

اثر خروج از محوری تیرهمبند بر رفتار و ظرفیت دیوار برشی بتن مسلح در ساختمان‌های با سیستم لرزه‌بر دوگانه

عباسعلی تسنیمی، استاد گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
آصف بهاری‌بندری، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

به دلیل وجود بازشوهای منظم ناشی از درب‌ها و پنجره‌ها در دیواربرشی، این دیوارها اغلب به دو یا سه دیوار جداگانه تفکیک شده که به وسیله تیرهای همبند به یکدیگر متصل می‌شوند. هنگام رخداد یک زلزله شدید، اگر تیرهای همبند بسیار مقاوم و سخت باشند، ممکن است دیوارها به علت نیروهای محوری و لنگرهای خمشی اعمالی دچار گسیختگی شوند و برعکس اگر تیرها خیلی ضعیف باشند، احتمال اینکه خیلی زود و قبل از اینکه رفتار دیوارها وارد محدوده خمیری شوند، گسیخته شده و فروریزند. هر یک از این پدیده‌ها اثر نامطلوبی بر روی عملکرد کل سازه خواهد گذاشت. آگاهی از عملکرد تیرهای همبند و دیوارها در حین زلزله و درک رفتار غیرخطی آنها به طراحی مطلوب این اعضا کمک می‌کند.

تاکنون تحقیقات قابل توجهی در زمینه رفتار غیرخطی و نحوه گسیختگی دیوارهای برشی کوپل، تیرهای همبند و نیز اثر رفتار غیرخطی تیرهای همبند روی عملکرد سازه‌ای ساختمان‌های دارای دیوار برشی کوپل صورت گرفته و نشان داده شده است که رفتار تیرهای همبند عمیق با رفتار تیرهای معمولی متفاوت است [۱-۷]. مطالعات عددی بر روی تیرهای همبند با استفاده از مدل‌سازی‌های مختلف مانند محیط برشی پیوسته معادل، المان‌های تیرگسسته با بازوهای صلب افقی، المان‌های تنش سطح برای تیر و اتصال آنها و المان‌های ناحیه انتقالی مدل‌سازی شده‌اند [۸-۱۲]. مطالعات مربوط به مودگسیختگی تیرهای همبند و بررسی رفتار خمشی آنها نشان داده است که رفتار آنها قبل از ترک خوردگی مشابه رفتار تیر معمولی است و بعد از

این مقاله با رویکرد ترویجی، موضوع اثر خروج از محوری تیرهای همبند را در دیوارهای برشی بتن مسلح که برای فرآیند طراحی و مراحل اجرا قابل توجه و حائز اهمیت است، به اختصار تشریح می‌کند. این موضوع بر روی بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی کوپل متمرکز است. برای این منظور دیوار برشی کوپل از ساختمان هشت طبقه برای نیروی جانبی مطابق استاندارد ۲۸۰۰ به وسیله نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی و بر مبنای آیین‌نامه ACI-318 طراحی شده است. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS دیوار در شرایط مختلف خروج از محوری تیرهمبند نسبت به محور دیوار تحت تحلیل استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی برای زلزله‌های بم، رودبار و طیس قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که لنگرهای خمشی و نیروی برشی خارج از صفحه دیوار در اثر خروج از محوری تیر نسبت به دیوار افزایش می‌یابند و تغییرات مقادیر حداکثر آنها نسبت به خروج از محوری دارای الگوی منظمی است و در برخی موارد این نیروها در مقایسه با مقاومت دیوار قابل توجه هستند. همچنین تغییر چندانی در حداکثر جابه‌جایی‌های داخل صفحه دیوار در اثر خروج از محوری ایجاد نمی‌شود اما از ظرفیت برشی دیوار ۲۰٪ تا ۳۰٪ کاسته می‌شود.

کلیدواژه‌ها: دیوار برشی کوپل، تیر همبند، تحلیل غیر خطی، خروج از محور

۱- مقدمه

دیوارهای برشی معمولاً در سازه‌های بلند برای ایجاد مقاومت در برابر بارهای جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خطی شده و با به دست آمدن نیروهای اعضا دیوارهای آن طراحی شد. با تغییر مقدار خروج از محوری تیرهمبند نسبت به دیوار و استفاده از نرم افزار ABAQUS [۱۸] تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بر روی آنها انجام شد. طول دیوارهای کوپل ۶ متر شامل دو دیوار ۲ متری در طرفین و یک تیر همبند ۲ متری به عمق ۶۰ cm در بین آنها است. ضخامت دیوار و کلیه تیرها ثابت و برابر با ۳۰ cm در نظر گرفته شد. برای بارگذاری زلزله نیز از استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده شده است. بار ثقلی در نظر گرفته شده برای طراحی سازه معادل ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمربع برای بار مرده و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع برای بار زنده بر طبق میحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۹] منظور شده است. پس از انجام تحلیل مقاطع تیرها، ستون‌ها و دیوارها برای بحرانی‌ترین حالت بارگذاری طراحی شدند. لازم به ذکر است که تیرها با میلگردگذاری معمولی برشی و خمشی و طبق ضوابط آیین‌نامه ACI-318 [۲۰] مسلح شده‌اند. همچنین برای دیوارها از میلگردهای خمشی متمرکز در ناحیه مرزی در دو انتها و از میلگردهای یکنواخت در ناحیه میانی استفاده شده است. در جدول (۱)، خلاصه نتایج طراحی اولیه آورده شده است.

