

بررسی اثرات انعطاف پذیری درون صفحه‌ای سیستم‌های کف بر تقاضای لرزه‌های سازه‌های نامتقارن

حامد ایوانی (نویسنده مسئول)^۱، محمدرضا حبیبی^۲

^۱ عضو هیئت علمی، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران H.eivani@iauksh.ac.ir

^۲ عضو هیئت علمی، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران M.r.habibi@iauksh.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از سقف و کف های نوین صنعتی با توجه به مزایای اقتصادی و قابلیت به کارگیری در دهانه‌های بلند و همچنین سرعت اجرای آن‌ها، در حال توسعه روزافزون در صنعت ساخت و ساز کشور است. با این وجود، چگونگی رفتار این سیستم‌های کف جدید به عنوان دیافراگم لرزه‌ای هنوز در عمل مشخص نشده است و از طرفی طراحی آن‌ها در جامعه مهندسی ایران، عموماً با فرضیات ساده کننده‌ای از قبیل فرض صلبیت کامل دیافراگم لرزه‌ای انجام می‌شود. به عبارت دیگر، فرض صلبیت کامل دیافراگم یکی از فرض‌های اصلی است که با توجه به سادگی کاربرد آن به طور گسترده در رویه‌های متداول طراحی در دفاتر مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، تعیین دقیق میزان انعطاف پذیری دیافراگم سقف، اغلب بدون مدل‌سازی دقیق اجزای محدود، که بسیار وقت گیر و دارای هزینه محاسباتی بالا است، امکان پذیر نیست. بنابراین همواره این امکان وجود دارد که دیافراگم‌های به ظاهر صلب بر اساس ضوابط تجویزی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، درجاتی از انعطاف پذیری درون صفحه‌ای را در زلزله‌ها تجربه کنند. از آنجاکه انعطاف پذیری دیافراگم دارای عدم قطعیت بیشتری در سازه‌های نامتقارن در پلان است، این تحقیق به بررسی اثرات ناشی از انعطاف پذیری احتمالی دیافراگم‌ها بر تقاضای المان‌های باربر جانبی ساختمان‌های مقید پیچشی می‌پردازد. نشان داده شده است که علاوه بر اثرات انعطاف پذیری دیافراگم که در پیشینه پژوهش به آن‌ها اشاره شده، وجود المان‌های عرضی در طی فرآیند طراحی سازه‌های با دیافراگم صلب و کاهش سریع قابلیت جذب نیرو در این المان‌ها در اثر انعطاف پذیری جزئی دیافراگم، همچنین می‌تواند به عنوان یک منبع مهم خطا در برآورد تقاضای المان‌های باربر جانبی سازه‌ای نقش داشته باشد. بر این اساس، نتایج تحقیق پیشنهاد می‌کند که طراحان سازه می‌بایست اثرات نامطلوب انعطاف پذیری دیافراگم را خصوصاً در سازه‌های مقید پیچشی مدنظر داشته باشند.

واژه‌های کلیدی

سیستم‌های کف نوین، دیافراگم لرزه‌ای، انعطاف پذیری سقف، رفتار لرزه‌ای، ساختمان‌های نامتقارن در پلان

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

۱. مقدمه

یکی از فرضیات ساده کننده‌ای که در طراحی معمول بسیاری از ساختمان‌ها بکار می‌رود فرض صلبیت کامل دیافراگم لرزه‌ای است. با این فرض طراحان مجبور به انجام مدل‌سازی اجزای محدود کف‌ها، که غالباً بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است، نیستند. بعلاوه این فرض راحت درجات آزادی سیستم دینامیکی را برای هر طبقه از سازه به سه درجه تقلیل می‌دهد: دو درجه انتقالی و یک درجه آزادی دورانی و سرعت تحلیل را بسیار بالا می‌برد. اگرچه فرض دیافراگم صلب می‌تواند در بسیاری موارد واقع‌بینانه باشد، اما تجربه زلزله‌های گذشته [۲۰۱] نشان‌دهنده عدم قطعیت فرض در برخی از موارد است. تحقیقات گذشته بیانگر لزوم توجه به امکان انعطاف‌پذیری دیافراگم از جنبه‌های زیر هستند:

۱- مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی قبلی به‌خوبی نشان داده‌اند که درجه انعطاف‌پذیری دیافراگم تابع پارامترهای متعددی از قبیل نوع سیستم کف، نوع سیستم باربر جانبی، نسبت ابعادی پلان سازه، طول دهانه سازه، نحوه طراحی سیستم باربر و کف‌ها و حتی شدت زلزله است [۳-۶]. در یکی از تحقیقات نسبتاً جدید انجام‌شده، تنا کولونگا و همکارانش [۷] به بررسی انعطاف‌پذیری سیستم‌های کف متداول در ساختمان‌های شهری همانند دال‌های دارای تیرچه، سقف‌های تیرچه‌بلوک، عرشه‌های فولادی و دال‌های مجوف در ساختمان‌های با نسبت‌های ابعادی مختلف و با سیستم باربر جانبی قاب خمشی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هر یک از این کف‌ها می‌توانند بسته به شرایط، درجات متفاوتی از انعطاف‌پذیری را تجربه کنند. آن‌ها همچنین دریافتند که ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای متداول [۸] برای دسته‌بندی دیافراگم‌ها که بر مبنای نسبت تغییرمکان دیافراگم به المان‌های جانبی تعریف می‌شود، به‌جز در دیافراگم‌های خیلی انعطاف‌پذیر معیار خوبی برای دسته‌بندی دیافراگم‌ها نیست. بنابراین همواره این احتمال وجود دارد که انواع سقف‌هایی که طبق ضوابط تجویزی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در رده دیافراگم صلب دسته‌بندی می‌شوند در طی زلزله درجاتی از انعطاف‌پذیری را تجربه کنند [۸-۶].

۲- عدم لحاظ انعطاف‌پذیری دیافراگم می‌تواند منجر به خطاهایی در تعیین مشخصات دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای گردد [۳، ۶، ۹]. انعطاف‌پذیری دیافراگم سبب افزایش پریود ارتعاش طبیعی سازه و همچنین افزایش مشارکت تعداد مودهای ارتعاشی بیشتری در پاسخ سازه نسبت به سازه‌های مشابه با دیافراگم صلب می‌شوند [۶]. اگر پریودهای ارتعاشی سازه اولیه با دیافراگم صلب روی شاخه صعودی طیف شبه شتاب واقع شوند، آنگاه با افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم شاهد افزایش تقاضای لرزه‌ای در سازه خواهیم بود [۷]. مطالعات انجام‌شده همچنین نشان دادند که مودهای متقارن (انتقالی) دیافراگم‌ها در پاسخ سازه‌های با دیافراگم انعطاف‌پذیر نقش بسیار پررنگی دارند و با افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم در سازه‌های نامتقارن اثرات پیچشی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند [۹، ۱۰]. در واقع در سازه‌های با دیافراگم نیمه صلب با پدیده‌ای به نام انتقال مود (mode shift) روبرو می‌شویم که طی آن برخی مودهای سازه با دیافراگم صلب در مودهای بالاتر سازه مشابه با دیافراگم انعطاف‌پذیر ظاهر می‌شوند [۱۱].

