

رفتار و الگوی شکست دیوار بنایی بلوک سیمانی تحت اثر بار افزون

محمد خلیل خواجه ثیان¹، فاطمه وطن پور²، محمود رضا ماهری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

Khajeheyan@yahoo.com

2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

Vatanpour87@yahoo.com

3- استاد، بخش راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

چکیده

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی و عددی دیوار بنایی بلوک سیمانی تقویت نشده تحت اثر بار برشی درون صفحه به صورت بار افزون (Pushover) پرداخته شده است. برای مدل سازی دیوار از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده می شود. برای مطالعه رفتار درون صفحه دیوار، مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و پاسخ غیر الاستیک نیرو-تغییر مکان و مد شکست نمونه آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه و کالیبره می شوند. با مقایسه نتایج ملاحظه می گردد که بین نتایج حاصل از مدل سازی و آزمایش به لحاظ سختی موثر و مقاومت نهایی، هماهنگی مناسبی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: دیوار بنایی تقویت نشده، بلوک سیمانی، مدل سازی عددی، آنالیز بار افزون، برش درون صفحه

1. مقدمه

بخش عمده ای از ساختمان های موجود در کشور به خصوص مناطق جنوبی، از نوع مصالح بنایی با بلوک سیمانی می باشند. با توجه به زلزله های اخیر در شهرستان های کاکلی و برازجان استان بوشهر و تلفات جانی و مالی بسیار گسترده و جبران ناپذیر در ارتباط با سازه های بنایی، لزوم بررسی نوع خسارت وارده بر این گونه سازه ها و رفتار شناسی آن ها امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

در گذشته محققین زیادی به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لرزه ای دیوارهای آجری و خصوصیات مکانیکی و همچنین مقاوم سازی آنها پرداخته اند. اما تحقیقات بسیار کمی بر روی رفتار لرزه ای و مکانیسم شکست دیوارهای بلوک سیمانی و همچنین خصوصیات مکانیکی آنها صورت گرفته است. در اینجا به برخی از مطالعات انجام گرفته اشاره می شود.

آقایان رازانی و Lee در سال 1973 [1]، مودهای مشاهده شده شکست دیوارهای بنایی در زلزله قیر در سال 1972 را گزارش کرده اند. همچنین آقای ماهری، پاسخ سازه های بنایی را به زلزله منجیل در سال 1990 [2] و

زلزله بم در سال 2003 [3]، گزارش کرده اند. مشاهدات آنها نشان می دهد که لغزش مرز آجر- ملات به صورت افقی و قطری، مود غالب شکست در دیوارهای برشی آجری می باشد. که این مطلب به چسبندگی ضعیف ملات و آجر، به علت عدم رعایت استانداردهای ساخت نسبت داده می شود.

در زمینه دیوارهای آجری، A.W. Page در سال 1978 [4]، از اولین کسانی بود که به مدل سازی عددی آجرکار تحت ترکیب نیروهای درون صفحه به صورت مدل سازی میکرو پرداخت. در مدل وی آجرها رفتار کاملاً خطی دارند و رفتار غیر خطی آجر کار ناشی از رفتار درزهای ملات در نظر گرفته شده است. H. P. Lotfi و P. B. Shing نیز در سال 1994 [5] به مدل سازی عددی دیوارهای آجری به روش میکرو پرداختند.

P. B. Lourenco و J. G. Rots در سال 1996 [6]، المان تماسی جهت مدل سازی دیوارهای آجری به روش میکرو را ارائه دادند. معیار زوال حاکم بر درزهای ملات در این روش مدل سازی، ترکیبی از معیار زوال مور- کلمب با معیار حداکثر مقاومت کششی به همراه یک کلاهیک فشاری می باشد. علاوه بر آن یک المان تماسی داخلی برای آجر جهت مدل سازی شکست کششی و برشی در واحد های بنایی استفاده شده است.

آقایان ماهری، نجف قلی پور و رجیبی در سال 2011 [7] در دانشگاه شیراز، به بررسی جامع آزمایشگاهی و عددی اثرات درزهای افقی و قائم ملات بر روی مقاومت های برشی درون صفحه و خمشی خارج از صفحه، دیوارهای بنایی آجری پرداختند. با توجه به خواص مصالح و مودهای شکست دیوار، معلوم شد که درزهای قائم به اندازه 35٪ تا 50٪ در ظرفیت برشی درون صفحه دیوار مشارکت دارند.

