

محاسبه ثوابت الاستیک دیوارهای آجری غیرمسلح بر اساس دیدگاه همگن سازی و میکرومکانیک در عملکرد غشایی و خمشی

ارسلان کالالی¹ و محمد زمان کبیر^{2*}

¹ دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

² دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت 87/11/1، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/9/14، تاریخ تصویب 89/12/22)

چکیده

برای تحلیل و ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی، تعیین مشخصات اصلی سازه‌های دیوارها مانند: سختی، ظرفیت باربری نهایی و ... ضروری است. مدل‌سازی میکرو در یک دیوار آجری به علت نحوه قرار گرفتن آجرها و درزهای افقی و قائم ملات و تعداد زیاد آنها، بسیار مشکل و تقریباً غیرکاربردی است و نیاز به انجام مدل‌سازی ماکرو می‌باشد. در مدل‌سازی ماکرو، یک ماده همگن جایگزین مصالح بنایی می‌شود. در تحقیق حاضر، یک سری روابط تحلیلی جهت تعیین مشخصات این ماده همگن معادل استخراج شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی جهت همگن‌سازی دیوارهای آجری غیرمسلح، در حالات مختلف دیوارهای توپر در بارگذاری داخل صفحه‌ای با مدل‌سازی دقیق مقایسه و مشخص شد که دقت مناسبی در برآورد مشخصات خطی دیوار مانند سختی و مشخصات غیرخطی دیوار مانند مقاومت نهایی دارد و در عین حال، باعث سهولت بسیار زیاد در مدل‌سازی و تحلیل ساختمان‌های بنایی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دیوار آجری، همگن‌سازی، بارگذاری داخل صفحه‌ای، تحلیل، سختی، مقاومت.

مقدمه

ملات) جداگانه مدل می‌شوند. این روش مدل‌سازی، مشکل و زمان‌بر است و اطلاعات ورودی زیادی نیاز دارد مانند: مشخصات مکانیکی آجر و ملات، مشخصات هندسی آجرها و درزهای افقی و قائم ملات، نحوه چیدمان آجرها و ...

2- مدل‌سازی ماکرو؛ مصالح بنایی به عنوان یک ماده همگن یک فازه در نظر گرفته شده که جایگزین آجر و ملات می‌شود و مشخصات مکانیکی آن با مشخصات مکانیکی اجزایش (آجر و ملات) متفاوت است و به نوعی میانگین آنها می‌باشد. ماده همگن معادل می‌تواند ایزوتروپیک یا ارتوتروپیک یا ... باشد. این روش مدل‌سازی، ساده و سریع است و اطلاعات ورودی کمی نیاز دارد.

علاوه بر این دو روش مدل‌سازی میکرو و ماکرو، یک روش شبه‌میکرو نیز قابل تعریف است [7] که نیازمند تجربه می‌باشد. در این روش، اگر در یک دیوار آجری با هندسه و بارگذاری مشخص، بتوان مسیر ترک‌خوردگی را حدس زد، می‌توان کل دیوار را به صورت قطعاتی پیوسته مدل نمود و تنها در مرزهای بین این قطعات پیوسته (مسیرهای ترک‌خوردگی پیش‌بینی شده)، المان‌های

ساختمان‌های آجری غیرمسلح موجود، بخش قابل توجهی از ساختمان‌های سرتاسر جهان را تشکیل می‌دهند. زلزله‌های اخیر بارها آسیب‌پذیری این ساختمان‌ها را اثبات کرده است. زیرا تعداد زیادی از آنها در مناطق لرزه‌ای واقع‌اند ولی اساساً برای بارگذاری لرزه‌ای طراحی و ساخته نشده‌اند. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای این سازه‌ها و در صورت لزوم، بهبود عملکرد آنها دارای اهمیت زیادی است. برای پاسخ به این چالش، روش‌های ارزیابی و تکنیک‌های تقویت به طور پیوسته در حال ترقی می‌باشند [1-3].

در ساختمان‌های آجری، اعضای سازه‌ای اصلی که با نیروهای جانبی مقابله می‌کنند، دیوارها هستند. این دیوارها در صفحه خود سختی و مقاومت بالایی دارند و عملکرد اصلی آنها در این صفحه صورت می‌گیرد و به پایداری ساختمان کمک می‌کنند. با توجه به اهمیت زیاد این اعضا، تحقیق حاضر بر روی آنها متمرکز شده است.

برای تحلیل سازه‌های آجری، محققین مختلف از یکی از روش‌های زیر برای مدل‌سازی استفاده کرده‌اند [4-6]:

1- مدل‌سازی میکرو؛ مصالح بنایی به عنوان یک ماده مرکب دو فازه در نظر گرفته می‌شود که اجزایش (آجر و

بنایی از آزمایش به دست آمده است.

از آنجا که برای تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک ساختمان بنایی، استفاده از روش مدل‌سازی میکرو به علت تعداد زیاد آجرها و نحوه قرار گرفتن آنها عملاً غیرممکن است و همچنین احتمال خطا بسیار زیاد بوده و تامین پیوستگی بین تمام اجزا در مدل، مشکل می‌باشد و از طرفی، برای انجام مدل‌سازی ماکرو نیز، مشخصات ماده همگن معادل باید تعیین شود، روش‌های مختلفی برای همگن‌سازی دیوار بنایی غیرمسلح و انجام مدل‌سازی ماکرو پدید آمده است. در روابط تحلیلی مربوط به تعیین مشخصات ماده همگن معادل مصالح بنایی [4-6]، برای سادگی تنها به آجرها و درزهای افقی ملات توجه شده و از اثر کاهنده درزهای قائم ملات صرف‌نظر شده است لذا برای توسعه و بهبود دقت روابط تحلیلی موجود، در اینجا وجود درزهای قائم ملات نیز در نظر گرفته شده و اثر آن در روابط وارد شده است.

با توجه به نحوه قرارگیری آجرها و درزهای افقی و قائم ملات در دیوار که موجب می‌شود تا سختی مصالح دیوار در امتدادهای مختلف متفاوت باشد، در اینجا ماده همگن معادل، ارتوتروپیک فرض شده و 9 پارامتر مستقل مورد نیاز برای تعریف آن استخراج شده است. در ادامه کارایی این روابط و فرضیات صورت گرفته، بعد از مقایسه با مدل‌سازی میکرو اثبات شده است. سادگی حاصل از روابط پیشنهادی بسیار زیاد است به گونه‌ای که برای مدل‌سازی یک دیوار آجری غیرمسلح بدون توجه به وضعیت آجرها و درزهای افقی و قائم ملات، ترسیم تنها یک مکعب مستطیل، اختصاص خواص مکانیکی ماده همگن ارتوتروپیک معادل، مش‌بندی و سپس تعریف شرایط مرزی و اعمال بارگذاری کافی است.

در اثبات روابط ریاضی پیشنهادی سعی شده است با حفظ دقت، از مفاهیم ساده تعادل نیروها و سازگاری تغییرشکل‌های مقاومت مصالح استفاده شود تا این روابط به سادگی قابل استفاده باشند و بتوان آنها را به هر دیوار بنایی با هر چیدمان آجر چه در نما و چه در ضخامت تعمیم داد و استفاده نمود.

همگن‌سازی دیوارهای آجری غیرمسلح

در این بخش، علائم σ ، ϵ ، E ، τ ، γ ، P ، G ، V ، δ و Δ به ترتیب مربوط به تنش قائم، کرنش قائم، مدول

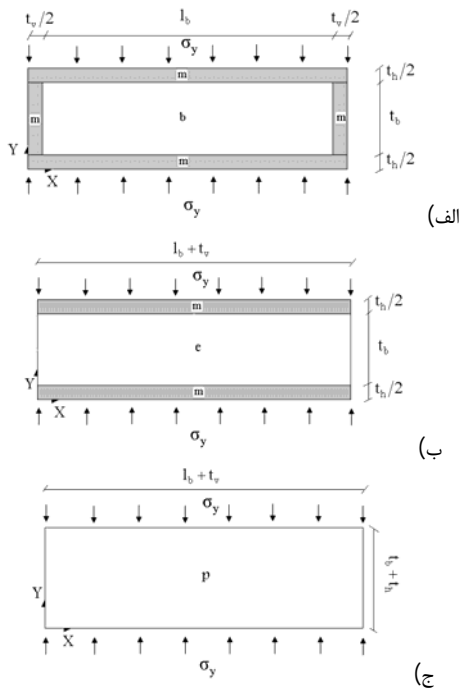
تماسی (المان‌هایی که قابلیت باز و بسته شدن و لغزش را دارند) را قرار داد. در این صورت دیگر نیازی به تعبیه المان‌های تماسی در تمامی درزهای افقی و قائم ملات نبوده و با حفظ دقت می‌توان پیچیدگی مدل و زمان مدل‌سازی را کاهش داده و سرعت تحلیل را افزایش داد.

علاوه بر طبقه‌بندی روش‌های مدل‌سازی سازه‌های بنایی به دو روش میکرو و ماکرو، از یک دیدگاه دیگر، محققان سازه‌های بنایی را به یکی از دو صورت زیر مدل و تحلیل کرده‌اند [5-6]:

1- مدل‌سازی علمی و کاربردی؛ در این روش مدل‌سازی برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح بنایی از مدل‌های گسیختگی ساده مانند: مور-کولمب، دراکر-پراگر و ... استفاده می‌شود که پارامترهای مورد نیاز جهت تعریف سطح گسیختگی کم بوده و برای تعیین آنها به آزمایش‌های اندکی نیاز است. این روش مدل‌سازی برای بررسی رفتار کلی دیوار یا سازه بنایی مناسب است.

