء بنایی...

مطابق با فرضیات روش بلوک صلب و فنر، درایه‌های ماتریس سختی قابل استخراج است. اگر در شرایط دوبعدی فرض شود که فقط دو بلوک مجاور هم توسط یک مجموعه شامل یک فنر نرمال و برشی متصل شوند، ماتریس سختی کل با توجه به مراکز بلوک‌ها و موقعیت قرارگیری فنرهای اتصالی نسبت به دستگاه مختصات کلی تعیین می‌شود. برای تعیین مؤلفه‌های ماتریس سختی در این شرایط، تغییرمکان واحد متناظر با درجه آزادی مورد نظر اعمال و نیروهای حاصله در سایر درجات آزادی بلوک مربوطه ارزیابی می‌شوند. ابعاد ماتریس سختی در این شرایط پیشفرض برابر با  $6 \times 6$  است که در رابطه (۲) مؤلفه‌های مربوط به ربع فوقانی سمت چپ ماتریس سختی شامل یک ماتریس  $3 \times 3$  ارایه شده‌اند (شکل ۳).

مطابق با این روابط، ماتریس سختی هر بلوک فقط وابسته به سختی فنر اتصال و موقعیت قرارگیری آن نسبت به مرکز بلوک است.

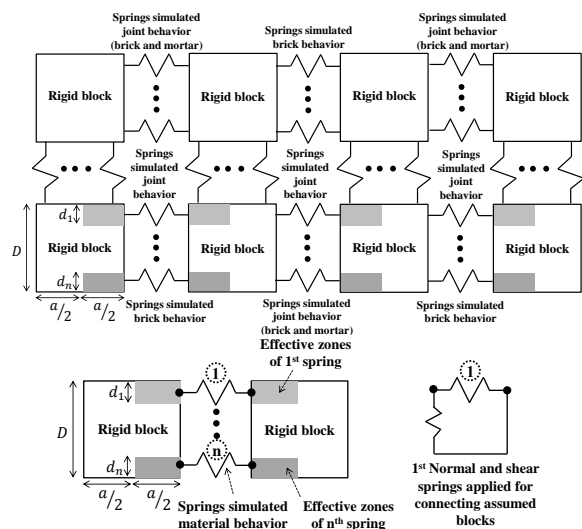
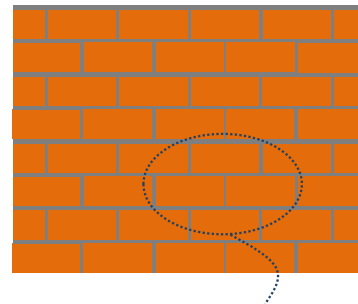


Fig. 2. Brick masonry wall with schematic view of numerical modeling in each masonry unit

$$K_{ni} = \frac{E \times t \times d_i}{a} \quad \& \quad K_{si} = \frac{G \times t \times d_i}{a} \quad (1)$$

در روابط فوق ماتریس سختی فقط برای یک جفت از فنرهای اتصالی تعیین شده است. به منظور تعیین ماتریس سختی کل با افزایش تعداد فنرهای پیرامون بلوک‌ها، باید مقادیر سختی در کلیه جفت فنرهای منفرد نسبت به مرکز آنها ارزیابی و در نهایت با هم ترکیب شوند. بررسی بیشتر ماتریس سختی در این روش بیانگر آن است که در هر بلوک به نوعی میانگینی از مقادیر سختی فنرهای پیرامونی نسبت به وضعیت تنش‌های اعمالی تعیین می‌شود که با ترکیب و تشکیل ماتریس سختی فنرهای هر بلوک نسبت به دستگاه مختصات مرجع انتخابی، می‌توان ماتریس سختی کل سیستم سازه‌ای را مشابه با سایر روش‌ها مبتنی بر تغییرمکان (ماتریس سختی) ارزیابی نمود.

در رابطه فوق،  $E$  و  $G$  به ترتیب معرف مدول‌های یانگ و برشی هر کدام از مصالح شامل آجر تنها یا بنایی (آجر-مالات)،  $d_i$  فاصله مابین هر فنر با فنرهای مجاور،  $t$  ضخامت المان و  $a$  فاصله مابین مراکز المان‌های مجاور هم هستند. با بکارگیری روابط فوق به سادگی می‌توان مشخصات سختی فنرهای نرمال و برشی مرتبط با مصالح را تعیین نمود. با توجه به فرض صلب بودن بلوک‌ها در این روش، تعداد درجات آزادی هر بلوک در صورت مدلسازی دوبعدی و یا سه‌بعدی به ترتیب به سه و یا شش محدود می‌شوند که در حقیقت بیانگر حرکات جسم صلب آن بلوک می‌باشد. علاوه بر این، می‌توان تغییرشکل مجموعه‌ی فنرها در سطوح مشترک مابین بلوک‌های مجاور هم را با درجات آزادی مراکز آنها مرتبط نمود که به تبع آن امکان

در مطالعه حاضر به منظور تحلیل غیرخطی سازه‌های بنایی، برنامه‌ای به زبان فرترن بر مبنای روش المان مجزای بلوک صلب و فنر توسعه یافته است که در آن تحلیل غیرخطی اجزاء به روش گام به گام عددی صورت می‌پذیرد.

$$K = \begin{bmatrix} [k_{11}]_{3 \times 3} & [k_{12}]_{3 \times 3} \\ [k_{21}]_{3 \times 3} & [k_{22}]_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$[k_{11}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} k_n \sin^2(\alpha_1 + \theta_1) + & -k_n \sin(\alpha_1 + \theta_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) + & -k_n L_1 \cos(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + \theta_1) + \\ k_s \cos^2(\alpha_1 + \theta_1) & k_s \sin(\alpha_1 + \theta_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) & k_s L_1 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) \\ -k_n \sin(\alpha_1 + \theta_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) + & k_n \cos^2(\alpha_1 + \theta_1) + & k_n L_1 \cos(\alpha_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) + \\ k_s \sin(\alpha_1 + \theta_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) & k_s \sin^2(\alpha_1 + \theta_1) & k_s L_1 \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + \theta_1) \\ -k_n L_1 \cos(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + \theta_1) + & k_n L_1 \cos(\alpha_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) + & k_n L_1^2 \cos^2(\alpha_1) + \\ k_s L_1 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1 + \theta_1) & k_s L_1 \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_1 + \theta_1) & k_s L_1^2 \sin^2(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

