ارزیابی روش های مختلف عددی و مدل سازی قاب های بتن مسلح دارای میانقاب بنایی در برابر بارهای جانبی

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۸-۲۷
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۱۰-۲۲

رضا مرادی
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی

ابراهیم خلیل زاده وحیدی (نویسنده مسئول)
استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی
Email: e_vahidi2000@yahoo.com

چکیده:
مدلسازی و ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب های بتن مسلح دارای میانقاب بنایی به علت وجود پارامترهای متعدد نظیر مشخصات آجر، خصوصیات ملات، اندرکنش بین آجر و ملات و نیز وجود عدم قطعیت های زیاد در مورد این پارامترها یکی از چالش های اصلی مهندسان طراح می باشد. جهت پیش بینی رفتار لرزه ای این عناصر سازه ای باید مدل تحلیلی، جامع و کارا باشد به نحوی که بتواند رفتار واقعی سازه را نشان دهد. در دهه های اخیر مدلسازی رفتار قاب بتن مسلح دارای میانقاب بنایی تحت بارگذاری درون صفحه توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف کرده است. هدف اصلی در این مقاله بررسی و مقایسه روش های مختلف مدلسازی قاب بتن مسلح دارای میانقاب بنایی با نتایج آزمایشگاهی و انتخاب روش برتر می باشد. برای دست یابی به این هدف پس از توضیح زمینه های کاربرد هر یک از این روش ها، نمونه ساخته شده در آزمایشگاه به سه روش مختلف مدلسازی شده است. مدل اول با روش کوچک مقیاس (micro) ساده سازی شده و مدل دوم با روش بزگ مقیاس (macro) در نرم افزارAbaqus مدل سازی شده اند. مدل سوم نیز با استفاده از ایده میله معادل فشاری در نرم افزار Opensees مدل سازی شده است. بررسی نتایج حاصل از مدلسازی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده‌ی آن است که مدلسازی به روش روش بزگ مقیاس (macro) با ۲/۶۵ درصد خطا در بار نهایی و نمایش بهتر محدوده ترک خوردگی، کم خطاترین روش مدلسازی است. همچنین نیاز به پارامترهای مختلف و پیچیده و در دسترس نبودن آنها و عدم قطعیت در مورد رفتار میانقاب‌ها موجب خطای ۱۰/۱۲ درصدی روش مدلسازی کوچک مقیاس (micro) ساده سازی شده است. مدلسازی با استفاده از ایده میله معادل با خطای ۹/۲۸ درصد می تواند سهولت زیادی در مدلسازی ساختمان ها بویژه ساختمان های بلند مرتبه ایجاد کند.

کلمات کلیدی :میانقاب بنایی، قاب بتن مسلح، مدلسازی کوچک مقیاس (micro) ساده شده، مدلسازی بزگ مقیاس (macro) ، روش میله معادل فشاری

۱- مقدمه

در طـول زلزلـه سـرپل ذهـاب سـال ۱۳۹۶ بسـیاری از سـاختمان‌هـای دارای میانقـاب بنـایی بـه دلیـل در نظـر نگـرفتن میانقـاب‌هـا در مراحـل طراحـی آسـیب جـدی متحمـل شـدند[۱]. میانقـاب‌هـا (پرکننـده‌هـا) عـلاوه بـر اینکـه جداکننـده فضـاهای معمـاری هسـتند مـی تواننـد رفتـار قـاب‌هـا در برابـر بارهـای جـانبی را تغییـر دهنـد. همچنـین بـه علـت خـواص مصالح مورد اسـتفاده در آنهـا و انـدرکنش بـا قـاب پیرامـونی، پرکننـده‌هـای بنـایی دارای رفتـار پیچیـده‌ای مـی باشـند. غالبـا مهندسان طـراح از اثـرات میانقـاب‌هـا چشـم پوشـی کـرده و آنـرا در جهـت اطمینـان فـرض مـی کننـد، در حـالی کـه وجـود میانقاب در قاب‌ها باعث افـزایش سـختی سـازه شـده کـه نتیجـه آن تشـدید اثـرات زلزلـه در سـازه مـی باشـد. عـلاوه بـر ایـن وجود میانقاب‌ها می تواند باعث ایجاد ستون کوتاه، پیچش سازه و تشکیل طبقه نرم شود[۲].

به دلیل اینکه غالباً برای مطالعـه رفتـار میانقـاب‌هـا امکانـات آزمایشـگاهی محـدود اسـت، لـذا انجـام مـدل سـازی عـددی کـه مطالعات را با دقت و سرعت بالا و هزینه کم بـه پـیش ببـرد، یـک ضـرورت مهـم تلقـی مـی گـردد. مدلسـازی قـاب‌هـای بـتن مسلح دارای میانقـاب بنـایی بـه علـت وجـود پارامترهـای متعـدد نظیـر مشخصـات آجـر، خصوصـیات مـلات، انـدرکنش بـین آجـر و مـلات و نیـز بـه علـت وجـود عـدم قطعیـت هـای زیـاد در مـورد ایـن پارامترهـا یکـی از چـالش‌هـای اصـلی بـرای مهندسان طراح می باشد. برای بررسی رفتـار میانقـاب‌هـا نیـاز بـه مـدل هـای تحلیلـی جـامع و کـارا مـی باشـد کـه بتوانـد تـا حد ممکن رفتار واقعـی سـازه را نشـان دهنـد. ایـن مـدل هـای تحلیلـی بایسـتی قابلیـت وارد کـردن عوامـل مـؤثر و مشخصـه هـای اصـلی دیـوار را داشـته باشـند. همچنـین مـدل هـای مـذکور، بایسـتی توانـایی شـبیه سـازی رفتـار میانقـاب را داشـته باشند. روش‌های مدلسـازی گونـاگونی بـرای ارزیـابی عملکـرد میانقـاب هـا توسـط پژوهشـگران بـه کـار گرفتـه شـده اسـت. از نقطه نظـر اصـول مدلسـازی، آنهـا را مـی تـوان بـه دو دسـته مـدل‌هـای کوچـک و بـزرگ مقیـاس تقسـیم کـرد. روش بـزرگ مقیـاس رفتـار کلـی سـازه بـدون در نظـر گیـری مشخصـات ریـز آسـیب دیـدگی را نشـان مـی دهـد. در حالیکـه در روش کوچک مقیاس جزئیات دقیـق تـری از رفتـار سـازه و آسـیب دیـدگی تـدریجی مصـالح بنـایی مشـاهده مـی‌شـود[۳]. انتخـاب هر یک از این روش‌ها به ابعاد مدل و پارامترهای مورد مطالعه بستگی دارد.

در ایـن مقالـه ابتـدا بـه بررسـی انـواع روش‌هـای مدلسـازی پرداختـه شـده و بعـد از توضـیح کامـل نمونـه آزمایشـگاهی، آن نمونه بـا سـه روش مختلـف عـددی تحـت بارگـذاری یـک جهتـه مدلسـازی مـی گـردد. مـدل اول بـا روش کوچـک مقیـاس ساده شـده و مـدل دوم بـا روش بـزرگ مقیـاس هـر دو در نـرم افـزار Abaqus شـبیه سـازی مـی شـود. مـدل سـوم نیـز بـا استفاده از ایده میلـه معـادل فشـاری در نـرم افـزار OpenSees شـبیه سـازی شـده و پارامترهـای مـورد نیـاز بـرای هـر روش شـبیه سـازی شـرح داده مـی شـوند. در پایـان بـا بکـارگیـری نمـودار نیـرو-تغییـرمکـان و نمـایش محـدوده تـرک خـوردگی، نتایج حاصل از هر سه روش مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

