پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکترا

مهندسی عمران – مهندسی زلزله

موضوع

بکارگیری انرژی ورودی برای بهینه سازی ویژگی‌های هیسترتیک سازه ها

(مطالعه موردی بر روی قابهای خمشی فولادی)

دانشجو

فرزان حداد شرق

استاد راهنما

دکتر محمود حسینی

استاد مشاور

دکتر محسن غفوری آشتیانی

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

آنانکه بدون همراهی ایشان انجام این پژوهش
ممکن نبود، به دختر و همسرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده

فصل اول مقدمه و مروری بر ادبیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- درآمدی بر کاربرد مفهوم انرژی در مهندسی زلزله ۶

۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده ۱۰

فصل دوم مفهوم انرژی ورودی لرزه‌ای ۱۸

۲-۱- معادلات تعادل انرژی ۱۹

۲-۲- اختلاف انرژی مطلق و نسبی ۲۲

۲-۳- ارتباط انرژی ورودی با تبدیل فوریه تابع تحریک ۲۲

فصل سوم طیف پاسخ خطی انرژی ورودی و جایگاه آن در بین طیفهای دیگر پاسخ ۲۵

۳-۱- طیف پاسخ و تاریخچه آن ۲۶

۳-۱-۱- طیف پاسخ ۲۶

۳-۱-۲- سیر تکوین طیف پاسخ ۲۸

۳-۲- پریود غالب در طیف‌های سه گانه جابجائی، شبه سرعت و شبه شتاب ۲۹

۳-۲-۱- رابطه طیف شبه سرعت با طیف سرعت نسبی ۳۳

۳-۲-۲- رابطه طیف شبه شتاب با طیف سرعت نسبی ۳۸

۳-۳- طیف انرژی ورودی لرزه‌ای و جایگاه آن ۴۲

۳-۳-۱- معادله انرژی ورودی در حوزه فرکانس ۴۲

۳-۳-۲- رابطه انرژی ورودی با طیف سرعت نسبی ۴۵
۳-۳-۳- جایگاه طیف انرژی ورودی ۴۷
۳-۳-۴- ارزیابی نتایج بدست آمده ۴۹
۳-۴- طیف طرح الاستیک انرژی ورودی ۵۲
۳-۴-۱- طیف طرح پیشنهادی هاوسنر ۵۲
۳-۴-۲- طیف طرح انرژی ورودی برای زلزله‌های ایران ۵۵
۳-۴-۳- طیف انرژی ورودی برای ده شتاب نگاشت مبنا ۵۵
۳-۵- خلاصه فصل ۵۷

فصل چهارم انرژی ورودی لرزه ای به سازه های چند درجه آزاد خطی ۵۸
۴-۱- تعریف انرژی ورودی لرزه‌ای در سازه‌های چند درجه آزاد ۵۹
۴-۱-۱- انرژی ورودی لرزه‌ای مطلق به سازه‌های چند درجه آزاد ۵۹
۴-۱-۲- انرژی ورودی لرزه‌ای نسبی به سازه‌های چند درجه آزاد ۶۰
۴-۲ - انرژی ورودی مودال ۶۰
۴-۲-۱- انرژی ورودی مودال در صورت ثابت بودن طیف ورودی ۶۳
۴-۳- خلاصه فصل ۶۵

فصل پنجم کمینه‌سازی انرژی ورودی در حوزه خطی با توزیع بهینه سختی در ارتفاع سازه‌های برشی ۶۶
۵-۱- طرح مسئله کمینه‌سازی انرژی ورودی بر اساس بهینه‌سازی توزیع سختی در محدوده خطی ۶۷
۵-۱-۱- کمینه‌سازی با محوریت شتاب نگاشت ۶۷
۵-۱-۲- کمینه‌سازی با محوریت طیف انرژی ورودی ۷۳
۵-۱-۲-۱- شرط کافی برای ثابت بودن طیف انرژی ۷۳
۵-۱-۲-۲- امکان‌پذیر بودن اصولی کمینه‌سازی انرژی ورودی ۷۵

۵-۲- راهبرد کمینه‌سازی انرژی ورودی ۷۶
۵-۲-۱- نتایج کمینه‌سازی برای سازه‌های کوتاه تا متوسط برش ۸۱
۵-۲-۲- نتایج کمینه‌سازی برای سازه‌های بلند برش ۸۵
۵-۳- تاثیر تحلیل مرتبه دوم ۸۶
۵-۳-۱- اثر بار محوری بر سختی سازه‌های برشی ۸۸
۵-۳-۲- اثر بار محوری در مسئله بهینه‌سازی توزیع سختی ۹۲
۵-۴- اثر توزیع جرم ۹۴
۵-۵- خلاصه فصل ۹۴