۳- تحلیل غیر خطی در نرم افزار ABAQUS

دیوار برشی طراحی شده به صورت سه بعدی در نرم افزار ABAQUS با استفاده از المان‌های سه بعدی SHELL و برای تیرهای همبند از المان‌های محیط پیوسته SOLID و برای اتصال المان‌های تیر و دیوار از قابلیت زوج سازی (SHELL TO SOLID COUPLING) در نرم افزار استفاده شد.

جدول (۱): مشخصات ساختمان مورد مطالعه.

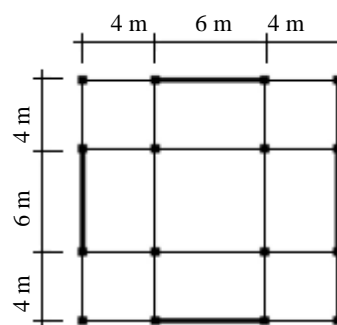
ارتفاع $H(m)$	وزن کل $W(ton)$	ضریب اهمیت (I)	ضریب رفتار (R)	ضریب خطر نسبی (A)
۲۴	۱۴۸۳	۱	۸	۰/۳
زمان تناوب	ضریب نیروی		برش پایه	برش پایه هر دیوار
$T(sec)$	C		$V_s(ton)$	$V_w(ton)$
۰/۶۷	۰/۰۷۶۸		۱۱۳/۸	۳۹/۵
مقاومت نهایی میلگردها	مقاومت جاری شدگی میلگردها	مدول ارتجاعی بتن	مقاومت مشخصه بتن	
$f_{us}(MPa)$	$f_{ys}(MPa)$	$E_c(MPa)$	$f'_c(MPa)$	
۶۰۰	۴۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰	

ترک خوردگی مشابه یک خرپا با اعضای فشاری قطری است. رفتار غیرخطی تیرهمبند وابسته به شرایط مرزی، آرایش میلگردها، الگوی ترک خوردگی، و اندرکنش بین بتن و فولاد است [۱۳-۱۵].

نکته اصلی این مقاله مربوط به برخی از موارد اجرایی، یا نیازهای معماری است، که ممکن است به دلایلی تیر همبند به صورت غیر هم محور با دیوار برشی اجرا شود. لازم به یادآوری است که تحقیقی که تاکنون در زمینه اثر خروج از محوری انجام شده مربوط به خروج از محوری دیوار بر روی رفتار سازه بوده است [۱۶]. با عنایت به تعداد تیرهای همبند در دیوارهای برشی کوپل، اثر خروج از محوری آنها حائز اهمیت بوده و باید مورد توجه قرار گیرد. در اثر ایجاد خروج از محوری به دلیل جابه جایی نقطه اثر برآیند نیروی محوری و نیروی برشی تیر به ترتیب نسبت به محل مرکز سطح و مرکز برش مقطع لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار و لنگر پیچشی در دو انتهای تیر همبند تولید می شود و این لنگرها به دیوار نیز منتقل شده و باعث ایجاد لنگرهای خمشی خارج از صفحه در دیوار برشی شده و در نتیجه به لنگر خمشی داخل صفحه دیوار در حالت بدون خروج از محوری اضافه می شود و در نهایت مقطع دیوار تحت خمش سه محوره قرار می گیرد.

۲- طرح اولیه مدل و نحوه انجام تحلیل

یک ساختمان منظم هشت طبقه واقع در منطقه با خطر نسبی زیاد و خاک نوع II مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۷] و پلان شکل (۱) به وسیله نرم افزار ETABS، تحلیل



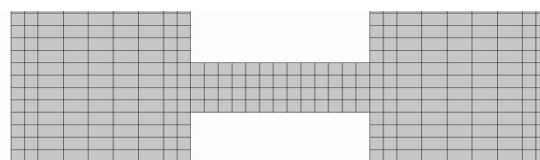
شکل (۱): پلان سازه‌های مورد مطالعه.

محوری تیر نسبت به دیوار می‌تواند موارد زیر را بر رفتار و پاسخ خارج از دیوار تحمیل کند:

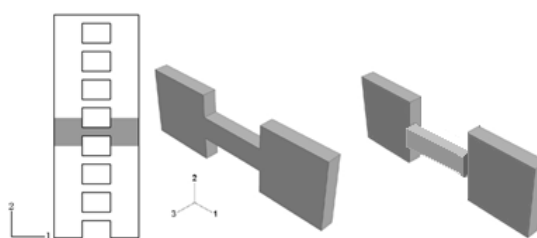
- ۱- نیروی برشی دیوار در جهت عمود بر صفحه دیوار؛
- ۲- نیروی خارج از صفحه دیوار؛
- ۳- لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار ناشی از خمش خارج از صفحه تیرهمبند؛
- ۴- لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار ناشی از پیچش تیرهمبند؛