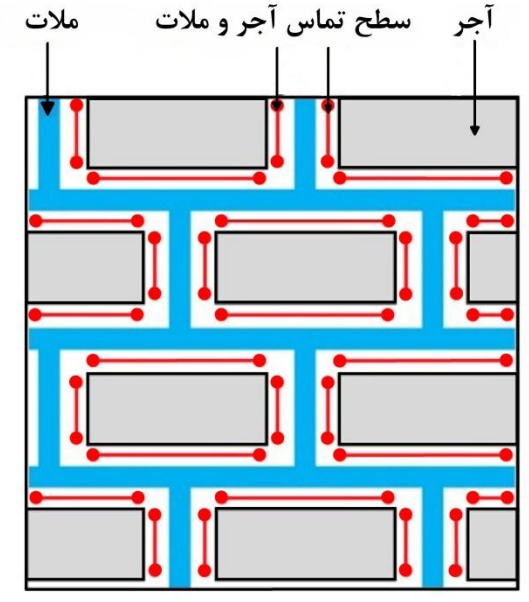
مروری بر روش های مختلف مدلسازی میانقاب ها

تنـوع در رفتـار میانقـاب‌هـا مـانع از پـیش بینـی رفتـار صـحیح آنهـا شـده و باعـث مـی شـود کـه اثـرات مثبـت و منفـی میانقـاب‌هـا نادیـده گرفتـه شـود. در دهـه‌هـای اخیـر بـا هـدف معرفـی روش‌هـای محاسـباتی دقیـق، پژوهشـگران زیـادی مطالعـات آزمایشـگاهی و عـددی مختلفـی بـر روی سـازه هـای دارای میانقـاب انجـام داده‌انـد. غالبـاً چهـار روش بـرای مدلسـازی سـازه‌هـای دارای میانقـاب مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیـرد کـه عبارتنـد از: مدلسـازی بـه روش کوچـک مقیـاس بـا جزئیـات دقیـق، مدلسـازی بـه روش کوچـک مقیـاس سـاده شـده، مدلسـازی بـه روش بـزرگ مقیـاس و مدلسـازی بـه روش میله معادل فشاری.

مدل کوچک مقیاس(micro) با جزئیات دقیق

میانقـاب هـا از واحـدهای بنـایی و مـلات تشـکیل شـده‌انـد. در ایـن روش تمـامی اجـزاء میانقـاب شـامل آجـر و مـلات و همچنین سطح تماس بـین آجـر و مـلات بـه صـورت جداگانـه مدلسـازی مـی گردنـد (شـکل۱). بنـابراین داشـتن مشخصـات مکانیکی مواد مذکور که بـه صـورت مجـزا و از طریـق آزمـایش بـر روی مـواد تعیـین مـی گـردد، ضـروری مـی باشـد. از ایـن

نـوع مدلسـازی بـرای تعیـین ویژگـی‌هـایی ماننـد سـختی و مقاومـت نهـایی قـاب دارای میانقـاب، حـالات شکسـت برشـی میانقاب ها در اثر ضـعف درزهـای ملاتـی، حـالات شکسـت و خرابـی میانقـاب تحـت بارهـای یـک جهتـه و چرخـه ای، نحـوه شـکل گیـری تـرک هـای مـرزی و برشـی و همچنـین خرابـی‌هـای کـنج، روش هـای تـرمیم و بهبـود عملکـرد قابهـای دارای میانقاب بنـایی ماننـد اسـتفاده از اتصـالات برشـی بـه کـار مـی رود[۴،۵،۶]. دقـت نتـایج مدلسـازی بـا روش کوچـک مقیـاس بسـیار بـالاتر خواهـد بـود؛ امـا انجـام آن نیـاز بـه حجـم محاسـبات بسـیار بیشـتر و داشـتن اطلاعـات کـاملی از خصوصـیات اجزاء سازنده و اندرکنش میان آنها می باشد [۶،۷،۸].

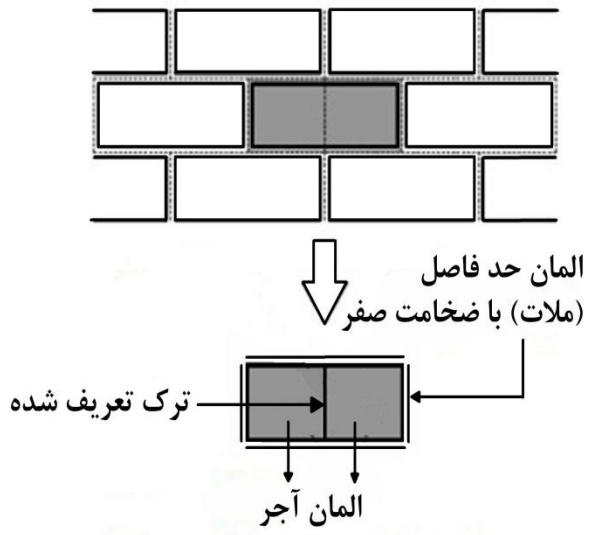


شکل ۱ : مدلسازی به روش کوچک مقیاس

جهت بررسی و تعیین رفتـار میانقـاب هـا بـه روش کوچـک مقیـاس ، مـدل هـای گونـاگونی توسـط محققـین بـه کـار گرفتـه شـده اسـت. آسـتریس[۹] (۲۰۰۸) نمونـه هـایی از قـاب یـک دهانـه-یـک طبقـه دارای میانقـاب را بـه روش کوچـک مقیـاس مدلسازی نمـود. همـه نمونـه‌هـا در نـرم افـزار Fortran مدلسـازی شـده‌انـد. هـدف از پـژوهش آسـتریس ارائـه معیـاری بـرای جـدایش میانقـاب از قـاب در مدلسـازی بـود. بـرای دسـت یـابی بـه ایـن هـدف پـس از مدلسـازی و تحلیـل نتـایج آن، طـول تمـاس قـاب بـا دیـوار و همچنـین توزیـع تـنش تماسـی بـین قـاب و دیـوار را مـورد مطالعـه قـرار داد. کوترمـانوس، اسـتاوریدس، شـینگ و ویلیـام[۱۰] (۲۰۱۱) مـدل آزمایشـگاهی قـاب دارای میانقـاب را بـا روش مدلسـازی کوچـک مقیاس مقایسـه کردنـد. مـدل آزمایشـگاهی بـه صـورت تمـام مقیـاس و تحـت بارگـذاری چرخـه‌ای قـرار داشـت. پاسـخ لـرزه ای و الگوی ترک خوردگی مدلسازی کوچک مقیاس انطباق خوبی با نمونه آزمایشگاهی داشت.

مدل کوچک مقیاس ساده شده

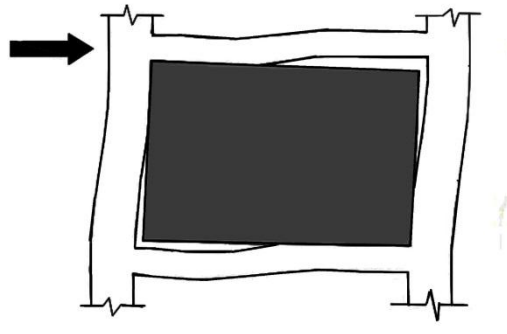
جهت کاهش حجـم محاسـبات در مدلسـازی کوچـک مقیـاس ، مـی تـوان المـان مـلات را در نظـر نگرفـت ولـی خـواص آنـرا اعمـال کـرد. در ایـن صـورت ضـخامت مـلات در ضـخامت المـان هـای آجـر در نظـر گرفتـه مـی شـود (شـکل ۲). امـا بـرای خطـای کمتـر بایسـتی المـان حدفاصـل را بـه طـور کامـل شناسـایی کـرد و مشخصـات فشـاری، برشـی و کششـی آنـرا در مدل سازی در نظر گرفت. مشخصات در نظـر گرفتـه شـده، بایـد توانـایی مدلسـازی رفتـار مـلات و رفتـار سـطح تمـاس بـین آجر و ملات را بـه طـور دقیـق داشـته باشـد. بنـابراین در ایـن روش خـواص کششـی، فشـاری و برشـی مـلات و اتصـال آن بـا آجـر دارای اهمیـت اسـت. بـدیهی اسـت رفتـار کششـی و برشـی مـلات تعیـین کننـده اسـت و رفتـار فشـاری آن در تحلیـل تاثیر قابل ملاحظه ای ندارد[۱۱].



