بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه

تاثیر شالوده انعطاف پذیر بر پیچش سازه ها تحت تاثیر بارهای دینامیکی

استاد راهنما:

دکتر حامد صفاری

مؤلف:

رضا کمالی دلفارد

شهریورماه ۱۳۸۹

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

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

دانشجو :رضا کمالی دلفارد

استاد راهنما : دکتر حامد صفاری

استاد مشاور :

داور ۱ : دکتر محمد جواد فدایی

داور۲ : دکتر محمد حسین باقری پور

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: پروین صفاپور

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : حجت الله رنجبر

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

تقدیم به پدر دلسوز، مادر مهربان و همسر فداکارم

تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که در گذر از تمام مراحل و مشکلات زندگی یار و یاور ماست و بهترین هدایت‌گر اوست. در اینجا قبل از هر کس از استاد دلسوز، سخت کوش و پرتلاشم جناب آقای **دکتر حامد صفاری** که افتخار شاگردی ایشان را دارم کمال قدردانی و تشکر را دارم. همچنین از همه دوستان، هم اتاقی ها و هم کلاسی هایم به ویژه آقایان **علیرضا بهزادی** و **غفار محمدی** که در مراحل مختلف انجام پایان نامه کمک حال اینجانب بودند کمال قدردانی را می‌نمایم. و در نهایت از زحمات سرکار خانم **مهتاب بردباری** که مانند همراهی مهربان و سرکار خانم **فاطمه ابدانی** که همانند مادری دلسوز در مراحل مختلف یار و یاور من بودند کمال تشکر و قدر دانی را دارم.

چکیده

در تحلیل دینامیکی سازه‌های معمولی عموما فرض می شود که خاک زیر شالوده صلب بوده و از انعطاف پذیری خاک زیر شالوده صرف نظر می‌شود. در این حالت پاسخ سازه متاثر از خواص دینامیکی خود سازه است و خواص خاک زیر شالوده تاثیری در پاسخ سازه ندارد. در حالی که با در نظر گرفتن خاک زیر شالوده، سیستم جدیدی از خاک و سازه تشکیل خواهد شد که پاسخ آن متاثر از خواص دینامیکی سیستم جدید خواهد بود. در اغلب آیین نامه‌ها بخصوص آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، تحلیل دینامیکی با فرض صلب بودن خاک زیر شالوده صورت می گیرد.

تاثیر لحاظ کردن انعطاف پذیری خاک در پاسخ پیچشی سازه ها موضوع اصلی این مطالعه است. بر این اساس سازه های با سه درجه آزادی بر روی خاک که با طبقه بندی چهارگانه زمین در آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران تطبیق دارد انتخاب و مدل مناسب نیم فضا و المان محدود برای احتساب اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از روشی که مولفه‌های پیچشی حرکت زمین را با در نظر گرفتن سرعت موج برشی و بعد شالوده بدست می‌دهد، مساله پیچش در سازه‌ها بررسی گردیده و نتایج به صورت خروج از مرکزیت تصادفی بیان شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که لحاظ کردن انعطاف پذیری خاک زیر شالوده در پاسخ دینامیکی سازه-ها می‌تواند نقش مهمی داشته باشد.

کلمات کلیدی: *اندرکنش سازه و خاک، پیچش اتفاقی، موج برشی*

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه اندرکنش خاک و سازه ۳

۱-۳ اهداف ۱۰

۱-۴ ساختار پایان نامه ۱۰

فصل دوم: مروری برکارهای گذشته و تحلیل مساله اندرکنش خاک و سازه ۱۲

۲-۱ مقدمه ۱۳

۲-۱-۱ اندرکنش استاتیکی ۱۳

۲-۱-۲ اندرکنش دینامیکی ۱۴

۲-۲ تحلیل مساله اندرکنش خاک و سازه ۱۹

۲-۳ روش‌های تحلیل اندرکنش خاک-سازه-فونداسیون ۱۹

۲-۳-۱ روش مستقیم ۲۰

۲-۳-۲ روش زیر سازه ۲۱

۲-۴ اندرکنش اینرسی ۲۳

۲-۴-۱ رفتار سیستم خاک-فونداسیون-سازه ۲۳

۲-۴-۲ تغییر مشخصات سازه با در نظرگیری اندرکنش لرزه‌ای خاک-فونداسیون-سازه ۲۵

۲-۵ محاسبه توابع امپدانس ۲۹

۲-۵-۱ کلیات ۲۹

۲-۵-۲ تابع امپدانس برای پروفیل خاک غیریکنواخت ۳۱

۲-۵-۳ تابع امپدانس برای فونداسیون مدفون ۳۲

۲-۵-۴ تابع امپدانس برای فونداسیون با شکل دلخواه ۳۳

۲-۵-۵ تابع امپدانس برای فونداسیون انعطاف‌پذیر ۳۳

۲-۵-۶ تابع امپدانس برای فونداسیون شمعی ۳۴

۲-۶ اندرکنش کینماتیک ۳۴

۲-۶-۱ فونداسیون‌های سطحی بر روی سطح خاک ۳۵
۲-۶-۲ فونداسیون‌های مدفون ۳۸
۲-۶-۳ فونداسیون‌های شمعی ۴۰
۲-۷ کاربرد توابع انتقال برای محاسبه حرکت فونداسیون ۴۱
۲-۸ کاربرد در استانداردهای طراحی لرزه‌ای ۴۲
۲-۸-۱ اندرکنش کینماتیک و اینرسی ۴۲
۲-۸-۲ طراحی المان های فونداسیون ۴۴
فصل سوم: بررسی تاثیر ابعاد شالوده و سرعت امواج زلزله در تعیین مولفه‌های پیچشی حرکت زمین ٤٦
۳-۱ مقدمه ۴۷
۳-۲ محاسبه شتاب زاویه‌ای ۴۸
۳-۳ طیف‌های پاسخ پیچشی ۵۰
فصل چهارم: مدل‌های جرم، فنر و میراگر و اجزا محدود برای بررسی اندرکنش خاک و سازه ٥٦
۴-۱ مقدمه ