مبانی نظری اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه های فولادی و پل بتنی

بهزاد حاصلی
محمد بهاری
نورالدین صادقی
سامان سنجری
حسین ممقانی

تابستان ۱۴۰۳

چکیده:

با توجه استقرار کشورمان بر روی کمربند لرزه ای، بسیاری از پل های واقع در شهر های مختلف کشورمان در مجاورت و نزدیکی گسل های فعال و خطرناک قرار گرفته است. لذا شناسایی عوامل موثر و تاثیر گذار در برآورد دقیق رفتار لرزه ای پل ها و مدلسازی این عوامل در نمونه های تحلیلی، می تواند درک عمومی نسبت به برآورد پاسخ های نزدیک به واقعیت را افزایش داده و منجر به تبیین الزامات مهندسی دقیقتر در احداث و اجرای سازه های حیاتی گردد. با توجه به اهمیت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه در انواع سیستم های سازه ای، از جمله پل و ساختمان های چند طبقه با کاربری های مختلف، در این مطالعه پس از معرفی روش های مختلف جهت مدل کردن اثرات اندرکنش خاک-سازه و ارائه مبانی نظری اندرکنش خاک، روند مدلسازی خاک در دو نمونه مورد ی مجزا مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در مورد اول اندرکنش خاک-سازه بر روی رفتار سازه های میان مرتبه و بلند مرتبه فولادی و در مورد دوم، اندرکنش خاک بر روی یک نمونه سازه پل بتنی و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، به منظور در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک از مدل مخروطی مربوط به پی های سطحی استفاده شده است. مدل مخروطی شامل شش درجه آزادی است که از درجه آزادی قائم صرف نظر شده است. نتایج مطالعه نشان می دهد، اندرکنش خاک در مورد سازه های مهندسی، تاثیر قابل توجهی بر روی انواع پاسخ های لرزه ای خواهد داشت. به عنوان نمونه در خصوص اثرات اندرکنش خاک بر روی رفتار پل، نتایج به دست آمده نشان داد، تفاوت نتایج در اثر صرف نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک مقادیر عددی پریود اصلی سازه، حداکثر جابجایی ایجاد شده در عرشه، حداکثر جابجایی ایجاد شده در پایه میانی پل، حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه میانی پل، حداکثر تنش در مقطع پایه میانی، حداکثر کرنش در مقطع پایه میانی و حداکثر عکس العمل تکیه گاهی پایه میانی پل به ترتیب ۸۸٪، ۲۵,۹٪، ۶۳,۷٪، ۵۴,۹٪، ۴,۵٪، ۲۸,۵٪ و ۲۸,۹٪ می باشد. لذا این اختلاف نتایج بیانگر اهمیت و تاثیر قابل توجه در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بر روی پاسخ های لرزه ای پل می باشد.

ساختار کتاب پیش رو به شکل زیر است:

در فصل اول این کتاب مقدمه ای از لزوم احداث سازه پل و نقش حیاتی آن در سیستم حمل و نقل کشور بیان شده است.

در فصل دوم، مبانی نظری و روش های مختلف تحلیل و اندرکنش خاک-سازه معرفی شده است.

در فصل سوم ادبیات پژوهش و بررسی های انجام شده در خصوص لزوم لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک-سازه بررسی شده است.

در فصل چهارم روند مدل سازی اثرات اندرکنش خاک-سازه به صورت مرحله به مرحله در خصوص چند سازه فولادی میان مرتبه و بلند مرتبه بررسی و ارزیابی شده است.
در فصل پنجم روند مدل سازی اثرات اندرکنش خاک-سازه به صورت مرحله به مرحله در خصوص یک نمونه پل بتنی مدل سازی شده در محیط نرم افزار اپنسیس ارائه شده است.
از تمامی خوانندگان و صاحب نظران محترم خواهشمندیم مارا از نظرات راهبردی و ارزشمند خود در جهت رفع نواقص و بهبود سطح کیفی این نوشتار، بهره مند نمایند. در پایان این تلاش اندک را به عنوان خدمتی ناقابل به روح شهدای خدمت به ویژه شهید جمهور، جناب آقای دکتر ابراهیم رئیسی تقدیم می نماییم.

گروه نویسندگان، تابستان ۱۴۰۳

فهرست مطالب

۱ فصل اول: سازه پل و تاثیر آن در سیستم حمل و نقل کشور ۱
۱-۲-۱ آیین نامه ایران (IC-۲۸۰۰) ۳
۱-۲-۲ آیین نامه اروپایی (Euro code-۸،۱۹۹۵) ۳
۱-۲-۳ آیین نامه آمریکایی FEMA (NEHRP-۹۷) ۳
۱-۴-۱ روش مستقیم در تحلیل اندرکنش خاک و سازه ۸
۱-۴-۲ روش زیرسازه در تحلیل اندرکنش خاک و سازه ۸
۱-۴-۳ روش فنر و میراگر در تحلیل اندرکنش خاک و سازه ۹
۱-۴-۴ روش اجتماع آثار در تحلیل اندرکنش خاک و سازه ۹
۱-۴-۵ روش مدل مخروط در تحلیل اندرکنش خاک و سازه ۱۱
۱-۴-۶ تحلیل اندرکنش خاک و سازه در آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ..... ۱۲
۱-۵-۱ تقسیم بندی ساختگاه های متفاوت ۱۵
۱-۵-۲ خصوصیات خاک ۱۵
۱-۶-۱ سیستم خاک سازه ۱۸
۱-۶-۲ مدلسازی محیط نا محدود خاک با به کارگیری روش مستقیم ۱۹
۱-۶-۳ ماتریس امپدانس خاک-فونداسیون ۲۰
۱-۷-۱ تحلیل سیستم خاک- فوندانسیون ۲۳
۲ فصل دوم: معرفی روش های تحلیل اندرکنش خاک-سازه ۲۸
۲-۱-۱ مدل فنر و کمک فنر در پی سازه ۲۸
۲-۱-۲ مدل تیر برشی ۲۹
۲-۱-۳ مدل نیم فضای الاستیک یا ویسکو الاستیک ۲۹
۲-۱-۴ مدل عناصر محدود برای خاک ۲۹
۲-۱-۵ مدل ترکیبی نیم فضا و المان محدود ۳۰
۲-۱-۶ اندرکنش خاک-سازه مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ..... ۳۰
۲-۲-۱ روش مستقیم ۳۱
۲-۲-۲ روش زیر سازه ۳۱
۲-۲-۳ روش مختلط ۳۲
۲-۲-۴ معادلات تعادل جهشی ۳۲
۲-۲-۵ روش های مختلف انتگرال گیری قدم به قدم در قلمرو زمان ۳۳
۲-۲-۶ روش تحلیل استاتیکی ۳۳
۳ فصل سوم: مرور و ادبیات پژوهش ۳۶
۳-۳-۱ بیشینه ی پژوهش ۳۶

۴ فصل چهارم: تاثیر اندرکنش خاک وسازه در سازه های بتنی ۳تا۸ طبقه بر روی میزان مصالح مصرفی فولاد و بتن..... ۴۸
۴-۳-۱ معرفی مقاطع تخصیص یافته به سازه های مورد مطالعه ۵۳
۴-۳-۲ نتایج سازه ۵ طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک..... ۵۶
۴-۳-۳ نتایج سازه ۸ طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک..... ۶۲
۴-۳-۴ نتایج سازه ۱۰ طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک..... ۶۷
۴-۳-۵ مقایسه نتایج در سازه های ۵، ۸ و ۱۰ طبقه..... ۷۵
۴-۳-۶ جمع بندی و نتیجه گیری..... ۷۸
۵ فصل پنجم: مطالعه ی رفتار لرزه ای پل بزرگراهی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک ۸۰
۵-۱-۱ معرفی مشخصات مصالح مصرفی ۸۲
۵-۱-۲ مدل سازی المان های مختلف پل..... ۸۴
۵-۱-۳ بارگذاری وارد برپل ۸۵
۵-۲-۱ جابجایی عرشه ۸۸
۵-۲-۲ جابجایی پایه میانی پل..... ۸۹
۵-۲-۳ حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه میانی پل ۹۰
۵-۲-۴ منحنی تنش-کرنش مربوط به پایه میانی پل..... ۹۱
۵-۲-۵ عکس العمل تکیه گاهی ۹۲
۵-۳-۱ جابجایی عرشه ۹۳
۵-۳-۲ جابجایی پایه میانی پل..... ۹۳
۵-۳-۳ حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه میانی پل ۹۴
۵-۳-۴ منحنی تنش-کرنش مربوط به پایه میانی پل..... ۹۵
۵-۳-۵ عکس العمل تکیه گاهی ۹۶
۵-۴-۱ جابجایی عرشه ۹۷
۵-۴-۲ جابجایی پایه میانی پل..... ۹۷
۵-۴-۳ حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه میانی پل ۹۸
۵-۴-۴ منحنی تنش-کرنش مربوط به پایه میانی پل..... ۹۹
۵-۴-۵ عکس العمل تکیه گاهی ۱۰۰
۵-۵-۱ پریود اصلی سازه..... ۱۰۱
۵-۵-۲ جابجایی عرشه پل ۱۰۲
۵-۵-۳ جابجایی پایه ی میانی پل ۱۰۴
۵-۵-۴ حداکثر شتاب پایه ی میانی پل..... ۱۰۶
۵-۵-۵ منحنی تنش-کرنش مقطع دایروی پایه میانی پل ۱۰۸

