بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده‌ی فنی و مهندسی
بخش مهندسی عمران

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه

ارزیابی پیچش تصادفی در سازه‌ها با درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه

استاد راهنما:
دکتر حامد صفاری

استاد مشاور:
دکتر محمدحسین باقری‌پور

مؤلف:
عبدالعلی شریف‌نسب

بهمن ماه ۱۳۹۰

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی عمران

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده‌است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : عبدالعلی شریف‌نسب

استاد راهنما : پرفسور حامد صفاری

استاد مشاور: دکتر محمدحسین باقری‌پور

داور ۱ : دکتر محمدجواد فدایی

داور۲ : دکتر حسین ابراهیمی فرسنگی

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی: دکتر سعید سریزدی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مریم احتشام‌زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

پویندگان راه علم و معرفت، آنان که در راه راستی قدم برمی‌دارند.

تشکر و قدردانی:

ستایش پروردگاری را سزاست که پرونده‌ی جهانیان است و بخشاینده ومهربان و درود او بر پیغامبری که رخساره‌ی یزدان است و راهنمای گمراهان و بر دودمان آن پیغامبر که همگی پاکانند.

راهنمایی‌های بی‌دریغ و بی‌نقص استاد ارجمند و بزرگوار، جناب آقای دکتر صفاری در طول تدوین پایان‌نامه، شایسته‌ی سپاس فراوان است. ایشان که علاوه بر علم، اخلاق وصفات انسانی را به من ارزانی نمودند، از درگاه پروردگار مهربان برای ایشان طول عمر همراه با سرفرازی و سربلندی آرزو می‌نمایم. همچنین سپاس شایسته است از زحمات استاد عالیمقدار، جناب آقای دکتر محمدحسین باقری‌پور که انجام این پایان‌نامه بدون مشاوره‌ی علمی ایشان دشوار بود و سپاس از آقایان دکتر محمدجواد فدایی و دکتر حسین ابراهیمی که افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام و زحمت داوری این پایان‌نامه بر عهده‌ی ایشان بود و سپاس فراوان از خانواده‌ام و پدر و مادر بزرگوارم که امکان انجام این پایان‌نامه بی مساعدت ایشان مقدور نبود.

و در پایان تشکر و قدردانی از همه‌ی اساتیدم و همه‌ی کسانی که به من چیزی آموختند و مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند.

چکیده:

اغلب آسیب‌های ناشی از زلزله در سازه‌ها به سبب بی نظمی در پلان آن‌هاست. پاسخ پیچشی سازه‌ها در برابر زلزله متأثر از توزیع نامتقارن جرم و سختی می‌باشد. علاوه بر آن عوامل دیگری که سنجش و پیش‌بینی آن‌ها چندان ساده نمی‌باشد نیز در پاسخ پیچشی اثرگذار می‌باشند. سختی و جرم اعضای غیر سازه‌ای که در تحلیل لحاظ نگردیده، توزیع ناشناخته و نامتقارن بارهای زنده، انعطاف‌پذیری شالوده، مؤلفه‌ی دورانی زمین و ... از جمله‌ی این عوامل می‌باشند. از اینرو پیچش به دو قسمت دینامیکی (ناشی از عدم تطابق مرکز جرم و مرکز سختی) و تصادفی (ناشی از سایر عوامل) تقسیم می‌گردد. به منظور بررسی اثر انعطاف‌پذیری شالوده و عبور امواج بر پاسخ پیچشی سازه، یک سیستم ایده‌آل‌شده متشکل از یک سازه‌ی یک طبقه‌ی نامتقارن در دو راستا به همراه پی آن واقع بر روی نیم فضـای همگن الاستیک خاک، انتخاب گردیده و مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج حاصله نشان داده‌است که لحاظ نمودن اندرکنش سبب افزایش پیچش در سازه‌های واقع بر بستر نرم می‌گردد. افزایش نسبت خروج از مرکزیت استاتیکی در سازه (e_y/e_x) ، افزایش زاویه‌ی برخورد امواج به سازه و کاهش نسبت جرمی شالوده به سازه، سبب افزایش خروج از مرکزیت و افزایش عمق دفن شالوده، سبب کاهش خروج از مرکزیت می‌گردند.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، انعطاف‌پذیری شالوده، پیچش تصادفی، عبور امواج.