۳- یکی از مسائل مهم دیگر، اثر انعطاف‌پذیری بر نحوه توزیع نیروهای لرزه‌ای، شتاب‌ها و تغییرمکان‌ها در المان‌های باربر جانبی سازه است [۶، ۱۱]. برای مثال در یک سازه متقارن منظم با دیافراگم صلب، تمام المان‌ها تغییرشکل یکسانی را تجربه می‌کنند و بنابراین توزیع نیروهای لرزه‌ای بر اساس نسبت سختی المان‌ها انجام می‌شود و در نتیجه المان‌های سخت‌تر نیروهای جانبی بیشتری را جذب می‌کنند. اما با افزایش انعطاف‌پذیری توزیع نیرو بیشتر بر اساس سطح بارگیر هر المان انجام می‌شود و بنابراین المان‌های میانی که سطح بارگیر بیشتری نسبت به المان‌های کناری دارند عموماً مقادیر بالاتری از نیرو و تغییرمکان را نسبت به همان المان در سازه مشابه با دیافراگم صلب تجربه می‌کنند.

علی‌رغم عدم قطعیت در صلبیت کامل بسیاری از دیافراگم‌ها در زلزله و اثرات نامطلوب انعطاف‌پذیری دیافراگم بر رفتار سازه‌ها، فرض دیافراگم صلب در قریب به اتفاق تحقیقات گذشته در حوزه پاسخ سازه‌های پیچشی همواره یکی از فرضیات اصلی بوده است. در حقیقت، درحالی‌که سازه‌های نامتقارن در پلان پتانسیل بیشتری برای انعطاف‌پذیری دیافراگم دارند [۱۴-۱۰، ۱۲]، توجه کمتری به اثرات انعطاف‌پذیری دیافراگم در آن‌ها شده است.

به نظر می‌رسد علاوه بر اثرات شناخته‌شده از انعطاف‌پذیری دیافراگم بر سازه‌های متقارن در مطالعات پیشین، از قبیل تغییر در مشخصات دینامیکی سازه و نحوه توزیع نیروها بین المان‌های باربر جانبی سازه، برخی مسائل دیگر وجود دارند که خطاهای ناشی از انعطاف‌پذیری دیافراگم‌ها را در برآورد پاسخ لرزه‌ای سازه‌های نامتقارن در پلان، و به‌ویژه در سازه‌های مقید پیچشی، افزایش می‌دهند: ۱- همان‌طور که

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

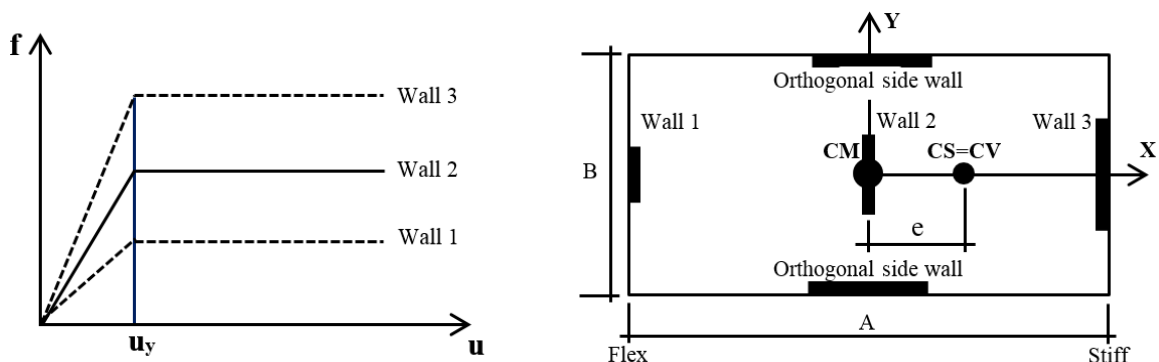
senaconf.ir

می‌دانیم با افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم، رفتار دینامیکی سازه از مودهای پیچشی به مودهای انتقالی تغییر می‌کند. اگرچه کاهش اثرات پیچشی می‌تواند به‌عنوان یکی از مزایای انعطاف‌پذیری دیافراگم در نظر گرفته شود، اما این رفتار همچنین می‌تواند منجر به تقاضاهای پیش‌بینی‌نشده در المان‌های باربر جانبی سازه نامتقارن در پلان گردد. ۲- فرض صلبیت کامل دیافراگم در فرآیند طراحی به این معنی است که المان‌های عرضی سازه (عمود بر جهت زلزله)، به‌طور مؤثری در باربری جانبی سازه و کنترل دررفت‌ها شرکت می‌کنند، و در نتیجه این فرض منجر به کاهش تقاضای سختی و مقاومت در المان‌های باربر جانبی اصلی سازه (در جهت زلزله) می‌گردد. از طرف دیگر، با افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم، جذب نیروی لرزه‌ای در المان‌های لرزه‌ای احتمالاً کاهش می‌یابد. این رفتار می‌تواند منجر به تخمین دست‌پایین تقاضای لرزه‌ای المان‌های باربر جانبی سازه در پروسه طراحی و تحلیل سازه‌های مقید پیچشی با فرض صلبیت کامل دیافراگم آن‌ها گردد.

از بحث فوق، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نیاز به بررسی کمی اثرات انعطاف‌پذیری دیافراگم‌های لرزه‌ای بر تقاضای المان‌های باربر جانبی در سازه‌های مقید پیچشی کاملاً ضروری است، تا طراحان بتوانند از اثرات احتمالی انعطاف‌پذیری دیافراگم در این سازه‌ها آگاه شوند. بدین منظور، در این تحقیق، یک مطالعه تحلیلی به‌منظور ارزیابی اثرات انعطاف‌پذیری دیافراگم و المان‌های عرضی سازه بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مقید پیچشی انجام گرفت. در این تحقیق سازه‌های با نسبت‌های ابعادی مختلف، درجات خروج از مرکزیت مختلف، و درجات مختلف مقید بودن پیچشی مورد بررسی قرار گرفتند. مدل‌های عددی اولیه با فرض دیافراگم کاملاً صلب طراحی شدند و اثرات المان‌های عرضی بر کاهش سختی و مقاومت المان‌های اصلی در فرآیند طراحی ارزیابی گردید. سپس افزایش تقاضای لرزه‌ای در المان‌های باربر جانبی، در اثر افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مشخصات مدل‌های سازه‌ای اولیه

مدل‌های سازه‌ای با پلان نامتقارن یک طبقه با دو دهانه مساوی و نسبت‌های ابعادی مختلف (۲ و ۴) در نظر گرفته شدند (شکل ۱-الف). همان‌طور که نشان داده شده است، مدل‌ها دارای دو دیوار برشی در جهت (X) دیوارهای عرضی (Y) و سه دیوار برشی در جهت (Y) دیوارهای اصلی) بودند. جرم سقف‌ها به‌صورت یکنواخت در دیافراگم لرزه‌ای توزیع شده است. نامتقارنی ساختمان تنها نسبت به محور Y بود و درجات مختلفی از خروج از مرکزیت (۱۵٪ و ۲۵٪) برای مدل‌ها در نظر گرفته شد. خروج از مرکزیت‌های سختی و مقاومت با تغییر طول دیوارهای برشی در مدل‌ها اعمال گردید. در شکل ۱-ب رابطه استاتیکی نیرو-تغییرمکان دیوارهای برشی ارائه شده است. در یک مدل‌سازی واقع‌بینانه‌تر، دیوارهای برشی به‌صورت المان‌های نوع D (D-type) در نظر گرفته شدند، به‌طوری‌که رابطه بین سختی و مقاومت به‌صورت خطی در نظر گرفته شد [۱۵] و در نتیجه خروج از مرکزیت‌های سختی و مقاومت در تمام مدل‌ها یکسان بودند.