2- مدل‌سازی دقیق و پیچیده؛ تکامل تکنیک‌های اجزا محدود، تحلیل‌های دقیق‌تری را سبب شده است. در این روش مدل‌سازی، برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح بنایی از مدل‌های تماسی دقیق [4 و 8] یا ترکیب مفاهیم تئوری پلاستیسیته و مکانیک شکست [9-13] استفاده می‌شود که قادرند هر دو پدیده زوال سختی و مقاومت را در نظر بگیرند. پارامترهای لازم جهت تعریف این مدل‌های غیرخطی زیاد بوده و برای تعیین آنها به آزمایش‌های بیشتری نیاز است. این روش مدل‌سازی مشکل‌تر و زمان‌برتر بوده و انجام آن نیاز به مهارت زیاد و فهم کافی دارد و برای بررسی رفتار محلی و کلی دیوار یا سازه بنایی قابل استفاده است. این روش‌های عددی به میزان زیادی موثرند و بیشتر پدیده‌هایی که در رفتار مصالح بنایی اتفاق می‌افتند را در نظر می‌گیرند. با وجود این، استفاده از آنها کاملاً تحقیقاتی است.

یک روش کاربردی برای تحلیل سازه‌های بنایی که در آیین‌نامه‌های جدید هم رواج یافته است تبدیل سازه بنایی به یک قاب معادل می‌باشد یعنی سازه صفحه‌ای (سازه دیوار باربر) به یک سازه خطی (سازه قابی شامل تیر و ستون) تبدیل می‌شود [7، 10 و 14-15]. غیرخطی شدن این قاب معادل، در نقاط خاصی به نام مفاصل پلاستیک متمرکز است که این مفاصل پلاستیک در دو سر هر عضو قرار دارند و خصوصیات این مفاصل پلاستیک برای اعضای



شکل 3: مراحل مربوط به فرآیند همگن سازی.

با توجه به سازگاری تغییرشکلها در شکلهای

(3-الف) و (3-ب) نتیجه می شود:

$$\delta_e^y = \delta_b^y = \delta_v^y \Rightarrow \varepsilon_e^y t_b = \varepsilon_b^y t_b = \varepsilon_v^y t_b$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma_b^y = (E_b/E_e^y) \sigma_y \\ \sigma_v^y = (E_m/E_e^y) \sigma_y \end{cases} \quad (1)$$

e مربوط به ماده همگن معادل آجر و درزهای قائم ملات دو طرف آن می باشد. با توجه به تعادل نیروها در شکل های 3-الف و 3-ب نتیجه می شود:

$$P_e^y = P_b^y + P_v^y \Rightarrow \sigma_y (l_b + t_v) t_w = \sigma_b^y l_b t_w + \sigma_v^y t_v t_w \quad (2)$$

با جاگذاری رابطه (1) در رابطه (2) خواهیم داشت:

$$E_e^y = (E_b l_b + E_m t_v) / (l_b + t_v) \quad (3)$$

با توجه به تعادل نیروها در شکل های 3-ب و 3-ج

نتیجه می شود:

$$P_p^y = P_e^y = P_h^y$$

$$\Rightarrow \sigma_y (l_b + t_v) t_w = \sigma_e^y (l_b + t_v) t_w = \sigma_h^y (l_b + t_v) t_w$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_e^y = (E_p^y/E_e^y) \varepsilon_p^y \\ \varepsilon_h^y = (E_p^y/E_m^y) \varepsilon_p^y \end{cases} \quad (4)$$

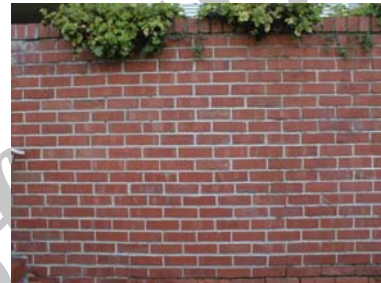
با توجه به سازگاری تغییرشکلها در شکل های (3-ب)

و (3-ج) نتیجه می شود:

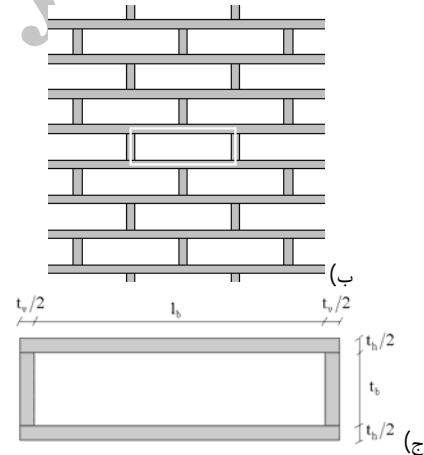
$$\delta_p^y = \delta_e^y + \delta_h^y \Rightarrow \varepsilon_p^y (t_b + t_h) = \varepsilon_e^y t_b + \varepsilon_h^y t_h \quad (5)$$

الاستیسیته، تنش برشی، کرنش برشی، مدول برشی، نیروی محوری، نیروی برشی و تغییرشکلها می باشد. همچنین زیرنویس های p, w, v, h, m, b و p استفاده شده در روابط پیشرو، به ترتیب مربوط به آجر، ملات، درز افقی ملات، درز قائم ملات، دیوار آجری و ماده همگن معادل مصالح بنایی می باشد.

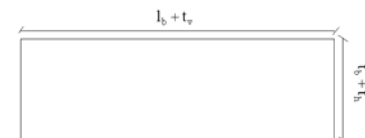
در دیوارهای آجری غیرمسلح مطابق شکل (1-الف)، المان کامل تشکیل دهنده دیوار در شکل های (1-ب) و (1-ج) نشان داده شده است که با تکرار خود دیوار را می سازد. هدف تعیین مشخصات مکانیکی ماده همگن ارتوتروپیک معادل المان شکل (1-ج) می باشد که در شکل (2) نمایش داده شده است.



شکل 1: دیوار آجری غیرمسلح و المان کامل تشکیل دهنده آن.



شکل 2: المان تشکیل شده در اثر فرآیند همگن سازی.



شکل 3: تعیین مدول های الاستیسیته

برای محاسبه E_p^y (مدول الاستیسیته ماده همگن ارتوتروپیک در امتداد محور y) به صورت زیر عمل می کنیم:

$$G_e^{xy1} = (G_b I_b + G_m t_v) / (I_b + t_v) \quad (10)$$

با توجه به تعادل نیروها در شکل‌های 4-ب و 4-ج نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} V_p^x &= V_e^x = V_h^x \\ \Rightarrow \tau_{yx} (I_b + t_v) t_w &= \tau_e^{yx} (I_b + t_v) t_w = \tau_h^{yx} (I_b + t_v) t_w \\ \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \gamma_e^{xy1} &= (G_p^{xy1} / G_e^{xy1}) \gamma_p^{xy1} \\ \gamma_h^{xy1} &= (G_p^{xy1} / G_m) \gamma_p^{xy1} \end{aligned} \right. \quad (11) \end{aligned}$$

با توجه به سازگاری تغییرشکل‌ها در شکل‌های 4-ب و 4-ج نتیجه می‌شود:

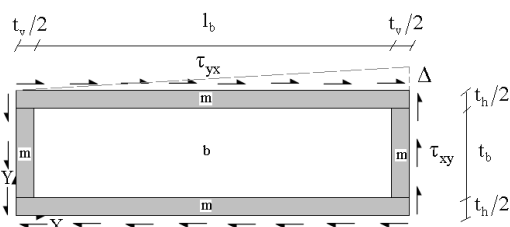
$$\begin{aligned} \Delta_p^x &= \Delta_e^x + \Delta_h^x \\ \Rightarrow \gamma_p^{xy1} (t_b + t_h) &= \gamma_e^{xy1} t_b + \gamma_h^{xy1} t_h \quad (12) \end{aligned}$$

با جاگذاری رابطه (11) در رابطه (12) خواهیم داشت:

$$G_p^{xy1} = (G_e^{xy1} G_m (t_b + t_h)) / (G_e^{xy1} t_h + G_m t_b) \quad (13)$$

رابطه (10) را در رابطه (13) قرار می‌دهیم:

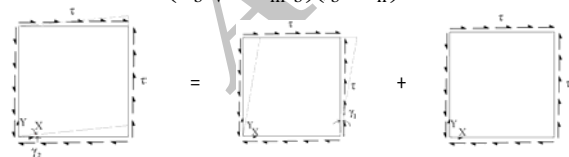
$$G_p^{xy1} = \frac{G_m (G_b I_b + G_m t_v) (t_b + t_h)}{G_b I_b t_h + G_m (I_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)} \quad (14)$$



شکل 5: مراحل مربوط به فرآیند همگن‌سازی.

با در نظر گرفتن تغییرشکل در امتداد محور y مطابق شکل 5 و به طور مشابه نتیجه می‌شود:

$$G_p^{xy2} = \frac{G_m [G_b (I_b t_b + t_b t_v + t_h t_v) + G_m I_b t_h]}{(G_b t_v + G_m I_b) (t_b + t_h)} \quad (15)$$



شکل 6: جمع آثار در تغییرشکل‌های برشی.