شکل ۲ : نحوه مدل سازی به روش کوچک مقیاس ساده شده[۱۱]

مدل بزرگ مقیاس (macro)

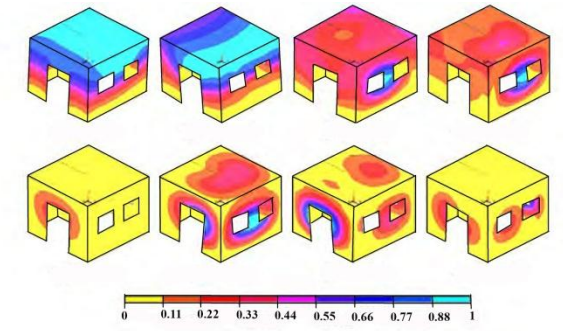
در این روش مصالح بنایی به عنوان یک ماده همگن در نظر گرفته شده و جایگزین آجر و ملات می گردد. البته مشخصات مکانیکی ماده جایگزین با مشخصات جداگانه هر یک از مواد آجر و ملات متفاوت می باشد،(شکل ۳). این روش یک روش ساده و سریع است و به اطلاعات ورودی کمی نیاز دارد. کاربرد اصلی این نوع مدلسازی در بررسی تأثیر میانقاب‌ها بر رفتار کل ساختمان به خصوص تأثیر میانقاب‌ها بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان می‌باشد. در این نوع مدلسازی، ویژگی‌هایی مانند تاثیر میانقاب‌ها بر پاسخ ساختمان به شتاب ناشی از زلزله‌های مختلف، اثر میانقاب‌ها بر ویژگی های دینامیکی سازه از جمله پریودهای ارتعاشی ساختمان و شکل مودهای ارتعاشی ساختمان، قابل بررسی می‌باشد[۶].



شکل ۳ : مدلسازی به روش بزرگ مقیاس

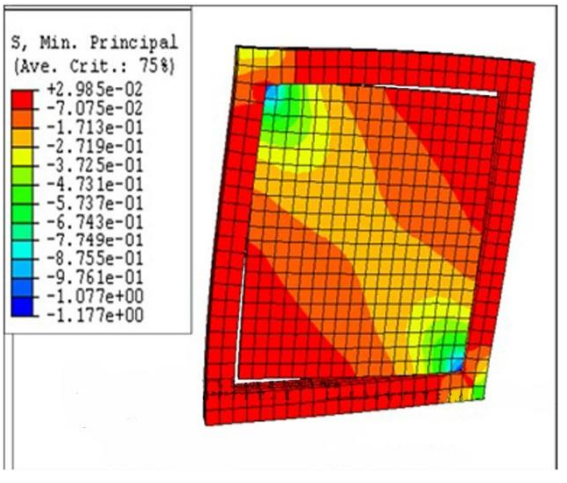
ونتورا و همکاران[۱۲] (۲۰۰۳) جهت مطالعه ویژگی‌های دینامیکی ساختمان های دارای میانقاب بنایی از روش بزرگ مقیاس برای مدلسازی استفاده کردند. در این مطالعه جهت محاسبه فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و نسبت میرایی در میزان پایینی از سطح ارتعاشات و تحریکات یک ساختمان واقع در تاکاماسون ژاپن از آزمایش ارتعاش محیطی استفاده شده است. مدل اجزاء محدود در نظر گرفته شده به وسیله نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی صورت گرفته کالیبره شده است. امید رضایی‌فر و همکاران[۱۳](۲۰۰۸) با بکارگیری روش بزرگ مقیاس ویژگی‌های دینامیکی و عملکرد لرزه‌ای یک سازه سه بعدی یک دهانه-یک طبقه را تحت بارگذاری دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند. از جمله پارامترهای بررسی شده، ویژگی های خطی و غیر خطی سازه، قابلیت شکل پذیری،

کاهش سختی و مکانیسم شکست می باشد. در این تحقیق جهت بررسی صحت نتایج مدلسازی عددی، از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی با مقیاس واقعی استفاده شده است. شکل ۴ روش مدلسازی امید رضایی‌فر را نشان می دهد.



شکل ۴ : مدلسازی به روش بزرگ مقیاس توسط امید رضایی‌فر و همکاران [۱۳]

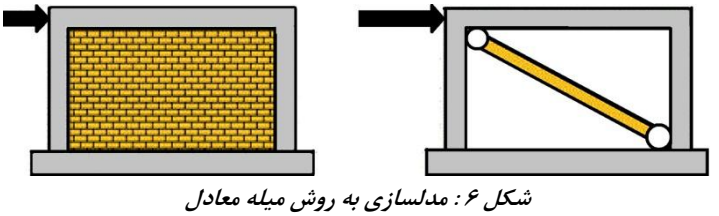
ناول و همکاران[۱۴] (۲۰۱۵) مدلی را که آستریس در سال ۲۰۰۸ با روش کوچک مقیاس مدلسازی نمود دوباره با روش بزرگ مقیاس مدلسازی کرده و رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح دارای میانقاب را مورد مطالعه قرار دادند (شکل۵). نتایج مدلسازی با نتایج مدل آستریس انطباق خوبی داشت.



شکل ۵ : مدلسازی ناول و همکاران (۲۰۱۵) [۱۴]

مدل میله معادل فشاری

در این روش میانقاب با یک یا دو و یا سه میله فشاری که به صورت مفصلی به اتصال تیر و ستون وصل شده است، معادل می گردد(شکل۶). این روش به دلیل سادگی و حجم محاسبات کمتر، در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بسیار متداول است. همچنین بسیاری از آیین نامه‌ها استفاده از این مدل را برای ارزیابی رفتار سازه‌های دارای میانقاب توصیه کرده‌اند.

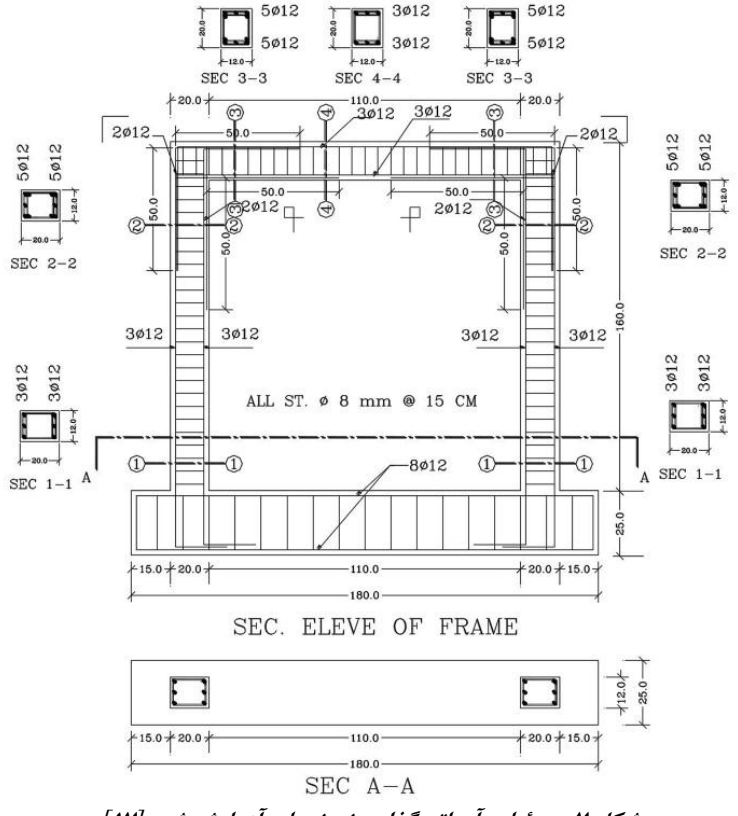


شکل ۶ : مدلسازی به روش میله معادل

هولمز[۱۵] (۱۹۶۱) از اولین کسانی بود که پیشنهاد داد میانقاب‌ها، با میله‌های معادل فشاری و مصالح مشابه با عرضی برابر با یک سوم قطر پر کننده جایگزین شود. صانعی‌نژاد و هوبز[۱۶] (۱۹۹۵) روشی بر پایه میله معادل فشاری برای تحلیل و طراحی قاب‌های بتن مسلح و فولادی با میانقاب‌های بنایی یا بتنی، در معرض نیروهای صفحه‌ای ابداع نمودند. این روش رفتار کشسانی-خمیری قاب‌های پرشونده را بررسی می‌نماید. عوامل مختلفی نظیر نسبت ابعادی میانقاب، تنش برشی در فصل مشترک میانقاب – قاب و مقاومت‌های نسبی تیر و ستون، در این روش قابل ارزیابی می‌باشد.

