

## کاربرد مدل چند صفحه‌ای برای تحلیل پوش آور سازه های بنایی غیر مسلح بزرگ مقیاس

امیر هوشنگ اخویسی

استادیار دانشکده فنی-گروه عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

Ahakhaveissy@razi.ac.ir

حمید توانایی فر

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه دانشگاه رازی کرمانشاه

hamidtavanaei@chmail.ir

محسن بیٹی

کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی همدان

m\_beyti@yahoo.com

کلید واژه‌ها: دیوار بنایی غیرمسلح، مدلسازی ماکرو، روش چندصفحه‌ای، ناهمسانی تحمیلی، سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی کرنشی

### چکیده

در این مقاله یک مدل ساده دوبعدی برای ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه های بنایی غیرمسلح که تحت بارگذاری درون صفحه قرار گرفته اند، ارائه شده است. این روش کاملاً دوبعدی است و این امکان را فراهم میسازد که تحلیل پوش آور بر روی سازه های بزرگ مقیاس بنایی بدون نیاز کاهش دیوارها به المان های یک بعدی انجام گیرد. در این روش یک مدل ماکرو بکار گرفته شده که در آن از مفهوم مدل چندصفحه ای برای مشخص شدن رفتار ساختاری بنایی استفاده میشود. در چارچوب مدل چندصفحه ای رفتار توابع تسلیم و پتانسیل پلاستیک بر روی تعدادی از صفحات نمونه به صورت مستقل در نظر گرفته میشود که در نتیجه آن جریان پلاستیک به طور کاملاً مستقل روی هر صفحه توسعه می یابد. بنابراین مدل های چندصفحه ای قادرند ناهمسانی تحمیلی را به طور ذاتی در نظر بگیرند. این ناهمسانی بعلت تشکیل ترک ها که عمود بر جهت تنش کششی اصلی است، ایجاد میشود. سطح تسلیم بکار گرفته شده در این مدل عبارتست از یک سطح تسلیم مورکلمب تعمیم یافته به همراه یک کپ فشاری و یک قطع کننده کششی. مدل چندصفحه ای مزبور در هر دو سطح نمونه و سازه، تأیید شده است. در سطح سازه ای، یک دیوار بزرگ مقیاس تحت اثر بارهای نموی افقی تحلیل شده و منحنی پوش آور بدست آمده با این مدل، با منحنی های حاصل از قاب های معادل استاندارد و سایر مدل های موجود در تحقیقات علمی مقایسه شده است.

### مقدمه

ساختمانهای بنایی یکی از قدیمی ترین سیستمهای سازه‌ای هستند که از گذشته‌های دور تاکنون رایج بوده‌اند. اولین گام در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها و نیز ارزیابی طرح تقویت مورد نظر، مدلسازی ساختمان‌ها می‌باشد. مدلسازی عددی دیوارهای آجری در چارچوب روشهای مقاومت، به طور کلی به سه دسته مدلسازی میکرو یا ریزمدلسازی، مدلسازی ماکرو یا درشت مدلسازی و المانهای ماکرو یا المانهای معادل تقسیم می‌شوند. ساده ترین روش برای مدلسازی ساختمان بنایی بر مبنای مدلسازی به وسیله ترکیبی از المان های سازه ای قرار دارد مانند المان خرپا، تیر، صفحه یا المانهای پوسته ای. برتری اصلی این روش در زمان و هزینه بسیار کم در مرحله مدلسازی (به دلیل نیاز به تعداد محدودی از پارامترها که با آزمایشهای متعارف قابل حصول است) و تحلیل (به این دلیل که هر المان ماکرو نماینده یک دیوار کامل یا یک پانل بنایی است و در نتیجه به میزان قابل توجهی تعداد درجات آزادی کاهش می‌یابد) است و عیب عمده آن اینست که توصیف کلی از بنایی ارائه می‌دهد (Akhaveissy 2012). اما بنایی آجری مصالحی است که شامل سه جزء اصلی (آجر، ملات و اتصال ملات آجر) می‌باشد. در ریز مدلسازی هر جزء بنایی به صورت جداگانه مدل



می‌شود. از جمله محدودیت های ریزمدلسازی، این حقیقت است که اندرکنش درزها با واحدهای بنایی (آجر) را نمیتوان بطور صحیح در نظر گرفت. در حقیقت بخاطر تفاوت های فاحش بین خواص مکانیکی آجرها و درزهای ملات، تنشهای جانبی مهم دیوار در نواحی مجاور به اتصالات توسعه می‌یابد، در کل، هرچند که مدلسازی در این روش از دقت قابل توجهی برخوردار است، اما از نظر حجم محاسبات و شیوه مدلسازی، بسیار پیچیده است و برای مدل سازی در ابعاد بزرگ کاربردی ندارد. تا کنون تعداد زیادی از ریز مدلهای برای مدلسازی سازه های بنایی تحت بارگذاری های یکنواخت و تناوبی به کار گرفته شده است (Lourenco (1996)، Akhveissy (2011)، Oliveira (2003)، Oliveira, Lourenco (2004)).