صلب وجود خواهد داشت، بنابراین می‌توان با بکارگیری فرضیات روش ترک پخشی وقوع ترک‌ها در راستای غیرمتعامد را نیز شبیه‌سازی نمود. بنابراین باید از مفاهیم روش ترک پخشی ثابت برای ارزیابی رفتار فنرهای شبیه‌سازی کننده هر واحد بنایی شامل مصالح آجر و ملات استفاده نمود. به منظور اعمال مفاهیم حاکم بر روش ترک پخشی ثابت، باید تنش‌های نرمال متعامد به همراه تنش برشی تعیین و این مجموعه به فضای تنش‌های اصلی انتقال یابد. بدین منظور تنش نرمال در هر فنر مورد بررسی با میانگین تنش‌های نرمال در راستای متعامد با آن ارزیابی می‌شود. همچنین میزان برش نیز با توجه به موقعیت فنر مورد نظر تعیین می‌شود (شکل ۴ الف). معمولاً برای ارزیابی وقوع ترک‌خوردگی در هر فنر، معیار مناسبی بر مبنای کرنش کششی مجاز مصالح انتخاب می‌شود که با برقراری آن، ترک در راستای مربوطه ایجاد می‌شود. با وقوع ترک‌خوردگی در گام‌های بعد تحلیل عددی، تنش‌های اعمالی در فنر مورد نظر به راستای ترک مربوطه انتقال می‌یابد که در این شرایط علاوه بر مدل‌های رفتاری نرمال مصالح بنایی نیاز به مدل رفتاری برشی مصالح خواهد بود (شکل ۴ ب). به منظور مدل‌سازی رفتار فنر برشی مابین بلوک‌ها از معیار موهر-کولمب استفاده می‌شود که پارامترهای لازم برای آن شامل سختی برشی، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و چسبندگی بوده که با توجه به مشخصات رفتاری مصالح بنایی و وضعیت تنش‌های محوری در فنر نرمال متناظر تعیین می‌شود.

برنامه توسعه یافته قابلیت ارزیابی پاسخ به هر دو روش بار افزون و یا روش اعمال تغییرمکان به روش‌های حل ضمنی و صریح را دارد.

شکل ۳. پارامترهای مفروض جهت استخراج درایه‌های ماتریس سختی

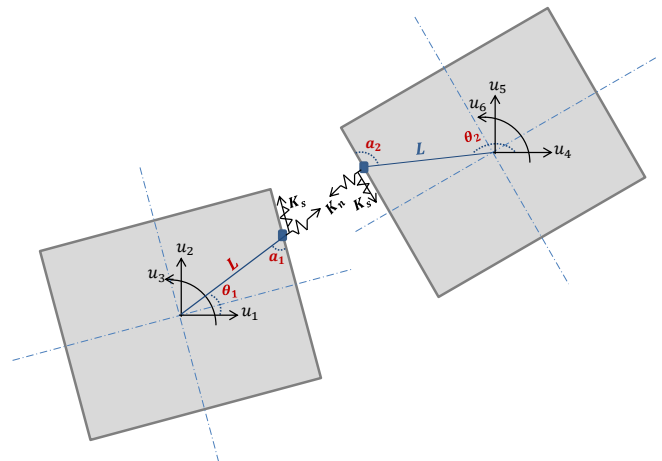


Fig. 3. Assumed parameters for derivation of entries of stiffness matrix

### ۳- اعمال مفاهیم روش ترک پخشی در فنرها و ساختار کلی مدل توسعه یافته

در روش المان مجزای بلوک صلب و فنر کلاسیک مشابه سایر روش‌ها مبتنی بر المان مجزا، فقط امکان وقوع و گسترش ترک در مرز مشترک مابین بلوک‌ها به عبارتی در صفحات متعامد آنها میسر است. از طرفی با توجه به اینکه عملاً امکان وقوع و گسترش ترک در راستای غیر از سطح تماس بلوک‌های

شکل ۴. الف) شیوه اعمال مفاهیم حاکم بر روش ترک پخشی ثابت در فنرهای پیرامون بلوک (ب) وضعیت توزیع تنش در فنر مورد بررسی پیش و پس از وقوع ترک خوردگی

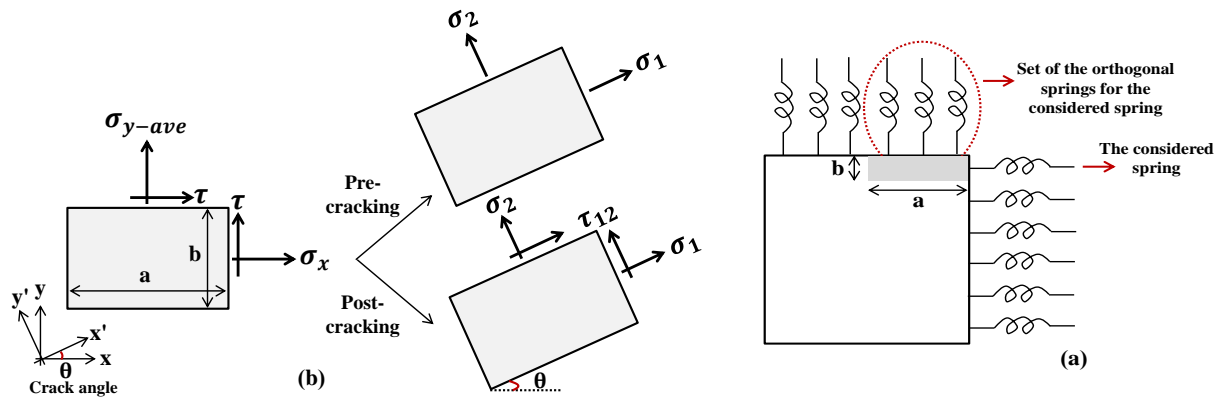


Fig. 4. (a) Method of applying fixed smeared crack approach to the springs surrounding of block (b) Stress distribution of considered spring in pre- and post-crack phase

سازه‌های بنایی توسط فنرهای برشی شبیه‌سازی کننده رفتار ملات و یا آجر بطور کلی نیاز است که میزان بازشدگی و لغزش در موقعیت ترک مربوطه تعیین شوند (شکل ۵).

