



یک مدل خرابای معادل برای تحلیل استاتیکی غیر خطی دیوارهای برشی آجری غیر مسلح با زوال برشی - لغزشی

محمدامیر نجفقلی پورحقیقی¹

1- استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

najafgholipour@sutech.ac.ir

چکیده

امروزه مدل سازی عددی ساختمان های مصالح بنایی غیر مسلح با توجه به اهمیت ارزیابی لرزه ای این ساختمان ها به طور قابل توجهی مورد توجه محققین قرار گرفته است. مدل های عددی ارائه شده با استفاده از ابزار عددی مختلف از جمله روش های اجزا محدود و اجزا مجزا و همچنین مدل های ساده قاب معادل در انواع مختلف معرفی شده اند. از آنجا که در آیین نامه های ارزیابی و بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، انواع تحلیل ها از جمله خطی و غیرخطی و استاتیکی و دینامیکی استفاده می شوند، بنابراین مدل های ساده کاربردی برای تحلیل ساختمان های مصالح بنایی و دیوارهای آجری غیرمسلح لازم می باشد. در این مقاله یک مدل ساده یک درجه آزادی خرابای معادل برای دیوارهای آجری غیرمسلح که در آنها شکست برشی لغزشی بر اساس معیار مور-کولمب حاکم است، ارائه شده است.

واژه های کلیدی: دیوارهای آجری غیر مسلح، برش درون صفحه، مدل خرابای معادل

1. مقدمه

بسیاری از ساختمان های موجود که اکثر آنها نیز در زلزله ها آسیب پذیر نشان داده اند، ساختمان های مصالح بنایی غیر مسلح می باشند. تعدادی از این ساختمان ها نیز با توجه به قدمت آنها، دارای ارزش تاریخی هستند. بنابراین بررسی آسیب پذیری این ساختمان ها و ارائه راهکارهای مقاوم سازی برای آنها، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به این منظور نشریه ها و آیین نامه های ارزیابی لرزه ای ساختمان های موجود در دنیا و همچنین در ایران از جمله FEMA356 [1]، EuroCode 6 [2] و نشریه مقاوم سازی ساختمان های مصالح بنایی موجود (نشریه 376) [3] منتشر شده اند. با توجه به مبنای این آیین نامه ها که عمدتاً بر مبنای فلسفه طراحی سازه ها بر اساس سطح عملکرد می باشد، انواع تحلیل های خطی و غیرخطی و استاتیکی و دینامیکی سازه ها مورد نیاز است. بنابراین مدل های ساده با حجم محاسبات کم، نظیر روش های قاب و خرابای معادل پرکاربرد می باشند. از سوی دیگر با توجه به اهمیت دیوارهای آجری غیرمسلح در این ساختمان ها، بررسی عملکرد این اعضا به عنوان