در مدلسازی ماکرو، دیوار آجری به صورت یک ماده هموزن و یکدست، با خواص مکانیکی معادل فرض می‌شود. مدلسازی در این روش ساده بوده و حجم محاسبات نیز بسیار کمتر از مدلسازی میکرو می‌باشد. در این مدلسازی هدف محاسبه رفتار یک سلول واحد مناسب عمومی بوسیله استخراج یک ضابطه ساختاری مستقیم بین حالت های تنش و کرنش متوسط است. چنین ضابطه ای را می‌توان به دو طریق به دست آورد، الف) بوسیله تکنیک های همگن سازی (Anthoine (1995,1997)، ب) با استفاده از آزمایش های اعمالی بر صفحه های بنایی به منظور تأمین پارامترهای رفتار ارتوتروپ (Lourenço, et al (1998) و ج) استفاده از مدلهایی که قادرند رفتار ارتوتروپ را بدون نیاز به پارامترهای اضافی مدل کنند (Akhveissy and Desai (2011)، Akhveissy and Milani (2013)). مدل اخیر از لحاظ کاربرد ساده تر از مدلهای ماکرو قبلی است و از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. با این حال همانند مدلهای قبلی پارامترهای زیادی را برای تحلیل نیاز دارد. بسیاری از مدلهای عددی ارائه شده در این زمینه نیاز به پارامترهای متعددی دارند که لازمه داشتن آنها انجام آزمایش های غیرمعارف و پرهزینه است و اجرای آن نیز نیاز به مهارت محاسباتی زیادی دارد. در این مقاله سعی شده یک مدل ماکرو با استفاده از نتایج آزمایش های معارف برای ارزیابی دیوار بنایی غیرمسلح ارائه گردد. در این تحقیق از یک ابتکار جدید جهت تحلیل دیوار بنایی استفاده شده است و آن استفاده از مدل چندصفحه ای است که اولین بار در مطالعه رفتار خاک بکار رفته است. این مدل قادر است رفتار ناهمسان تحمیلی ماده را به صورت ذاتی، پس از تسلیم در نظر بگیرد، این ناهمسانی در نتیجه تشکیل ترکهای عمود بر جهت تنش کششی اصلی بوجود می‌آید. ویژگی عمده مدل چند صفحه ای، ارائه مدل ساختاری در صفحه و نه در فضا است. بنابراین از پیچیدگی های بیش از حد مدلهای ساختاری ارائه شده در فضا در این روش کاسته می‌شود.

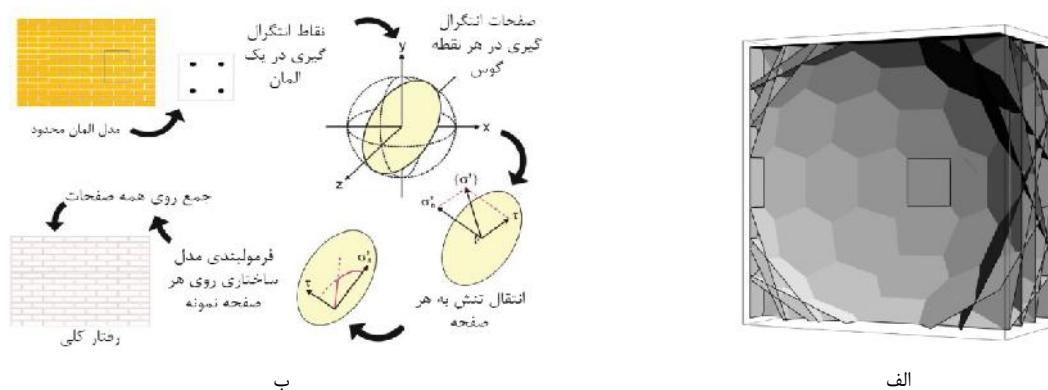
## اصول چارچوب چندصفحه ای

بطور کلی، چارچوب چندصفحه ای عبارت از یک رابطه ساده بین رفتار مکانیکی ماده در ریزمقیاس و درشت مقیاس است. چارچوب چندصفحه ای بر مبنای تئوری لغزش بوده که در سال ۱۹۳۸ برای مدلسازی رفتار پلاستیک فلزات، پیشنهاد شده است (Taylor, 1938). در این چارچوب رفتار کلی یک ماده، از خواص ماده روی سطوح لغزش بدست می‌آید. (Zienkiewicz, Pande, 1977). از این چارچوب برای مدلسازی سنگ های درزه دار استفاده کردند، مدلسازی مزبور با فرض اینکه ناهمسانی مشخص شده در سنگ را بتوان با تعداد محدودی از صفحات ضعیف، توصیف کرد، صورت گرفته است. (Pande, Sharma, 1983). این مفهوم را برای مدلسازی رفتار مکانیکی خاک توسعه دادند. در شکل ۱ در قسمت الف به صورت شماتیک صفحات تماس بر یک کره واحد به عنوان صفحات مورد نظر و در قسمت ب مفهوم نحوه کاربرد این مدل در یک برنامه المان محدود شرح داده شده است.

