

تحلیل غیرخطی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح به روش اجزاء مجزا

امین محب خواه^۱، احمد سروچراغی^۲

۱- استادیار سازه، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

amoheb@malayeru.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۴/۱۱]

چکیده- در این مقاله یک مدل اجزاء مجزای سه‌بعدی برای تحلیل غیرخطی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح تحت بار جانبی استاتیکی یکنوا توسعه می‌یابد. به منظور صحت سنجی مدل یاد شده از نتایج آزمایش یک ساختمان بنایی دوطبقه که طبق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است استفاده می‌شود. با توجه به کم بودن تنش‌های ثقلی در ساختمان‌های بنایی متداول، برای توصیف خصوصیات رفتاری آجرها از مدل ارتجاعی و برای درزه‌های ملات از مدل موهر-کولمب استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از این است که مدل توسعه یافته به خوبی قادر به شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح است و از آن می‌توان برای انجام مطالعات پارامتری و رفتارسنجی آنها استفاده نمود. نظر به اینکه در بررسی ظرفیت باربری ساختمان‌های بنایی در هر جهت از اثر دیوارهای متعامد چشم‌پوشی می‌شود، پس با انجام یک مطالعه پارامتری، میزان تاثیر این دیوارها نیز بررسی شد. نتایج مطالعه پارامتری نشان داد که دیوارهای عمود بر جهت بارگذاری در ساختمان مورد بررسی، درصد قابل توجهی از ظرفیت برشی ساختمان را تامین می‌کنند.

واژگان کلیدی: ساختمان بنایی غیرمسلح؛ روش اجزاء مجزا؛ تحلیل غیرخطی؛ رفتار لرزه‌ای؛ ظرفیت برشی.

۱- مقدمه

ساختمان‌های مصالح بنایی همواره به دلایلی از قبیل ارزان بودن، امکان تهیه مصالح از منطقه احداث بنا و پایین بودن هزینه نگهداری آن، یکی از پرکاربردترین سامانه‌های ساختمانی در صنعت ساخت و ساز در مناطق مختلف ایران به‌ویژه مناطق روستایی بوده‌اند. اما متأسفانه با نگاهی گذرا به تاریخچه حوادث غیرمترقبه در کشور ملاحظه می‌شود که همین ساختمان‌ها در حین وقوع زلزله‌های مخرب بیشترین تلفات و خسارات مالی و جانی را به بار آورده‌اند. علت این امر را می‌توان در عدم شناخت صحیح رفتار آنها و رعایت نکردن اصول ساده مهندسی دانست. به‌ویژه در نیم قرن اخیر به دنبال ورود مصالح جدید فولاد و بتن به کشور و کم توجهی به ساختمان‌های مصالح بنایی که طیف گسترده‌ای از ساختمان‌ها

را تشکیل می‌دهند و سپردن مسئولیت ساخت آنها به افراد غیرمتخصص موجب مغفول ماندن اصولی شده است که از قرن‌ها قبل در ساخت سازه‌های عظیم بنایی در ایران که هنوز هم ایستایی خود را حفظ نموده‌اند مرسوم بوده است. البته خوشبختانه در دو دهه اخیر خلاصه‌ای از این اصول ساده مهندسی در ساخت و اجرای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح در استاندارد ۲۸۰۰ [۱] ایران گردآوری شده و به مرور زمان با استفاده از تجارب افراد صاحب‌نظر و متخصص بهبود یافته است.

ساختمان بنایی غیرمسلح فاقد سیستم باربر جانبی مشخصی بوده و در حقیقت دیوارهای برشی بنایی غیرمسلح تنها عناصری هستند که به طور همزمان هر دو نوع بار ثقلی و جانبی زلزله را تحمل می‌نمایند. البته رفتار مناسب لرزه‌ای این

