بسم الله الرّحمن الرّحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

توزیع تقاضای شکل‌پذیری ساختمان‌های نامتقارن بتن‌آرمه با سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران
گرایش سازه

محمّد صادق بیرژندی

استاد راهنما
دکتر امیر مهدی حلبیان

۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش سازه

محمّد صادق بیرژندی

تحت عنوان:

توزیع تقاضای شکل‌پذیری ساختمان‌های نامتقارن بتن‌آرمه با سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی

در تاریخ ۱۳۸۸/۲/۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه: دکترامیر مهدی حلبیان

۲- استاد مشاور پایان‌نامه: دکتر محمّد مهدی سعادت پور

۳- استاد داور: دکتر فیاض رحیم‌زاده رفوئی

۴- استاد داور: دکتر فرهاد بهنام‌فر

۵- مسئول تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر عبدالرضا کبیری

الهی، چون به تو نگریم شاهیم و تاج بر سر و چون به خود نگریم خاکیم و از خاک کمتر

سپاس، خضوع و ادب بی‌پایان نثار **پدر و مادر عزیزم** که بی هیچ مبالغه‌ای هر چه دارم از آنهاست.

با تشکّر از استاد گرامی **جناب آقای دکتر امیرمهدی حلبیان** که با حوصله و دقّت فراوان، هدایت این تحقیق را بر عهده داشته‌اند.

با سپاس از استاد ارجمند **جناب آقای دکتر محمّد مهدی سعادت پور** که در طول دوران تحصیل و انجام این تحقیق از راهنمایی‌هایشان بهره برده‌ام.

با قدردانی از همراهی و همدلی همیشگی دوست عزیزم **جناب آقای مهندس سید مهدی زندی** که هر کجا هست، خدایا به سلامت دارش.

با تشکّر از همه **اساتید و دوستانم** که همواره از نعمت الطافشان برخوردار بوده‌ام؛

و **خواهر عزیزم** که گر رنج پیش آید و گر راحت، محبّتش را از من دریغی نیست.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادرم

که ترسم حق ادا نشود، اگر گویم:

مسلمانان مرا وقتی دلی بود　　　که با وی گفتمی گر مشکلی بود
دلی همدرد و یاری مصلحت بین　　　که استظهار هر اهل دلی بود

فهرست مطالب

عنـــــوان **صفحه**

فهرست مطالب .... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- اهمیت موضوع ۲

۱-۲- روند مطالعات گذشته ۳

۱-۳- اهداف تحقیق حاضر ۳

۱-۴- فصل‌بندی پایان‌نامه ۵

فصل دوم: پیشینۀ علمی موضوع

۲- ۱- مقدمه ۷

۲-۲- پاسخ پیچشی در محدودۀ رفتار الاستیک ۸

۲-۳- پاسخ پیچشی در محدودۀ رفتار غیرالاستیک ۹

۲-۴- تأثیرات حضور عناصر مقاوم متعامد و تحریک دو بعدی ۱۶

۲-۵- ملاحظات طراحی سیستم‌های نامتقارن یک‌طبقه ۱۹

۲-۶- تعمیم نتایج سیستم‌های یک‌طبقه به چندطبقه ۲۱

۲-۷- استفاده از روش طراحی ظرفیت در سیستم‌های نامتقارن ۲۳

۲-۸- اثرات پیچش تصادفی ۲۵

۲-۹- سایر مطالعات مربوط به سیستم‌های نامتقارن ۲۶

فصل سوم: بسط مدل‌های نامتقارن

۳-۱- مقدمه ۳۱

۳-۲- اصلاح مدل دیوار برشی ۳۲

۳-۳- خروج از مرکزیُت سختی و مقاومت در مطالعات گذشته ۳۵

۳-۴- انواع خروج از مرکزیُت‌های سختی پس از اصلاح مدل دیوار برشی ۳۶

۳-۴-۱- خروج از مرکزیُت سختی نوع اوّل (استفاده از عناصر مقاوم قوی و ضعیف) ۳۶

۳-۴-۲- خروج از مرکزیُت سختی نوع دوم (توزیع غیریکنواخت) ۳۷

۳-۵- لحاظ کردن خروج از مرکزیُت مقاومت به صورت غیرمستقیم ۳۷

۳-۶- استفاده از روش قاب ژنریک برای قاب خمشی ۳۹

۳-۶-۱- فرضیّات مورد استفاده در طراحی قاب‌های ژنریک بتن‌آرمه ۳۹

۳-۶-۲- الگوی بار جانبی مورد استفاده در طراحی قاب‌های ژنریک ۴۰

۳-۶-۳- الگوریتم محاسبهٔ الگوی بار جانبی و طراحی سختی اعضاء در قاب‌های ژنریک ۴۰

۳-۷- مدل‌های مورد استفاده در فصل پنجم ۴۱

۳-۷-۱- مدل هشت طبقهٔ متقارن (مدل پایه) ۴۲

۳-۷-۲- مدل‌های نامتقارن با خروج از مرکزیُت جرم ۴۳

۳-۷-۳- مدل‌های نامتقارن با خروج از مرکزیُت سختی نوع اوّل ۴۳

۳-۷-۴- مدل‌های نامتقارن با خروج از مرکزیُت سختی نوع دوم ۴۶

۳-۸- مدل‌های مورد استفاده در فصل ششم ۴۶

۳-۸-۱- مدل‌های هشت، چهارده و بیست طبقهٔ متقارن (مدل‌های پایه) ۴۶

۳-۸-۲- مدل‌های نامتقارن با خروج از مرکزیُت جرم ۴۸

فصل چهارم: مدل‌سازی اعضاء، تحریک‌های زلزله و روش تحلیل مورد استفاده

۴-۱- مقدمه ۴۹

۴- ۲- مدلسازی عضو تیر ۵۰

۴- ۲- ۱- رابطهٔ لنگر-انحناء جهت مدلسازی رفتار غیرخطی خمشی عضو تیر ۵۰

۴- ۲- ۲- منحنی پایهٔ فولاد ۵۱

۴- ۲- ۳- منحنی پایهٔ بتن ۵۲

۴- ۲- ۴- چرخه‌های بارگذاری-باربرداری (هیسترزیس) ۵۲
۴- ۳- مدلسازی رفتار غیرخطی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی برای عضو ستون ۵۴
۴- ۳- ۱- رابطهٔ نیرو-تغییر مکان در المان الیافی ۵۴
۴- ۳- ۲- رابطهٔ نیرو-تغییر مکان بین یک مقطع دلخواه از المان ستون و دو انتهای آن ۵۶
۴- ۳- ۳- ماتریس سختی المان ستون ۵۷
۴-۴- مدلسازی رفتار برشی و پیچشی اعضای تیر و ستون ۵۸
۴- ۵- مدلسازی دیوار برشی ۵۸
۴- ۶- انتخاب تحریکات زلزله ۶۰
۴- ۶ – ۱ – تفاوت‌های حرکات نزدیک به گسل با حرکات دور از گسل ۶۰
۴- ۶ – ۲ – تحریکات مورد استفاده در فصل پنجم ۶۲
۴- ۶ – ۳ – تحریکات مورد استفاده در فصل ششم ۶۴
۴- ۷- روش تحلیل دینامیکی سیستم ۶۴
۴- ۷ – ۱- معادلهٔ حرکت ۶۴
۴- ۷ – ۲ – روش حل: انتگرال‌گیری نیومارک ۶۶
۴- ۷ – ۳ – تقسیم هر گام زمانی با تغییر سختی ۶۸

فصل پنجم: ارزیابی تأثیرات انواع خروج از مرکزیّت بر شکل‌پذیری کلّی و شکل‌پذیری طبقات

۵-۱- مقدمه ۶۹
۵-۲- انتخاب شکل‌پذیری نرمال به عنوان پارامتر پاسخ ۷۰
۵-۳- بحث بر روی مودهای پیچشی ۷۱
۵- ۴- ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت جرم بر تقاضای شکل‌پذیری ۷۴
۵- ۴ – ۱ – ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت جرم بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم ۷۴
۵-۴-۲- ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت جرم بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت ۷۵
۵-۵- ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل بر تقاضای شکل‌پذیری ۷۵
۵- ۵ – ۱ – ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم ۷۶

۵- ۵ – ۲ – ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت ۷۷
۵- ۶- ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع دوم بر تقاضای شکل‌پذیری ۷۸
۵- ۶ – ۱ – ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع دوم بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم ۷۸
۵- ۶ – ۲ – ارزیابی تأثیرات خروج از مرکزیّت سختی نوع دوم بر تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت ۷۸
۵- ۷- نتایج ۸۹

فصل ششم: ارزیابی تأثیرات تعداد طبقات، تحریک دو بعدی و خروج از مرکزیّت دو جهتی بر شکل‌پذیری کلّی و شکل‌پذیری طبقات

۶-۱- مقدمه ۹۱
۶- ۲- ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی در مدل هشت طبقه ۹۲
۶- ۲ – ۱ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ نرم در مدل هشت طبقه ۹۲
۶- ۲ – ۲ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت در مدل هشت طبقه ۹۳
۶- ۳- ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی در مدل چهارده طبقه ۹۴
۶- ۳ – ۱ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ نرم در مدل چهارده طبقه ۹۴
۶- ۳ – ۲ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت در مدل چهارده طبقه ۹۶
۶- ۴- ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی در مدل بیست طبقه ۹۷
۶- ۴ – ۱ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ نرم در مدل بیست طبقه ۹۷
۶- ۴ – ۲ – ارزیابی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت در مدل بیست طبقه ۹۸
۶- ۵- توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم، در ارتفاع ۹۹
۶- ۵ – ۱ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم در مدل هشت طبقه، در ارتفاع ۹۹
۶- ۵ – ۲ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم در مدل چهارده طبقه، در ارتفاع ۱۰۰
۶- ۵ – ۳ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ نرم در مدل بیست طبقه، در ارتفاع ۱۰۰
۶- ۶- توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت، در ارتفاع ۱۰۰
۶- ۶ – ۱ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت در مدل هشت طبقه، در ارتفاع ۱۰۰
۶- ۶ – ۲ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت در مدل چهارده طبقه، در ارتفاع ۱۰۱

۶- ۶ – ۳ – توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت در مدل بیست طبقه، در ارتفاع ۱۰۱
۶- ۷- تأثیر خروج از مرکزیّت دو جهتی بر توزیع تقاضای شکل‌پذیری در ارتفاع ۱۰۱
۶- ۸- نتایج ۱۳۶
۶- ۸ – ۱ – تأثیر تعداد طبقات بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۳۶
۶- ۸ – ۲ – تأثیر حضور دیوارها و تحریک متعامد بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۳۷
۶- ۸ – ۳ – تأثیر خروج از مرکزیّت دو جهتی بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۳۷
۶- ۸ – ۴ – تأثیر عوامل مختلف بر توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت و نرم در ارتفاع ۱۳۸

فصل هفتم: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷- ۱- خلاصهٔ تحقیق ۱۳۹
۷- ۲- نتیجه‌گیری ۱۴۰
۷- ۲ – ۱ – تأثیر انواع خروج از مرکزیّت بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی و توزیع تقاضای شکل‌پذیری طبقات ۱۴۰
۷- ۲ – ۲ – تأثیر تعداد طبقات بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۴۲
۷- ۲ – ۳ – تأثیر حضور دیوارها و تحریک متعامد بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۴۲
۷- ۲ – ۴ – تأثیر خروج از مرکزیّت دو جهتی بر تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ سخت و نرم ۱۴۳
۷- ۲ – ۵ – تأثیر عوامل مختلف بر توزیع تقاضای شکل‌پذیری لبهٔ سخت و نرم در ارتفاع ۱۴۳
۷- ۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده ۱۴۴
پیوست ۱ .... ۱۴۶
پیوست ۲ .... ۱۴۹
فهرست مراجع ۱۵۷

چکیده

مشاهدات انجام شده پس از زلزله‌های شدید، نشان داده است که سازه‌های نامتقارن در پلان، ممکن است آسیب‌های شدیدی را تجربه کنند. روش رایج در بررسی اثرات عدم تقارن، مطالعهٔ تغییرات جابجایی و تقاضای شکل‌پذیری نسبت به حالت متقارن است. سیستم‌های سازه‌ای مورد بررسی در تحقیقات پیشین به دو نوع سیستم‌های یک طبقه و سیستم‌های چند طبقهٔ قاب خمشی محدود می‌شود. در این تحقیق، توزیع تقاضای شکل‌پذیری در پلان و ارتفاع برای سیستم‌های دوگانهٔ قاب خمشی و دیوار برشی نامتقارن، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا خروج از مرکزیّت در این سیستم‌ها، در قالب خروج از مرکزیّت جرم و دو نوع متفاوت از خروج از مرکزیّت سختی، تقسیم‌بندی شده است. در نوع اوّل از خروج از مرکزیّت سختی، عدم تقارن به‌وسیلهٔ دیوارهای برشی با طول متفاوت (با چیدمان متقارن)، ایجاد شده و در نوع دوم، عدم تقارن به کمک چیدمان نامتقارن اعضای دیوار برشی (با طول یکسان) ایجاد شده است. جهت بسط مدل‌های سیستم دوگانه، ابتدا با استفاده از روش قاب ژنریک مدل‌های هشت، چهارده و بیست طبقهٔ قاب خمشی، توسعه داده شده و سپس دیوارهای برشی با نسبت سختی معینی به آن اضافه شده است. برای مدلسازی غیرخطّی اعضای تیر از رابطهٔ لنگر-انحناء و برای مدل‌سازی غیرخطّی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای ستون از المان الیافی (فنرهای محوری چندگانه مبتنی بر منحنی تنش-کرنش پایهٔ مصالح) استفاده می‌شود. همچنین برای مدل‌سازی اعضای دیوار برشی از المان پانل استفاده شده و اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در این اعضاء نیز (مشابه اعضای ستون)، به کمک المان الیافی صورت گرفته است. این نحوهٔ مدلسازی اعضاء ستون و دیوار برشی موجب می‌شود سختی سیستم در هر لحظه از زمان تابعی از مقاومت آن باشد و نیازی به در نظر گرفتن خروج از مرکزیت سختی و مقاومت به طور جداگانه، نباشد. در مدل‌های با خروج از مرکزیّت جرم، برای هر سازهٔ نامتقارن سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است: (۱) خروج از مرکزیّت یک جهتی و حذف دیوارهای جهت متعامد، تحت تحریک یک مؤلّفه‌ای؛ (۲) خروج از مرکزیّت یک جهتی و اضافه شدن دیوارهای جهت متعامد، تحت تحریک دو مؤلّفه‌ای؛ (۳) خروج از مرکزیّت دو جهتی و حضور دیوارهای جهت متعامد، تحت تحریک دو مؤلّفه‌ای. نتایج این تحقیق، به دو صورت ارائه شده است؛ نخست تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) دیوارهای طرّه‌ای موجود در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه به صورت کلّی و دوم به صورت توزیع تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه در تمامی طبقات.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بجز حالت خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل، هیچ‌گونه افزایشی نسبت به حالت متقارن، برای لبهٔ سخت مشاهده نمی‌شود. همچنین در سازه‌های دارای خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل، می‌توان از تغییرات دو پارامتر تغییر مکان نهایی و تغییر مکان تسلیم به گونه‌ای استفاده کرد که توزیع شکل‌پذیری در پلان، تا حد ممکن یکنواخت شود. به طور کلّی تقاضای شکل‌پذیری کلّی لبهٔ نرم، با افزایش تعداد طبقات از هشت به چهارده، کاهش می‌یابد و این کاهش، از سازهٔ چهارده به بیست طبقه، چشم‌گیرتر است. همچنین با افزایش تعداد طبقات، اثرات کاهشی پیچش در لبهٔ سخت، کاهش می‌یابد. با توجّه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت مدل‌سازی دوبعدی برای بررسی اثرات پیچش در بیشینهٔ پاسخ لبهٔ نرم (به خصوص در سازه‌های کوتاه) گمراه‌کننده است. همچنین اضافه شدن خروج از مرکزیّت جهت دوم، در بیشینهٔ پاسخ‌ها تأثیرات چشم‌گیری ندارد. پیرامون توزیع ارتفاعی اثرات پیچش در لبهٔ نرم نیز، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که غالباً باید در طبقات پائین سازه انتظار بیش‌ترین اثرات پیچش را داشته باشیم.

کلمات کلیدی:

پاسخ لرزه‌ای، سازه‌های نامتقارن، پاسخ پیچشی، تقاضای شکل‌پذیری، سیستم‌های دوگانه قاب و دیوار

فصل اوّل

مقدّمه

۱- ۱- اهمیّت موضوع

مطالعهٔ پاسخ سازه‌های نامتقارن در پلان[1] نسبت به تحریکات لرزه‌ای، از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین مسائل مهندسی زلزله می‌باشد. مشاهدات انجام شده پس از زلزله‌های شدید، نشان داده است که سازه‌های نامتقارن، ممکن است آسیب‌های شدیدی را تجربه کنند. تمایل به خلق معماری‌های بدیع، حفظ تقارن در سازه‌های ساختمانی را نسبتاً مشکل ساخته است. دلایلی از قبیل خروج از مرکزیّت سختی، خروج از مرکزیّت جرم، خروج از مرکزیّت مقاومت، از جمله عواملی است که منجر به عدم تقارن در پلان می شود. حتی در سازه‌هایی که متقارن طراحی شوند، تغییر در هندسه، توزیع سختی و یا جرم در زمان ساخت یا بهره‌برداری منجر به خروج از مرکزیّت اتّفاقی می گردد که در آئین‌نامه‌ها پیش‌بینی شده است.

در زلزله‌های شدید، بسیاری از عناصر مقاوم از جمله در سازه‌های نامتقارن، وارد محدودهٔ رفتار غیرخطّی می‌شوند. در این راستا، مسئله پاسخ پیچشی سازه‌هایی که در ناحیه غیرالاستیک عمل می‌کنند، موضوع بسیاری از تحقیقات به خصوص در دو دههٔ اخیر بوده است. در این میان، سازه‌های بتن‌آرمه به دلیل ماهیّت رفتاری بتن به لحاظ ترک‌خوردگی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند.

---

[1] Plan asymmetric structures

از جمله موارد مشاهده شده در زلزله‌های شدید می‌توان به آسیب‌های ناشی از پیچش، در زلزله‌های ۱۹۷۱ San Fernando [۱]، Mexico۱۹۸۵ [۲و۳]، Loma Prieta۱۹۸۹ [۴]، Philippines۱۹۹۰ [۵]، Northridge۱۹۹۴ [۶] و Kobe۱۹۹۵ [۷] اشاره نمود. این مشاهدات، تمایل محقّقین نسبت به مطالعه پاسخ پیچشی سازه‌های نامتقارن را روزافزون نموده است.

۱- ۲- روند مطالعات گذشته

فرضیّات و نتایج مطالعات پیشین، در فصل دوم پایان‌نامه به تفصیل ذکر خواهد شد. در این بخش، صرفاً روند این مطالعات ذکر می‌شود تا ارتباط موضوع این پایان‌نامه با مطالعات گذشته، مشخص گردد.