شکل ۵. ارزیابی میزان تغییر مکان برشی (لغزش) و بازشدگی ترک خوردگی در صفحه ترک برای فنرهای برشی [17]

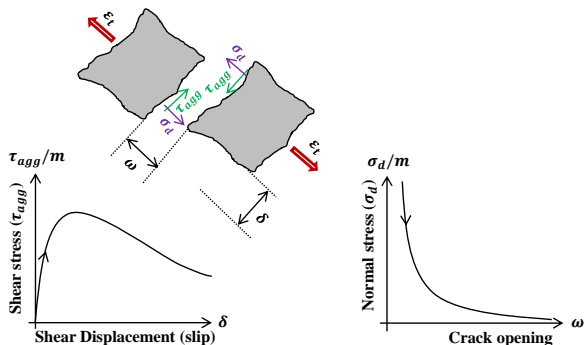


Fig. 5. Evaluation of shear displacement and crack opening on the crack surface for shear springs [17]

ساختار کلی برنامه توسعه یافته در چهار بخش اصلی صورت پذیرفته است که هر قسمت خود شامل زیربرنامه‌های متعددی است (شکل ۶). قسمت اول شامل تعریف مختصات مراکز بلوک‌ها و ابعاد آنها به منظور تعیین موقعیت سطوح تماس مشترک بلوک‌ها خواهد بود. مشخصات مدل‌های رفتاری مصالح بنایی اختصاص یافته به فنرهای اتصالی بلوک‌ها توسط زیربرنامه‌های در همین قسمت اعمال شده است. قسمت دوم

با توجه به فرضیات روش ترک پخشی ثابت پس از وقوع اولین ترک در هر فنر بررسی شده، جهت و راستای آن ثابت بوده و به ازای سیکل‌های بعدی بارگذاری، وضعیت تنش‌ها و کرنش‌ها در صفحه ترک مفروض بروزسانی می‌شود. بنابراین مجموعه سازوکارهای انتقال تنش در عضو ترک‌خورده شامل تنش‌های موازی و نرمال بلوک در صفحه ترک به همراه سازوکار انتقال تنش برشی در آجر و یا ملات ناشی از کرنش میانگین محوری آنها می‌باشد [16-17].

با توجه به پیشفرض وقوع ترک‌های دو جهته در روش ترک پخشی ثابت برای مطالعه حاضر، تنها امکان وقوع دو ترک در عضو بنایی وجود خواهد داشت و زمانی ترک جدید (ترک دوم) نسبت به ترک قدیم (ترک اول) ایجاد می‌شود که راستای آن نسبت به ترک اولیه از زاویه‌ای بیش از ۴۵ درجه برخوردار باشد. پس از وقوع دو ترک در عضو، یکی از آنها بر مبنای راستا، جهت و مقدار کرنش‌های اعمالی، به عنوان ترک فعال محسوب و مقادیر تنش‌های عضو و مشخصات رفتاری آن متناظر با ترک مربوطه بروزسانی می‌شود. بطور کلی امکان وقوع ترک خوردگی در دیوارهای بنایی معمولاً در حد فاصل آجرها مابین ملات وجود خواهد داشت مگر آنکه مودهای شکستی از قبیل شکست کشش قطری دیوار بنایی حاکم شود که در نتیجه آن امکان عبور مسیر ترک خوردگی علاوه بر ملات‌ها، از داخل آجر نیز وجود دارد. برای ارزیابی رفتار برشی

در این مرحله برای هر المان سه معادله خواهیم داشت که نیروهای خارجی با برآیند نیروهای داخلی ایجاد می‌شود در مراکز المان‌ها ناشی از فنرهای متصل به آنها، باید در تعادل قرار گیرند. در صورت عدم ارضای معادلات تعادل، نیروهای غیرمتعادل محاسبه و با تغییر علامت به عنوان نیروهای خارجی در گام بعدی تحلیل سازه اعمال می‌شود.

#### ۴- مدل‌های رفتاری میانگین المان بنایی غیرمسلح

مودهای خرابی مصالح بنایی بطور کلی تحت بارهای جانبی شامل ترک خوردگی و جداشدگی بلوک‌ها در محل درزهای اتصالی، لغزش در امتداد درزهای افقی و یا قائم، ترک خوردگی کششی قطری آجرها و خردشدگی فشاری مصالح هستند (شکل ۷) [2]. بنابراین در مجموع رفتار المان بنایی غیرمسلح از ۳ رفتار کلی تبعیت می‌نماید که عبارتند از: رفتار المان بنایی غیرمسلح تحت فشار، رفتار المان بنایی غیرمسلح تحت کشش، رفتار المان بنایی غیرمسلح تحت برش (شکل ۸).

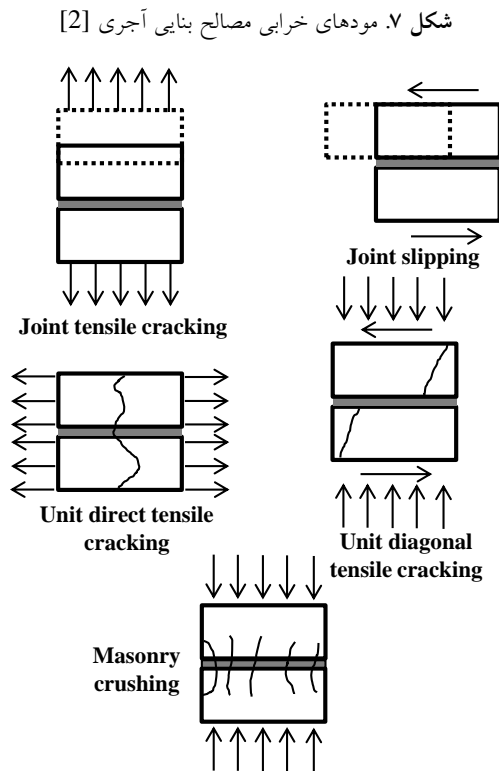


Fig. 7. Failure modes of brick masonry material [2]

این برنامه به آنالیز و محاسبات اختصاص یافته است. بخش محاسبات شامل عملیات تعیین موقعیت قرارگیری فنرهای نرمال و برشی پیرامون بلوک‌ها نسبت به مرکز آنها، تشکیل ماتریس سختی هر بلوک به ازای فنرها و انتقال این ماتریس سختی به سیستم دستگاه مختصات مرجع و برهم نهی کلیه ماتریس‌ها برای تشکیل ماتریس سختی کل سازه خواهد بود. در این مرحله تعریف شرایط مرزی شامل موقعیت‌های اعمال شرایط نیروی و یا تغییر مکانی مشخص در هر کدام از درجات آزادی نظیر صورت می‌پذیرد. در قسمت سوم پس از حل معادلات تعادل، بردار جابه‌جایی در هر کدام از درجات آزادی مجهول ارزیابی و با اعمال آن میزان کرنش‌های نرمال و برشی ایجاد شده در هر فنر پیرامون بلوک‌ها تعیین می‌شود. در این مرحله با اعمال بردار جابه‌جایی، هندسه تغییر شکل یافته سازه شبیه‌سازی شده نیز مشخص می‌شود. در قسمت چهارم با توجه به هندسه تغییر شکل یافته سازه آثار نیرویی آن در فنرهای اتصال پیرامونی بلوک‌ها معین و شرایط تعادل لنگر و نیروها برای هر بلوک به ازای درجات آزادی مفروض کنترل می‌شود.