با توجه به شکل 6 نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \gamma_p^1 / 2 + \gamma_p^2 / 2 \\ \Rightarrow \tau / G_p &= \tau / (2G_p^1) + \tau / (2G_p^2) \\ \Rightarrow G_p &= 2G_p^1 G_p^2 / (G_p^1 + G_p^2) \quad (16) \end{aligned}$$

بنابراین با توجه به روابط (14)، (15) و (16) خواهیم داشت:

با جاگذاری رابطه (4) در رابطه (5) خواهیم داشت:

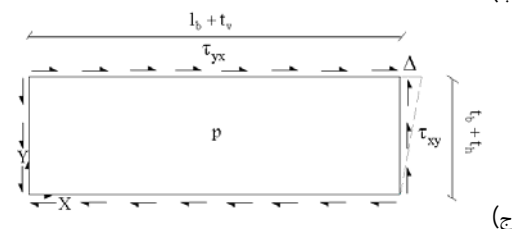
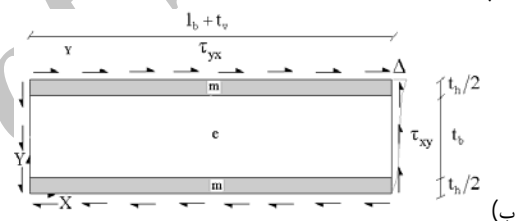
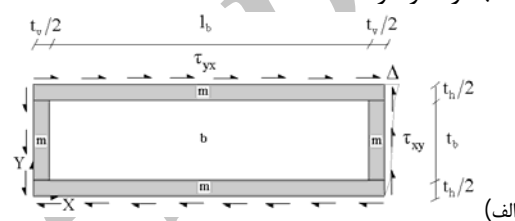
$$E_p^y = (E_e^y E_m (t_b + t_h)) / (E_e^y t_h + E_m t_b) \quad (6)$$

رابطه (3) را در رابطه (6) قرار می‌دهیم:

$$E_p^y = \frac{E_m (E_b I_b + E_m t_v) (t_b + t_h)}{E_b I_b t_h + E_m (I_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)} \quad (7)$$

تعیین مدول‌های برشی

برای محاسبه G_p^{xy} (مدول برشی ماده همگن ارتوتروپیک در صفحه x-y)، یکبار تغییرشکل در امتداد محور x (G_p^{xy1}) و بار دیگر تغییرشکل در امتداد محور y (G_p^{xy2}) در نظر گرفته شده است:



شکل 4: مراحل مربوط به فرآیند همگن‌سازی.

با در نظر گرفتن تغییرشکل در امتداد محور x مطابق شکل (4) و با توجه به سازگاری تغییرشکل‌ها در شکل‌های (4-الف) و (4-ب) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta_e^x &= \Delta_b^x = \Delta_v^x \Rightarrow \gamma_e^{xy1} t_b = \gamma_b^{xy1} t_b = \gamma_v^{xy1} t_b \\ \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \tau_b^{yx} &= (G_b / G_e^{xy1}) \tau_e^{yx} \\ \tau_v^{yx} &= (G_m / G_e^{xy1}) \tau_e^{yx} \end{aligned} \right. \quad (8) \end{aligned}$$

با توجه به تعادل نیروها در شکل‌های (4-الف) و (4-ب) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} V_e^x &= V_b^x + V_v^x \\ \Rightarrow \tau_e^{yx} (I_b + t_v) t_w &= \tau_b^{yx} I_b t_w + \tau_v^{yx} t_b t_w \quad (9) \end{aligned}$$

با جاگذاری رابطه (8) در رابطه (9) خواهیم داشت:

$$\varepsilon_e^x = -v_e^{yx} \varepsilon_e^y, \quad \varepsilon_b^x = -v_b \varepsilon_b^y, \quad \varepsilon_v^x = -v_m \varepsilon_v^y \quad (20)$$

با جاگذاری رابطه (18) در رابطه (20) و جاگذاری رابطه (20) در رابطه (19) خواهیم داشت:

$$v_e^{yx} = (v_b l_b + v_m t_v) / (l_b + t_v) \quad (21)$$

مطابق قانون بتی نتیجه می‌شود:

$$v_e^{xy} = (E_e^x / E_e^y) v_e^{yx} \quad (22)$$

که:

$$\frac{G_m (G_b l_b + G_m t_v) (t_b + t_h)}{G_b l_b t_h + G_m (l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}$$

$$E_e^x = (E_b E_m (l_b + t_v)) / (E_b t_v + E_m l_b)$$

$$E_e^y = (E_b l_b + E_m t_v) / (l_b + t_v)$$

با توجه به سازگاری تغییرشکل‌ها در شکل‌های (7-ب)

و (7-ج) نتیجه می‌شود:

$$\delta_p^x = \delta_e^x = \delta_h^x \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_e^x = \varepsilon_h^x = \varepsilon_p^x \quad (23)$$

$$\delta_p^y = \delta_e^y + \delta_h^y \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_p^y (t_b + t_h) = \varepsilon_e^y t_b + \varepsilon_h^y t_h$$

$$(24)$$

از طرفی:

$$\varepsilon_p^y = -v_p^{xy} \varepsilon_p^x, \quad \varepsilon_e^y = -v_e^{xy} \varepsilon_e^x, \quad \varepsilon_h^y = -v_m \varepsilon_h^x \quad (25)$$

با جاگذاری رابطه (23) در رابطه (25) و جاگذاری رابطه (25) در رابطه (24) خواهیم داشت:

$$v_p^{xy} = (v_e^{xy} t_b + v_m t_h) / (t_b + t_h)$$

$$v_p^{yx} = (E_p^y / E_p^x) v_p^{xy} \quad (26)$$

که v_e^{xy} در رابطه (22) داده شده است. در انتها برای محاسبه وزن مخصوص معادل γ_p به صورت زیر عمل می‌کنیم. با توجه به تعادل نیروهای ناشی از شتاب ثقلی در شکل‌های (1-ج) و (2) نتیجه می‌شود:

$$P_h = P_d$$

$$\Rightarrow (l_b + t_v)(t_b + t_h) t_w \gamma_p = l_b t_b t_w \gamma_b + [(l_b + t_v)(t_b + t_h) - l_b t_b] t_w \gamma_m$$

خواهیم داشت:

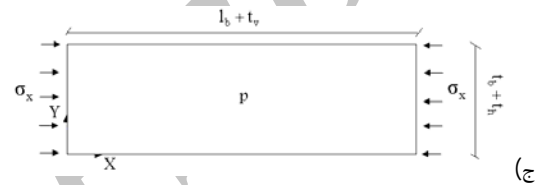
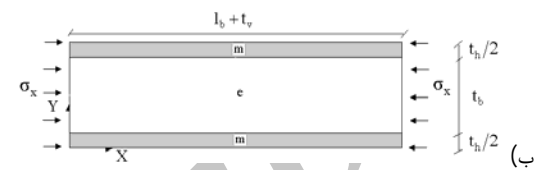
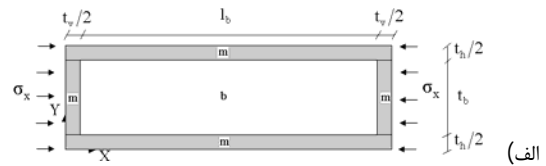
$$\gamma_p = \frac{\gamma_b l_b t_b + \gamma_m [(l_b + t_v)(t_b + t_h) - l_b t_b]}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)} \quad (27)$$

به طریق مشابه سایر پارامترها تعیین خواهند شد. به طور خلاصه تمام ثوابت الاستیک مربوط به ماده همگن

$$G_p^{xy} = 2G_p^{xy1} G_p^{xy2} / (G_p^{xy1} + G_p^{xy2}) \quad (17)$$

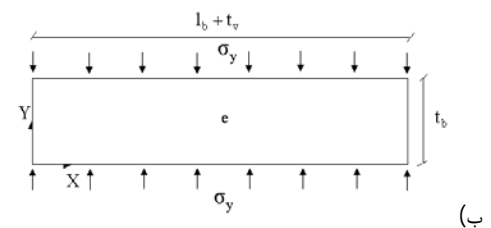
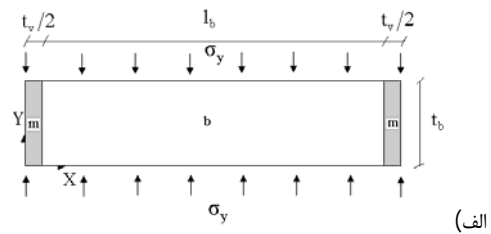
تعیین ضرایب پواسون

برای محاسبه v_p^{yx} و v_p^{xy} (ضرایب پواسون ماده همگن ارتوتروپیک در صفحه x-y) به صورت زیر عمل می‌کنیم:



شکل 7: مراحل مربوط به فرآیند همگن‌سازی.

برای محاسبه v_e^{xy} شکل (8) را در نظر می‌گیریم.



شکل 8: مراحل مربوط به فرآیند همگن‌سازی.

با توجه به سازگاری تغییرشکل‌ها در شکل‌های (8-الف) و (8-ب) نتیجه می‌شود:

$$\delta_e^y = \delta_b^y = \delta_v^y \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_b^y = \varepsilon_v^y = \varepsilon_e^y \quad (18)$$

$$\delta_e^x = \delta_b^x + \delta_v^x \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_e^x (l_b + t_v) = \varepsilon_b^x l_b + \varepsilon_v^x t_v \quad (19)$$

از طرفی:

چیدمان دلخواه می‌باشد یعنی می‌توان همگن‌سازی را هم در نمای دیوار و هم در ضخامت آن انجام داد که در ادامه نمونه‌هایی آورده شده است.

