بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه ملایر

دانشکده عمران و معماری- گروه مهندسی‌عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش سازه)

رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با مهار زانویی

به وسیله‌ی:

علیرضا بازوند

استاد راهنما:

دکتر امین محب‌خواه

استاد مشاور:

دکتر علیرضا جهان‌پور

شهریور ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

اکنون مجالیست تا سپاسگزار زحمات و دلسوزی اساتید بزرگوار این دوره‌ی تحصیلی بخصوص استاد راهنمای ارجمندم آقای دکتر محب‌خواه باشم که بر من منت نهادند و راهگشای راهم بودند.

نام خانوادگی دانشجو : بازوند نام : علیرضا
عنوان پایان نامه : رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با مهار زانویی
استاد راهنما : دکتر امین محب خواه استاد مشاور : دکتر علیرضا جهانپور
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: عمران گرایش: سازه دانشگاه ملایر–گروه: عمران تاریخ فارغ التحصیلی : شهریور ۱۳۹۲ تعداد صفحات: ۱۲۰
کلید واژه: قاب خمشی فولادی، مهار زانویی، تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل استاتیکی غیر خطی، پارامترهای لرزه‌ای

چکیده:

یکی از سیستم‌های مقاوم که در مناطق لرزه‌خیز بکار می‌روند قاب‌های خمشی فولادی می‌باشند که دارای شکل‌پذیری خوبی هستند لیکن از لحاظ سختی و کنترل جابجایی‌ها دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. اخیراً سیستمی تحت عنوان قاب خمشی با مهارزانویی معرفی شده است که با اضافه کردن عضوهای زانویی به قاب خمشی معمولی در محاذات اتصالات خمشی به عنوان فیوزهای سازه‌ای، رفتار لرزه‌ای قاب خمشی اولیه بهبود می‌یابد. نظر به اینکه در خصوص شناسایی رفتار این قبیل قاب‌ها مطالعات بسیار اندکی انجام شده و تاثیر عضوهای زانویی در پاسخ لرزه‌ای آنها مشخص نیست، در تحقیق حاضر به بررسی نیاز لرزه‌ای–غیرخطی آنها پرداخته می‌شود. برای این منظور، رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی معمولی با مهار زانویی برای سه نوع مدل ۳، ٦ و ۱۰ طبقه با تعداد دهانه‌های مختلف، با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی و تحلیل استاتیکی غیرخطی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقادیر ضریب اضافه مقاومت این قبیل قاب‌ها و نیاز محوری ستون‌های آنها

از آنچه در آیین‌نامه‌ها برای قاب‌های خمشی پیشنهاد شده متفاوت است. همچنین با مقایسه پارامترهای لرزه‌ای قاب‌های خمشی و قاب‌های با مهارزانویی مشخص شد که با اضافه کردن عضوهای زانویی، پارامترهای ضریب رفتار، سختی، مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌ها افزایش می-یابد؛ به نحوی که با طراحی قاب خمشی معمولی(ضریب رفتار ۳/۵) و اضافه کردن المان‌های زانویی به آن می‌توان با قابلیت اطمینان بالایی از آن به عنوان جایگزینی برای قاب خمشی متوسط(ضریب رفتار ۵) استفاده نمود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ ضرورت انجام پژوهش ٤

۱-۳ ساختار پژوهش ٥

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ پیشینه تحقیقات در زمینه قاب مهاربندی با مهارزانویی ۹

۲-۳ پیشینه تحقیقات در زمینه قاب خمشی با مهار زانویی ۱۷

۲-٤ خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه نیاز لرزه‌ای سازه‌ها ۲۹

