

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٢٨

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران - سازه

# بررسی تأثیر مدل‌های اندرکنش خاک - سازه بر روی پاسخ لرزه‌ای قابهای برشی

اساتید راهنما:

دکتر محمود وفائیان

دکتر سعید مهینی

استاد مشاور: دکتر حسینعلی رحیمی

پژوهش و نگارش: بهزاد وفائیان

کتابخانه اطلاعات موزن علمی بزرگ  
تیم بهارک

۱۳۸۸/۷/۱

دی ماه ۱۳۸۲

۱۲۶۸۲۳

... من هر چه نگاه میکنم، می‌بینم هیچ کشوری از این کشورهایی که در زمینه‌های مختلف چنین پیشرفتهائی پیدا کرده‌اند، مثل کشور ما نیست! ما مظلومانه، تنها و در بین این همه دشمنیها - در حالی که هم شرق کمونیستی و هم غرب سرمایه‌داری با ما به جد دشمن بودند؛ اروپا هم که مایل بود یک نقش مثلاً میانه‌ای ایفا کند، هیچگونه کمکی به ما نکرد، بلکه ضربه هم زد - این جوانهای باهوش و زیرک و احیاناً بسیار زبل از میان ملت ما، توانستند این نهالها را رشد بدهند و به ثمر برسانند. کارهای بزرگی شده؛ این خیلی امیدبخش است. در آینده هم میتوانید این کارها را انجام بدهید. لذا من نگاهم به آینده، نگاه خیلی خوبی است؛ اگرچه وضع کنونی را قابل تحسین میدانم، اما به هیچ وجه قناعت به این وضع را مجاز نمیشمارم، برای هیچ کس: نه برای دولتیها، نه برای خود شما جوانها، نه برای اساتیدتان. ما هنوز خیلی باید راه برویم؛ خیلی باید حرکت کنیم. فاصله‌ی ما هنوز با آن قله‌ها - حتی، برخی پائین‌تر از قله‌ها - زیاد است. باید این فاصله‌ها را طی کنیم.

قسمتی از بیانات مقام معظم رهبری

دیدار نخبگان جوان دانشگاهی با رهبر انقلاب

(۱۳۸۷/۰۶/۰۵)



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای بهزاد وفائیان

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه یزد، در رشته/گرایش: عمران - سازه

تحت عنوان « بررسی تاثیر مدل‌های اندرکنش خاک - سازه بر روی پاسخ لرزه ای قابهای برشی »

وتعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۱۲

امضاء

نام و نام خانوادگی

باحضور اعضای هیات داوران متشکل از:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| دکتر سیدسعید مهینی - دکتر محمود وفائیان | ۱- استاد راهنما      |
| دکتر حسینعلی رحیمی                      | ۲- استاد مشاور       |
| دکتر شهرام وهدانی                       | ۳- داور خارج از گروه |
| دکتر نادر عبدلی یزدی                    | ۴- داور داخل گروه    |

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران، با درجه عالی و نمره

به عدد ۱۸٫۵ به حروف هیجده و پنج مورد تصویب قرار گرفت.

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام و نام خانوادگی: دکتر غلامعلی مظفری

امضاء:

مظفری

## چکیده

معمولاً تحلیل رفتار سازه‌ها تحت اثر بار زلزله به صورت مستقل از شرایط واقعی و متغیر خاک زیر آن انجام می‌گیرد و به بیانی بستر قرار گیری سازه صلب فرض می‌شود. در این شرایط تحریک لرزه‌ای به پای سازه به صورت یک جابه‌جایی یا شتاب متغیر با زمان (و یا نیروی معادل) اعمال می‌گردد. این ساده‌سازی‌ها -در هر حال- موجب تقریب‌هایی در تحلیل یک سازه در شرایط واقعی می‌گردد. آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد اینست که سازه بر روی محیط خاک به عنوان یک بستر انعطاف پذیر و به لحاظ ابعاد نیمه بینهایت (یا بدون مرز از سمتی) قرار گرفته است و ارتعاشات زلزله از طرف منبع خود با گذر از این محیط به پای سازه می‌رسد که نتیجه آن تعامل یا اندرکنش خاک و سازه است. انعطاف پذیر شدن پای سازه و خروج انرژی سیستم از طریق پراکنده شدن امواج در محیط نیمه بینهایت خاک (استهلاک تابشی) دو اثر مهم ناشی از پدیده اندرکنش خاک-سازه می‌باشد. یکی از روش‌های در نظرگیری پدیده مذکور در تحلیل سازه‌ها با فرض رفتار الاستیک خطی محیط خاک، استفاده از مدل‌های اندرکنش خاک-سازه است که در این تحقیق با بهره‌گیری از آن‌ها سازه‌هایی از نوع قاب برشی تحت بار زلزله با در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه تحلیل شده است. در فصول ابتدایی پایان‌نامه حاضر توضیحاتی درباره پدیده اندرکنش خاک-سازه همراه با فرمول‌های کلی مربوط به آن و روش‌های تحلیل بیان شده است. سپس ضمن بررسی انواع مدل‌های اندرکنش خاک-سازه و منشأ آن‌ها، رابطه کلی استفاده آن‌ها به صورت همبسته با سازه، با بهره‌گیری از روابط کلی اندرکنش-خاک سازه و بر مبنای جابه‌جایی مطلق بسط داده شده است. در کنار رابطه مذکور، معادله‌ای نیز بر مبنای جابه‌جایی نسبی (نسبت به حرکت میدان آزاد) برای تحلیل همزمان سازه‌های برشی و مدل‌های اندرکنش از مراجع در دسترس، استخراج شده است. این دو رابطه به ترتیب اساس تحلیل اندرکنش خاک-سازه در یک نرم افزار آماده اجزای محدود و کد برنامه نویسی نوشته شده، قرار گرفت. در فصول بعدی با انتخاب یک مدل مناسب خاک، ابتدا به بررسی ارتعاش پی صلب بر بستر ارتجاعی و توابع امیدانس پرداخته شد و سپس با بهره‌گیری از روابط بسط داده شده و موجود، تحلیل‌های اندرکنش خاک-