بر طبق چارچوب چندصفحه ای، می‌توان رفتار مکانیکی ماده را، با تعداد نامحدودی از صفحات لغزش خیالی، که به طور تصادفی در فضا جهت دار شده اند، جایگزین کرد. در نتیجه تغییر شکل پلاستیک جسم عبارت از حرکت پلاستیک در امتداد این صفحات می‌باشد. تنش های بین ذرات را می‌توان تنش روی این صفحات و تغییر شکل پلاستیک ماده را به صورت لغزش پلاستیک ذرات در امتداد این صفحات فرض نمود. بنابراین کل تغییر شکل ماده برابر با تغییر شکل الاستیک ذرات جامد و تغییر شکل پلاستیک حاصل از تغییر شکل روی صفحات مزبور می‌باشد. از آنجا که در نظر گرفتن تعداد نامحدودی از صفحات لغزش غیرممکن است، از اینرو تعدادی صفحه محدود و یک ضریب وزنی مربوطه، انتخاب می‌شود. صفحات انتخاب شده را صفحات نمونه<sup>۱</sup>، تماس<sup>۲</sup> یا انتگرال<sup>۳</sup> می‌نامند. در اینجا عبارت صفحات نمونه برای این مجموعه از صفحات اختیار می‌شود. دقت مدل، وابسته به تعداد، جهت و توزیع صفحات نمونه استفاده شده، می‌باشد.

در مدل های ساختاری همانند مدل چندصفحه ای، توابع پتانسیل و تسلیم به طور مستقل برای هر صفحه نمونه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین کرنش های پلاستیک روی هر صفحه به طور مستقل روی صفحه گسترش می‌یابد. از این رو در فرآیند بارگذاری، برخی از سطوح تسلیم فعال شده و برخی دیگر دست نخورده باقی می‌مانند. بنابراین مدل چندصفحه ای قادر است به طور ذاتی یعنی بدون نیاز به پارامترهای اضافی، ناهمسانی تحمیلی را محاسبه کند.





شکل ۱: الف-نمایی از ۳۳ صفحه برای نیمکره در فضا و ب: مفهوم کلی مدل‌های چند صفحه ای (Galavi, (2007)

تنش در سطح ریزمقیاس (تنشهای نرمال و مماسی بر روی یک صفحه خاص) بوسیله مفهوم تصویر تانسور تنش ماکروسکوپیکی روی صفحه مورد نظر بدست می‌آید. تابع تسلیم برای  $\mathbf{i}$  آمین صفحه نمونه را می‌توان به صورت تابعی از تنش در سطح میکرو و مجموعه ای از پارامترهای مقاومتی، نوشت:

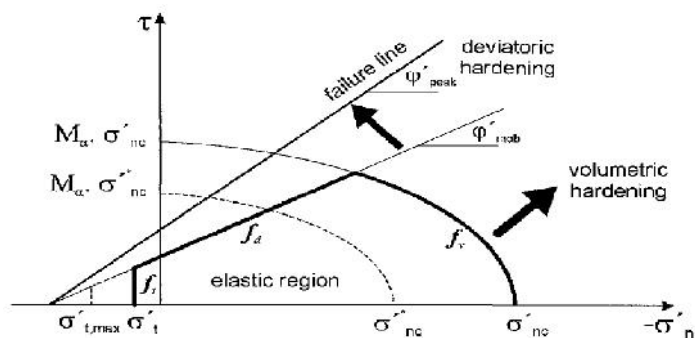
$$f_i = f_i(t'_i, t_i) \quad (1)$$

$$t'_i = [t'_{ni}, t_i]^T = \begin{bmatrix} t'_i n_i n_i \\ \|t'_i n_i - (t'_i n_i n_i) n_i\| \end{bmatrix} \quad (2)$$

که تانسور تنش مؤثر و بردار یکه نرمال مربوط به صفحه  $\mathbf{i}$  میباشد. بر اساس تئوری پلاستیسیته، نموهای کرنش پلاستیک متناسب با مشتق تابع پتانسیل پلاستیک (یا تابع تسلیم در حالت جریان وابسته) نسبت به تنش، هستند. نمو کرنش پلاستیک مربوط به  $\mathbf{i}$  آمین صفحه نمونه به صورت زیر داده می‌شود:

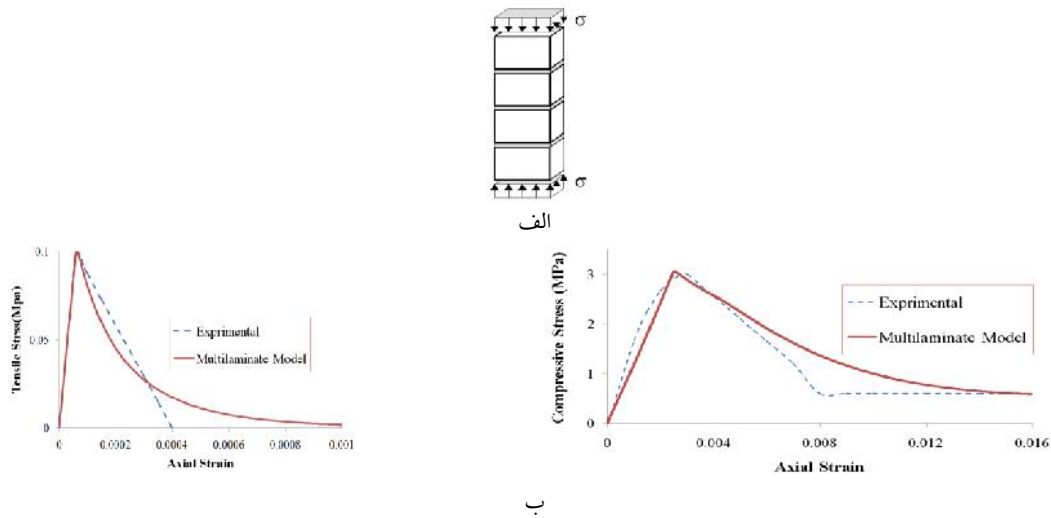
$$\Delta v_i^p = \Delta \lambda_i (\partial g_i / \partial t_i) \quad (3)$$

در این رابطه نمو ضریب پلاستیک در سطح میکرو و تابع پتانسیل پلاستیک در سطح میکرو است. فرمول بندی چندصفحه ای که در این مقاله استفاده می‌شود براساس مدلی است که توسط گالوی (Galavi and Schweiger, 2009, 2010) برای رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته، ارائه شده است. این مدل توانایی مدلسازی ناهمسانی ذاتی، خرابی و نرم‌شوندگی کرنش را دارد. شایان ذکر است، مدل سطح تسلیم استفاده شده توسط گالوی که در شکل (۲) نمایش داده شده است همان مدل مورد استفاده توسط (Lourenco (1996)، Akhaveissy (2011)، Oliveira (2003)، برای مدلسازی رفتار درزه ملات در ریز مدلسازی دیوارهای بنایی غیر مسلح است. از این رو، در تحقیق حاضر می‌توان از این فرمول بندی برای تحلیل دیوارهای بنایی استفاده کرد. ضابطه تسلیم مدل چندصفحه ای به طور مستقل برای هر صفحه نمونه ای تعریف شده و در حالت ایزوتروپیک، در تمام صفحات نمونه، شکلی کاملاً مشابه دارد.



شکل ۲: منحنی تسلیم و ضابطه گسیختگی روی صفحه نمونه (Galavi and Schweiger (2009)

تابع تسلیم استفاده شده شامل سه تابع مستقل ( ، و ) از مؤلفه های تنش مؤثر یعنی به ترتیب قسمت‌های انحرافی، حجمی و کششی از منحنی پوش است (شکل ۳).



شکل ۳: الف-منشور بنایی استاندارد و ب-مقایسه نمودار تنش-کرنش ساخته شده و حاصل از مدل چندصفحه ای برای منشور بنایی آجری به کار رفته در دیوار دارای بازشو

تابع تسلیم انحرافی تعمیمی از ضابطه موهر-کلمب است که یک زاویه اصطکاک انتقالی را بکار می‌گیرد):

$$f_d = \dagger + \dagger'_n \cdot \tan \{ \dagger'_{mob} - \frac{c'_{mob} \cdot \tan \{ \dagger'_{mob}}{\tan \{ \dagger'_{peak}} = 0 \quad (6)$$

$$\tan \{ \dagger'_{mob} = \tan \{ \dagger'_i + (\tan \{ \dagger'_{mod} - \tan \{ \dagger'_i) \cdot \frac{V_{x,d}^p}{V_{x,d}^p + A_{mat}} \quad (7)$$

$$R_f = \frac{\tan \{ \dagger'_{peak}}{\tan \{ \dagger'_{mod}} \quad (8)$$

که ، و به ترتیب زوایای اصطکاک مؤثر اولیه، نهایی و اصلاح شده هستند. پارامتری است که نرخ سخت شوندگی انحرافی را کنترل می‌کند و می‌تواند به وسیله کالیبراسیون در مقابل داده های آزمایش سه محوری محاسبه گردد. شایان توجه است، مقادیر بزرگتر موجب انتقال کندتر زاویه اصطکاک با کرنش های برشی پلاستیک بزرگتر می‌شود. در کار حاضر این پارامتر و سایر پارامترهای مجهول بوسیله کالیبراسیون در مقابل آزمایش یک منشور بنایی محاسبه می‌گردد. نسبت گسیختگی که به طور معمول برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود. انتقال زاویه اصطکاک به وسیله کرنش برشی پلاستیک بر مبنای قسمت انحرافی از تابع تسلیم کنترل می‌گردد).