۲-٥ جمع‌بندی ۳۱

فصل سوم: روش تحقیق و اعتبار سنجی

۳-۱ مقدمه ۳۳

۳-۲ تحلیل دینامیکی ۳٥

۳-۲-۱ تعریف خصوصیات مصالح در آنالیز دینامیکی ۳۷

۳-۲-۲ تحلیل دینامیکی نموی(IDA) ۳۸

۳-۳ معرفی نرم افزار Seismostruct ٤٠

۳-٤ روش مدل سازی المان زانویی کمانش پذیر ٤٧

۳-۵ صحت سنجی نرم فزار با یک کار آزمایشگاهی ٤٩

فصل چهارم: جزئیات طراحی و نتایج تحلیل قاب‌ها

٤-۱ مقدمه ۵٤

٤-۲ طراحی قاب‌ها ۵۵

٤-۳ جزئیات طراحی قاب‌های خمشی پایه ۵۸

٤-٤ طراحی قاب‌های با مهار زانویی ٦۲

٤-٤-۱ طراحی مهارهای زانویی برای مقاطع تیرها ٦۲

٤-٤-۲ روش کنترل ستون‌ها در قاب با مهار زانویی ٦٤

٤-٤-۳ راهبرد ستون ثقلی معادل ٦٤

٤-۵ شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی ٦۸

٤-٦ نتایج تحلیل قاب‌ها ۷۱

٤-۷ تحلیل استاتیکی غیر خطی ۸۲

٤-۷-۱ روش محاسبه ضریب رفتار ۸٤

٤-۷-۲ نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی ۹۰

٤-۸ نتایج تحلیل دینامیکی نموی ۹۵

٤-٩ جمع‌بندی ٩٦

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

٥-١ مقدمه ٩٨

٥-٢ نتیجه‌گیری ٩٨

٥-٣ پیشنهادات ١٠١

پیوست الف جزئیات طراحی مهار زانویی ١٠٢

پیوست ب کنترل ظرفیت محوری ستون برای نیروی محوری نظیر تسلیم‌شدگی مهار زانویی..... ١٠٤

پیوست ج جزئیات نیروهای حاصل از تحلیل دینامیکی ١٠٧

پیوست د نمودارهای دوخطی منحنی ظرفیت قاب‌ها ١١٢

منابع و مآخذ ١١٧

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ مدل‌های مصالح قابل استفاده در نرم افزار seismostruct ٤٣

جدول ۳-۲ مشخصات فولاد مورد استفاده در اعضای سازه‌ای ٤٤

جدول ۳-۳ نمودارهای هیسترزیس جهت مدل کردن لینک‌ها ٤٥

جدول ٤-۱ پارامترهای طراحی قاب‌های خمشی فولادی مطابق ASCE7-10 ..... ٥٦

جدول ٤-۲ طبقه بندی ساختگاه ها بر اساس جدول 20.3-1 از ASCE-7 ..... ٥٦

جدول ٤-۳ ترکیبات بارگذاری مورد استفاده جهت طراحی ٥٧

جدول ٤-٤ جزئیات طراحی قاب‌های خمشی پایه ٥٩

جدول ٤-٥ پارامترهای مورد استفاده در طراحی المان زانویی ٦٣

جدول ٤-٦ ابعاد مقطع مهارهای زانویی متناظر با هر تیر ٦٣

جدول ٤-۷ جزئیات مدل‌سازی قاب‌های با مهار زانویی ٦٥

جدول ٤-۸ رکوردهای زلزله با ضرایب مقیاس برای سازه‌های مختلف ٦٩

جدول ٤-۹ اضافه مقاومت کلی قاب‌های مورد بررسی ۷۲

جدول٤-۱۰ نیروی الاستیک ، نیروی دینامیکی و ضرایب اضافه مقاومت ستون‌ها در مدل‌های ۳ و ٦ طبقه ۷٤

جدول٤-١١ نیروی الاستیک ، نیروی دینامیکی و ضرایب اضافه مقاومت ستون‌ها در مدل‌های ١٠طبقه ٧٥

جدول٤-١٢ نمودارهای اضافه مقاومت ستون‌ها برای مدل‌های قاب با مهار زانویی ٧٦

جدول٤-١٣ نمودارهای جابجایی نسبی میان طبقه‌ای برای مدل‌های قاب با مهار زانویی ... ٧٩

جدول٤-١٤ محدوده قابل قبول تغییر مکان جانبی برای سطوح عملکرد مختلف قابها ٨٤

جدول٤-١٥ مقایسه نمودارهای ظرفیت قاب‌های خمشی و قاب با مهار زانویی ٨٧

جدول٤-١٦ پارامترهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل استاتیکی و دینامیکی برای قاب‌های با مهار زانویی ٩٢