فهرست مطالب

فصل اوّل: مقدّمه

۱-۱مقدّمه..... ۱
۱-۲ضرورت تحقیق..... ۴
۱-۳مطالعات انجام شده..... ۴
۱-۴روش تحقیق..... ۶
۱-۵ساختار پایان‌نامه..... ۷

فصل دوم: تحلیل دینامیکی سازه‌ها

۲-۱ هدف اساسی تحلیل دینامیکی سازه‌ها..... ۹
۲-۲ مشخصات یک مسأله‌ی دینامیکی..... ۱۰
۲-۳ روش‌های گسسته‌سازی..... ۱۱
۲-۴ فرمول‌بندی معادلات حرکت..... ۱۱
۲-۴-۱ اصل دالامبر..... ۱۲
۲-۴-۲ اصل جابجایی‌های مجازی..... ۱۳
۲-۴-۳ راه حل تغییراتی..... ۱۳
۲-۵ روش‌های حل معادله‌ی حرکت..... ۱۴
۲-۵-۱ روش جمع آثار..... ۱۴
۲-۵-۲ انتگرال‌گیری گام به گام..... ۱۵
۲-۶ حل در حوزه‌ی زمان..... ۱۸
۲-۷ حل در حوزه‌ی فرکانس..... ۱۸
۲-۷-۱ انتگرال فوریه پاسخ..... ۱۹
۲-۷-۲ تبدیلات گسسته فوریه..... ۲۰
۲-۷-۳ تبدیلات سریع فوریه..... ۲۱
۲-۷-۴ طیف فوریه..... ۲۳

فصل سوم: پیچش در سازه‌ها

۳-۱ اهمیت بررسی پیچش در سازه‌ها..... ۲۷
۳-۲ پاسخ پیچشی سیستم‌های یک طبقه..... ۳۰
۳-۳ بررسی ضوابط پیچشی آیین‌نامه‌ها..... ۳۲
۳-۳-۱ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰..... ۳۳
۳-۳-۲ آیین‌نامه‌ی EC8..... ۳۴
۳-۳-۲ آیین‌نامه‌ی NBCC..... ۳۴
۳-۳-۴ سایر آیین‌نامه‌ها..... ۳۵
۳-۳-۵ مقایسه پیچش تصادفی در آیین‌نامه‌ها..... ۳۵

فصل چهارم: اندرکنش خاک-سازه

۴-۱ مقدّمه..... ۳۸
۴-۲ امواج در محیط‌های نامحدود..... ۳۸
۴-۲-۱ امواج یک‌بعدی..... ۳۸
۴-۲-۲ امواج سه‌بعدی..... ۴۰
۴-۳ امواج در جسم نیمه‌محدود..... ۴۱
۴-۳-۱ امواج رالی..... ۴۲
۴-۳-۲ امواج لاو..... ۴۲
۴-۴ امواج در محیط‌های لایه‌ای..... ۴۳
۴-۴-۱ حالت یکبعدی..... ۴۳
۴-۴-۲ حالت سه‌بعدی..... ۴۵
۴-۵ میرایی در امواج..... ۴۶
۴-۶ تشریح اندرکنش خاک-سازه..... ۴۷
۴-۶-۱ اندرکنش جنبشی..... ۴۸
۴-۶-۲ اندرکنش اینرسی‌دار..... ۴۹
۴-۶-۳ ترکیب اندرکنش جنبشی و اینرسی‌دار..... ۴۹
۴-۷ روش‌های تحلیل و مدلسازی اندرکنش خاک-سازه..... ۴۹
۴-۷-۱ روش حل مستقیم..... ۵۰

۴-۷-۲ روش زیرسازه..... ۵۱
۴-۷-۳ روش حل مختلط..... ۵۱
۴-۷-۴ مدلسازی اندرکنش خاک-سازه..... ۵۱
۴-۸ بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه..... ۵۴
۴-۸-۱ انواع میرایی در مسألهی اندرکنش خاک-سازه..... ۵۸
۴-۹ بررسی آییننامهها..... ۶۰
۴-۹-۱ آییننامهی EC8..... ۶۰
۴-۹-۲ آییننامهی ASCE..... ۶۱

فصل پنجم: معرّفی روش پیشنهادی

۵-۱ مقدّمه..... ۶۵
۵-۲ معادلات حرکت..... ۶۵
۵-۳ خروج از مرکزیت معادل..... ۷۱

فصل ششم: مطالعهی عددی

۶-۱ مقدّمه..... ۷۵
۶-۲ رکوردهای زلزلهی مورد استفاده..... ۷۵
۶-۳ طیف آییننامهی IBC2006..... ۷۶
۶-۴ مقادیرعددی پارامترهای سیستم..... ۷۷
۶-۵ زاویهی انحراف موج..... ۷۸
۶-۶ زاویهی آزیموت..... ۸۱
۶-۷ تأثیر عمق دفن شالوده..... ۸۴
۶-۸ نسبت بی بعد جرمی..... ۸۶
۶-۹ نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی..... ۸۷
۶-۱۰ ارائهی رابطه برای خروج از مرکزیت معادل..... ۸۹