یادآوری این نکته ضروری است که صحت روش مدلسازی با انجام مدلسازی و تحلیل دو نمونه آزمایشگاهی در دو مرجع [۳] و [۲۱] بررسی و تأیید شده است و برای پرهیز از طولانی شدن مطلب و عدم تجانس مطالب تحقیقی با مطالب ترویجی از ذکر آنها خودداری شده و به مرجع [۲۲] ارجاع داده می‌شود. شکل (۳-الف) نمودارهای بار-تغییر مکان نسبی یا منحنی ظرفیت دیوارهای برشی را برای حالات مختلف خروج از محوری تیر نسبت به محور دیوار نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت شبه استاتیکی و با استفاده از روش صریح در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد و علت ناهموار بودن بخش‌هایی از منحنی‌های ظرفیت، استفاده از مدل پلاستیسیته خسارت برای مدلسازی بتن می‌باشد. به‌طور کلی بر روی نمودار ظرفیت چهار قسمت قابل تشخیص است که به ترتیب عبارتند از ناحیه جاری‌شدگی، حداکثر ظرفیت، ناحیه خمیری و جابه‌جایی نهایی. با توجه به نمودار ظرفیت و جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش خروج از محوری تیرهمبند، از ظرفیت نهایی دیوار کاسته می‌شود به طوری که در خروج از محوری $3/33\%$ بیشترین کاهش ظرفیت در حدود ۱۲ درصد است. اما با افزایش خروج از محوری از $3/33\%$ به 50% اندکی مقدار کاهش کمتر می‌شود. اما همچنان ظرفیت دیوار از حالت بدون خروج از محوری کمتر است. نمودارهای نیروی بر صفحه دیوار (خارج

برای مدلسازی میلگردها ابتدا هر کدام از آنها به وسیله المان تیر مدل شده و سپس با استفاده از قابلیت جاسازی المان (EMBEDDED ELEMENT) در نرم‌افزار در محل‌های مربوطه در داخل بتن جاسازی شد. ابعاد المان‌های تیرهمبند ۱۵ سانتیمتر و المان‌های دیوار در ناحیه مرزی ۱۵ سانتیمتر و در سایر نواحی ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. شکل (۲) نحوه مش‌بندی مدل را نشان می‌دهد. برای مدلسازی رفتار غیرخطی بتن و میلگردها به ترتیب از مدل پلاستیسیته خسارت مدل ساده شده سه خطی استفاده شد. مدل مورد نظر برای حالت‌های مختلف خروج از محوری تیر نسبت به دیوار تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی و با استفاده از شتاب نگاشت‌های زلزله‌های بم، رودبار و طبس تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت.



الف- المان بندی



ب- نمای سه‌بعدی تیرهمبند و بخشی از دیوار

شکل (۲): نمای سه‌بعدی و نحوه المان‌بندی تیرهمبند و دیوار.

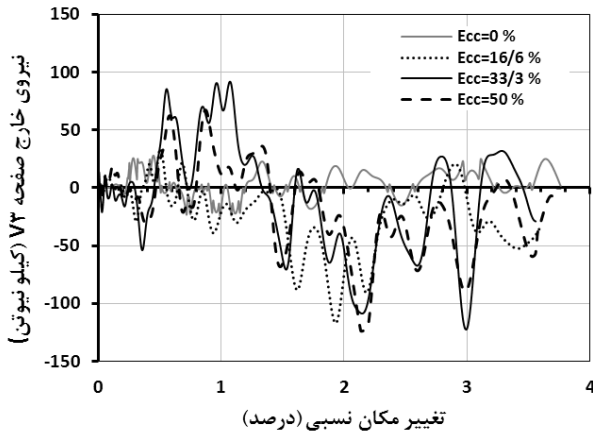
۴- نتایج تحلیل غیر خطی

۴-۱- استاتیکی غیر خطی

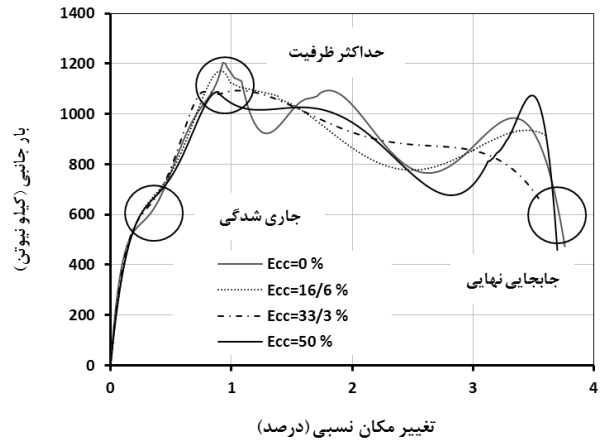
دیوار برشی کوپل برای چهار حالت خروج از محوری صفر، $7/16\%$ ، $3/33\%$ و 50% تحلیل شدند. خروج از

جدول (۲): ظرفیت دیوار برشی برای مقادیر مختلف خروج از محوری تیرهمبند.