فصل ششم تاثیر ویژگی‌های سازه یک‌درجه آزاد بر انرژی ورودی و هیستـرتیک در محدوده رفتار غیر خطی ۹۶
۶-۱- مبانی مطالعه رفتار هیسترتیک سازه های یک درجه آزاد ۹۷
۶-۱-۱- شتابنگاشتهای مورد استفاده ۹۸
۶-۱-۲- تابع نیروی مقاوم یا منحنی رفتار چرخه‌ای سازه ۹۹
۶-۲- پارامترهای مورد مطالعه و برنامه های مورد استفاده ۱۰۲
۶-۳- بررسی نتایج ۱۰۳
۶-۳-۱- تاثیر شتاب اوج بر انرژی ورودی و انرژی تلف شده هیسترتیک ۱۰۳
۶-۳-۱-۱- اثبات ریاضی وجود رابطه خطی بـین شـتاب اوج و سـرعت معـادل انرژی ورودی ۱۰۷
۶-۳-۱-۲- اثبات ریاضی وجود رابطه خطی بین شتاب اوج و سرعت معادل انرژی هیسترتیک ۱۰۹
۶-۳-۲- تاثیر میرائی و سخت شدگی کرنشی بر طیف انرژی ۱۱۰
۶-۳-۳- رابطه انرژی ورودی و انرژی تلف شده هیسترتیک ۱۱۵
۶-۴- خلاصه فصل ۱۲۰

فصل هفتم تاثیر توزیع سختی بر انرژی لرزه‌ای در سازه های واقعی با رفتار چرخه‌ای ۱۲۱
۷-۱- طرح مسئله و رهیافت حل آن ۱۲۲
۷-۱-۱- ویژگیهای سازه های مورد مطالعه ۱۲۴
۷-۱-۲- ویژگیهای طراحی سازه های مورد مطالعه ۱۲۶
۷-۱-۳- مقاومت اعضا ۱۲۸
۷-۲- مسائل مرتبط با تحلیل غیر خطی ۱۲۹
۷-۲-۱- انتخاب شتابنگاشت ۱۲۹
۷-۲-۲- مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها ۱۳۰
۷-۲-۳- مدل رفتاری اعضای سازه ۱۳۳
۷-۳- شاخص های ارزیابی ۱۳۴
۷-۳-۱- شاخص خسارت مبتنی بر تغییر سختی اعضا (محرز- خشائی) ۱۳۵
۷-۳-۲- شاخص انگ و پارک ۱۳۶
۷-۳-۳ شاخص های دیگر ۱۳۷
۷-۴- بررسی نتایج تحلیل‌ها ۱۳۷
۷-۴-۱- انرژی ورودی ۱۳۷
۷-۴-۲- توزیع انرژی هیسترتیک در ارتفاع ۱۴۲
۷-۴-۳- برش پایه ۱۴۳
۷-۴-۴- لنگر واژگونی ۱۴۳
۷-۴-۵- جابجایی نسبی طبقات ۱۴۵
۷-۴-۶- جابجایی نسبی بام به تراز پایه ۱۴۶
۷-۴-۷- شاخص خسارت انگ و پارک ۱۴۷
۷-۴-۸- شاخص خسارت محرز – خشائی ۱۴۹
۷-۵- تحلیل حساسیت ۱۵۰
۷-۵-۱- اثر میرایی ۱۵۰

۷-۵-۲- اثر شتاب اوج ۱۵۱
۷-۵-۳- اثر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم ۱۵۲
۷-۶- مقایسه اقتصادی ۱۵۳
۷-۶-۱- رهیافت حل مسئله ۱۵۳
۷-۷- خلاصه فصل ۱۵۵

فصل هشتم جمع بندی و نتیجه گیری ۱۵۷
۸-۱- ترسیم خطوط اصلی رساله ۱۵۸
۸-۲- طیف پاسخ انرژی ورودی در حوزه رفتار خطی ۱۵۸
۸-۳- انرژی ورودی به سازه های چند درجه آزاد ۱۵۸
۸-۴- توزیع بهینه سختی در محدوده رفتار خطی ۱۵۹
۸-۵- انرژی لرزه ای در سازه های یکدرجه آزاد در محدوده غیر خطی ۱۶۰
۸-۶- ارزیابی نتایج در سازه های واقعی تحت تحلیل غیر خطی ۱۶۰
۸-۷- نتایج و خلاصه تحقیق ۱۶۱
۸-۸- پیشنهاد برای تحقیقات آینده ۱۶۳

مراجع ۱۶۵

پیوست اول شتابنگاشتهای بانک داده آشتیانی برای تحلیلهای غیر خطی
پیوست دوم تاثیر ویژگی‌های سازه یک‌درجه آزاد بر انرژی ورودی و هیستر تیک در محدوده رفتار غیر خطی
پیوست سوم مشخصات سازه‌های مورد استفاده در تحلیلهای غیر خطی

