مدلسازی رفتار غیر الاستیک دیوارهای برشی بتن مسلح مجاور با نرم افزار اپنسیس

احمد رضا فخریت[۱]،ساسان معتقد[۲،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۷/۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۵/۶

واژگان کلیدی:

ستون مش خورده معادل،

اپنسیس،

المان مرزی،

تحلیل دینامیکی،

تحلیل استاتیکی افزایشی.

چکیده

سازه‌های بتن مسلح با دیوار برشی به دلیل مزایای تحمل نیرو و کنترل تغییر شکل بخش مهمی از ساخت و سازها را شامل می‌شود. به منظور تأمین مقاومت جانبی و یا کاهش دریفت و یا الزامات معماری، در برخی از این ساختمان‌ها دیوارهای برشی در دهانه‌های متوالی اجرا می‌شود و دیوارهای مجاور هم به وجود می‌آید. نرم‌افزارهای مدل‌سازی نقش بسزایی در آنالیزهای غیرخطی دیوار ایفا خواهند کرد. در نرم‌افزاری‌هایی مانند اپنسیس به دلیل کد باز بودن کاربر قادر خواهد بود، با استفاده از جدیدترین روش‌های ارائه شده برای مدلسازی با در نظر گرفتن انواع پارامترهای تحلیل، شرایط و خواسته‌های مورد نیاز خود به کتابخانه‌ی این نرم افزار اضافه کند. ساخت مدل این دیوارها در نرم افزار اپنسیس با دشواری مواجه است. در صورتی که دیوارها در دهانه‌های مجاور اجرا شوند، مدلسازی دهانه‌ها به صورت منفرد، با المان MVLEM و SFI_MVLEM به دلیل ستون مشترک میانی سختی مدل را افزایش می‌دهد. همچنین این المان‌ها در دریفت‌های بیش از ۴ درصد ارتفاع سازه از جنبه همگرایی دچار مشکل خواهند بود. در این مقاله ضمن ارائه و مقایسه روش‌های مختلف مدلسازی، روشی برای مدلسازی رفتار دیوار برشی ارائه شده است، که مدلسازی دهانه مجاور هم را تسهیل و امکان همگرایی را افزایش می‌دهد. روش پیشنهادی ستون‌های مش خورده‌ی معادل است. مقایسه نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی و نتایج سایر مدلسازها توانایی این روش در مدلسازی دیوار برشی مجاور را نشان می‌دهد.

۱-مقدمه[۱]

دیوارهای برشی بتنی روشی اقتصادی جهت ایجاد پایداری در برابر بارهای جانبی ایجاد شده توسط باد و زلزله هستند و از این رو به عنوان سیستم رایج مقاوم در برابر نیروی جانبی در ساختمان‌ها به کار می‌روند. دیوارهای سازه‌ای دارای سختی بالا در جهت صفحه دیوار هستند و با محدود کردن تغییر شکل جانبی در حین زمین لرزه به کاهش آسیب‌ها به سازه کمک می‌کند[۱]. بررسی رفتار سازه‌هایی که شامل دیوارهای برشی به عنوان سیستم باربر اولیه جانبی در حین زلزله بوده‌اند، بیانگر رفتار مناسب این گونه سیستم باربر جانبی می‌باشد. در زلزله ۱۹۸۵ و ۲۰۱۰ شیلی، ساختمان‌های با سیستم باربر جانبی دیوار برشی، عملکرد بسیار خوبی داشتند [۲]. همچنین، در حین زلزله ارمنستان در سال ۱۹۸۸، ساختمان‌هایی که با طراحی ضعیف ساخته شده بودند و دیواربرشی به عنوان سیستم اصلی مقاوم در برابر نیروی جانبی بود عملا عملکرد بهتری از ساختمان‌های ساخته شده با دیگر سیستم‌های سازه‌ای داشتند [۳]. حتی در مخرب‌ترین زلزله‌ها (زلزله نورثریج ۱۹۹۴ در کالیفرنیا، زلزله کوبه ۱۹۹۵ در ژاپن و زلزله کوکائلی در سال ۱۹۹۹ در ترکیه)، نیز هیچ ساختمانی با دیوارهای برشی، فرونریخت[۱]. هولدن و همکاران(۲۰۰۳) و توماس(۲۰۰۳) در بررسی عملکرد دیوار برشی، آسیب پذیری آن‌ها را اندک دانسته‌اند[۴ و ۵]. با این وجود، اغلب محققین مدلسازی غیر خطی دیوارهای برشی را برای انجام

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:motaghed@bkatu.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۲.استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

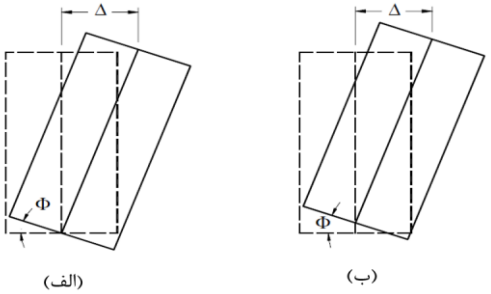
تحلیل‌های دقیق لرزه‌ای ضروری می‌دانند [۶].

حسب نیاز ممکن است برای تامین مقاومت جانبی دیوارهای برشی در دو دهانه مجاور در یک جهت اجرا شود. مدلسازی رفتار غیر خطی در این حالت با توجه به روش‌های مدلسازی معمول موجود در نرم افزار اپنسیس، که مدلسازی دیوار و المان مرزی با هم مدل می‌شود، دشوار خواهد بود. زیرا المان مرزی در محل اتصال دو دیوار دو بار مدل خواهد شد و به نوبه‌ی خود سختی مدل را افزایش می‌دهد. در این مقاله ضمن ارائه و مقایسه روش‌های مختلف مدلسازی دیوار برشی، روشی برای مدلسازی رفتار دیوار برشی در نرم افزار اپنسیس معرفی شده است. این روش مدلسازی دیوارها در دهانه‌های مجاور را تسهیل و امکان همگرایی را افزایش می‌دهد. روش پیشنهادی ستون‌های مش خورده معادل است. روش ارائه شده با روش‌های معمول مدلسازی قاب در نرم افزار اپنسیس و نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه و صحت سنجی شده است. در نهایت توانایی روش در قاب بتن مسلح سه طبقه با دیوارهای برشی مجاور نشان داده شده است.