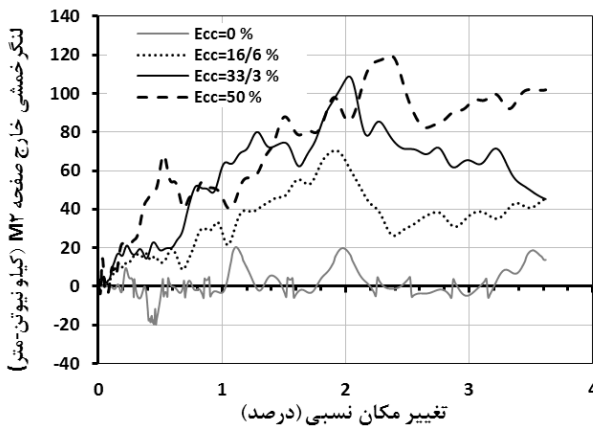
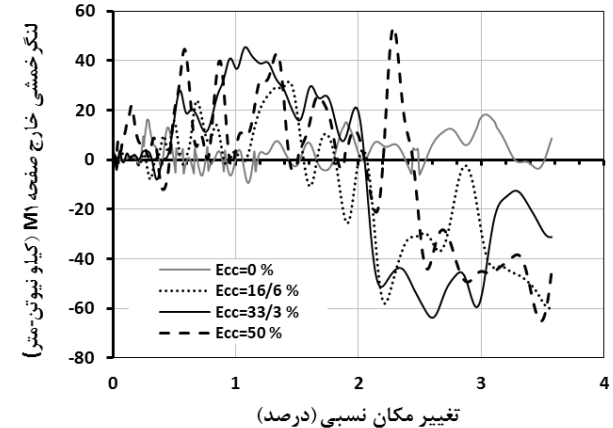
خروج از محوری (درصد)	برش پایه		حداکثر نیروی خارج صفحه		مقادیر حداکثر لنگر M_1		مقادیر حداکثر لنگر M_2	
	نسبت	مقدار (kN)	نسبت	مقدار (kN)	نسبت	مقدار (kN-m)	نسبت	مقدار (kN-m)
۰	۱	۱۲۹۳/۴	۱	۲۷/۸	۱	۱۸/۴	۱	۲۰/۳
۱۶/۷	۰/۹۵	۱۲۳۴/۸	۴/۲	۱۱۶/۸	۳/۳	۶۰/۰	۳/۵	۷۰/۵
۳۳/۳	۰/۸۸	۱۱۴۰/۹	۴/۴	۱۲۲/۳	۳/۵	۶۳/۸	۵/۴	۱۰۸/۹
۵۰	۰/۹۲	۱۱۸۴/۴	۴/۵	۱۲۳/۸	۳/۵	۶۵/۱	۵/۹	۱۱۹/۷



ب- منحنی تغییرات نیروی خارج از صفحه- تغییر مکان نسبی



الف- نمودار بار- تغییر مکان نسبی دیوار

د- منحنی تغییرات لنگر خمشی خارج از صفحه (M_1) - تغییر مکان نسبیج- منحنی تغییرات لنگر خمشی خارج از صفحه (M_1) - تغییر مکان نسبی

شکل (۳): رفتار دیوار برشی تحت اثر خروج از محوریت تیرهمبند نسبت به دیوار برشی.

به 60 kN-m می‌رسد. با افزایش خروج از محوری تیر از $16/7$ درصد به $33/3$ یعنی با دو برابر شدن خروج از محوری مقدار این لنگر تغییر چندانی نکرده و به $63/8 \text{ kN-m}$ می‌رسد و در خروج از محوری 50 درصد مقدار حداکثر این لنگر به 65 kN-m افزایش می‌یابد. همچنین نمودارهای لنگر خمشی در پای دیوار M_1 ناشی از خمش خارج از صفحه تیرهمبند در مقابل تغییر مکان نسبی در شکل (۳-د) ارائه شده است. با بررسی این نمودارها و مقادیر حداکثر این لنگر در جدول (۲) ملاحظه می‌شود که در حالت بدون خروج از محوری مقدار این لنگر اندک بوده و حداکثر آن از $20/3 \text{ kN-m}$ تجاوز نمی‌کند. اما با افزایش خروج از محوری تیر نسبت به دیوار مقدار حداکثر این لنگر در خروج از محوری $16/7$ درصد حدود 70 kN-m و در خروج از محوری $33/3$ درصد معادل 109 kN-m و در خروج از محوری 50 درصد به حدود 120 kN-m افزایش می‌یابد.

از صفحه) در مقابل تغییر مکان نسبی برای حالت‌های مختلف خروج از محوری تیرهمبند در شکل (۳-ب) آورده شده است. با بررسی و مقایسه این منحنی‌ها و مقادیر جدول (۲) مشخص می‌شود که با افزایش مقدار خروج از محوری دیوار مقدار حداکثر عکس‌العمل نیروی خارج از صفحه به‌طور قابل توجهی تا حدود چهار برابر افزایش می‌یابد. به نحوی که برای خروج از محوری تیر از $16/7$ تا 50 درصد از $4/2$ تا $4/5$ برابر افزایش می‌یابد. نمودارهای لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار M_1 در پای دیوار که از پیش تیرهمبند بوجود می‌آید، در مقابل تغییر مکان نسبی دیوار ترسیم شده و در شکل (۳-ج) ارائه شده است. با بررسی این نمودارها و مقادیر حداکثر این لنگر مندرج در جدول (۲) مشخص می‌شود که حداکثر مقدار این لنگر در حالت بدون خروج از محوری $18/4 \text{ kN-m}$ بوده که با افزایش خروج از محوری تیر به $16/7$ درصد مقدار این لنگر بیش از سه برابر شده و