در این جا دیوارهای آجری غیرمسلح در نرم‌افزار اجزا محدود غیرخطی ANSYS 10 در دو حالت دقیق و همگن شده مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. در حالت دقیق، مشخصات مکانیکی و هندسی آجرها و درزهای افقی و قائم ملات به طور کامل در نظر گرفته شده‌اند و در حالت همگن شده، مصالح بنایی با یک ماده همگن ارتوتروپیک معادل مطابق روابط پیشنهادی جایگزین شده است. در دیوارهای مورد مطالعه، از آجرهایی به ضخامت، عرض و طول به ترتیب، 6، 10 و 22 سانتی‌متر استفاده شده که ضخامت درزهای افقی و قائم ملات برابر 2 سانتی‌متر است. مطابق استاندارد 2800 ایران، دیوارهایی که با آجر ساخته می‌شوند باید طوری چیده شوند که درزهای قائم روی هم قرار نگیرند و کاملاً با ملات پر شوند.

در بارگذاری داخل صفحه‌ای، از کلاف بتنی در بالا و پایین دیوارها استفاده شده و دیوارها تحت بار ثقلی در بالا و وزن خود قرار داشته و در امتداد جانبی هل داده می‌شوند. هدف مقایسه مقادیر سختی، توزیع تغییرشکل‌ها، توزیع تنش‌ها و ... در دو حالت دقیق و همگن‌سازی می‌باشد.

بارگذاری داخل صفحه‌ای دیوارهای آجری غیرمسلح توپر

پارامترهای مورد مطالعه در این بخش شامل: نسبت ابعادی دیوار ($1.6, 1.3, 1, L/H=0.7$) که $H=3m$ ، نسبت مدول الاستیسیته ملات به آجر ($E_m/E_b=0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.8$) که $E_b=2000MPa$ و اندازه المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی (2، 4 و 8 سانتی‌متر) می‌باشد.

لازم به ذکر است که در مدل‌سازی دقیق، اندازه مش‌ها را نمی‌توان از حدی بزرگتر در نظر گرفت زیرا تمام آجرها و درزهای افقی و قائم ملات باید به طور کامل در نظر گرفته شوند ولی در مدل‌سازی همگن، این محدودیت وجود ندارد و می‌توان اندازه مش‌ها را با توجه به دقت مورد نیاز، بزرگ کرد. بنابراین مش‌بندی 2 سانتی‌متری مختص مدل‌سازی دقیق و مش‌بندی 4 و 8 سانتی‌متری مربوط به مدل‌سازی همگن است.

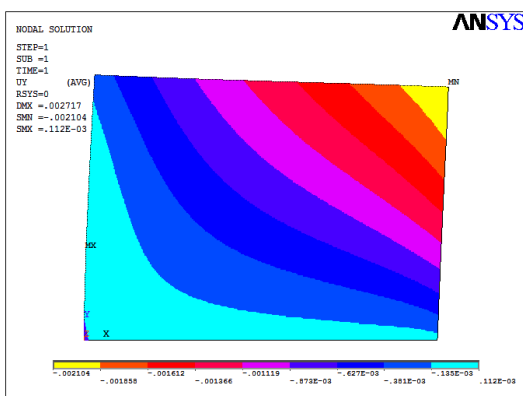
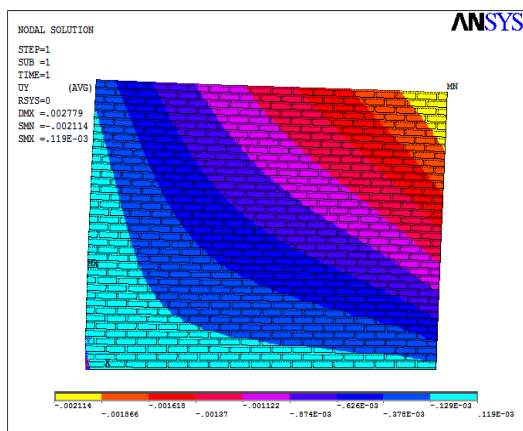
ارتوتروپیک معادل مصالح بنایی در جدول (1) آورده شده است.

جدول 1: ثوابت الاستیک ماده همگن ارتوتروپیک معادل مصالح بنایی.

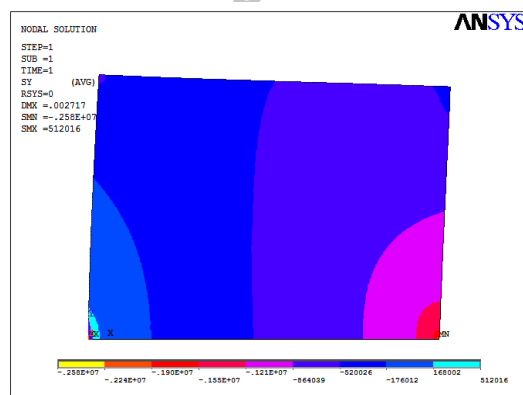
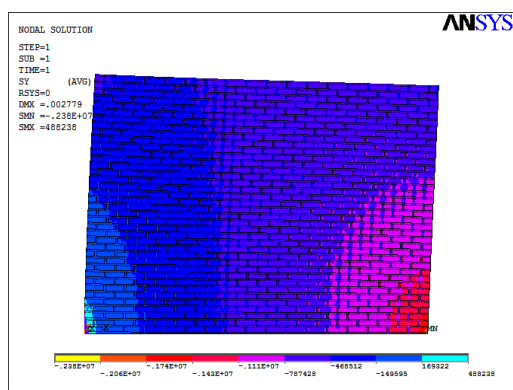
E_p^x	$\frac{E_m[E_b(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v) + E_m l_b t_h]}{(E_b t_v + E_m l_b)(t_b + t_h)}$
E_p^y	$\frac{E_m(E_b l_b + E_m t_v)(t_b + t_h)}{E_b l_b t_b + E_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}$
E_p^z	$\frac{E_b l_b t_b + E_m(l_b + t_v)(t_b + t_h) - l_b t_b}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)}$
G_p^{xy1}	$\frac{G_m(G_b l_b + G_m t_v)(t_b + t_h)}{G_b l_b t_b + G_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}$
G_p^{xy2}	$\frac{G_m[G_b(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v) + G_m l_b t_h]}{(G_b t_v + G_m l_b)(t_b + t_h)}$
G_p^{xy}	$2G_p^{xy1}G_p^{xy2}/(G_p^{xy1} + G_p^{xy2})$
G_p^{yz1}	$\frac{G_m(G_b l_b + G_m t_v)(t_b + t_h)}{G_b l_b t_b + G_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}$
G_p^{yz2}	$\frac{G_b l_b t_b + G_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)}$
G_p^{yz}	$2G_p^{yz1}G_p^{yz2}/(G_p^{yz1} + G_p^{yz2})$
G_p^{xz1}	$\frac{G_m[G_b(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v) + G_m l_b t_h]}{(G_b t_v + G_m l_b)(t_b + t_h)}$
G_p^{xz2}	$\frac{G_b l_b t_b + G_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)}$
G_p^{xz}	$2G_p^{xz1}G_p^{xz2}/(G_p^{xz1} + G_p^{xz2})$
v_p^{xy}	$\frac{E_b/E_m t_b(v_b l_b + v_m t_v)/(l_b + t_v) + v_m t_h/(t_b + t_h)}{E_b/E_m t_b(v_b l_b + v_m t_v)/(l_b + t_v) + v_m t_h/(t_b + t_h)}$
v_p^{zy}	$\frac{v_b l_b t_b + v_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)}$
v_p^{zx}	$\frac{v_b l_b t_b + v_m(l_b t_b + t_b t_v + t_h t_v)}{(l_b + t_v)(t_b + t_h)}$

مقایسه با نتایج عددی

بسیاری از روش‌های موجود در همگن‌سازی مصالح بنایی دارای پیچیدگی زیادی هستند [16] که باعث شده فقط کاربری تحقیقاتی داشته و در کاربردهای روزمره مقرون به صرفه نباشند. فرآیند پیشنهادی در بخش قبلی برای استخراج روابط تحلیلی جهت همگن‌سازی دیوارهای آجری غیرمسلح، یک روش ساده و در عین حال کاربردی بوده که می‌تواند در عمل به نحو موثری مورد استفاده قرار گیرد. در این مرحله لازم است دقت روابط پیشنهادی به کمک مدل‌سازی دقیق اجزا محدود مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین حالت بارگذاری داخل صفحه‌ای دیوارهای آجری غیرمسلح توپر مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی قابل تعمیم به هر دیوار آجری با هر گونه



شکل 10: توزیع تغییر شکل قائم در دو حالت دقیق و همگن شده.



شکل 11: توزیع تنش قائم در دو حالت دقیق و همگن شده.

برای نمونه دیواری با نسبت ابعادی $L/H=1.3$ که از المان‌های 2 سانتی‌متری برای مدل‌سازی آن در دو حالت استفاده شده و تحت بارهای متداولی به صورت فشار ثقیلی 0/5 مگاپاسکال در بالا و بار جانبی 58 کیلو نیوتن قرار دارد و دارای مصالحی با مشخصات زیر است [9 و 17]، در نظر گرفته شده است:

مشخصات
آجر: $\rho_b=1700(\text{kg/m}^3)$, $\nu_b=0.15$, $E_b=2000\text{MPa}$

مشخصات
مالات: $\rho_m=2100(\text{kg/m}^3)$, $\nu_m=0.2$, $E_m=700\text{MPa}$

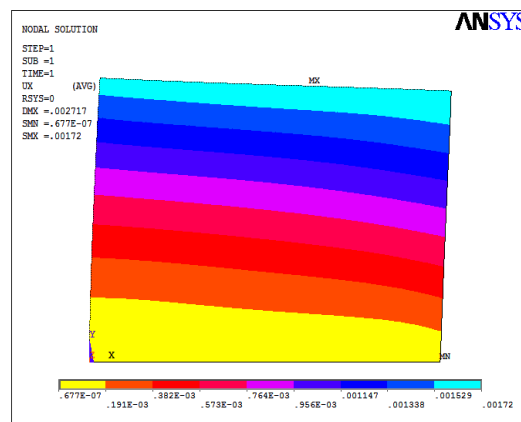
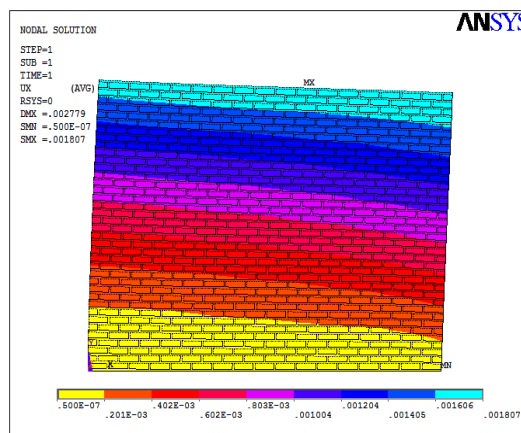
مشخصات ماده همگن ارتوئروپیک معادل مطابق روابط پیشنهادی در جدول (1) به صورت زیر در می‌آید:

$$E_p^x=1474, E_p^y=1326.9, E_p^z=1593.8\text{MPa}$$

$$G_p^{xy}=596.87, G_p^{yz}=620.8, G_p^{xz}=659.62\text{MPa}$$

$$\nu_p^{xy}=0.156, \nu_p^{yz}=0.138, \nu_p^{xz}=0.153, \rho_b=1825(\text{kg/m}^3)$$

در شکل‌های (9)، (10)، (11) و (12)، توزیع تغییر شکل‌ها و تنش‌های دیوار در انتهای بارگذاری در دو حالت نشان داده شده است.

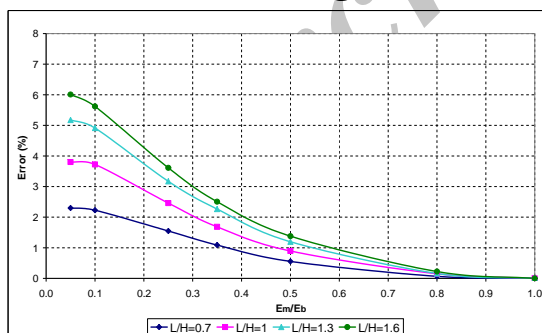


شکل 9: توزیع تغییر شکل افقی در دو حالت دقیق و همگن شده.

جدول 3: مقایسه نتایج تحلیل در دو حالت دقیق و همگن شده برای نسبت‌های ابعادی مختلف دیوار.

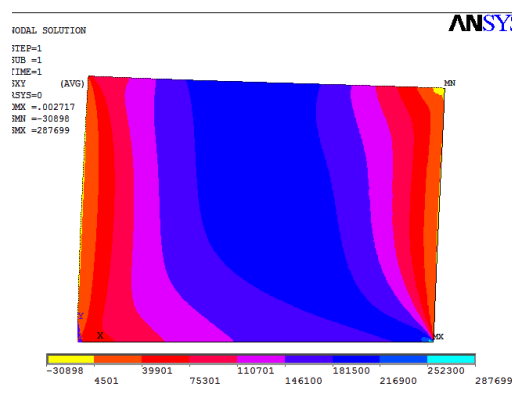
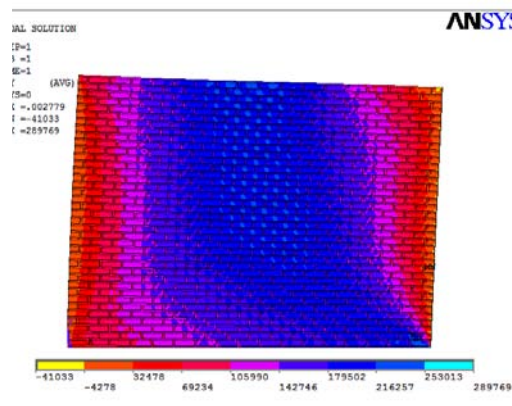
Comparison		Error (%)		
		L/H=0.7	L/H=1	L/H=1.6
Lateral deformation		2.25	3.58	5.46
Vertical deformation	Positive	3.15	4.95	5.65
	Negative	0.24	0.33	0.51
Normal stress	Compression	5.3	5.17	5.11
	Tension	8.63	8.64	8.11
Shear stress		7.74	2.64	2.81

از جدول (3) مشاهده می‌شود که خطای ناشی از همگن‌سازی در تمامی موارد کمتر از 10% و قابل صرف‌نظر می‌باشد. در ادامه به طور خلاصه نتایج مربوط به مهم‌ترین پارامتر یعنی خطای حاصل شده در محاسبه سختی ناشی از فرآیند همگن‌سازی مطابق روابط پیشنهادی برای تمامی حالت‌ها آورده شده است. با توجه به نحوه بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی دیوارهای مورد بررسی، به نظر می‌رسد که در تغییر شکل‌های برشی عملاً با حالتی مطابق شکل (4) مواجه هستیم لذا $G_p^{xy} = G_p^{xyl}$ اختیار می‌شود. در شکل (13)، برای دیوارهای آجری با مش‌بندی 2 سانتی‌متری و نسبت‌های مختلف L/H و E_m/E_b ، خطای ناشی از همگن‌سازی در محاسبه سختی دیوارها نشان داده شده است. واضح است که با بزرگ شدن E_m/E_b و نزدیک شدن آن به یک، مصالح بنایی به سمت همگن‌شدن پیش می‌روند و خطای ناشی از فرآیند همگن‌سازی کاهش می‌یابد.



شکل 13: خطای ناشی از همگن‌سازی در محاسبه سختی دیوارها.

از شکل (13) نتیجه می‌شود که برای L/H های مختلف و تمام محدوده تغییرات E_m/E_b ، خطای ناشی از همگن‌سازی کمتر از 10% و قابل صرف‌نظر می‌باشد. خطای ناشی از همگن‌سازی را می‌توان به فرضیات ساده کننده مورد استفاده در استخراج روابط و کامل نبودن المان مورد استفاده در محاسبات همگن‌سازی (مطابق شکل 1) در



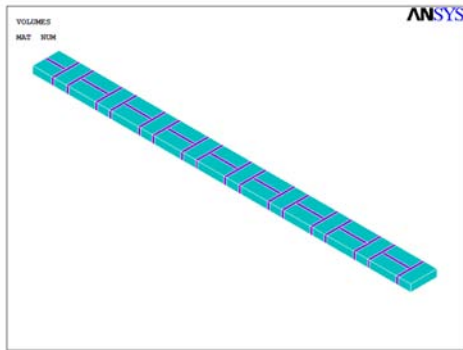
شکل 12: توزیع تنش برشی در دو حالت دقیق و همگن شده.

در جدول (2) مقادیر ماکزیمم تغییر شکل‌ها و تنش‌ها در دو حالت دقیق و همگن شده به همراه خطای ناشی از عملیات همگن‌سازی آورده شده است.

جدول 2: مقایسه نتایج تحلیل در دو حالت دقیق و همگن شده.

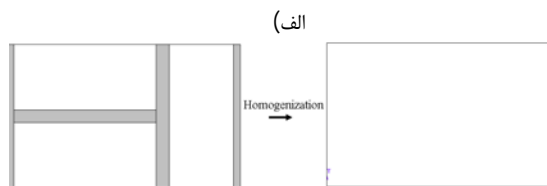
Comparison	Detailed	Homogenize d	Error (%)	
Lateral deformation (mm)	1.807	1.72	4.81	
Vertical deformation (mm)	Positive	0.119	0.112	5.88
	Negative	2.114	2.104	0.47
Normal stress (MPa)	Compression	0.488	0.512	4.87
	Tension	2.38	2.58	8.4
Shear stress (MPa)	0.29	0.288	0.71	

برای سه دیوار مشابه با این دیوار ولی با L/H به ترتیب برابر 0/7، 1 و 1/6 و تحت فشار ثقلی 0/5 مگاپاسکال در بالا و بار جانبی به ترتیب 16، 34 و 84 کیلونیوتن، نتایج تحلیل در جدول (3) آورده شده است.

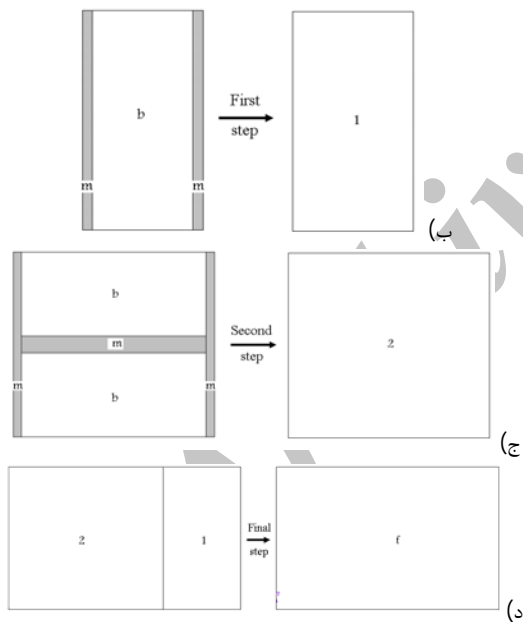


شکل 15: دیوار سه بعدی مورد بررسی.

همگن‌سازی این دیوار در سه مرحله صورت می‌گیرد که در شکل (16) نشان داده شده است.



شکل 16: همگن‌سازی دیوار سه بعدی.



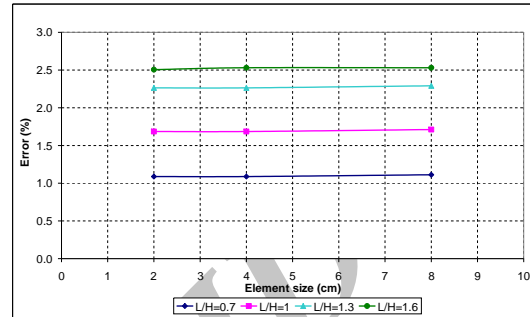
شکل 16: همگن‌سازی دیوار سه بعدی.

برای آجر و ملات با ویژگی‌های زیر، مشخصات ماده همگن ارتوتروپیک معادل در هر مرحله مطابق شکل (16) در جدول (4) آورده شده است.

مشخصات آجر: $\rho_b=1700(\text{kg/m}^3)$, $\nu_b=0.15$, $E_b=2000\text{Mpa}$

مشخصات ملات: $\rho_m=2100(\text{kg/m}^3)$, $\nu_m=0.2$, $E_m=700\text{MPa}$

لبه‌های دیوار نسبت داد. با توجه به آنکه در مدل همگن شده می‌توان اندازه المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی را افزایش داد لذا در شکل (14) برای دیوارهای آجری با $E_m/E_b=0.35$ و L/H های مختلف، اثر افزایش اندازه المان‌ها در میزان خطای ایجاد شده در محاسبه سختی دیوارها بررسی شده است.

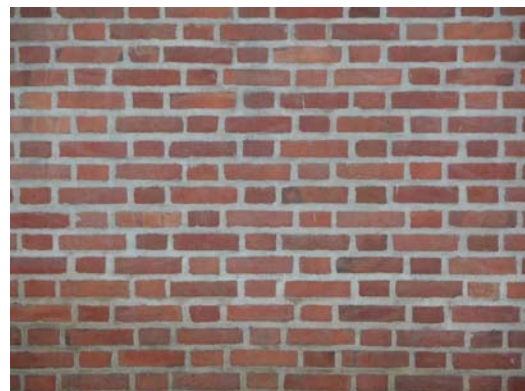


شکل 14: خطای ناشی از همگن‌سازی در محاسبه سختی دیوارها.

از شکل (14) نتیجه می‌شود که تاثیر درشت شدن المان‌ها در افزایش خطا، اندک بوده و می‌توان با حفظ دقت، تعداد المان‌ها را در نمای دیوار تا 16 برابر تعداد المان‌ها در حالت دقیق کاهش داد که باعث افزایش بسیار زیاد سرعت تحلیل می‌شود.

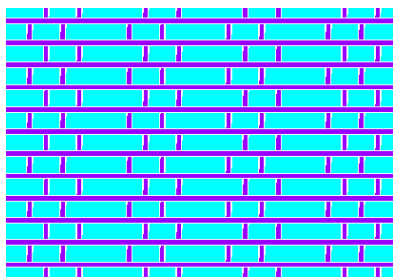
همگن‌سازی دیوارهای آجری در نما و ضخامت

فرآیند و فرضیات مورد استفاده در استخراج روابط تحلیلی برای همگن‌سازی دیوارهای آجری غیرمسلح در نما مطابق بخش قبلی، قابل تعمیم به ضخامت برای دیوار با هر چیدمان دلخواه می‌باشد. برای نمونه دیواری با $E_m/E_b=0.35$ و $L/H=1$ در نظر گرفته شده که در ضخامت نیز مطابق شکل (15) دارای ناهمگنی است.



شکل 15: دیوار سه بعدی مورد بررسی.

از شکل (17) نتیجه می‌شود که خطای ناشی از همگن‌سازی در سختی دیوار بسیار اندک و در حدود 2/53% است. اکنون اگر در این دیوار، وضعیت ردیف‌های متوالی آجرکاری نسبت به هم مطابق شکل (18) عوض شود، نتایج تحلیل تحت عنوان الگوی 2 در جدول (5) نمایش داده شده است.



شکل 18: تغییر وضعیت ردیف‌های متوالی آجرکاری نسبت به هم.

جدول 5: خطای ناشی از همگن‌سازی در محاسبه سختی دیوارهای سه بعدی.

Approximate L/H	Error in stiffness (%)	
	Pattern 1	Pattern 2
0.7	1.68	1.43
1	2.53	2.51

از جدول (5) نتیجه می‌شود که با این تغییر وضعیت، باز هم خطا ناچیز و در حدود 2/51% می‌باشد. برای دیوارها با حالت‌های مختلف، نتایج مشابهی به دست آمده است که در جدول (5) آورده شده است. بنابراین روش معرفی شده در همگن‌سازی دیوارهای آجری سه بعدی دارای ناهمگنی در ضخامت، دقت مناسبی داشته و کارایی زیادی دارد.

مدل‌سازی آزمایش فشار قطری

بعد از همگن‌سازی دیوارهای آجری و تعیین سختی آنها با دقت بالا، نوبت به بررسی مقاومت می‌رسد. برای این منظور، آزمایش فشار قطری مطابق ASTM E519 [18] مد نظر قرار گرفته است. این آزمایش می‌تواند به نحو ساده و موثری برای تعیین مقاومت ترک خوردگی قطری دیوارهای آجری مورد استفاده قرار گیرد و مود گسیختگی ترک خوردگی قطری را شبیه‌سازی کند که رایج‌ترین مود خرابی داخل صفحه‌ای در دیوارهای آجری غیرمسلح می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات مربوط به بررسی و

جدول 4: مشخصات ماده همگن ارتوتروپیک معادل در هر مرحله.

Homogenization	Material 1	Material 2	Final material
E_p^x (MPa)	1320.5	1403.6	1374.8
E_p^y (MPa)	1285.8	1269.9	1275.2
E_p^z (MPa)	1512.5	1428	1456.2
G_p^{xy} (MPa)	555.14	569.2	564.45
G_p^{yz} (MPa)	595.45	574.25	581.4
G_p^{xz} (MPa)	604.72	607.31	606.7
ν_p^{xy}	0.152	0.16	0.157
ν_p^{yz}	0.143	0.144	0.144
ν_p^{xz}	0.147	0.157	0.154

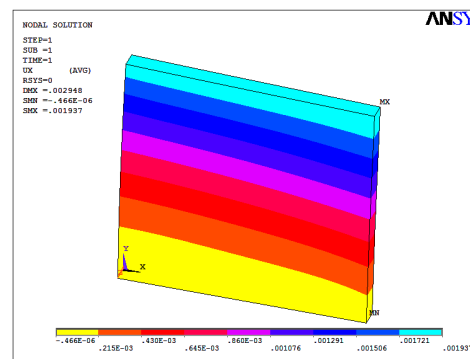
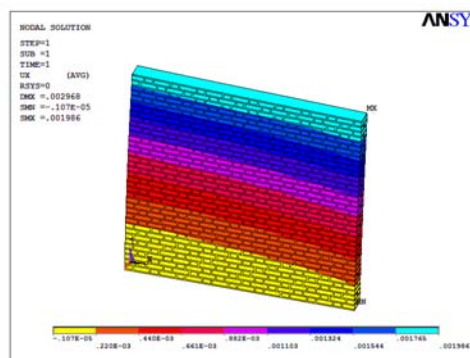
برای محاسبه وزن مخصوص ماده همگن ارتوتروپیک معادل، مشابه با رابطه (27) خواهیم داشت:

$$V_p = (l_b + b_b + 2t_v) l_b (t_b + t_h) \quad V_b = 3l_b b_b t_b$$

$$\gamma_p = (\gamma_b V_b + \gamma_m (V_p - V_b)) / V_p$$

که نتیجه می‌شود: $\gamma_p = 1850 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

اکنون اگر این دیوار تحت وزن خود و فشار ثقلی 0/5 مگاپاسکال در بالا به همراه بار جانبی 68 کیلونیوتن قرار گیرد، تغییرشکل جانبی آن در دو حالت دقیق و همگن شده در شکل (17) نشان داده شده است.

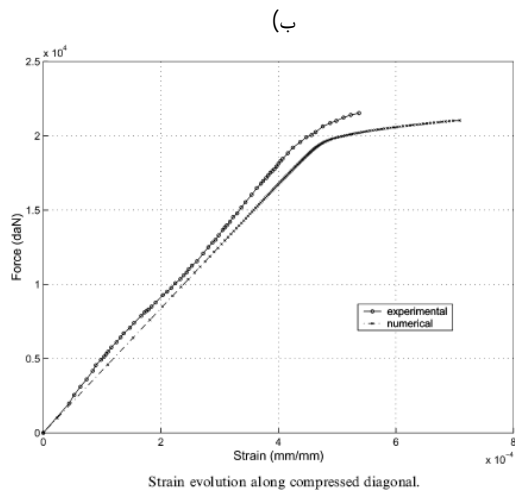


شکل 17: توزیع تغییرشکل جانبی دیوار در دو حالت دقیق و همگن شده.

ملات (ملات‌های ضعیف تا قوی) می‌باشد.



(الف)



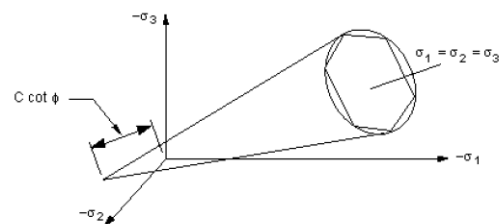
(ب)

شکل 20: مقایسه رفتار پانل‌های آجری غیر مسلح تحت فشار قطری در دو حالت آزمایشگاهی و عددی دقیق [5].

در اکثر دیوارهای آجری غیرمسلح موجود، درزهای ملات به عنوان صفحات ضعیف مجموعه عمل می‌کنند و بیشتر خرابی و خسارت دیوار در آن محل‌ها متمرکز است [5-6 و 23-24]. در مدل‌سازی غیرخطی دقیق یک دیوار آجری، مشخصات خطی و غیرخطی آجر و درزهای ملات باید به طور جداگانه در مدل در نظر گرفته شود. برای حفظ سادگی و کاربردی بودن بحث و همچنین محافظه کارانه بودن آن، این موضوع در این‌جا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که اگر دیوار آجری مطابق روابط تحلیلی معرفی شده در بخش قبلی، همگن شود و سپس مشخصات غیرخطی درز ملات به آن ماده همگن اختصاص یابد خطا در تعیین مقاومت دیوار چه میزان می‌باشد. ایده اصلی در مدل پیشنهادی در این است که در یک دیوار آجری با درزهای ضعیف ملات، ترک‌ها اکثراً در درزهای ملات اتفاق می‌افتند و به آن مکان‌ها محدود می‌شوند ولی در مدل پیشنهادی، ترک خوردگی‌ها در هر

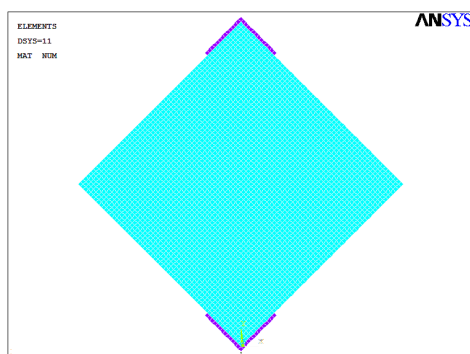
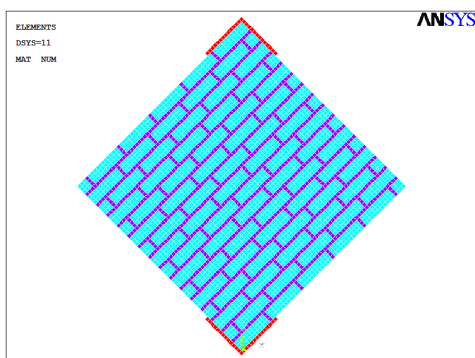
ارزیابی روش‌های مختلف تقویت دیوارهای بنایی غیرمسلح مانند: استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف (FRPها)، استفاده از میلگردهای FRP و ...، از آزمایش فشار قطری استفاده می‌شود تا با مشاهده مود خرابی و اندازه‌گیری سختی، مقاومت نهایی و ظرفیت تغییرشکل پانل‌های بنایی بعد از تقویت و مقایسه با حالت تقویت نشده، میزان کارایی آن روش مشخص شود [19-22]. پانل‌های بنایی مورد آزمایش مربعی بوده و دارای طول و عرض حدود 1/2 متر و ضخامت مورد نظر می‌باشند. ابعاد انتخابی برای نمونه‌ها، حداقل ابعادی است تا نمونه‌ها بتوانند نماینده کاملی از یک دیوار واقعی باشند. کفه‌های فولادی بارگذاری در گوشه بالا و پایین پانل‌ها، باید در هر طرف حداقل طول اتکایی برابر 15 سانتی‌متر با پانل‌های بنایی داشته باشند تا تمرکز تنش و گسیختگی محلی در گوشه‌های بارگذاری به وقوع نپیوندد و گسیختگی به صورت ترک‌های گذرنده از آجر یا درزهای ملات در امتداد قطر تحت فشار اتفاق بیفتد [18].

برای مدل‌سازی غیرخطی پانل‌های آجری، می‌توان از معیار گسیختگی دراکر-پراگر یا ویلام-وارنک استفاده کرد [5-6 و 10-13]. مدل گسیختگی دراکر-پراگر قابل کاربرد در مصالح دانه‌ای (اصطکاکی) مانند: خاک، سنگ، مصالح بنایی و بتن بوده و مطابق شکل (19) تقریب ساده شده‌ای از مدل گسیختگی مور-کولمب است.



شکل 19: مدل‌های گسیختگی مور-کولمب و دراکر-پراگر در فضای تنش‌های اصلی.

در ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی موجود در مرجع [5] مد نظر قرار گرفته است. بعد از مدل‌سازی عددی و در نظر گرفتن آجر و ملات به طور جداگانه و سپس مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، مطابق شکل (20) دیده می‌شود که معیار گسیختگی دراکر-پراگر توانسته است رفتار غیرخطی پانل‌های آجری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند لذا در ادامه تحقیق، از این مدل استفاده شده است. پارامترهای مورد مطالعه در این قسمت شامل چگالی مش‌بندی و نوع



شکل 21: مدل سازی فشار قطری پانل های آجری در دو حالت دقیق و همگن شده.

جدول 7: خطا در تخمین بار نهایی پانل ها بر حسب نوع ملات مورد استفاده.

Type of mortar	Error in strength (%)
Type 1	9.52
Type 2	7.2
Type 3	6.68
Type 4	6.05
Type 5	3.41

همان طور که قبلا بیان شد، یکی از مزایای همگن سازی، امکان افزایش اندازه المان ها با توجه به دقت مورد نظر می باشد. لذا در این جا، اثر ریزی و درشتی المان ها در سختی و مقاومت نهایی پانل ها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (23) برای حالت $C_m/C_b=0.11$ (ضعیف ترین ملات)، منحنی های رفتاری پانل های تحت فشار قطری در حالت دقیق و همگن شده (با اندازه مختلف المان ها) ترسیم شده است. با توجه به شکل (23)، خطای ناشی از همگن سازی و درشت کردن المان ها در جدول (8) آورده شده است. از جدول (8) نتیجه می شود که با افزایش اندازه المان ها تا حدود 9 سانتی متر و به تبع آن کاهش تعداد المان ها تا تقریباً 20 برابر در نمای پانل، باز هم خطا در تخمین سختی و مقاومت نهایی دیوار آجری غیر مسلح قابل صرف نظر و کمتر از 10% می باشد.

جای دیوار قابلیت وقوع دارند. با توجه به تعداد زیاد درزهای ملات که در همه جای دیوار نیز وجود دارند، فرض صورت گرفته منطقی به نظر می رسد. همچنین واضح است که با قوی تر شدن ملات و نزدیک شدن مشخصات غیرخطی آن به آجر، دقت این فرض افزایش می یابد. لذا در ادامه برای بررسی مود گسیختگی ترک خوردگی قطری دیوارهای آجری، پانل های بنایی در دو حالت دقیق و همگن شده تحت فشار قطری قرار گرفته و علاوه بر سختی، مقاومت نهایی آنها نیز مقایسه و دقت همگن سازی بررسی شده است.

پانل های بنایی دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب 126، 126 و 10 سانتی متر بوده و متشکل از مصالحی با مشخصات خطی و غیرخطی (مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) زیر و جدول (6) می باشند [9 و 17].

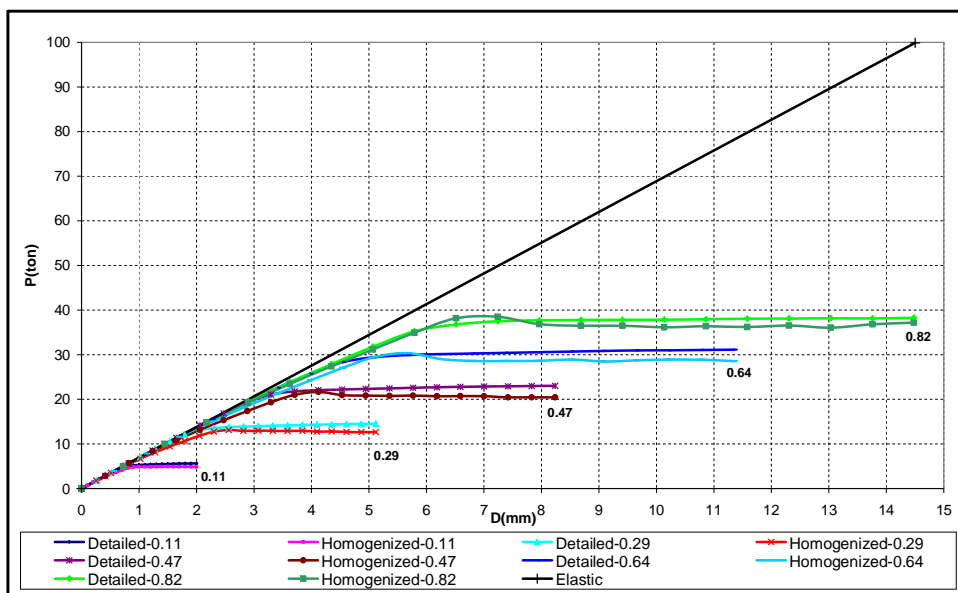
مشخصات آجر: $v_b=0.15, E_b=2000\text{Mpa}$
 $\phi_b=42^\circ, C_b=2.2\text{MPa}$