مهمترین عناصر لرزه ای باربر، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. این خود دلیلی دیگر بر اهمیت ارائه مدل های مناسب برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی خطی و غیرخطی دیوارهای آجری غیرمسلح می باشد. از اینرو محققین مختلف مدل های ساده خرپا یا قاب معادل را برای این اعضا پیشنهاد داده اند. این مدل ها حتی برای مدل سازی میانقاب های بنایی غیرمسلح در قاب های فولادی یا بتنی نیز ارائه شده اند. از میان تحقیقات فراوان انجام شده می توان به مدل پیشنهاد شده توسط روکا و همکاران [4] در سال 2005 اشاره کرد. آنها مدلی ساده و به صورت قاب معادل و با در نظر گرفتن اثرات دو بعدی مصالح برای مدل سازی ساختمان های آجری به ویژه ساختمان های تاریخی ارائه دادند. نحوه دستیابی به مدل مذکور توسط آنها شامل سه مرحله بود که به شرح زیر است: 1- نوشتن روابط مربوط به المان های یک بعدی منحنی، 2- تطبیق رفتار دیوارها با این المان ها و 3- نوشتن روابط حاکم بر شکست مصالح بنایی. در نهایت سازه های آزمایش شده با این روش نیز مدل سازی شد و نتایج قابل قبولی نیز استخراج گردید. روکا [5] نیز به تنهایی در سال 2006 به بررسی مدلی مبنی بر روابط ساده تعادل برای یافتن مقاومت نهایی درون صفحه دیوارهای آجری غیرمسلح پرداخت. همچنین چن و همکاران [6] در سال 2008 یک مدل ماکرو (قاب معادل) را برای ساختمان های آجری ارائه دادند. در این مدل ساختمان آجری به صورت یک قاب در نظر گرفته می شود و المان های قابی با سه درجه آزادی در هر گره به همراه مفاصل پلاستیک مناسب برای اجزا قاب (تیر یا ستون) تعریف شده است. روشی ساده برای تحلیل ساختمان های با دیوارهای برشی آجری بر اساس روش مورد استفاده در آیین نامه های مکزیک (SMSA) که خود دارای محدودیت هایی نیز می باشد، توسط تی کولونگا و کاولیکونا [7] در سال 2010 ارائه شد. آنها مطالعات خود را بر اساس بازمینی روش مذکور از دو جنبه بنا نهادند که مهمترین آنها این بود که در این روش تنها رفتار برشی برای دیوارهای برشی در نظر گرفته می شود، حال آنکه رفتار خمشی دیوارها به خصوص در نسبت های ارتفاع به طول کمتر تاثیر قابل توجهی بر رفتار سازه دارد. بررسی های انجام شده در این زمینه نشان داد که اصلاح پارامتر موثر ضریب مساحت برشی می تواند این نقص را برطرف کند. اخیراً نیز لاگومارسینو و همکاران [8] در سال 2013 با هدف ارائه مدل ساده قاب معادل برای تحلیل های غیرخطی ساختمان های مصالح بنایی به منظور بدست آوردن سطح عملکرد این ساختمان ها بر اساس استانداردهای مختلف، مدلی با این شرایط را در نرم افزار Tremuri ارائه کردند. در مدل آنها با توجه به اینکه یک مدل قاب معادل می باشد، تنها به زوال کلی درون صفحه دیوار توجه شده است. در کنار این تحقیقات، مدل های ساده پیشنهاد شده برای میانقاب های آجری غیرمسلح نیز موجود است.

از آنجا که یکی از پرکاربردترین روابط حاکم برای تعیین مقاومت برشی درون صفحه دیوارهای آجری رابطه مقاومت برشی مور-کولمب می باشد و این رابطه در بسیاری از آیین نامه های رایج و به خصوص EuroCode 6 [2] به عنوان رابطه حاکم برای مقاومت درون صفحه دیوارهای آجری به شمار می رود، بنابراین مدل رفتاری منطبق بر آن از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. از این رو در این مقاله یک مدل ساده خرپای معادل برای مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح که از رابطه زوال مور کولمب تبعیت می



کنند ارائه شده است. بدیهی است که این مدل با توجه به ساختار رابطه مورکولمب که معیار حاکم بر رفتار برشی درزهای ملات نیز می باشد، برای مدل سازی میکرو درزهای افقی ملات نیز قابل تعمیم است.

2. مدل حاکم مور کولمب و کاربرد آن در استانداردهای مختلف

بر اساس آزمایش های فراوان انجام شده توسط محققین مختلف بر روی نمونه های گوناگون آجرکار از جمله درز ملات یا منشور آجرکار در ابعاد کوچک و همچنین آزمایش های انجام شده بر روی دیوارهای آجری غیرمسلح با مقیاس های مختلف، در اکثر موارد رابطه حاکم بر شکست درون صفحه دیوارهای آجری غیرمسلح همان رابطه حاکم بر معیار مور-کولمب است که شکل کلی این رابطه به صورت معادله زیر می باشد:

$$\tau = C + \sigma\mu \quad (1)$$

در این رابطه τ مقاومت برشی دیوار به صورت تنش، C مقاومت چسبندگی برشی آجر و ملات در درزهای افقی، σ میزان تنش قائم ناشی از سربار و μ ضریب اصطکاک داخلی سطوح آجر و ملات در درزهای افقی است. این رابطه با شکل های گوناگون در آیین نامه های مختلف به عنوان مبنای محاسبه مقاومت برشی درون صفحه دیوار های آجری مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در آیین نامه EuroCode 6 [2] این رابطه صورت زیر معرفی می شود:

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \quad (2)$$

که در این رابطه f_{vk} مقاومت برشی مشخصه مصالح بنایی، f_{vko} مقاومت برشی مشخصه اولیه مصالح بنایی بدون سربار و σ_d میزان سربار موثر وارد بر دیوار می باشند. البته این رابطه در زمانی که درزهای قائم ملات از ملات خالی باشند به شکل زیر اصلاح می گردد:

$$f_{vk} = 0.5f_{vko} + 0.4\sigma_d \quad (3)$$

در آیین نامه FEMA356 [1] و نشریه 376 [3] نیز از شکل کلی این رابطه برای محاسبه مقاومت برشی درون صفحه دیوارهای آجری با زوال لغزشی درزهای افقی ملات استفاده شده است که رابطه مربوطه به شکل زیر می باشد:

$$v_{me} = \frac{0.75 \left(0.75v_{te} + \frac{P_{CE}}{A_n} \right)}{1.5} \quad (4)$$

که در این رابطه v_{me} مقاومت برشی مورد انتظار مصالح بنایی، P_{CE} نیروی ثقلی مورد انتظار وارد بر دیوار، A_n سطح مقطع خالص دیوار و v_{te} مقاومت برشی درزهای افقی ملات می باشند.

در نشریه 360 [9] نیز از شکل کلی رابطه مقاومت برشی مور-کولمب به شکل زیر استفاده شده است:

$$v_a = 0.1v_1 + 0.15\sigma_c \quad (5)$$

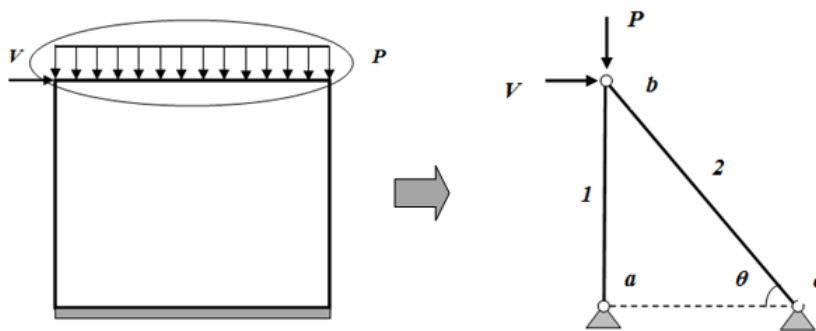
که در این رابطه V_a تنش مجاز برشی دیوار، V_1 چسبندگی برشی درزهای افقی ملات و σ_c میزان سربار وارد بر دیوار می باشند.

علاوه بر این روابط، مدل زوال مور کولمب اصلی ترین مدل حاکم بر رفتار برشی درزهای افقی ملات می باشد که بارها بر اساس آزمایش های گوناگون به اثبات رسیده است.

با توجه به استفاده قابل توجه از روابط با شکل کلی رابطه مقاومت برشی مور-کولمب، بنابراین مدل های کاربردی عددی برای ساختمان های مصالح بنایی و دیوارهای برشی آجری بر اساس این رابطه لازم می باشد. در ادامه مدلی ساده برای تحلیل استاتیکی غیرخطی دیوارهای برشی مصالح غیرمسلح که قابل استفاده در مدل سازی ساختمان های مصالح بنایی غیرمسلح نیز می باشد، ارائه شده است.

3. معرفی مدل پیشنهادی

همانگونه که قبلا نیز شرح داده شد، تحقیقات فراوانی در زمینه ارائه مدل های ساده گوناگون برای تحلیل ساختمان های مصالح بنایی غیرمسلح در گذشته انجام شده است. در اینجا نیز بر اساس یک شبیه سازی انجام شده بین یک دیوار آجری که در آن مد زوال برشی-لغزشی حاکم است و یک خرپای دو عضوی که در شکل (1) نمایش داده شده است، مدل پیشنهادی 1 درجه آزادی برای یک دیوار برشی آجری ارائه شده است.



شکل (1): مدل خرپای معادل پیشنهادی برای دیوار آجری غیرمسلح

در این مدل، دیوار توسط یک خرپای دو عضوی که شامل یک عضو قائم (عضو شماره 1) و یک عضو مایل (عضو شماره 2) می باشد مدل می شود. با توجه به اینکه خرپای مورد نظر یک خرپای معین است، نیروی داخلی اعضا مستقل از نوع و اندازه مقاطع می باشد. از سوی دیگر در سختی جانبی خرپا تنها عضو شماره 2 مشارکت دارد. بنابراین برای تعیین مقطع عضو مایل خرپا بر اساس سختی اولیه دیوار اقدام می شود. به این ترتیب

که سختی جانبی خرپا با استفاده از رابطه 5 بدست آمده و با سختی جانبی دیوار که در منابع مختلف روابط متنوعی برای آن پیشنهاد شده است، معادل قرار داده می شود و در نهایت سطح مقطع عضو 2 خرپا استخراج می گردد.

$$K_t = \left(\frac{AE}{l}\right) \cos^2 \theta \quad (5)$$

که در این رابطه K_t سختی جانبی خرپا، A سطح مقطع عضو مایل خرپا، E مدول الاستیسیته مصالح خرپا، l طول عضو مایل خرپا و θ زاویه تمایل عضو مایل خرپا می باشند.

از سوی دیگر با توجه به ماهیت معادله حاکم بر مقاومت برشی درون صفحه دیوارهای آجری غیر مسلح که تابعی از میزان سربار وارد بر دیوار و یک چسبندگی اولیه می باشد، می توان ارتباطی میان پارامترهای هندسی و مقاومتی خرپای معادل و پارامترهای مقاومتی دیوار بدست آورد. همچنین کل سربار وارد بر دیوار و نیروی جانبی وارد بر آن به ترتیب به صورت دو بار متمرکز قائم و افقی بر گره فوقانی خرپا اعمال می گردد، شکل (1).

به منظور یافتن رابطه ای بین خواص مقاومتی و هندسی خرپای معادل و دیوار آجری مورد نظر، برای گره فوقانی خرپا که بارهای خارجی به آنها اعمال شده است، در دو راستای افقی و قائم معادله تعادل نوشته می شود و نیروهای داخلی اعضا بر حسب نیروهای خارجی که همان نیروی جانبی و میزان سربار وارد بر دیوار هستند بدست می آید. در زیر رابطه بین نیروهای خارجی و داخلی پس از ساده سازی نشان داده شده

$$V = \frac{F_1}{\tan \theta} + \frac{P}{\tan \theta} \quad \text{است:} \quad (6)$$

در این رابطه F_1 نیروی داخلی عضو شماره 1 خرپا است. همانگونه که مشخص است معادله فوق مستقل از نیروی داخلی در عضو شماره 2 خرپا می باشد. از سوی دیگر رابطه 1 را که بر حسب تنش می باشد بر حسب نیرو به صورت زیر بازنویسی می کنیم:

$$V_r = A_n \tau = A_n C + A_n \mu \sigma = A_n C + \mu P \quad (7)$$

در این رابطه V_r مقاومت برشی دیوار است.

مقایسه معادلات 6 و 7 نشان می دهد که جملات اول و دوم هر دو معادله با یکدیگر متناظر می باشند. بنابراین با مقایسه این معادلات، دو پارامتر مجهول θ و F_1 مربوط به خرپای معادل به شکل زیر بر حسب خواص مکانیکی دیوار بدست می آیند:

$$F_1 = A_n C \tan \theta \quad (8)$$

$$\theta = \text{Arc tan} \left(\frac{1}{\mu} \right) \quad (9)$$

بنابراین خرابای معادل با سه پارامتر اصلی که شامل سطح مقطع عضو مایل، زاویه تمایل عضو مایل و مقاومت کششی عضو قائم می باشند، توانایی مدل کردن مقاومت برشی یک دیوار آجری غیر مسلح در تحلیل های استاتیکی غیر خطی را دارد.

مزیت این مدل آن است که به طور خودکار تاثیر میزان سربار بر مقاومت برشی درون صفحه دیوارهای برشی آجری را در تحلیل های استاتیکی غیر خطی در نظر می گیرد. مدلی که می تواند با اصلاحاتی که در آینده روی آن انجام می شود، تحلیل غیر خطی استاتیکی ساختمان های مصالح بنایی را به سادگی میسر کند.

4. استفاده از مدل پیشنهادی برای مدلسازی یک دیوار با مصالح دلخواه

برای این منظور یک دیوار با ابعاد و مقاومت مصالح دلخواه انتخاب شده و مقاومت به صورت دستی و با استفاده از رابطه کلی 1 بدست می آید. سپس پارامترهای مدل خرابی معادل برای آن محاسبه شده و با مدل سازی آن در نرم افزار SAP2000، مقاومت درون صفحه دیوار استخراج می گردد.