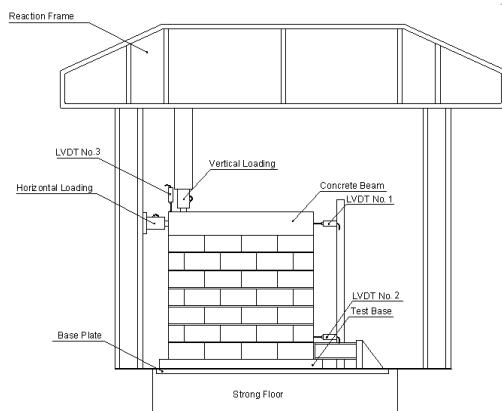
در زمینه دیوارهای بلوک سیمانی، آقایان Hong Hao و Chengqing Wu در سال 2008 [8]، از یک روش همگن سازی ساده و تئوری مکانیک شکست برای مدل کردن یک واحد پایه سه بعدی استفاده کردند تا خصوصیات مصالح معادل شامل خصوصیات الاستیک معادل، مقاومت و خصوصیات شکست واحد بنایی بلوک بتنی توخالی را بدست آورند. نتایج بدست آمده نشان می دهند که بر خلاف آجر بنایی توپر، مقاومت واحد بنایی بتنی توخالی تحت شرایط بار گذاری دو محوری و سه محوری، افزایش پیدا نمی کند. همچنین نشان دادند که خصوصیات الاستیک واحد بنایی بتنی توخالی مستقل از اندازه واحد پایه در روش همگن سازی ساده در شرایط فشار تک محوری می باشد. ولی هندسه بلوک بتنی توخالی اثر مهمی بر روی مقادیر تنش و کرنش متوسط شده واحد پایه دارد.

آقایان Mosallam و Banerjoo در سال 2011 [9]، به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی ظرفیت برشی درون صفحه دیوارهای بنایی غیر مسلح مقاوم سازی شده با FRP، پرداختند. در این تحقیق آنها به این نتیجه رسیدند که مد شکست نهایی دیوار از حالت ترد به حالت شکل پذیر تغییر می کند.

آقای P. Medeiros و همکاران در سال 2012 [10]، به مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار دیوارهای بنایی با بلوک سبک سیمانی به صورت محصور شده و محصور نشده تحت اثر بارهای درون صفحه افقی به صورت رفت و برگشتی پرداختند. مدل سازی دیوار به صورت مدل ماکرو اجزای محدود غیرخطی پیوسته همگن و بر مبنای مدل های تنش-کرنش کلی پخش ترک، انجام گرفته است.

2. مطالعات آزمایشگاهی

با توجه به اینکه عمده دیوارهای بلوک سیمانی در کشور، به صورت دیوار با درزهای قائم خالی ساخته می شوند، لذا جهت بررسی رفتار اینگونه دیوارها، یک نمونه دیوار به صورت غیر استاندارد با طول 1560 میلی متر و ارتفاع 1330 میلی متر ساخته شده است. برای این کار بلوک های سیمانی به ابعاد $180 \times 180 \times 390$ میلی متر به صورت توخالی در 7 ردیف 4 تایی چیده شده و روی هر ردیف ملات قرار می گیرد. جهت اعمال بارگذاری افقی و قائم یک تیر بتن مسلح با ارتفاع 250 میلیمتر به منظور شبیه سازی دیافراگم سقف بر روی دیوار ساخته شد.



شکل (1): نمای سیستم انجام آزمایش

1.2. سیستم، ابزار دقیق و نحوه انجام آزمایش برش درون صفحه

سیستم انجام آزمایش در شکل (1) نشان داده شده است. اجزای اصلی این سیستم عبارتند از: قاب عکس العمل، کف مقاوم و جک های هیدرولیکی قائم 30 تنی. بارگذاری نیز از طریق 2 جک افقی و قائم انجام شده است، در حقیقت جک افقی نیروی جانبی درون صفحه را به نمونه اعمال می کند و جک قائم که به طور همزمان کار می کند، دیوار را به رفتار برشی وا می دارد. آزمایش به صورت استاتیکی بار افزون (Pushover) با گام بار گذاری حدود 3 KN انجام گرفته است. در هر مرحله از بار گذاری تغییر شکل های نمونه با استفاده از 3 جابجایی سنج (LVDT) نصب شده بر روی دیوار ثبت شده است. بار گذاری تا شکست کامل نمونه ادامه یافته و در نهایت منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه استخراج شده است.