۵-۵-۶ حداکثر عکس العمل تکیه گاهی ۱۰۹
۶ پیوست الف: بدون اندرکنش eigen ۱۱۴
۷ پیوست ب: بدون اندرکنش-تحلیل تاریخچه زمانی ۱۲۴
۸ منابع: ۱۶۰

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱: مدل پایه گیردار (سمت چپ) و مدل اندرکنش خاک و سازه (سمت راست) برای یک سازه قابی شکل[۵] ۷
شکل ۱-۲: مدل اجزای محدود برای تحلیل مساله ی اندرکنش خاک و سازه[۶] ۸
شکل ۱-۳: نمونه مدل سازی به روش فنر و میراگر معادل ۹
شکل ۱-۴: روش اجتماع آثار: اندرکنش سینماتیکی (سمت چپ) و اندرکنش اینرسی دار(سمت راست)[۶] ۱۰
شکل ۱-۵: هندسه ی سازه (تصویر بالا)، تفکیک حل به اندرکنش سینماتیک و اینرسی دار(تصویر وسط)، مراحل حل اندرکنش اینرسی دار (تصویر پایین) [۷] ۱۱
شکل ۱-۶: نسبت میرایی پی[۹] ۱۴
شکل ۱-۷: رابطه کلی تنش-کرنش خاک تحت تحریک حالت پایدار دامنه ثابت[۱۱] ۱۶
شکل ۱-۸: طیف طرح برای شرایط مختلف ساختگاه با میرایی ٪۵. به ازای حالت های مختلف ساختگاه I، II، III و IV (ساختگاه ها به ترتیب با SCI، SCII، SCIII و SCIV مشخص شده اند) [۱۲] ۱۷
شکل ۱-۹: مدل اندرکنش خاک-سازه بر اساس مطالعات طباطبایی فر و معصومی[۱۳] ۲۰
شکل ۱-۱۰: مدل سازی اجزاء محدود خاک با مرزهای اولیه بر اساس مطالعات طباطبایی فر و معصومی[۱۳] ۲۰
شکل ۱-۱۱: آرایش امپدانس[۱۴] ۲۱
شکل ۱-۱۲: روش زیر سازه برای SSI : a) سیستم کامل خاک-فونداسیون-روسازه (b) زیر سازه خاک-فونداسیون و (c) زیر سازه روسازه[۱۶] ۲۴
شکل ۱-۱۳: (a) گروه شمع در یک خاک لایه ای افقی؛ (b) مدل خاک-فونداسیون و (c) جابه جایی در گره i در اثر نیروهای وارد شده در گره j.[۱۶] ۲۶

شکل ۲-۱: مدلسازی خاک به روش فنر و کمک فنر ۲۹
شکل ۲-۲: مدل تحلیلی در نظر گرفته شده در استاندارد ۲۸۰۰[۱۸] ۳۱
شکل ۲-۳: تعریف طیف طرح در نرم افزار ایتبس ۳۴
شکل ۳-۱: سازه سه بعدی مدل شده توسط شوشتری و همکاران در نرم افزار اپنسیس[۱۹] ۳۷
شکل ۳-۲: نتایج مطالعات جواهر زاده و همکاران[۲۰] ۳۷
شکل ۳-۳: نمای مقطع طولی پل مورد مطالعه در رفرنس[۲۱] ۳۸
شکل ۳-۴: نمودارهای میرایی مودهای سیستم خاک-سازه بر اساس مطالعات قدرتی و همکاران[۲۲] ۳۹
شکل ۳-۵: صحت سنجی انجام شده توسط کلبادی و همکاران[۲۳] ۴۰
شکل ۳-۶: نتایج مطالعات گل نرگسی و همکاران[۲۴] ۴۰
شکل ۳-۷: توزیع تغییر مکان نسبی طبقات در حالات اندرکنشی بر اساس مطالعات قدرتی امیری و همکاران[۲۶] ۴۲
شکل ۳-۸: اثرات اندرکنش خاک و سازه برای قابهای ساختمانی در ساختگاه ۱، بر اساس مطالعات بالندرا [۲۷] ۴۳
شکل ۳-۹: نتایج مطالعات گوانگ و وانگ [۲۸] ۴۴
شکل ۳-۱۰: منحنی ظرفیت ارائه شده برای پل مورد مطالعه توسط ایز [۲۹] ۴۵
شکل ۳-۱۱: نتایج مطالعات ارحان و همکاران [۳۰] ۴۶
شکل ۳-۱۲: نمودار خیز دال بتنی پل مورد مطالعه توسط تانون به ازای موقعیت های مختلف بار اعمالی [۳۱] ۴۶
شکل ۳-۱۳: مدل عددی سیستم خاک-شمع-فوندانسیون براساس مطالعات تانگ و همکاران[۳۲] ۴۷
شکل ۴-۱: تعریف پروفیل خاک در محیط نرم افزار ایتبس ۴۹
شکل ۴-۲: ساختار هندسی سازه پنج طبقه در دو حالت با و بدون تغییر شکل (به ترتیب پایین و بالا) ۵۱
شکل ۴-۳: ساختار هندسی سازه هشت طبقه در دو حالت با و بدون تغییر شکل (به ترتیب پایین و بالا) ۵۲

شکل ۴-۴: ساختار هندسی سازه ده طبقه در دو حالت با و بدون تغییر شکل (به ترتیب پایین و بالا)..... ۵۳
شکل ۴-۵: مقاطع بتنی مورد استفاده در پژوهش حاضر(تیر و ستون)..... ۵۴
شکل ۴-۶: نمایش مقاطع منتخب..... ۵۵
شکل ۴-۷: مقایسه وزن مصالح بتنی در سازه پنج طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش..... ۵۹
شکل ۴-۸: مقایسه برش پایه و حداکثر جابجایی بام در سازه پنج طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش..... ۶۰
شکل ۴-۹: منحنی نمایش اندرکنش ستون B-۲ در طبقه اول سازه پنج طبقه..... ۶۱
شکل ۴-۱۰: نتایج مربوط به نیروی محوری ولنگر خمشی در ستون B-۲ در سازه پنج طبقه ۶۱
شکل ۴-۱۱: مقایسه وزن مصالح بتنی در سازه هشت طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش ۶۵
شکل ۴-۱۲: مقایسه برش پایه و حداکثر جابجایی بام در سازه هشت طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش..... ۶۵
شکل ۴-۱۳: منحنی نمایش اندرکنش ستون B-۲ در طبقه اول سازه هشت طبقه..... ۶۶
شکل ۴-۱۴: نتایج مربوط به نیروی محوری ولنگر خمشی در ستون B-۲ در سازه هشت طبقه..... ۶۶
شکل ۴-۱۵: مقایسه وزن مصالح بتنی در سازه ده طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش..... ۷۲
شکل ۴-۱۶: مقایسه برش پایه و حداکثر جابجایی بام در سازه ده طبقه در دو حالت با و بدون اندرکنش..... ۷۳
شکل ۴-۱۷: منحنی نمایش اندرکنش ستون B-۲ در طبقه اول سازه ده طبقه..... ۷۴
شکل ۴-۱۸: نتایج مربوط به نیروی محوری ولنگر خمشی در ستون B-۲ در سازه ده طبقه ۷۴
شکل ۴-۱۹: مقایسه روند تغییرات وزن مصالح بتنی در سازه های مورد مطالعه..... ۷۵
شکل ۴-۲۰: مقایسه روند تغییرات وزن مصالح فولادی در سازه های مورد مطالعه..... ۷۶
شکل ۴-۲۱: مقایسه روند تغییرات برش پایه در سازه های مورد مطالعه..... ۷۷

شکل ۴-۲۲: مقایسه روند تغییرات جابجایی بام در سازه های مورد مطالعه..... ۷۷
شکل ۵-۱: ساختار و هندسه ی پل مورد مطالعه در پژوهش حاضر..... ۸۱
شکل ۵-۲: مختصات سیستم و درجات آزادی..... ۸۲
شکل ۵-۳: الف)منحنی رفتار ماده یک بعدی(Concrete۰۱)- ب) منحنی رفتار ماده یک بعدی(Concrete۰۳)-ج) منحنی رفتار ماده یک بعدی (Steel۰۱)..... ۸۳
شکل ۵-۴: ویژگی طرح کامیون برای اختصاص بار زنده..... ۸۶
شکل ۵-۵: جابجایی عرشه پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد jfpg..... ۸۹
شکل ۵-۶: جابجایی پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد jfpg..... ۹۰
شکل ۵-۷: حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد jfpg..... ۹۰
شکل ۵-۸: منحنی تنش-کرنش مقطع پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد jfpg..... ۹۱
شکل ۵-۹: حداکثر عکس العمل تکیه گاهی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد jfpg..... ۹۲
شکل ۵-۱۰: جابجایی عرشه پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد loma..... ۹۳
شکل ۵-۱۱: جابجایی پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد loma..... ۹۴
شکل ۵-۱۲: حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد loma..... ۹۴
شکل ۵-۱۳: منحنی تنش-کرنش مقطع پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد loma..... ۹۵
شکل ۵-۱۴: حداکثر عکس العمل تکیه گاهی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد loma..... ۹۶
شکل ۵-۱۵: جابجایی عرشه پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد syl..... ۹۷