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱): رفتار معکوس در تحلیل مودی غیر خطی استاتیکی ۸

شکل (۱-۲): طیف‌های مورد مطالعه در تحقیقات آکی یاما ۱۲

شکل (۲-۱): تاریخچه زمانی انرژی ورودی به سازه‌ها ۲۱

شکل (۳-۱): طیف پاسخ جابجائی و طیف شبه شتاب نرمال شده A/g مربوط به زلزله ثبت شده در دوم اکتبر سال ۱۹۳۳ در پایانه زیرگذر لس‌آنجلس ۲۹

شکل (۳-۲): طیف های سه گانه جابجائی نسبی – شبه سرعت و شبه شتاب زلزله طبس ۳۰

شکل (۳-۳): طیف طرح استاندارد سه جانبه در کاغذ لگاریتمی چهارجانبه ۳۰

شکل (۳-۴): ویژگی عمومی توابع در ربع اول صفحه مختصات دکارتی ۳۲

شکل (۳-۵): نمودار مربع تابع پاسخ فرکانس ۳۵

شکل (۳-۶): چگالی طیفی کانای-تاجیمی برای سه ساختگاه مختلف ۳۶

شکل (۳-۷): شدت چگالی طیفی پاسخ و تحریک (کانای-تاجیمی برای آبرفت) و مربع تابع فرکانس با ضریب میرائی ده درصد ۳۷

شکل (۳-۸): ارتعاش فرضی سازه با فرکانس طبیعی بالا تحت اثر زلزله ۳۸

شکل (۳-۹): مقایسه طیف‌های سرعت نسبی و شبه سرعت برای نسبت میرائی صفر ۳۹

شکل (۳-۱۰): مقایسه طیف‌های سرعت نسبی و شبه سرعت برای نسبت میرائی پنج درصد ۴۰

شکل (۳-۱۱): مقایسه طیف‌های شبه شتاب و مقدار تقریبی آن برای نسبت میرائی پنج درصد ۴۱

شکل (۳-۱۲): طیف‌های چهارگانه برای میرائی ده درصد ۵۱

شکل (۳-۱۳): طیف‌های انرژی ورودی هاوسنر ۵۳

شکل (۳-۱۴): طیف‌های طرح الاستیک انرژی ورودی برای زلزله‌های ایران ۵۶

شکل (۳-۱۵): طیف‌های الاستیک انرژی ورودی برای ده شتاب‌نگاشت مبنا ۵۶

شکل (۵-۱): مدل‌های تیر خمشی و برشی برای سازه‌های پیوسته ۶۷

شکل (۵-۲): منحنی تغییرات تابع $F(\omega)$ ۷۴
شکل (۵-۳): روند نمای بهینه‌سازی توزیع سختی در ارتفاع ۷۶
شکل (۵-۴): روند نمای کنترل محاسبه انرژی ورودی از راه طیفی ۷۷
شکل (۵-۵): تغییرات بهینه سختی در سازه‌های برشی ۸۰
شکل (۵-۶): تغییر شکل بهینه سازه ۸۱
شکل (۵-۷): مراحل تشکیل تغییر شکل بهینه ۸۱
شکل (۵-۸): تغییرات برش با فرض خطی بودن تغییر شکل مودال ۸۲
شکل (۵-۹): برازش منحنی بر توزیع ارتفاعی سختی ۸۴
شکل (۵-۱۰): تغییر شکل و توزیع سختی بهینه برای سازه های برشی کوتاه تا متوسط ۸۵
شکل (۵-۱۱): توزیع سختی بهینه در سازه های برشی بلند ۸۶
شکل (۵-۱۲): بررسی اثر بار محوری بر تغییر شکل سازه ۸۷
شکل (۵-۱۳): تاثیر بارگذاری جانبی بر تغییر بار محوری ستونها ۸۸
شکل (۵-۱۴): ستون معادل برای یک طبقه از ساختمان با سازه برشی ۸۹
شکل (۵-۱۵): پارامترهای بکار رفته در معادلات شیب افت ۹۰
شکل (۶-۱): برخی مدلهای رایج برای رفتار چرخه ای مصالح و اعضای فولادی ۹۹
شکل (۶-۲): منحنی انحنا – لنگر همپایه شده و ضرائب شکل برای مقاطع مختلف ۱۰۰
شکل (۶-۳): مدل اصلاح شده کلاف برای رفتار کاهندگی یا زوال سختی ۱۰۱
شکل (۶-۴): مدل رفتار کاهندگی یا زوال سختی و مقاومت ۱۰۱
شکل (۶-۵): مدل دوخطی ارتجاعی – خمیری با سختی بعد به قبل از تسلیم پنج در صد ۱۰۲
شکل (۶-۶): طیف های همپایه شده پاسخ خطی برای شتابنگاشت شماره ۸ ۱۰۳
شکل (۶-۷): تاثیر مقدار شتاب اوج بر انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد، نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم صفر و شکل‌پذیری‌های مختلف ۱۰۴
شکل (۶-۸): تاثیر مقدار شتاب اوج بر انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد، نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم پنج درصد و شکل‌پذیری‌های مختلف ۱۰۵