2.2. نتایج مطالعات آزمایشگاهی

3

در شکل (2)، نحوه ایجاد شکست برشی دیوار نشان داده شده است. ملاحظه می شود که ترک قطری برشی کاملاً از سطح تماس آجر و ملات به صورت لغزشی عبور می کند. که علت اصلی آن عدم پر شدن درزهای قائم دیوار با ملات می باشد.

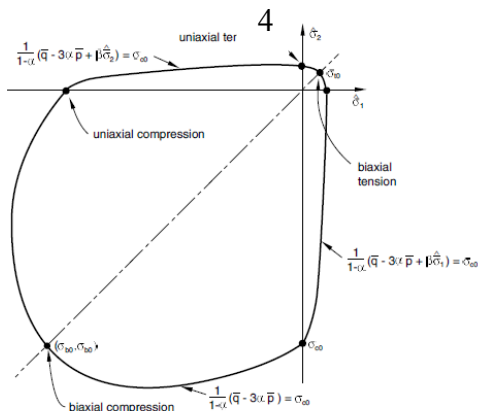


شکل (2): الگوی شکست دیوار در نمونه آزمایشگاهی

3. مدل سازی عددی

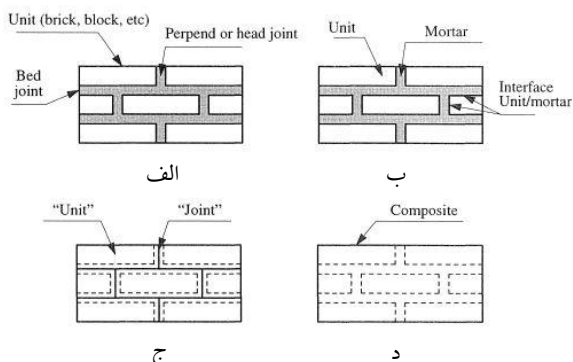
به طور معمول بررسی رفتار اجزای و المان ها و به طور کلی تمام پارامترهای موجود در آزمایشگاه به دلایل متعددی از جمله صعوبت، هزینه و امکانات در دسترس، امکان پذیر نمی باشد. از این رو استفاده از مدل های ریاضی و تحلیلی کالیبره شده بر نتایج آزمایش، کمک موثری به درک رفتار خواهد داشت. بنابراین پس از اتمام مطالعات آزمایشگاهی، به مدلسازی و آنالیز غیرخطی دیوار در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS جهت گسترش مدل، می پردازیم. در این نرم افزار برای مدل سازی مصالح ترد و شکننده ای همچون بتن و مصالح بنایی از مدل رفتاری پلاستیسیته خرابی بتن استفاده شده است که در این مدل رفتاری از معیار گسیختگی اصلاح شده

Lubliner و همکاران توسط Lee و Fenves برای ارزیابی مقاومت ماده در برابر فشار و کشش استفاده می شود [11]. منحنی گسیختگی این مدل رفتاری در شکل (3) نشان داده شده است.



شکل (3): منحنی گسیختگی مدل رفتاری پلاستیسته خرابی بتن در حالت تنش دو بعدی

به طور کلی مدل سازی دیوارهای بنایی به سه دسته جزئی نگر (میکرو)، جزئی نگر ساده شده و کلی نگر (ماکرو) تقسیم می شود [12]. در روش مدل سازی جزئی نگر (میکرو) واحدهای بنایی و ملات ها هر کدام به صورت المان های پیوسته مدل شده و ناحیه تماس بین واحد بنایی و ملات نیز با المان های جدا کننده مدل سازی می شود که این کار با وجود دقت قابل توجه، مستلزم حجم محاسبات بسیار زیاد و شیوه مدل سازی بسیار پیچیده بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در روش مدل سازی جزئی نگر ساده شده، جهت کاهش حجم محاسبات، می توان المان ملات را حذف و خواص آن را در المان تماسی بین واحدها به صورت اصطکاک و چسبندگی، لحاظ نمود. در این صورت ضخامت ملات در ضخامت واحد ها گنجانده خواهد شد. البته در این روش قابلیت خرد شدگی ملات وجود ندارد که این امر با توجه به نادر بودن این رویداد، خطای قابل توجهی در نتایج ایجاد نمی کند.