از سوی دیگر قسمت حجمی تابع تسلیم ( معادله ۹)، یک تابع بیضوی شکل که در هنگام سخت شوندگی حجمی با افزایش کرنش نرمال پلاستیک تجمعی  $v_{n,v}^p$  توسعه می‌یابد. این رفتار به وسیله معادله (۹) شرح داده می‌شود که رابطه ای برای انبساط حجمی از تابع تسلیم ارائه می‌دهد. شایان توجه است، قطر کوچک بیضی معادل با است. ضریب شکل که شکل را تعیین می‌کند بوسیله معادله (۱۰) تعیین می‌شود. همچنین برابر با ۰/۶۷ در نظر گرفته می‌شود. تنش نرمال پیش تحکیمی مؤثر واقعی و مقدار اولیه آن است، که می‌تواند به صورت تنش تسلیم نرمال خاک در نتیجه تنش های اولیه روی صفحه موردنظر، فرض شود، با توجه به استفاده از این سطح تسلیم در مدلسازی رفتار سازه بنایی و عدم وجود این پارامترها در سازه، در ادامه مقادیری برای آنها فرض خواهد شد، به گونه ای که اثر این پارامترها در مدل حاضر قابل صرف نظر باشد. پارامتر سخت شوندگی  $K$  در معادله (۱۱)، در خاک تابعی از شیب خط فشاری نرمال و شیب خط باربرداری- بارگذاری مجدد در دیگرام  $p' - e$  و نسبت تخلخل در تنش است که در این تحقیق به صورت ثابت و برابر با ۱/۰ اختیار شده است

$$f_v = \frac{\dagger'^2_n}{\dagger'^2_{nc}} + \frac{\dagger^2}{(M_{\infty} \cdot \dagger'_{nc})^2} - 1 = 0 \quad (9)$$

$$M_{\infty} = \alpha \cdot \tan\{\prime_{peak} \quad (10)$$

$$\dagger'_{nc} * = \dagger'_{nc,i} * \cdot e^{-K \cdot V_{n,v}^p} \quad (11)$$

و به ترتیب، تنش نرمال پیش تحکیمی مؤثر واقعی و اولیه رس خراب شده را نشان میدهد. تنش نرمال پیش تحکیمی مؤثر واقعی تابعی از ساختار فعلی خاک است.

در مصالح حاضر که بنایی آجری استمی توان تنش پیش تحکیمی را برابر با یک عدد کوچکی فرض کرد (با توجه به عدم حضور این تنش در سازه) و مقدار را برابر با مقاومت فشاری مصالح بنایی در نظر گرفت. به عنوان مثال در صورتی که فرض گردد و مقدار برای یک منشور مصالح بنایی با مقاومت فشاری 3.0Mpa- انتخاب گردد، حدود مقدار طبق معادله (12)

$$b_i = \frac{\dagger'_{nc,i}}{\dagger'_{nc,i} *} \quad (12)$$

برابر با 3000 به دست می آید، و با کالیبره کردن منحنی تنش- کرنش حاصل از مدل چندصفحه ای در یک نقطه گوس درمقابل منحنی تنش-کرنش مربوط به منشور مصالح بنایی، می توان مقدار دقیق آن را که برابر 3350 است را تعیین کرد. قسمت سوم از سطح تسلیم ( ) یک برش قطع کننده کششی را تعریف می کند.

$$f_t = \dagger'_n - \dagger'_t \quad (13)$$

مقاومت کششی واقعی است و در صورت نبود داده در این زمینه میتوان مقدار پیش فرض  $c'_{peak} / \tan\{\prime_{peak}$  را برای آن اختیار کرد. شایان ذکر است که در این مدل برای تمام سطوح تسلیم ، و ، قانون جریان وابسته در نظر گرفته شده است.

## اعتبار سنجی مدل

در مدل سازی سازه های بنایی به روش ماکرو از اندرکنش بین بلوک های آجری و درزه ملات صرف نظر می شود Akhaveissy, Desai (2011). بنابراین رفتار مصالح بنایی با رفتار معادل یک منشور که شامل بلوک و درزه ملات است، همگن سازی می شود. از این رو در ادامه به بررسی رفتار این نوع از مصالح در کشش و فشار پرداخته می شود.

## اعتبار سنجی مدل در سطح نمونه:

به منظور نمایش توانایی مدل در ارائه رفتار مصالح بنایی، با استفاده از پارامترهای داده شده در جدول (1)، اعتبار سنجی مدل ارزیابی می شود. این ارزیابی در یک نقطه گوس با استفاده از انگرال گیری بر روی روابط ساختاری نموی بدست آمده است. شکل (3)، نتایج حاصل از مدل چندصفحه ای در یک نقطه تنش (ماکروسکوپی) برای یک منشور بنایی آجری براساس داده های جدول (1)، با منحنی تنش-کرنش آزمایشگاهی را نشان می دهد.