شکل ۶. فلوچارت محاسباتی برنامه توسعه یافته



Fig. 6. Flowchart of developed code

هستند. یک موضوع بسیار مهم در تحلیل المانهای بنایی تحت فشار، تفاوت مقاومت فشاری آنها در هر راستا با راستای دیگر می باشد که در نتیجه ارتوتروپ بودن رفتار المانهای بنایی به ازای راستاهای مختلف خواهد بود.

به منظور اعمال اثر ترک خوردگی بر مقاومت فشاری بنایی، از ضریب اصلاح ( $\beta$ ) پیشنهاد شده توسط مایکاووا و همکاران [17] استفاده می شود که بر مبنای کرنش کششی عمود بر سطح ترک ( $\epsilon_1$ ) مطابق با رابطه (۴) محاسبه می شود.

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & ; \epsilon_1 \leq 0.0012 \\ 1.0 - 1.25(\epsilon_1 - 0.002) & ; 0.0012 < \epsilon_1 < 0.0014 \\ 0.6 & ; 0.0014 \leq \epsilon_1 \end{cases} \quad (4)$$

#### ۴-۲- مدل رفتاری المان بنایی غیرمسلح تحت کشش

رفتار المان بنایی غیرمسلح در کشش با توجه به نوع گسیختگی و ترک ایجاد شده در آن متفاوت خواهد بود. در صورتی که ترک در درز بین ملات و آجر حادث شود، در اینصورت برای المان بنایی شکست کششی لغزشی به عنوان یک مود شکست شکل پذیر با مقاومت پسماند مناسب ایجاد می شود. حال آنکه ترک از میان آجر و ملات عبور نماید، المان بنایی شکست کششی قطری به عنوان یک مود شکست با رفتار ترد را تجربه نموده و مقاومت پسماند عضو با افت قابل ملاحظه ای مواجه می شود. در این مطالعه عددی جهت مدلسازی رفتار کششی المان بنایی زمانی که ترک از آجر و ملات عبور می کند، از مدل جامع کششی اکامورا و مائکاووا [20] با حذف بخش پلاستیک آن استفاده می شود [21]. در رابطه (۵) مدل کششی بکار گرفته شده در دیوار بنایی غیرمسلح ارائه شده است.

$$\begin{cases} \sigma_c = |\sigma_{cc}| \tan \phi \cdot \cos^2(\theta) & \therefore \sigma_{cc} < 0 \\ \sigma_c = 0.0 & \therefore \sigma_{cc} \geq 0 \end{cases}$$

$$\sigma_{cn} = \min\{\sigma_c, E_m \epsilon_t\}$$

$$\epsilon_{crm} = \frac{f_{tm}}{E_m} \quad \therefore \epsilon_{crb} = \frac{f_{tb}}{E_b} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_A = E_m \epsilon_t + \sigma_{cn} & \therefore \epsilon_t < \epsilon_{crm} \\ \sigma_A = f_{tm} \left( \frac{\epsilon_{crm}}{\epsilon_t} \right)^c + \sigma_{cn} & \therefore \epsilon_t \geq \epsilon_{crm} \end{cases}$$

مدل های رفتاری محوری شامل رفتار تحت کشش و یا تحت فشار المان بنایی در فنرهای نرمال متصل به بلوک ها و مدل رفتاری برشی المان بنایی در فنرهای برشی، متناظر با مشخصات مصالح شبیه سازی کننده رفتار آجر و یا بلوک اعمال می شود. در فنرهای برشی برای ارزیابی رفتار برشی لازم است لغزش و بازشدگی ترک و سپس با بکارگیری روابط مناسب، ارتباط مابین آنها با تنش های به دست آمده هر فنری برشی تعیین شود. لازم به ذکر است مدل های رفتاری باید قابلیت ارزیابی تمامی مودهای خرابی محتمل بر رفتار کلی سازه های بنایی همچون مودهای خرابی حرکت گهواره ای، لغزش برشی، کشش قطری و خرد شدگی فشاری را داشته باشد.

#### ۴-۱- مدل رفتاری المان بنایی غیرمسلح تحت فشار

رفتار المان بنایی تحت فشار تک و دو محوره از مهمترین خواص مورد نیاز برای انجام تحلیل های غیرخطی است. پژوهشگران مختلفی در زمینه رفتار فشاری منشوری بنایی و ارائه مدل تحلیلی مناسب برای آن تلاش نموده اند. در این پژوهش برای مدلسازی رفتار المان بنایی تحت فشار از مدل پیشنهادی ژوگه و همکاران [18] استفاده شده است که برگرفته از مدل رفتاری داروین و پکنولد [19] برای بتن است. به این ترتیب که با تعیین کرنش معادل تک محوره برای المان بنایی و ارزیابی تنش از مدل رفتاری تک محوره از روابط (۳) استفاده می شود.

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} = \left( \frac{\epsilon_{iu}}{\epsilon_{ic}} \right) \exp \left( 1 - \frac{\epsilon_{iu}}{\epsilon_{ic}} \right)$$

$$\epsilon_{iu} = \frac{\epsilon_i}{1 - \vartheta \frac{\sigma_j}{\sigma_i}} \quad (3)$$

$$\rightarrow E_0 = \frac{d\sigma_i}{d\epsilon_{iu}} = \exp(1) \times \frac{\sigma_{ic}}{\epsilon_{ic}}$$

در رابطه فوق  $\sigma_i$  تنش اصلی معادل در جهت  $i$ ،  $\sigma_{ic}$  تنش تسلیم معادل در جهت  $i$ ،  $\epsilon_{iu}$  کرنش متناظر معادل در جهت  $i$ ،  $\epsilon_{ic}$  کرنش متناظر با نقطه تسلیم در جهت  $i$ ،  $\vartheta$  ضریب پواسون مصالح بنایی در جهت  $i$  و  $E_0$  مدول الاستیسیته اولیه در جهت  $i$



رفتاری برشی اصلاح شده لی و همکاران [22] در المان بتنی با اعمال اصلاحاتی برای واحد بنایی مطابق با پیشنهاد غیائی و سلطانی [21] استفاده می‌شود. بدین منظور با صرف نظر از مؤلفه تغییرشکل ارتجاعی در صفحه ترک، تنش برشی به صورت ضابطه‌ای فقط برحسب نسبت تغییرمکان برشی به عرض ترک تعیین می‌شود و مقدار مدول برشی قبل از ترک خوردگی  $G_{sh\_uncrack}$  برحسب مدول الاستیسیته هر کدام از مصالح بنایی  $E_{m0}$  توسط رابطه (۶) ارزیابی می‌شود.

$$G_{sh\_uncrack} = 0.4 \times E_{m0}$$

$$\varphi = \frac{\alpha\beta^2}{1 + \beta^2}$$

$$\varphi = \frac{\tau_b}{f_b} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\delta}{\omega}$$

$$\frac{\sigma'_b}{f_b} = \frac{\pi}{2} - \cot^{-1}(\beta) - \frac{\beta}{1 + \beta^2}$$

در رابطه فوق  $\tau_b$  تنش برشی آجر،  $\sigma'_b$  تنش فشاری آجر،  $f_b$  مقاومت فشاری آجر،  $\delta$  تغییرمکان برشی (لغزش) در سطح ترک،  $\omega$  بازشدگی (عرض) ترک و  $\alpha$  ضریب اعمال اصلاح آثار زبری سطح ترک است [21].