سازه با استفاده از مدل‌های متفاوت خاک و مدل قاب برشی انجام گردید که در ضمن آن نکات و موضوعات حل عددی روابط، در نرم افزار و کد نوشته شده، بررسی شد. هدف از کاربرد یک نرم افزار اجزای محدود و نوشتن کد جداگانه بر مبنای دو فرمول بندی (جابه‌جایی نسبی و مطلق)، مقایسه و کنترل صحت نتایج و بررسی امکان به کارگیری مدل‌های اندرکنش خاک-سازه در یک نرم افزار اجزای محدود می‌باشد. در انتها رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های یک تا ده طبقه تشکیل شده از قاب‌های برشی با حضور پدیده اندرکنش خاک-سازه بررسی شد. در این تحقیق از یک مدل اندرکنش با قابلیت در نظرگیری ضخامت لایه خاک استفاده شد و علاوه بر پارامتر ضخامت و خواص مکانیکی لایه خاک، تأثیر مشخصات مکانیکی و ابعادی سازه‌ها نیز بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها، تحت زلزله‌های متفاوت بررسی گردید. با تعریف مشخصات خاک، پی و سازه‌ها در حد متعارف و معمول و استخراج تغییرات و مقادیر برش پایه و جابه‌جایی رأس ساختمان‌ها تحت اثر زلزله‌های متفاوت، این نتیجه کمی و کلی حاصل شد که در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه در بعضی شرایط می‌تواند منجر به مقدار برش پایه و جابه‌جایی نسبی به ترتیب تا ۳۰٪ و ۶۰٪ بیشتر از شرایط بستر صلب شود. این در حالی است که در نقطه مقابل، کاهش ۷۰٪ نیز در مقدار برش پایه با در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه در بعضی از شرایط مشاهده گردید. این دو موضوع لزوم توجه به پدیده اندرکنش خاک-سازه در تحلیل و طراحی سازه‌های با اهمیت را از حیث ضریب اطمینان و مسائل اقتصادی، نمایان می‌کند.

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
ا	فهرست مطالب
ه	فهرست جداول
و	فهرست اشکال
<b>فصل اول : کلیات</b>	
۱	مقدمه
۴	۱-۱ مفهوم اندرکنش خاک- سازه
۸	۲-۱ روش‌های تحلیل اندرکنش خاک- سازه
۹	۱-۲-۱ روش مستقیم
۱۰	۲-۲-۱ روش زیر سازه
۱۳	۳-۲-۱ روش مختلط
۱۳	۳-۱ مقایسه روش مستقیم و زیر سازه
۱۳	۴-۱ رفتار خاک
۱۵	۵-۱ تحلیل میدان آزاد
<b>فصل دوم : تاریخچه و سابقه تحقیق</b>	
۱۹	۱-۲ تاریخچه
۲۲	۲-۲ بررسی مقالات
<b>فصل سوم : معادلات حرکت در اندرکنش لرزه‌ای خاک- سازه</b>	
۲۹	۱-۳ معادلات حرکت در روش زیر سازه
۳۱	۱-۱-۳ پی انعطاف پذیر
۳۶	۲-۱-۳ پی صلب
۳۸	۲-۲ اندرکنش سینماتیکی و اندرکنش ناشی از اینرسی
۳۸	۱-۲-۳ پی انعطاف پذیر
۴۰	۲-۲-۳ پی صلب
۴۲	۳-۳ معادلات حرکت در روش مستقیم در حوزه زمان
۴۵	۴-۳ ماتریس سختی دینامیکی خاک
۴۵	۱-۴-۳ معادلات انتشار موج و ماتریس سختی دینامیکی
۴۹	۲-۴-۳ بررسی ماتریس سختی دینامیکی خاک
۵۲	۵-۳ نگاهی به استهلاک در سیستم خاک- سازه
<b>فصل چهارم : مدل‌های اندرکنش خاک- سازه</b>	
۵۷	۱-۴ تعریف و منشأ مدل‌های اندرکنش خاک-سازه
۶۱	۲-۴ پی صلب و مدل‌های اندرکنش خاک- سازه