شکل ۵-۱۶: جابجایی پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد syl.....۹۸
شکل ۵-۱۷: حداکثر شتاب ایجاد شده در پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد syl.....۹۹
شکل ۵-۱۸: منحنی تنش-کرنش مقطع پایه ی میانی پل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد syl.....۱۰۰
شکل ۵-۱۹: حداکثر عکس العمل تکیه گاهی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک تحت اثر رکورد syl.....۱۰۱
شکل ۵-۲۰: مقایسه ی پریود اصلی سازه دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۲
شکل ۵-۲۱: مقایسه ی جابجایی عرشه پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۳
شکل ۵-۲۲: مقایسه ی اختلاف جابجایی عرشه پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۴
شکل ۵-۲۳: مقایسه ی جابجایی پایه میانی پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۵
شکل ۵-۲۴: مقایسه ی اختلاف جابجایی پایه میانی پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۶
شکل ۵-۲۵: مقایسه ی حداکثر شتاب پایه میانی پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۷
شکل ۵-۲۶: مقایسه ی اختلاف حداکثر شتاب پایه میانی پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۸
شکل ۵-۲۷: نقاط حداکثر تنش-کرنش پایه میانی پل دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک.....۱۰۹
شکل ۵-۲۸: حداکثر عکس العمل تکیه گاهی در حالت صرف نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک در شش جهت.....۱۱۰
شکل ۵-۲۹: حداکثر عکس العمل تکیه گاهی در حالت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک در شش جهت.....۱۱۰

شکل ۵-۳۰: اختلاف مقادیرحداکثر عکس العمل تکیه گاهی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک در شش جهت..... ۱۱۱

فهرست جدول ها

جدول ۴-۱: معرفی پارامترهای لرزه‌ای سازه‌های مختلف مورد مطالعه جهت تعریف بار لرزه‌ای..... ۵۰
جدول ۴-۲: وزن واحد طول اجزای تیر و ستون در پژوهش حاضر..... ۵۵
جدول ۴-۳: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۵ طبقه بدون اندرکنش خاک... ۵۷
جدول ۴-۴: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۵ طبقه بدون اندرکنش خاک ۵۷
جدول ۴-۵: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۵ طبقه با اندرکنش خاک..... ۵۸
جدول ۴-۶: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۵ طبقه با اندرکنش خاک ۵۹
جدول ۴-۷: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۸ طبقه بدون اندرکنش خاک... ۶۲
جدول ۴-۸: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۸ طبقه بدون اندرکنش خاک ۶۳
جدول ۴-۹: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۸ طبقه با اندرکنش خاک..... ۶۳
جدول ۴-۱۰: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۸ طبقه با اندرکنش خاک ۶۴
جدول ۴-۱۱: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۱۰ طبقه بدون اندرکنش خاک ۶۷
جدول ۴-۱۲: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۱۰ طبقه بدون اندرکنش خاک.... ۶۹
جدول ۴-۱۳: مقاطع اختصاص یافته به ستون های سازه ۱۰ طبقه با اندرکنش خاک.... ۷۰
جدول ۴-۱۴: مقاطع اختصاص یافته به تیرهای سازه ۱۰ طبقه با اندرکنش خاک ۷۱
جدول ۵-۱: معرفی حالت های مختلف مورد مطالعه در پژوهش حاضر..... ۸۱
جدول ۵-۲: پارامترهای عددی مورد استفاده در دو ماده یک بعدی(Concrete۰۱) و (Concrete۰۳)..... ۸۳
جدول ۵-۳: پارامترهای عددی مورد استفاده در ماده یک بعدی (Steel۰۱) ۸۳
جدول ۵-۴: مقادیر عددی پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی اجزای پل..... ۸۵
جدول ۵-۵: بار دینامیکی مجاز(IM) ۸۷

جدول ۵-۶: مقادیر جابجایی عرشه در حالت با و بدون اثرات اندرکنش خاک تحت اثر سه رکورد زلزله.....۱۰۳
جدول ۵-۷: مقادیر جابجایی پایه میانی در حالت با و بدون اثرات اندرکنش خاک تحت اثر سه رکورد زلزله ۱۰۵
جدول ۵-۸: مقادیر حداکثر شتاب پایه میانی در حالت با و بدون اثرات اندرکنش خاک تحت اثر سه رکورد زلزله.....۱۰۷
جدول ۵-۹: معرفی درجات آزادی انتقالی و دورانی.....۱۰۹

فصل اول:

سازه پل و تاثیر آن در سیستم حمل و نقل کشور

۱-۱ مقدمه

در مطالعات مهندسی سازه ها عموما فرض می شود که خاک زیر سازه صلب است و از انعطاف پذیری آن صرف نظر می گردد، در این حالت پاسخ سازه متاثر از خواص دینامیکی سازه است و انعطاف پذیری خاک، در پاسخ لرزه ای در نظر گرفته نشده است. به منظور بررسی اثرات اندرکنش خاک در پاسخ لرزه ای سازه انتظار می رود، پاسخ سازه تحت تاثیر سیستم دینامیکی جدیدی قرار بگیرد[۱]. اندرکنش خاک- سازه یکی از عوامل مهم وموثر در تعیین نیروها، جابجایی ها وعملکرد سازه محسوب می شود[۲]. در مساله اندرکنش خاک و سازه با دو تعبیر عمومی و تخصصی مواجه خواهیم بود. در تعبیر عمومی که ملزم به تحلیل دو محیط با سختی و جنس متفاوت با یکدیگر(چه از نظر استاتیکی و چه از نظر دینامیکی) می باشند مورد نظر این تحقیق نخواهد بود. لذا در تعبیر تخصصی که در نظرگیری بازگشت امواج ناشی از ارتعاش سازه به درون زمین در اثر ناتوانی شالوده در تحمل تغییر مکان های حرکت میدان آزاد و حرکت قاعده سازه نسبت به حرکت میدان آزاد و به تبع آن تحت تاثیر قرار گرفتن پاسخ خاک در اثر حرکت سازه و پاسخ سازه در اثر حرکت خاک ملاک اغلب کتب اندر کنش خاک و سازه ها و همچنین مبحث مطالعاتی تحقیق حاضر می باشد. در مساله اندرکنش خاک و سازه با سه محیط متفاوت روبرو خواهیم بود. محیط اول، بخشی از سازه که روی زمین قرار دارد (روسازه)[۱] ، محیط دوم، بخشی از سازه است که درون زمین قرار گرفته(زیر سازه)[۲] و محیط سوم نیم فضای الاستیک یا زمین می باشد.

اگر سختی زمین بسیار بالا باشد، مساله اندرکنش به مساله پای صلب تبدیل خواهد شد. لازم به توضیح است که در مساله پای صلب اثر زمین درنظر گرفته نمی شود و موضوع مورد بحث، تحلیل سازه می باشد. اثرات اندرکنش خاک- سازه اختلافات پاسخ سازه در

---

[۱] Super Structure
[۲] Sub Structure

حالتی که این پاسخ با فرض برابر بودن حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده است را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت واقعی پی، نشان می دهد و این اختلافات به مشخصه های حرکت میدان آزاد زمین و خواص سازه و خاک زیر آن بستگی دارد. اثرات اندرکنش خاک- سازه می تواند عکس العمل سازه را افزایش یا کاهش دهد که این امر به مشخصه ها و خواص سازه و خاک بستگی دارد. بنابراین در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک می تواند طرح لرزه ای سازه را از حاشیه اطمینان خارج کند. پل ها به عنوان یکی از شریان های حیاتی سیستم حمل و نقل هر کشور محسوب می شود که خرابی و تخریب آن اقتصاد منطقه را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد**[۳]**. بنابراین در برآورد پاسخ لرزه ای سازه ای مهم، مانند پل لازم است ساده سازی ها جهت مدلسازی را به حداقل رسانید تا پاسخ های نزدیک به واقعیت حاصل شود. یکی از عمده ترین ساده سازی های انجام شده در شبیه سازی رفتار پل، صرف نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک می باشد. اندرکنش خاک و سازه به بررسی تاثیر وجود خاک در پاسخ می پردازد. نیروی ناشی از زلزله به خاک زیرین سازه تغییر مکان یا نیرو وارد می کند، این نیرو موجب ایجاد نیرویی در شمع شده و سپس تغییر مکان در طول شمع و پایه ی پل ادامه می یابد**[۴]**. با توجه استقرار کشورمان بر روی کمربند لرزه ای، بسیاری از پل های واقع در شهر های مختلف کشورمان در مجاورت و نزدیکی گسل های فعال و خطرناک قرار گرفته است. لذا شناسایی عوامل موثر و تاثیر گذار در برآورد دقیق رفتار لرزه ای پل ها و مدلسازی این عوامل در نمونه های تحلیلی، می تواند درک عمومی نسبت به برآورد پاسخ های نزدیک به واقعیت را افزایش داده و منجر به تبیین الزامات مهندسی دقیقتر در احداث و اجرای سازه های حیاتی گردد. این امر خسارات احتمالی پل ها در اثر وقوع زلزله های احتمالی آینده را تا حد قابل قبولی کاهش داده و علاوه بر افزایش طول عمر مفید پل، از اتلاف حجم قابل توجهی از منابع مالی و اقتصادی نیز جلوگیری می نماید. لذا لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک- سازه در پای ستون ها و پایه های میانی پل که بر روی خاک قرار گرفته اند، می تواند کمک شایانی در حصول پاسخ های دقیق و نزدیک به واقعیت پل ارائه دهد.