در مطالعات موجود در ادبیّات فنی، پاسخ پیچشی سیستم‌های دیوار برشی و قاب هر یک به صورت جداگانه، مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سیستم‌های دیوار برشی، در تمام موارد از مدل‌های یک طبقه استفاده شده که در مدلسازی، از المان‌هایی ساده با رفتار دوخطی[1] برای مدلسازی دیوار برشی، استفاده شده است. نتایج این مطالعات، اغلب به صورت مقادیر جابجایی و شکل‌پذیری نرمال‌شده نسبت به حالت متقارن ارائه گردیده‌اند؛ امّا در این میان، ارزیابی‌های متفاوت و گاه متناقضی دیده می‌شود. برای علل این تفاوت‌ها و تناقض‌ها، می‌توان به مواردی چون تفاوت در فرضیّات مدل‌ها، تفاوت در نحوهٔ ایجاد خروج از مرکزیّت و تفاوت در تعریف شکل‌پذیری، اشاره نمود. علاوه بر این، با تغییر مدل قابل قبول برای رفتار سیستم دیوار برشی در اواخر دههٔ ۱۹۹۰ میلادی، بسیاری از فرضیّات این مطالعات با ایرادات جدّی مواجه شده است.

اما در بخش سیستم‌های قابی، علاوه بر مطالعاتی که به بررسی سیستم‌های یک طبقه پرداخته‌اند، سیستم‌های چند طبقه نیز، در برخی تحقیقات مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعات، رفتار اعضای تیر و ستون، با استفاده از روابط لنگر-انحنا مدلسازی شده است. در این بخش نیز، مانند سیستم‌های دیوار برشی، همسویی لازم بین نتایج، دیده نمی‌شود.

۱- ۳- اهداف تحقیق حاضر

در این پایان‌نامه، توزیع تقاضای شکل‌پذیری ساختمان‌های نامتقارن بتن‌آرمه با سیستم دوگانه قاب و دیوار برشی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی اثرات پیچشی ناشی از تحریک انتقالی در سیستم‌های نامتقارن، پارامترهای مختلفی می‌تواند به عنوان کمیّت پاسخ مد نظر قرار گیرد. امّا با بررسی مطالعات گذشته مشخص می‌شود که

---

[1] Shear-beam model

شکل‌پذیری تحمیل شده به عناصر مقاوم مختلف سازه[1] (توسط تحریک)، مناسب‌ترین پارامتر به نظر می‌رسد. بنابراین در این تحقیق، پاسخ سازه‌ها به لحاظ توزیع تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) در پلان و ارتفاع، به عنوان پارامتر پاسخ انتخاب شده است.

در این تحقیق تلاش شده است تا خصوصیات سیستم‌های مورد مطالعه از نظر نحوهٔ ایجاد خروج از مرکزیُت، تا حد زیادی (در مقایسه با مطالعات پیشین) به سازه‌های واقعی نزدیک شود. بر همین اساس در ایجاد خروج از مرکزیُت در این سازه‌ها، به منشأ پیدایش این خروج از مرکزیُت در سازه‌های واقعی توجُه شده است. سازه‌های مورد مطالعه، محدودهٔ سازه‌های هشت، چهارده و بیست طبقه را شامل می‌شود و برای مدلسازی اعضاء نیز، از روش‌هایی استفاده شده است که با دقّت قابل قبولی رفتار غیرخطی اعضاء بتن‌آرمه تحت بار زلزله را، مدلسازی می‌کند.

در بسیاری از مطالعات قبلی، از تحریکات یک‌بعدی استفاده شده است و صرفاً عناصر مقاوم موازی با تحریک زلزله مدل شده است. بنابراین جهت روشن شدن اثرات مدلسازی سه‌بعدی سیستم‌های نامتقارن (در نظر گرفتن عناصر مقاوم عمود بر جهت نامتقارنی[2])، در این تحقیق هر دو حالت حضور و یا عدم حضور عناصر مقاوم عمود بر جهت نامتقارنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدیهی است که برای هر یک از دو حالت مذکور، باید مؤلّفهٔ دوم تحریک، به تناسب حذف و یا اضافه شود.

با توجُه به پیچیدگی‌های مسئله پیچش و تعدُد پارامترهای مؤثر و همچنین تنّوع نتایج محقّقین مختلف در سیستم‌های با خروج از مرکزیُت یک جهتی، اثرات خروج از مرکزیُت دو جهتی تا حد زیادی مورد غفلت واقع شده است. در این مطالعه تلاش شده است تا با مقایسهٔ اثرات خروج از مرکزیُت دو جهتی با یک جهتی، پیرامون اهمیُت در نظر گرفتن این مسئله، نقطه نظراتی ارائه شود.