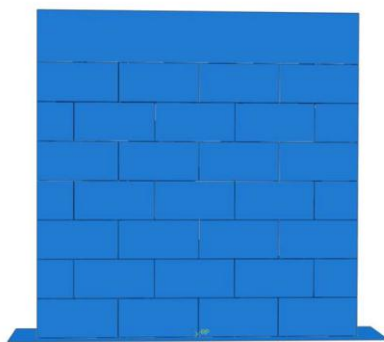


شکل (4): رویکرد های مختلف مدل سازی سازه های بنایی: الف- نمونه بنایی، ب- مدل سازی جزئی نگر (میکرو)، ج- مدل سازی جزئی نگر ساده شده، د- مدل سازی کلی نگر (ماکرو)

در روش مدل سازی کلی نگر (ماکرو)، دیوار 5، به صورت یک ماده همگن و یکدست، با خواص مکانیکی معادل فرض می شود. مدل سازی در این روش ساده بوده و حجم محاسبات نیز بسیار کمتر از مدل سازی جزئی نگر می باشد. اما دقت این روش چندان زیاد نیست. شکل (4) انواع روش های مدل سازی را نشان می دهد. در این تحقیق به منظور بررسی دقیق تر رفتار دیوار، مدل سازی دیوار به صورت جزئی نگر ساده شده انجام می گیرد.

1.3. مدل اجزای محدود

برای مدل سازی بلوک ها از المان های مکعبی با تابع درجه یک و انتگرال گیری کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است. به منظور بررسی دقیق تر رفتار دیوار، بلوک ها به صورت توخالی مدل شده است. در ضمن فونداسیون بتنی زیر دیوار به علت عدم رویت خرابی در آزمایشگاه و صلیبیت قابل توجه نسبت به دیوار و بررسی های عددی انجام گرفته، به صورت یک صفحه صلب دو بعدی جایگزین شده است. در شکل (5) مدل اجزای محدود نشان داده شده است. خصوصیات سطح تماس از جمله چسبندگی برشی و کششی و ضریب اصطکاک بین سطوح تماس، از جمله پارامترهای لازم برای مدل سازی می باشد. خصوصیات مکانیکی مصالح بنایی که از طریق آزمایش های انجام شده طبق استاندارد ASTM بدست آمده اند و لایه چسبنده مدل سازی شده، به ترتیب در جدول (1) و (2) ارائه شده است.



شکل (5): مدل اجزای محدود دیوار بنایی

جدول (1): پارامترهای مورد استفاده برای مصالح بنایی

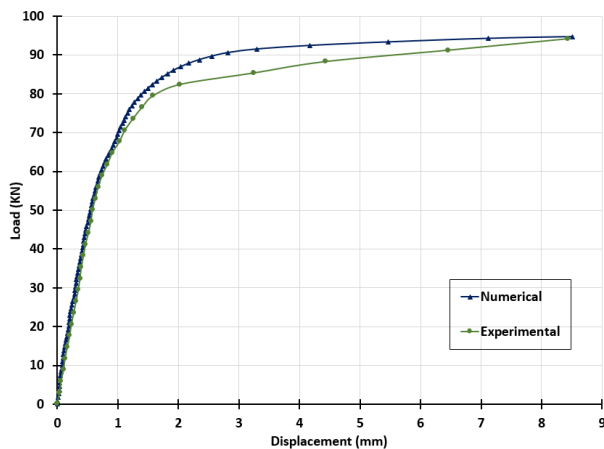
پارامتر	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون ν
مقدار	7000	8/5	1/5	0/15

جدول (2): پارامترهای 6 استفاده برای المان های تماسی

پارامتر	ضریب اصطکاک μ_v (درز قائم)	ضریب اصطکاک μ_h (درز افقی)	چسبندگی کششی بین ملات و بلوک (MPa)	چسبندگی کششی بین ملات و بلوک (MPa)
مقدار	0/75	0/95	0/58	0/41