نوع ساختمان‌ها منوط به این است که مجموعه دیوارها و سقف‌ها به شکل یکپارچه عمل نموده و با تامین عملکرد جعبه‌ای ساختمان (حذف موده‌های گسیختگی موضعی مانند جدایی دیوارها از یکدیگر) موجبات جذب نیروهای جانبی زلزله به وسیله‌ی دیوارهای برشی بنایی را فراهم نمایند. هرچند در استاندارد ۲۸۰۰ [۱] برای رسیدن به رفتار مناسب ساختمان‌های بنایی غیرمسلح، ضوابط و محدودیت‌هایی برای ارتفاع، پلان، سطح نسبی بازشوها و طول دیوارهای سازه‌ای ارائه شده است، ولی غالباً مطمئن‌ترین راه برای بررسی کفایت لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ [۱]، انجام آزمایش‌های استاتیکی یا دینامیکی روی این ساختمان‌هاست. تسنیمی [۲] در سال ۱۳۸۳ آزمایش‌هایی را روی دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ با مقیاس ۲:۳ تحت بارهای ثقلی و جانبی چرخه‌ای انجام داد. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها حاکی از این مطلب است که دیوارهای آجری کلاف‌دار نه تنها از نظر شکل‌پذیری بلکه از نظر مقاومت نیز نسبت به دیوارهای بدون کلاف برتری دارند. تسنیمی [۳] همچنین در سال ۱۳۸۵ به منظور بررسی رفتار سه‌بعدی ساختمان‌های بنایی، دو ساختمان بنایی با کلاف و بی‌کلاف با مقیاس ۱:۲ را در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار داد. انجام آزمایش‌ها روی ساختمان‌های بنایی واقعی با مشکلاتی از قبیل پرهزینه بودن و زمان‌بر بودن آن‌ها مواجه است و برای بررسی رفتار آنها به صورت جامع، روش مناسبی نیست. روش دیگر برای بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی در این قبیل موارد، استفاده از روش‌های عددی و محاسباتی مانند روش

تشکیل می‌دهند. در روش اجزاء مجزا، بلوک‌ها را می‌توان به صورت صلب یا انعطاف‌پذیر در نظر گرفت. دو ویژگی اصلی این روش که منجر به، به کارگیری آن در تحلیل سازه‌های مصالح بنایی می‌شود عبارتند از: الف) امکان در نظر گرفتن جابه‌جایی، چرخش و جدایی کامل بلوک‌ها و ب) امکان پیش‌بینی خودکار نقاط تماسی جدید در حین انجام فرآیند محاسبات. در محاسبات روش اجزاء مجزا به شکل متناوب از قانون دوم نیوتن برای همه‌ی بلوک‌ها و گره‌ها و قانون نیرو-جابه‌جایی در کلیه نقاط تماسی استفاده می‌شود. قانون نیرو-جابه‌جایی برای محاسبه نیروهای تماسی بر حسب جابه‌جایی‌های معلوم به کار می‌رود. قانون دوم نیوتن نیز حرکت بلوک‌ها را در اثر نیروهای اعمالی به آنها پیش‌بینی می‌کند. در سال‌های اخیر، روش اجزاء مجزا برای تحلیل سازه‌های مصالح بنایی نیز بکار رفته است. لموس [۵] در سال ۱۹۹۷ رفتار دینامیکی سه بعدی قوس‌های مصالح بنایی سنگی را با استفاده از روش اجزاء مجزا مورد بررسی قرار داد. سینکرایان و آزودو [۶]، سینکرایان و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۸ و آزودو و همکاران [۸] نیز در سال ۲۰۰۰ از روش اجزاء مجزا برای شبیه‌سازی دینامیکی رفتار پل‌ها و برج‌های مصالح بنایی استفاده نمودند. محب‌خواه [۹] در سال ۱۳۸۶ با استفاده از نرم‌افزار اجزای مجزای دو بعدی توسعه یافته به وسیله‌ی کاندا (UDE²) به مدل سازی دیوارهای بنایی و میانقاب‌های بنایی در قاب‌های فولادی پرداخت. رولاند و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش اجزای مجزا به بررسی اثر نوع خاکریز^۳ بر رفتار سازه‌ای پل‌های بنایی قوسی چند دهانه پرداختند.

اجزاء محدود و اجزاء مجزا است.