(ب) رابطه نیرو-تغییرمکان دیوارهای برشی

(الف) نمای پلان سازه‌های نامتقارن

شکل ۱. مدل‌های در نظر گرفته شده در مطالعه تحلیلی

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

بارهای ثقلی سازه بر مبنای مبحث ششم مقررات ملی ایران [۱۶] تعیین شدند و فرض شد که سیستم باربر ثقلی سازه قاب ساختمانی ساده است. طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر مبنای دیافراگم کاملاً صلب انجام شد. بارهای طراحی لرزه‌ای با استفاده از روش استاتیکی معادل طبق استاندارد ۲۸۰۰ [۱۷] تعیین شدند. ضریب رفتار سازه برای همه مدل‌های سازه‌ای برابر با ۵٫۰ به دست آمد. سختی و مقاومت موردنیاز در جهت X (جهت تقارن) به ترتیب با مقادیر F_x و K_x مشخص شدند. به منظور ارزیابی اثر دیوارهای عرضی بر پاسخ لرزه‌ای، سه مقدار متفاوت در جهت X برای آن‌ها در نظر گرفته شد: (۱) $0.0K_x$ و $0.0F_x$ (سازه نامقید)، (۲) $0.5K_x$ و $0.5F_x$ (سازه نسبتاً مقید)، (۳) $1.0K_x$ و $1.0F_x$ (سازه کاملاً مقید). سپس مقاومت و سختی دیوارهای اصلی (در جهت Y) بر مبنای ضوابط آیین‌نامه لرزه‌ای (کنترل مقاومت و دررفت) تعیین گردید. در فرآیند طراحی، سختی و مقاومت دیوار مرکزی در جهت Y برای همه مدل‌ها برابر در نظر گرفته شد ($0.33K_x$ و $0.33F_x$)، و سپس سختی و مقاومت دو دیوار دیگر در این جهت در فرآیند طراحی به دست آمدند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، حضور دیوارهای عرضی منجر به کاهش سختی و مقاومت موردنیاز در دیوارهای اصلی گردید. مشخصات دیوارهای مدل‌های سازه‌ای در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. ویژگی‌های المان‌های سازه‌ای در مدل‌های موردبررسی

Model	floor span A (m)	floor aspect ratio	Eccentricity y-direction	walls strength (x- direction)	Wall 1 strength (y-direction)	Wall 2 strength (y-direction)	Wall 3 strength (y-direction)
1	20	2.0	15%	0	FL_1	$F_M = 0.33 F_{X1}$	F_{R1}
2	20	2.0	15%	$0.5 F_{X1}$	$0.92 FL_1$	$F_M = 0.33 F_{X1}$	$0.93 F_{R1}$
3	20	2.0	15%	F_{X1}	$0.87 FL_1$	$F_M = 0.33 F_{X1}$	$0.89 F_{R1}$
4	20	2.0	25%	0	FL_2	$F_M = 0.33 F_{X1}$	F_{R2}
5	20	2.0	25%	$0.5 F_{X1}$	$0.91 FL_2$	$F_M = 0.33 F_{X1}$	$0.93 F_{R2}$
6	20	2.0	25%	F_{X1}	$0.85 FL_2$	$F_M = 0.33 F_{X1}$	$0.88 F_{R2}$
7	40	4.0	15%	0	FL_3	$F_M = 0.33 F_{X2}$	F_{R3}
8	40	4.0	15%	$0.5 F_{X2}$	$0.97 FL_3$	$F_M = 0.33 F_{X2}$	$0.97 F_{R3}$
9	40	4.0	15%	F_{X2}	$0.95 FL_3$	$F_M = 0.33 F_{X2}$	$0.96 F_{R3}$
10	40	4.0	25%	0	FL_4	$F_M = 0.33 F_{X2}$	F_{R4}
11	40	4.0	25%	$0.5 F_{X2}$	$0.96 FL_4$	$F_M = 0.33 F_{X2}$	$0.97 F_{R4}$
12	40	4.0	25%	F_{X2}	$0.95 FL_4$	$F_M = 0.33 F_{X2}$	$0.95 F_{R4}$

در جدول ۲، پریودهای ارتعاشی و نسبت‌های فرکانس پیچشی به انتقالی برای مدل‌های با دیافراگم کاملاً صلب ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت فرکانس پیچشی به جانبی در تمام مدل‌های موردبررسی بزرگ‌تر از یک است و بنابراین تمام این مدل‌ها سخت پیچشی محسوب می‌گردند و پاسخ عمده آن‌ها در مود انتقالی سازه است.

جدول ۲. پریود ارتعاش طبیعی و نسبت‌های فرکانس پیچشی به انتقالی (Ω) مدل‌های موردبررسی

Model NO.	Mode x (sec)	Mode y (sec)	Mode θ (sec)	Ω_x	Ω_y
1	-	0.362	0.286	-	1.268
2	0.697	0.370	0.279	2.498	1.326
3	0.493	0.377	0.272	1.812	1.387
4	-	0.293	0.259	-	1.130
5	0.697	0.300	0.255	2.728	1.173
6	0.493	0.307	0.252	1.956	1.218
7	-	0.256	0.186	-	1.375
8	0.493	0.258	0.185	2.660	1.391
9	0.348	0.259	0.184	1.893	1.406
10	-	0.207	0.169	-	1.226
11	0.493	0.208	0.168	2.930	1.237
12	0.348	0.209	0.168	2.078	1.249

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

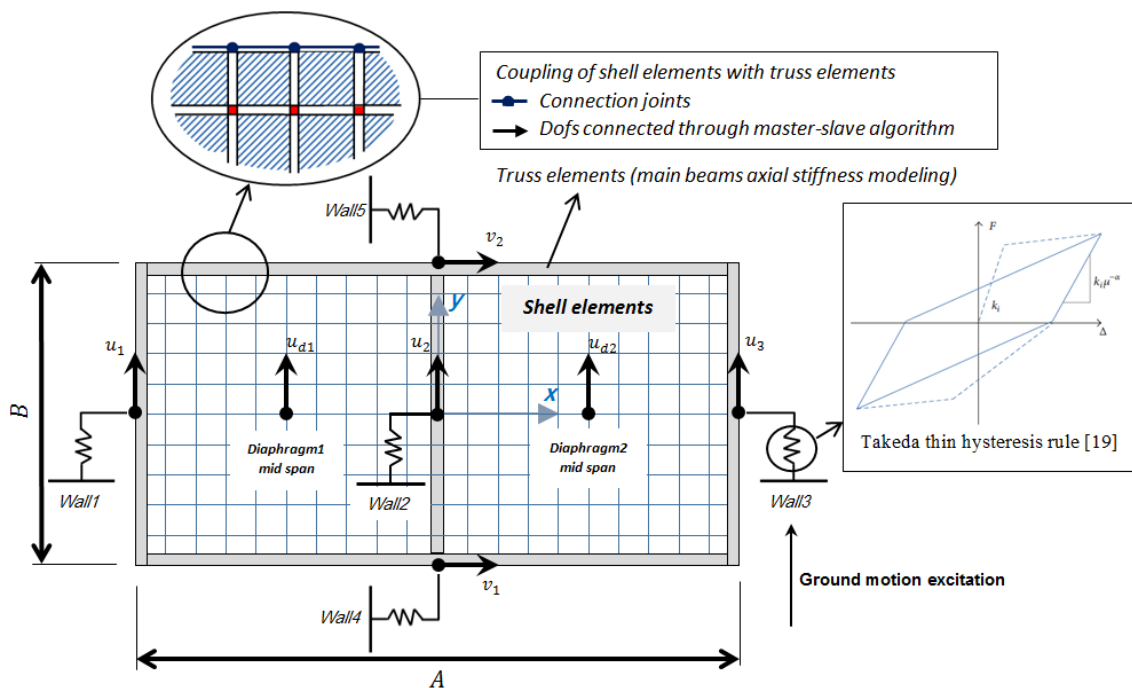
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

پس از طراحی مدل‌های اولیه با فرض دیافراگم کاملاً صلب و تعیین سختی و مقاومت المان‌های باربر جانبی آن‌ها، درجات مختلفی از انعطاف‌پذیری دیافراگم سقف برای آن‌ها در نظر گرفته شد. سپس تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی آن‌ها، همان‌گونه که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود، محاسبه شد.