شکل (۶-۹): تاثیر مقدار شتاب اوج بر انرژی هیسترتیک برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم پنج درصد و شکل‌پذیری‌های مختلف ۱۰۶
شکل (۶-۱۰): تاثیر نسبت میرائی و مقدار سخت‌شدگی کرنشی بر انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با ضرایب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۲
شکل (۶-۱۱): تاثیر میرائی بر انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با سختی بعد از تسلیم صفر و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۳
شکل (۶-۱۲): تاثیر میرائی بر انرژی هیسترتیک برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با سختی بعد از تسلیم صفر و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۴
شکل (۶-۱۳): تاثیر میرائی بر نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با سختی بعد از تسلیم صفر و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۵
شکل (۶-۱۴): تاثیر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم بر انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۶
شکل (۶-۱۵): تاثیر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم بر انرژی هیسترتیک برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۷
شکل (۶-۱۶): تاثیر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم بر نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد و ضرائب شکل‌پذیری مختلف ۱۱۸
شکل (۶-۱۷): تاثیر مقدار سخت‌شدگی کرنشی بر نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی برای سازه‌های یک‌درجه آزاد با میرائی پنج درصد و شکل‌پذیری‌های مختلف ۱۱۹
شکل (۷-۱): نمای قاب‌های مورد استفاده در تحلیل غیرخطی ۱۲۳
شکل (۷-۲): تغییرات سختی یکنواخت،خطی و بهینه در ارتفاع ۱۲۵
شکل (۷-۳): شکل مود اصلی نوسان (همپایه شده) ۱۲۶
شکل (۷-۴): توزیع تغییر شکل نسبی طبقات ۱۲۷
شکل (۷-۵): تغییر شکل همپایه شده سازه تحت تحلیل طیفی ۱۲۸

شکل (۷-۶): تاثیر اعمال ضریب مقیاس بر طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل غیرخطی سازه ۵ طبقه ۱۳۲
شکل (۷-۷): تاثیر اعمال ضریب مقیاس بر طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل غیرخطی سازه ۱۲ طبقه ۱۳۲
شکل (۷-۸): تاثیر اعمال ضریب مقیاس بر طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل غیرخطی سازه ۱۶ طبقه ۱۳۳
شکل (۷-۹): تاثیر اعمال ضریب مقیاس بر طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل غیرخطی سازه ۲۰ طبقه ۱۳۳
شکل (۷-۱۰): مدل پنج خطی مورد استفاده برای مدل سازی رفتار غیرخطی اعضای سازه ۱۳۴
شکل (۷-۱۱): همبستگی شاخص خسارت محرز- خشائی با انرژی ورودی لرزه‌ای ۱۳۶
شکل (۷-۱۲): *(*: تاریخچه زمانی تیپ انرژی ورودی به سازه‌ها ۱۳۹
شکل (۷-۱۳): تاثیر توزیع سختی بر انرژی تلف شده ۱۴۰
شکل (۷-۱۴): تاثیر توزیع سختی بر انرژی ورودی در انتهای زلزله ۱۴۱
شکل (۷-۱۵): تاثیر توزیع سختی بر انرژی ورودی بیشینه ۱۴۲
شکل (۷-۱۶): تاثیر توزیع سختی برتوزیع انرژی تلف شده در ارتفاع ۱۴۳
شکل (۷-۱۷): تاثیر توزیع سختی بر برش پایه ۱۴۴
شکل (۷-۱۸): تاثیر توزیع سختی بر لنگر واژگونی ۱۴۵
شکل (۷-۱۹): تاثیر توزیع سختی بر توزیع جابجائی نسبی طبقات ۱۴۶
شکل (۷-۲۰): تاثیر توزیع سختی بر جابجائی نسبی بام به تراز پایه ۱۴۷
شکل (۷-۲۱): توزیع شاخص خسارت انگ و پارک در ارتفاع سازه‌ها ۱۴۸
شکل (۷-۲۲): توزیع شاخص خسارت محرز و خشائی در ارتفاع سازه‌ها ۱۴۹
شکل (۷-۲۳): متغیرهای تعریف‌کننده مقطع تیر ورقها ۱۵۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱): پارامترهای رابطه کانای تاجیمی ۳۵