روش اجزاء گسسته یا مجزا^۱ در سال ۱۹۷۱ به وسیله‌ی کاندا^۱ برای مدل‌سازی توده‌های سنگی درزه‌دار تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی پیشنهاد شد [۴]. در این روش، یک محیط ناپیوسته به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا در نظر گرفته شده و ناپیوستگی‌ها یا درزه‌ها نیز مرزهای این بلوک‌ها را

در این مقاله سعی می‌شود تا امکان مدل‌سازی رفتار سه‌بعدی ساختمان‌های آجری با استفاده از روش اجزاء مجزا بررسی شود. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار اجزای مجزای سه‌بعدی توسعه یافته به وسیله‌ی کاندا^۲ و همکاران (3DEC^۴) [۱۱] مدلی از ساختمان مورد آزمایش به وسیله‌ی تسنیمی [۳]

2 Universal Distinct Element Code (UDE²)

3 Backfill

4 Three-Dimensional Distinct Element Code (3DEC)

1 Distinct or Discrete Element Method (DEM)

می‌شود [۱۳]:

$$k_n = \frac{E_b E_m}{h_m (E_b - E_m)} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{G_b G_m}{h_m (G_b - G_m)}$$

این ضرایب در واقع مقادیر سختی فنرهای ارتجاعی نرمال و برشی هستند که در مدل‌سازی به منظور اعمال اثر ملات در بین آجرها به کارگرفته می‌شوند. در این روابط، E_b و E_m به ترتیب مدول ارتجاعی آجر و ملات و G_b و G_m نیز مدول برشی آجر و ملات است. h_m نیز ضخامت واقعی ملات است. مقدار ضریب پواسون مصالح بنایی برابر با 0.2 در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. از آنجا که مقادیر ضریب ارتجاعی آجر و ملات مصرفی در گزارش تسنیمی داده نشده است، بنابراین برای برآورد این مقادیر از نتایج آزمایش‌های انجام شده به وسیله ی لورنکو [۱۲] بر حسب مقاومت فشاری آجر و ملات استفاده شده است.

۲-۲- انتخاب معیار گسختگی و محاسبه پارامترهای غیر ارتجاعی

عوامل زیادی در رفتار مدل ریاضی یک سازه تاثیرگذار است. مهم‌ترین این عوامل، نوع مدل رفتاری انتخاب شده برای توصیف رفتار غیرخطی مصالح مصرفی است. در برنامه 3DEC برای توصیف رفتار بلوک‌ها و درزه‌ها، مدل‌های رفتاری متعددی از قبیل: مدل‌های ارتجاعی همسانگرد^۱، دراگر-پراگر^۲، موهر-کولمب^۳ و غیره وجود دارد. اگر مقدار تنش‌های ثقلی در دیوارهای بنایی کم باشد، رفتار غیرخطی دیوار بیشتر ناشی از وقوع لغزش در بین درزه‌ها خواهد بود. پس در این حالت می‌توان رفتار بلوک‌ها (آجرها) را ارتجاعی فرض نموده، و برای رفتار غیرخطی درزه‌ها از مدل‌های موهر-کولمب یا دراگر-پراگر استفاده نمود. در صورتی که مقدار تنش ثقلی زیاد باشد، باید برای بلوک‌ها نیز از مدل‌های غیرخطی بهره جست.

ساخته شده و تحت بار جانبی یکنوا به صورت غیرخطی تحلیل می‌شود و در پایان برای درستی آزمایش، نتایج حاصل از مدل توسعه یافته با نتایج آزمایش مقایسه می‌شود. همچنین با استفاده از مدل اجزای مجزای توسعه یافته به بررسی میزان تاثیر دیوارهای عمود بر جهت بار جانبی در تامین ظرفیت برشی ساختمان‌های بنایی پرداخته می‌شود.

۲- توسعه مدل اجزای مجزا برای دیوارهای مصالح بنایی

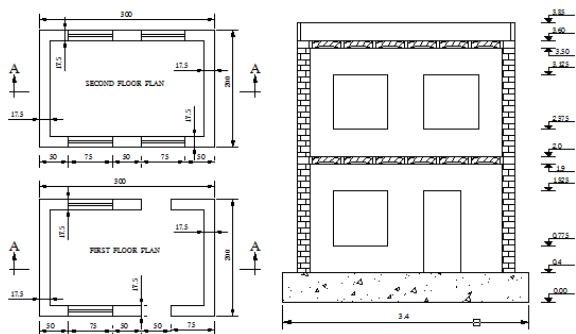
در این پژوهش برای مدل‌سازی دیوارهای سازه‌ای ساختمان بنایی از روش مدل‌سازی میکروی ساده شده استفاده می‌شود. در این روش، آجرها در ابعاد بسط داده شده به وسیله المان‌های پیوسته مدل شده و رفتار ملات درزه‌ها و سطوح برخورد ملات-آجر در المان‌های تماسی بین آجرها به شکل متمرکز فرض می‌شود. به سخن دیگر، در این روش درزه‌های ملات به صورت سطوحی به ضخامت صفر مدل‌سازی می‌شوند و ابعاد بسط داده شده آجرها برابر با ابعاد اصلی آجرها به اضافه ضخامت ملات فرض می‌شود. همچنین، برای مدل‌سازی اندرکنش بین بلوک‌ها فرض می‌شود که بلوک‌ها از طریق فنرهای ارتجاعی نرمال و برشی (عمود و مماس بر سطح درزه) به یکدیگر متصل شده‌اند. دقت این نوع مدل‌سازی پیش‌تر به وسیله ی لورنکو [۱۲] با استفاده از مدل‌های اجزاء محدود میکروی دقیق به اثبات رسیده است.