۳. مدل‌سازی تحلیلی سازه‌ها و رکوردهای زلزله در نظر گرفته شده

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق ارزیابی رفتاری کلی سازه‌های در نظر گرفته شده بود، برخی فرضیات ساده کننده به شرح ذیل در مدل‌سازی اجزاء محدود (شکل ۲)، مورداستفاده قرار گرفتند: (۱) با توجه به اینکه بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای در سراسر دنیا دیافراگم‌های لرزه‌ای را به‌عنوان اجزای غیر شکل‌پذیر در نظر می‌گیرند که باید در طول زلزله بدون خسارت باقی بمانند، در این تحقیق تنها رفتار الاستیک برای این دیافراگم‌ها در نظر گرفته شد. از آنجاکه سختی درون صفحه‌ای برخی از دیافراگم‌های بتنی، مانند دال‌های دوطرفه، دال‌های با تیرچه و دال‌های مجوف، در دو جهت اصلی یکسان هستند، بنابراین از مصالح ایزوتروپیک برای رفتار دیافراگم‌ها در محدوده الاستیک استفاده شد. به جهت ساده‌سازی، تنها سختی کلی دیافراگم‌ها در مدل‌سازی با استفاده از المان‌های shell لحاظ شد و سختی خمشی تیرها به‌صورت صریح در نظر گرفته نشد. نرم‌افزار این سیس [۱۸] برای مدل‌سازی دیافراگم‌ها مورداستفاده قرار گرفت. همچنین آنالیز حساسیت مش انجام و مورد تأیید قرار گرفت. در یک سازه‌سازی دیگر، اتصال بین المان‌های باربر جانبی و دیافراگم‌ها به‌صورت کامل، پیوسته و بدون هیچ‌گونه نقصی در نظر گرفته شد.



شکل ۲. مدل‌های تحلیلی (با نسبت ابعادی برابر با ۲) و رکوردهای تغییر مکان در نظر گرفته شده در نرم‌افزار این سیس

(۲) برای بیان انعطاف‌پذیری دیافراگم، پررود اصلی تحلیلی دیافراگم با تکیه‌گاه‌های انتهایی گیردار در دو سمت (T_d) مورداستفاده قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سطوح متفاوتی از انعطاف‌پذیری دیافراگم از کاملاً صلب تا کاملاً انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است. این درجات انعطاف‌پذیری دیافراگم با فرض مقادیر ثابت برای ابعاد هندسی دیافراگم و سپس تعیین مدول الاستیسیته مصالح دیافراگم (E_d) با سعی و خطا، به دست آمدند.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

جدول ۳. مقادیر در نظر گرفته شده برای انعطاف پذیری دیافراگم

Diaphragm dimensions	Fundamental natural periods of fixed-ended diaphragms (T_d (sec))																	
	0.002	0.071	0.114	0.184	0.285	0.425	0.529	0.616	0.693	0.762	0.884	0.990	1.087	1.258	1.408	1.544	1.669	1.785
10m*10m*0.2m	0.002	0.071	0.114	0.184	0.285	0.425	0.529	0.616	0.693	0.762	0.884	0.990	1.087	1.258	1.408	1.544	1.669	1.785
10m*20m*0.2m	0.005	0.163	0.261	0.421	0.653	0.973	1.213	1.413	1.588	1.746	2.025	2.270	2.491	2.883	3.228	3.539	3.825	4.091

با توجه به اینکه طول دهانه سیستم باربر ثقلی در همه سازه‌ها یکسان بودند، بنابراین ضخامت دیافراگم در تمام مدل‌ها تقریباً یکسان در نظر گرفته شد. بنابراین، اختلاف در پرید ارتعاشی دیافراگم‌ها تنها ناشی از تفاوت در طول دهانه دیافراگم‌ها بود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، دیوارهای برشی با استفاده از مدل ماکروی تاکدا (Takeda) مدل‌سازی شدند که یک مدل ساده و متداول برای شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی و ستون‌های بتن آرمه است [۱۹]. بعلاوه از مقاومت و صلبیت خارج از صفحه دیوارهای برشی صرف‌نظر شد. در تمام مدل‌ها، سختی پس از تسلیم دیوارهای برشی برابر صفر در نظر گرفته شد. به منظور اجتناب از تمرکز کرنش در نقاط اتصال دیافراگم‌ها و دیوارها در مدل تحلیلی، سختی محوری تیرهای اصلی دیافراگم با استفاده از المان خرپا در مدل لحاظ شد (شکل ۲). مشخصات مقطع عرضی دیافراگم‌ها در طراحی اولیه سازه‌ها تحت بارهای ثقلی و بارهای لرزه‌ای به دست آمدند. در تمام تحلیل‌ها از ضریب میرایی ثابت و برابر با ۰.۵٪ میرایی بحرانی استفاده شد. سپس مدل‌ها تحت هفت رکورد زلزله تک مؤلفه‌ای (در جهت Y سازه) و مربوط به حوزه دور قرار گرفتند. رکوردهای زلزله انتخابی همگی مربوط به خاک مشابه (خاک نوع ۲ طبق استاندارد ۲۸۰۰) با حداقل بزرگی ۶ ریشتر و بیشینه شتاب (PGA) برابر با $0.15g$ بودند (جدول ۴ و شکل ۳). تحلیل خطی و غیرخطی سازه‌ها با استفاده از امکانات وب‌سایت DesignSafe [۲۰] انجام شد. همه رکوردها بر مبنای بیشینه شتاب زمین برابر با $PGA = 0.35g$ (زلزله مبنای طراحی) مقیاس شدند.

جدول ۴. رکوردهای زمین لرزه مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی

Event	Year	Station	M_w	Mechanism	Closest Distance (m)	V_{s30} (m/s)	PGA (g)	Duration (Sec)
Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.53	strike slip	15.19	471.53	0.168	36.27
N. Palm Springs	1986	San Jacinto	6.06	Reverse Oblique	22.96	447.22	0.254	20.09
Cape Mendocino	1992	Shelter Airport	7.01	Reverse	26.51	518.98	0.228	30.5
Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.62	Reverse Oblique	26	704.64	0.507	35.095
San Fernando	1971	Old Ridge Route	6.61	Reverse	19.33	450.28	0.320	20.27
Kern County	1952	Lincoln School	7.36	Reverse	38.42	385.43	0.159	47.64
Manjil, Iran	1990	Qazvin	7.37	strike slip	49.97	302.64	0.184	35.99

۴. نتایج تحلیل

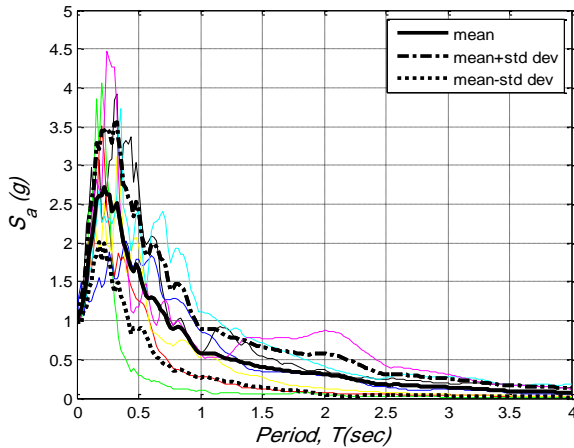
۴.۱. اثرات انعطاف پذیری دیافراگم بر پاسخ سازه‌های پیچشی مقید

میانگین حداکثر تقاضای تغییرشکل دیوارهای عرضی در درجات مختلف انعطاف پذیری دیافراگم (T_d) برای مدل‌های ۱ تا ۳ در تحلیل‌های خطی و غیرخطی به ترتیب در شکل ۴-الف و ب ارائه شده است. این دو مدل دارای نسبت ابعادی یکسان ($A/B = 2.0$) و همین‌طور خروج از مرکزیت یکسان ($e = 15\%$) هستند. تنها تفاوت بین این مدل‌ها در مقاومت و سختی المان‌های عرضی آنها است.