به دلیل تفاوت ماهیت تحریکات نزدیک به گسل[3] و مقایسهٔ آثار آن‌ها با تحریکات عادی زمین[4]، در دههٔ اخیر این تحریکات مورد توجُه محقّقین قرار گرفته است. در این مطالعه نیز با استفاده از هر دو نوع تحریک (عادی و نزدیک به گسل)، تلاش شده است تا تفاوت‌های احتمالی آن‌ها در اثرات پیچشی بر روی سازه‌های نامتقارن، بررسی و ارزیابی شود.

---

[1] Ductility demand

[2] Orthogonal elements

[3] Near-fault ground motions

[4] Far-fault ground motions

۱-۴- فصل‌بندی پایان‌نامه

مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه، علاوه بر فصل حاضر در شش فصل دیگر تنظیم شده است. در فصل دوم، به بررسی مطالعات قبلی پیرامون پاسخ پیچشی سازه‌های نامتقارن پرداخته شده است. با توجُه به گستردگی و تنّوع این مطالعات، در این فصل، مطالعاتی که در آن‌ها به مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل اثرگذار بر رفتار سازه‌های نامتقارن پرداخته شده است، مرور گردیده است. بر این اساس ابتدا مطالعات مربوط به پاسخ الاستیک و سپس مطالعات مربوط به پاسخ غیرالاستیک این‌گونه سازه‌ها مرور شده است. در ادامه، مطالعات مربوط به تأثیر حضور عناصر مقاوم متعامد و تحریک دوبعدی، مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعدی تحقیقاتی که با هدف بهبود ملاحظات طراحی سیستم‌های نامتقارن یک طبقه انجام گردیده، مرور می‌شود و در ادامه، تحقیقات مربوط به تعمیم نتایج سیستم‌های یک طبقه به سیستم‌های چند طبقه، بررسی شده است. همچنین مطالعات مرتبط با روش طراحی ظرفیت[1]در سیستم‌های نامتقارن نیز در این فصل مرور شده است. در پایان نیز، سایر تحقیقاتی که به مسائلی از قبیل اثرات پیچش تصادفی و نرمی دیافراگم پرداخته‌اند، به اجمال مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در فصل سوم، روند بسط مدل‌های نامتقارن شرح داده شده است. در این راستا، ابتدا مدل‌های رفتاری دیوار برشی مقایسه شده و پس از آن، بر اساس مدل صحیح‌تر، انواع خروج از مرکزیُت که در این مطالعه بررسی می‌شود، شرح داده شده است. در ادامه نیز، روند طراحی قاب خمشی و اضافه شدن دیوارهای برشی به آن، به تفصیل ارائه شده است. در پایان نیز، مشخّصات مدل‌های هشت، چهارده و بیست طبقه مورد استفاده در این تحقیق، ارائه می‌شود.

فصل چهارم، به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود. ابتدا نحوۀ مدل‌سازی اعضاء بتن‌آرمه شامل تیر، ستون و دیوار برشی شرح داده شده است. بر این اساس، نحوۀ مدل‌سازی رفتار غیرخطی خمشی اعضای تیر (با استفاده از رابطۀ لنگر-انحناء)، نحوۀ مدل‌سازی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در اعضای ستون (با استفاده از المان الیافی[2]) و نحوۀ مدل‌سازی اعضای دیوار برشی (با استفاده از المان پانل[3]) و اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در این اعضاء (با استفاده از المان الیافی)، شرح داده شده است. در بخش بعدی، تحریکات مورد استفاده در این تحقیق معرُفی شده است و خصوصیات عمومی آن‌ها ارائه شده است. در بخش انتهایی نیز، معادلات حاکم بر سیستم و روش حلّ آن‌ها ذکر شده است.

---

[1] Capacity design method
[2] Fiber element
[3] Panel element

فصل پنجم، به ارائه نتایج مربوط به مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق که دارای خروج از مرکزیّت‌های متفاوت هستند، اختصاص دارد. بر این اساس، مدل‌های مورد استفاده دارا ی خروج از مرکزیّت جرم، خروج از مرکزیّت سختی نوع اوّل و خروج از مرکزیّت سختی نوع دوم (که در فصل سوم شرح داده خواهد شد)، تحت تحریکات عادی و نزدیک به گسل قرار گرفته و نتایج به دست آمده، در این فصل ارائه شده است. نتایج این تحلیل‌ها به دو صورت ارائه شده است؛ نخست تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) دیوارهای طره‌ای موجود در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه به صورت کلّی[1] و دوم به صورت توزیع تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه در تمامی طبقات[2].

فصل ششم، به ارائه نتایج حاصل از تحلیل کلّیهٔ مدل‌های بسط داده شده در این مطالعه که معرّف سازه‌های کوتاه تا بلند بوده و دارای خروج از مرکزیّت جرم یک جهتی و دو جهتی می‌باشند، اختصاص دارد. در این فصل برای هر سازهٔ نامتقارن سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است: (۱) خروج از مرکزیّت یک جهتی و حذف دیوارهای جهت متعامد تحت تحریک یک مؤلّفه‌ای؛ (۲) خروج از مرکزیّت یک جهتی و اضافه شدن دیوارهای جهت متعامد تحت تحریک دو مؤلّفه‌ای؛ (۳) خروج از مرکزیّت دو جهتی و حضور دیوارهای جهت متعامد تحت تحریک دو مؤلّفه‌ای. تحریکات استفاده شده دراین فصل نیز به دو دستهٔ عادی و نزدیک به گسل تقسیم می‌شود. نتایج تحلیل‌های این فصل نیز، به دو صورت ارائه شده است؛ نخست تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) دیوارهای طره‌ای موجود در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه به صورت کلّی و دوم به صورت توزیع تقاضای شکل‌پذیری (نرمال شده نسبت به حالت متقارن) در لبهٔ نرم و لبهٔ سخت سازه در تمامی طبقات.

در نهایت، در فصل هفتم نتایج کلّی این تحقیق گردآوردی شده است و پیشنهاداتی نیز برای تحقیقات آینده ارائه شده است.

---

[1] Global ductility demand
[2] Story ductility demand

فصل دوم

پیشینهٔ علمی موضوع

۲- ۱- مقدمه

تحقیقات زیادی در مورد حرکت پیچشی سازه‌های ساختمانی انجام شده است. این مطالعات دربرگیرندهٔ رفتار الاستیک و غیرالاستیک مدل‌های یک طبقه و چند طبقه بوده‌اند. هدف از مطالعات مذکور، تعیین پارامترهای مهم و محدودهٔ بحرانی تأثیر آن‌ها بر رفتار و طرّاحی سازه‌ها و ارائه توصیه‌های طراحی مبتنی بر نتایج بدست‌آمده، می‌باشد. اما به دلیل پیچیدگی مسئله و تعداد زیاد پارامترهای مؤثّر، نتایج مطالعات گوناگون در همه موارد سازگار نیست. معمولاً نتایج این تحقیقات، تنها برای مدل‌های مطالعه شده و نیز پارامترهای خاص استفاده شده به‌همراه فرضیات متناظر آن‌ها، قابل اعتماد است. ولی به هر حال، این مطالعات یک فهم عمومی و درک کلّی از ماهیت پاسخ پیچشی سازه‌ها و پارامترهای حاکم بر آن‌ها را ارائه می‌کند. با توجّه به گستردگی و تنّوع این مطالعات، در این فصل مهم‌ترین و تأثیرگذارترین آن‌ها مرور شده است.

۲-۲- پاسخ پیچشی در محدودهٔ رفتار الاستیک

پاسخ لرزه‌ای سازه‌های الاستیک خطی که مرکز جرم آن‌ها از مرکز سختی فاصله دارد، بوسیله محقّقین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در برخی مطالعات ابتدایی که توسط Ayre (۱۹۵۶) [۸]، Housner و Outinen (۱۹۵۸) [۹]، Medearis (۱۹۶۶) [۱۰] و Rosenblueth و Elorduy (۱۹۶۹) [۱۱] انجام گرفت، مدل‌های جرم متمرکز مورد استفاده قرار گرفته است. همزمان در مطالعات دیگری که توسط Berg (۱۹۶۲) [۱۲]، Hoerner (۱۹۷۱) [۱۳] و Gibson و همکاران (۱۹۷۲) [۱۴] انجام پذیرفت، از مدل‌هایی با جرم گسترده استفاده شد. این مطالعات به دو نتیجه اصلی منجر شد؛ نخست آن‌که لنگر پیچشی دینامیکی، ممکن است از مقداری که از در نظر گرفتن برش افقی و خروج از مرکزیّت (به طور استاتیکی) بدست می‌آید، به طور قابل ملاحظه‌ای تجاوز کند و دوم آن‌که اگر فرکانس‌های طبیعی سیستم برای حرکات انتقالی و پیچشی به هم نزدیک باشند، این حرکات بسیار به هم وابسته‌اند. آزمایشاتی که توسط Jennings و همکاران (۱۹۷۱) [۱۵] انجام شد، نتیجهٔ دوم را تأیید کرد.

مطالعاتی که توسط Bustamante و Rosenblueth (۱۹۶۰) [۱۶]، Jhaveri (۱۹۶۸) [۱۷] و Rosenblueth و Elorduy (۱۹۶۹) [۱۱]، انجام گرفت به این نتیجه منجر شد که وابستگی حرکت انتقالی و پیچشی[1]، باعث کاهش نیروی برش پایه می‌شود؛ اگرچه Hoerner (۱۹۷۱) [۱۳] به نتایج متناقضی رسید.

Kan و Chopra (۱۹۷۶) [۱۸]، بر اساس مطالعه طیفی پاسخ الاستیک ساختمان‌های نامتقارن، نتیجه‌گیری کردند که وابستگی جانبی-پیچشی، مقدار لنگر پیچشی را نسبت به تحلیل استاتیکی، افزایش می‌دهد؛ امّا به طور معمول برش پایه را کاهش می‌دهد. Dempsey و Irvine (۱۹۷۹) [۱۹]، برش و لنگر بدون بعد را به صورت تابعی از دو پارامتر خروج از مرکزیّت بدون بعد و نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی[2]، ارزیابی کردند. در مطالعات بعدی که توسط Tso و Dempsey (۱۹۸۰) [۲۰] بر روی مدل‌های الاستیک یک طبقه نامتقارن انجام گرفت، محقّقین نسبت لنگر دینامیکی به لنگر استاتیکی را به عنوان خروج از مرکزیّت دینامیکی تعریف کردند و آن را به عنوان معیاری از اثرات پیچشی، لحاظ کردند. با استفاده از این تعریف مشخص شد که اثرات پیچشی برای یک محدوده مشخص از نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی (۱/۲۵ – ۰/۸) چشمگیرتر است.

مطالعات بعدی Dempsey و Tso (۱۹۸۲) [۲۱] و Tso (۱۹۸۳) [۲۲] نشان داد که بیشینه تغییر مکان لبه‌ای[3]، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری (نسبت به بیشینه لنگر پیچشی) از اثرات پیچش، ارائه می‌کند. این موضوع، باعث تعریف

---

[1] Torsional coupling

[2] Uncoupled frequency ratio

[3] Maximum edge displacement

مفهومی به نام خروج از مرکزیّت لبه‌ای موثر شد. خروج از مرکزیّت لبه‌ای موثر عبارتست از فاصله مرکز سختی تا نقطه‌ای که باید برش استاتیکی اعمال شود، تا همان جابجایی لبه‌ای که از آنالیز دینامیکی بدست می‌آید حاصل شود. برای یک ساختمان با خروج از مرکزیّت مشخص، Dempsey و Tso [۲۱] ثابت کردند که بیشینه خروج از مرکزیّت لبه‌ای موثر حدود ٪۵۰ تا ٪۷۵ خروج از مرکزیّت دینامیکی است. در توضیح این تفاوت باید گفت که بیشینه تغییر مکان لبه‌ای ناشی از پاسخ انتقالی و پیچشی در آنالیز دینامیکی (برعکس آنالیز استاتیکی)، لزوماً در یک لحظه اتفاق نمی‌افتد.

۲-۳- پاسخ پیچشی در محدودهٔ رفتار غیرالاستیک

هر چند آثار پیچش بر روی پاسخ الاستیک خطی ساختمان‌ها به خوبی تبیین شده است، اما این نتایج قابلیت اعمال مستقیم بر روی محاسبه نیروهای طراحی لرزه‌ای اکثر سازه‌ها را ندارد. زیرا سازه‌های ساختمانی معمولاً به این منظور طراحی می‌شوند که طی زلزله‌های شدید، تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای بعد از تسلیم را تجربه کنند. یکی از مسائلی که در بررسی پاسخ پیچشی سیستم‌های نامتقارن در محدوده رفتار غیرالاستیک، وجود دارد این است که پارامترهای بسیار بیشتری برای معرفی خصوصیات سیستم در مقایسه با سیستم الاستیک متناظر، مورد نیاز است. برای یک مدل یک طبقه، برخی از این پارامترها عبارتند از: توزیع مقاومت[1]، خروج از مرکزیّت مقاومت[2]، تعداد عناصر مقاوم موازی جهت زلزله، سهم عناصر مقاوم متعامد در سختی پیچشی، خروج از مرکزیّت جرم و محدوده محتوای فرکانسی تحریک.

مطالعات Syamal و Pekau (۱۹۸۵) [۲۳] نشان داد که آثار وابستگی پیچشی در سیستم غیرالاستیک مشابه سیستم الاستیک است. مطالعهٔ Kan و Chopra (۱۹۸۱) [۲۴] نشان داد که اثر وابستگی پیچشی در محدوده غیرالاستیک به طور کلی، کمتر از پاسخ الاستیک است و بعد از اوّلین تسلیم، پاسخ اصلی سیستم به صورت انتقالی خواهد بود. این بدین معنی است که رفتار سیستم شبیه یک سیستم یک درجه آزادی خواهد شد. لازم به ذکر است که این مطالعه با استفاده از یک مدل دارای یک عنصر مقاوم، انجام شده بود. این نتیجه با یافته‌های Irvine و Kountouris (۱۹۸۰) [۲۵] تطابق داشت. در این مطالعه [۲۵] همچنین نتیجه‌گیری شده بود که تقاضای شکل‌پذیری در عناصر مقاوم، نسبت به خروج از مرکزیّت سختی و نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی، حساسیتی نشان نمی‌دهد. همچنین آن‌ها تصریح کرده بودند که افزایش تقاضای شکل‌پذیری نسبت به سیستم متقارن، در قابی که بدترین

---

[1] Strength distribution

[2] Strength eccentricity