- ۳-۴ سیستم‌های فنر-دمپر-جرم به عنوان مدل‌های اندرکنش خاک-سازه ..... ۶۳
- ۱-۳-۴ شبیه سازی ماتریس سختی دینامیکی خاک بوسیله تابع امیدانس مدل ..... ۶۵
- ۲-۳-۴ برازش توابع امیدانس مدل و حل دقیق ..... ۶۶
- ۳-۳-۴ انواع سیستم‌های فنر-دمپر-جرم ..... ۷۰
- ۱-۳-۳-۴ سیستم بدون درجه آزادی داخلی برای محیط خاک نیمه بینهایت ..... ۷۰
- ۲-۳-۳-۴ سیستم با یک درجه آزادی داخلی برای محیط خاک نیمه بینهایت ..... ۷۲
- ۳-۳-۳-۴ سیستم با دو درجه آزادی داخلی برای محیط خاک نیمه بینهایت ..... ۷۳
- ۴-۳-۳-۴ سیستم با دو درجه آزادی داخلی برای محیط لایه خاک همگن ..... ۷۶
- ۴-۴ مدل مخروط ..... ۸۰
- ۱-۴-۴ مدل مخروط برای ارتعاش دیسک صلب سطحی بر فضای نیمه بینهایت ..... ۸۰
- ۲-۴-۴ مدل مخروط برای ارتعاش دیسک صلب سطحی بر خاک لایه‌ای ..... ۹۰
- ۵-۴ مقایسه مدل‌ها ..... ۹۳
- ۶-۴ همبسته شدن مدل‌های اندرکنش با سازه ..... ۹۴
- ۱-۶-۴ معادلات دینامیکی همبسته خاک-سازه تحت تحریک لرزه‌ای ..... ۹۵
- ۲-۶-۴ معادلات همبسته دینامیکی خاک-سازه برای قاب برشی ..... ۹۹
- ۱-۲-۶-۴ تعریف قاب برشی ..... ۹۹
- ۱-۲-۶-۴ معادلات همبسته قاب برشی و خاک ..... ۱۰۱
- فصل پنجم: استفاده از نرم افزار ..... ۱۰۶**
- ۱-۵ نرم افزار انسیس ..... ۱۰۷
- ۱-۱-۵ معرفی نرم افزار ..... ۱۰۷
- ۲-۱-۵ ساختار کلی انسیس ..... ۱۰۸
- ۳-۱-۵ موارد کاربری انسیس در این پایان‌نامه ..... ۱۱۳
- ۱-۳-۱-۵ المان‌های به کارگرفته شده ..... ۱۱۳
- ۲-۳-۱-۵ تحلیل‌های به کارگرفته شده در انسیس ..... ۱۱۶
- ۱-۲-۳-۱-۵ تحلیل مودال ..... ۱۱۶
- ۲-۲-۳-۱-۵ تحلیل هارمونیک ..... ۱۱۸
- ۳-۲-۳-۱-۵ تحلیل دینامیکی گذرا با زمان ..... ۱۲۰
- ۴-۱-۵ زبان طراحی پارامتری انسیس ..... ۱۲۶
- ۲-۵ نرم افزار متلب ..... ۱۲۸
- ۱-۲-۵ ساختار کلی متلب ..... ۱۲۸
- ۲-۲-۵ موارد استفاده از متلب در این پایان‌نامه ..... ۱۲۸
- ۳-۵ نرم افزار سایزمو-سیگنال ..... ۱۲۹
- ۴-۵ چند مثال حل شده به وسیله انسیس و متلب ..... ۱۳۱



۱۳۷	فصل ششم: بررسی و به کارگیری مدل اندرکنش خاک-سازه
۱۳۷	۱-۶ انتخاب و بررسی مدل مناسب
۱۳۸	۲-۶ پیاده سازی مدل در نرم افزار
۱۳۸	۱-۲-۶ به کارگیری مدل در نرم افزار انسیس
۱۴۱	۲-۲-۶ به کارگیری مدل در نرم افزار متلب
۱۴۲	۳-۶ بررسی تابع امیدانس تولید شده بوسیله مدل (در حوزه فرکانس)
۱۴۳	۱-۳-۶ به دست آوردن تابع امیدانس درجات آزادی پی در انسیس
۱۴۵	۲-۳-۶ ترسیم اجزای تابع امیدانس مدل
۱۵۱	۳-۳-۶ بررسی اجزای تابع امیدانس مدل
۱۵۸	۴-۶ استفاده از مدل در حوزه زمان
۱۵۸	۱-۴-۶ استفاده از مدل و نرم افزار در حوزه زمان
۱۶۰	۲-۴-۶ پاسخ مدل تحت بار هارمونیک و بار ضربه
۱۶۴	۵-۶ به کار بردن مدل به صورت همبسته با سازه در حوزه زمان
۱۶۴	۱-۵-۶ کاربرد نرم افزار انسیس
۱۶۸	۲-۵-۶ به کارگیری نرم افزار مطلب در حل معادلات همبسته خاک-سازه
۱۷۱	۳-۵-۶ مقایسه حل انسیس و حل کد نوشته شده در متلب
۱۷۸	۶-۶ تحلیل مسئله با استفاده از مدل های دیگر اندرکنش خاک-سازه
۱۸۴	۷-۶ تحلیل مسئله اندرکنش خاک-سازه در حوزه فرکانس
۱۸۹	فصل هفتم: مطالعات پارامتری
۱۹۰	۱-۷ تعریف مسئله
۱۹۱	۲-۷ بررسی رفتار سازه قرار گرفته بر لایه همگن و فضای نیمه بینهایت خاک
۲۱۲	۳-۷ بررسی پارامتری خواص فرکانسی و استهلاکی
۲۲۶	فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۲۲۶	۱-۸ نتایج
۲۲۶	۱-۱-۸ نتایج حاصل از کاربرد مدل های اندرکنش خاک-سازه و حل معادلات دینامیکی مربوط به آن
۲۲۸	۲-۱-۸ نتایج تحلیل های پارامتری رفتار لرزه ای قاب های برشی
۲۳۰	۲-۸ پیشنهادات
۲۳۲	پیوست A: تحلیل دینامیک گذرا در انسیس
۲۳۲	۱-A تحلیل دینامیکی گذرا در انسیس
۲۳۸	۲-A پیاده سازی مدل اندرکنش خاک-سازه (مدل "ولف") در انسیس
۲۴۰	۳-A تحلیل هارمونیک مدل اندرکنش خاک-سازه در انسیس
۲۴۱	۴-A مدل سازی مدل قاب برشی در انسیس

- ۵-A نمونه کدهای APDL به کار رفته ..... ۲۴۳
- ۱-۵-A تحریک لرزه‌ای پای سازه یک درجه آزادی و به دست آوردن طیف جابه‌جایی نسبی زلزله  
السنترو. .... ۲۴۳
- ۲-۵-A تحلیل ارتعاش پی و تحریک تکیه‌گاهی سازه برشی تحت بار هارمونیک در حوزه زمان ..... ۲۴۵
- ۳-۵-A تحریک لرزه‌ای سیستم مدل خاک-مدل قاب برشی (مدل اندرکنش "ولف" با دو درجه  
آزادی داخلی) ..... ۲۴۶
- ۴-۵-A تحریک لرزه‌ای سیستم مدل خاک-مدل قاب برشی؛ مدل اندرکنش با یک درجه آزادی  
داخلی ..... ۲۴۷
- ۶-A تحریک هارمونیک سیستم مدل خاک-مدل قاب برشی در حوزه فرکانس؛ مدل "ولف" ..... ۲۴۸
- پیوست B : کاربرد متلب در حل معادلات اندرکنش ..... ۲۵۴
- ۱-B الگوریتم و کد برنامه مربوط به محاسبه اندرکنش خاک-سازه ..... ۲۵۴
- ۱-۱-B توضیحات و الگوریتم تحلیل ..... ۲۵۴
- ۲-۱-B کدهای مربوط به تابع  $\text{intr}()$  و توابع وابسته ..... ۲۶۴
- ۲-B کدهای مربوط به محاسبات سازه با بستر صلب ..... ۲۷۱
- ۳-B کدهای مربوط به تحلیل ارتعاش هارمونیک و ضربه‌ای پی در حوزه زمان ..... ۲۷۴
- منابع و ماخذ ..... ۲۷۴

## فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷۱	جدول ۱-۴ ضرایب فنر-دمپر-جرم مدل شکل ۳-۴
۷۳	جدول ۲-۴ ضرایب فنر-دمپر-جرم مدل شکل ۴-۴
۷۴	جدول ۳-۴ تعریف پارامترهای بی بعد مدل
۷۴	جدول ۴-۴ رابطه ضرایب فنر، دمپر، جرم و پارامترهای بی بعد
۷۵	جدول ۵-۴ مقدار عددی پارامترهای بی بعد مدل شکل ۵-۴
۷۹	جدول ۶-۴ مقادیر پارامترهای ضرایب اجزای مدل شکل ۷-۴
۸۷	جدول ۴-۷ ضرایب فنر-دمپر-جرم در مدل مخروط
۱۴۶	جدول ۱-۶ سختی‌های استاتیکی مورد استفاده در بی بعد سازی اجزای تابع امیدانس
۱۷۸	جدول ۱-۶ الف مشخصات خاک و پی
۱۷۸	جدول ۱-۶ ب مشخصات سازه
۱۹۲	جدول ۱-۷ مشخصات مبنای خاک و پی
۱۹۲	جدول ۲-۷ مشخصات مبنای سازه
۲۰۴	جدول ۳-۷ مقایسه مشخصات پارامترهای زلزله‌های مورد استفاده
۲۱۰	جدول ۴-۷ مقایسه اثر زلزله‌های متفاوت بر اختلاف کیفی برش پایه بستر صلب و انعطاف‌پذیر
۲۱۰	جدول ۵-۷ مقایسه اثر زلزله‌های متفاوت بر اختلاف کیفی برش پایه بستر صلب و انعطاف‌پذیر
۲۲۵	جدول ۶-۷ مقایسه نتایج تحلیل هارمونیک سازه بر بستر صلب و انعطاف‌پذیر
۲۳۶	جدول ۱-A دستورات به کار رفته APDL
۲۳۹	جدول ۲-A المان‌های استفاده شده برای مدل سازی
۲۵۹	جدول ۱-B تعریف متغیرهای به کار گرفته شده در کد برنامه نویسی

## فهرست اشکال

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳.....	شکل ۱-۱ شمای کلی از مسئله اندرکنش خاک- سازه .....
۵.....	شکل ۲-۱ مقایسه پاسخ لرزه‌ای سازه بنا شده روی سنگ و خاک .....
۸.....	شکل ۳-۱ موقعیت مرز. اندرکنش در روش مستقیم و زیر سازه .....
۱۲.....	شکل ۴-۱ اندرکنش لرزه‌ای خاک- سازه با استفاده از روش زیر سازه .....
۱۴.....	شکل ۵-۱ میدان نزدیک و میدان دور .....
۱۶.....	شکل ۶-۱ نقطه کنترل در تحلیل میدان آزاد .....
۱۸.....	شکل ۷-۱ الف تحلیل یک بعدی میدان آزاد .....
۱۸.....	شکل ۷-۱ ب نمونه‌ای از تحلیل یک بعدی میدان آزاد .....
۳۱.....	شکل ۱-۳ سیستم خاک- سازه .....
۳۳.....	شکل ۲-۳ ماتریس سختی دینامیکی .....
۳۶.....	شکل ۳-۳ تعبیر فیزیکی معادلات حرکت .....
۳۷.....	شکل ۴-۳ سیستم خاک- سازه با پی صلب .....
۳۸.....	شکل ۵-۳ محیط خاک با حفاری درون آن و سطح مشترک صلب خاک- سازه .....
۴۰.....	شکل ۶-۳ تفسیر فیزیکی اندرکنش سینماتیکی و ناشی از اینرسی .....
۴۱.....	شکل ۷-۳ حرکت سینماتیکی و ناشی از اینرسی .....
۴۳.....	شکل ۸-۳ سیستم دینامیکی در روش مستقیم .....
۴۷.....	شکل ۹-۳ جابه‌جایی‌های مربوط به انتشار امواج نوع P و برشی .....
۵۰.....	شکل ۱۰-۳ چهار مود ارتعاشی متمرکز دیسک صلب در مرکز سختی آن .....
۵۱.....	شکل ۱۱-۳ نمونه‌ای از اجزای تابع امیدانس .....
۵۲.....	شکل ۱۲-۳ دیسک صلب واقع بر خاک لایه‌ای .....
۵۳.....	شکل ۱۳-۳ سیستم یک درجه آزادی با (الف) مدل استهلاک ویسکوز و (ب) استهلاک هیستریزس .....
۶۱.....	شکل ۱-۴ درجات آزادی پی صلب واقع در مرکز پی .....
۶۴.....	شکل ۲-۴ نمونه مدل با یک درجه آزادی داخلی .....
۷۱.....	شکل ۳-۴ مدل اندرکنش خاک- سازه بدون درجه آزادی داخلی .....
۷۲.....	شکل ۴-۴ مدل اندرکنش خاک- سازه با یک درجه آزادی داخلی .....
۷۴.....	شکل ۵-۴ مدل اندرکنش خاک- سازه پیشنهادی پنزین .....
۷۶.....	شکل ۶-۴ دیسک صلب روی لایه خاک همگن .....
۷۶.....	شکل ۷-۴ سیستم فنر-دمپر-جرم برای ارتعاش قائم دیسک صلب روی لایه خاک .....
۷۸.....	شکل ۸-۴ مقایسه اجزای تابع امیدانس مدل "ولف" با حل دقیق .....
۸۰.....	شکل ۹-۴ مخروط ناقص نیمه بینهایت .....
۸۲.....	شکل ۱۰-۴ مدل مخروط ارتعاش عمودی .....
۸۶.....	شکل ۱۱-۴ مدل مخروط برای ارتعاش افقی .....
۸۶.....	شکل ۱۲-۴ مدل مخروط برای ارتعاش پیچشی .....
۸۶.....	شکل ۱۳-۴ (الف) مدل مخروط برای ارتعاش گهواره‌ای، (ب) نیروهای وارده به عنصری از مخروط .....
۸۸.....	شکل ۱۴-۴ مدل فنر-دمپر-جرم برای ارتعاش گهواره‌ای .....