مدل آزمایشگاهی

در تحقیق آزمایشگاهی که توسط لیلا عبدالحافظ و همکاران[۱۷] در سال ۲۰۱۴ به منظور مطالعه رفتار میانقاب های تقویت شده صورت گرفته از هفت نمونه قاب یک دهانه-یک طبقه با مقیاس ۱:۲ استفاده شده است. هندسه تمام نمونه ها یکسان بوده که مشخصات آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ : جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌های آزمایش شده [۱۷]

مطابق شکل ۷ ابعاد مقطع برای تیر و ستون‌ها ۱۲۰×۲۰۰ میلیمتر می باشد. خاموت‌ها از میلگرد با قطر ۸ میلیمتر و فواصل ۱۵ سانتیمتر و آرماتورهای طولی با قطر ۱۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. میانگین مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌ها بر اساس نمونه مکعبی ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. همچنین مقاومت فشاری آجر که از جنس سیلت می باشد، ۷۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی آرماتورها نشان داده شده است. بارگذاری افقی با استفاده از یک جک هیدرولیکی ۵۰ تنی و به صورت بار کنترل اعمال می شود. آزمایش با بارگذاری یک جهته با گام های ۳۰۰ کیلوگرم انجام شده است. همچنین بارگذاری تا شکست کامل نمونه ها ادامه یافته و در نهایت نمودار نیرو- تغییرمکان نمونه‌ها استخراج شده است.

جدول ۱ : مشخصات مکانیکی آرماتورها [۱۷]

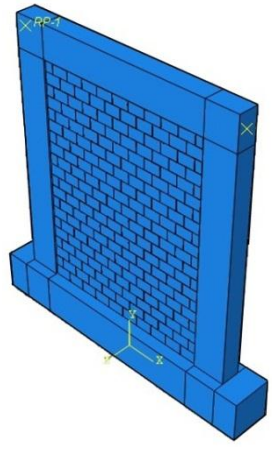
قطر آرماتور(mm)	۸	۱۲
مقاومت تسلیم (Kg/cm^2)	۲۷۲۰	۵۱۵۰
مقاومت نهایی (Kg/cm^2)	۴۵۰۰	۷۴۷۵
تغییر طول در لحظه شکست (درصد)	٪۲۶	٪۲۳
ضریب کشسانی (Kg/cm^2)	۲۰۶۰۰۰۰	۲۰۶۰۰۰۰

مدلسازی

در بخش های قبل روش‌های مختلف مدلسازی قاب های دارای میانقاب بنایی بیان و جزئیات مدل آزمایشگاهی نیز به صورت خلاصه ارائه شد. در این بخش با مقایسه نتایج نمونه آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی دقت روش‌های مدلسازی پرداخته می‌شود. نمونه‌ای که از پژوهش آزمایشگاهی لیلا عبدالحافظ و همکارانش برای مدلسازی انتخاب شده، یک قاب بتن مسلح با میانقاب بنایی معمولی است که در آن هیچگونه بازشویی وجود ندارد. در ادامه نمونه آزمایشگاهی مورد نظر به سه شیوه متفاوت مدلسازی شده‌اند. مدل اول به روش کوچک مقیاس ساده شده و مدل دوم به روش بزرگ مقیاس که هر دو در نرم افزار Abaqus شبیه سازی می شوند. مدل سوم نیز با استفاده از ایده میله معادل فشاری در نرم افزار OpenSees شبیه سازی می‌شود.

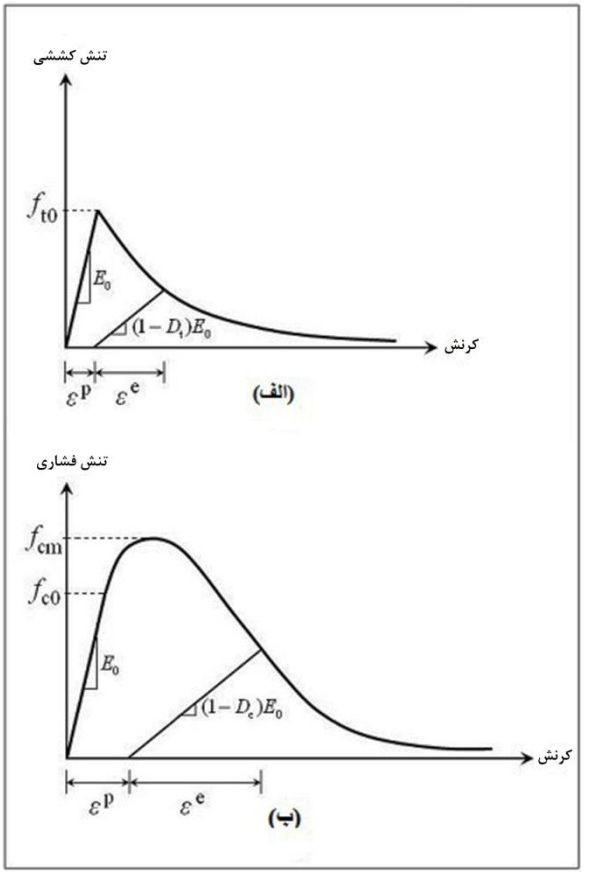
مدلسازی به روش کوچک مقیاس (micro) ساده شده

در این بخش رفتار قاب بتن مسلح دارای میانقاب بنایی به روش کوچک مقیاس ساده شده با کمک نرم افزار اجزاء محدود Abaqus شبیه سازی و بررسی می‌گردد. مدل عددی نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده، ابتدا در محیط دو بعدی رسم شده و سپس به محیط سه بعدی انتقال داده می شود. مقاطع آجر و بتن به صورت جسم توپر معرفی شده و تغییر شکل پذیر می باشند. در این روش نیازی به مدلسازی ملات به صورت پارت‌های مجزا نمی باشد. به همین دلیل لازم است به علت وجود ملات در درزهای افقی و قائم، به ارتفاع و طول آجر به اندازه نصف ضخامت ملات در هر طرف افزوده گردد. ضخامت ملات در درزهای افقی و قائم ۱۰ میلیمتر فرض شده است. بنابراین ابعاد واقعی آجر کامل ۱۰۰×۶۰×۱۰۰ میلیمتر و آجر نیمه ۱۰۰×۶۰×۵۰ میلیمتر می باشد ولی در قسمت پارت ابعاد آجر کامل ۱۰۰×۷۰×۱۱۰ میلیمتر و آجر نیمه ۱۰۰×۷۰×۵۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. شکل ۸ هندسه مدل را نشان می دهد.