۲-مدلسازی غیر خطی

۲-۱-مدلسازی غیر خطی با MVLEM

مدل‌های مختلفی جهت تحلیل و تعیین پاسخ غیرالاستیک دیوارهای برشی بتن مسلح ارائه شده است. یک رویکرد مدلسازی معمول برای رفتار هیسترزیس دیوار، از یک المان تیر- ستون در محور مرکزی دیوار با پیوندهای محکم روی تیرها استفاده می‌کند [۷]. معمولاً یک مدل المان تیرستون تک جزئی انتخاب می‌شود. این مدل از یک المان الاستیک خمشی با یک فنر چرخشی غیرخطی در هر انتها تشکیل شده است تا رفتار غیرالاستیک مناطق بحرانی را به حساب آورد [۷]. در این مدل، چرخش انتهای ثابت در هر رابط اتصال می‌تواند توسط یک فنر دیگر چرخشی غیر خطی در نظر گرفته شود. برای مدلسازی واقعی‌تر دیوارها، بهبودهایی نظیر نمایش چندین فنره، تغییر مناطق غیرالاستیک و رفتار خاص برشی غیرالاستیک به المان‌های تیر- ستون ساده اضافه شدند. با این حال، پاسخ غیرالاستیک دیوارهای سازه تحت بارهای افقی تحت تاثیر کرنش های کششی بزرگ و چرخش انتها ثابت به دلیل اثرات لغزش اتصال همراه با تغییر محور خنثی است. این ویژگی را نمی‌توان به طور مستقیم توسط مدل المان تیر-ستون مدلسازی کرد. بنابراین، المان تیر- ستون، قابلیت مدلسازی ویژگی‌های مهم رفتارآزمایشگاهی، از جمله تغییر محور خنثی سطح مقطع دیوار(شکل ۱)، تکان نوسانی دیوار و اثر متقابل با المانهای قاب متصل به دیوار را ندارد. المان تیر- ستون در نرم افزار اپنسیس با دستور فایبر مدلسازی شده است. استفاده از المان تیر–ستون با دستور فایبر نمی‌تواند رفتار برشی، اندرکنش خمش و برش و اندرکنش با قاب را مدل کند. همچنین در این مدل فرض می‌شود که چرخش دیوار حول نقطه مرکزی آن انجام می شود. پس از یک آزمایش جامع، کابیاساوا و همکاران (۱۹۸۳) مدل المان ماکروسکوپی سه خط قائم (TVLEM) را پیشنهاد کردند[۸]. در این مدل عضو دیوار به عنوان سه المان خط عمودی با تیرهای بی نهایت صلب در سطوح بالا و پایین (کف) مدلسازی می‌شود؛ دو المان بیرونی خرپا نشان دهنده سختی محوری ستون های مرزی و المان مرکزی یک مدل تک عضوی با فنرهای عمودی، افقی و چرخشی است[۷].



شکل ۱- اثر تغییر محور خنثی بر جابجایی عمودی
الف- رفتار مدل المان تیر ستون ب- رفتار واقعی دیوار[۷].

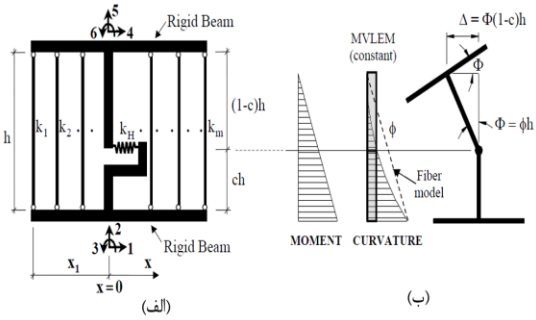
برای اثر دادن مؤلفه تغییر شکل برشی، یک فنر برشی در راستای افقی همراه با آن آلمان عمودی در نظر می‌گیرند که باعث می‌شود تغییر شکل‌های برشی نیز وارد محاسبات شود. این المان‌های متعدد موسوم به المان‌های چند خطه قائم (MVLEM)[1] می‌باشد[۷].

مدل پایه المان چند خطه قائم MVLEM توسط والکانو و همکاران (۱۹۸۸) ارائه شد[۹]. این روش توسط اوراکال (۲۰۰۴) برای شبیه‌سازی پاسخ‌های غیر خطی دیوارها و ستون‌های بتن مسلح توسعه یافته است[۱۰]. رفتار خمشی با یک سری از المان های تک محوره (ماکروفایبر) که در بالا و پایین به تیر های صلب متصل شده‌اند، شبیه سازی

[1] Multiple-Vertical-Line-Element-Model

شده است. دو المان خرپای بیرونی سختی محوری المان-های مرزی را مدل می‌کنند. خواص سختی و روابط نیرو تغییر مکان المان‌های محوری بر اساس روابط ساختاری بتن و فولاد مسلح کننده و نواحی انشعابی تخصیص داده شده به المان محوری بدست آمده است [۶]. در این مدل، با فرض توزیع یکنواخت انحنای دیوار در ارتفاع هر المان (شکل۱-ب)، دوران و جابجایی‌های عرضی حاصل از خواص مصالح و مقطع مربوط به ممان خمشی در ارتفاع ch هر المان بدست می‌آید.

مقدار ch= ۰/۴ توسط والکانو و همکاران (۱۹۸۸) توصیه شده است[۹]. پاسخ برشی المان، با فنر افقی جایگزین شده در ارتفاع ch شبیه سازی می‌شود.



شکل۲- الف-فرمول بندی المان مدل ب-دوران ها و جابجایی ها [۶]

المان MVLEM به صورت کلی دارای یک سری المان دو سر مفصل (المان خرپایی) است که به صورت عمودی در طول دیوار در نظر گرفته می‌شود. برای مدلسازی توزیع تغییر شکل محوری در نقاط مختلف طول دیوار ، یک فنر برشی برای تغییر شکل‌های برشی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل دیوار به صورت کلی هندسه‌ی دمبلی شکل دارد که در دو سوی آن دارای المان مرزی، با آرماتورگذاری شبیه به ستون، قرار دارند. در قسمت میانی که به جان دیوار موسوم است، آرماتورگذاری ساده تر است. در این بخش یک یا دو سفره آرماتور در راستای طولی قرار داده می‌شود و آرماتور عرضی نیز به صورت مستقیم قرار می-گیرد. روش MVLEM نمی‌تواند اندرکنش نیروی برشی و لنگر خمشی را در نظر بگیرد. با تکامل روش‌ها، مصالح چند محوره (nDMaterial) تعریف شد. مصالحی که برای مدلسازی رفتار تنش و کرنش در محیط‌های پیوسته و با در نظر گرفتن مولفه متعامد تنش تعریف می‌شود. این مصالح با نام FSAM به نرم افزار اپنسیس اضافه شد[۱۱]. با توجه به توضیحات توسعه‌دهندگان یک المان تنش صفحه‌ای است و در حالت سه بعدی تنش ها در آن دیده نمی‌شود. علت این است که معمولا رفتار دیوار رفتاری داخل صفحه است و تنش‌های خارج از صفحه در آن قابل صرف نظر کردن می‌باشد. ضمن مدل کردن رفتار غیر خطی، این مصالح یک راستای ثابت و بدون تغییر برای ترک‌ها فرض می‌کند. به عبارت دیگر راستایی که برای اولین بار تنش کششی به حد گسیختگی می‌رسد آن راستا از تنش تا انتهای تحلیل ثابت می‌ماند و برای راستاهای مشخص ترک بین دو قسمتی از بتن که در دو طرف ترک وجود دارد یک اندرکنش اصطکاکی فرض می‌شود. در همین راستا ضریب اصطکاکی را از کاربر می‌پرسد. همین طور نقش آرماتور را در اصطکاک لحاظ می‌نماید. یعنی با توجه به مقاومت آرماتور و نیروی که آرماتور وارد می‌کند جلوی باز شدن دو وجه ترک را می‌گیرد که اثر کلی نیروی آرماتورها در مقاومت کلی مقطع را هم اثر می‌دهد.