۱-۲ نظری اجمالی بر آیین نامه های پیرامون لزوم در نظرگیری اثر اندرکنش خاک و سازه

۱-۲-۱ آیین نامه ایران (IC-۲۸۰۰)

در آیین نامه ایران تحلیل توام سازه و ساختگاه مورد اشاره واقع نشده ولی اثر سختی ساختگاه در محاسبه ضریب بازتاب B اعمال گردیده است و نیز بحثی از ضخامت لایه خاک زیر سازه نشده و صرفاً نوع خاک در نظر گرفته شده است. در این خصوص برخی از محققین به این نتیجه رسیده اند که اگر ضخامت خاک زیر سازه بین ۵ الی ۱۵ متر باشد می تواند بدترین شرایط را برای پاسخ سازه ایجاد نماید.

۱-۲-۲ آیین نامه اروپایی (Euro code-۸،۱۹۹۵)

در این آیین نامه اثر اندر کنشی خاک و سازه در نظر گرفته شده و دو روش تحلیل:

۱-روش فنر و میراگر معادل

۲-روش مستقیم تحلیل عددی مورد قبول آیین نامه قرار گرفته است.

۱-۲-۳ آیین نامه آمریکایی (FEMA (NEHRP-۹۷

در آیین نامه آمریکایی توصیه شده است که زمان تناوب و میرایی سازه در حالتی که پی انعطاف پذیر است به روش پریود اصلاح شده (T') محاسبه گردد. همچنین توصیه شده است که برش پایه حداکثر معادل ۳۰٪ مطابق رابطه زیر کاهش یابد.

$$\Delta V = \left[C_s - \acute{C}_s \left(\frac{۱}{۲\acute{B}}\right)^{۰.۴}\right] \acute{W} \leq ۰.۳V$$

که در آن :

ΔV: میزان کاهش برش پایه به دلیل انعطاف پذیری پی

V: برش پایه

Cs: ضریب زلزله بدون در نظر گیری اثر اندرکنش خاک و سازه (حالت پای صلب)

C's: ضریب زلزله با اعمال اندرکنش خاک و سازه

β ' : ضریب میرایی مجموعه خاک و سازه

W': وزن موثر سازه که در آیین نامه FEMA تعریف شده است.

همچنین T'از رابطه زیر بدست می آید.

$$T'=T\sqrt{\frac{1+[K'(1+\frac{K_x h'^2}{K_\theta})]}{K_x}}$$

که در آن:

T': زمان تناوب افزایش یافته با توجه به در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه

T: زمان تناوب سازه در حالت پای صلب

h': ارتفاع موثرسازه (برای سازه های قابی شکل ۰/۷h می باشد).

Kx: سختی جانبی پی

Kθ: سختی دورانی پی

K': سختی سازه در حالت پای صلب

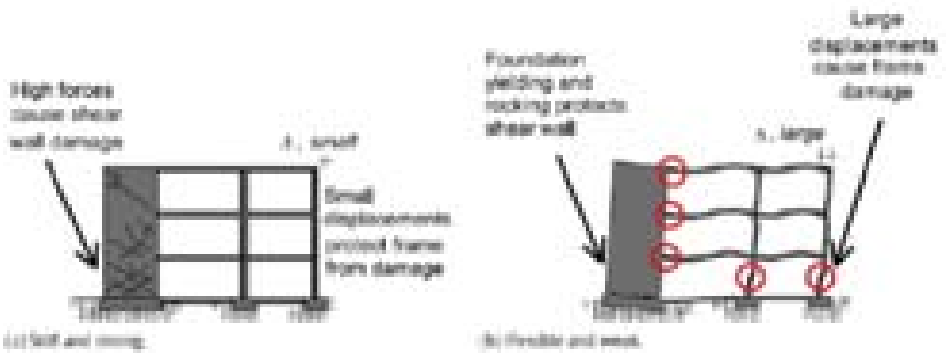
طبق این آیین نامه با اعمال اثر اندرکنش خاک و سازه میرایی و زمان تناوب سیستم افزایش یافته و برش پایه کاهش می یابد، با این حال تغییرات مذکور فقط برای مود اول پذیرفته شده است و در سایر مودها نتایج پی صلب قابل قبول خواهد بود.

هر چند تحلیل دینامیکی سازه ها از ابتدای قرن بیستم مورد توجه محققان بوده است، با این حال درنظرگیری اثرات خاک در این تحلیل ها قدمت زیادی ندارد. در سال های اخیر به طور فزاینده ای مسئله منظور نمودن اثر خاک در تحلیل لرزه ای مورد توجه طراحان قرار گرفته است. علت این موضوع تفاوت پاسخ سازه در حالت تحلیل رفتار سازه بدون در نظرگرفتن آثار اندرکنش خاک و با در نظر گرفتن این آثار، توجیه پذیر است. این موضوع توسط آیین نامه های بین المللی نیز در ده سال اخیر مورد توجه ویژه بوده است. بر همین اساس پیش بینی می شود که در سال های آتی طراحان سازه های مهندسی بزرگ و متوسط نیاز به دانش اندرکنش خاک و سازه خواهند داشت. تحلیل اندرکنش خاک و سازه، به تحلیل های دینامیکی اختصاص می یابد که در آن سازه و محیط خاکی به صورت یک سیستم یکپارچه تحت ارتعاش واقع می شوند و مودهای ارتعاشی همدیگر را تحت تاثیر قرار می دهند. در این حالت امواج لرزه ای از خاک به سازه منتقل می شوند و سازه را به ارتعاش در می آورند. از سوی دیگر بازگشت امواج ناشی از ارتعاش سازه به درون زمین تنش های لرزه ای جدیدی در خاک ایجاد می کند. در صورتی که سازه ای بر روی یک لایه عمیق از خاک نرم مستقر بر روی سنگ بستر احداث گردد، مشاهده می شود که پاسخ سازه کاملاً متفاوت از حالتی است که همان سازه بر روی یک لایه ی نازک از خاک نرم بر بستر سنگی

قرار گرفته است. از سوی دیگر پاسخ سازه در هر دو حالت مذکور متفاوت از حالتی خواهد بود که سازه به طور مستقیم روی سنگ بستر قرار گرفته باشد. علاوه بر این نوع پی و خصوصیات هندسی و عمق کارگذاری آن نیز بر پاسخ لرزه ای سازه مؤثر خواهد بود. در هر حال در جریان انتشار امواج لرزه ای، سازه بر خاک اطراف خود تأثیر گذاشته و بر حرکت آن مؤثر خواهد بود. بر این اساس، برای تحلیل لرزه ای سازه های روزمینی و یا زیرزمینی، در نظر گرفتن اثرات خاک بر پاسخ سازه به خصوص در شرایطی که خاک و یا پی از سختی زیادی برخوردار نیست، بسیار ضروری و با اهمیت است. به طور عمومی در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه در تحلیل پاسخ دینامیکی سازه ها موجب تغییر در فرکانس طبیعی و شکل مودهای سیستم می شود. به صورتی که با درنظرگیری اندرکنش خاک و سازه برای سازه هایی که بر روی زمین نرم بنا شده اند، زمان تناوب افزایش می یابد. برای روشن تر شدن این مطلب می توان به دویدن یک دونده بر روی زمین نرم اشاره کرد که در مقایسه با زمین سخت برای طی کردن یک مسافت ثابت زمان بیشتری طول خواهد کشید. پاسخ لرزه ای یک سازه به عوامل متعددی نظیر نوع ساختگاه، مشخصات حرکت زمین، خاک زیرین و اطراف سازه و پارامترهای دینامیکی سازه، بستگی دارد. برای سازه هایی که بر روی سنگ بستر یا خاک های با سختی بسیار زیاد ساخته شده اند، حرکت فونداسیون واقعا همان حرکت زمین است که در تراز روی خاک ایجاد می شود. این حرکت با نام حرکت سطح آزاد زمین، شناخته می شود، ولی برای خاک های نرم این تعریف متفاوت از حالت سیستم قبل است. دلیل این تفاوت را باید در نحوه ی بازتاب و پراکندگی امواج لرزه ای منتشر شده در خاک و همچنین انرژی تشعشعی ناشی از ارتعاش سازه، جستجو نمود. بنابراین تغییر شکل و حرمت زمین در خاک زیرین سازه با حرکت سطح آزاد زمین، تفاوت اساسی دارد. از این رو، پاسخ دینامیکی یک سازه ی بنا شده بر لایه های خاک نرم، از نظر دامنه و محتوای فرکانسی اساسا با پاسخ دینامیکی سازه مشابه بنا شده بر روی سنگ بستر یا خاک هایی با سختی بسیار زیاد، متفاوت است. لذا به دلیل حساسیت خاصی که در طرح و اجرای سازه های بتنی وجود دارد، همچنین به دلیل تأثیر گذار بودن ابعاد مقاطع اعضاء در میزان و ظرفیت باربری عضو و کل سیستم، اعمال اثرات اندرکنش خاک سازه در تحلیل و طراحی سازه های بتنی و تغییر نیروی داخلی اعضاء ناشی از در نظرگرفتن این آثار (اثرات اندرکنش خاک)، علاوه برافزایش ایمنی طرح و موجب صرفه جویی و توجیه پذیری طرح از منظر اقتصاد نیز خواهد شد. از دیگر سو چون طرح لرزه ای سازه های بتنی، تعیین ضریب