۲-۱- محاسبه پارامترهای ارتجاعی

سختی سطوح برخورد در این نوع مدل‌سازی، از سختی واقعی درزه‌های ملات استخراج می‌شود. بدین مفهوم که، خواص ارتجاعی آجر بسط یافته و سطوح برخورد باید به شکلی تنظیم شود تا به نتایج درستی دست یافت. معمولاً به دلیل ابعاد نسبی ملات و آجر فرض می‌شود که خواص ارتجاعی آجرها در این تبدیل بدون تغییر باقی می‌ماند. سپس، با فرض پیوند رویهم^۱ و توزیع تنش یکنواخت در ملات و آجر، مولفه‌های سختی ارتجاعی سطوح برخورد بین آجرها به صورت زیر محاسبه

1. Isotropic elastic
2. Drucker-Prager
3. Mohr-Coulomb

1 Stack bond



شکل ۱- هندسه و ابعاد ساختمان آجری دو طبقه مورد آزمایش به وسیله‌ی تسنیمی (بر حسب سانتی‌متر) [۳]

محاذات پنجه جرزه‌های بنایی، می‌توان از مدل ارتجاعی-خطی برای توصیف رفتار آجرهای بسط یافته استفاده نمود. زیرا در ساختمان‌های بنایی کوتاه مرتبه متداول به دلیل کم بودن تنش‌های ثقلی، رفتار غیرخطی ساختمان عمدتاً به دلیل لغزش آجرها روی یکدیگر (شکست برشی-لغزشی دیوارها) اتفاق می‌افتد. در این پژوهش برای توصیف رفتار غیرخطی درزه‌ها از مدل موهر-کولمب استفاده شده و طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده [۳]، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی درز ملات به ترتیب برابر با $27/4$ درجه و $0/2$ مگاپاسکال اختیار می‌شود.

برای کاهش زمان تحلیل، هر چهار آجر استفاده شده در ساختمان مورد آزمایش با یک آجر واحد بزرگ مدل‌سازی شده و در راستای ضخامت دیوارها نیز تنها از یک آجر استفاده شده است. در ضمن با عنایت به منظم بودن ساختمان و تقارن بارگذاری جانبی (حذف پیچش)، هر دو سقف ساختمان به صورت یک جسم یکپارچه و ارتجاعی مدل‌سازی شده است. با توجه به زوال شدید مقاومت ساختمان‌های بنایی بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری و رفتار ترد آنها، برای تحلیل غیرخطی این قبیل ساختمان‌ها بهتر است از روش بارگذاری تغییرمکان-کنترل استفاده شود. هرچند این نوع تحلیل در نرم‌افزار 3DEC موجود است، اما امکان اعمال تغییرمکان‌های متفاوت در تراز طبقات با یک نسبت مشخص (مانند الگوی مثلثی اعمالی در آزمایش) وجود ندارد. بنابراین برای حل این مشکل و امکان اعمال الگوی تغییرمکان جانبی مثلثی در ارتفاع ساختمان، مطابق شکل (۲) از یک سازوکار لولایی صلب استفاده شد.

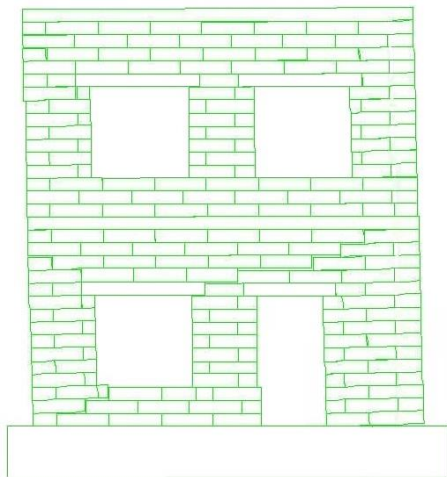
برای توصیف رفتار غیرخطی درزه‌ها و امکان شبیه‌سازی لغزش بلوک‌ها، مقدار پارامترهای غیرارتجاعی درز ملات از قبیل مقاومت کششی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی باید معلوم باشد.