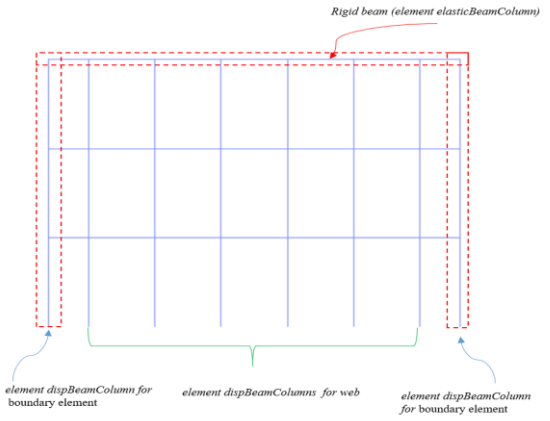
۲ـ ۲ ـ مدلسازی غیر خطی با SFI-MVLEM

فرمول‌بندی MVLEM با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی برش و خمش اصلاح شده است. در این مدل فرض بر این است که صفحات مستوی، پس از خمش مستوی باقی می‌مانند. کرنش‌های برشی توزیع یکنواخت در مقطع عرضی نیز دارند. جمع تنش‌های افقی نرمال حاصل از بتن و فولاد (یعنی تنش افقی در بتن σ_x) در طول دیوار برابر صفر است. فرضیات اول و دوم مبنای فرمول‌بندی اصلی MVLEM هستند. فرض سوم در فرمول‌بندی SFI-MVLEM برای ارضاء شرایط تعادل المان های پانل دیوار برشی در جهت افقی ضروری است. به گونه ای که کرنش نرمال در جهت افقی برای هر المان پانل قابل محاسبه است. فرض توزیع یکنواخت کرنش‌های برشی در طول دیوار تأثیر مهمی بر پیش بینی رفتار دیوار در المان‌های بتن مسلح لاغر ندارد. زیرا جابجایی‌های جانبی عمدتا ناشی از تغییر شکل‌های خمشی است. البته استفاده از فرض مشابه در ستون‌های کوتاه یا دیوارهای کوتاه به علت احتمال حضور مدهای مختلف تغییر شکل (مثلاً warping) یا مکانیزم های انتقال نیرو (مثلاً تغییرشکل‌های برشی) منطقی نیست. بعلاوه ارتفاع نسبی کم اعضای سازه ممکن است برای بازتوزیع تمرکز تنش در نزدیکی نقاط اعمال بار یا تکیه گاه‌ها (که به آن اثر سن –ونان گفته می‌شود) کافی نباشد. این اثرات و ستون‌ها یا دیوارهای کوتاه باعث توزیع غیر یکنواخت تنش‌ها و کرنش‌ها شده و ممکن است با تفاوت

اساسی در پاسخ‌ها مشاهده شود. بعلاوه فرض مجموعه تنش های افقی صفر در هر المان به معنای صفر بودن مجموعه‌ی تنش‌های نرمال افقی در طول عضو سازه‌ای است. این فرض در حالی که هیچ نیروی عرضی در ارتفاع عضو وارد نشود با شرایط مرزی سازگار است. ماسن و همکاران در سال ۲۰۰۶ نشان داده‌اند که فرضیات مجوعه تنش های افقی صفر توزیع یکنواخت کرنش برشی و مستوی باقی ماندن صفحات برای دیوارهای طره‌ای با نسبت شکل بزرگتر از ۱ منطقی است[۱۲]. بنابراین انتظار می‌رود که رهیافت مدلسازی پیشنهادی برای ستون‌ها و دیوارهای بتنی مسلح نسبتاً لاغر یا با ارتفاع متوسط با نسبت دهانه‌ی برشی به عمق بیش از ۱ مناسب باشد[۶].

۳-۲-روش مدلسازی پیشنهادی (ستون‌های مش خورده معادل (فایبر))

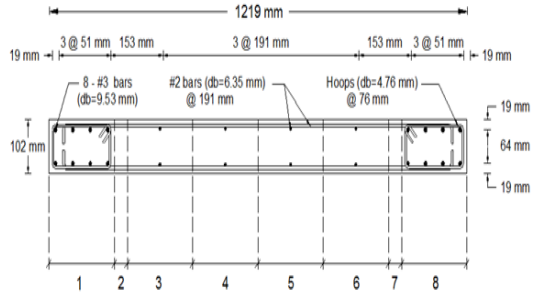
یک شیوه‌ی جایگزین برای مدلسازی دیوار برشی، مش‌بندی هر قطعه از دیوار با مقاطع فایبر است. جهت رسیدن به این هدف در ابتدا یک سری المان عمودی با مقطع فایبر در نظر گرفته می‌شود که مشخصات مقطع آنها مشابه MVLEM تابع ضخامت و عرض المان‌ها خواهد بود. این المان‌های عمودی به کمک المان غیر خطی element dispBeamColumn در راستای افقی در هر بخش از مش‌بندی دیوار ایجاد می‌شود. این مش‌بندی افقی باعث می‌شود پیوستگی هندسی که در دیوار در جهت افقی وجود دارد لحاظ شود به این ترتیب در هر ناحیه از دیوار یک ستون تعریف می‌شود و آن ستون با توجه به مشخصات ضخامت و طول دیوار در قسمت‌های المان‌های مرزی و جان دیوار که آن ناحیه از دیوار با آن مدلسازی می‌شود، تعریف می‌شود. همچنین در روش ستون‌های معادل، قابلیت مشابه با روند المان‌های MVLEM و SFI_MVLEM، که جان دیوار با چندین المان مش‌بندی شود وجود دارد و صحت نتایج مش‌بندی در حالت‌های مختلف با هم مقایسه خواهد شد. ضمن پیوستگی افقی پیوستگی عمودی نیز در دیوار وجود دارد. المان افقی، المانی الاستیک با سختی خمشی زیاد (Rigid beam) که صرفا نقش همبند کردن نقاط بالای دیوار را بر عهده دارد است. چنین لینک‌هایی که توسط المان element elasticBeamColumn ایجاد می‌شود. با توجه به نحوه تعریف هر المان عمودی ستون‌های معادل، در روند برنامه نویسی در اپنسیس، المان ابتدا و انتها به المان‌های مرزی اختصاص داده می‌شود. در صورتی که ساختمان مورد نظر دارای دهانه‌های دیواربرشی مجاور هم باشد، المان مرزی مشترک میانی که برای دهانه دیوار مجاور اول از قبل تعریف شده است، در روند برنامه نویسی در نرم افزار به گونه ای معرفی می‌شود که المان مرزی برای دیوار دهانه مجاور بعدی مجدداً تعریف نمی‌شود و از المان مرزی دهانه به صورت مشترک استفاده می‌شود.



شکل۳- شماتیک مدلسازی ستون مش‌خورده معادل (فایبر)

۳-صحت سنجی

به منظور سنجش صحت مدلسازی پیشنهادی، دیوار برشی معمولی به سه شیوه‌ی MVLEM و SFI_MVLEM و روش ستون مش‌خورده معادل (فایبر) با نرم افزار اپنسیس مدل‌شده و پاسخ‌ها با نتایج دقیق آزمایشگاهی مقایسه شده است. مدل آزمایشگاهی دیوار برشی بتن مسلح یک دهانه تحت اثر بار چرخه‌ای از گزارش PEER استخراج شده است. هندسی کلی و جزئیات این دیوار در شکل (۳) آورده شده است[۶].