۴-۲- دینامیکی غیر خطی

کلیه نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی شامل تاریخچه پاسخ ظرفیت، تاریخچه پاسخ نیروی خارج از صفحه، و تاریخچه پاسخ لنگرهای خارج از صفحه دیوار به‌منظور جلوگیری از حجیم شدن مقاله و رعایت تناسب مطالب با اهداف ترویجی، در این جا آورده نمی‌شود. از این‌رو، به‌طور اجمال حداکثر پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل دینامیکی تحت زلزله‌های سه‌گانه بم، رودبار و طبس و حالات خروج از محوری تیرهمبند نسبت به دیوار در شکل (۴-الف تا د) ارائه شده است. در جدول (۳)، برای زلزله‌های بم، طبس و رودبار مقدار و نسبت حداکثر برش پایه تحمل شده توسط دیوار، حداکثر برش پایه خارج از صفحه دیوار، لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار (M_1) ناشی از پیچش تیرهمبند و لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار (M_2) ناشی از خمش خارج از صفحه تیرهای همبند برای خروج از محوری‌های مختلف آورده شده‌است. با توجه به این جدول و شکل (۴-الف) که تغییرات حداکثر برش پایه تحمل شده توسط دیوار نسبت به خروج از محوری را نشان می‌دهد، چنین نتیجه می‌شود که عموماً با ایجاد خروج از محوری تیر نسبت به دیوار از ظرفیت برش پایه دیوار کاسته خواهد شد. چنانچه ملاحظه می‌شود در هر سه زلزله با افزایش خروج از محوری ظرفیت دیوار همچنان کاهش می‌یابد. این کاهش ظرفیت در زلزله بم، رودبار و طبس آهنگ مشابهی دارد و همان‌طور که جدول آمده است، میانگین کاهش ۲۳٪ برای خروج از محوری ۱۶/۷٪، ۲۴٪ برای خروج از محوری ۳۳٪ و ۳۲٪ برای خروج از محوری ۵۰٪ بوده است. همچنین با توجه به جدول (۳) و شکل (۴-ب) که تغییرات حداکثر برش پایه خارج از صفحه را نسبت به خروج از محوری نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که همواره با افزایش خروج از محوری از صفر تا ۳۳/۳٪ حداکثر برش پایه خارج از صفحه افزایش می‌یابد، اما از ۳۳/۳ تا ۵۰٪ مقدار آن کاسته می‌شود. با این وجود مقدار حداکثر آن در خروج از محوری ۵۰٪ از حالت بدون خروج از محوری بیشتر است.

نمودارهای لنگر خمشی خارج از صفحه دیوار (M_1) که

ناشی از پیچش تیرهای همبند است در شکل (۴-ج) و مقادیر آنها در جدول (۳) ارائه شده‌است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که همواره با ایجاد خروج از محوری در دیوار لنگر خمشی خارج از صفحه افزایش می‌یابد و برای سه زلزله مشابه و از نظر مقادیر به هم نزدیک است. حداکثر این لنگر غالباً در بیشترین خروج از محوری یعنی ۵۰٪ اتفاق می‌افتد. بیشترین افزایش لنگر در زلزله بم با ۱/۹۴ برابر نسبت به حالت بدون خروج از محوری و کمترین افزایش در همین زلزله خروج از محوری ۱۶/۷٪ برابر بیشتر از حالت بدون خروج از محوری افتاده است. میانگین این افزایش از ۵۹٪ تا ۹۹٪ به ترتیب برای خروج از محوری ۱۶/۷٪ و ۳۳٪ بوده است.

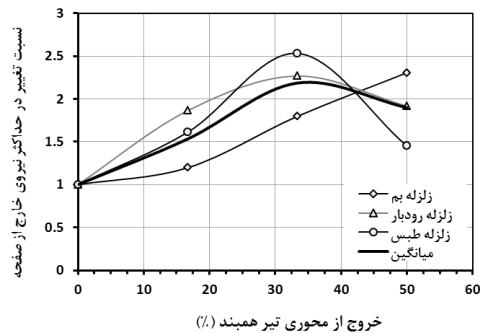
منحنی‌های پاسخ لنگر خمشی خارج از صفحه (M_2) دیوار که ناشی از خمش خارج از صفحه تیرهای همبند است در شکل (۴-د) و مقدار آنها در جدول فوق نشان می‌دهد که همواره با افزایش خروج از محوری مقدار حداکثر این لنگر افزایش می‌یابد. حداکثر این لنگر همواره در بیشترین خروج از محوری یعنی ۵۰٪ اتفاق می‌افتد. بیشترین افزایش لنگر در زلزله بم با ۲/۷۴ برابر نسبت به حالت بدون خروج از محوری و کمترین افزایش در زلزله رودبار و خروج از محوری ۱۶/۷٪ دو درصد بیشتر نسبت به حالت بدون خروج از محوری اتفاق افتاده است. میانگین این افزایش از ۲۱٪ تا حدود دوبرابر به ترتیب برای کمترین و بیشترین خروج از محوری بوده است.

در هر یک از این نمودارها، منحنی میانگین آنها بر مبنای نسبت ارقام آخرین ستون جدول (۳) ترسیم شده است. با استفاده از برازش خطی منحنی‌های میانگین، رابطه (۱) استخراج شده است که با بکارگیری آن می‌توان برای هر مقدار از خروج از محوری تیر همبند نسبت به دیوار برشی، هر یک از ظرفیت‌های اصلی (برش پایه، نیروی خارج از صفحه و لنگرهای خمشی خارج از صفحه دیوار (M_1 و M_2)) را به‌دست آورد. در این رابطه F نسبت جدید هر یک از ظرفیت‌ها به مقدار نظیر درون صفحه، α ضریب کاهش یا افزایش، E مقدار خروج از محوری تیر همبند نسبت به محور دیوار (درصد) می‌باشد.