جدول٤-١٧ مقایسه‌ی نموداری مقاومت و سختی قاب‌های خمشی پایه با، قاب با مهار زانویی ٩٣

جدول٤-١٨ مقایسه سختی و مقاومت مدل‌های قاب خمشی و قاب خمشی با مهار زانویی ٩٥

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ شمای کلی قاب خمشی با مهار زانویی ٤

شکل ۲-۱ انواع پیکربندی‌های مختلف قاب با مهارزانویی ۹

شکل ۲-۲ مقایسه رفتار الاستوپلاستیک قاب واگرا و قاب با مهارزانویی ۱۰

شکل ۲-۳ مقایسه رفتار قاب با مهارزانویی و قاب واگرا برای سازه‌های چند طبقه..... ۱۰

شکل ۲-٤ نمونه قاب مورد بررسی توسط بالندرا ۱۱

شکل ۲-۵ نمودار هیسترزیس نمونه آزمایشگاهی ۱۱

شکل ۲-٦ جزئیات اتصال مهارزانویی با سخت کننده‌ی برشی ۱۲

شکل ۲-۷ مدل‌های قاب بتنی با مهارهای مورد بررسی توسط اکبری و ماهری ۱۳

شکل ۲-۸ مقایسه نمودار ظرفیت قاب با مهارهای X و زانویی و بدون مهار ۱۳

شکل ۲-۹ قاب‌های مورد بررسی توسط هانگ ژن ١٤

شکل ۲-۱۰ مقایسه نمودار ظرفیت قاب‌های مورد بررسی توسط هانگ ژن ۱۵

شکل ۲-۱۱ انواع قاب‌های با مهار زانویی مورد بررسی توسط میری و همکاران..... ۱۵

شکل ۲-۱۲ مقایسه ضریب شکل‌پذیری در قاب‌ها توسط میری و همکاران ١٦

شکل ۲-۱۳ مقایسه ضریب اضافه مقاومت قاب‌ها توسط میری و همکاران ١٦

شکل ۲-۱٤ مقایسه ضریب رفتار قاب‌ها توسط میری و همکاران ۱٦

شکل ۲-۱۵ جزئیات مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک و کمانش و تسلیم المان زانویی در قاب خمشی با مهار زانویی ۱۷

شکل ۲-۱٦ جزئیات نیروهای ایجاد شده در مفاصل پلاستیک قاب خمشی با مهار زانویی ۱۹

شکل ۲-۱۷ مقاومت مورد نیاز مهار زانویی برای نسبت‌های مختلف L_k / L و θ ۲۰

شکل ۲-۱۸ جزئیات قاب خمشی با المان زانویی و مقطع تیر ثابت آزمایش شده توسط لاتاویوات و همکاران(برحسب میلی‌متر) ۲۱

شکل ۲-۱۹ نمودار هیسترزیس قاب با مقطع تیر ثابت ۲۱

شکل ۲-۲۰ کرنش هم‌پایه شده اعضای کلیدی نمونه تیر با مقطع ثابت ۲۲

شکل ۲-۲۱ جزئیات قاب خمشی با المان زانویی و مقطع تیر کاهش یافته آزمایش شده توسط لاتاویوات و همکاران(ابعاد بر حسب میلی‌متر)..... ۲۳

شکل ۲-۲۲ نمودار هیسترزیس قاب با مقاطع کاهش یافته ۲۳

شکل ۲-۲۳ نمودار مقایسه پوش دو نمونه آزمایشگاهی ۲٤

شکل ۲-۲٤ ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل تحلیلی قاب سه طبقه ۲۵

شکل ۲-۲۵ نحوه توزیع تنش در قاب و محل تشکیل مفاصل پلاستیک ۲٦

شکل ۲-۲٦ جزئیات قرارگیری مهار زانویی در قاب و اتصالات ورق‌ها و تیر به ستون ۲۷

شکل ۲-۲۷ تسلیم ورق مستهلک کننده‌ی انرژی ۲۷

شکل ۲–۲۸ مقایسه اتلاف انرژی در مقابل جابجایی نسبی ۲۸

شکل ۲–۲۹ مقایسه نمودار هیسترزیس مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی ۲۹