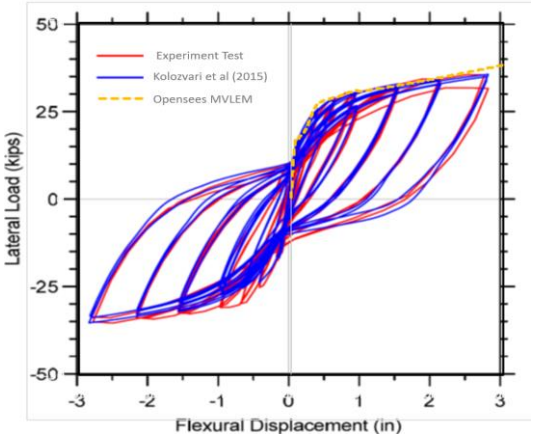


شکل ۴- هندسه و جزییات دیوار برشی آزمایشگاهی بتن مسلح مورد استفاده برای صحت‌سنجی[۶]

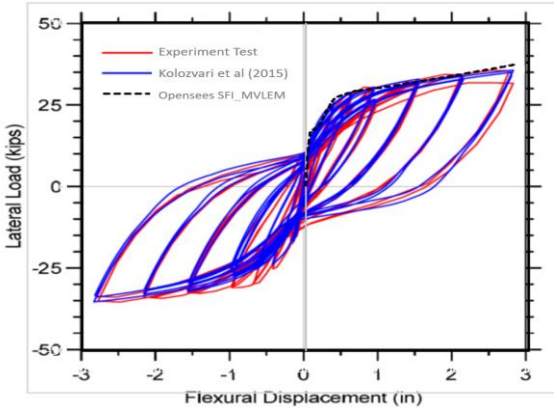
دیوار دارای ارتفاع ۳۶۵ و عرض ۱۲۲ و ضخامت۱۰ سانتیمتر است. المان مرزی به طول ۲۰ و عرض ۱۰ سانتیمتر است. نیروی محوری برابر با $0/07\ A_g f'_g$ به

عنوان بار ثقلی و بار جانبی در نقطه‌ی فوقانی دیوار اثر می-کند. مقاومت فشاری که برای بتن در مرحله طراحی در نظر گرفته شده است ۲۷/۵ MPa بوده است. نتایج آزمون‌های نمونه‌های بتن مقاومت بتن بین ۲۸/۷MPa تا ۵۸/۴ MPa را در نقاط مختلف بتن نشان داده است. همچنین مقاومت متوسطی که برای بتن در نظر گرفته شده است، مقدار ۴۲/۸MPa می‌باشد. در تست نمونه‌های بتنی، حداکثر مقاومت فشاری در کرنش ۰/۰۰۲ مشاهده شده است. در مورد مشخصات آرماتورها در نواحی المان های مرزی از 8 عدد آرماتور نمره‌ی ۱۰ با f_y برابر ۴۱۳MPa/۶ استفاده شده است. آرماتورهای جان به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. دو لایه آرماتور نمره ۶ با f_y ۴۴۸/۱MPa قرار دارند. مشخصات دقیق آرماتورها در شکل (۴) داده شده است[۶]. با توجه به این گزارش، بار وارده به دیوار متمرکز است و باید به نرم افزار اپنسیس بار را به گونه‌ای داده شود که معادل بار آزمایش شده باشد. در این مدل، بار مرده بام لحاظ شده و بار زنده صفر فرض شده است. درصد آرماتور عمودی و افقی جان برابر با ۰/۰۰۳ است. قطر خاموت‌ها در ناحیه المان مرزی برابر ۴/۷۶ میلی متر و فاصله آنها از یکدیگر ۷۶ میلی‌متر است [۶].

بر اساس شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه نتایج نمودار پوش‌آور مدل‌سازی MVLEM، SFI_MVLEM تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بارگذاری چرخه‌ای بر اساس نمودار ۷ به نمونه اعمال شده است، شکل (۸) نتیجه تحلیل دیوار به روش MVLEM تحت بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد که تطابق خوبی به نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد.

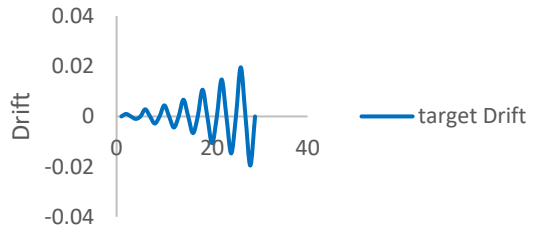


شکل ۵- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی [۶] با نتایج مدل MVLEM اپنسیس برای دیوار برشی بتنی مسلح در بارگذاری یکنوا



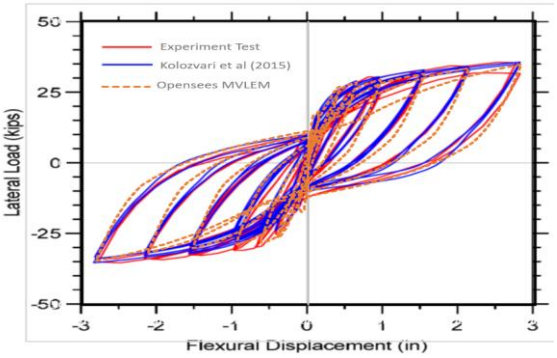
شکل ۶- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی [۶] با نتایج مدل SFI_MVLEM اپنسیس برای دیوار برشی بتنی مسلح در بارگذاری یکنوا

به منظور صحت‌سنجی رفتار نمونه در بارگذاری چرخه‌ای، داده‌های دامنه‌ی تغییر مکان‌ها یا دریفت‌های هدف آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفته است. برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای، در هر سیکل تغییر مکان یا دریفت متناظر با آن به صورت شکل (۷) در نظر گرفته شده است.

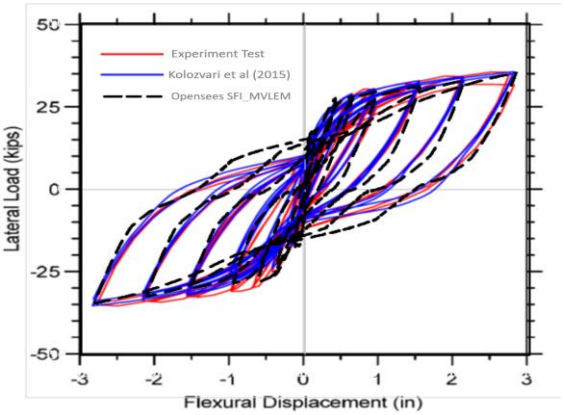


شکل۷- بارگذاری اعمال شده در صحت سنجی مشابه با نمونه آزمایشگاهی (جابجایی کنترل)

نتایج مدل‌های عددی به روش MVLEM و SFI_MVLEM تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد که نمودار هسیترزیس به ترتیب مطابق شکل (۸) و (۹) همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



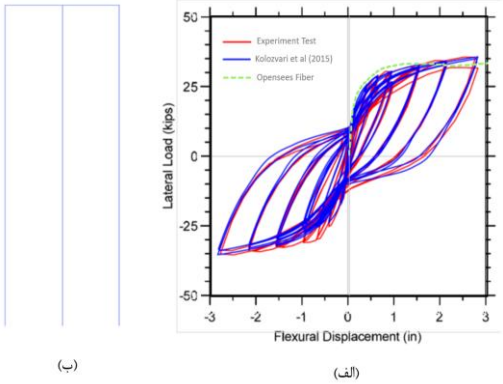
شکل ۸- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی [۶] با نتایج مدل MVLEM اپنسیس برای دیوار برشی بتنی مسلح در بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی [۶] با نتایج مدل SFI_MVLEM اپنسیس برای دیوار برشی بتنی مسلح در تحلیل چرخه‌ای