جدول (۳-۲): شتاب‌نگاشت‌های مورد مطالعه ۴۹

جدول (۳-۳): پریودهای غالب در طیف‌های شتاب‌نگاشت‌های مورد مطالعه ۵۰

جدول (۳-۴): نتیجه مطالعات آماری روابط پیشنهادی ۵۰

جدول (۳-۵): پارامترهای طیف‌های طرح الاستیک انرژی ورودی زلزله‌های ایران ۵۵

جدول (۵-۱): توابع پایداری و مقایسه ضرائب سختی دقیق و تقریبی ۹۲

جدول (۷-۱): انتخاب شتاب‌نگاشت برای تحلیل غیرخطی ۱۲۵

جدول (۷-۲): شتاب‌نگاشت‌های پیشنهادی برای گروه‌های مختلف سازه‌ها بر پایه پریود ۱۳۰

جدول (۷-۳): ضرائب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده برای تحلیل غیر خطی سازه ۵ طبقه ۱۳۱

جدول (۷-۴): ضرائب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده برای تحلیل غیر خطی سازه ۱۲ طبقه ۱۳۱

جدول (۷-۵): ضرائب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده برای تحلیل غیر خطی سازه ۱۶ طبقه ۱۳۱

جدول (۷-۶): ضرائب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده برای تحلیل غیرخطی سازه ۲۰ طبقه ۱۳۲

جدول (۷-۷): نتایج تحلیل غیرخطی بر انرژی ورودی، انرژی ورودی بیشینه و انرژی تلف شده ۱۳۸

جدول (۷-۸): نسبت انرژی تلف شده بر انرژی ورودی و انرژی ورودی بیشینه ۱۳۹

جدول (۷-۹): شاخص خسارت انگ – پارک برای کل سازه ۱۴۸

جدول (۷-۱۰): شاخص خسارت محرز – خشائی برای کل سازه ۱۴۹

جدول (۷-۱۱): تاثیر میرایی بر شاخص‌های انرژی ورودی لرزه‌ای ۱۵۰

جدول (۷-۱۲): تاثیر میرایی بر برش پایه و لنگر واژگونی ۱۵۱

جدول (۷-۱۳): تاثیر شتاب اوج زلزله بر شاخص‌های انرژی ورودی ۱۵۱

جدول (۷-۱۴): تاثیر شتاب اوج زلزله بر برش پایه و لنگر واژگونی ۱۵۲

جدول (۷-۱۵): تاثیر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم بر شاخص‌های انرژی ورودی ۱۵۲

جدول (۷-۱۶): تاثیر نسبت سختی بعد به قبل از تسلیم بر برش پایه و لنگر واژگونی ۱۵۳

جدول (۷-۱۷): نسبت وزن تیرهای مصرفی در حالتهای مختلف توزیع سختی ۱۵۴

چکیده

در روش طراحی بر اساس انرژی، هدف تامین ظرفیت اتلاف انرژی در سازه در برابر نیاز به مقدار انرژی لرزه‌ای ورودی است. در سالهای آغازین فلسفه طراحی بر اساس انرژی، انرژی ورودی عمدتا مستقل از ویژگی‌های سازه، از جمله توزیع سختی در ارتفاع فرض می‌شد. همچنین فرض می‌شد که در محدوده وسیعی از پریود، انرژی ورودی حتی مستقل از پریود بوده و مقدار طیفی آن ثابت می‌باشد. با توسعه بیشتر فلسفه طراحی بر اساس انرژی، این فرض مورد نقد قرار گرفت و موضوعی چالش برانگیز گردید. تمرکز اصلی این رساله، پژوهش بر روی محدوده اعتبار این فرض، و مطالعه بر روی امکاناتی است که با کنار گذاشتن آن، در طراحی بهینه سازه‌ها قابل دستیابی خواهد بود. ابتدا نشان داده می‌شود که فرض ثابت بودن مقدار طیفی انرژی ورودی صرفا فرضی ساده کننده و دور از واقعیت می‌باشد، آنگاه امکان پذیر بودن یافتن یک توزیع بهینه سختی برای کمینه کردن انرژی ورودی نشان داده می‌شود. در مرحله بعد برای سازه‌های با رفتار برشی و در محدوده خطی توزیع بهینه معرفی و نشان داده می‌شود که برای سازه‌های میان مرتبه (تا حدود ۲۰ طبقه) این توزیع را می‌توان سهموی در نظر گرفت. برای سازه‌های بلندتر، شکل توزیع با منحنی زنگی شکل انطباق بیشتری پیدا می‌کند. نشان داده می‌شود که در محدوده مورد بررسی، انرژی ورودی وقتی کمینه خواهد شد که توزیع بهینه سختی موجب یکنواختی جابجایی‌های نسبی طبقات گردد. علی رغم بهینه بودن توزیع بدست آمده، اختلاف در انرژی ورودی حاصل قابل توجه ارزیابی نمی‌شود. برای آزمودن تاثیر عملی توزیع سختی بدست آمده، چهار قاب ساختمانی ۵ ، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه و برای هر قاب سه توزیع یکنواخت، پله ای و بهینه طراحی و تحلیل غیر خطی می‌شوند. تاثیر توزیع سختی بر انرژی ورودی – انرژی هیسترتیک و برخی شاخص‌های خسارت ارزیابی می‌شود. نتایج حاصله ضمن آنکه بطور کلی بهینه بودن توزیع سختی مورد نظر را منعکس می‌کنند، در عین حال نشان می‌دهند که عملا تاثیر آن در کاهش شاخص‌های انرژی اندک، اما در کاهش شاخص‌های خسارت چشمگیر می‌باشد. این نتیجه‌گیری با برخی از تحقیقات قبلی در تناقض بوده و با برخی دیگر همسویی کامل دارد.