شکل ۲–۳۰ نسبت اضافه مقاومت در قاب‌های مهاربندی شده همگرا در دو نوع قوی(خط پر) و ضعیف(خط‌چین) در قاب‌های ۳، ۹ و ۱۸ طبقه ۳۰

شکل۳–۱ فلوچارت کلی انجام پایان‌نامه و نتایج حاصل از آن ۳٤

شکل۳–۲ نمودار جابجایی در مقابل شتاب طیفی افزاینده ۳۹

شکل۳–۳ نمودار تغییرات احتمال وقوع شکست در مقابل شتاب طیفی ٤۰

شکل۳–٤ مقطع گسسته تیر بتن مسلح و تقسیم بندی المان‌ها ٤۱

شکل۳–۵ مدل ساده شده‌ی عضو کمانش پذیر..... ٤۷

شکل۳–٦ مقطع عضو مدل‌سازی شده، الگوی بارگذاری..... ٤۸

شکل۳–۷ مقایسه نتایج آنالیز نرم افزاری و نتایج آزمایشگاهی عضو زانویی مورد بررسی توسط نصراله‌بیگی..... ٤۹

شکل۳–۸ نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی قاب خمشی با مهار زانویی ۵۰

شکل۳–۹ الگوی بارگذاری مدل آزمایشگاهی ۵۰

شکل۳–۱۰ مدل‌سازی نرم افزاری نمونه آزمایشگاهی قبل وبعد از بارگذاری ۵۱

شکل۳–۱۱ مقایسه نمودار هیسترزیس مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری ۵۲

شکل ٤–۱ پلان سازه سه دهانه با ابعاد مساوی ٤متری ۵۸

شکل ٤-٢ شتابنگاشت زلزله‌ی لوماپریتا گیل‌روی ٦٩

شکل ٤-٣ طیف شتاب زلزله‌ی لوماپریتا گیل‌روی برای میرایی ٥درصد ٦٩

شکل ٤-٤ طیف طراحی ASCE و طیف‌های مقیاس نشده به همراه طیف میانگین ٧٠

شکل٤-٥ طیف طراحی ASCE وطیف‌های مقیاس شده برای سازه سه طبقه ٧٠

شکل ٤-٦ طیف طراحی ASCE و طیف‌های مقیاس شده برای سازه شش طبقه ٧٠

شکل ٤-٧ طیف طراحی ASCE و طیف‌های مقیاس شده برای سازه ده طبقه ٧١

شکل ٤-٨ نمودار مقایسه اضافه مقاومت‌های کلی قاب‌ها ٧٢

شکل ٤-٩ شکل کلی منحنی ظرفیت و پارامترهای لرزه‌ای ٨٣

شکل ٤-١٠ مقایسه ضریب رفتار قاب‌های با مهار زانویی بر اساس تحلیل دینامیکی ٩٢

شکل ٤-٥ مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی نموی و تحلیل استاتیکی غیر خطی برای قاب سه طبقه سه دهانه ٩٦