۳- تحلیل یک ساختمان بنایی با استفاده از مدل اجزاء مجزای توسعه یافته

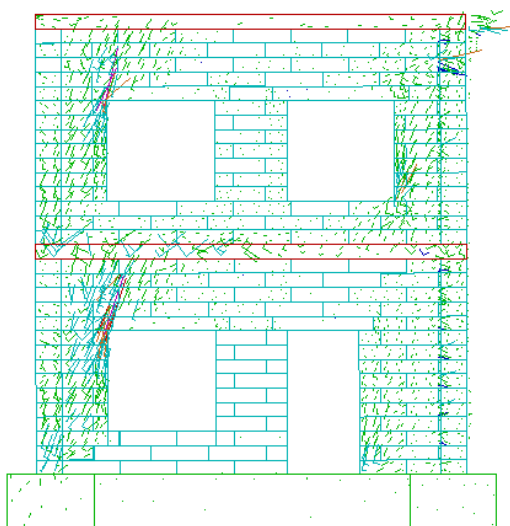
در این بخش به بررسی صحت و سقم مدل اجزای مجزای توسعه یافته در بخش ۲ با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی 3DEC پرداخته می‌شود. به همین منظور، ساختمان آجری غیرمسلح آزمایش شده به وسیله‌ی تسنیمی [۳] در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه و ابعاد ساختمان آجری غیرمسلح آزمایش شده در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختمان دو طبقه در مقیاس ۱:۲ و کاملاً بر مبنای ضوابط فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی و اجرا شده است. در این ساختمان از آجرهای معمولی ولی با نصف ابعاد یک آجر کامل و از ملات ماسه سیمان به نسبت ۳ به ۱ استفاده شده است. ضخامت ملات مورد استفاده برابر یک سانتی‌متر است. برای پوشاندن سقف نیز از سیستم طاق ضربی استفاده شده است. بار جانبی اعمالی به ساختمان از نوع کنترل نیرو- تغییرمکان بوده و به وسیله‌ی دو عدد جک هیدرولیکی در تراز طبقات و به صورت رفت و برگشتی (چرخه‌ای) است. لازم به ذکر است نسبت نیروی جانبی در تراز سقف طبقه اول به طبقه دوم در تمام مراحل آزمایش برابر با $0/6$ اختیار شده است که نزدیک به الگوی توزیع مثلثی بارهای جانبی در تراز طبقات است. میانگین مقاومت فشاری آجرها و ملات مصرفی به ترتیب برابر با $10/6$ و $4/33$ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. میانگین مقاومت فشاری و کششی منشور مصالح بنایی (مجموعه آجر و ملات) نیز به ترتیب برابر با $8/4$ و $0/338$ مگاپاسکال است.

در این مطالعه با توجه به کم بودن تنش‌های نرمال ثقلی موجود در دیوارها (بیشینه $0/3$ مگاپاسکال در مقایسه با مقاومت فشاری آجر برابر با $10/6$ مگاپاسکال) و کم بودن احتمال بروز رفتار غیرخطی در داخل آجرها جز در

مقایسه شده است و همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این دو منحنی هماهنگی خوبی با یکدیگر دارند. پس از مدل اجزاء مجزای توسعه یافته می‌توان برای انجام مطالعات پارامتری بر روی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح و رفتارسنجی آنها استفاده نمود. با توجه به هندسه تغییرشکل یافته دیوار وجه جانبی ساختمان در شکل (۴) (که برای وضوح بیشتر به صورت دوبعدی نمایش داده شده است)، ملاحظه می‌شود که پای جرز انتهایی و تیر پیشانی بالای بازشوی درب در طبقه اول، آسیب پذیرترین نواحی از لحاظ ایجاد شکست برش قطری در بین درزه‌ها است.