پارامترهایی همچون مقاومت فشاری (f<sub>t</sub>)، مقاومت کششی (f<sub>t</sub>)، زاویه اصطکاک گسیختگی (i)، چسبندگی (C)، مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν̂)، مشخصات متعارف سازه بنایی هستند که به سادگی از آزمایشهای فشاری، کششی و برشی بر روی نمونه های بنایی همانند نمونه های بتنی بدست می آیند. برخی دیگر از پارامترها نظیر A<sub>mat</sub>، b<sub>i</sub>، با کالیبره کردن منحنی تنش-کرنش حاصل از مدل چندصفحه ای در یک نقطه گوس در مقابل منحنی تنش-کرنش مربوط به منشور مصالح بنایی، تعیین میشوند. همانگونه که مشخص است، نتایج به دست آمده از مدل چندصفحه ای توافق نسبتاً خوبی با رفتار مشاهده شده بر مبنای رفتار آزمایشگاهی را ارائه می دهد. در این راستا، تحلیل دیوار بنایی غیر مسلح همراه با بازشو که دارای مقاومت کششی بسیار پایین نسبت به مقاومت فشاری، حدود یک درصد، می باشد مورد مطالعه قرار می گیرد. شایان توجه است چنین دیواری دارای رفتار بسیار ترد و شکننده می باشد که تحلیل عددی آن ممکن است به سختی انجام شود.



جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز برای مدل چندصفحه‌ای

نوع مصالح	پارامترهای مورد نیاز برای مدل							
	$E (MPa)$	$\nu$	$\{f_c$	$C(MPa)$	$A_{mat}$	$b_i$	$f'_m (MPa)$	$f_t (MPa)$
دیوار بنایی	1650	0.15	$26^\circ$	0.15	0.01	3350	3.0	0.1

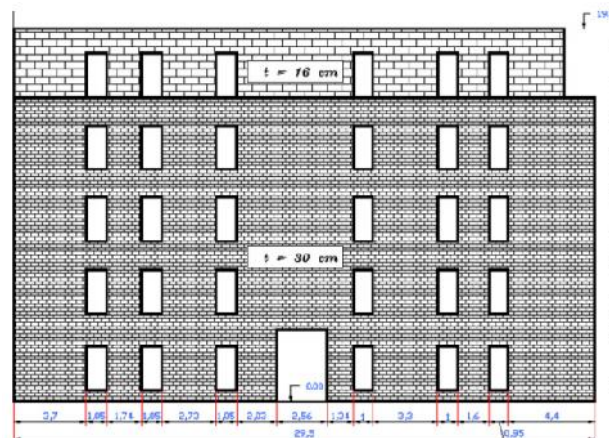
## مثالهای عددی

مدلسازی عددی سازه‌های بنایی مختلف با مقاومت‌های فشاری و کششی متفاوت واحدهای بنایی مشتمل بر بلوک‌های آجری و درزه ملات در نظر گرفته شده است. در این راستا برنامه کامپیوتری به زبان فرترن برای تحلیل سازه‌های با رفتار تنش مسطح و کاربرد مدل چند صفحه‌ای آماده شده است. جزئیات تحلیل غیر خطی عددی در چارچوب اجزای محدود مطابق با دستورالعمل‌های داده شده در (Smith and Griffiths (2004 می‌باشد.

## ساختمان بنایی غیر مسلح یک طبقه

یک دیوار داخلی از ساختمان پنج طبقه واقع در Martoglio (کاتانیا، ایتالیا) بوسیله مفاهیم ارائه شده در این مقاله در مورد مدل چند صفحه‌ای، آنالیز شده است (شکل ۴). ضخامت دیوار طبقه آخر ۱۶۰ میلی‌متر است درحالی‌که ضخامت دیوار سایر طبقات ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. داده‌های عددی مربوط به مصالح بنایی این ساختمان که در مدلسازی حاضر استفاده شده، (چسبندگی  $C$ ، مقاومت کششی  $f_t$ ، مقاومت فشاری  $f_c$  و زاویه اصطکاک  $\Phi$ ) از (Brencich et.al (2000 استخراج گردیده و در جدول ۱ خلاصه شده است.