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

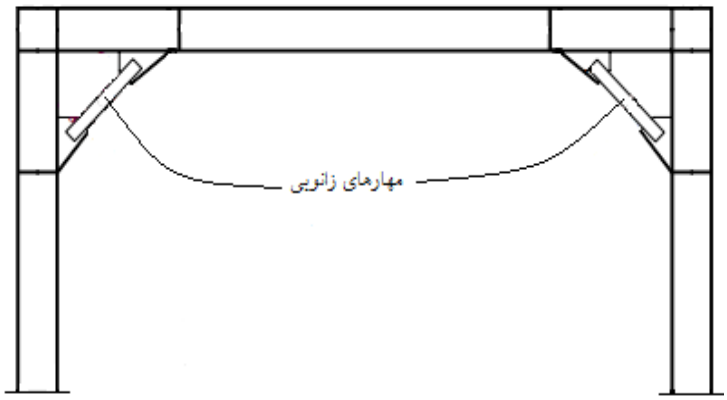
زلزله یکی از مهیب‌ترین حوادث طبیعی است که هر ساله در نقاط مختلف دنیا رخ می‌دهد و ویرانی‌هایی را در پی دارد. در طول تاریخ انسان به دنبال پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لرزه بوده است تا از خطرات و خسارات مالی و جانی آن بکاهد. با پیشرفت علم و ظهور تکنولوژی‌های مدرن نظیر رایانه‌ها که امکان تحلیل و پردازش داده‌ها را فراهم کرده است، بشر به شناخت گسترده‌ای از پدیده‌ی زلزله و مسائل مرتبط با آن دست یافته و رفتار سازه‌ها را در حین وقوع زمین‌لرزه تا حدودی قابل پیش‌بینی کرده است. از اینرو اقدام به ساخت سازه‌هایی کرده که در مقابل زلزله مقاوم و بهینه بوده و قابلیت بهره‌برداری خود را پس از وقوع زمین‌لرزه حفظ کنند. از جمله سیستم‌های سازه‌ای مقاوم می‌توان به قاب‌های خمشی فولادی و قاب‌های مهاربندی همگرا اشاره کرد که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، از طرفی این سیستم‌ها با توجه به نحوه‌ی طراحی و اجرا با نقطه ضعف‌هایی همراه هستند که ممکن است منجر به ایجاد شرایطی شوند که عملکرد مطلوب و مورد انتظار آنها را محدود کنند. قاب‌های خمشی بر اساس میزان شکل‌پذیری خود به قاب‌های خمشی ویژه، متوسط و معمولی تقسیم‌بندی می‌شوند. قاب‌های خمشی به دلیل سختی محدود، هنگامی که تحت اثر ارتعاشات شدید قرار می‌گیرند تغییرشکل‌های نسبتاً زیادی را تجربه می‌کنند و این امر ممکن است باعث بروز مشکلاتی در رابطه با کنترل تغییرشکل‌های جانبی گردد؛ قاب‌های مهاربندی عمدتاً با عملکرد محوری(خرپایی) خود نیروهای جانبی را منتقل و مستهلک می‌کنند، و به همین دلیل دارای

سختی خوبی هستند لیکن رفتار چرخه‌ای مناسبی ندارند و استهلاک انرژی آنها وابسته به رفتار پس‌کمانشی عضوهای قطری است[۱-٤].

ازاینرو محققین به دنبال روش‌هایی بوده‌اند که رفتار این سیستم‌ها را بهبود بخشیده و نواقص آنها را برطرف کنند. در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ سیستمی تحت عنوان قاب مهاربندی همگرا با مهارزانویی معرفی شد و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. در این سیستم از یک عضو زانویی به عنوان فیوز سازه‌ای استفاده می‌شود بطوریکه در بارهای رفت و برگشتی تسلیم شده و عمده‌ی تغییرشکل‌های غیرالاستیک سیستم به آن محدود شود و مهاربند اصلی الاستیک باقی بماند، بنابراین پس از وقوع زلزله در صورت بروز خرابی، المان زانویی قابلیت تعمیر و جایگزینی دارد؛ از طرفی شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی سیستم قاب همگرا با استفاده از این تکنیک بهبود یافته است[۵-۱۲].

یکی دیگر از سیستم‌هایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است استفاده از مهارزانویی در قاب‌های خمشی فولادی(KBMF)[1] مطابق شکل۱-۱ می‌باشد. در این سیستم که ویژگی‌های اصلی قاب‌های مهاربندی و قاب‌های خمشی را بطور توأمان دارا می‌باشد عضوهای زانویی طوری طراحی می‌شوند که بخشی از تغییرشکل‌های غیرالاستیک به عضو زانویی و بخشی دیگر به تیر میانی طبقه محدود می‌شود و سایر اعضا الاستیک باقی می‌مانند. همانطور که اشاره شد قاب‌های خمشی فولادی با توجه به جزئیات‌بندی[2] و سطح عملکردی که از آن‌ها انتظار می‌رود شکل‌پذیری خوبی دارند اما سختی[3] الاستیک آنها کم می‌باشد. بنابراین با استفاده از مهارزانویی سختی سیستم بهبود قابل ملاحضه‌ای یافته و در مواردی باعث افزایش شکل-پذیری[4] می‌شود[۱۳-۱٤].