واژه‌های کلیدی

طراحی بر اساس انرژی، رفتار هیسترتیک، توزیع سختی، انرژی ورودی، شاخص خسارت، طیف پاسخ، تحلیل غیرخطی

فصل اول

۱-۱- مقدمه

اساس طرح لرزه ای، ایجاد تعادل بین " نیاز " و " ظرفیت " در سطح عضو و سطح سازه است. با مطالعه در سیر تکوین مهندسی زلزله، به نظر می رسد که از دوران ابتدایی این علم، " نیاز " اساسا مرتبط با ویژگی های سازه (بویژه جرم) و البته شدت تحریک فرض شده است. با توسعه دانش مهندسی زلزله، وجود ارتباط تنگاتنگ بین " نیاز " و ویژگی های سازه بیشتر روشن شد و به همین میزان طرح لرزه ای پیچیده تر گردید و " نیاز " و " ظرفیت " بسته به زاویه نگرش به مساله، تعاریف مختلفی پیدا نمود. متداولترین مبنای تعریف نیاز و ظرفیت، مقاومت می باشد که پایه و اساس کنونی آیین نامه های طرح لرزه ای را تشکیل می دهد. از دهه ۵۰ قرن بیستم مشخص گردید که " مقاومت " معیار جامعی برای تعریف نیاز و ظرفیت نمی باشد، اما سادگی و عامه فهم بودن آن باعث شد که تا زمان حاضر و البته با اعمال قیود متعدد، این روش طراحی پابرجا بماند. مهمترین ایراد وارد بر فلسفه طراحی بر اساس مقاومت، آن است که فقدان " مقاومت کافی " به تنهایی بازتابی از خسارت وارد بر سازه از زلزله نمی باشد. یک سازه با مقاومت تعریف شده، سطوح متعددی از خسارت را می تواند تجربه کند، در صورتیکه اگر ملاک صرفا مقاومت باشد، با فراتر رفتن سطح نیاز از سطح مقاومت، قاعدتا سازه بیشترین حد خسارت را باید تحمل کند.

فلسفه های دیگر طراحی، همچون طراحی بر اساس تغییر شکل و یا طراحی بر اساس انرژی، نگرشی قوی تر به تعریف " نیاز " و " ظرفیت " دارند. اینکه کدام فلسفه طراحی نگرش جامعتری به مساله دارد، به تعریف " خسارت " باز می گردد. هم مقاومت، هم تغییر شکل و هم انرژی تلف شده، شاخصی از خسارت محسوب می شوند، اما مشاهدات حاکی از آن است که یک شاخص جامع خسارت، صراحتا یا تلویحا باید هم جابجایی و تغییر شکل سازه و هم میزان اتلاف انرژی در آن را مورد توجه قرار دهد.

اگر طراحی بر اساس ظرفیت، یکی از مهمترین دستاوردهای مهندسی زلزله پذیرفته شود، به ناچار باید پذیرفت که تامین ظرفیت اتلاف انرژی در اعضای شکل پذیر، از مهمترین چالش های طرح لرزه ای کنونی می باشد. به همین دلیل است که انرژی ورودی و نحوه اتلاف آن در سازه را اساسی ترین مولفه طرح لرزه ای دانسته اند [۱]. اینکه علی رغم اهمیت این موضوع، چرا یک فلسفه طرح لرزه ای بر اساس انرژی فراگیر نشده است، اساسا ناشی از آن است که نمی توان مفاهیم مرتبط با انرژی را براحتی در قالب مفاهیم ملموسی همچون سختی و مقاومت بیان نمود [۱].

در روش طراحی بر اساس انرژی، نیاز عبارتست از مقدار انرژی وارد بر سازه از زلزله و بنابراین ظرفیت نیز عبارتست از توانایی جذب و استهلاک انرژی ورودی در اعضا. چنانچه اشاره خواهد شد، این فلسفه طراحی از نیمه دوم قرن بیستم مورد توجه محققان متعددی بوده و پژوهشهای جامعی در این خصوص صورت گرفته

است. هم تعیین نیاز و هم تخمین ظرفیت موضوع این پژوهشها را تشکیل داده است. در مراحل آغازین فرض می شد که " نیاز " تا حدود بسیار زیادی مستقل از ویژگی های سازه بوده و اساسا با ماهیت تحریک مرتبط می باشد، اما با توسعه مطالعات، نقد هایی بر این فرض وارد آمد (به شرحی که خواهد آمد) و ادعا شد که ویژگی های سازه همچون سختی، مقاومت، شکل پذیری، منحنی رفتار چرخه ای و میرایی، به اندازه تحریک در ایجاد " نیاز " که همان انرژی ورودی است موثر می باشد.