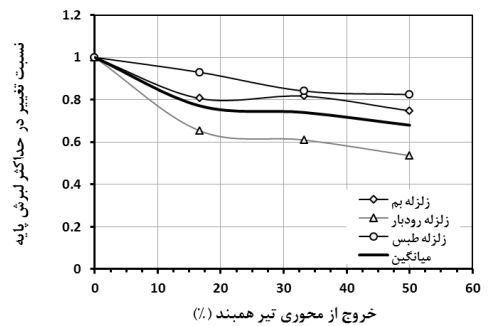
$$F = \alpha E \quad (1)$$

جدول (۳): حداکثر پاسخ‌های دیوار در تحلیل دینامیکی برای خروج از محوری مختلف تیرهمبند.

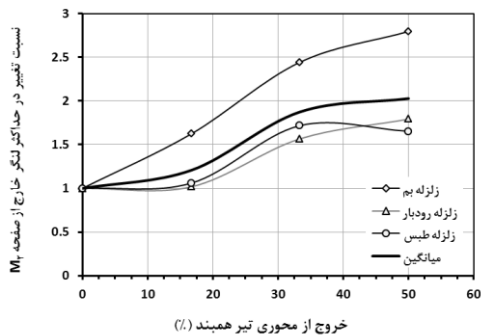
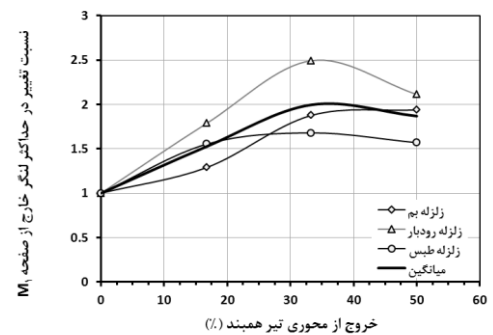
مقدار خروج از محوری		زلزله بم		زلزله طیس		زلزله رودبار		میانگین سه زلزله	
نسبت	مقدار	نسبت	مقدار	نسبت	مقدار	نسبت	مقدار	نسبت	مقدار
برش پایه درون صفحه دیوار (kN)									
صفر درصد	۱۹۵۰	۱	۱۰۱۲/۷	۱	۱۹۵۰	۱	۱۶۴۰/۶	۱	۱۶۴۰/۶
۱۶/۷ درصد	۱۵۷۱/۸	۰/۸۱	۹۴۹/۸	۰/۹۴	۱۲۷۴	۰/۶۵	۱۲۶۵/۲	۰/۷۷	۱۲۶۵/۲
۳۳/۳ درصد	۱۵۹۳/۸	۰/۸۲	۸۵۹/۳	۱/۸۵	۱۱۸۹/۵	۰/۶۱	۱۲۱۴/۲	۰/۷۴	۱۲۱۴/۲
۵۰ درصد	۱۴۵۸/۶	۰/۷۵	۸۴۲/۶	۰/۸۳	۱۰۴۶/۳	۰/۵۴	۱۱۱۵/۸	۰/۶۸	۱۱۱۵/۸
نیروی خارج از صفحه دیوار (kN)									
صفر درصد	۱۴۱/۴	۱	۱۳۲/۵	۱	۱۱۲/۷	۱	۱۲۸/۹	۱	۱۲۸/۹
۱۶/۷ درصد	۱۶۹/۳	۱/۲۰	۲۱۳/۶	۱/۶۱	۲۱۰/۰	۱/۸۶	۱۹۷/۶	۱/۵۳	۱۹۷/۶
۳۳/۳ درصد	۲۵۳/۹	۱/۸۰	۳۳۵/۴	۲/۵۳	۲۵۵/۵	۲/۲۷	۲۸۱/۶	۲/۱۸	۲۸۱/۶
۵۰ درصد	۳۲۶/۱	۲/۳۱	۱۹۲/۱	۱/۴۵	۲۱۵/۸	۱/۹۲	۲۴۴/۷	۱/۹۰	۲۴۴/۷
لنگر خمشی M_1 دیوار (kN-m)									
صفر درصد	۵۷/۴	۱	۵۱/۷	۱	۴۶/۸	۱	۵۲/۰	۱	۵۲/۰
۱۶/۷ درصد	۷۳/۹	۱/۲۹	۸۰/۲	۱/۵۷	۸۳/۵	۱/۷۸	۷۹/۲	۱/۵۲	۷۹/۲
۳۳/۳ درصد	۱۰۷/۶	۱/۸۸	۸۶/۸	۱/۶۸	۱۱۶/۶	۲/۴۹	۱۰۳/۶	۱/۹۹	۱۰۳/۶
۵۰ درصد	۱۱۱/۲	۱/۹۴	۸۱/۱	۱/۵۷	۹۸/۸	۲/۱۱	۹۷/۰	۱/۸۷	۹۷/۰
لنگر خمشی M_2 دیوار (kN-m)									
صفر درصد	۴۵/۵	۱	۵۸/۲	۱	۵۲/۶	۱	۵۱/۸	۱	۵۱/۸
۱۶/۷ درصد	۷۲/۴	۱/۵۹	۶۱/۷	۱/۰۶	۵۳/۶	۱/۰۲	۶۲/۶	۱/۲۱	۶۲/۶
۳۳/۳ درصد	۱۰۸/۸	۲/۳۹	۱۰۰/۰	۱/۷۲	۸۲/۴	۱/۵۷	۹۷/۱	۱/۸۸	۹۷/۱
۵۰ درصد	۱۲۴/۵	۲/۷۴	۹۶/۳	۱/۶۶	۹۴/۴	۱/۸۰	۱۰۵/۰	۲/۰۳	۱۰۵/۰