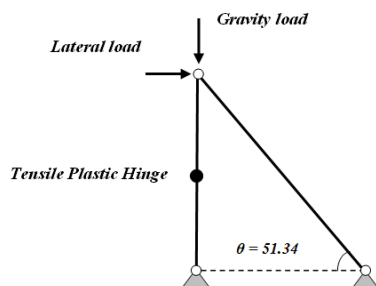
جدول (1): مشخصات دیوار آجری غیر مسلح

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
7000	مدول ارتجاعی مصالح بنایی (مگاپاسکال)	3/0	طول دیوار (متر)
0/2	چسبندگی برشی (مگاپاسکال)	3/0	ارتفاع دیوار (متر)
0/8	ضریب اصطکاک داخلی	0/3	ضخامت دیوار (متر)
		120000	میزان سربار (نیوتن)

جدول (2): مشخصات خرابی معادل

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
51/34	زاویه تمایل عضو مایل (درجه)	225	مقاومت کششی عضو قائم خرابی (کیلو نیوتن)

با استفاده از معادله 1 مقاومت درون صفحه دیوار معادل 276 کیلونیوتن بدست می آید. همچنین پارامترهای خرابی معادل محاسبه شده و در جدول 2 ارائه شده اند. با استفاده از این پارامترها مدل عددی خرابی معادل در نرم افزار SAP2000 ساخته شده و تحلیل انجام می گردد. در شکل 2 مدل ساخته شده در نرم افزار نشان داده شده است. پس از انجام تحلیل ساده غیر خطی، مقاومت نهایی برشی درون صفحه دیوار با مقداری دقیقاً برابر مقدار بدست آمده به روش دستی بدست می آید. بدیهی است که این مدل می تواند به صورت عمومی برای مدل سازی یک ساختمان مصالح بنایی یک طبقه و انجام یک تحلیل استاتیکی غیر خطی به کار برده شود.



شکل (2): مدل خرابای معادل به همراه مفصل پلاستیک در نرم افزار

از سوی دیگر در صورتی که منحنی نیرو-جابجایی مفصل مورد نظر در اختیار باشد، می توان به سادگی این مدل را به مفصل اختصاص داد و منحنی نیرو-جابجایی را برای دیوار یا یک ساختمان استخراج کرد.

5. خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ساده خرابای معادل برای یک دیوار آجری غیر مسلح که در آن شکست برشی لغزشی حاکم است، ارائه گردید. مدل مورد نظر نشان داد که می تواند به خوبی مقاومت برشی درون صفحه دیوار را شبیه سازی کند. بنابراین این مدل برای تحلیل های استاتیکی غیرخطی دیوارهای آجری غیر مسلح کاربرد دارد. مزیت این مدل آن است که میزان تاثیر سربار بر مقاومت درون صفحه دیوارهای آجری را به طور خودکار در نظر می گیرد. این مدل برای تحلیل های غیرخطی یک ساختمان مصالح بنایی غیرمسلح بر اساس آیین نامه های مقاوم سازی قابل تعمیم بوده و انجام تحلیل ها با حجم عملیات کم را میسر می سازد. همچنین در آینده می توان مدل مذکور را با استفاده از روابط مناسب نیرو-جابجایی اعضا که در آیین نامه های موجود تعریف شده اند، ارتقا بخشید.

6. مراجع

- [1] Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA356, 2000, Federal Emergency Management Agency.
- [2] EN: 1996-1-1, Eurocode 6: Design of Masonry Structures: Part 1-1-General rules for reinforced and unreinforced structures, 2005.
- [3] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های بنایی غیرمسلح موجود (نشریه 376)، 1386، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- [4] Roca, P., Molins, C. and Mari, A. R., Strength capacity of masonry wall structures by the equivalent frame method, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **131**, 1601-1610, 2005.

- [5] Roca, P., Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models, *Construction and Building Materials*, **20**, 229-238, 2006.
- [6] Chen, S. Y., Moon, F. L. and Yi, T., A macroelement for the nonlinear analysis of in-plane unreinforced masonry piers, *Engineering Structures*, **30**, 2242-2252, 2008.
- [7] Tena-Colunga, A. and Cano-Licona, J., Simplified method for the seismic analysis of masonry shear-wall buildings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **136**, 511-520, 2010.
- [8] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. and Cattari, S., TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, **56**, 1787-1792, 2013.
- [9] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه 360)، 1385، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.