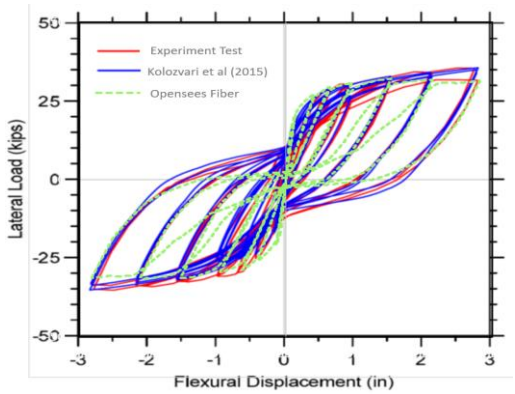
بر اساس شکل‌های (۸) و (۹) رفتار منحنی MVLEM نسبت به SFI_MVLEM انحنای بهتری از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد انحنای خوب روش MVLEM نسبت به مدل FI_MVLEM نشان دهنده‌ی این است که روش MVLEM بیشتر تحت تأثیر رفتار فولاد (steel02) بوده است. در روش MVLEM انتقال از ناحیه خطی به غیر خطی را با یک منحنی ملایم است، اما در روش SFI_MVLEM رفتار منحنی هیسترزیس علاوه بر رفتار فولاد، تحت تاثیر پارامترهای دیگر مانند اثر اندرکنش برش و خمش نیز بوده است .

برای بررسی روش پیشنهادی ستون مش خورده معادل (فایبر) ابتدا ساده‌ترین حالت ممکن در مش‌بندی دیوار مورد واکاوی قرار می‌گیرد. در این حالت جان دیوار با یک ستون معادل مدل شده و در نتیجه تعداد تقسیم‌بندی افقی (مش بندی) برابر عدد ۳ و تقسیم بندی عمودی در جهت ارتفاع دیوار برابر۱در نظرگرفته می‌شود.



شکل ۱۰- الف- مقایسه نتایج بارگذاری چرخه‌ای ستون مش خورده معادل و با نتایج آزمایشگاهی ب-هندسه مدل

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) صحت سنجی مدل ستون مش خورده معادل تحت بارگذاری چرخه ای نشان داده شده است.



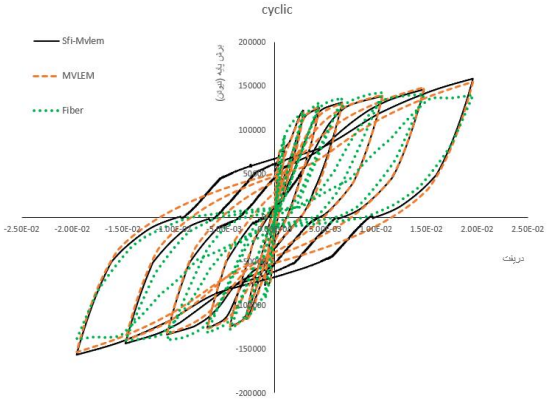
شکل ۱۱- مقایسه نتایج بارگذاری چرخه‌ای ستون مش خورده معادل (فایبر) با نتایج آزمایشگاهی

شکل (۱۰) همخوانی مناسب نتایج را نشان می‌دهد. در این شکل نمونه ستون مش خورده را نیز نشان می‌دهد.

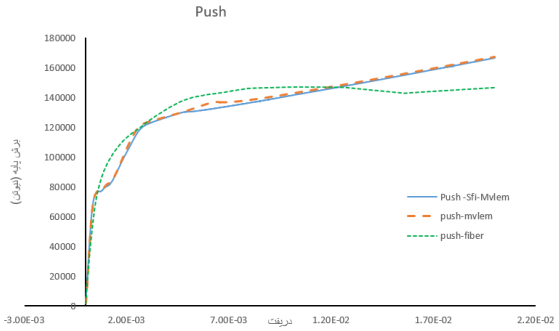
در شکل (۱۱) دیده می‌شود که مقدار زوال سختی مدل پیشنهادی بیش از نمونه آزمایشگاهی است. همانطور که مشخص است در حالت‌های یکنوا نمودار دارای زوال رفتاری(مقاومت، سختی) چرخه‌ای بیشتری است. همچنین در حالت باربرداری نیز شیب بیشتری نسبت به نتیجه آزمایشگاهی دارد که رفتار باریک‌شدگی شدیدتر نمونه عددی را نشان می‌دهد.

۴-مقایسه منحنی‌های رفتار دیوار آزمایشگاهی با سه شیوه مدلسازی عددی در نرم افزار اپنسیس

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مقایسه رفتار چرخه‌ای و پوش‌اور مدلهای عددی نرم افزار اپنسیس دیوار شکل (۳) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- مقایسه منحنی های رفتار سه شیوه مدلسازی عددی دیوار آزمایشگاهی تحت بار چرخه ای

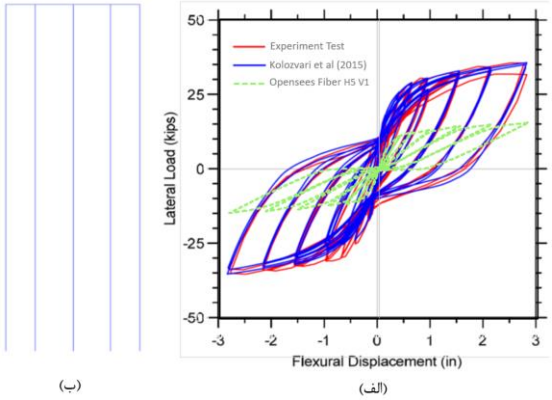


شکل ۱۳- مقایسه منحنی‌های رفتار سه شیوه مدلسازی عددی دیوار آزمایشگاهی تحت بار یکنوا(مونوتونیک)

در این حالت نمی‌توان برتری خاصی را برای یک مدل در نظر گرفت.

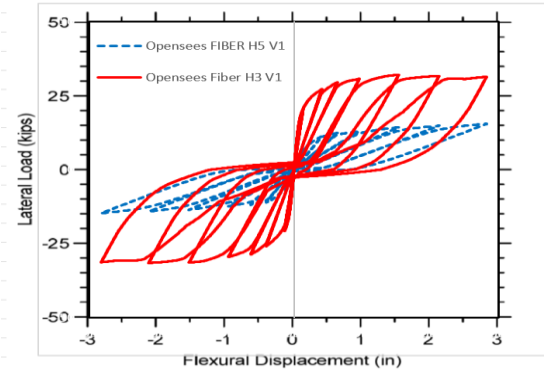
۵-حساسیت سنجی مدل تحت تاثیر مش‌بندی افقی و قائم در روش ستون معادل

به منظور سنجش حساسیت مدل به مش‌بندی افقی و قائم در روش ستون مش خورده معادل (فایبر) تعداد تقسیم بندی افقی از ۳ به ۵ تغییر و نتیجه در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