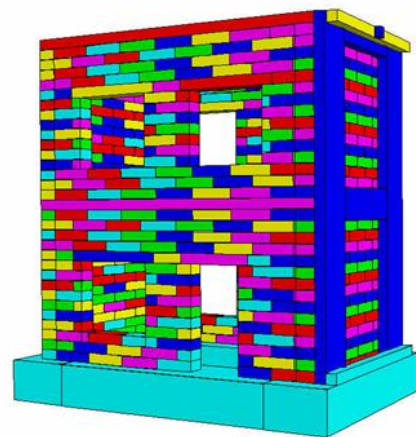
شکل ۴- هندسه تغییرشکل یافته‌ی ساختمان مورد نظر



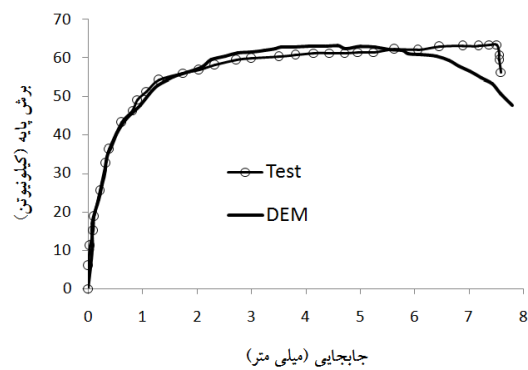
شکل ۵- کانتور تنش‌های اصلی دیوار جانبی

شکل (۵) کانتور تنش‌های اصلی دیوار وجه جانبی ساختمان را در انتهای بارگذاری نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر نسبی

برای این منظور، در وجه تحت بارگذاری ساختمان یک بازوی صلب که در قسمت تحتانی خود به صورت لولایی عمل می‌کند ایجاد شد و نمو تغییرمکان جانبی در تراز سقف دوم به این بازو اعمال شد. در این حالت، نسبت تغییرمکان جانبی تراز سقف طبقه اول به طبقه دوم در تمام مراحل تحلیل برابر با ۰/۵ است. هرچند این نسبت برابر با نسبت ۰/۶ مورد استفاده در آزمایش نیست ولی همان‌گونه که در ادامه خواهد آمد، استفاده از این فناوری برای ساختمان مورد بررسی از دقت خوبی برخوردار است.



شکل ۶- هندسه مدل ساخته شده‌ی ساختمان مورد بررسی و سامانه اعمال بار جانبی



شکل ۷- منحنی ظرفیت برشی-تغییرمکان جانبی ساختمان مورد نظر

شکل ۶، هندسه مدل اجزاء مجزای ساخته شده از این ساختمان به وسیله‌ی نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد. این مدل تحت یک جابه‌جایی فزاینده‌ی جانبی در تراز فوقانی بازوی صلب بارگذاری به صورت غیرخطی مورد تحلیل قرار گرفت. منحنی ظرفیت برشی-جابه‌جایی جانبی تراز بام حاصل از این تحلیل با منحنی به دست آمده از آزمایش در شکل (۷) با یکدیگر

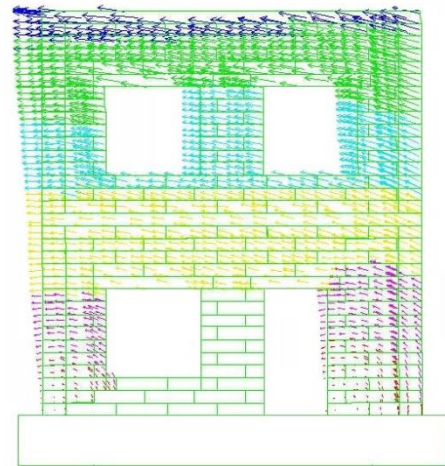
برشی-لغزشی و برشی-قطری است که در پایان منجر به بروز رفتار ترد و تخریب زود هنگام آنها می‌شود. بردار جابه‌جایی آجرهای دیوار مورد بررسی در شکل (۶) نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. در این شکل به وضوح ملاحظه می‌شود که جرز میانی در طبقه اول به علت وقوع لغزش برشی در تراز فوقانی خود، متحمل هیچ‌گونه جابه‌جایی جانبی نشده و عملاً غیرفعال است.