- شکل ۴-۱۵ مقایسه اجزای تابع امیدانس مدل مخروط با حل دقیق برای ارتعاش افقی دیسک ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۶ مقایسه اجزای تابع امیدانس مدل مخروط با حل دقیق برای ارتعاش عمودی دیسک ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷ مقایسه اجزای تابع امیدانس مدل مخروط با حل دقیق برای ارتعاش پیچشی دیسک ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۸ مقایسه اجزای تابع امیدانس مدل مخروط با حل دقیق برای ارتعاش گهواره‌ای دیسک ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۹ دیسک صلب قرار گرفته بر روی لایه خاکی واقع بر محیط نیمه بینهایت ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۰ توزیع امواج در مخروط ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۱ روند به وجود آمدن مخروط‌ها ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۲ رفتار سیستم قاب برشی ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۳ مدل ریاضی سیستم قاب برشی ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۴ رفتار لرزه‌ای مدل قاب برشی واقع بر روی خاک ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱ نمای عمومی نرم افزار انسیس ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۲ جزئیات پیش پردازشگر و پردازشگر حل ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳ جزئیات پس پردازشگرهای عمومی و تاریخچه زمانی ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۴ Beam3 المان ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۵ Combin40 المان ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۶ نمای دورانی یک المان فنر-دمپر ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷ Combin14 المان ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۸ مراحل تحلیل مودال در انسیس ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۹ مراحل تحلیل هارمونیک در انسیس ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۰ مراحل تحلیل دینامیکی گذرا در انسیس ..... ۱۲۵
- شکل ۵-۱۱ نرم افزار سائزمو-سیگنال ..... ۱۳۰
- شکل ۵-۱۲ (الف) سازه یک درجه آزادی تحت تحریک پایه، (ب) مدل اجزای محدود سازه در انسیس ..... ۱۳۱
- شکل ۵-۱۳ پاسخ سازه یک درجه آزادی در برابر تحریک هارمونیک پایه ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۱۴ شتاب‌نگاشت و جابه‌جایی زلزله‌سنترو ۱۹۴۰ ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۱۵ سازه یک درجه آزادی مدل شده در انسیس به منظور تولید طیف ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۱۶ مقایسه طیف زلزله‌سنترو به دست آمده توسط انسیس و حل مرجع ..... ۱۳۶
- شکل ۶-۱ مدل اندرکنش خاک-سازه با دو درجه آزادی داخلی ..... ۱۳۸
- شکل ۶-۲ موقعیت، شماره گره‌ها و درجات آزادی مدل ..... ۱۳۹
- شکل ۶-۳ شماره، ترکیب و نوع المان‌ها و شرایط مرزی انتهایی مدل ..... ۱۴۰
- شکل ۶-۴ اجزای تابع امیدانس پی روی فضای نیمه بینهایت ..... ۱۴۷
- شکل ۶-۵ اجزای تابع امیدانس پی روی لایه خاک برای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس ..... ۱۴۷
- شکل ۶-۶ اجزای تابع امیدانس پی روی لایه خاک برای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس ..... ۱۴۸
- شکل ۶-۷ اجزای تابع امیدانس پی روی لایه خاک برای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس ..... ۱۴۸