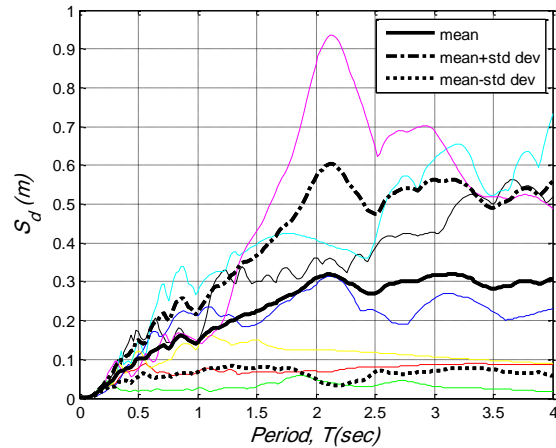
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



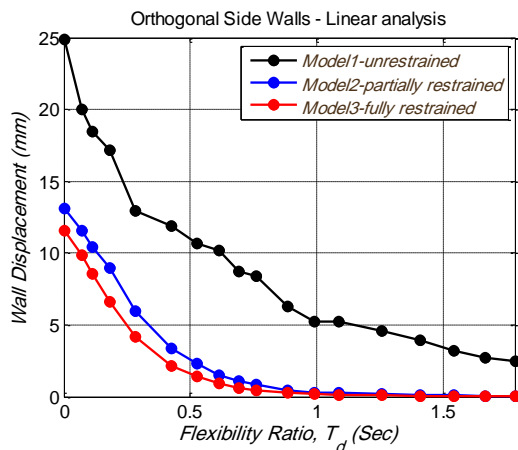
(ب) طیف شبه شتاب



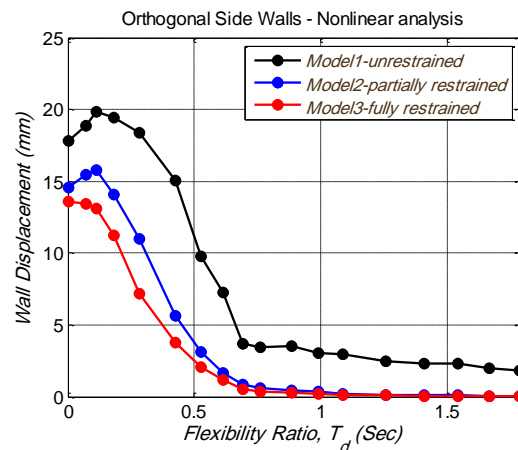
(الف) طیف تغییر مکان

شکل ۳. طیف پاسخ رکوردهای زمین لرزه در نظر گرفته شده با $\xi = 5\%$

همانطور که پیشتر اشاره شد، سختی و مقاومت المان های عرضی، سختی و مقاومت مورد نیاز المان های اصلی سازه را در طول فرآیند طراحی تحت تاثیر خود قرار می دهد. مدل ۱، یک سازه نامقید پیچشی است (بدون هیچگونه المان عرضی)، مدل ۲ از نظر پیچشی نسبتاً مقید است (المان های عرضی ۵۰ درصد سختی و مقاومت مورد نیاز در فرآیند طراحی را دارند) و مدل ۳ کاملاً از نظر پیچشی مقید است (المان های عرضی ۵۰ درصد سختی و مقاومت مورد نیاز در فرآیند طراحی را دارند). لازم به ذکر است که در مدل ۱ دیوار عرضی وجود ندارد و تغییرمکان رکوردها (v_1 و v_2) تنها به منظور مقایسه رسم شده اند. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود، بیشترین تغییرمکان ها تقریباً مرتبط با سازه های با دیافراگم صلب هستند و با افزایش انعطاف پذیری دیافراگم، کاهش سریع در تقاضای تغییرشکل المان های عرضی مشاهده می شود. بنابراین با افزایش انعطاف پذیری، جذب نیروی المان های عرضی سریعاً کاهش می یابد و در نتیجه قابلیت آنها در باربری جانبی در جهت اصلی سازه (جهت Y) نیز کاهش می یابد. مقایسه شکل های ۴-الف و ب نشان می دهد که تسلیم المان های اصلی سازه منجر به کاهش تقاضا در دیوارهای عرضی می شود که این موضوع کاهش تقاضای پیچشی در سازه در اثر تسلیم المان های اصلی را تایید می کند.



(ب) تحلیل خطی



(الف) تحلیل غیرخطی

شکل ۴. متوسط حداکثر تغییرشکل المان های عرضی در مدل های سازه ای ۱ تا ۳ ($A/B = 2.0$, $e = 15\%$)

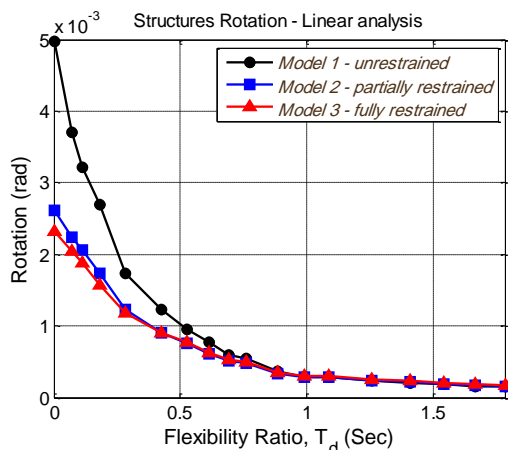
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

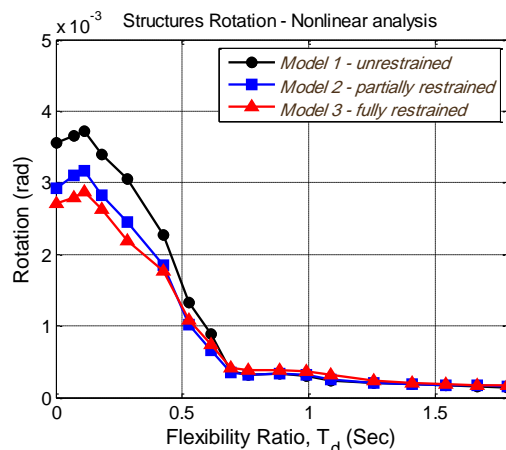
senacnf.ir

کاهش تقاضا در دیوارهای عرضی در اثر انعطاف پذیری دیافراگم میتواند بر اساس این واقعیت توجیه شود که با افزایش انعطاف پذیری دیافراگم، دوران دیافراگم به طور قابل توجهی کاهش می یابد. از آنجایی که به طور عمده با دوران دیافراگم تحریک می شوند، با افزایش انعطاف پذیری کاهش سریع در تقاضای تغییرمکان دیوارهای عرضی رخ می دهد. بنابراین با افزایش انعطاف پذیری دیافراگم رفتار دینامیکی سازه ها از مودهای پیچشی به مودهای انتقالی تغییر خواهد کرد و این مسئله تقاضاهای لرزه ای بیشتری را به دیوارهای اصلی سازه پیچشی تحمیل کند. دوران کلی سازه را میتوان با استفاده از رکوردهای در نظر گرفته شده در شکل ۲ و به کمک معادله ۱ محاسبه نمود. شکل ۵-الف و ب متوسط حداکثر دوران سازه به ازای درجات مختلف انعطاف پذیری دیافراگم را برای مدل های ۱ تا ۳ در تحلیل های خطی و غیرخطی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، دوران کلی سازه ها با افزایش انعطاف پذیری دیافراگم به شدت کاهش می یابد.