۴- بررسی تاثیر دیوارهای متعامد در جهت نیرو (عملکرد بالی)

در بررسی کفایت لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی در هر جهت، معمولاً دیوارهای سازه‌ای بنایی واقع در همان جهت مد نظر قرار می‌گیرد و از اثر دیوارهای عمود بر جهت مورد بررسی چشم‌پوشی می‌شود. این در حالی است که در صورت تامین عملکرد جعبه‌ای ساختمان بنایی (از طریق اتصال مناسب دیوارها و سقف به یکدیگر)، کل مجموعه‌ی ساختمان بصورت یک جسم سه‌بعدی در مقابل ارتعاشات زلزله عمل خواهد نمود. در این بخش، دیوارهای متعامد در جهت نیرو مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان مشارکت واقعی آنها از طریق ایجاد عملکرد بالی در تامین ظرفیت باربری ساختمان مشخص شود.

برای این منظور، ساختمان مورد بررسی در بخش ۳ دوباره در دو حالت: الف- بدون دیوار متعامد سمت راست (دیوار واقع در وجه بارگذاری ساختمان در پلان شکل ۱) و ب- بدون دیوار متعامد سمت چپ (دیوار واقع در سمت مقابل) تحلیل شد. منحنی‌های ظرفیت ساختمان حاصل از این دو تحلیل همراه با منحنی ظرفیت به دست آمده در بخش قبل برای کل ساختمان در شکل (۷) نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، حذف دیوار سمت راست و دیوار سمت چپ، هر یک به ترتیب به میزان ۲۲ و ۸ درصد باعث کاهش ظرفیت برشی ساختمان مورد بررسی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت دیوار متعامد واقع در سمت بارگذاری نسبت به دیوار سمت چپ بیشترین سهم را در تامین ظرفیت برشی ساختمان دارد و در کل، مجموع ظرفیت دیوارهای متعامد، ۳۰ درصد از ظرفیت

تنش‌های اصلی و جهت آنها در این شکل (که بیانگر راستای تشکیل دستک‌های فشاری است) ملاحظه می‌شود که باربری جانبی این دیوار عمدتاً به وسیله‌ی ظرفیت برشی جرزهای آجری ابتدا و انتهای دیوار تامین می‌شود. به سخن دیگر، جرزهای میانی به علت پایین بودن تنش‌های نرمال ثقلی و حاکم شدن مود شکست برشی-لغزشی در تراز فوقانی آنها، نقش قابل ملاحظه‌ای در باربری جانبی دیوار ایفا نمی‌کنند و بیشتر نقش باربری ثقلی را بر عهده دارند. به نظر می‌رسد با افزایش ظرفیت برشی و شکل‌پذیری جرزهای انتهایی (مانند استفاده از کلاف‌های قائم بتنی مسلح در مرزهای پیرامونی آنها) شاید بتوان رفتار لرزه‌ای دیوارهای آجری دارای بازشو و در نتیجه ساختمان‌های آجری را بهبود بخشید. البته این موضوع باید با انجام آزمایش‌های متعدد روی ساختمان‌های بزرگ مقیاس مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۶- بردارهای جابه‌جایی دیوار جانبی

نکته قابل تامل دیگر در این شکل، به تراز تنش‌های اصلی فشاری در لحظه ظرفیت باربری بیشینه دیوار مربوط می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار تنش‌های فشاری اصلی در داخل المان‌های دیوار بجز کنج بازشوها، بیشینه ۱/۵ مگاپاسکال است. از آنجا که مقدار این تنش کمتر از مقاومت فشاری منشور مصالح بنایی (۸/۴ مگاپاسکال) است، پس مشکل اصلی این نوع ساختمان‌ها کمبود مقاومت واحدهای بنایی (آجرها) نیست؛ بلکه مشکل اساسی آنها از دست رفتن انسجام اجزای دیوارها (جرزها و تیرهای پیشانی) پس از وقوع ترک‌های

۶- مراجع

[۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)", ویرایش ۳، نشریه شماره ض - ۲۵۳، تهران، ۱۳۸۴.

[۲] تسنیمی، عباسعلی، "رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. تهران، ۱۳۸۳.

[۳] تسنیمی، عباسعلی، "رفتار ساختمان‌های آجری با کلاف و بی کلاف"، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ۱۳۸۴.

[4] Lemos J. V. and Cundall P. A. "Earthquake analysis of concrete gravity dams on jointed rock foundations." In *Distinct Element Modeling in Geomechanics*, Eds. Sharma V. M., Saxena K. R, and Woods R. D., Rotterdam: A. A. Balkema, 1999, pp 117-143.