شکل ۸ : هندسه مدل

جهت تعریف مصالح بتن و آجر از گزینه بتن آسیب دیده خمیری استفاده شده است. این روش یک مدل آسیب دیده پیوسته که قابل استفاده برای بتن و سایر مواد ترد و شکننده تحت تاثیر بارگذاری یک جهته و چرخه‌ای می باشد، که با توجه به شرایط بارگذاری در این تحقیق گزینه مناسبی می باشد[۱۸]. در مدل مذکور فرض می گردد که پاسخ به کشش و فشار تک محوره به وسیله معیار خرابی خمیری کنترل می شود (شکل ۹). در اثر کشش تک محوره منحنی تنش-کشش تا نقطه تنش خرابی f_{to} به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک های ریز در بتن هم‌زمان می باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی ها به صورت ترک های قابل مشاهده در می آیند که به صورت منحنی نرم شدگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می شوند. تحت فشار تک محوره پاسخ تا لحظه رسیدن به نقطه جاری شدگی f_{co} به صورت کشسانی خواهد بود و در ناحیه خمیری رفتار عموماً به وسیله منحنی سخت شدگی بیان می شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی f_{cm} منحنی ها به صورت منحنی نرم شدگی در می آیند[۱۹].



شکل ۹ : **پاسخ بتن برای بارگذاری تک محوره الف: کشش ب: فشار .[۱۹]**

در این مقاله از مدل هسو و همکاران[۲۰] (۱۹۹۴) برای نشان دادن رفتار فشاری بتن و آجر استفاده شده است(شکل ۱۰). رابطه تنش-کرنش فشاری بتن در این مدل به صورت زیر به دست می آید.

$$\sigma_c = \left(\frac{\beta\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^{\beta}}\right) \qquad (۱)$$

که در این رابطه:

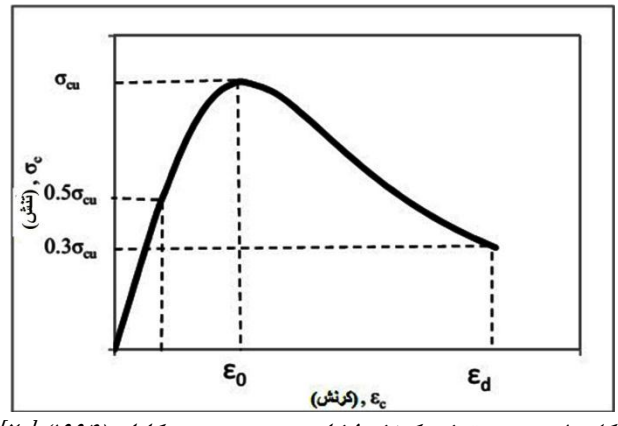
$$\varepsilon_0 = 8.9\times10^{-5}\sigma_{cu} + 2.114\times10^{-3} \qquad (۲)$$

$$\beta = \frac{1}{1-\left(\frac{\sigma_{cu}}{\varepsilon_0 E_0}\right)} \quad (۳)$$

مقدار ضریب کشسانی اولیه را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$E_0 = 1.2431\times10^2\sigma_{cu} + 3.28312\times10^3 \quad (۴)$$

در رابطه (۱) σ_c و ε_c بترتیب تنش و کرنش فشاری بتن را نشان می دهند. ضمناً در روابط بالا E_o، σ_c و σ_{cu} بر حسب kip/in^2 می باشد. (ضریب تبدیل $1\ MPa=0.145037743\ kip/in^2$)



شکل ۱۰ : منحنی تنش-کرنش فشاری بتن هسو و همکاران (۱۹۹۴) [۲۰]

به علت پیچیده و زمانبر بودن تحلیل دینامیکی در پیش‌بینی رفتار سازه‌ها، غالبا با تقریب خوب از تحلیل استاتیکی غیرخطی به جای آن استفاده می‌شود.[۲۱].

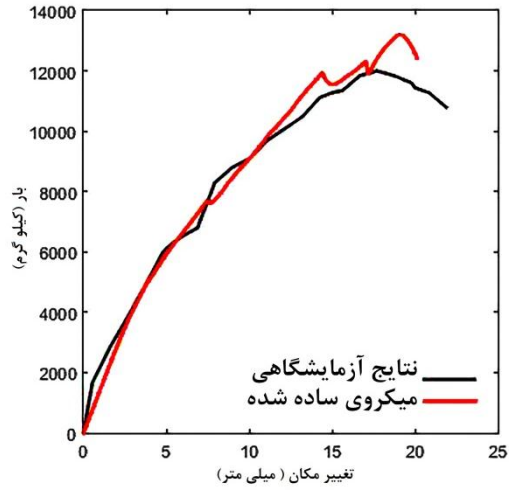
پس از آنکه مراحل مدلسازی شامل تعریف هندسه مدل، اختصاص مواد، مونتاژ، تعریف نوع تحلیل، تعریف بارگذاری و شرایط مرزی به پایان رسید، لازم است اندرکنش بین سطوح را تعیین کنیم. برای تعیین اندرکنش بین سطوح، ابتدا باید رفتار تماسی بین سطوح را تعریف کنیم. در هنگام برخورد آجر با آجر همچنین آجر با قاب بتن مسلح نیروی در جهت عمود بر سطح تماس وارد می شود. همچنین بین سطوح اصطکاک وجود دارد که باعث تشکیل نیروی برشی می شود. بنابراین رفتار تماسی دارای دو خاصیت مهم اصطکاکی و عمودی می باشد. پس از تعریف سطح تماس می بایست آنرا به سطوحی که با هم در تماس‌اند و قبلا انها را تعریف کرده ایم، اعمال کنیم. لازم به ذکر است که سطوح تماسی حداقل دارای یک سطح مبنا و یک سطح پیرو می باشند. با توجه به اینکه ضریب کشسانی قاب بتن مسلح از آجرها بیشتر است، لذا سطح آجرها به عنوان سطح پیرو[۱] و سطح قاب به عنوان سطح پایه[۲] انتخاب می شوند. برای اندرکنش بین میلگرد و بتن از قید ناحیه مدفون شده[۳] استفاده می شود.

برای مدلسازی هر سیستم، مطابق اجزاء تشکیل دهنده آن، می توان از المان های مختلفی استفاده کرد. بدین منظور در تعریف بتن و آجر از المان پیوسته هشت گرهی سه بعدی با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) و در تعریف میلگردهای فولادی المان تیر مرتبه اول سه بعدی (B31) بکار می رود. ابعاد مش برای اجزاء مدل طوری انتخاب شده است که با هم انطباق داشته باشند. به همین دلیل ابعاد مش برای بتن و آجر ۱۰۰ میلیمتر و برای میلگردها ۵۰ میلیمتر انتخاب شده است.

در شکل ۱۱، نمودار بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی عددی آن با هم مقایسه شده اند.

---

[۱] slave
[۲] master
[۳] Embedded Region



شکل ۱۱ : مقایسه نمودار بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی آن

۱-۱- مدلسازی به روش بزرگ مقیاس

در این بخش رفتار قاب بتن مسلح دارای میانقاب بنایی به روش بزرگ مقیاس با کمک نرم افزار اجزاء محدود Abaqus شبیه سازی و بررسی می گردد. در روش بزرگ مقیاس ملات و آجرها به صورت یک جسم همگن مدلسازی می شود(شکل ۱۲) . در این روش مدلسازی از مدل هسو و همکاران[۲۰] برای نشان دادن رفتار فشاری بتن و همچنین از مدل همانت و همکاران[۲۲] برای نشان دادن رفتار فشاری میانقاب بنایی استفاده شده است (شکل۱۳). در این رابطه تنش فشاری میانقاب که تابع مقاومت فشاری ملات و آجر می باشد از رابطه زیر به دست می آید.

$$\frac{f_m}{f_m^{'}} = (2\times\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_m^{'}}) - (\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_m^{'}})^2 \qquad (۵)$$

که در این رابطه f_m و ε_m بترتیب تنش و کرنش فشاری میانقاب را نشان می دهند و همچنین:

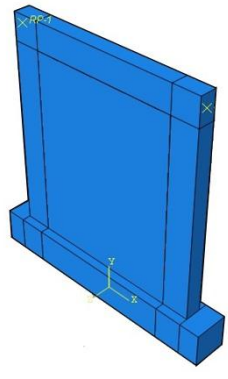
$$f_m^{'} = 0.63 f_b^{0.49} f_j^{0.39} \qquad (۶)$$

$$\varepsilon_m^{'} = \frac{0.27 f_m^{'}}{f_j^{0.25} E_m^{0.7}} \qquad (۷)$$

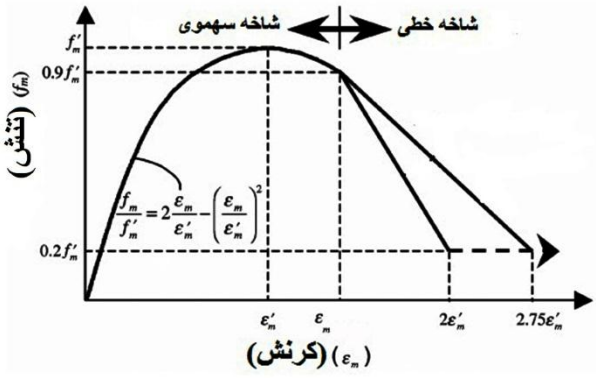
همچنین مقدار ضریب کشسانی اولیه را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$E_m = 550\times f_m^{'} \qquad (۸)$$

در روابط بالا f_b مقاومت فشاری آجر و f_j مقاومت فشاری ملات که هر دو بر حسب مگاپاسکال می باشند.



شکل ۱۲ : هندسه مدل



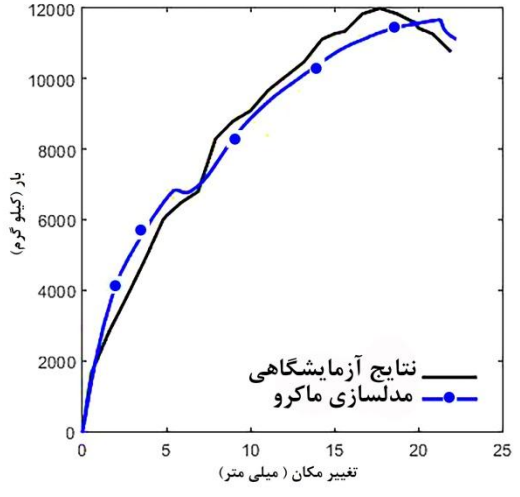
شکل ۱۳ : مدل فشاری دیوار طبق مدل همانت و همکاران[۲۲]

تحلیل مورد استفاده از نوع استاتیکی غیرخطی می‌باشد. همچنین بارگذاری از نوع تغییر مکان کنترل می باشد.

در مرحله بعد، لازم است اندرکنش بین سطوح را تعیین کنیم. بنابراین ابتدا باید رفتار تماسی بین سطوح را تعریف کنیم. رفتار تماسی میانقاب با قاب بتن مسلح دارای دو خاصیت مهم اصطکاکی و عمودی می باشد. پس از تعریف سطح تماس می بایست آنرا به سطوحی که با هم در تماس‌اند و قبلا انها را تعریف کرده ایم، اعمال کنیم. لازم به ذکر است که سطوح تماسی حداقل دارای یک سطح مبنا و یک سطح پیرو می باشند. با توجه به اینکه ضریب کشسانی قاب بتن مسلح از میانقاب بیشتر است، لذا سطح میانقاب به عنوان سطح پیرو و سطح قاب به عنوان سطح پایه انتخاب می شوند. برای اندرکنش بین میلگرد و بتن از قید ناحیه مدفون شده استفاده می شود.

برای مدلسازی هر سیستم، مطابق اجزاء تشکیل دهنده آن، می توان از اجزاهای مختلفی استفاده کرد. بدین منظور در تعریف بتن توپر از اجزای پیوسته بیست گرهی سه بعدی (C3D20) و در تعریف دیوار از اجزای پیوسته هشت گرهی سه بعدی (C3D8) و در تعریف میلگرد از اجزای تیر مرتبه اول سه بعدی (B31) استفاده می شود. ابعاد شبکه برای اجزاء مدل طوری انتخاب شده است که با هم انطباق داشته باشند. به همین دلیل ابعاد شبکه برای بتن و دیوار ۱۰۰ میلیمتر و برای میلگردها ۵۰ میلیمتر انتخاب شده است.

در شکل ۱۴ نمودار بار– تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی آن مقایسه شده‌اند.

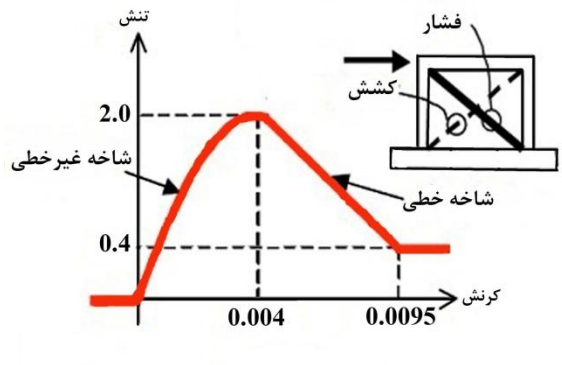


شکل ۱۴ : مقایسه نمودار بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی آن

مدلسازی با استفاده از ایده میله معادل فشاری

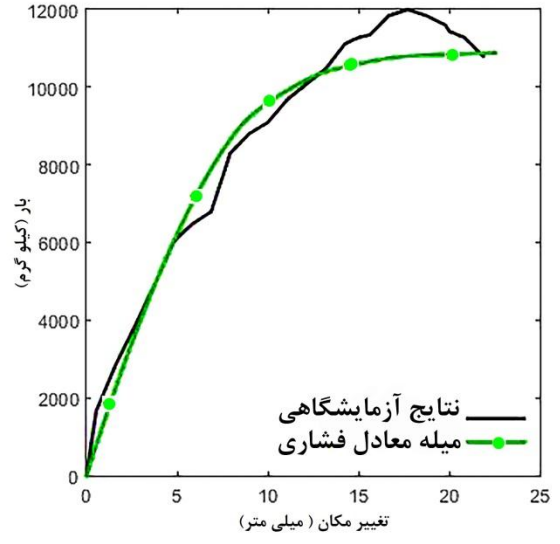
در این قسمت رفتار قاب دارای میانقاب بنایی به روش میله معادل فشاری در نرم‌افزار OpenSees بررسی می‌شود. در این روش میانقاب بنایی را با یک میله معادل فشاری مدلسازی می‌کنیم. این میله فشاری به صورت قطری و گره

به گره می باشد که طول آن برابر قطر قاب در نظر گرفته می شود. عرض دستک فشاری برابر یک سوم قطر قاب انتخاب شده و ضخامت آن نیز همان ضخامت میانقاب است. در این روش از مدل هسو و همکاران (۱۹۹۴) برای نشان دادن رفتار فشاری بتن استفاده شده است[۲۰]. همچنین از مدل همانت و همکاران برای نشان دادن رفتار فشاری میانقاب بنایی استفاده شده است[۲۲]،(شکل ۱۵). برای بتن قاب از مدل Concrete 01 و میانقاب از Concrete 02 و برای آرماتورها از مدل Steel 02 بهره گرفته شده است.



شکل ۱۵ : رفتار فشاری میانقاب بنایی طبق مدل همانت و همکاران برای میله معادل فشاری [۲۲]

مقاطع تیر و ستون و میله معادل فشاری به صورت الیافی[۴] تعریف شده اند. برای تیرها و ستون ها از اجزای تیر ستون غیر خطی[۵] و برای میله معادل فشاری از اجزای خرپایی با تبدیل هندسی همگرد[۶] استفاده شده است.
در شکل ۱۶ نتایج نمونه آزمایشگاهی با نتایج مدلسازی عددی آن مقایسه شده است.