رفتار سازه و تأمین شکل پذیری اعضای آن بر اساس سطح عملکرد اعضاء انجام می شود(طراحی بر اساس عملکرد)، بنابراین تشخیص رفتار سازه و بازتاب و پاسخ لرزه ای آن تا حد زیادی به مدل سازی خاک زیرین سازه وابسته است. در تحلیل دینامیکی سازه عموما فرض می شود که خاک زیر شالوده صلب بوده و از انعطاف پذیری خاک زیر شالوده، صرف نظر می شود. در این شرایط پاسخ متاثر از خواص دینامیکی سازه است و خواص خاک زیر شالوده تاثیری در پاسخ سازه ندارد، در حالی که اگر خاک زیر شالوده نیز در تحلیل ها لحاظ شود، سیستم جدیدی ناشی از اندرکنش خاک و سازه تشکیل خواهد شد، که رفتار آن متفاوت از رفتار اشاره شده در حالت قبل خواهد شد. معمولا از اثرات اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه های مرسوم، چشم پوشی می شود. این امر اغلب موجب محافظه کارانه شدن طراحی می شود، اندرکنش خاک و سازه برای سازه های سنگین و سخت با پی های عمیق و یا سازه هایی که سیستم باربر آن ها باعث سختی پی شده است، بسیار حائز اهمیت است. در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه موجب می شود تا شرایط شبیه سازی، تطابق بالاتری با شرایط واقعی داشته باشد و در نهایت منجر به دستیابی به پاسخ های با دقت بالا و نزدیک به واقعیت خواهد شد.

برای سازه های بنا شده بر روی سنگ و خاک های خیلی سخت، تغییر پاسخ ناشی از اندرکنش کوچک و قابل صرف نظر است. بنابراین در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل لرزه ای سازه های روزمینی و زیرزمینی که با خاک های بسیار سخت در ارتباط هستند لزومی ندارد. در این حالت می توان از تحلیل پایه گیردار (Fixed Base) که در آن زمین به کلی صلب و گیردار فرض می شود، استفاده نمود[۵]. اما در بسیاری از موارد تحلیل رفتار لرزه ای سازه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی خاک و سازه در مقایسه با تحلیل پایه گیردار متفاوت است و عدم در نظرگیری اثرات اندرکنش منجر به انحراف پاسخ ها از شرایط حقیقی خواهد شد. تأثیر اندرکنش دینامیکی خاک و سازه به خصوصیات هندسه، جرم، سختی و میرایی سازه و خاک وابسته است. در صورتی که فقط اثرات انعطاف پذیری زمین در تحلیل منظور شود و مسئله بازگشت امواج از سازه به زمین مورد نظر نباشد، از این تحلیل تحت عنوان اثر انعطاف پذیری پی یاد می شود. این تحلیل بخشی از اثرات اندرکنش را در نظر خواهد. در شکل(۱-۱) نمونه ای از تفاوت پاسخ یک قاب در دو حالت با و بدون اثرات انعطاف پذیری پی نمایش داده شده است.



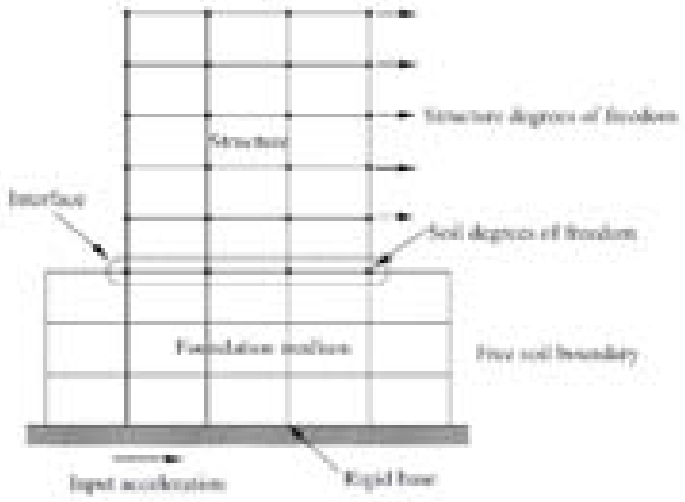
شکل ۰-۱: مدل پایه گیردار (سمت چپ) و مدل اندرکنش خاک و سازه (سمت راست) برای یک سازه قابی شکل[۵]

۱-۳ اهمیت تحلیل اندرکنش در سازه های مختلف

به عنوان اولین دسته از سازه هایی که در نظرگیری اندرکنش برای آنها اهمیت دارد، می توان از سازه های بلند نام برد. بر همین راستا مطالعات انجام شده نشان می دهد که برای یک سازه خاص در صورتی که نسبت سرعت موج برشی به حاصل ضرب ارتفاع سازه و فرکانس آن، کوچک تر از ۲۰ باشد، در نظر گیری اندرکنش از اهمیت برخوردار است. در مقابل در سازه هایی که بر روی پی سخت قرار گرفته اند و سختی زمین بیش از ۱۰ برابر سختی سازه است، ساختمان های کوتاه، سازه های مدفون در صورتی که شرایط میدان آزاد برای آنها قابل قبول باشد و سختی سازه با سختی زمین اطراف یکسان باشد، می توان در جهت سادگی از اثرات اندرکنش خاک چشم پوشی نمود.

۱-۴ روش های مختلف تحلیل اندرکنش خاک و سازه

مساله ی اندرکنش خاک و سازه به روش های مختلفی قابل بحث و بررسی است. به طور کلی روش های تحلیل اندرکنش خاک و سازه شامل روش های عددی، روش های تحلیلی و روش های آزمایشگاهی می شود. ابتدایی ترین مدل عددی در حل مساله ی اندرکنش، در نظرگیری یک لایه خاک همراه با سازه و استفاده از روش اجزای محدود برای مدل سازی سیستم است. چنین مدلی را می توان در شکل(۱-۲) مشاهده کرد که در آن سازع قابی شکل، بر روی لایه خاک و در نهایت بر روی بستر صلب استقرار یافته است.



شکل ۰-۲: مدل اجزای محدود برای تحلیل مساله ی اندرکنش خاک و سازه[٦]

۱-۴-۱ روش مستقیم در تحلیل اندرکنش خاک و سازه

در این روش سازه، پی و زمین به صورت توأم مدل می گردند. در برخی موارد مرز بین سه جزء مذکور نیز توسط المان های فصل مشترک مدل می شود. در واقع در این روش هندسه، میرایی و جرم زمین به طور کامل در تحلیل دیده شده اند. این روش به طور معمول با المان بندی و حل معادله تعادل دینامیکی توسط نرم افزار همراه خواهد بود. برای اعمال تحریک لرزه ای در این روش می توان به دو صورت عمل کرد:

الف) اعمال رکورد شتاب بر پایه ی مدل

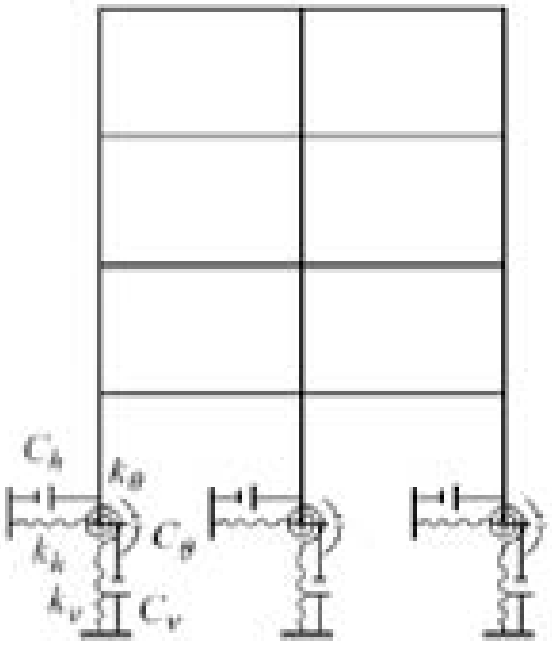
ب) اعمال رکورد تغییرمکان به پایه ی مدل

۱-۴-۲ روش زیرسازه در تحلیل اندرکنش خاک و سازه

در این روش مسئله خطی اندرکنش خاک و سازه به چند زیر سازه مجزا تقسیم شده و برای هر زیرسازه به طور جداگانه تحلیل دینامیکی انجام می شود. در نهایت با استفاده از اصل جمع آثار قوا نتایج با هم جمع می گردند. در واقع در این روش سازه و زمین به صورت مستقل تحلیل می شوند و ارتباط بین آنها توسط نیروهای اندرکنشی برقرار می گردد. با توجه به اینکه در این روش از اصل جمع آثار قوا استفاده شده است، این روش فقط برای رفتار خطی صادق است. با این حال برخی از محققین ادعا کرده اند که هر یک از دو جزء خاک و سازه به طور مستقل می توانند به صورت غیرخطی تحلیل شوند.