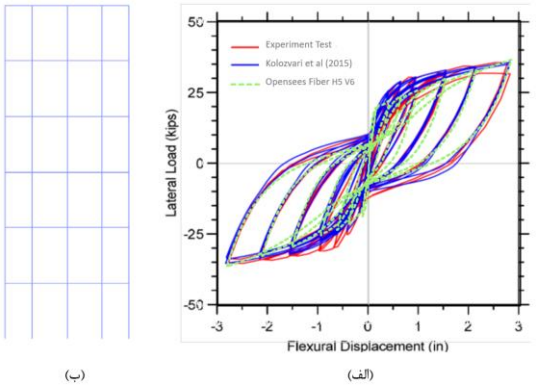


شکل۱۴- تحلیل چرخه‌ای به روش فایبر با ۵ مش در جهت افقی یک مش قائم ب-هندسه مدل

در این حالت نمودار افت شدید سختی و مقاومت دیده می-شود. دلیل این رفتار عدم اتصال کامل جان دیوار به علت مدلسازی با چندین ستون عمودی است. این ستون‌ها فقط با یک المان در بالای خود با یکدیگر متصل شده‌اند. در حالی‌که دیوار در تمام طول ارتفاع خود یک محیط پیوسته است و این نوارهای عمودی با یکدیگر اندرکنش دارند. به نظر می‌رسد که افت مقاومت و سختی ناشی از این حالت مش‌بندی است. به منظور روشن شدن موضوع، در راستای افقی در ارتفاع دیوار هم مش‌بندی بیشتری انجام شده است. رفتار چرخه‌ای در حالتی که جان دیوار فقط با یک المان ستون مدل شده است را با حالت مدلسازی جان دیوار با سه ستون، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. افت شدید مقاومت و سختی در حالتی که جان با چند ستون مدلسازی شده باشد، کاملاً مشهود است. مش‌بندی عمودی همچنان ۵ و این بار در راستای افقی در طول دیوار مش بندی ۳ تغییر داده شده است. نتیجه در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با افزایش تقسیم بندی افقی در راستای ارتفاع دیوار از ۳ به ۶، نتیجه مطابق شکل (۱۶) بدست آمده است.



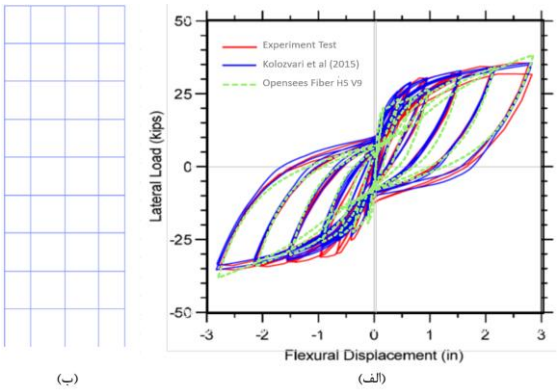
شکل ۱۵- مقایسه مش‌بندی دیوار با ۳ و ۵ المان فایبر در جهت افقی



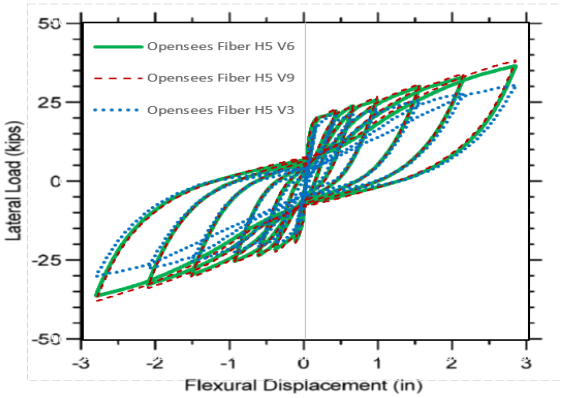
شکل۱۶- الف-رفتار چرخه‌ای دیوار با شش المان در ارتفاع ب-هندسه مدل

افزایش روند مش بندی عمودی تا ۹ تغییر چندانی در نتیجه مشاهده نمی‌شود(شکل ۱۷). این مساله در شکل (۱۸) که مقایسه تأثیر تغییرات مش بندی در جهت قائم را نشان می‌دهد، کاملاً مشخص است.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که روش MVLEM دقت بیشتری نسبت به SFI_MVLEM دارد. روش‌های پیشنهادی ستون مش خورده معادل(فایبر) در مدلسازی دیوارهای برشی مجزا باریک شدگی بیشتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد، که از این لحاظ مدل‌های قبلی بهتر هستند. سایر مشخصه‌های رفتار هیسترزیس مشابه هستند.



شکل ۱۷- الف- رفتار چرخه‌ای دیوار با ۹ المان در ارتفاع ب- هندسه مدل



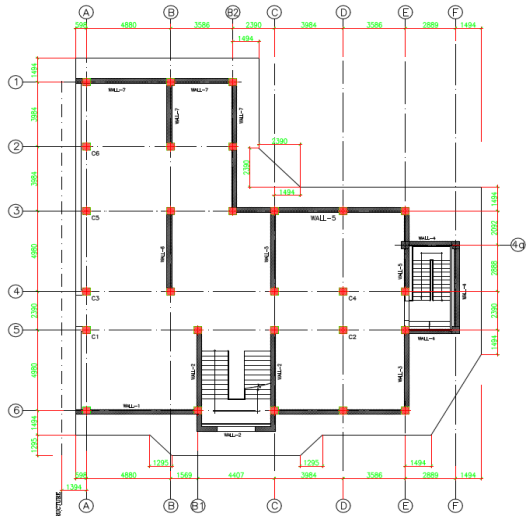
شکل ۱۸- نمودار مقایسه‌ای مش‌بندی قائم ۳، ۶، ۹

در مورد زوال سختی و مقاومت لازم است توجه شود که ترک خوردگی در مقطع بتنی در ناحیه کششی است و بازشدگی مربوط به ترک‌ها عامل زوال است[۱۳]. به طور کلی در یک مقطع بتنی درناحیه‌ی کششی در زمان بارگذاری ترک‌ها بدون مقاومت باز می‌شوند و المان دچار افت سختی خواهند شد. زمانی که جهت بارگذاری در جهت مخالف باشد و ناحیه ای که قبلا تحت کشش بوده است، تحت فشار بارگذاری شود، ابتدا باید ترک ها بسته شوند تا آن قسمت می‌تواند تحت بار فشاری سختی و مقاومت برای نمونه تأمین نماید. در این حالت این ترک خوردگی در شیب ناحیه‌ای از نمودار که دچار افت شده است تأثیر گذار خواهد بود. گسترش ناحیه ی ترک خورده به سمت کل مقطع باعث می‌شود کل مقطع مورد نظر دچار افت مقاومت و سختی شوند و هر چه دامنه‌ی تغییر مکان‌ها بزرگ‌تر شود بخش بزرگ‌تری از مقطع در ناحیه‌ی کششی ترک می‌خورد و آن بخش دیگر نمی‌تواند سختی اولیه ایجاد کند و دچار زوال می‌شود. به صورت کلی این رفتار ها را باید در رفتار تنش و کرنش بتن جستجو کرد.