$$\theta_{\text{Struct}}(t) \cong \frac{|u_2(t) - u_1(t)|}{A} \quad (1)$$

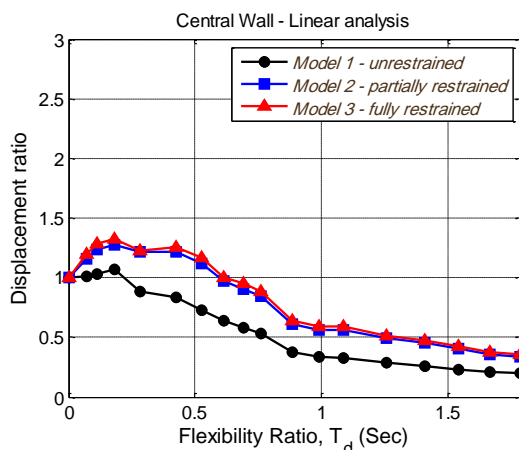


(ب) تحلیل خطی

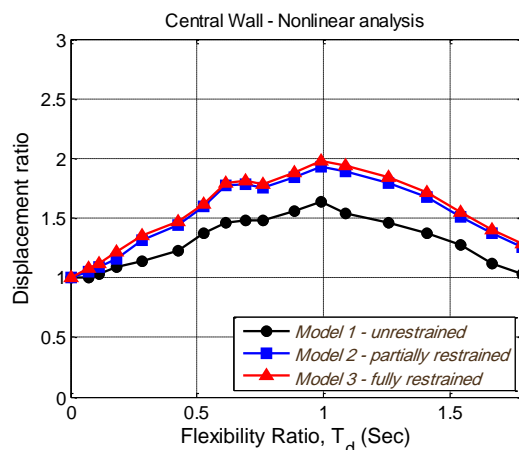


(الف) تحلیل غیرخطی

شکل ۵. متوسط حداکثر دوران دیافراگم ها در مدل های ۱ تا ۳ ($A/B = 2.0, e = 15\%$)



(ب) تحلیل خطی



(الف) تحلیل غیر خطی

شکل ۶. میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیوار مرکزی در مدل های ۱ تا ۳ ($A/B = 2.0, e = 15\%$)

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

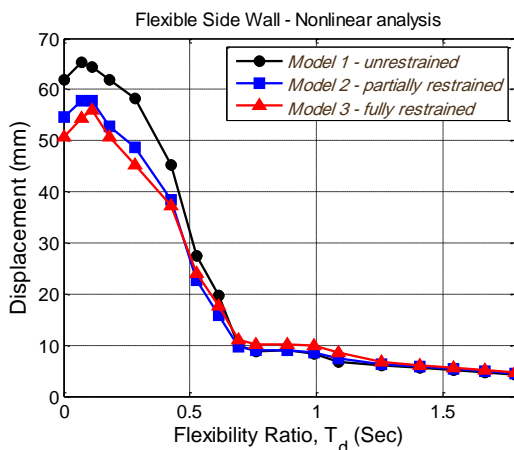
متوسط حداکثر تقاضاهای تغییرشکل دیوارهای مرکزی در درجات مختلف انعطاف پذیری دیافراگم برای مدل های ۱ تا ۳ در شکل ۶-الف و ب ترسیم شده اند. برای سادگی مقایسه، تقاضای لرزه ای سازه های با دیافراگم انعطاف پذیر بر اساس مقادیر بدست آمده در سازه های مشابه با دیافراگم کاملاً صلب نرمالایز شده اند. از این نمودارها نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- به طور کلی با افزایش انعطاف پذیری دیافراگم، افزایش تغییرمکان ها در مدل های غیرخطی بیشتر از مدل های خطی مشابه است. در مدل های غیرخطی، افزایش حدود ۷۰ درصدی تغییرمکان دیوار مرکزی در بدترین حالت در سازه نامقید (مدل ۱) قابل مشاهده است. این افزایش تقاضا میتواند ناشی از تغییر رفتار دینامیکی سازه از مودهای پیچشی به انتقالی و همچنین در اثر تغییر در نحوه توزیع نیروهای جانبی از توزیع بر اساس سختی و موقعیت المان های بارگیر به توزیع بر اساس سطح بارگیر المان ها باشد.

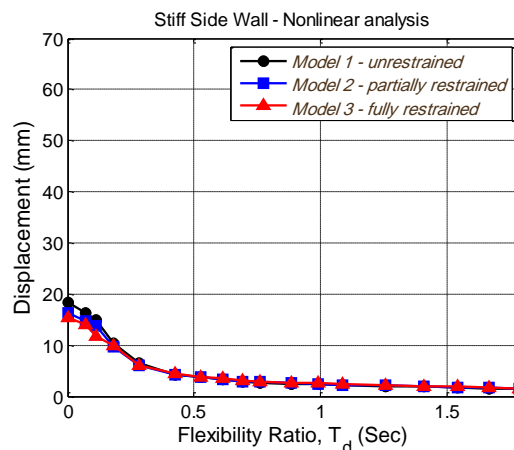
۲- در مدل های مقید پیچشی، افزایش در تغییرمکان دیوار مرکزی در اثر انعطاف پذیری دیافراگم، بیشتر از سازه نامقید پیچشی مشابه است، بطوریکه در مدل کاملاً مقید (مدل ۳) این تقاضا در سازه غیرخطی به دو برابر افزایش یافته است. این افزایش بیشتر تقاضا می تواند ناشی از کاهش جذب نیرو در المان های عرضی در اثر انعطاف پذیری دیافراگم و همچنین کاهش سختی و مقاومت المان های اصلی سازه در اثر حضور المان های عرضی در فرآیند طراحی سازه باشد. این اثرات حتی در انعطاف پذیری های کم ($T_d < 0.55 \text{Sec}$) قابل توجه بوده و قابل صرف نظر نیستند.

۳- به طور کلی، بیشینه پاسخ مدل های خطی در مقایسه با مدل های غیرخطی در درجات انعطاف پذیری کمتر اتفاق می افتد. با این حال، در انعطاف پذیری های بیشتر، تقاضاهای تغییرمکان در هر دو دسته مدل های خطی و غیرخطی کاهش می یابند که میتوان آن را به افزایش پررود ارتعاشی سازه ها که روی شاخه نزولی طیف شبه شتاب قرار دارند نسبت داد.

شکل ۷-الف و ب- میانگین حداکثر نسبت تغییرمکان ها در دیوارهای لبه سخت و نرم سازه را نشان میدهند. این نمودارها نشان میدهند که با افزایش انعطاف پذیری، بجز در موارد استثناء، تغییرمکان ها در هر دو لبه سخت و نرم سازه ها به طور ابل توجهی کاهش می یابند که میتوان آن را به نحوه تغییر توزیع نیروها به سمت توزیع بر اساس سطح بارگیر در هنگام افزایش انعطاف پذیری دیافراگم نسبت داد.