۱-۴-۳ روش فنر و میراگر در تحلیل اندرکنش خاک و سازه

فنر و میراگر یکی از پرکاربردترین روش ها در حل مسائل اندرکنش خاک و سازه است. در این روش به جای زمین و پی، مجموعه ای از فنرها و میراگرها قرار می گیرند که فنرها در واقع انعطاف پذیری تکیه گاه ها را مدل می کنند. هر چند در این روش جرم زمین دیده نشده است، با این حال در بسیاری از موارد نتایج واقع بنیانه و یا نزدیک واقع را به دست می دهد. فنرها و میراگرها می توانند در جهات مختلف وجود داشته باشند. پس از تشکیل ماتریس های جرم، سختی و میرایی برای سازه، پی و زمین با نوشتن معادله تعادل دینامیکی سیستم در فضای فرکانس یا زمان مجهولات مورد نظر که فرکانس ارتعاش آزاد یا تغییرمکان های نسبی سازه هستند، بدست می آیند.در شکل(۳-۱) نمونه ای از مدل سازی سازه به روش فنر و میراگر معادل نمایش داده شده است.



شکل ۰-۳: نمونه مدل سازی به روش فنر و میراگر معادل

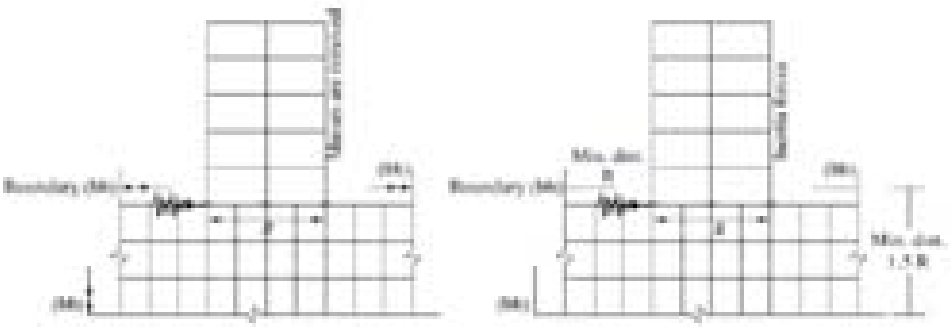
۱-۴-۴ روش اجتماع آثار در تحلیل اندرکنش خاک و سازه

در روش اجتماع آثار، مسئله در دو گام مختلف سینماتیکی و اینرسی دار، حل می شود. در شکل(۴-۱) مراحل مذکور به صورت شماتیک قابل مشاهده است. در مرحله ی نخست

مساله ی اندرکنش سینماتیکی[۳] حل می شود که در آن جرم سازه فوقانی در نظر گرفته نمی شود. معادله ی حرکت سازه در این حالت به صورت رابطه ی زیر می باشد:

$$M_g\ddot{u}_I + C\dot{u}_I + Ku_I = -M_g I\ddot{u}_g$$

که در آن Mg ماتریس جرم بدون در نظرگیری جرم سازه فوقانی و شالوده است. یعنی در حقیقت تنها جرم زمین در نظر گرفته شده است. ui جابجایی نسبی در درجات آزادی است و اگر ui در کلیه درجات آزادی سازه ای تقریبا برابر مقادیر آن در پایه سازه باشد، در نتیجه اندرکنش سینماتیکی قابل صرف نظر کردن است و حرکت زمین در میدان آزاد زمین به همان صورتی که هست در سازه ظاهر می شود. در واقع وقتی گفته می شود اثرات سینماتیکی اهمیت دارد، معنی این عبارت آن است که نمی توان به طور مستقیم پاسخ میدان آزاد را به پایه سازه اعمال کرد و لازم است تغییراتی در آن داده شود.



شکل ۰-٤: روش اجتماع آثار: اندرکنش سینماتیکی (سمت چپ) و اندرکنش اینرسی دار(سمت راست)[٦]

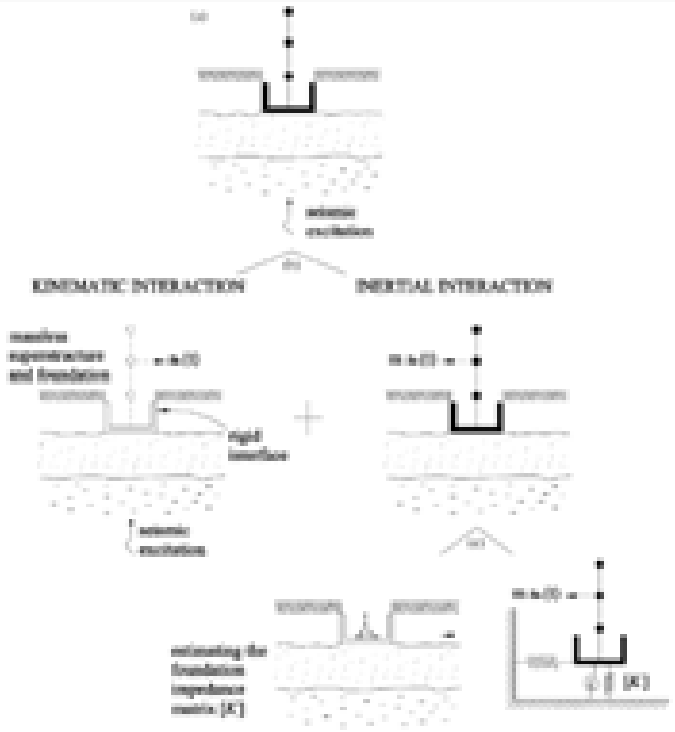
در مرحله ی دوم مسئله ی اندرکنش اینرسی دار حل می شود که در بردارنده ی ماتریس جرم کلی در سمت چپ است و نیروهای موثر لرزه ای ر آن اثر می کنند. معادله ی تعادل در این حالت به صورت رابطه ی زیر نوشته می شود.

$$M_g\ddot{u}_{II} + C\dot{u}_{II} + Ku_{II} = -M_s(\ddot{u}_I + I\ddot{u}_g)$$

در شکل(۵-۱)، تعبیر فیزیکی روش جمع آثار قابل مشاهده است. بر این اساس در اندرکنش سینماتیکی لایه خاک به طور کامل مدل می شود، ولی سازه و پی فقط دارای سختی هستند، ولی برای آن ها جرم منظور نشده است. همچنین تحریک ورودی بر پایه ی مدل وارد شده است. در نتیجه تحلیل سینماتیکی، حرکت ورودی پی به دست می آید.

[۳] Kinematic Interaction

این حرکت با پاسخ میدان آزاد لایه خاک تفاوت دارد و اغلب کوچکتر از آن است. علاوه بر این اندرکنش سینماتیکی منجر به بروز مولفه ی چرخش در پی می شود که برای پی های مدفون قابل توجه خواهد بود[۷].از سوی دیگر اندرکنش اینرسی دار در واقع پاسخ سیستم کامل خاک-پی-سازه به شتابی است که بر سازه فوقانی وارد می شود و در اثر اندرکنش سینماتیکی به وجود آمده است. تحلیل اندرکنش اینرسی دار در دو مرحله انجام می گردد. در مرحله اول امپدانس دینامیکی پی که مشتمل بر فنرها و میراگرهایی به ازای هر درجه آزادی است، محاسبه می گردد. در مرحله دوم سازه و پی بر روی فنر و میراگرهای محاسبه شده قرار گرفته و تحت تحریک شتاب برآوردشده در اندرکنش سینماتیکی، قرار می گیرند.



شکل ۰-۵: هندسه ی سازه (تصویر بالا)، تفکیک حل به اندرکنش سینماتیک و اینرسی دار(تصویر وسط)، مراحل حل اندرکنش اینرسی دار (تصویر پایین) [۷]

۱-۴-۵ روش مدل مخروط در تحلیل اندرکنش خاک و سازه

در این روش یک پی بدون جرم بر روی سطح خاک نیمه بی نهایت قرار می گیرد و ارتعاشات از طریق این پی در محیط خاکی انتشار می یابند. فرض اولیه در این روش آن است که امواج فقط در محدوده یک مخروط با زاویه مشخص انتشار می یابند. این فرض

ساده کننده منجر به حصول روابط ساده برای سیستم می گردد. در این مدل نظیر آن چه در مدل های اجزای مجزا (فنر و میراگر) وجود دارد، زمین توسط مجموعه ای از جرم ها و فنرها مدلسازی می گردد. مطابق مدل مخروط پی می تواندرجه حرکت افقی، قائم و چرخشی داشته باشد[۸].

۱-۴-۶ تحلیل اندرکنش خاک و سازه در آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰

بسیاری از آیین نامه های طراحی لرزه ای ساختمان ها در سال های اخیر مبحث اندرکنش خاک و سازه را مورد توجه قرار داده اند. اغلب این آیین نامه ها در تحلیل استاتیکی معادل به کارگیری اندرکنش را مجاز دانسته اند. تاثیر اندرکنش در وهله اول به صورت اصلاح پریود ارتعاش آزاد سازه و میرایی سیستم دیده شده است. در مراحل بعدی کاهش برش پایه و افزایش تغییرمکان ها مورد توجه است. با این حال کاهش برش پایه در آیین نامه ها به یک درصد مشخص محدود شده است.لذا در این بخش به جزئیات اشاره شده در خصوص تحلیل اثرات اندرکنش خاک و سازه مطابق با پیوست پنجم استاندارد ۲۸۰۰ [۸] خواهیم پرداخت. در شرایطی که لحاظ اثرات اندرکنش خاک وسازه در تحلیل یک سازه، ضروری باشد، می توان از روش تحلیل استاتیکی معادل، با هدف تعیین نیروهای ناشی از زلزله و تغییر شکل های ایجاد شده در سازه با لحاظ اثرت اندرکنش خاک و سازه، استفاده نمود. لازم به ذکر است استفاده از روش پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ زمانی می تواند مورد استفاده قرار گیرد که در هنگام مدل سازی و تحلیل سازه از فرض تکیه گاه ثابت استفاده شده باشد و سازه بر روی زمین های نوع ۱، ۲ و یا ۳ مستقر باشد. به بیان دیگر، چنان چه در مدل سازی سازه، اثر انعطاف پذیری پی صریحا و با استفاده از روش های معتبر مکانیک خاک لحاظ شده باشد، استفاده از روش حاضر مجاز نیست.