به منظور ارزیابی تنش در فنرهای برشی معرف رفتار ملات در هر واحد بنایی به شیوه مستقیم با تعیین تغییرمکان برشی (لغزش) و بازشدگی ترک بطور مستقل از هم، از معیار موهر-کولمب استفاده می‌شود؛ برای این منظور میزان تنش برشی نمونه بطور مستقیم از رابطه (۷) ارزیابی می‌شود.

$$\begin{cases} \tau_m = (|\sigma_{cc}| \tan \phi + c_{oh}) \times \sin^2(\theta) & \therefore \sigma_{cc} < 0 \\ \tau_m = 0.0 & \therefore \sigma_{cc} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

در رابطه فوق  $\tau_m$  تنش برشی ملات،  $\sigma_{cc}$  تنش محوری فشاری وارد بر ملات،  $c_{oh}$  مقدار چسبندگی ملات،  $\phi$  زاویه اصطکاک،  $\theta$  زاویه ترک است. برای آشنایی بیشتر با مدل رفتاری المان بنایی غیرمسلح در برش رجوع به مراجع [21, 23] توصیه می‌شود.

$$\begin{cases} \sigma_B = E_m \varepsilon_t & \therefore \varepsilon_t < \varepsilon_{crb} \\ \sigma_B = f_{tb} \left( \frac{\varepsilon_{crb}}{\varepsilon_t} \right)^c & \therefore \varepsilon_t \geq \varepsilon_{crb} \end{cases}$$

در رابطه فوق  $\sigma_{cc}$  تنش محوری فشاری وارد بر بلوک،  $\sigma_c$  مقاومت برشی ملات،  $\sigma_{cn}$  مقاومت برشی،  $E_m$  مدول الاستیک ملات،  $E_b$  مدول الاستیک آجر،  $\phi$  زاویه اصطکاک،  $\theta$  زاویه ترک،  $f_{tm}$  مقاومت کششی ملات،  $f_{tb}$  مقاومت کششی آجر،  $\sigma_A$  تنش کششی ملات،  $\sigma_B$  تنش کششی آجر است. در رابطه فوق ضریب توانی  $c$  بیانگر میزان انرژی مصرف شده برای انتشار و رشد ترک ایجادی در مصالح بنایی بوده که معرف انرژی شکست لازم می‌باشد. این ضریب وابسته به طول مینا یا همان اندازه المان معرفی شده می‌باشد.

#### ۳-۴- مدل رفتاری المان بنایی غیرمسلح تحت برش

در مورد رفتار برشی المان‌های بنایی پس از ترک خوردگی، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها بیانگر آن است که برای ارزیابی دقیق رفتار برشی، بطور کلی نیاز به تعیین روابط بین تغییرمکان برشی (لغزش) سطح ترک، بازشدگی آن، تنش برشی و تنش قائم فشاری است [20]. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، هر واحد بنایی از مجموعه فنرهای شبیه‌سازی کننده رفتار ملات و آجر تشکیل می‌شود که در این مطالعه عددی، چگونگی مدلسازی رفتار فنرهای برشی واقع در موقعیت ملات و یا آجر با شیوه‌های متفاوتی از هم صورت می‌پذیرد. بطور اجمالی با وقوع ترک در عضو تحت برش با رفتار نیمه ترد و یا ترد مشابه با مصالح بنایی، به دلیل وجود سطح زبر بین دو المان ترک خورده، به تدریج چسبندگی کاهش یافته و با ثابت ماندن ضریب اصطکاک بین دو المان جداسدگی به همراه بازشدگی و یا تنش فشاری ناشی از اتساع به وجود می‌آید. بنابراین برای مدلسازی دقیق این رفتار نیاز است که رابطه مابین تنش برشی با تغییرمکان برشی (لغزش) سطح ترک و میزان بازشدگی آن برقرار شود. در این مطالعه برای ارزیابی فنرهای برشی شبیه‌سازی کننده رفتار آجر در هر واحد بنایی مشابه با مدل

شکل ۸. مدل‌های رفتاری فشاری، کششی و برشی در مصالح بنایی

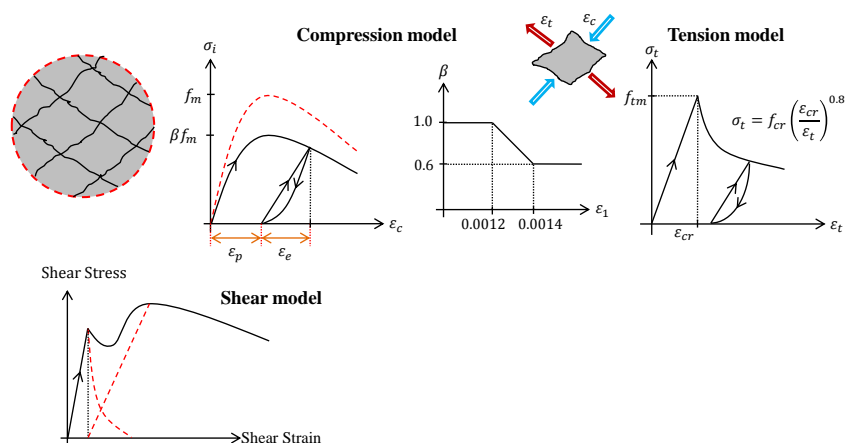


Fig. 8. Compression, tension, and shear behavioral models of masonry material

محوری فشاری اعمالی در دیوارها است. بار محوری فشاری برای دیوارهای J4D و J5D معادل با ۳ تن، برای دیوار J6D معادل با ۱۲ تن و برای دیوار J7D معادل با ۲۱ تن است. همه دیوارها بطور مشابه توسط ۱۸ ردیف آجر که ۱۶ رنج آن آزاد بوده و ۲ رنج ابتدایی و انتهایی آن مهار شده در غلاف‌های فولادی برای موقعیت‌های تکیه‌گاهی و بارگذاری هستند. شرایط بارگذاری دیوارها بدین صورت است که در گام نخست بار یکنواخت فشاری در کل طول دیوار اعمال و پس از آن در گام بعد با ممانعت از دوران قسمت فوقانی دیوارها، بار افزایشنده تغییر مکان افقی اعمال می‌شود (شکل ۹).