فصل هفتم: نتیجهگیری

نتیجهگیری..... ۹۷

ضمیمه

کد حل معادلات سیستم اندرکنشی.....۹۸

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: تفاوت اساسی بین بارهای استاتیکی و دینامیکی.....۱۰
شکل ۲-۲: بارگذاری دلخواه توسط سری فوریه.....۱۹
شکل ۲-۳: تقارن حول فرکانس نایکویست در داده‌های حاصل از DFT.....۲۱
شکل ۲-۴: طیف دامنه‌ی فوریه برای مؤلفه‌ی N-S رکورد زلزله‌ی Loma Perita.....۲۴
شکل ۳-۱: ساختمان ده طبقه در کوبه ژاپن.....۲۸
شکل ۳-۲: نمایش اجزای سازه ساختمان ده طبقه در پلان ۲۸
شکل ۳-۳: ساختمان ۹ طبقه در کوبه.....۲۹
شکل ۳-۴: مدل سیستم یک طبقه برای بررسی پاسخ پیچشی.....۳۰
شکل ۳-۵: نمایش خروج از مرکزیت معادل در آیین‌نامه‌ها.....۳۲
شکل ۴-۱: میله‌ی محصورشده‌ی نامحدود و نمایش تنش‌ها و تغییرمکان‌ها.....۳۸
شکل ۴-۲: حرکت ایجادشده توسط یک موج رالی.....۴۲
شکل ۴-۳: امواج سطحی و حجمی مورد توجه در مهندسی زلزله.....۴۳
شکل ۴-۴: انتشار موج یک‌بعدی در مرز مشترک مصالح.....۴۴
شکل ۴-۵: شعاع‌های منعکس شده ناشی از برخورد موج‌های مختلف.....۴۵
شکل ۴-۶: انتشار موج در چند لایه‌ی مختلف خاک.....۴۶
شکل ۴-۷: اندرکنش جنبشی.....۴۸
شکل ۴-۸: روش‌های مدلسازی اندرکنش در پی.....۵۳
شکل ۴-۹: مدل یکدرجه آزادی با قاعده‌ی انعطاف پذیر.....۵۶
شکل ۴-۱۰: فاکتورمیرایی شالوده.....۶۱
شکل ۵-۱ : سیستم ایده‌آل مورد مطالعه.....۶۶
شکل ۵-۲ : نمایش تغییرشکل‌های سیستم شالوده و سازه.....۶۷
شکل۵-۳: سیستم اندرکنشی ایده‌آل شده.....۷۰
شکل ۵-۴: نمایش پارامترهای هندسی پلان سازه.....۷۱

شکل ۶-۱ : طیف پاسخ زلزله‌ی Landers قبل و بعد از انطباق بر طیف..... ۷۶
شکل۶-۲ : طیف پاسخ زلزله‌ی Morgan قبل و بعد از انطباق بر طیف..... ۷۶
شکل ۶-۳ : زاویه‌ی انحراف امواج SV و SH..... ۷۹
شکل ۶-۴ : خروج از مرکزیت بر حسب زاویه‌ی برخورد (خاک سخت)..... ۸۰
شکل ۶-۵ : خروج از مرکزیت بر حسب زاویه‌ی برخورد (خاک نرم)..... ۸۰
شکل ۶-۶ : تأثیر نوع موج و زاویه‌ی برخورد در خروج از مرکزیت (خاک سخت)..... ۸۱
شکل ۶-۷ : تأثیر نوع موج و زاویه‌ی برخورد در خروج از مرکزیت (خاک نرم)..... ۸۱
شکل ۶-۸ : برخورد موج ورودی با زاویه‌ی آزیموت..... ۸۲
شکل ۶-۹ : خروج از مرکزیت بر حسب زاویه‌ی آزیموت (خاک سخت)..... ۸۲
شکل ۶-۱۰ : خروج از مرکزیت بر حسب زاویه‌ی آزیموت (خاک نرم)..... ۸۳
شکل ۶-۱۱ : مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری شالوده در خروج از مرکزیت (خاک سخت)..... ۸۳
شکل ۶-۱۲ : مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری شالوده در خروج از مرکزیت (خاک نرم)..... ۸۴
شکل ۶-۱۳ : خروج از مرکزیت بر حسب نسبت عمق دفن (خاک سخت)..... ۸۵
شکل ۶-۱۴ : خروج از مرکزیت بر حسب نسبت عمق دفن (خاک نرم)..... ۸۵
شکل ۶-۱۵ : مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری شالوده در خروج از مرکزیت (خاک سخت)..... ۸۶
شکل ۶-۱۶ : مقایسه‌ی انعطاف‌پذیری شالوده در خروج از مرکزیت (خاک نرم)..... ۸۶
شکل ۶-۱۷ : تغییرات خروج از مرکزیت بر حسب نسبت بی بعد جرمی(خاک سخت)..... ۸۷
شکل ۶-۱۸ : تغییرات خروج از مرکزیت بر حسب نسبت بی بعد جرمی(خاک نرم)..... ۸۷
شکل ۶-۱۹ : تغییرات خروج از مرکزیت بر حسب نسبت بی بعد فرکانسی (خاک سخت)..... ۸۸
شکل ۶-۲۰ : تغییرات خروج از مرکزیت بر حسب نسبت بی بعد فرکانسی (خاک نرم)..... ۸۹
شکل ۶-۲۱ : مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی با نتایج تحلیلی..... ۹۲
شکل ۶-۲۲ : مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی با آیین‌نامه‌ها..... ۹۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱: انواع نامنظمی در ساختمان‌ها..... ۲۷
جدول ۳-۲: ضرایب α، β و δ در آیین‌نامه‌های مختلف..... ۳۵