شکل ۱۶ : مقایسه نمودار بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی آن

مقایسه و تفسیر نتایج مدلسازی

امروزه روش های تحلیلی در حل مسائل پیچیده مهندسی کمتر استفاده می شود. از این رو حل مسائل مهندسی هر روز بیش از پیش به روش‌های عددی وابسته می شوند. همچنین سرعت و دقت بالا، هزینه ناچیز و عدم نیاز به

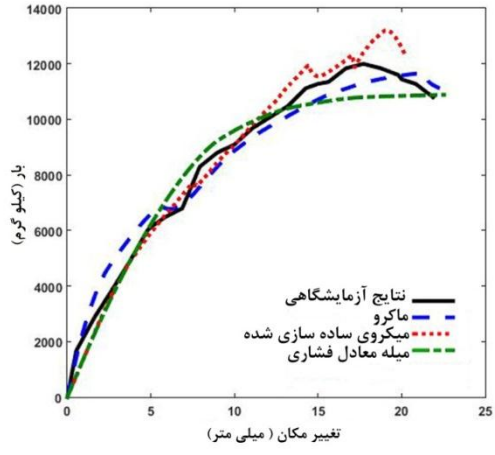
[۴] Fiber
[۵] Nonliner Beam Column element
[۶] Corotational Truss Element

امکانات آزمایشگاهی سبب شده است که در اکثر پروژه‌های تحقیقاتی، پژوهشگران از مدلسازی عددی به عنوان ابزاری سودمند در جهت رفع نیازهای خود استفاده کنند.

جهت پیش بینی رفتار سازه‌ها، فقط آشنایی با مدلسازی عددی و داشتن دانش استفاده از نرم افزار کافی نیست، بلکه تفسیر خروجی مدلسازی از اهمیت زیادی برخوردار است. اغلب در هنگام مدلسازی لازم است پس از انتخاب نوع تحلیل، تعیین کنیم که چه خروجی‌هایی از تحلیل برای ما مورد نیاز است. تشخیص خروجی‌های مورد نیاز تاثیر زیادی روی زمان تحلیل دارد چرا که هرچقدر میزان خروجی های درخواستی بیشتر باشد، زمان بیشتری برای تحلیل نیاز است. در نرم افزار Abaqus، این خروجی ها به دو گروه خروجی‌های گرافیکی به صورت کانتورهای رنگی (توزیع رنگ ها) و خروجی‌های نموداری تقسیم می شوند. ولی در نرم افزار OpenSees خروجی‌ها فقط به صورت نموداری قابل نمایش می باشند. چون خروجی های گرافیکی و نموداری نمونه‌های عددی دقیقاً مطابق با نمونه آزمایشگاهی نیست، پس می توان از آنها برای بررسی دقت مدلسازی استفاده کرد. در این مطالعه از معیار کمی مقاومت نهایی و معیار کیفی ترک خوردگی برای یررسی دقت مدلسازی استفاده شده است.

منحنی نیرو-تغییرمکان حاصل از آزمایش و منحنی‌های به دست آمده از مدلسازی‌های عددی تا جابجایی ۰/۲۲۵ متر، مطابق با شرایط بارگذاری آزمایشگاهی در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

نرم افزارهای اجزاء محدود، ابزار بسیار سودمندی هستند که بیشتر مواقع مهندسین را در بررسی رفتار سازه ها یاری می دهند. یکی از مهمترین مواردی که پژوهشگران و مهندسین از آن در جهت رفع نیاز های خود بهره می گیرند، کانتورهای رنگی می باشند. در این تحقیق از کانتور آسیب دیدگی کششی استفاده شده است. با استفاده از این کانتور به راحتی می توانیم محدوده اتفاق افتادن ترک خوردگی را تحت نیروی کششی مشاهده کنیم. همچنین با استفاده از این کانتور می توان نوع شکست در میانقاب را مشاهده کرد.

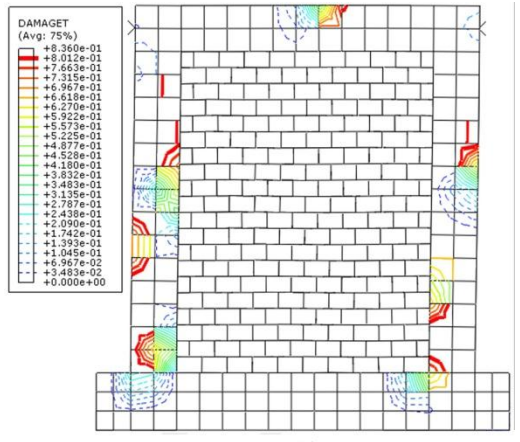


شکل ۱۷ : مقایسه نمودار بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدلهای عددی

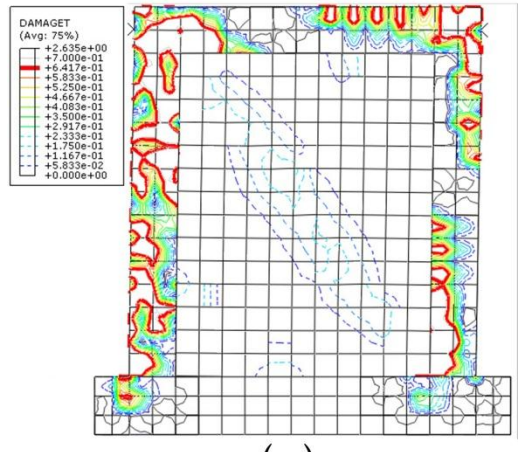
جدول ۲ : درصد خطای روش‌های مختلف مدلسازی

	بار نهایی (Kgr)	درصد خطا
نمونه ازمایشگاهی	۱۲۰۰۰	۰
کوچک مقیاس ساده شده در Abaqus	۱۳۲۱۴/۷	۱۰/۱۲
بزرگ مقیاس در Abaqus	۱۱۶۸۱/۱۵	۲/۶۵
میله معادل فشاری	۱۰۸۸۵/۴	۹/۲۵

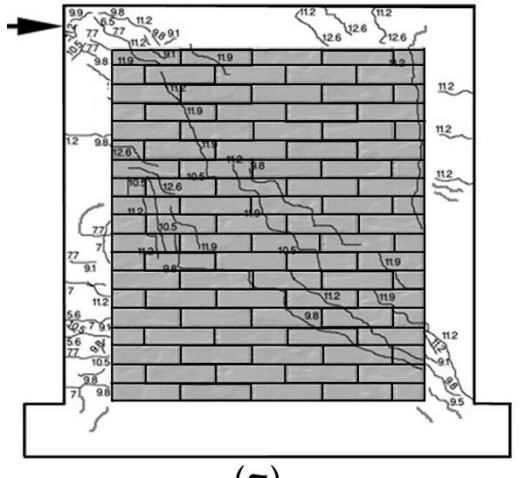
در شکل ۱۸ محل تشکیل ترک‌ها در روش کوچک مقیاس ساده شده و روش بزرگ مقیاس با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل مذکور رنگ آبی خط چین نشان دهنده ترک های ریز و رنگ قرمز صخیم نشان دهنده ترک های عمیق می باشند. با توجه به شکل مذکور می توان گفت که میانقاب دچار شکست ترک قطری شده است. در روش کوچک مقیاس ساده سازی شده به دلیل اینکه بین آجرها جداییش اتفاق افتاده است مسیر ترک های قطری قابل تشخیص نیست. ولی در روش ماکر به دلیل اینکه مصالح بنایی به عنوان یک ماده همگن در نظر گرفته شده، مسیر ترک های قطری بخوبی قابل تشخیص است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۸ : مقایسه محل تشکیل ترک الف: مدل کوچک مقیاس ، ب:مدل بزرگ مقیاس و ج: نمونه آزمایشگاهی

نتیجه گیری

در این تحقیق، سه روش مختلف شامل روش کوچک مقیاس ساده شده و روش بزرگ مقیاس هر دو در نرم افزار Abaqus و مدل سوم با استفاده از ایده میله معادل فشاری در نرم افزار OpenSees در مدلسازی قاب‌های بتن مسلح دارای میانقاب بنایی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور یک مدل آزمایشگاهی انتخاب و سپس به سه روش فوق مدلسازی شد. نتایج اصلی مطابق زیر است:

۱-مدلسازی به روش بزرگ مقیاس در Abaqus بیشترین دقت و مدلسازی به روش کوچک مقیاس ساده شده کمترین دقت را دارد. نیاز به پارامترهای مختلف و پیچیده و در دسترس نبودن آنها و عدم قطعیت در مورد رفتار میانقاب‌ها موجب دقت پایین روش مدلسازی به روش کوچک مقیاس ساده شده، گردید. میزان خطای به دست آمده نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی، در مدلسازی بزرگ مقیاس ۲/۶۵ ٪ ، مدلسازی میله معادل فشاری ۹/۲۵ ٪ و مدلسازی کوچک مقیاس ساده شده ۱۰/۱۲ ٪ می باشد.