## ۵- تحلیل دیوار بنایی تحت بارگذاری یکنوا

به منظور ارزیابی الگوریتم محاسباتی و مدل‌های رفتاری استفاده شده در برنامه توسعه یافته، نتایج تحلیل تعدادی دیوار بنایی با مطالعات آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. برای این منظور از سری مطالعات آزمایشگاهی راجماکرز و ورملتفورت [24-25]، چهار دیوار بنایی بدون بازشو به ابعاد  $990 \times 1000$  میلی‌متر انتخاب و ارزیابی می‌شود (شکل ۹). نتایج آزمایشگاهی این دیوارها پیشتر نیز به منظور درستی‌آزمایی مدل عددی توسعه یافته توسط لورنسو استفاده شده است [2]. تنها تفاوت این دیوارها مطابق با آنچه در آزمایش اشاره شده است، میزان بار

شکل ۹. ابعاد، بارهای اعمالی، شرایط مرزی تکیه‌گاهی و مشخصات مصالح دیوارهای بنایی مورد بررسی [24-25]

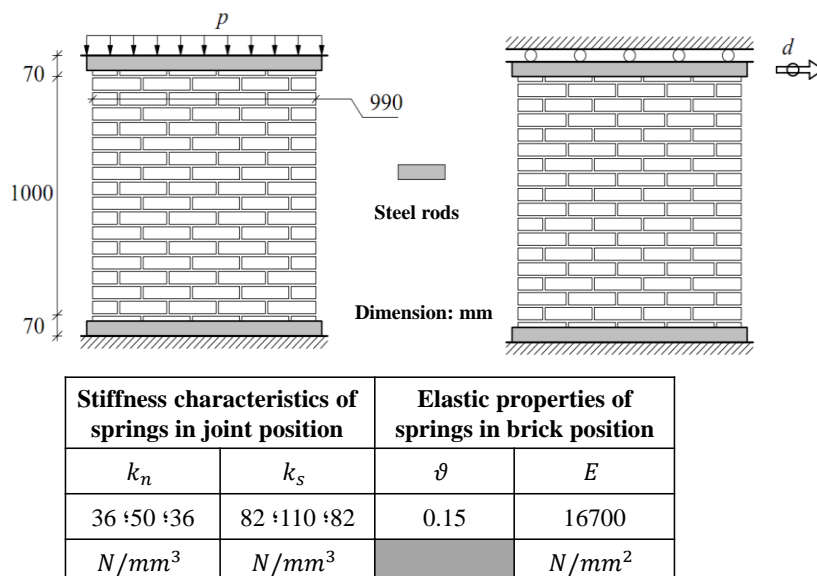


Fig. 9. Dimensions, applied loads, boundary conditions and material properties of considered masonry walls [24-25]

شکل ۱۰. مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی بار-تغییرمکان جانبی دیوارهای J4D، J5D، J6D و J7D به همراه الگوی تغییرشکل یافته آنها

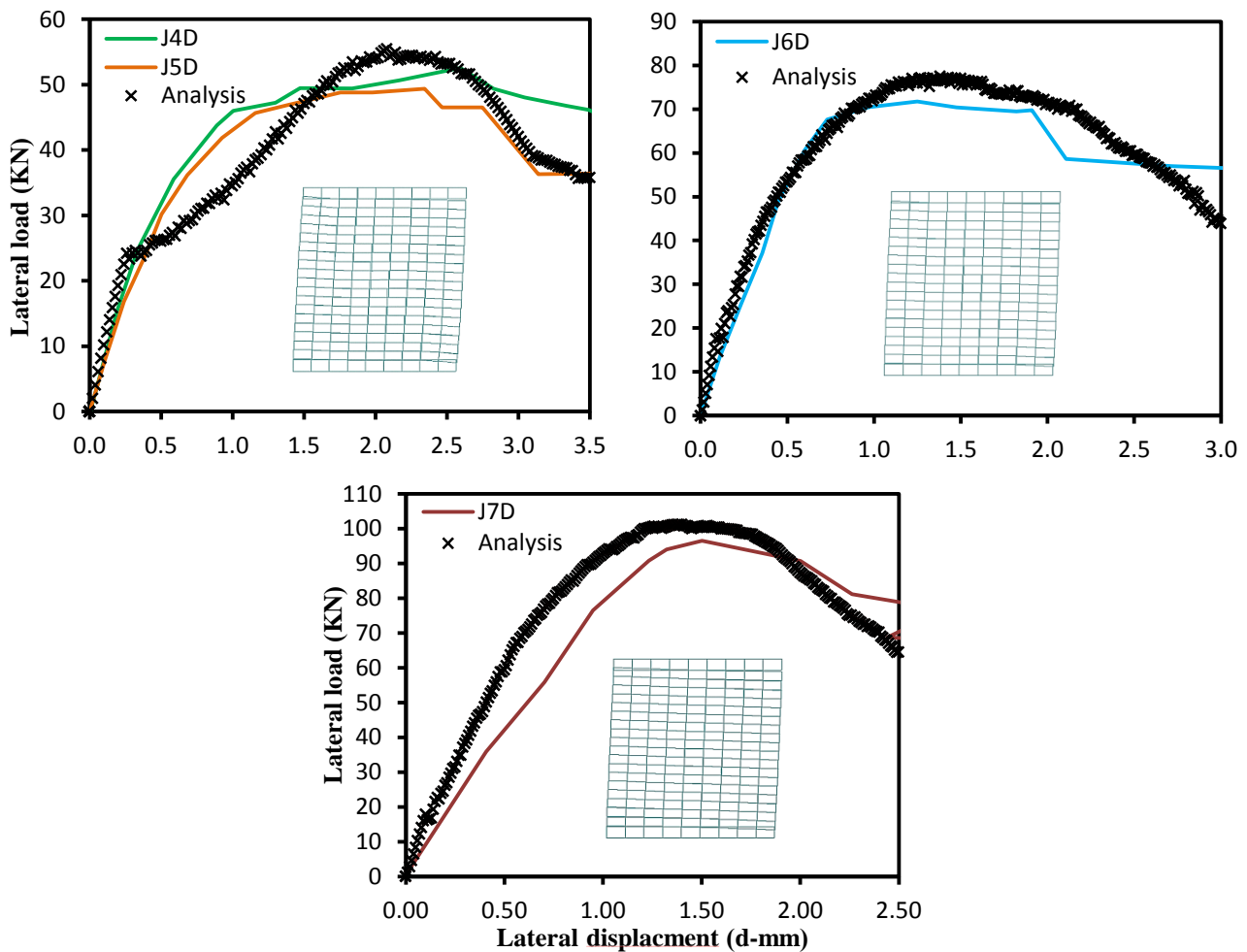


Fig. 10. Comparison of analytical and experimental results of lateral load-displacement curve of J4D, J5D, J6D and J7D walls with their deformed shapes