جدول ۳-۳: مقایسه‌ی پیچش تصادفی در آیین‌نامه‌های مختلف..... ۳۶
جدول ۴-۱: تأثیر امپدانس بر دامنه‌ی تغییرمکان امواج منعکس شده و منتقل شده..... ۴۴
جدول ۴-۲: سختی دینامیکی سازه در راکینگ..... ۶۲
جدول۶-۱: رکوردهای حرکات قوی زمین مورد استفاده..... ۷۵
جدول ۶-۲: تغییر همزمان پارامترها برای مطالعه‌ی رفتار پیچشی سیستم اندرکنشی..... ۹۰
جدول ۶-۳: ضرایب مربوط به روابط حاصله از رگرسیون غیرخطی..... ۹۱

Introduction

مقدّمه

Introduction, The nessecity of research, Pervious works, Research methodology, Structure of thesis

۱-۱-مقدّمه

مهندسی عمران، که شاید به جرأت بتوان آن را نخستین دانش مهندسی در بشر نام برد از ابتدای تاریخ پیدایش انسان سعی در بوجود آوردن زیر ساخت‌های یک تمدن برای بشریت داشته است. با توجه به نیاز بشر به زیر ساخت‌ها، این دانش در جبهه‌ی نخست پیشرفت قرار داشته‌است. البته این پیشرفت توأم با تجربه بوده‌است. یعنی تجربه‌ی قدرت‌های فوق‌العاده‌ی طبیعت مثل سیل، باد، طوفان، آتشفشان، صاعقه، زلزله، رانش زمین و... سبب گردیده که برای ساخت و ساز ابنیه‌ی مقاوم بشر به تکاپو افتد. یکی از شایع‌ترین رخدادهای طبیعی که سبب تخریب ابنیه می‌گردد، زلزله است. گرچه از ابتدای تاریخ تمدّن، تلاش برای ساخت مقاوم در برابر زلزله وجود داشته‌است امّا نخستین گام‌های مهندسی و بررسی دقیق، برای طراحی لرزه‌ای در اواخر قرن نوزدهم میلادی توسط عدّه‌ای از مهندسین اروپایی صورت گرفت [۱]. آنان پیشنهاد طراحی سازه در برابر زلزله را با درنظر گرفتن درصدی از وزن سازه به عنوان نیروی جانبی دادند. این گام‌ها در ژاپن با ارائه‌ی تئوری شبه دینامیکی ادامه یافت. به هر حال وقوع زلزله‌های شدید و میزان خرابی قابل توجه آن‌ها سبب بوجود آمدن دانش مهندسی زلزله و طراحی لرزه‌ای گردید. با گسترش دانش لرزه‌شناسی حرکات قدرتمند زمین، مورد توجه مهندسین سازه و ژئوتکنیک قرارگرفت و نخستین آیین نامه‌ها برای طراحی لرزه‌ای بوجود آمدند که در آن‌ها نیروی زلزله به‌عنوان یک نیروی استاتیکی جانبی که درصدی از جرم سازه بود، به سازه‌ی بر روی بستر صلب اعمال می‌شد. با توسعه‌ی دانش مهندسی زلزله و سازه، روش‌های دینامیکی نیز برای مدلسازی زلزله بکار گرفته شدند. مطالعات محققان و بررسی زلزله‌ها و آسیب‌های وارده به سازه‌ها در برخی موارد، نشانگر نادرست بودن فرض در نظر گرفتن تکیه‌گاه صلب برای سازه بود. به عنوان مثال در زلزله‌ی ۱۹۷۰ ترکیه قسمتی از یک کارخانه که در شهری به فاصله‌ی ۱۳۵ کیلومتر از کانون زلزله قرارداشت و درآن هیچ ساختمانی تخریب نشده بود، خراب گردید. بررسی‌ها نشان داد که زمان تناوب اصلی سازه‌ی کارخانه با خاک زیر آن همگامی داشته است[۲]. بنابراین مشخص گردید که زمین به‌عنوان یک عامل اساسی در پاسخ سازه تأثیرگذار خواهد بود.