۲-نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدلسازی به روش بزرگ مقیاس در نرم افزار Abaqus در نمایش محل تشکیل ترک ها عملکرد بهتری داشته است.

۳-علی‌رغم خطای نسبتاً زیاد روش میله معادل فشاری نسبت به روش بزرگ مقیاس ، به دلیل ایجاد سهولت و سرعت زیاد این روش، بسیاری از آیین نامه ها نظیر نشریه۳۶۰ سازمان برنامه و بودجه کشور، استفاده از مدل میله معادل فشاری را برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمان های دارای میانقاب، توصیه کرده اند.

۴-نکته‌ی حائز اهمیت در این مطالعه این است که هر دو نرم افزار Abaqus و Opensees توانایی بالایی در تحلیل مسائل مختلف دارند. به عبارت دیگر چنانچه یک مسئله توسط دو اپراتور ماهر نرم افزارهای مذکور، حل شود جواب هر دو یکسان خواهد شد. البته اختلاف اندکی در دقت جواب این دو نرم افزار وجود دارد که آن هم به دلیل الگوریتم و روش حل متفاوت آنها می باشد. همچنین در هر کدام برخی قابلیت ها وجود دارد که در دیگری نیست.

مراجع

[1]. Zare, Mehdi, F. Kamranzad, I. Parcharidis, and V. Tsironi. "Preliminary report of Mw7. 3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017." EMSC Report (2017): 1-10.

[2]. Fabio D.T., Giuseppe M., Liborio C. and Maurizio P. "Masonry infills and RC frames interaction: literature overview and state of the art of macromodeling approach " Taylor & Francis, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015 .

[3]. Keyvani J. & Farzadi M. , "impact of brick infill walls on the seismic behavior of reinforced concrete using finite element method" Asian journal of civil engineering VOL. 12, NO. 6(2011); PP. 789-802,

[4]. Lourenco, P.B, "User/Programmer Guide for the Micro-Modeling of Masonry Structures", Delft University of Technology ; Faculty of Civil Engineering; Report no.03.21.1.31.35 November 1996.

[5]. Bakeer, T. "Collapse Analysis of Masonry Structure under Earthquake Actions" Chair of Structure Design , TU Dresden, 8 edition , 2009. ISBN 9783867801300

[6]. Chaimoon, K, and Attard, M,M. "Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression" Engineering Structure, Vol. 29,PP. 2056-2068. 2007.

[7]. Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E., and Hamelin, P. "Analysis and modelling of the in-plan shear behavior of hollow brick masonry panels." Construction and Building Materials, Vol. 20, No, 5. PP, 308-321. 2006.

[8]. Gabor, A. Bennani, A. Jacquelin, E. and Lebon, F. "modeling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels." Composite structure, Vol, 74, No, 3, PP. 277-288. 2006.

[9]. P.G. Asteris. "Finite Element Micro-Modeling of Infilled Frames". Electronic Journal of Structural Engineering, Volume 8(2008), PP. 1-11.

[10]. Ioannis Koutromanos a., Andreas Stavridis a, P. Benson Shing a, Kaspar Willam. "Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads ".Computers & Structures, Volume 89(2011), Issues 11–12, Pages 1026 – 1037.

[11]. P.B. Lourenço, J.G. Rots and J. Blaauwendraad. "Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro and Macro-Modelling ". Heron, Vol. 40 (1995) No. 4, pp. 313-340.

[12]. C.E. Ventura, W.D. Liam Finn, J.F. Lord, N. Fujita ,"Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurements and low level earthquake shaking" , Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23 (2003) PP.313–322

[13]. Omid Rezaifar, M.Z. Kabir,M. Taribakhsh, "A. Tehranian, Dynamic behaviour of 3D-panel single-storey system using shaking table testing" , Journal of Engineering Structures 30 (2008) PP.318–337

[14]. Nawel Mezigheche, Abdelhacine Gouasmia, Allaeddine Athmani, Mouloud Merzoud. "Behavior of the Masonry Infill in Structures Subjected to the Horizontal Loads" International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:9, No:6, (2015)

[15]. Buonopane, S. and White, R."Pseudo dynamic Testing of Masonry infilled Reinforced Concrete Frame ". Journal of Engineering, Volume 125, issue 6 (June 1999)

[16]. .Modan A. Reinhorn A.M, .Fellow, ASCE,J.B.Mander, Member, ASCE, and R.E Valles "Modeling of Masonry Infill Panels for Structure Analysis" Journal of structural engineering, Vol. 123, No. 10, (1997)

[17]. Lila M. Abdel-Hafez, A.E.Y. Abouelezz, Faseal F. Elzefeary." Behavior of masonry strengthened infilledreinforced concrete frames under in-plan load " HBRC Journal (2015)11, PP.213–223

[18]. PhD thesis, Andreas Stavridis. "Analytical and Experimental Study of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Infilled with Masonry Walls". PhD Thesis, University Of CalIfornia, San Diego, 2009

[19]. Abaqus 6.14 Documentation / CAE User Guide.

[20]. Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D.P., Chan,T.H.T., & Fawzia, S."A Material Model For Flexural Crack Simulation In Reinforced Concrete Elementes Using Abaqus" Wahalathantri, Buddhi Lankananda, Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T., &Fawzia, S (2011)

[21]. Pinho, R.;Casarotti, c; Antoniou, s. "A Comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges", Journal of Earthquake Engineering, Vol, 36, PP 1347-1362. (2007).

[22]. Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai. and Sudhir K. Jain. " Uniaxial Compressive Stress–Strain Model for Clay Brick Masonry" Cuurent Science, Vol. 92, No. 4, 25Feebruary (2007).

Comparison of Numerical Techniques of Masonry Infilled RC Frames for Lateral Loads

Reza Moradi
MSc Student in Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi
Assistant professor, Razi University, Kermanshah, Iran
Email e_vahidi2000@yahoo.com

Abstract
Due to the influences of several parameters such as brick and mortar properties, interaction between brick and mortar and etc., engineers encounter challenges in modeling and evaluating procedure of the seismic behavior of masonry-infilled reinforced concrete (RC) frames. To predict the seismic behavior of these structural elements, the analytical model must be comprehensive and efficient in such a way that it can show the actual behavior of the structure. Modeling the behavior of masonry infilled reinforced concrete frames under in-plan load, has received much attention over the last decade. The main aim of this paper compares different methods of modeling infilled frame with experimental results in order to choose the appropriate method for modelling of infilled RC frames. To achieve the purpose, after describing the background to the application of each method, the specimen which was tested in the laboratory was modeled in three different methods. The first model was realized by simplified micro-modelling and, the second model was realized by macro-modelling procedure via Abaqus software. The third model was further made by equivalent diagonal compressive strut modelling in OpenSees software. The results showed that the macro-modeling method had maximum and the simplified micro-modeling had minimum accuracy in Abaqus software. The amount of observed differences between experimental results and macro-modeling approach, between experimental results and simplified micro-modeling approach, and equivalent diagonal compressive strut modeling were 2.65%, 9.25% and 10.12%, respectively. These findings maintain that macro-modeling technique in Abaqus software could have an appropriate performance in detecting cracks.
Keywords: *Infilled Masonry, RC Frame, Simplified Micro-Modelling, Macro-Modelling, In-Plan load*