اگر تاثیر ویژگی های سازه بر مقدار انرژی ورودی مسلم فرض شود، این سوال مهم مطرح می شود که آیا با ایجاد تغییرات هدفمند در طرح یک سازه، می توان انرژی ورودی به آن و در واقع " نیاز " طراحی را تقلیل داد؟ و از این طریق ویژگی های هیسترتیک (ظرفیت محدود اتلاف انرژی در اعضا) را بهبود بخشید؟

نو آوری این رساله، نوع نگرش و پاسخ به سوال اساسی عنوان شده می باشد. اگرچه مساله توزیع سختی در ارتفاع سازه های متعارف مهندسی، کمابیش در ادبیات مورد بررسی بوده است [۲] و [۳]، اما این نگرش که توزیع بهینه ای از سختی ممکن است وجود داشته باشد که باعث کمینگی انرژی ورودی گردد، مورد بحث قرار نداشته است که البته علت این امر در فصول بعدی رساله بطور کامل تشریح خواهد شد. اگرچه در این رساله تاثیر و اندرکنش ویژگی های مختلف سازه بر انرژی ورودی مورد بررسی قرار می گیرد، اما موضوع رساله حاضر که به عنوان پایان‌نامه دکتری در مهندسی زلزله ارایه می‌شود، بررسی جنبه‌های ویژه‌ای از مفهوم انرژی ورودی لرزه‌ای و ارتباط آن با توزیع سختی در ارتفاع سازه‌های میان تا بلند مرتبه می‌باشد. ایده اصلی موضوع پایان‌نامه از برخی مسائل تاریخی ریاضیات و مهندسی سازه اقتباس شده است، مسائلی که اساساً در ارتباط با حساب تغییرات (حساب وردشها)مطرح شده و یا باعث بوجود آمدن این نگره ریاضی شده‌اند. یافتن اشکال هندسی که با ارضاء برخی قیود، ویژگی خاصی را بیشینه یا کمینه نمایند، از دیر باز مورد علاقه ریاضی‌دانان بوده است. احتمالاً مسئله "هم پیرامونی" قدیمی‌ترین مسئله در این ارتباط می‌باشد که طرح آن به دوران یونان باستان برمی‌گردد. موضوع مسئله "هم پیرامونی" یافتن منحنی بسته‌ایست که با محیط ثابت دارای بیشترین مساحت باشد. یونانیان به طور "شهودی" از جواب مسئله که "دایره" است، آگاهی داشتند، اما اثبات دقیق آن بعد از ابداع حساب تغییرات در اواخر قرن هفدهم و اوایل قرن هجدهم صورت پذیرفت [۴] (به همین دلیل در اوایل پیدایش حساب تغییرات این رشته از ریاضیات "روش هم پیرامونی" یا isoperimetric method خوانده می‌شد).

همزمان با ابداع حساب تغییرات توسط یوهان برنولی، مفاهیم مرتبط با انرژی نیز وضوح بیشتری یافتند که در این مورد نیز یوهان برنولی از جایگاه مهمی برخوردار است زیرا وی برای اولین بار در نامه‌ای به وارینیون، "اصل جابجایی‌های مجازی" را صورت‌بندی نمود[۵]. در آن دوران یکی از مسائل مورد علاقه

ریاضی‌دانان یافتن معادله تغییر شکل تیرهای الاستیک یا "منحنی‌های الاستیک" بود. دانیل برنولی در نامه‌ای به اولر، کلید یافتن منحنی‌های الاستیک را کمینه کردن انتگرال $\int \frac{ds}{r^2}$ دانسته و به وی پیشنهاد می‌کند که با استفاده از حساب تغییرات آنر موشکافی کند [۵]. انتگرال مورد اشاره دانیل برنولی از دیدگاه امروزی همان معادله انرژی کرنش تیر ($\frac{EI}{2}\int y''^2 dx$) می‌باشد زیرا:

$$\phi = \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{r} \approx y'' = \frac{M}{EI} \qquad (۱-۱)$$

$$\int \frac{ds}{r^2} = \int y''^2 . ds \approx \int y''^2 . dx \qquad (۱-۲)$$

در روابط ۱-۱ و ۱-۲ :