در بحث مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، تحلیل پاسخ زمین از دو دیدگاه قابل بررسی می‌باشد. دیدگاه ابتدایی و پایه‌ای که جهت پیش‌بینی فقط حرکات زمین و تدوین طیف پاسخ طرح به‌منظور تعیین تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی برای ارزیابی خطرات روانگرایی و محاسبه‌ی نیروهای ناشی

از زلزله که می‌تواند سبب ناپایداری زمین گردند به‌کار می‌رود. در این حالت تنها، زمین بدون اثری خارجی مثل یک سازه‌ی بنا شده بر روی آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد. رفتار خاک با توجه به میزان کرنش، خطی یا غیرخطی درنظرگرفته می‌شود به این حرکات زمین که تحت تأثیر وجود سازه نیستند، حرکات «میدان آزاد زمین[1]» گفته می‌شود[۳]. هنگامی که یک سازه واقع بر بستر سنگی صلب در معرض زلزله قرار می‌گیرد، سختی بسیار زیاد سنگ سبب می‌شود که مشخصه‌های حرکات سنگ به حرکات میدان آزاد بسیار نزدیک باشد. اما از منظری دیگر اگر همان سازه بر روی یک توده‌ی خاک نرم واقع گردد، پاسخی کاملاً متفاوت خواهد داشت. چراکه اوّلاً ناتوانی شالوده در تحمل تغییر مکان‌های حرکت میدان آزاد، سبب می‌گردد که حرکت پایه‌ی سازه نسبت به حرکت میدان آزاد انحراف پیدا کند و ثانیاً پاسخ دینامیکی سازه سبب تغییرشکل خاک زیر آن می‌گردد. این روند که در آن پاسخ خاک تحت تأثیر حرکت سازه و پاسخ سازه تحت تأثیر حرکت خاک قرار می‌گیرد به «اندرکنش خاک–سازه[2]» مشهور است[۳]. از آنجایی که نیروی زلزله به مرکز جرم طبقات وارد می‌شود، اگر مرکز جرم و مرکز سختی بر هم منطبق نباشند و یا سختی پیچشی سازه کم باشد، نیروی زلزله علاوه بر نیروی انتقالی، باعث ایجاد پیچش در سازه نیز می‌گردد. به طور کلی پیچش در سازه‌ها به دو دسته تقسیم می‌گردد:

۱. پیچش دینامیکی[3] ۲. پیچش تصادفی[4]

به علت نامتقارن بودن پلان در جرم یا سختی ممکن است مرکز جرم و مرکز سختی بر هم منطبق نباشد که این فاصله را «خروج از مرکزیت » می‌نامند. خروج از مرکزیت طراحی که در آیین‌نامه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، از دو قسمت تشکیل شده‌است: قسمت نخست خروج از مرکزیت دینامیکی یا طبیعی نام دارد که به دلیل اختلاف توزیع سختی و جرم در سازه ایجاد می‌گردد. قسمت دوم «خروج از مرکزیت تصادفی» نام دارد که به دلیل عوامل متعددی چون خطا در محاسبه‌ی میزان اختلاف مرکز سختی و جرم، مؤلفه‌های دورانی زلزله، انعطاف‌پذیری شالوده و شرایط ساختگاهی بوجود می‌آید. شرایط ساختگاه و انعطاف‌پذیری آن و مؤلفه‌ی دورانی زلزله، مسأله‌ی عبور امواج، توزیع پیش‌بینی نشده‌ی بارهای زنده و عدم انطباق مرکز سختی بر مرکز جرمِ روسازه، توأمان باعث ایجاد خروج از مرکزیت و تولید پیچش در روسازه می‌گردند.

[1] -Free field motion
[2] -Soil-structure interaction
[3] -Dynamic Torsion
[4] -Accidental Torsion

۱-۲-ضرورت تحقیق

تحلیل پدیده‌ی اندرکنش خاک-سازه از آن جهت قابل اهمیت می‌گردد که خاک می‌تواند تأثیری بسیار اساسی در رفتار و پاسخ سازه نسبت به زلزله داشته‌باشد. این بدین معناست که فرض صلبیت تکیه‌گاه سازه همواره نمی‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه را دقیقاً بیان نماید. اثر اندرکنش خاک-سازه می‌تواند منجر به کاهش یا افزایش (بسته به سایر شرایط) در پاسخ سازه گردد. این مسأله زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که سازه‌ای تقریباً حجیم و سخت، بر روی خاکی نسبتاً نرم واقع گردد[۴]. از طرفی نیز فرض انعطاف پذیری تکیه‌گاه سبب پیچیدگی در تحلیل پاسخ می‌گردد[۵]. بنابراین باید در مواردی که نیاز به داشتن تحلیلی واقع بینانه‌تر از رفتار لرزه‌ای سازه می‌باشد، مسأله‌ی اندرکنش مورد توجه قرار گیرد[۶].