بنایی، میزان شکل‌پذیری کاهش یافته است. علت لغزش افقی در تغییرمکان جانبی حدود ۳ میلی‌متر (کاهش ناگهانی ظرفیت باربری دیوار J4D) ناشی از انتشار ترک در آجر و باز شدن کامل ترک در امتداد آن و بلوک‌های پیرامونی است. با این وجود بطور کلی سازوکار گسیختگی در همه دیوارها مشابه است. برای دیوارهای با بار محوری فشاری اولیه اندک (J4D و J5D)، ترک‌های کششی در موقعیت‌های اعمال بار و تکیه‌گاهی برای گام‌های اولیه بارگذاری تشکیل می‌شود، اما بعد از آن برای کلیه دیوارها ترک‌های کشش قطری در قسمت میانی به همراه وقوع و امتداد در آجرها و همچنین خردشدگی فشاری مصالح بنایی گسترش می‌یابد. لازم به ذکر است که این سازوکار گسیختگی مشابه با نتایج آزمایشگاهی است. بنابراین مقایسه

همچنین مشخصات فنرهای مدل‌سازی کننده اجزاء در دیوارهای آجری شامل مشخصات ارتجاعی آجر و سختی در ناحیه بنایی (شامل سختی توأم آجر و ملات) به ترتیب در شکل (۹) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مشخصات سختی‌های ارائه شده در این شکل، برای فنرهای نرمال و برشی در موقعیت ملات به ترتیب از چپ به راست برای دیوارهای J4D و J5D، J6D و J7D هستند. در شکل (۱۰) مقایسه منحنی بار-تغییرمکان حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی به همراه الگوی تغییرشکل دیوارها مشاهده می‌شود.

بررسی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای دیوارهای مفروض حاکی از آن است که همه آنها از رفتار نسبتاً شکل‌پذیری برخوردار هستند که البته با افزایش نیروی محوری بر دیوار

مختلف اعمال بار به ارزیابی دقیق پاسخهای سازه‌ای دست یافت. برای این منظور پس از تقسیم هر واحد بنایی به چهار بلوک صلب و اختصاص مشخصات ملات و آجر به فنرهای مابین بلوک‌ها، در فنرهای شبیه‌سازی کننده رفتار آجر مفاهیم روش ترک پخشی دو جهت اعمال می‌شود که در نتیجه آن امکان گسترش ترک علاوه بر موقعیت درز مابین ملات و آجر، در خود واحد بنایی (آجر و ملات) بطور مستقل نیز امکان‌پذیر می‌شود.

- مقایسه نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی حاکی از آن است که با اعمال اصلاحات برای ارزیابی سختی فنرهای متصل به بلوک‌ها و همچنین بکارگیری مدل‌های رفتاری معرفی شده در مصالح بنایی، امکان ارزیابی سازوکارهای مختلف خرابی سازه‌های بنایی به همراه الگوی ترک‌خوردگی آنها در مدل عددی توسعه یافته فراهم شده است. مقایسه نمودارهای بار-تغییرمکان جانبی دیوارها در مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی بیانگر دقت مناسب مدل عددی توسعه یافته است.

## References

## ۷- منابع

- 1- Romano A. 2005 Modeling, analysis and testing of masonry structures, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Napoli.
- 2- Lourenco P.B. 1996 Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University, Netherlands.
- 3- Cundall P.A. 1971 A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock systems, Proc. of the Symposium of the International society for Rock Mechanics, Society for Rock Mechanics, Nancy, France, 129-136.
- 4- Cundall P.A. & Strack O.D.L. 1979 A discrete element model for granular assemblies, Geotechnique, 29(1), 47-56.
- 5- Pagnoni T. 1994 Seismic analysis of masonry and block structures with the discrete element method, 10th European Conf. on Earthquake Engineering, Vienna, 1669-1674.

نتایج آزمایشگاهی منحنی بار-تغییرمکان جانبی دیوار بنایی با مطالعه عددی مؤید آن است که برنامه توسعه یافته بر مبنای روش المان مجزای بلوک صلب و فنر با بکارگیری مفاهیم ترک پخشی، از دقت و کارایی مناسبی برای ارزیابی رفتار غیرخطی دیوارهای بنایی برخوردار است. مطابق با انتظار روش بلوک صلب و فنر و فرضیات آن مبنی بر مدلسازی مجزا و مستقل از هم مصالح همراه با مدل‌های رفتاری معرفی شده، به عنوان یک روش تحلیلی عددی مناسب برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های با مصالح بنایی محسوب می‌شود.

## ۶- نتایج

تحلیل عددی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بنایی با وجود به پیچیدگی‌های رفتاری و هندسی آنها، با بکارگیری شیوه ریز مدلسازی امکان‌پذیر است. برای انتخاب روش عددی مناسب علاوه بر دقت نتایج، باید سهولت مدلسازی و پارامترهای لازم برای تعیین مشخصات رفتاری مصالح بنایی نیز مورد توجه قرار گیرند. با توجه به این موارد، برای این مطالعه عددی از روش المان مجزای بلوک صلب و فنر با بکارگیری مفاهیم روش ترک پخشی ثابت استفاده شده است تا بتوان دقت روش مربوطه برای ارزیابی پاسخ سازه‌های بنایی را ارتقا داد. مطابق با فرضیات روش بلوک صلب و فنر، انتظار می‌رود که تعداد درجات آزادی مدل عددی بر مبنای آن کمتر و به تبع آن سرعت تحلیل نسبت به سایر روش‌های عددی مبتنی بر المان مجزا مناسب‌تر باشد. خلاصه نتایج حاصل از مطالعات عددی به شرح زیر است:

- با توجه به اینکه در روش المان مجزای بلوک صلب و فنر، ارزیابی مشخصات هر کدام از فنرهای نرمال و برشی مدلسازی کننده رفتار ملات و یا آجر بطور مستقل از همدیگر صورت می‌پذیرد، بنابراین در این روش عملاً امکان ارزیابی دقیق رفتار عضو تحت بار برشی خالص (ویا ترکیبی از بارهای محوری و برشی) وجود نخواهد داشت. بنابراین می‌توان به عنوان یک راهکار مناسب و کاربردی با بکارگیری مفاهیم روش ترک پخشی ثابت بطور همزمان در فرضیات مدلسازی روش بلوک صلب و فنر به ازای شرایط