الف- روش تحلیل استاتیکی معادل

نیروی برشی پایه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک، در مقایسه با حالتی که از اندرکنش خاک صرف نظر شده بود، کمتر خواهد بود. لذا در این حالت برش پایه مطابق با رابطه ی زیر قابل محاسبه است:

$$V_{eu} = C \times w - \left[C - \bar{C}\left(\frac{۰.۰۵}{\beta_e}\right)^{۰.۴}\right]\overline{w} \leq ۰.۱۵C \times W$$

در این رابطه C ضریب زلزله و با فرض زمان تناوب سازه دارای تکیه گاه ثابت می باشد. $\bar{C}$ضریب زلزله با فرض زمان تناوب موثر سازه، محاسبه شده است.Be درصد میرایی

بحرانی موثر برای سیستم سازه و پی می باشد. $\overline{W}$ وزن موثر لرزه ای در محاسبات اندرکنش که برابر با ۰,۷W در نظر گرفته می شود. زمان تناوب اصلی موثر سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه، مطابق با رابطه ی زیر قابل محاسبه است.

$$T_e = T\sqrt{۱ + \frac{\bar{K}}{K_y}(۱ + \frac{K_y\bar{h}^۲}{K_\theta})}$$

در این رابطه، T زمان تناوب اصلی سازه در حالت تکیه گاه ثابت است و $\bar{K}$ سختی سازه در حالت تکیه گاه ثابت است که از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\bar{K} = ۴\pi^۲ \ (\frac{\bar{W}}{gT^۲})$$

در این رابطه h ارتفاع موثر سازه که برابر با ۰,۷ ارتفاع کل سازه است، در نظر گرفته می شود. kθ سختی حرکت گهواره ای پی، ky سختی حرکت جانبی پی و g شتاب ثقل می باشد. در حالتی که سازه بر روی پی سطحی گسترده در نزدیکی سطح زمین قرار گرفته باشد و یا در عمقی مدفون باشد که در تماس دیوارهای جانبی با خاک در هنگام زلزله طرح را نتوان موثر در نظر گرفت، به جای رابطه ی قبلی می توان زمان تناوب را از رابطه ی زیر محاسبه نمود.

$$T_e = T\sqrt{۱ + \frac{۲۵\alpha r_a\bar{h}}{V_S^۲T^۲}(۱ + \frac{۱.۱۲r_a\bar{h}^۲}{\alpha_\theta r_m^۳})}$$

در این رابطه α شاخص نسبت جرم سازه به خاک است و از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\alpha = \frac{\bar{w}}{\gamma A.\bar{h}}$$

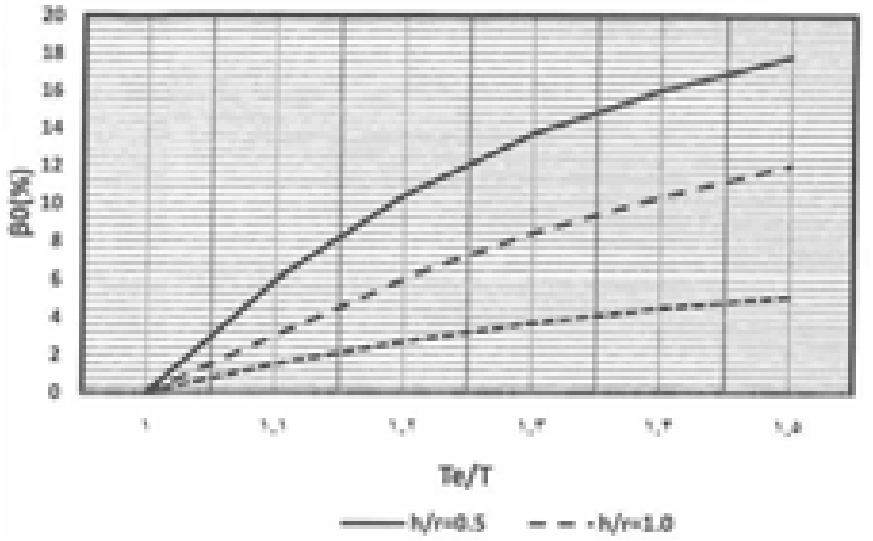
 در این رابطه متوسط وزن مخصوص خاک و r_a و r_m ابعاد مشخصه ی پی هستند که از روابط زیر به دست می آیند.

$$r_a = \sqrt{\frac{A_O}{\pi}}$$

$$r_m = \sqrt[۴]{\frac{۴I_O}{\pi}}$$

در این روابط A_0 مساحت باربر پی، I_0 ممان اینرسی سطح باربر پی حول محور افقی که از مرکز پی عبور می کند و Vs سرعت موج برشی در خاک سازگار با سطح کرنش تحت اثر زلزله طراحی می باشد. میرایی موثر سیستم سازه-پی از رابطه ی زیر قابل محاسبه است. در این رابطه B_0 نسبت میرایی پی است که از روی شکل (۱-۶) قابل محاسبه است.

$$\beta_e = \beta_0 + \frac{0.05}{(\frac{T_e}{T})^3}$$



شکل ۰-٦: نسبت میرایی پی[۹]

۱-۵ مفهوم کلی اثر ساختگاه

برای تحلیل لرزه ای سازه هایی که واقع بر خاک غیر صلب می باشند موارد زیر باید در نظر گرفته شود [۱۰] : الف: تشدید امواج لرزه ای بوسیله خاک ، ب: انعطاف پذیری شالوده به سبب تغییر شکل خاک اطراف شالوده در اثر انتقال انرژی بین سازه و خاک که قبلاً اثر ساختگاه نامیده می شد و امروزه اندرکنش خاک و سازه نام گرفته است. مورد الف، دربرگیرنده تفاوت در حرکت ورودی با حرکتی که سازه بر روی بستر سنگی تجربه می کند، می باشد. و مورد ب، دربرگیرنده درجات آزادی بزرگتر در مقایسه با سازه هایی که بر بستر سنگی واقع شده اند خواهد بود. علاوه بر این، هدر رفت انرژی در امتداد انتشار تشعشعی امواج در خاک وجود دارد که این مورد در سازه های واقع بر بستر سنگی بیان نشده است. با این حال حدود سی سال است که به اثر ساختگاه و اندرکنش خاک و سازه توجه قابل ملاحظه ای شده است.

۱-۵-۱ تقسیم بندی ساختگاه های متفاوت

آلتو[۹] [۱۰] در سال ۱۹۷۸ یک مطالعه آماری بر پایه ۳۲ حرکت قوی بستر سنگی جهت تعیین برش پایه دینامیکی ساختمان ها روی سه ساختگاه متفاوت که معرف خاک سخت، خاک غیرچسبنده عمیق و رس نرم می باشد انجام داده است. بدین منظور یک ساختمان کوتاه با پلان گسترده و یک ساختمان بلند و لاغر با سیستم های مقاوم جانبی قاب-دیوار و قاب-دیوار برشی، انتخاب گردیده است. بر این اساس شرایط متفاوت خاک به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- شرایط خاک سخت یا زمین سخت، شامل هر ساختگاهی که دارای عمق لایه خاک کمتر از حدود ۶۱ متر(ft۲۰۰) و خاک روی بستر سنگی از رسوب ماسه، شن یا رس سخت باشد.

۲- شرایط خاک غیر چسبنده عمیق یا رس سخت شامل ساختگاهی است که عمق خاک از حدود ۷۶ متر (ft۲۵۰) تجاوز کرده و خاک بالای سنگ بستر از رسوب ماسه، شن و یا رس سخت باشد.

۳- رس نرم تا نسبتاً سخت یا ماسه که شامل ۹ متر (ft۳۰) یا بیشتر از رس نرم تا نسبتاً سخت، با و یا بدون لایه های میانی ماسه یا خاکهای غیر چسبنده دیگر باشد.

در سال های اخیر روش های ریاضی و برآوردهای ساده مهندسی برای حل مساله اندر کنش توسعه داده شده است. اما در میان روش های متفاوت در دسترس، روش اجزاء محدود به دلیل سادگی و مدلسازی واقع گرایانه با هندسه و خصوصیات مصالح، گسترده تر می باشد. با این وجود در اکثر موارد برآوردهای ساده مهندسی، تعیین اثرات ساختگاه و اندرکنش خاک و سازه را ممکن ساخته است.