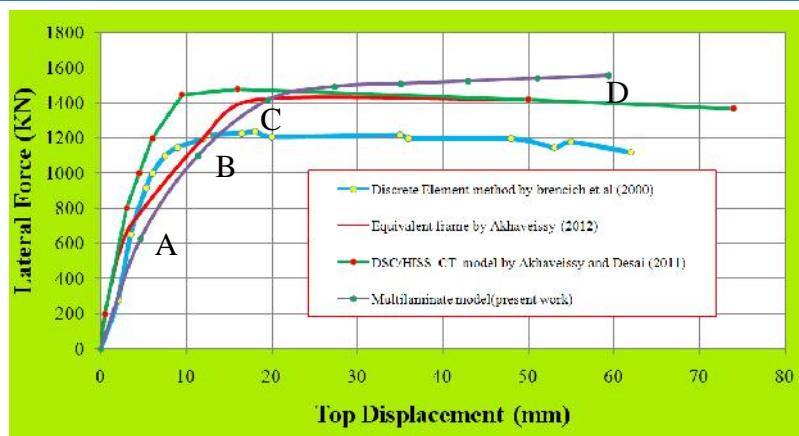
گسسته‌سازی استفاده شده مشابه با (Akhavessy and Milani (2013 برای تحلیل دیوار عبارتست از ۳۱۶۸ المان هشت گرهی ایزوزارامتریک و ۱۱۹۱۹ گره، تعداد درجات آزادی برابر با ۲۰۲۷۴ است. نیروهای استاتیکی معادل که در تراز طبقات برای مدل اعمال شده، مجدداً از (Brencich et.al (2000، استخراج شده است. در این تحلیل غیرخطی از ضابطه همگرایی جابجایی استفاده شده است. ماکزیمم خطای مجاز در هر تکرار معادل است با ۰/۰۱، منحنی ظرفیت تأمین شده بوسیله مدل حاضر با نتایج بدست آمده از سایر مدلها در شکل ۵ مقایسه شده است، به عنوان مثال مدل حاضر با روش قاب معادل (Akhavessy (2012)، المان مجزا (Brencich et.al (2000) و مدل (DSC/HISS-CT) (Akhavessy and Milani (2013) شکل ۵ توافق خوبی را بین همه مدلها نشان می‌دهد.



شکل ۴: ساختمان پنج طبقه، هندسه (برحسب متر) مربوط به دیوار داخلی مورد نظر (Brencich et.al (2000

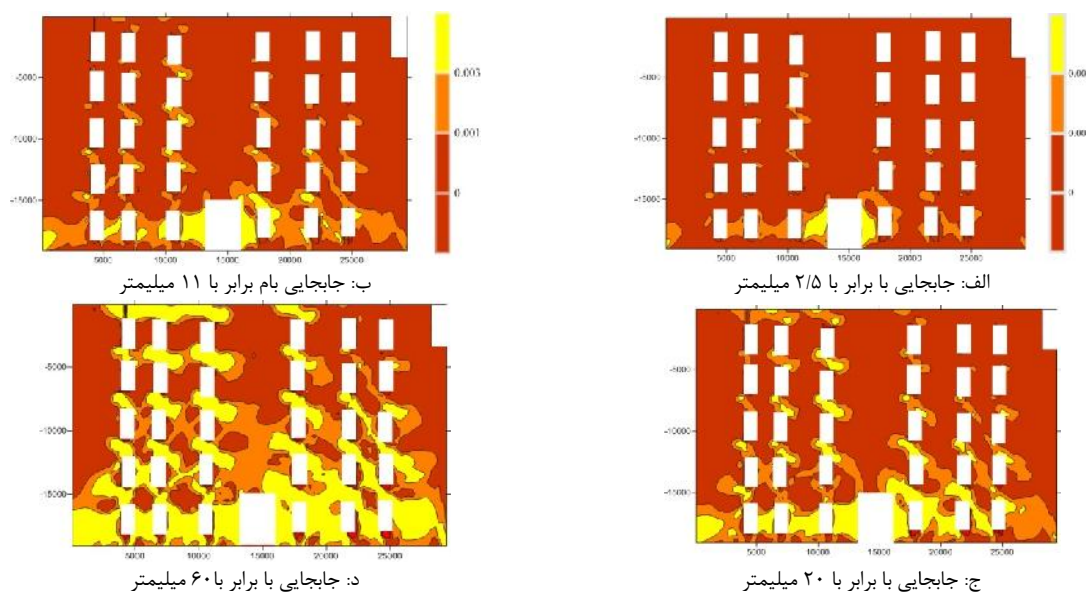
بویژه برش پایه نهایی بدست آمده با روشهای مدل چندصفحه‌ای، قاب معادل، DSC/HISS-CT و المان مجزا نسبتاً مشابه اند و به ترتیب برابرند با ۱۵۵۰، ۱۴۳۰، ۱۴۸۰ و ۱۲۵۸ کیلونیوتن. نهایتاً این نکته جالب توجه است که مدل حاضر به وضوح رفتار شکننده قابل مشاهده ای را نشان می‌دهد.





شکل ۵: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی، حاصل از پیش بینی مدل‌های چندصفحه‌ای در کار حاضر و قاب معادل، DSC/HISS CT و المان مجزا

الگوی ترک خوردگی تأمین شده بوسیله مدل مولتی لمینایت در افزایش جابجایی بام در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشهود است دیوارهای پیشانی (تیرها) در طبقات و دیوارهای پایه طبقه همکف بیشترین سهم آسیب پذیری را داشته اند. از طرفی در جابجایی های کلی نسبتاً ناچیز، پایه درب ورودی ساختمان شدیداً ترک خورده، و این خرابی در نقطه B از شکل ۵ به طور پیش رونده در سطح گسترده ای از پایه پخش شده است. بوسیله یک آنالیز دقیق از الگوی ترک، میتوان استنباط کرد که اینچنین نواحی میبایست کاملاً تقویت شوند. در نقطه D از شکل ۵ که برابر با جابجایی بام در حدود ۶۰ میلی‌متر است، همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده یک مکانیزم گسیختگی در طبقه همکف رخ داده و در این نمو از بار دیگر همگرایی در تحلیل رخ نداده است.