از منظری دیگر شرایط ساختگاه و انعطاف‌پذیری آن و مؤلفه‌ی دورانی زلزله سبب می‌گردند که امواج برخوردی به مجموعه‌ی سازه (شالوده، پی و روسازه) در نقاط مختلف یکسان نباشند. این مسأله و عدم انطباق مرکز سختی بر مرکز جرمِ روسازه، توأمان باعث ایجاد خروج از مرکزیت و تولید پیچش در روسازه می‌گردند.

وجود همزمان پدیده‌ی اندرکنش و پیچش در سازه سبب تغییر قابل توجه در پاسخ سازه می‌شود. از اینرو به منظور بررسی واقع‌بینانه‌تر رفتار سازه‌ها در زلزله، لحاظ نمودن اثرات پیچش بر روی تکیه‌گاه انعطاف پذیر ضروری به نظر می‌رسد مخصوصاً اینکه برخی آیین‌نامه‌ها به طور اجمالی و برخی بسیار کم به این مسأله توجه نموده‌اند.

۱-۳-مطالعات انجام شده

تاریخچه‌ی آغاز مطالعات اندرکنش خاک-سازه به اواخر قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد. این دانش در دهه‌های اخیر بتدریج گسترش یافته‌است. عامل اصلی توسعه‌ی آن نیاز به بهبود ایمنی لرزه‌ای در صنایع ساحلی و صنایع مرتبط با انرژی اتمی و به موازات آن، توسعه‌ی رایانه‌ها و گسترش روش‌های محاسباتی و عددی توانمند برای مدلسازی بوده‌است [۷]. در واقع اندرکنش خاک-سازه دانشی چند شاخه‌ای می‌باشد که دربرگیرنده‌ی دانش‌های مکانیک خاک و سازه، دینامیک سازه و دینامیک خاک، مهندسی زلزله و روش‌های محاسباتی و عددی می‌باشد.

در سال‌های اخیر شناخت از ساختار ایجاد زلزله و حرکات زمین، همچنین تأثیر آن بر سازه پژوهشگران را بر آن داشته تا پایداری سازه در برابر زلزله را به‌عنوان هدف مهمی در طراحی

قلمداد نمایند. تحقیقات انجام شده بر روی آسیب‌های وارده بر سازه‌های واقع در مناطق لرزه‌خیز آشکار ساخته‌است که علاوه بر وجود نیروهای جانبی زلزله، انعطاف‌پذیری بستر سازه و شرایط غیر همسان ساختگاه و مؤلفه‌های دورانی زلزله (به همراه عدم انطباق مرکز جرم و سختی) سبب ایجاد تغییر مکان‌های زیاد و تخریب در سازه می‌گردند. مثلاً در زلزله‌ی ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی بیش از ۴۰ درصد ساختمان‌ها به دلیل پیچش دچار تخریب شدند.

مفهوم خروج از مرکزیت تصادفی نخستین بار توسط نیومارک [۸] برای درنظرگرفتن ارتعاشات پیچشی ناشی از مؤلفه‌ی دورانی زلزله، پیشنهاد گردید. پس از آن محققین زیادی به بررسی خروج از مرکزیت دینامیکی و خروج از مرکزیت تصادفی با فرض تکیه‌گاه صلب برای سازه پرداختند. ولستوس و پراساد [۹] و ولستوس و تانگ [۱۰] نشان دادند که عبور امواج و اتفاقی بودن اثر امواج بر روی پاسخ سازه‌های روی بستر انعطاف‌پذیر قابل توجه می‌باشد. پاسخ پیچشی سازه‌ی واقع بر بستر نرم توسط لوکو [۱۱] مورد مطالعه قرارگرفته‌است. وی [۱۲] همچنین پاسخ پیچشی یک شالوده‌ی نیم‌کروی را در برابر امواج برشی مورد مطالعه قرار داده‌است. در این مطالعه، لوکو با مقایسه‌ی پاسخ پیچشی این شالوده با پاسخ پیچشی شالوده‌ی دیسکی دایره‌ای، به بررسی اثر مدفون شدگی شالوده، در پاسخ پیچشی سازه پرداخته‌است. آویلس و سوارِز [۱۳] به بررسی پیچش تصادفی و طبیعی در سازه‌ی یک طبقه واقع بر بستر الاستیک تحت عبور امواج پرداخته‌اند. سیواکوماران و همکارانش [۱۴] به بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه و خروج از مرکزیت در یک ساختمان ۱۰ طبقه واقع بر خاک نرم پرداخته‌اند. همچنین وو [۱۵] توابع امپدانس شالوده را در حوزه‌ی فرکانس مورد استفاده قرار داده تا به ارزیابی اندرکنش خاک-سازه و اثرات پیچشی در سازه بپردازد. چوپرا [۱۶] جزو نخستین پژوهشگرانی است که به ارزیابی مقررات آیین‌نامه‌ای وضع شده برای خروج از مرکزیت تصادفی، با استفاده از رکوردهای واقعی ثبت شده‌ی زلزله در نقاط مختلف یک ساختمان با پلان متقارن، پرداخته‌است. در این مطالعه مؤلفه‌ی دورانی زمین نیز مورد توجه قرارگرفته‌است. استاتوپولوس [۱۷] نیز به بررسی خروج از مرکزیت تصادفی در آیین‌نامه‌ها[1] پرداخته‌است. چاندلر [۱۸] به مطالعه‌ی پارامتریک پاسخ پیچشی سازه با لحاظ نمودن اندرکنش سازه و شالوده، پرداخته‌است. همچنین وی با همکاری سیکارودی [۱۹] پاسخ پیچشی سازه‌های غیر متقارن را با فرض اندرکنش شالوده و سازه بررسی کرده‌اند. در این مطالعه پاسخ پیچشی شالوده‌ی انعطاف پذیر با حالت صلب مقایسه گردیده‌است.