۱-۵-۲ خصوصیات خاک

رفتار خاک تحت بارگذاری دینامیکی بیشتر به صورت غیرخطی می باشد. وفرض شده است که وابسته به فرکانس بارگذاری باشد. چرخه کلی تنش کرنش بدست آمده از تحریک دامنه ثابت حالت پایدار در شکل(۱-۷) نشان داده شده است[۱۱]. بر این اساس خصوصیات دینامیکی خاک به صورت زیر می باشد:

مدول برشی در کرنش پایین G_0

[۹] Alto ۱۹۷۸

مدول سکانت G^*، در دامنه کرنش γ

نسبت میرایی هیسترتیک، $\Delta=\beta w/(4\pi w)$ که Δw مقدار انرژی هدر رفته در هر سیکل و w انرژی کرنشی قابل بازگشت بدست آمده از رابطه $w=1/2G^*\gamma^2$ می باشد.

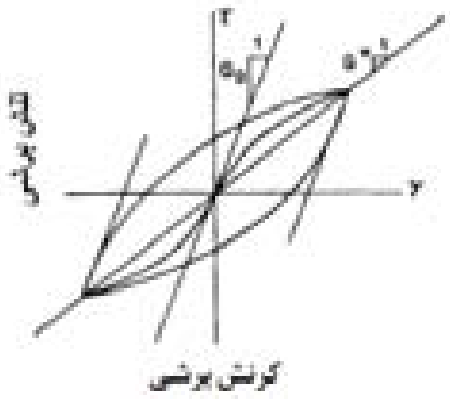
سید و ایدریس[10]رابطه ساده شده زیر را برای مدول برشی ماسه ارائه داده اند:

$$G^* = 1000K_2(\delta_m)^{1/2}$$

$$\delta_m = (1 + 2K_0)\delta_y/3$$

در معادله فوق G^* به صورت lb/ft2 بیان شده، m σ میانگین تنش موثر ، $K_0 = 0/4$ ، ضریب فشار زمین در حالت سکون، σv تنش موثر عمودی و K_2 تابع کرنش می باشد. مقدار K_2 در کرنش های کوچک ٪ ۴-۱۰ می باشد که از رابطه زیر بدست آمده است. در شکل(۱-۷) محور افقی کرنش برشی و محور قائم بیانگر تنش برشی می باشد.

$$K_2 = 61\ (1 + \frac{D_{r-75}}{100})$$



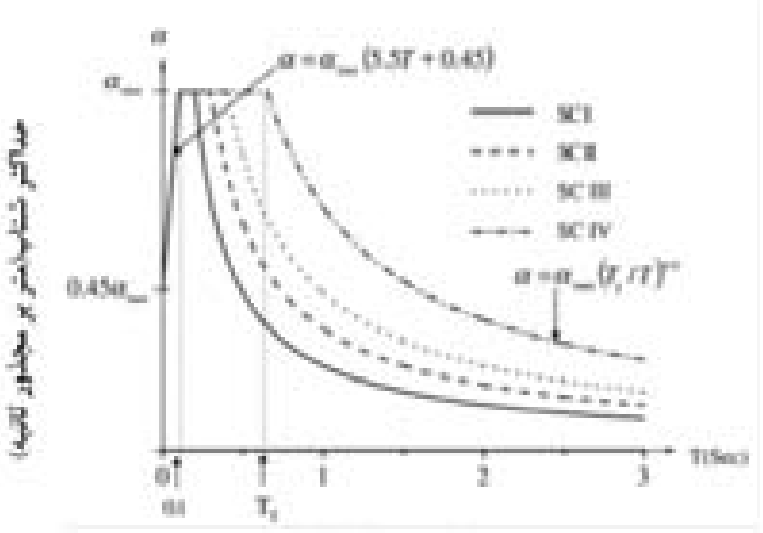
شکل ۰-۷: رابطه کلی تنش-کرنش خاک تحت تحریک حالت پایدار دامنه ثابت[۱۱]

۱-۶ ساختار سازی برای ماتریس احتمالاتی خسارت

ون[6]و همکاران[۱۲]در مطالعه ای به بررسی ساختار سازی جهت دستیابی به ماتریس احتمالاتی خسارت پرداختند. در این تحقیق، اگرچه اثر زمین شناسی و بیسین (basin)[7]

[10] Seed &Idriss
[11] Z.p Wen۲۰۰۲
[7] حوزه ی زمین شناسی

در نظر گرفته نشده، به علاوه اثر مدت حرکات قوی زمین نیز شامل نشده است، اما طیف پاسخ طرح ساختگاه و زلزله، از آیین نامه چین ۸۹-۱۱ GBJ به عنوان حرکت ورودی تطبیق داده شده است. همان طور که در شکل (۱-۸) نشان داده شده است. ضریب لرزه α در طیف بیان شده، و وابسته به پریود طبیعی ساختگاه Tg و شرایط ساختگاه می باشد. شرایط ساختگاه در چهار گروه به نام های SCI، SCII، SCIII و SCIV طبقه بندی شده است، که مطابقت با ساختگاه سخت، ساختگاه متوسط-سخت، ساختگاه متوسط-نرم و ساختگاه نرم دارد. عموماً SCI ساختگاه سنگی و SCII متعلق به ساختگاه با ضخامت کمتر از ۹ متر از خاک سخت با سرعت موج برشی vs >۵۰۰m/s و SCII متعلق به یک ساختگاه با ضخامت ۳-۸۰ متر از خاک متوسط-سخت با ۵۰۰>vs>۲۵۰m/s یا یک خاک متوسط-نرم(۲۵۰>vs>۱۴۰m/s) با ضخامت بیشتر از ۸۰ متر، و SCIV متعلق به یک ساختگاه با خاک نرم و vs<۱۴۰ با ضخامت بیشتر از ۸۰ متر می باشد. ضریب لرزه ماکزیمم αmax از شکل(۱-۸) بدست آمده، و بستگی به سطح طراحی شدت زمین لرزه دارد. مقادیر αmax متعلق به شدت های VI،VII،VIII،IXوX به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۲۳، ۰/۴۵، ۰/۹۰ و۱/۸ بدست می آید[۱۲].



شکل ۰-۸: طیف طرح برای شرایط مختلف ساختگاه با میرایی ٪۵. به ازای حالت های مختلف ساختگاه I،II،IIIو IV (ساختگاه ها به ترتیب با SCI، SCII، SCIII و

SCIV مشخص شده اند) [۱۲]

۱-۶-۱ سیستم خاک سازه

طباطبایی فر و معصومی[۱۳] در پژوهشی نتیجه گرفتند، متداول ترین روش اندرکنش خاک-سازه (SSI)، استفاده برای سیستم های خاک سازه ۳ بعدی، برپایه ساختارسازی "حرکت اضافه" می باشد. این ساختار سازی از نظر ریاضی ساده بوده و از نظر تئوری صحیح است. و دارای استفاده ساده در برنامه های تحلیل سازه خطی است. به علاوه، قابل استفاده برای حرکات میدان آزاد بوجود آمده از امواج زمین لرزه تولید شده از هر منبع می باشد. در این روش پیش از تحلیل های تعاملی خاک-سازه، حرکات میدان آزاد در پایه سازه محاسبه می شود. به دلیل توسعه معادلات اساسی تعادلی دینامیکی SSI، سیستم خاک-سازه سه بعدی مطابق شکل(۱-۹) در نظر گرفته می شود. تعادل دینامیکی سیستم خاک-سازه سه بعدی با میرایی اضافه شده و جرم متمرکز به صورت زیر است:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -m_x\ddot{v}_x(t) - m_y\ddot{v}_y(t) - m_z\ddot{v}_z(t)$$

در رابطه بالا M، ماتریس جرم مدل خاک سازه؛ C، ماتریس میرایی مدل؛ K، ماتریس سختی مدل؛ u، جابه جایی نسبی اضافه شده برای سیستم خاک سازه؛ mx، جرم در جهت x سازه اضافه شده؛ my، جرم در جهت y سازه اضافه شده؛ mz، جرم در جهت z سازه اضافه شده؛ $\ddot{v}_x(t)$مولفه میدان آزاد شتاب در جهت x درصورتیکه سازه وجود نداشته باشد؛ $\ddot{v}_y(t)$مولفه میدان آزاد شتاب در جهت y در صورتی که سازه وجود نداشته باشد؛ $\ddot{v}_z(t)$مولفه میدان آزاد شتاب در جهت z در صورتی که سازه وجود نداشته باشد[۱۳].

اغلب برنامه های کامپیوتری تحلیل سازه ها، به طور خودکار بارگذاری لرزه ای را به تمام درجات آزادی جرم مدل وارد کرده، و نمی توانند مساله SSI را حل کنند. این عدم توانایی باعث توسعه مدل فونداسیون بدون جرم شده است. که اجازه می دهد نیروهای لرزه ای صحیح به سازه وارد آید؛ اگرچه، از نیروهای اینرسی موجود در مصالح فونداسیون چشم پوشی شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل فونداسیون بدون جرم همگرا است همان طور که اندازه مدل فونداسیون افزایش یافته است. اگرچه راه حل های همگرایی ممکن است دارای خطاهای اجتناب پذیر در شکل های مود، فرکانس و پاسخ سیستم باشد. برای فعال کردن اندرکنش خاک-سازه در یک برنامه کامپیوتری، تنها شناسایی جرم فونداسیون برای قسمتی که در بارگذاری وارد نمی شود ضروری است. سپس برنامه اطلاعاتی را برای تشکیل جرم کلی و جرم اضافه شده به سازه نیاز دارد. برنامه SAP۲۰۰۰ دارای چنین انتخابی است،