2.3. نتایج اجزای محدود

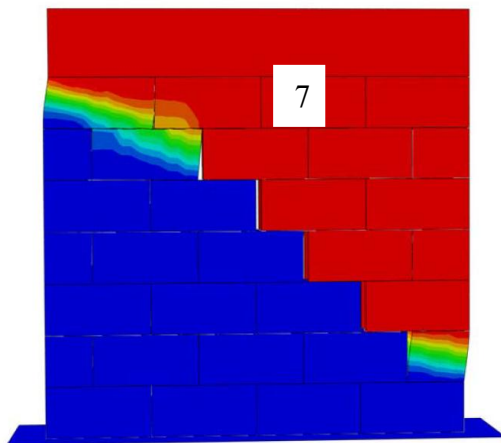
پاسخ نیرو-تغییر مکان دیوار بنای تقویت نشده حاصل از آزمایش و مدل سازی در شکل (6) نشان داده شده و مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت سنجی شده و الگوی توزیع ترک و تغییر شکل دیوار بنایی در اثر بار گذاری اعمالی در شکل (7) (کانتورهای رنگی برای این شکل بیانگر تغییر مکان افقی درون صفحه دیوار می باشند) نمایش داده شده است. مشاهده می گردد که در هر دو نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود تحت بار گذاری دارای مد شکست کشش قطری (Diagonal Tension) می باشد. همچنین در جدول (3) مقادیر عددی مقاومت نهایی و سختی مؤثر نمونه، حاصل از تحلیل و آزمایش با هم مقایسه شده اند.



شکل (6): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل عددی تحت بار گذاری بار افزون

جدول (3): مقایسه پارامترهای رفتاری استخراج شده از نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

	مقاومت نهایی (KN)	سختی مؤثر (KN/mm)
نمونه آزمایشگاهی	94/14	82/44
مدل عددی	94/73	86/82
میزان خطا و اختلاف نتایج (%)	0/63	5/3



شکل (7): الگوی شکست دیوار در تحلیل عددی

4. خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا رفتار یک نمونه دیوار بنایی تقویت نشده با بلوک سیمانی در آزمایشگاه تحت اثر نیروی برشی درون صفحه بررسی شده و سپس با استفاده از نرم افزار اجزای محدود و به روش مدل سازی جزئی نگر ساده شده مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه پارامترهایی چون نحوه شکست، منحنی نیرو-تغییر مکان، سختی مؤثر و مقاومت نهایی نشان می دهند که مدل سازی ارائه شده، توانسته رفتار دیوار بنایی بلوک سیمانی را به نحو مناسبی شبیه سازی نماید.

5. مراجع

- [1] Razani, R. & Lee, K.L. The Engineering aspects of the Qir earthquake of April 10, 1972 in Southern Iran, *National Academy of Engineering, Washington D.C.*, 1973.
- [2] Maheri, M.R. Engineering aspects of Manjil, Iran earthquake of June 1990, *A Field Report by EEFIT, W.S. Atkins Engineering Sciences, Leatherland, U.K.*, Publication No. G8630/90/001, 1990.
- [3] Maheri, M.R., Naeim, F. & Mehraïn, M. Performance of adobe residential buildings in the 2003 Bam, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. S1, 2005.
- [4] Page, A. w. Finite element model for masonry, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. ST58, pp. 1267-1285, 1978.
- [5] Lotfi, H.R. Interface model applied to fracture of masonry structures, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 63-80, 1994.
- [6] Lourenco, B. P. & Rots, J. G. Multisurface interface model for analysis of masonry structures, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 7, pp. 660-668. 1997.
- [7] Maheri, M. R., Najafgholipour, M. [^] & Rajabi A. R. The influence of mortar head joints on the in-plane and out-of- Γ seismic strength of brick masonry walls, *IJST, Transactions of civil and environmental engineering*, Vol. 35, pp. 63-79, 2011.
- [8] Chenqing, Wu., Hong Hao. Numerical derivation of averaged material properties of hollow concrete block masonry. *Journal of Engineering Structures*, Vol. 30, PP.870-883, 2008.
- [9] Mosallam. A., Banerjoo. S. Enhancement in in-plane shear capacity of unreinforced masonry (URM) walls strengthened with fiber reinforced polymer composites". *Journal of Composites*, Vol. 42, pp. 1657-1670, 2011.
- [10] Medeiros. P., Vasconcelos. G., Lourenco. P.B., Gouveia. J. Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls, *Journal of Construction and Building Materials*, 2012.
- [11] A. S. U. Manual, Version 6.12, *ABAQUS Inc*, 2012.
- [12] Lourenço, P.B. Computational Strategies for Masonry Structures, *PhD thesis, Delft University of Technology*, 1996.