- verifications, *Structural Engineering and Mechanics*, 5(6), 743-754.
- 17- Maekawa K., Pimanmas A. & Okamura H. 2003 *Nonlinear mechanics of reinforced concrete*, London (England), Spon Press.
- 18- Zhuge Y., Thambiratnam D. & Corderoy J. 1998 *Nonlinear dynamic analysis of unreinforced masonry*, *Journal of Structural Engineering*, 124(3), 270-277.
- 19- Darwin D. & Pecknold D.A. 1977 *Nonlinear biaxial stress-strain law for concrete*, *Journal of Engineering Mechanics*, 103(2), 229-241.
- 20- Okamura H. & Maekawa K. 1990 *Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete*, Giho-do Press, Tokyo, Japan.
- 21- Ghiassi B. 2009 *Homogenization and development of constitutive models for seismic evaluation of brick masonry structures with reinforced concrete layer*, M.Sc. Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran (In Persian).
- 22- Li B., Maekawa K. & Okamura H. 1989 *Contact density model for stress transfer across cracks in concrete*, *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo*, 40(1), 9-52.
- 23- Salehi Delarestaghi I. 2006 *Average stress-strain constitutive models and fracture of brick masonry based on its micro structural characteristics*, M.Sc. Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran (In Persian).
- 24- Raijmakers T.M.J. & Vermeltoort A.Th. 1992 *Deformation controlled tests in masonry shear walls (in Dutch)*, Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft, The Netherlands.
- 25- Vermeltoort A.Th. & Raijmakers T.M.J. 1993 *Deformation controlled tests in masonry shear walls, Part 2 (in Dutch)*, Report TUE/BKO/93.08, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
- 6- Azevedo J., Sincaian G. & Lemos J.V. 2000 *Seismic behavior of blocky masonry structures*, *Earthquake Spectra*, 16(2), 337-365.
- 7- Giordano A., Mele E. & Luca A.D. 2002 *Modeling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study*, *Engineering Structures*, 24(8), 1057-1069.
- 8- Calio I., Marletta M. & Panto B. 2012 *A new discrete element model for the evaluation of the seismic behavior of unreinforced masonry buildings*, *Engineering Structures*, 40, 327-338.
- 9- Cannizzaro F., Panto B., Caddemi S. & Calio I. 2018 *A discrete macro-element method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches*, *Engineering Structures*, 168(1), 243-256.
- 10- Tagel-Din H. & Meguro K. 1996 *A new efficient technique for fracture analysis of structures*, *Structural Engineering and Earthquake Engineering, Bulletin of ERS*, 30, 103-116.
- 11- Meguro K. & Tagel-Din H. 1998 *A new simplified and efficient technique for fracture behavior analysis of concrete structures*, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Bulletin of ERS, Gifu, Japan*, 31, 51-61.
- 12- Malomo D., Pinho R. & Penna A. 2018 *Using the applied element method for modelling calcium silicate brick masonry subjected to in-plane cyclic loading*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(7), 1610-1630.
- 13- Kawai T. 1986 *Recent developments of the rigid body and spring model (RBSM) in structural analysis*, *Seiken Seminar Text Book, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo*, 226-237.
- 14- Kikuchi A., Kawai T. & Suzuki N. 1992 *The rigid-bodies spring models and their applications to three dimensional crack problems*. *Computers & Structures*, 44(1-2), 469-480.
- 15- Mayorca P. & Meguro K. 2003 *Modeling masonry structures using the applied element method*, *Journal of the Seisan-Kenkyu*, 55(6), 581-584.
- 16- Maekawa K., Irawan P. & Okamura H. 1997 *Path-dependent three-dimensional constitutive laws of reinforced concrete-formulation and experimental*

# Development of discrete element method for nonlinear analysis of unreinforced masonry members

S. Moshirabadi<sup>1</sup>, M. Soltani Mohammadi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student of Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>2\*</sup> Associate Prof. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[msoltani@modares.as.ir](mailto:msoltani@modares.as.ir)

## Abstract

One of the oldest and most durable building materials used for a large number of ancient structures by mankind is the masonry material. The advantages of this material such as few maintenance costs of masonry building and beautiful sight view of this structure, as well as its proper resistance to fire, have caused to be the boost building materials nowadays. Although numerical analysis of the seismic behavior of masonry structures due to their geometrical and behavioral complexities is difficult, it is possible to accurately evaluate them by using an appropriate recently developed modeling method. In order to select the appropriate numerical method in addition to the accuracy of the results, the simplicity of the modeling and the necessary parameters to determine the behavioral characteristics of the masonry materials must also be considered. Two major modeling approaches for simulating the behavior of masonry members are micro-modeling (heterogeneous model) and macro-modeling (homogeneous model). In the micro-modeling approach, the failure mechanisms and cracking pattern are precisely determined; but because of the required specifications and details, it is considered as a sophisticated modeling approach. In this study, the main purpose is to develop a micro-modeling approach based on the discrete element method (i.e. rigid block and spring method) for simulating in-plane behavior of unreinforced brick masonry buildings. For modeling each brick masonry wall in this paper, the masonry unit is defined which is consisted of a rigid block in the transverse direction and four blocks in the horizontal direction with two different types of springs. This unit represents, in fact, two bricks and connecting mortar in real condition. According to the assumption of the rigid block and spring method, the properties of the normal and shear springs are considered independently. In this situation, it is not practically possible to accurately estimate the behavior of masonry member in shear dominated case. In order to model cracking in brick, the two-way crack hypothesis and for subsequent behavior in each masonry unit, the idea of fixed smeared crack approach is implemented in this research. The properties of the normal and shear springs, simulating behavior of the mortar and the brick-mortar interaction, are determined separately by estimating the cracking opening and shear displacement in the crack surface. The Mohr-Coulomb criterion is used to evaluate the behavior of mortar-brick interface. The computational algorithm and developed FORTRAN code are described and validated. Comparison of analytical and experimental results showed that by applying corrections to evaluate the stiffness of springs attached to the blocks and also the application of behavioral models introduced in this paper for the masonry material, it is possible to evaluate the different mechanisms of failure of the masonry building along with their cracking pattern. Therefore, an accurate evaluation of the structural responses can be obtained by applying the smeared crack approach in the modeling assumptions of the rigid block and spring method for different loading conditions. The lateral load-displacement diagrams of the masonry walls in analytical and numerical models illustrate the appropriate accuracy of the developed numerical models.

**Key words:** Micro modeling, Discrete element method, Rigid block and spring method, Fixed smeared crack approach, Nonlinear analysis, Unreinforced masonry structure