- شکل ۶-۸ اجزای تابع امپدانس پی روی لایه خاک برای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس. ۱۴۹.....
- شکل ۶-۹ اجزای تابع امپدانس پی روی لایه خاکبرای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس. ۱۴۹.....
- شکل ۶-۱۰ اجزای تابع امپدانس پی روی لایه خاکبرای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس. ۱۵۰.....
- شکل ۶-۱۱ اجزای تابع امپدانس پی روی لایه خاک برای مود ارتعاشی افقی و گهواره‌ای به دست آمده از انسیس. ۱۵۰.....
- شکل ۶-۱۲ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی روی حالات مختلف لایه خاک با نسبت پواسون  $\nu = 0.33$ . ۱۵۳.....
- شکل ۶-۱۳ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی روی حالات مختلف لایه خاک با نسبت پواسون  $\nu = 0.45$ . ۱۵۴.....
- شکل ۶-۱۴ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی برای  $\frac{r_0}{d} = 0$  و دو نسبت پواسون متفاوت. ۱۵۶.....
- شکل ۶-۱۵ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی برای  $\frac{r_0}{d} = 0.25$  و دو نسبت پواسون متفاوت. ۱۵۶.....
- شکل ۶-۱۶ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی برای  $\frac{r_0}{d} = 0.5$  و دو نسبت پواسون متفاوت. ۱۵۷.....
- شکل ۶-۱۷ مقایسه اجزای تابع امپدانس پی برای  $\frac{r_0}{d} = 1$  و دو نسبت پواسون متفاوت. ۱۵۷.....
- شکل ۶-۱۸ تعریف بار اعمالی و شرایط پی و بستر. ۱۶۱.....
- شکل ۶-۱۹ مقایسه بین پاسخ به دست آمده از انسیس و مطلب ناشی از تحریک هارمونیک. ۱۶۱.....
- شکل ۶-۲۰ نمودار بار ضربه‌ای. ۱۶۲.....
- شکل ۶-۲۱ الف پاسخ به دست آمده در حالت  $\Delta t = 0.1$  ثانیه. ۱۶۳.....
- شکل ۶-۲۱ ب پاسخ به دست آمده در حالت  $\Delta t = 0.101$  ثانیه. ۱۶۳.....
- شکل ۶-۲۲ پیاده سازی مدل همبسته خاک-سازه در انسیس به منظور تحلیل دینامیکی لرزه‌ای در حوزه زمان. ۱۶۵.....
- شکل ۶-۲۳ اعمال بردار نیرویی تابع زمان رابطه ۶-۱۴ به گره‌های ۱، ۲ و ۴. ۱۶۷.....
- شکل ۶-۲۴ مؤلفه افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی زلزله‌السنترو ۱۹۴۰. ۱۷۲.....
- شکل ۶-۲۵ مقایسه جابه‌جایی طبقه پنجم، به دست آمده از انسیس و مطلب. ۱۷۲.....
- شکل ۶-۲۶ مقایسه برش پایه ساختمان پنج طبقه، به دست آمده از انسیس و مطلب. ۱۷۳.....
- شکل ۶-۲۷ پیغام هشدار انسیس، مبنی بر احتمال وجود خطای عددی قابل توجه. ۱۷۳.....
- شکل ۶-۲۸ مقایسه جابه‌جایی طبقه اول، به دست آمده از انسیس و مطلب. ۱۷۷.....
- شکل ۶-۲۹ مقایسه برش پایه ساختمان یک طبقه، به دست آمده از انسیس و مطلب. ۱۷۷.....
- شکل ۶-۳۰ مدل همبسته سازه و مدل خاک. ۱۷۹.....
- شکل ۶-۳۱ مقایسه جابه‌جایی مطلق طبقه آخر سازه پنج طبقه، به دست آمده از کاربرد مدل اندرکنش با یک درجه آزادی داخلی و مدل "ولف" و دو نگرش متفاوت در حل. ۱۸۱.....
- شکل ۶-۳۲ مقایسه برش پایه سازه پنج طبقه، به دست آمده از کاربرد مدل اندرکنش با یک درجه آزادی داخلی و مدل "ولف" و دو نگرش متفاوت در حل. ۱۸۱.....
- شکل ۶-۳۳ دو حالت انتخاب مدل فنر-دمپر-جرم برای ارتعاش گهواره‌ای مدل مخروط. ۱۸۲.....

- شکل ۳۴-۶ مقایسه جابه‌جایی مطلق طبقه آخر سازه پنج طبقه، به دست آمده از کاربرد مدل مخروط و مدل "ولف" و دو نگرش متفاوت در حل ..... ۱۸۳
- شکل ۳۵-۶ مقایسه برش پایه سازه پنج طبقه، به دست آمده از کاربرد مدل مخروط و مدل "ولف" و دو نگرش متفاوت در حل ..... ۱۸۳
- شکل ۳۶-۶ پیاده سازی مدل همبسته خاک-سازه در انسیس به منظور تحلیل هارمونیک در حوزه فرکانس ..... ۱۸۶
- شکل ۳۷-۶ دامنه برش پایه به دست آمده از تحریک هارمونیک سیستم خاک-سازه ..... ۱۸۷
- شکل پاسخ تحریک هارمونیک سیستم خاک-سازه با فرکانس تحریک  $56/547 \text{ rad/s}$  ..... ۱۸۸
- شکل پاسخ تحریک هارمونیک سیستم خاک-سازه با فرکانس تحریک  $402/112 \text{ rad/s}$  ..... ۱۸۸
- شکل ۱-۷ مدل قاب برشی واقع بر بستر انعطاف‌پذیر و پلان و پی مربوط به مجموع قاب‌ها ..... ۱۹۰
- شکل ۲-۷ پی سازه واقع بر لایه خاک ..... ۱۹۱
- شکل ۳-۷ شتاب نگاشت و جابه‌جایی زمین زلزله السنترو ۱۹۴۰ ..... ۱۹۳
- شکل ۴-۷ طیف شتاب پاسخ زلزله السنترو ۱۹۴۰ ..... ۱۹۳
- شکل ۵-۷ الف تغییرات  $V/W$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۵
- شکل ۵-۷ ب مقادیر  $b$  بعد نمودارهای شکل ۷-۵ الف ..... ۱۹۵
- شکل ۶-۷ تغییرات  $u_x$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۶
- شکل ۷-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $K/K_0$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۷
- شکل ۸-۷ تغییرات  $u_x$  بر حسب  $K/K_0$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۸
- شکل ۹-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $r/r_0$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۹
- شکل ۱۰-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $h/h_0$  برای ساختمان یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۱۹۹
- شکل ۱۱-۷ تغییرات  $V_j/W$  برای ساختمان چهار طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۰۰
- شکل ۱۲-۷ تغییرات  $V_j/W$  برای ساختمان هفت طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۰۰
- شکل ۱۳-۷ تغییرات  $V_j/W$  برای ساختمان هفت طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۰۱
- شکل ۱۴-۷ تغییرات  $V_j/W$  برای ساختمان ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۰۱
- شکل ۱۵-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $c_s$  برای ساختمان‌های واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۰۲
- شکل ۱۶-۷ طیف فوریه و پاسخ زلزله السنترو ..... ۲۰۴
- شکل ۱۷-۷ طیف فوریه، طیف پاسخ و شتاب نگاشت زلزله ساکاریا ..... ۲۰۴
- شکل ۱۸-۷ طیف فوریه، طیف پاسخ و شتاب نگاشت زلزله بیگ بر ..... ۲۰۵
- شکل ۱۹-۷ طیف فوریه، طیف پاسخ و شتاب نگاشت زلزله طیس ..... ۲۰۵
- شکل ۲۰-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۷
- شکل ۲۱-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان چهار طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۷
- شکل ۲۲-۷ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان هفت طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۸