ب- منحنی نسبت تغییرات حداکثر نیروی خارج از صفحه



الف- نمودار نسبت تغییرات حداکثر برش پایه

د- منحنی نسبت تغییرات حداکثر لنگر خمشی خارج از صفحه (M_1) ناشی از خمش خارج از صفحه تیر همبندج- منحنی نسبت تغییرات لنگر خمشی خارج از صفحه (M_2) ناشی از پیچش تیر همبند

شکل (۴): حداکثر پاسخ دیوار برشی تحت اثر خروج از محوری تیر همبند در تحلیل دینامیکی.

متوسط حدود ۲۵٪ ظرفیت برشی درون صفحه دیوار بوده است. بنابراین لازم است مقاومت دیوار در جهت عمود بر صفحه آن کنترل شود.

۵-۲- خمش خارج از صفحه دیوار در اثر پیچش انتهای تیرهمبند

خروج از محوری تیرهمبند نسبت به دیوار موجب می‌شود تا نیروی برشی در انتهای تیر ایجاد لنگر پیچشی اضافی نماید که این لنگر باعث خمش خارج از صفحه دیوار (M_1) می‌شود. الگوی تغییرات حداکثر این لنگر هم در تحلیل استاتیکی و هم دینامیکی غیرخطی تا حدودی مشابه است. جدول (۴) تغییرات مقدار این لنگر بر حسب درصدی از مقاومت خمشی داخل صفحه دیوار در حالت بدون خروج از محوری را برای خروج از محوری مختلف ارائه کرده است. در حالت دینامیکی این مقدار برای سه زلزله متوسط‌گیری شده است. از جدول فوق می‌توان مقدار لنگر لازم برای کنترل مقاومت خمشی خارج از صفحه دیوار را به دست آورد.

۵-۳- خمش خارج از صفحه دیوار در اثر نیروی محوری تیرهمبند

از دیگر آثار خروج از محوری تیرهمبند این است که در آن یک نیروی محوری ایجاد می‌شود و این نیرو یک لنگر خمشی خارج از صفحه (M_2) به دیوار تحمیل می‌کند. الگوی تغییرات حداکثر این لنگر چه در تحلیل استاتیکی غیرخطی و چه در تحلیل دینامیکی غیرخطی کاملاً مشابه بوده به طوری که با افزایش خروج از محوری مقدار آن همواره افزایش یافته و در خروج از محوری ۵۰٪ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در جدول (۵)، مقدار نسبت این لنگر به مقاومت خمشی درون صفحه دیوار برای خروج از محوری تیرهمبند آورده شده است. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی این مقدار برای سه زلزله متوسط‌گیری شده است. با توجه به موارد فوق وجود خروج از محوری تیرهمبند این لنگر را نیز به دیوار تحمیل می‌کند و سرانجام ظرفیت آن را کاهش می‌دهد.

جدول (۴): ضریب کاهش یا افزایش برای محاسبه F در تحلیل دینامیکی غیرخطی.

R^2	α	F
۰/۸	-۰/۰۱	برش پایه درون صفحه
۰/۷	۰/۰۲۴	نیروی خارج از صفحه
۰/۸	۰/۰۲۱۶	لنگر خمشی M_1
۰/۹	۰/۰۲۱۹	لنگر خمشی M_2

لازم به ذکر است که مقدار خروج از محوری ۵۰٪ بسیار زیاد تلقی می‌شود و برای اخذ تصمیم باید در ترکیب با نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی که ذیلاً به آن اشاره می‌شود، اقدام نمود.

۵-۴- بررسی کلی پاسخ‌ها

بررسی پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی برای منظور کردن اثر خروج از محوری تیرهمبند نسبت به محور دیوار برشی که در برخی موارد اجرایی یا در ضرورت‌های معماری برای بهسازی لرزه‌ای اجتناب ناپذیر می‌شود، نشان داده است که حداقل چهار عامل مهم که بدان‌ها اشاره رفت تحت تأثیر واقع می‌شوند. بررسی کلی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی کاهش ظرفیت برشی دیوار در خروج از محورهای بررسی شده اختلاف فاحشی ندارند و برای جبران این کاهش ظرفیت دیوار باید یا در فرآیند مدلسازی وضعیت خروج از محوری تیرهمبند در نظر گرفته شود یا در فرآیند طراحی ظرفیت برشی دیوار افزایش داده شود.