ب) دیوارهای لبه نرم



الف) دیوارهای لبه سخت

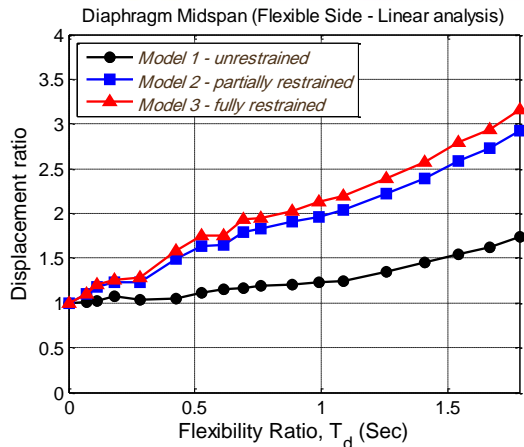
شکل ۷. میانگین حداکثر تغییرمکان دیوارهای کناری در مدل های ۱ تا ۳ ($A/B = 2.0, e = 15\%$)

در شکل ۸-الف و ب، میانگین حداکثر نسبت تغییرمکان وسط دهانه دیافراگم در سمت نرم سازه در درجات مختلف انعطاف پذیری (T_d) برای مدل های خطی و غیرخطی ارائه شده است. روند مشابهی در دیافراگم سمت سخت سازه نیز مشاهده شد. همانطور که انتظار می رفت، افزایش انعطاف پذیری منجر به رشد تقاضای تغییرشکل در دیافراگم ها می شود. برخلاف مدل غیرخطی، در مدل های خطی اختلاف پاسخ سیستم های مقید و نامقید پیچشی زیاد است. این تغییرشکل ها باید در طراحی ستون های ثقلی و المان های غیرسازه ای متصل به دیافراگم در نظر گرفته شوند.

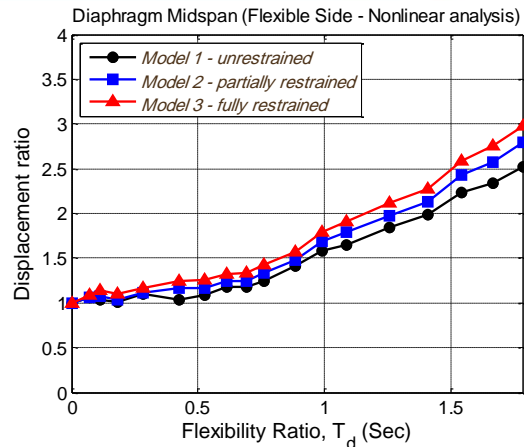
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



(ب) تحلیل خطی

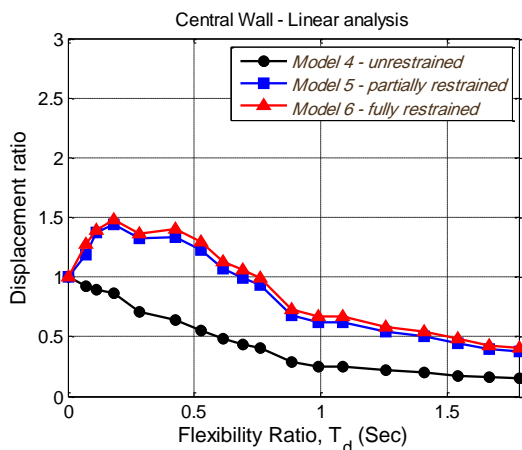


(الف) تحلیل غیرخطی

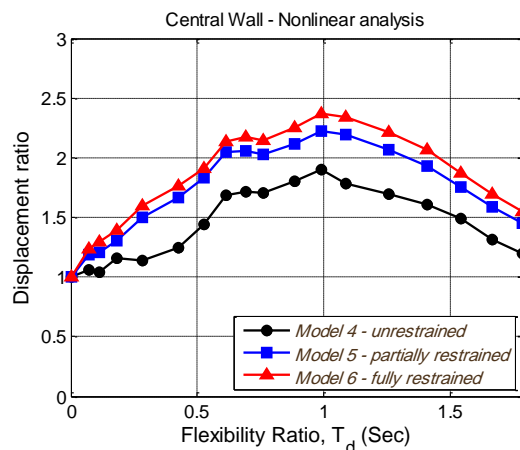
شکل ۸. میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیافراگم ها در مدل ۱ تا ۳ ($A/B = 2.0, e = 15\%$)

۲.۴. اثرات خروج از مرکزیت

میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیوارهای مرکزی در درجات مختلف انعطاف پذیری برای مدل های ۴ تا ۶ در شکل ۹-الف و ب برای تحلیل های خطی و غیرخطی ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ آمده است، این مدل ها شبیه مدل های ۱ تا ۳ بوده و تنها میزان خروج از مرکزیت آنها بیشتر است ($e = 25\%$). مقایسه شکل ۹ و ۶ نشان می دهد که در برآورد تقاضای لرزه ای، خطاهای ناشی از انعطاف پذیری دیافراگم با افزایش خروج از مرکزیت در سازه ها، افزایش می یابند. در حقیقت با افزایش خروج از مرکزیت در سازه با دیافراگم صلب، اثرات دیوارهای عرضی برای محدود کردن تقاضای تغییرشکل در دیوارهای اصلی افزایش می یابند. بنابراین کاهش اثرات دیوارهای عرضی در اثر انعطاف پذیری دیافراگم منجر به خطاهای بیشتر در برآورد تقاضای المان های اصلی می گردد. بعلاوه با افزایش خروج از مرکزیت، اختلاف بین پاسخ مدل های مقید و نامقید پیچشی هم در تحلیل های خطی و هم در تحلیل های غیرخطی بیشتر شده است.



(ب) تحلیل خطی



(الف) تحلیل غیرخطی

شکل ۹. میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیوار مرکزی در مدل های ۴ تا ۶ ($A/B = 2.0, e = 25\%$)

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

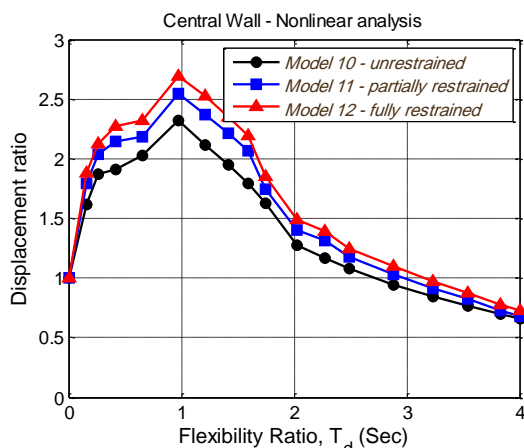
۳.۴. اثرات نسبت ابعادی

در شکل ۱۰، میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیوارهای مرکزی برای مدل های ۷ تا ۱۲ ارائه شده است. تمام این مدل ها نسبت ابعادی یکسان دارند ($A/B = 4.0$). برای مدل های ۷ تا ۹ میزان خروج از مرکزیت ۱۵ درصد ($e = 15\%$) و برای مدل های ۱۰ تا ۱۲ میزان خروج از مرکزیت ۲۵ درصد ($e = 25\%$) است. از مقایسه این نمودار با شکل های ۶ و ۹ نتایج زیر قابل استخراج است:

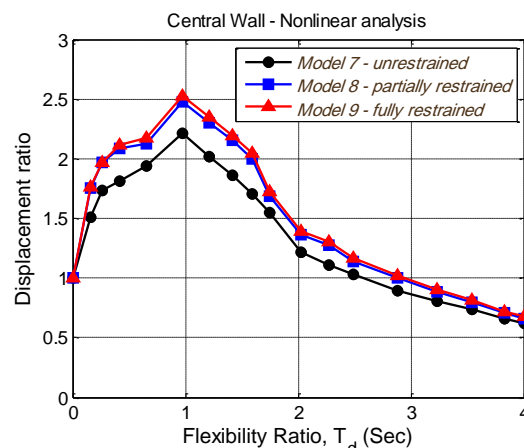
۱- با افزایش نسبت ابعادی، افزایش بیشتری در نسبت تغییرشکل دیوارهای مرکزی در اثر انعطاف پذیری و بویژه در مدل های غیرخطی مشاهده می گردد. این موضوع می تواند به افزایش سهم بارگیر المان مرکزی در اثر نسبت های ابعادی بزرگتر مرتبط باشد. همانطور که پیشتر ذکر شد (جدول ۲)، افزایش نسبت ابعادی پلان منجر به درجات انعطاف پذیری بیشتری در دیافراگم سازه نیز می گردد.