- شکل ۷-۲۳ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $m/m_0$  برای ساختمان ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۸
- شکل ۷-۲۴ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $K/K_0$  برای ساختمان یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۹
- شکل ۷-۲۵ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $K/K_0$  برای ساختمان ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک، تحت بار زلزله‌های متفاوت ..... ۲۰۹
- شکل ۷-۲۶ تغییرات  $V/W$  بر حسب  $Wb/W$  برای ساختمان ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۱۲
- شکل ۷-۲۷ سیستم خاک-سازه و سازه یک درجه آزادی معادل با آن ..... ۲۱۳
- شکل ۷-۲۸ نتیجه تحلیل هارمونیک یک سیستم خاک-سازه در حوزه فرکانس ..... ۲۱۶
- شکل ۷-۲۹ الف تغییرات  $\tilde{\omega}$  در مقابل  $m/m_0$  برای سازه یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۱۷
- شکل ۷-۲۹ ب نسبت  $\frac{\tilde{\omega}}{\omega_s}$  برای نمودار شکل ۷-۲۹ الف ..... ۲۱۷
- شکل ۷-۳۰ تغییرات  $\tilde{\omega}$  در مقابل  $K/K_0$  برای سازه یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۱۷
- شکل ۷-۳۱ فرکانس طبیعی و استهلاك معادل سیستم خاک-سازه ..... ۲۱۸
- شکل ۷-۳۲ مقایسه نتیجه تحلیل هارمونیک یک سازه بر روی لایه‌های متفاوت خاک ..... ۲۱۹
- شکل ۷-۳۳ الف تغییرات  $\tilde{\omega}$  در مقابل  $h/h_0$  برای سازه یک طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۲۰
- شکل ۷-۳۳ ب نسبت  $\frac{\tilde{\omega}}{\omega_s}$  برای نمودار شکل ۷-۳۳ الف ..... ۲۲۰
- شکل ۷-۳۲ الف تغییرات  $\tilde{\omega}$  در مقابل  $m/m_0$  برای سازه ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۲۱
- شکل ۷-۳۲ ب نسبت  $\frac{\tilde{\omega}}{\omega_s}$  برای نمودار شکل ۷-۳۲ الف ..... ۲۲۱
- شکل ۷-۳۳ الف تغییرات  $\tilde{\omega}$  در مقابل  $K/K_0$  برای سازه ده طبقه واقع بر ضخامت‌های متفاوت لایه خاک ..... ۲۲۲
- شکل ۷-۳۳ ب نسبت  $\frac{\tilde{\omega}}{\omega_s}$  برای نمودار شکل ۷-۳۳ الف ..... ۲۲۲
- شکل ۷-۳۴ فرکانس طبیعی سیستم خاک-سازه ..... ۲۲۳
- شکل ۷-۳۵ مقایسه نتایج تحلیل هارمونیک سازه یک طبقه بر بستر صلب و انعطاف‌پذیر ..... ۲۲۴
- شکل ۷-۳۶ فرکانس طبیعی سیستم خاک-سازه ..... ۲۲۵
- شکل ۷-۳۸-۱ مقادیر جابه‌جایی زلزله‌السنترو ..... ۲۳۳
- شکل ۷-۳۸-۲ مقادیر جابه‌جایی و سرعت زلزله، آماده شده در فایل متنی ..... ۲۳۴
- شکل ۷-۳۸-۳ ایجاد یک آرایه از نوع جدول در انسیس ..... ۲۳۴
- شکل ۷-۳۸-۴ انتقال مقادیر از فایل به جدول ..... ۲۳۵
- شکل ۷-۳۸-۵ کنترل مقادیر جدول ..... ۲۳۶
- شکل ۷-۳۸-۶ کد مربوط به مقدار دهی به ثابت‌ها ..... ۲۳۹
- شکل ۷-۳۸-۷ نمای مدل در انسیس ..... ۲۴۰
- شکل ۷-۳۸-۸ مدل قاب برشی ..... ۲۴۲



- شکل A-9 محیط وارد کردن روابط شرط بین درجات آزادی در انسیس ..... ۲۴۲
- شکل B-1 تابع  $intr()$  ..... ۲۵۴
- شکل B-2 ورودی‌های تابع  $intr()$  ..... ۲۵۶
- شکل B-3 مدل قاب برشی ..... ۲۵۷
- شکل B-4 یک المان از مدل قاب برشی ..... ۲۵۸
- شکل B-5 ورودی و خروجی توابع به کار رفته در تابع  $intr()$  ..... ۲۶۰
- شکل B-6 الگوریتم تابع  $intrt()$  ..... ۲۶۱
- شکل B-7 الگوریتم حلگر معادلات سازه و خاک به صورت همزمان ..... ۲۶۳

## فصل اوّل

### کلیات

#### مقدمه

مطالعه و تحلیل رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها در برابر زلزله نه تنها یکی از مباحث با اهمیت در حوزه مهندسی عمران است بلکه در کشور ایران، به دلیل اینکه واقع بر یکی از کمربندهای زلزله کره زمین است و در بسیاری از شهرها احتمال وقوع زلزله‌های بزرگ کاملاً وجود دارد، لذا تحلیل دقیق رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها - با دقت هر چه بیشتر- منطقی و حتماً ضروری است.