مشخصات ملات: $v_m=0.2, E_m=700\text{MPa}$

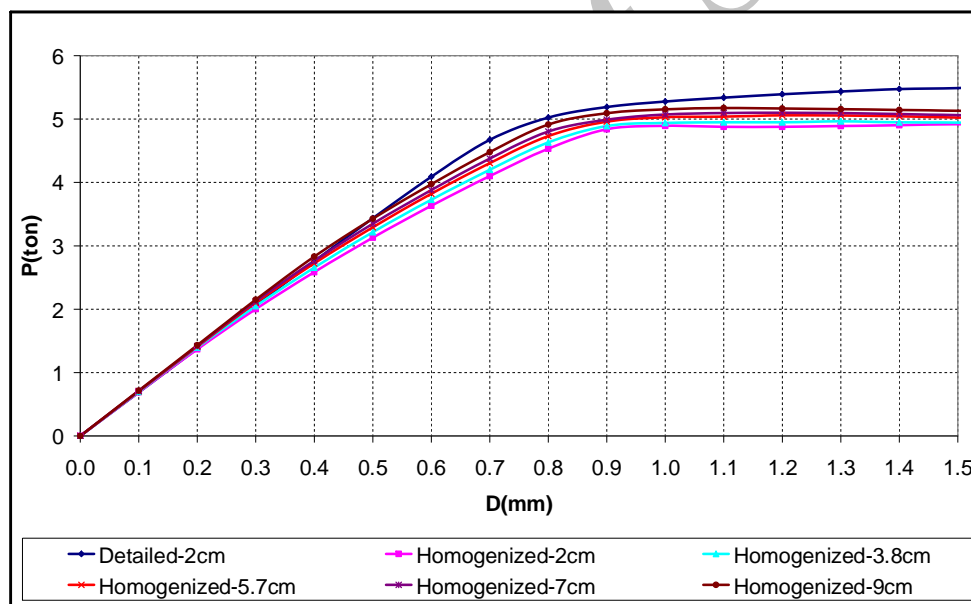
جدول 6: مشخصات غیرخطی انواع ملات های مورد استفاده.

Type of mortar	C_m (MPa)	ϕ_m
Type 1	0.25	27°
Type 2	0.64	30.5°
Type 3	1.03	33.7°
Type 4	1.42	36.7°
Type 5	1.81	39.4°

پانل ها در دو حالت دقیق و همگن شده مطابق شکل (21) تحت فشار قطری مدل سازی شده و منحنی های رفتاری جهت مقایسه در شکل (22) ترسیم شده است. از شکل (22) نتیجه می شود که خطای ناشی از همگن سازی در سختی پانل های بنایی بسیار اندک و برابر 0/34% می باشد همچنین در انواع ملات های مورد استفاده (ضعیف تا قوی)، ظرفیت باربری نهایی پانل های آجری در حالت همگن کمتر از حالت دقیق بوده و خطای ناشی از همگن سازی در برآورد مقاومت نهایی پانل ها در همگی کمتر از 10% و قابل صرف نظر می باشد که جزئیات آن در جدول (7) آورده شده است. از جدول (7) نتیجه می شود که با قوی تر شدن ملات، میزان خطا کاهش می یابد. چون مجموعه به سمت همگن شدن بیشتر پیش می رود.



شکل 22: منحنی‌های نیرو - تغییر شکل پانل‌ها در امتداد قطر تحت فشار در دو حالت دقیق و همگن شده برای C_m/C_b (نسبت مقاومت چسبندگی ملات به آجر)های مختلف.



شکل 23: منحنی‌های نیرو - تغییر شکل پانل‌ها در امتداد قطر تحت فشار در دو حالت دقیق و همگن شده با المان‌ها با بزرگی‌های مختلف.

جدول 8: خطای ناشی از همگن‌سازی در سختی و بار نهایی.

Size of element (cm)	Error in stiffness (%)	Error in strength (%)
2	0.34	9.52
3.8	1.31	8.18
5.7	2.33	6.18
7	2.98	5.4
9	4	4.17

نتیجه گیری

با توجه به تعداد زیاد ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود که از نظر لرزه‌های ضعیف می‌باشند، انجام تحلیل غیرخطی این نوع ساختمان‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای آنها ضروری است تا در صورت لزوم نسبت به بهسازی لرزه‌ای آنها اقدام شود. با توجه به طبیعت دیوارهای آجری که از تعداد زیادی آجر و درزهای افقی و قائم ملات تشکیل شده که مدل‌سازی تک‌تک آنها بسیار دشوار و تقریباً غیرعملی است، لذا در این تحقیق، یک ماده همگن ارتوتروپیک معادل معرفی شده تا جایگزین مصالح بنایی (مجموعه آجر و ملات) شود و مشکلات مدل‌سازی این سازه‌ها را حل نماید. در حالت‌های مختلف بارگذاری داخل صفحه‌ای دیوارهای توپر و دیوار ناهمگن در ضخامت، روش

همگن‌سازی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت مناسب آن مورد تایید قرار گرفت. همچنین برای بررسی رایج‌ترین مود خرابی دیوارها که ترک خوردگی قطری می‌باشد، آزمایش فشار قطری پانل بنایی شبیه‌سازی شد و خطای حاصل از روش پیشنهادی در برآورد مقاومت نهایی، قابل صرف‌نظر و کمتر از 10% به دست آمد. با توجه به تخمین دقیق مشخصه‌های خطی و غیرخطی دیوار آجری غیرمسلح مانند: سختی، ظرفیت باربری نهایی و ... توسط روش همگن‌سازی پیشنهادی و سادگی بسیار زیاد حاصل شده به کمک آن در مدل‌سازی و تحلیل ساختمان‌های بنایی، روش معرفی شده می‌تواند به نحو موثری در کاربردهای عملی روزمره مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- 1 - Roca, P. (2006). "Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models." *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 4, PP. 229-238.
- 2 - Benedetti, A. and Steli, E. (2008). "Analytical models for shear-displacement curves of unreinforced and FRP reinforced masonry panels." *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 3, PP. 175-185.
- 3 - Shrive, N.G. (2006). "The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry." *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 4, PP. 269-277.
- 4 - Chaimoon, K. and Attard, M.M. (2007). "Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression." *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 9, PP. 2056-2068.
- 5 - Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E. and Hamelin, P. (2006). "Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels." *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 5, PP. 308-321.
- 6 - Gabor, A., Bennani, A., Jacquelin, E. and Lebon, F. (2006). "Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels." *Composite Structures*, Vol. 74, No. 3, PP. 277-288.
- 7 - Yi, T., Moon, F. L., Leon, R. T. and Kahn, L. F. (2006). "Analyses of a Two-Story Unreinforced Masonry Building." ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 5, PP. 653-662.
- 8 - Ascione, L., Feo, L. and Fraternali, F. (2005). "Load carrying capacity of 2D FRP/strengthened masonry structures." *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 8, PP. 619-626.
- 9 - Tasnimi, A. A. (2005). *Behavior of confined and non-confined brick buildings*. Natural Disaster Research Institute, Tehran, Iran.
- 10 - Kappos, A. J., Penelis, G. G. and Drakopoulos, C. G. (2002). "Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings." ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 7, PP. 890-897.
- 11 - Betti, M. and Vignoli, A. (2008). "Assessment of seismic resistance of a basilica-type church under earthquake loading: Modelling and analysis." *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, No. 4, PP. 258-283.

- 12 - Betti, M. and Vignoli, A. (2008). "Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance." *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 2, PP. 352-367.
- 13 - Pallarés, F. J., Agüero, A. and Martín, M. (2006). "Seismic behaviour of industrial masonry chimneys." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 7-8, PP. 2076-2090.
- 14 - Yi, T., Moon, F. L., Leon, R.T. and Kahn, L. F. (2006). "Lateral Load Tests on a Two-Story Unreinforced Masonry Building." ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 5, PP. 643-652.
- 15 - FEMA 356. (2000). *Prestandard for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington.
- 16 - Milani, G., Lourenço, P. and Tralli, A. (2007). "3D homogenized limit analysis of masonry buildings under horizontal loads." *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 11, PP. 3134-3148.
- 17 - Tasnimi, A. A. (2004). *Behavior of brick walls Recommended by Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*. Building and Housing Research Center, No. R-404, Tehran, Iran.
- 18 - American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, E519*.
- 19 - Valluzzi, M. R., Tinazzi, D. and Modena, C. (2002). "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates." *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 7, PP. 409-416.
- 20 - Hamid, A. A., El-Dakhkhni, W. W., Hakam, Z. H. R. and Elgaaly, M. (2005). "Behavior of Composite Unreinforced Masonry-Fiber-Reinforced Polymer Wall Assemblages Under In-Plane Loading." ASCE, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 1, PP. 73-83.
- 21 - Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M. R. and Modena, C. (2006). "Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars." *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 2, PP. 289-296.
- 22 - Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G. and Aldea, C. (2006). "Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites." ASCE, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 3, PP. 223-233.
- 23 - ElGawady, M. A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2007). "Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymers." ASCE, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 1, PP. 50-61.
- 24 - Abdou, L., Ami Saada, R., Meftah, F. and Mebarki, A. (2006). "Experimental investigations of the joint-mortar behaviour." *Mechanics Research Communications*, Vol. 33, No. 3, PP. 370-384.