[1] - Euro Code 8 (EC8) , IBC

۱-۴- روش تحقیق

در این پژوهش قصد براین است که به بررسی خروج از مرکزیت تصادفی سازه در زلزله با تأکید بر وجود پدیده‌ی اندرکنش خاک-سازه و امواج برخوردی زلزله پرداخته شود.
در برخی از مطالعات پیشین در رابطه با اندرکنش خاک-سازه، اثرات اندرکنش سینماتیک (اثر عبور امواج) بمنظور سادگی مطالعات، درنظر گرفته نمی‌شد. همچنین تأثیر وجود اندرکنش خاک-سازه تنها به صورت تغییر در پریود مؤثر سیستم لحاظ می‌گردید. در واقع این مطالعات تنها به بررسی اثر اندرکنش اینرسیال می‌پرداختند. در این مطالعات با داشتن زمان تناوب مؤثر سیستم می‌توانستند با استفاده از طیف‌های موجود (محاسبه شده برای سیستم‌های با پایه‌ی گیردار) به تحلیل مسأله بپردازند. در حالیکه اثر عبور امواج تأثیر قابل توجهی در میرایی سیستم و پاسخ آن دارد. برخی مطالعات نیز به بررسی اثر اندرکنش در حوزه‌ی زمان پرداخته‌اند. اگرچه پاسخ‌های حاصله در حوزه‌ی زمان قابل درک می‌باشند، اما دشواری تحلیل اندرکنش در حوزه‌ی زمان نیز یکی از معایب این نوع تحلیل تلقی می‌گردد. استفاده از روش ترکیبی حوزه‌ی زمان-فرکانس[1] که پاسخ حاصله‌ی در حوزه‌ی فرکانس را به حوزه‌ی زمان منتقل می‌نماید، می‌تواند به عنوان راهکار بهتری تلقّی گردد. چراکه حل معادلات دینامیکی در حوزه‌ی فرکانس ساده‌تر می‌باشد و پاسخ‌ها نیز در نهایت در حوزه‌ی زمان ارائه می‌گردند. لذا در این پژوهش، رویکرد حل ترکیبی فرکانس-زمان با توجه به مزایای آن انتخاب گردیده‌است. برای تحلیل مسأله‌ی اندرکنش در این پژوهش، از روش مستقیم استفاده شده‌است. در روش مستقیم، خاک، سازه و شالوده با هم مدل می‌شوند و تحلیل در یک گام صورت می‌پذیرد. با توجه اهمیت اندرکنش سینماتیک، در اینجا نیز سعی بر آن بوده‌است تا اثرات عبور امواج در پاسخ سیستم مورد توجه قرار گیرند. از آنجایی که حل مسأله‌ی اندرکنش سینماتیک دور از توانایی اکثر برنامه‌های تجاری کامپیوتری می‌باشد و در آن-ها برای محاسبه نیاز به مشخصه‌های دقیق تحریک ورودی است تا بطور مناسب اثرات تداخل امواج و انحراف موج را مشخص کند، برای تحلیل در این پژوهش، یک سیستم ساده مدل شده تا امکان نوشتن معادله‌ی تعادل اندرکنش دینامیکی برای کل سیستم بصورت یکپارچه و حل آن با یک کد کامپیوتری فراهم گردد. سپس با استفاده از معادلات حاصله و تغییر پارامترهای مؤثر در پاسخ پیچشی سیستم اندرکنشی مورد مطالعه، به بررسی تأثیرات این پارامترها در پاسخ سیستم، پرداخته می‌شود.