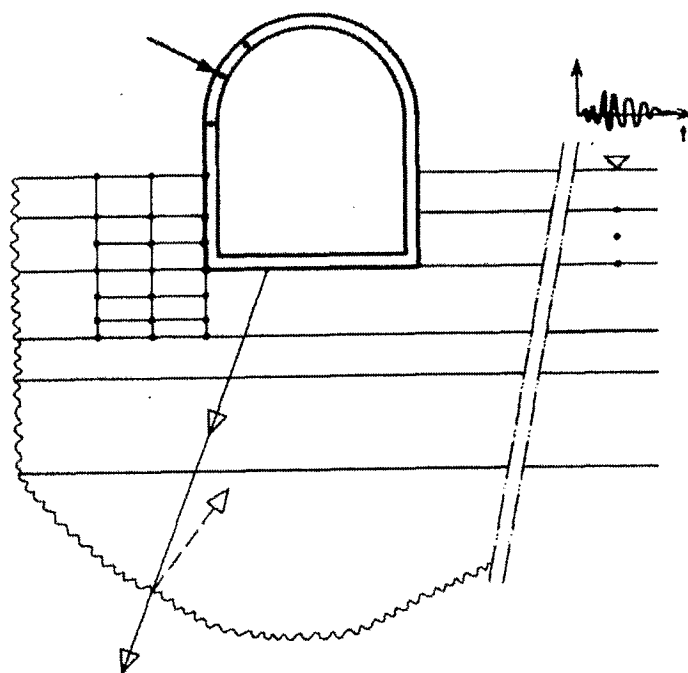
از آنجا که کاربرد ضریب اطمینان بالا در طراحی‌ها موجب افزایش هزینه‌هاست و چه بسا ضروری نباشد، و یا حتی چنانچه روش بررسی و تحلیل مناسب انتخاب نشود، معلوم نیست که افزایش ضریب اطمینان، خود اطمینان واقعی پایداری سازه را در برابر زلزله افزایش دهد. بنابراین طی دهه‌های قبل کوشش‌های فراوانی شده است که طراحی‌های لرزه‌ای سازه‌ها هرچه دقیق‌تر صورت پذیرد، و در این مسیر توجه به تعامل یا اندرکنش خاک-سازه یکی از مواردی است که کنجکاو و توجه بسیاری را در حوزه مهندسی زلزله و سازه به خود جلب کرده است.

معمولاً تحلیل رفتار سازه‌ها تحت اثر بار زلزله به صورت مستقل از شرایط واقعی و متغیر خاک زیر آن انجام می‌گیرد و به بیانی بستر قرار گیری سازه صلب فرض می‌شود. در این شرایط تحریک لرزه‌ای به پای سازه به صورت یک جابه‌جایی یا شتاب متغیر با زمان (و یا نیروی معادل) اعمال می‌گردد. که این ساده سازی‌ها -در هر حال- موجب تقریب‌هایی در تحلیل یک سازه در شرایط واقعی می‌گردد. آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد اینست که سازه بر روی محیط خاک به عنوان یک بستر انعطاف پذیر و به لحاظ ابعاد نیمه بینهایت (یا بدون مرز از سمتی) قرار گرفته است و ارتعاشات زلزله از طرف منبع خود با گذر از این محیط به پای سازه می‌رسد که در نتیجه در هنگام زلزله تعاملی بین رفتار سازه و خاک وجود دارد که از آن به اندرکنش خاک و سازه<sup>۱</sup> تعبیر می‌شود. انعطاف پذیر شدن پای سازه و خروج انرژی سیستم از طریق پراکنده شدن امواج در محیط نیمه بینهایت خاک (استهلاک تابشی) دو اثر مهم ناشی از پدیده اندرکنش خاک- سازه می‌باشد.

مبانی تحلیل اندرکنش خاک- سازه در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. یک نیروی دینامیکی (تابع زمان) به یک سازه بنا شده روی خاک (یا قسمتی درون خاک) اثر می‌کند. این نیرو می‌تواند از طریق خاک (مثل زلزله) به پی و سازه منتقل شود و یا ناشی از ارتعاشات یک منبع مرتعش (مثل یک دستگاه ارتعاش کننده یا ماشین دورانی) درون ساختمان باشد. در نهایت، پاسخ دینامیکی سازه- و در درجه اهمیت کمتر پاسخ خاک- باید محاسبه گردد.

اما محاسبه پاسخ سازه یا خاک با در نظر گرفتن اثر متقابل آن دو روی یکدیگر به سادگی تحلیل یک سیستم چند درجه آزادی دینامیکی نمی‌باشد. در این میان بر خلاف سازه که یک محیط محدود است و می‌تواند به راحتی با تعداد محدودی درجه آزادی دینامیکی به طور دقیق مدل و تحلیل شود، خاک یک فضای نیمه بینهایت است که رفتار دینامیکی آن تابع فرکانس تحریک می‌باشد. از این رو از سه دهه گذشته تا کنون روش‌های متفاوتی برای تحلیل مسئله

اندرکنش خاک- سازه طرح شده است. این روش‌ها می‌تواند به دو دسته کلی: روش مستقیم و روش زیر سازه تقسیم گردد [۱].



شکل ۱-۱ شمای کلی از مسئله اندرکنش خاک- سازه [۱]

تحلیل این مسئله با رویکرد روش زیر سازه منجر به مطرح شدن تابعی بر حسب فرکانس به نام امپدانس یا همان سختی دینامیکی خاک زیر پی می‌شود. تابع امپدانس می‌تواند به صورت سیستمی از فنر-دمپر (فنر تعمیم یافته) زیر سازه تفسیر شود. از آنجایی که به دست آوردن تابع امپدانس نیازمند استفاده از تئوری الاستو-دینامیک و یا روش‌های عددی پیشرفته می‌باشد، مدل‌هایی نیز با عنوان مدل‌های اندرکنش خاک-سازه ارائه شده است که تابع امپدانس را شبیه سازی می‌کند. این مدل‌ها به دو صورت ایجاد می‌شود: (۱) از طریق برآزش پارامترهای تابع امپدانس مدل با تابع امپدانس خاک که از حل دقیق به دست آمده است، و یا (۲) با استفاده از فرض‌های ساده کننده مدلی برای ارتعاش پی و خاک زیرین، یا الگوی حرکت امواج در خاک ارائه می‌شود و به وسیله آن تحلیل اندرکنش خاک- سازه انجام می‌گیرد.