۵-۱- نیروی خارج از صفحه دیوار

همچنین نشان داده شد که نیروی خارج از صفحه دیوار در اثر خروج از محوری تیرهمبند افزایش می‌یابد و تغییرات این نیرو در تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی دارای الگوی مشابهی است. مقدار حداکثر این نیرو در تحلیل استاتیکی معادل ۱۰٪ ظرفیت برشی درون صفحه دیوار و در تحلیل دینامیکی به‌طور

3. Dugas, D.G. (2002). Seismic response of diagonally reinforced coupling beams with headed bars, MSc thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University Montreal, Canada.
4. Tassios, T.P., Moretti, M., and Bezas, A. (1996). On the behavior and ductility of R.C. coupling beams of shear walls, *ACI Struct. J.*, **93**(6), 711-720.
5. Galano, L. and Vignoli, A. (2000). Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts, *ACI Struct. J.*, **97**(6), 876-885.
6. Aktan, A.E. and Bertero, V.V. (1984). Seismic response of r/c frame-wall structures, *J. Struct. Eng., ASCE*, **110**(8), 1803-1821.
7. Aristizabal-Ochoa, J.D. (1987). Seismic behavior of slender coupled wall systems, *J. Struct. Eng., ASCE*, **113**(1), 2221-2234.
8. Glu'ck, J. (1973). Elasto-plastic analysis of coupled shear walls, *J. Struct. Div., ASCE*, **99**(ST8), 1743-1760.
9. Nayar, K. and Coull, A.E. (1976). Lastoplastic analysis of coupled shear walls, *J. Struct. Div., ASCE*, **102**(ST9), 1845-1860.
10. Pala, S.O., and Zmen, G. (1995). Effective stiffness of coupling beams in structural walls, *Comput. Struct.*, **54**(5), 925-931.
11. Harries, K.A., Mitchell, D., Redwood, R.G., and Cook, W.D. (1998). Nonlinear seismic response prediction of walls coupled with steel and concrete beams, *Can. J. Civil Eng.*, **25**(5), 803-818.
12. Kim, H.S., Hong, S.M. (1995). Formulation of transition elements for the analysis of coupled wall structures, *Comput. Struct.*, **57**(2), 333-344.
13. Subedi, N.K. (1991). RC-coupled shear wall structures I: analysis of coupling beams, *J. Struct. Eng., ASCE*, **117**(3), 667-680.
14. Subedi, N.K. (1991). RC-coupled shear wall structures II: ultimate strength calculations, *J. Struct. Eng., ASCE*, **117**(3), 681-698.
15. Kotsovos, M.D. and Pavlovic', M.N. (1995). Structural concrete: finite element analysis for limit-state design, London: Thomas Telford.
16. Larry, R. Jimenez (1989). Strengthening of reinforced concrete frame using an eccentric wall, Dissertation for MSc degree, Graduate School, University of Texas at Austin.

جدول (۵): نسبت لنگر خارج از صفحه به ظرفیت خمشی درون صفحه دیوار (درصد).

لنگر خارج از صفحه M_2		لنگر خارج از صفحه M_1		خروج از محوری (درصد)
تحلیل استاتیکی	تحلیل دینامیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل دینامیکی	
۰/۰۷	۰/۰۲۹	۰/۰۶	۰/۰۳	۰
۰/۲۴	۰/۰۳۳	۰/۲	۰/۰۴	۱۶/۷
۰/۴	۰/۰۴۳	۰/۲۳	۰/۰۶	۳۳/۳
۰/۴۲	۰/۰۵۵	۰/۲۳	۰/۰۴	۵۰

۶- نتیجه گیری

در صورت وجود خروج از محوری تیر همبند نسبت به دیوار نتایج زیر به دست آمده که می تواند مورد توجه قرار گیرد:

- ۱- کاهش ظرفیت برشی درون صفحه دیوار، برای جبران آن می توان در فرآیند طراحی ظرفیت برشی دیوار را ۱۰ تا ۱۵٪ افزایش داد.
- ۲- کنترل برش پایه خارج از صفحه دیوار، که در این حالت باید مقاومت برشی دیوار در جهت عمود بر صفحه آن را برای نیروی برشی معادل ۱۰٪ تا ۲۵٪ ظرفیت برشی درون صفحه دیوار کنترل کرد.
- ۳- مقدار لنگر خارج از صفحه دیوار M_1 که از لنگر پیچشی انتهای تیر رابط بوجود می آید، برای ۲۰٪ لنگر خمشی درون صفحه دیوار کنترل شود.
- ۴- نیروی محوری ایجاد شده در تیر همبند، موجب لنگر خمشی خارج از صفحه تیر و در نهایت خمش خارج از صفحه دیوار می شود. مقدار لنگر خارج از صفحه دیوار M_2 در این وضعیت باید برای ۴۰٪ لنگر خمشی درون صفحه دیوار کنترل شود.

۷- مراجع

1. Paulay, T. and Priestley, MJN. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, New York, Wiley.
2. Kwan, A.K.H. and Zhao, Z.Z. (1999). Reinforced concrete coupling beams: their differences from ordinary beams, *Proceedings of 7th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science EPMESC VII, Macao*, **1**, 581-588.

۱۷. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۸۴-۲۸۰۰)، ویرایش ۳، نشریه شماره ض-۲۵۳، چ ۵، تهران.

18. ABAQUS (2000). Theory manual, 6 and 3, Habbit Karlsson & Sorensen, Inc.

۱۹. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۸۲). مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان، چ ۳، تهران.

20. American Concrete Association (ACI) (2002). Building code requirements for reinforced concrete and commentary (ACI 318-02 and ACr 318R-02), Detroit, MI, 353p.

21. Tasnimi, A.A. (2000). Strength and deformation of mid-rise shear walls under load reversal *Engineering Structures*, 22, 311-322.

۲۲. بهاری‌بندری، آصف (۱۳۸۸). رفتار غیرخطی تیرهای همبند بتن مسلح غیرهم‌محور با دیوارهای برشی کوپل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس.