شکل ۶: مقایسه وضعیت کرنش پلاستیک نقاط مختلف دیوار الف: نقطه A، ب-نقطه B، ج- نقطه C و د: نقطه D.

## نتیجه گیری

یک روش المان محدود غیرخطی با جزء ایزوپارامتریک ۸ گرهی برای ترکیب بلوک های بنایی و درزه ملات جهت پیش بینی رفتار سازه‌های بنایی غیر مسلح، استفاده شده است. مدل چندصفحه‌ای با قانون جریان وابسته برای مشخص کردن رفتار فشاری و کششی سازه‌های بنایی استفاده گردید. این مدل، برای واحد بنایی در سطح نمونه ارزیابی گردید که پاسخ های مناسبی را ارائه می‌کند. پیش گویی های عددی با استفاده از مدل مزبور در روش اجزای محدود برای دیوار های برشی بنایی در مقایسه با سایر مدل‌های اصلی و تأیید شده، نتایج خوبی را ارائه می‌کند. عیب اصلی این مدل‌سازی، زمان بیشتر تحلیل در مقایسه با سایر مدل‌های رفتاری است چرا که بجای بررسی مدل ساختاری در سه صفحه در فضا، مدل را در تعداد صفحات بیشتری (در تحقیق حاضر ۶۶ صفحه) بررسی میکند، که البته این عیب با توجه به پیشرفت تکنولوژی در حوزه سخت افزاری، اهمیت چندانی ندارد، اما از مزایای این روش اینست که این مدل می‌تواند رفتار سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی مصالح را پیش بینی کرده و مودهای گسیختگی را بدون نیاز به پارامترهای اضافی تشخیص دهد، از طرفی چون این مدل در فضای دوبعدی (روی هر صفحه نمونه) توسعه

## مراجع

- Akhaveissy AH (2011) Lateral strength force of URM structures based on a constitutive model for interface element, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 8, pp. 445 – 461, 2011
- Akhaveissy AH (2012) Finite element nonlinear analysis of high-rise unreinforced masonry building. *Latin Am J Solids Struct*; 9:547–67
- Akhaveissy AH, Desai CS (2011) Unreinforced Masonry Walls: Nonlinear Finite Element Analysis with a Unified Constitutive Model, *Arch Comput Methods Eng*, Vol. 18, pp. 485–502
- Akhaveissy AH, Milani G (2013) Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model, *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 276–295
- Anthoine A (1995) Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenisation theory, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 32(2), pp. 137–63
- Anthoine A (1997) A Homogenisation of periodic masonry: Plane stress, generalised plane strain or 3D modelling, *Comm. Num. Meth. Engrg.*, Vol. 13, pp. 319–326
- Brencich A, Gambarotta L and Lagomarsino S (2000) Analysis of a masonry building in via martoglio. pages 107–143. Catania Project: Research on the seismic response of two masonry buildings, [chapter 6], University of Genoa [in Italian], CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti
- Galavi V (2007) A multilaminate model for structured clay incorporating inherent anisotropy and strain softening. PhD thesis, TU Graz, Austria, Hest 32
- Galavi V and Schweiger H (2010) Nonlocal Multilaminate Model for Strain Softening Analysis, *Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. 10:1(30), pp. 1532–3641
- Galavi V and Schweiger HF (2010) A multilaminate model with destructuration considering anisotropic strength and anisotropic bonding, *Soils Found.*, Vol. 49(3), pp. 341–354, 2009
- Lourenço PB (1996) Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Thesis, Available from: <www.civil.uminho.pt/masonry>
- Lourenço PB, Rots JG and Blaauwendraad J (1998) Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124(6), pp. 642–652
- Oliveira DV (2003) Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading, Ph.D. thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal. Available from: <http://www.civil.uminho.pt/masonry>
- Oliveira D and Lourenço PB (2004) Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behavior of interface elements, *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 1451–61, 2004.
- Pande GN and Sharma KG (1983) Multilaminate model of clays a numerical evaluation of the influence of rotation of principal stress axes. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 7, No. 4, 397–418
- Smith IM and Griffiths DV (2004) Programming the Finite Element Method, 5th ed., John Wiley & Sons, Ltd
- Taylor GI (1938) Plastic strain in metals. *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 62, 307–324. Reprinted in: The Scientific Papers of G.I. Taylor 1, 1958, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Zienkiewicz OC and Pande GN (1977) Time-dependent multilaminate model of rocks - A numerical study of deformation and failure of rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 1, No. 3, 219–247.