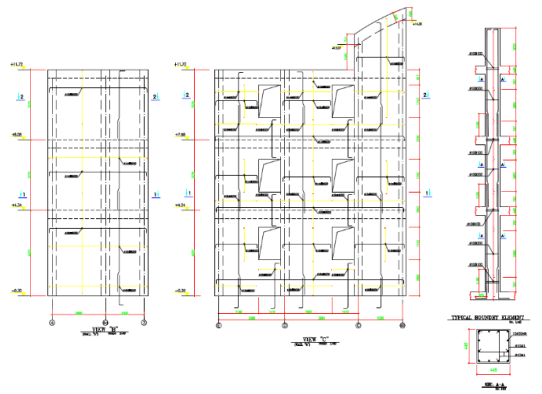
نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که استفاده از سه مش در عرض دیوار، دو مش برای مدلسازی المان‌های مرزی و یک مش برای مدلسازی جان دیوار کافی است.

۶-تحلیل و نتایج

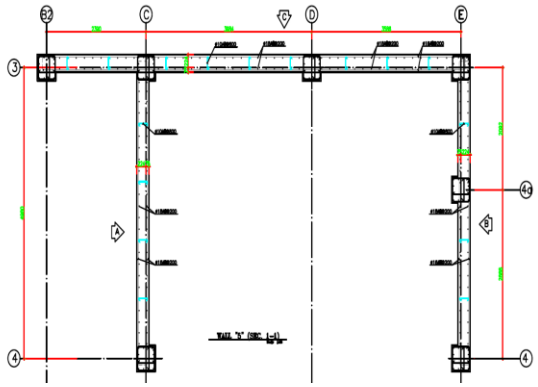
به منظور سنجش قابلیت و دقت روش پیشنهادی در تحلیل دیوارهای برشی بتن مسلح مجاور دو ساختمان مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا ساختمان اداری شرکت پالایش گاز بیدبلند بهبهان به صورت موردی مدلسازی و تحلیل شده است. اطلاعات هندسی، پیکربندی و سازه‌ای این ساختمان در شکل‌های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. ساختمان سه طبقه با زیر بنای ۳۴۲ m^2 است. سیستم باربر جانبی ساختمان دیوارهای برشی بتن مسلح است. چنانچه از شکل (۱۹) دیده می‌شود در هر جهت دیوارهای برشی به هم چسبیده وظیفه انتقال بارهای جانبی را بر عهده دارند. قاب انتخابی در محور ۳ از ساختمان در شکل (۱۹) نشان داده شده است. در این قاب سه دیوار برشی به هم چسبیده وجود دارد. المان‌های مرزی هر دیوار در محل ستون با دیوار مجاور مشترک است.



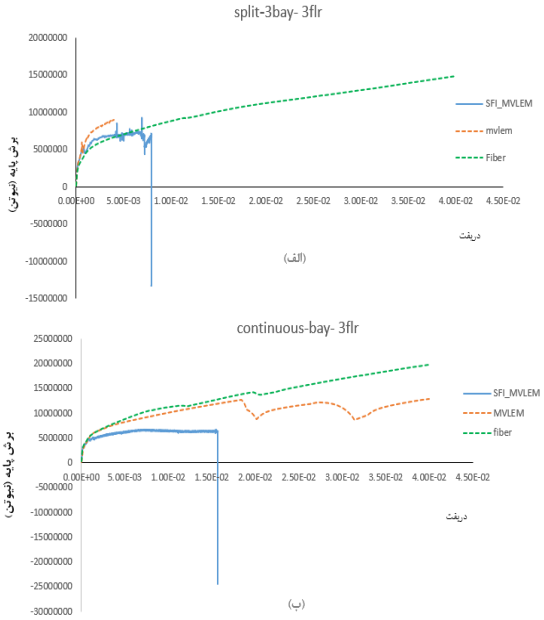
شکل ۱۹- پلان تیپ طبقات ساختمان



شکل ۲۰- برش قاب مورد مطالعه



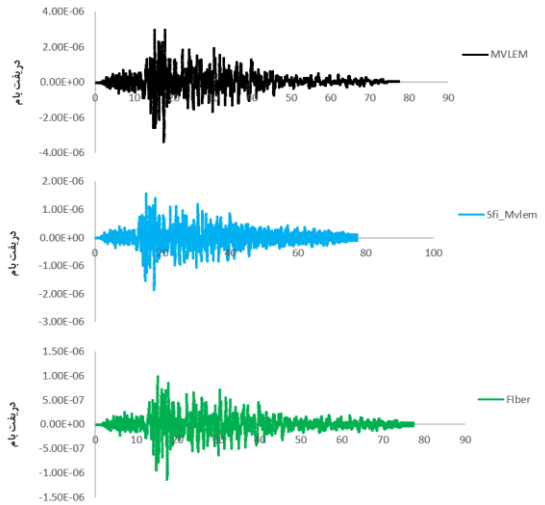
شکل۲۱- برش جهت عرضی قاب مورد مطالعه



شکل۲۲- منحنی پوش اور قاب ۳ طبقه مورد مطالعه
الف_مدلسازی دیوار مجاور هم با داشتن المان مرزی مشترک بین دیوارها ب-مدلسازی دیوار به صورت یک دهانه پیوسته بدون المان مرزی مشترک

شکل (۲۲-الف) منحنی پوش‌اور قاب مورد مطالعه (دارای ستون مشترک میانی) در شرایطی که دیوارهای دهانه‌های مجاور با المان‌های SFI_MVLEM وMVLEM مدلسازی شود، با منحنی پوش آور همان قاب با استفاده از روش ستون معادل که در هر دهانه مجزا دارای دیوار است، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در صورتی که قاب مورد بررسی در روش‌های SFI_MVLEM وMVLEM دارای ستون مشترک میانی باشد و با روش ستون معادل در شرایط یکسان مقایسه شود، سختی روش-های MVLEM و SFI_MVLEM به دلیل تعریف ستون مشترک، نسبت به روش ستون معادل در شرایطی که دیوار به صورت یک دهانه یکپارچه بدون در نظر گرفتن اثر ستون میانی مدل شود بیشتر خواهد بود. به این ترتیب سختی مدل‌های SFI_MVLEM و MVLEM در شرایط داشتن ستون مشترک بیشتر از روش ستون معادل خواهد بود (شکل ۲۲- الف) اما در صورت مدلسازی یکپارچه دیوار و حذف اثر ستون مشترک سختی مدل ستون معادل به روش‌های SFI_MVLEM و MVLEM نزدیک‌تر و حتی بیشتر خواهد بود. همچنن روش ستون معادل همگرایی بهتری نسبت به دو المان SFI_MVLEM و MVLEM دارد.

به منظور بررسی بیشتر توانایی‌های مدل پیشهادی، قاب مورد مطالعه تحت اثر نیروی دینامیکی زلزله در هر سه روش مدلسازی قرار گرفته است. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی در شکل (۲۳) داده شده است.