[1] - Hybrid frequency time domain (HFTD)

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر هفت فصل می‌باشد. در فصل نخست بیان مقدّمه و شرح پیشنهاد موضوع، ضرورت تحقیق، کارهای قبلی صورت گرفته، روش انجام پژوهش در این پایان‌نامه و ساختار آن ذکر شده‌است. تحلیل دینامیکی سازه‌ها در فصل دوم بطور خلاصه بیان شده‌است. در فصل سوم مسأله‌ی پیچش در سازه‌ها و نحوه‌ی تحلیل آن در آیین‌نامه‌ها به صورت کاربردی در طراحی و به صورت تئوری و دقیق‌تر در تحلیل مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در فصل چهارم تحلیل اندرکنش خاک- سازه مورد بررسی قرار گرفته‌است. ابتدا تئوری انتشار امواج مورد بحث واقع شده‌است. آن‌گاه اثر عبور امواج مورد توجه قرار گرفته‌است. این فصل با بررسی حرکت آزاد زمین، تحلیل دینامیکی اندرکنش، روش‌های تحلیل اندرکنش و بیان مفهوم آن‌ها، مسائلی که در اندرکنش دخالت دارند و مبانی روش مورد استفاده در پژوهش ادامه می‌یابد. در فصل بعدی یعنی فصل پنجم سیستم اندرکنشی که برای این مطالعه و پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، معرفی شده و نحوه‌ی استخراج معادلات حاکم بر رفتار این سیستم، بیان گردیده‌است. در فصل ششم پارامترهای مؤثر بر رفتار پیچشی سیستم مورد مطالعه معرفی گردیده‌اند و همچنین با تغییر دادن این پارامترها تأثیرات آن‌ها بر پاسخ پیچشی سیستم، بررسی گردیده‌است. و با مقایسه‌ی نتایج حاصله با هم، نتیجه گیری در فصل هفتم ارائه گردیده‌است.

تحلیل دینامیکی سازه‌ها

Dynamical Analysis of Structures

Objective of analysis, Characteristics of dynamic problem, Methods of discretization, Equation of motion, methods of solution, solution in time domain, Solution in frequency domain.

۲-۱-هدف اساسی تحلیل دینامیکی سازه‌ها

هدف اولیه تحلیل دینامیکی، ارائه‌ی روش‌هایی است که توسط آن تحلیل تنش‌ها و تغییرمکان‌های ایجاد شده در هر نوع سازه‌ای، وقتی که سازه تحت یک بار دینامیکی قرار گیرد، انجام‌پذیر باشد. در واقع این روش را می‌توان بسط روش‌های استاندارد تحلیل سازه که عموماً سر و کارشان با بارهای استاتیکی است تلقی نمود، به نحوی که در این تحلیل‌ها بارهای دینامیکی را نیز بتوان مد نظر قرار داد. در این نحوه‌ی نگرش، ممکن است به وضعیت بار استاتیکی صرفاً به عنوان شکل خاصی از بار دینامیکی توجه شود. به هر حال در تحلیل سازه‌های خطی به سادگی می‌توان مؤلفه‌های استاتیکی و دینامیکی بار اعمالی را از یکدیگر تمیز داد، پاسخ هر نوع بار را جداگانه تعیین نمود و سپس پاسخ‌های هر دو مؤلفه را ترکیب کرده تا اثر کلی آن‌ها حاصل شود.

دو راهکار عمده‌ی متفاوت برای ارزیابی پاسخ هر سازه در مقابل بارهای دینامیکی وجود دارد: راهکار متعیّن[۷] و غیر متعیّن[۸]. انتخاب روش مورد استفاده در هر حالت بستگی به نحوه‌ی تعریف بار دارد. اگر تغییرات زمانی بار حتی به صورت خیلی نوسانی و یا با خصوصیت نامنظم به طور کامل شناخته شده باشد، تحلیل پاسخ هر سیستم سازه‌ای مشخص در مقابل چنین بار دینامیکی یک تحلیل نوع متعین است. از طرف دیگر، اگر تغییرات زمانی یک بار به طور کامل شناخته شده نباشد، اما بتوان آن را به شکل آماری تعریف نمود، آن را یک بار دینامیکی تصادفی[۹] نامیده و تحلیل پاسخ مربوطه، به عنوان یک تحلیل غیر متعین تعریف می‌شود.

در حالت کلی، پاسخ یک سازه در مقابل بار اعمالی دینامیکی اساساً بر حسب جابجایی‌های آن سازه بیان می‌شود. از این رو تحلیل متعین مستقیماً منجر به تعیین تاریخچه‌ی بار اعمالی می‌شود. پدیده‌های دیگر پاسخ سازه، نظیر تنش‌ها، کرنش‌ها، نیروهای داخلی و غیره معمولاً در مرحله دوم تحلیل حاصل می‌شوند. از طرف دیگر، یک تحلیل غیر متعین صرفاً ارائه کننده‌ی اطلاعاتی آماری در مورد جابجایی‌های حاصل از یک بارگذاری آماری است.

[7] - Deterministic
[8] - Nondeterministic
[9] - Random Dynamic Loading