[5] Lemos J. V. "Discrete element modeling of the seismic behavior of stone masonry arches." In *Computer Methods in Structural Masonry- 4*, Eds. Pande, Middleton and Kralj, E and FN SPON, 1997, pp 220-227.

[6] Sincaian G. E. and Azevedo J. J. "Numerical simulation of the seismic behavior of stone and brick masonry structures." Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, 1998.

[7] Sincaian G. E., Lemos J. V. and Oliveira C. S. "Assessment of the seismic behavior of stone masonry aqueduct using the discrete element method." Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, 1998.

[8] Azevedo J. J., Sincaian G. E. and Lemos J. V. "Seismic behavior of blocky masonry structures." *Earthquake Spectra*; 16(2), 2000, pp 337-365.

[۹] محب‌خواه، ا. "مدل غیرخطی-لززه‌ای میانقاب‌های آجری دارای بازشو در قاب‌های فولادی" رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۶.

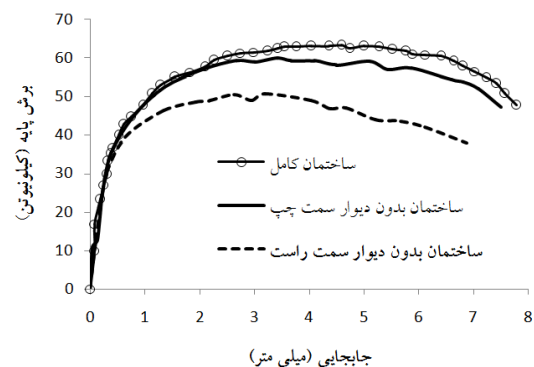
[10] Roland Toth A., Zoltan O. and Bagi K. "Discrete element analysis of a stone masonry arch." *Mechanics Research Communications*; 36, 2009, pp 469-480.

[11] Itasca Consulting Group, Inc., 3DEC- 3 Dimensional Distinct Element Code, version 2.0- User's manual, Minneapolis, 1998.

[12] Lourenco P. B. "Computational strategies for masonry structures." Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1996.

[13] Rots J. G., Editor. "Structural masonry: an experimental/numerical basis for practical design rules." Center for Civil Engineering Research and Codes (CUR), Balkema, 1997.

برشی ساختمان را تشکیل می‌دهد. پس ملاحظه می‌شود که علاوه بر دیوارهای همراستا با نیروی جانبی اعمالی، عملکرد بالای دیوارهای متعامد نیز سهم قابل توجهی در افزایش مقاومت جانبی ساختمان‌های بنایی دارند. البته این موضوع باید با انجام آزمایش‌ها و مطالعات عددی بر روی پلان‌های منظم و نامنظم با چیدمان‌های مختلف دیوارهای برشی بنایی، بیشتر مورد بحث و بررسی قرار گیرد تا بتوان به یک جمع‌بندی عمومی در مورد میزان تاثیر دیوارهای متعامد رسید.



شکل ۷- بررسی اثر دیوارهای متعامد در ظرفیت برشی ساختمان

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای بررسی رفتار غیرخطی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح کوتاه مرتبه‌ی متداول، یک مدل سه بعدی به روش اجزاء مجزا با استفاده از نرم افزار 3DEC توسعه داده شد و برای صحت سنجی مدل ساخته شده از نتایج آزمایش انجام شده روی یک ساختمان بنایی غیرمسلح در مقیاس ۱:۲ استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی قابلیت و توانایی بالای روش اجزاء مجزا در تحلیل غیرخطی ساختمان‌های بنایی است. همچنین از بررسی کانتور تنش‌های اصلی ایجاد شده در دیوارهای دارای بازشو مشخص شد که در ساختمان‌های بنایی کوتاه مرتبه‌ی منظم، جرزهای انتهایی، موثرترین اجزا در تامین ظرفیت باربری جانبی این قبیل دیوارها هستند و جرزهای میانی فقط نقش باربری ثقلی را بر عهده دارند. ضمناً دیوار متعامد واقع در سمت بارگذاری نسبت به دیوار سمت چپ بیشترین سهم را در تامین ظرفیت برشی ساختمان دارد و بطور کلی، ۳۰ درصد از ظرفیت برشی ساختمان مورد بررسی حاصل مشارکت دیوارهای متعامد است.