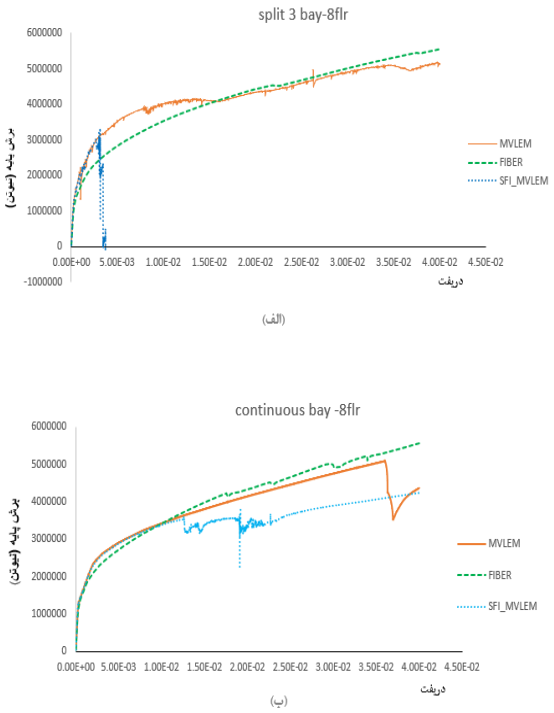


شکل ۲۳- تحلیل قاب مورد مطالعه با شتابنگاشت زلزله

نتایج آنالیز دینامیکی نشان می‌دهد که این ساختمان سه طبقه دریفت بسیار کمی تحت اثر زلزله داشته است. علت این رفتار مقاومت جانبی بالای ساختمان به علت توالی دیوارهای برشی است.

به این ترتیب مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی توانایی قابل قبولی در مدلسازی رفتار ساختمان با دیوار برشی و انجام تحلیل‌های گوناگون را دارد.

نتایج تحلیل قاب ساختمانی ۸ طبقه(شکل ۲۴) نشان می-دهد که مدلسازی تکراری المان‌های مشترک در روش‌های المان SFI_MVLEM و MVLEM باعث افزایش سختی مدل می‌شود. همچنین همانطور که از پیش دیده شده بود، روش ستون‌های معادل همگرایی بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.



شکل ۲۴- مدلسازی یک قاب ۸ طبقه الف_مدلسازی دیوار مجاور هم با داشتن المان مرزی مشترک بین دیوارها ب- مدلسازی دیوار به صورت یک دهانه پیوسته بدون المان مرزی مشترک

۷-نتیجه‌گیری

در نرم افزار اپنسیس برای تحلیل دیوار برشی بتن مسلح از المان MVLEM استفاده می‌شود. هندسه دیوار برشی به صورت کلی یک هندسه ی دمبلی شکل است که وسط جان دیوار و در دو سوی آن المان‌های مرزی قرار دارند. روش MVLEMاندرکنش نیروی برشی و لنگر خمشی را نمی-تواند در نظر بگیرد. برای رفع این مشکل، المان SFI_MVLEM معرف شده است.

به منظور تأمین مقاومت جانبی و یا کاهش دریفت و یا الزامات معماری، در برخی از ساختمان‌ها دیوارهای برشی در دهانه های متوالی اجرا می شود و دیوارهای مجاور هم به وجود می‌آید. ساخت مدل این دیوارها در نرم افزار اپنسیس با استفاده ازروش‌های MVLEM و SFI-MVLEM با دشواری مواجه است. در صورتی که دارای دهانه مجاور باشد، استفاده از این المان‌های برای مدلسازی در هر دهانه به دلیل ستون مشترک میانی، المان مرزی مشترک دو بار مدل شود و به این ترتیب همانطور که دیده شد باعث افزایش سختی مدل می‌شود. برای مدلسازی رفتار دیوار برشی یک شیوه‌ی جایگزین به وسیله مش بندی هر قطعه از دیوار با مقاطع فایبر است. در روش ستون‌های معادل در هر ناحیه از دیوار یک ستون تعریف می‌شود و آن ستون با توجه به مشخصات ضخامت و طول دیوار در قسمت‌های المان‌های مرزی و جان دیوار که آن ناحیه از دیوار با آن مدلسازی می‌شود، تعریف خواهد شد. روش‌هایی مانند المان MVLEM در قسمت میانی دیوار (ناحیه‌ی جان) را با چند المان مدل‌سازی می‌کنند. فلسفه مش بندی جان دیوار در روش MVLEM و روش ستون معادل این است که برای بالا بردن دقت توزیع تغییر شکل‌های سطح دیوار است. زیرا، اگرجان دیوار با یک المان تک ستونی معادل‌سازی شود، ویژگی‌های مهم رفتار آزمایشگاهی از جمله تغییر محور خنثی سطح مقطع دیوار را نمی‌تواند در نظر بگیرد. در این شرایط با توجه به مساحت بزرگ جان و ناچیز بودن تغییر طول محوری، تغییر محور خنثی سطح مقطع دیوار وارد محاسبات نمی‌شود. این ضعف در روش پیشنهادی نیز وجود دارد. بدین معنا که روش ستون‌های معادل نمی‌تواند توزیع تغییر شکل‌های واقعی دیوار را به خوبی مدل کند، اما روند مدلسازی در هر دهانه مجاور هم دیوار و تعریف ستون میانی را دقیق‌تر کرده و سرعت تحلیل و میزان همگرایی مدل را افزایش می دهد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت شرکت پالایش گاز بیدبلند بهبهان به شماره قرارداد ۳۹۵۲۵۰ انجام شده است. به این وسیله از ایشان تشکر می‌شود.

مراجع

[1] S. Aaleti, “Behavior of Rectangular Concrete Walls Subjected to Simulated Seismic Loading”, Graduate Theses and Dissertations, 2009.

[2] S. L. Wood, J. K. Wight and J. P.Moehle, “The 1985 Chile earthquake: observations on earthquake-resistant construction in Viña del Ma”, University of Illinois Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1987.

[3] L. A.Wyllie Jr, and J. R. Filson, “Armenia earthquake: reconnaissance report”, Earthquake Spectra, 1989.

[4] T. Holden, J. Restrepo and J. B. Mander, “Seismic performance of precast reinforced and prestressed concrete walls”, Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 3, pp.286-296, 2003.

[5] D. J. Thomas, “Analysis and validation of a seismic design method proposed for precast jointed wall systems”, (Doctoral dissertation, Iowa State University), 2003.

[6] K. Kolozvari, J. Wallace, C. Arteta, M. Fischinger, S. Gavridou, M. Hube and J. Vásquez, “Comparative Study of State-of-the-Art Macroscopic Models for Planar Reinforced Concrete Walls”, ACI Structural Journal, Vol. 115, No. 6, pp.1637-1657, 2018.

[7] K. Orakcal, L. M. M. Sanchez, and J. W. Wallace, “Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2006 .

[8] T. Kabeyasawa, H. Shiohara, S.Otani and H. Aoyama, “Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure”, Journal of the Faculty of Engineering,Vol. 37, No. 2, pp. 431-478, 1983.

[9] A. Vulcano, V. V. Bertero and V. Colotti, “Analytical modeling of RC structural walls”, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6, pp. 41-6, 1988.

[10] K.Orakcal, “Nonlinear modeling and analysis of slender reinforced concrete walls”, University of california, Los Angeles, 2004.

[11] F. McKenna, G. L. Fenves, B. Jeremic and M. H. Scott, “Open system for earthquake engineering simulation”, 2015, URL http://opensees. berkeley. edu.

[12] L.M. Massone, K. Orakcal and J. W. Wallace, “Shear-flexure interaction for structural walls”, Special Publication, Vol. 236, pp.127-150, 2006.

[۱۳] غلامرضا قدرتی امیری، علی رضویان امرئی و وحید شیخی ،" بررسی رفتار کاهنده چرخه هیسترزیس در تحلیل های غیرخطی (پوش اور) برای قاب های بتنی خمشی ویژه با دیوار برشی"، مدلسازی در مهندسی, دوره ۱۰ ، شماره۳۰، ۱۳۹۱، صفحه ۳۳-۴۱.