[1] Knee Braced Moment Frame
[2] Detailing
[3] Stiffness
[4] Ductility



شکل۱-۱ شمای کلی قاب خمشی با مهار زانویی[۱۳]

۱-۲ ضرورت انجام پژوهش

با توجه به توضیحات بخش قبلی مبنی بر بکار بردن قاب‌های خمشی فولادی با مهار زانویی به عنوان یک سیستم باربر جانبی و روشی جهت مقاوم‌سازی و بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، شایسته است که نحوه‌ی پاسخ و عملکرد این نوع سیستم در برابر نیروهای زلزله به طور جامع و همه جانبه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در زمینه مفهوم قاب خمشی با مهارزانویی و روش طراحی آن، همچنین استفاده از ورق‌های مستهلک کننده‌ی انرژی و مکانیزم‌های تسلیم آنها، در قالب کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی مطالعاتی انجام شده است؛ اما به نظر می‌رسد برای مطرح شدن این سیستم در قالب یک روش استاندارد شده و نظام‌مند که قابلیت اطمینان کافی از لحاظ روش طراحی و نحوه‌ی اجرا و کاربرد در طرح‌های مهندسی را داشته باشد، نیاز به مطالعات بیشتری دارد. از جمله مواردی که بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد، ارزیابی پارامترهای طرح لرزه‌ای این سیستم سازه‌ای است؛ پارامترهای مهم در طراحی شامل: ضریب رفتار(R_u)، اضافه مقاومت کلی(Ω_o)، اضافه مقاومت ستون‌ها و ضریب شکل‌پذیری(μ) می‌باشند. با توجه به عدم شناخت جامع این سیستم و نحوه پاسخ مدل‌های

چند دهانه- چند طبقه، تاکنون در هیچ‌کدام از آیین‌نامه‌های معتبر از این سیستم به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی زلزله نام برده نشده است.

با توجه به نیاز شناخت این سیستم و عدم آگاهی کافی از آن، در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی بزرگ مقیاسِ قاب‌های خمشی با مهارزانویی و به کارگیری روش‌های تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی، سعی در ارزیابی پارامترهای لرزه‌ای و عملکرد این سیستم مقاوم لرزه‌ای می‌شود. از جمله اهدافی که در این پژوهش، علاوه بر محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای دنبال می‌شود عبارتست از بررسی این موضوع که با طراحی قاب خمشی پایه به صورت قاب خمشی معمولی و اضافه کردن مهارهای زانویی به آن می‌توان از آن به عنوان قاب جایگزینی برای قاب خمشی متوسط استفاده کرد یا خیر؟ به عبارت دیگر آیا شکل‌پذیری مورد انتظار قاب خمشی متوسط (که در قالب ضریب رفتار ارائه می‌شود) در این سیستم جدید محقق می‌شود یا خیر؟

۱-۳ ساختار پژوهش

ساختار کلی این پژوهش مشتمل بر چهار فصل می‌باشد. فصل دوم خلاصه تحقیقات شاخص در زمینه قاب‌های مهاربندی با مهار زانویی و قاب‌های خمشی با مهار زانویی را ارائه می‌کند. فصل سوم مربوط به روش کار و اعتبارسنجی می‌باشد؛ این فصل به توضیح مختصری در مورد روش تحلیل دینامیکی و نرم‌افزار Seismostruct[۱۵] که جهت انجام تحلیل‌ها از آن استفاده می‌شود، می‌پردازد. مطابق با روش طراحی قاب خمشی با مهارزانویی، عضوهای زانویی که به قاب‌ها اضافه می‌شوند کمانش‌پذیر هستند ازاینرو جهت مدل‌سازی آنها در نرم-افزار از یک روش دقیق و معتبر استفاده خواهد شد. جهت مدل‌سازی قاب‌ها بایستی از صحت مدل‌سازیِ نرم‌افزار اطمینان حاصل شود بنابراین نتایج نرم‌افزار مورد نظر با یک کار آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود. در فصل چهارم فرآیند طراحی، مدل‌سازی، تحلیل و تفسیر