M : تغییرات لنگر در طول عضو

E : مدول الاستیسیته

I : ممان اینرسی

r : شعاع انحنا

θ : زاویه ممان بر منحنی

y و y'' : به ترتیب منحنی تغییر شکل و مشتق دوم آن

اولر با استفاده از حساب تغییرات و کمینه کردن انرژی پتانسیل سیستم نه تنها موفق به یافتن معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییر شکل تیرها می‌شود بلکه بار بحرانی کمانش ستونها را نیز محاسبه می‌کند. در همین ارتباط مسئله جدیدی از مجموعه مسائل "شکل‌های بهینه" تحت عنوان "ستون با بیشترین کارائی" یا "column of greatest efficiency" توسط لاگرانژ مطرح شد. مسئله عبارتست از یافتن یک منحنی مولد که با دوران حول یک محور، ستونی با بیشترین کارایی بوجود آورد. لاگرانژ کارایی ستون را نسبت بار بحرانی ستون (P) به مربع حجم ستون (V) تعریف می‌کند[۱].

[۱] بحث در خصوص جزییات این مسئله دشوار خارج از موضوع پایان‌نامه می‌باشد. علاقه‌مندان می‌توانند به مرجع ۶ مراجعه نمایند. فقط به اختصار اشاره می‌شود که نه تنها لاگرانژ بلکه سایر ریاضی‌دانان و مهندسان نیز تا نیمه دوم قرن نوزدهم موفق به حل کامل آن نشدند.

با توسعه روزافزون صنعت در قرن نوزدهم و بیستم، مسائل مهندسی بی‌شماری تحت عنوان شکل بهینه "optimal shape" مطرح شد که بدلیل تعدد پارامترهای کنترل‌کننده شکل و قیود متنوع محدودکننده آن، حل آنها از طریق روش‌های حساب تغییرات امکان‌پذیر نمی‌بود و به همین دلیل روشهای عددی بهینه‌سازی ابداع و گسترش یافتند [۷].

با توجه به مقدمه عنوان شده و قبل از پرداختن به جزییات مطالعه ی این رساله قابل ذکر است که با امکانات نرم افزاری کنونی، اصولا هر مساله مطرح در بهینه یابی و بهینه سازی امکان پذیر است، اما در اینکه این بهینه یابی ها چه ارزش فلسفی و تاثیر گذار بر مفهوم طراحی مهندسی می توانند داشته باشند، باید تامل نمود. طرح صحیح مساله باید به گونه ای باشد که ارزش اجرایی آن تضمین شده بوده و وزن مهندسی آن بیش از وزن ریاضی آن باشد. برخی از مطالعات سالهای اخیر ضمن آنکه ارزش و اهمیت خاص خود را دارند، از نقطه نظر کاربردی از اهمیت چندانی برخوردار نبوده اند زیرا نتایج بدست آمده از آنها بشدت تابع زلزله بوده و بنابراین کارآمدی خود را در عمل از دست داده اند. چنانچه در متن رساله مشاهده خواهد شد، در این مطالعه تلاش شده است تا ارزش کاربردی این تحقیق محفوظ باشد.

با این مقدمه، موضوع اصلی این پایان‌نامه را نیز می‌توان در زمره مسائل optimal shape دانست، زیرا اساساً بدنبال شکلی از تغییرات سختی در ارتفاع سازه‌هاست که متضمن کمینه بودن انرژی ورودی لرزه‌ای به سازه باشد. تلف شدن انرژی در اعضای سازه که با انرژی ورودی از زمین لرزه متناسب است، عامل اصلی خسارت ناشی از زمین لرزه محسوب می‌شود و بنابراین مطالعه در امکان کمینه کردن آن، از دیدگاه مهندسی زلزله با اهمیت خواهد بود.

در فصل اول ادبیات فنی مرتبط با این پژوهش مرور می‌شود. فصل دوم اختصاص دارد به تعریف و مبانی ریاضی محاسبه انرژی ورودی لرزه‌ای. در فصل سوم طیف انرژی ورودی لرزه‌ای و جایگاه آن در میان طیف‌های دیگر زلزله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در فصل چهارم نشان داده می‌شود که برخلاف برخی نظرات، بدست آوردن یک توزیع سختی بهینه برای کمینه‌سازی انرژی ورودی لرزه‌ای امکان‌پذیر می‌باشد. در فصل پنجم این "توزیع بهینه" در حوزه رفتار خطی سازه‌های برشی منظم بدست آمده و آثار تغییر شکلهای درجه دوم (P-Δ) در آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در فصل ششم موضوع انرژی ورودی و هیسترتیک و ارتباط آن با سایر مشخصات سازه و شدت تحریک در حوزه غیرخطی برای سازه‌های یک درجه آزاد مطالعه می‌شود. فصل هفتم اختصاص دارد به ارزیابی تاثیر توزیع سختی بهینه در رفتار واقعی (غیرخطی) سازه‌های میان مرتبه. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی رساله در فصل هشتم ارایه شده است.