۲- در مدل های غیرخطی با نسبت های ابعادی بزرگتر، اثر دیوارهای عرضی کاهش می یابد، به طوریکه پاسخ سازه های مقید و نامقید بسیار نزدیک به یکدیگر است.

۳- در مدل های غیرخطی با نسبت های ابعادی بزرگتر، اگر چه خروج از مرکزیت بیشتر هنوز منجر به تغییرمکان های بیشتر در دیوارهای مرکزی سازه می شود، اما از اهمیت خروج از مرکزیت در این خصوص کاسته شده است.



(ب) تحلیل غیرخطی، $e = 25\%$



(الف) تحلیل غیرخطی، $e = 15\%$

شکل ۱۰. میانگین حداکثر نسبت تغییرشکل دیوارهای مرکزی در مدل های ۷ تا ۱۲ ($A/B = 2.0$)

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق اثرات انعطاف پذیری دیافراگم در سازه های مقید پیچشی مورد بررسی قرار گرفت. سیستم های با درجات متفاوتی از نسبت ابعادی، خروج از مرکزیت و قید پیچشی مورد ارزیابی قرار گرفتند. ابتداء، سازه ها با فرض دیافراگم کاملاً صلب و در نظر گرفتن اثر المان های عرضی در سختی و مقاومت المان های اصلی طراحی شدند. سپس درجات متفاوتی از انعطاف پذیری دیافراگم برای سازه ها در نظر گرفته شد و تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی روی مدل ها انجام گرفت. نتایج بیانگر آن است که در نسبت های ابعادی کم، حتی تغییرات اندک در درجه انعطاف پذیری دیافراگم، منجر به خطاهای قابل توجه در برآورد تغییرمکان ها در المان های مرکزی سازه و نقاط میانی دیافراگم ها در سازه های مقید پیچشی می گردد. منشاء این خطاها می تواند چهار عامل عمده باشد: ۱- حضور دیوارهای عرضی تقاضای سختی و مقاومت المان های اصلی سازه را در طی فرآیند طراحی، کاهش می دهد (در سازه های با فرض دیافراگم کاملاً صلب). ۲- قابلیت جذب نیروی المان های عرضی سازه با انعطاف پذیری دیافراگم سریعاً کاهش می یابد. ۳- افزایش انعطاف پذیری منجر به تغییر رفتار دینامیکی سازه از مودهای پیچشی به مودهای انتقالی می گردد. ۴- با افزایش انعطاف پذیری، توزیع نیروها بین المان ها به سمت توزیع بر اساس سطح بارگیر می رود و المان های میانی عموماً سطح بارگیر بیشتری دارند. از طرف دیگر، با افزایش نسبت ابعادی

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

سازه، احتمال انعطاف پذیری دیافراگم ها بیشتر می گردد. بعلاوه سهم بارگیر المان های میانی نیز افزایش می یابد. این عوامل منجر به تقاضای لرزه ای بیشتر در سازه های نامقید پیچشی با دیافراگم انعطاف پذیر می شود. لازم به ذکر است که با افزایش خروج از مرکزیت، اثرات نامطلوب انعطاف پذیری دیافراگم نیز تشدید می شوند. بنابراین طراحی باید همواره احتمال درجه ای از انعطاف پذیری دیافراگم و اثرات نامطلوب آن بر تقاضای المان های میانی سازه های نامتقارن و بویژه سازه های مقید پیچشی را مدنظر داشته باشند.

منابع

- [1] Somers P, Campi D, Holmes W, Kehoe BE, Klingner RE, Lizundia B et al. Unreinforced masonry buildings. *Earthquake Spectra* 1996; 12(S1):195-217.
- [2] Shepherd R, Holmes WT, Lizundia B, Aiken ID, De Angelis CA, Bertero V, et al. Buildings. *Earthquake Spectra* 1990; 6(S1):127-49.
- [3] Fleischman RB, Farrow KT. Dynamic behavior of perimeter lateral-system structures with flexible diaphragms. *Earthquake Eng Struct Dynam* 2001; 30(5):745-63.
- [4] Kim S-C, White DW. Nonlinear analysis of a one-story low-rise masonry building with a flexible diaphragm subjected to seismic excitation. *Eng Struct* 2004; 26(14):2053-67.
- [5] Lee HJ, Aschheim MA, Kuchma D. Interstory drift estimates for low-rise flexible diaphragm structures. *Eng Struct* 2007; 29(7):1375-97.
- [6] Sadashiva VK, Macrae GA, Deam BL, Spooner MS. Quantifying the seismic response of structures with flexible diaphragms. *Earthquake Eng Struct Dynam* 2012; 41(10):1365-89.
- [7] Tena-Colunga A, Chinchilla-Portillo KL, Juárez-Luna G. Assessment of the diaphragm condition for floor systems used in urban buildings. *Eng Struct* 2015; 93:70-84.
- [8] ASCE-7. Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE standard ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers; 2010. ISBN 0-7844-0809-2.
- [9] Tena-Colunga A, Abrams DP. Seismic behavior of structures with flexible diaphragms. *ASCE J Struct Eng* 1996;122(4):439-45.
- [10] De-La-Colina J. In-plane floor flexibility effects on torsionally unbalanced systems. *Earthquake Eng Struct Dynam* 1999;28(12):1705-15.
- [11] Moon SK, Lee DG. Effects of inplane floor slab flexibility on the seismic behaviour of building structures. *Eng Struct* 1994; 16(2):129-144
- [12] Ju SH, Lin MC. Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors. *ASCE J Struct Eng* 1999;125(1):25-31.
- [13] Nakamura Y, Derakhshan H, Magenes G, Griffith MC. Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings. *J Earthq Eng* 2017; 21(6):935-60
- [14] Eivani H, Sarvghad Moghadam A, Aziminejad A, Nekooei M. Seismic Response of Plan-Asymmetric Structures with Diaphragm Flexibility. *Shock and Vibration* 2018; 1-18.
- [15] Tso WK, Myslimaj B. Effect of strength distribution on the inelastic torsional response of asymmetric structural systems. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London. Elsevier: Oxford, 2002, Paper no. 081.*
- [16] Iranian national building code, Part 6. Design Loads for Buildings. Building and Housing Research Center, Tehran, Iran; 2013.
- [17] Standard No. 2800, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Building and Housing Research Center, Tehran, Iran; 2014.
- [18] OpenSees Open System for Earthquake Engineering Simulation; Earthquake Engineering Research Center (PEER), California, USA, <http://opensees.berkeley.edu>; 2017.
- [19] Priestley MJN, Calvi GM, MJ. Displacement- Based Seismic Design of Structures, IUSS Press, Pavia, Italy; 2007.
- [20] Rathje EM, Dawson C, Padgett JE, Pinelli JP, Stanzione D, Adair A, et al. DesignSafe: new cyberinfrastructure for natural hazards engineering. *Natural Hazards Review* 2017; 18(3).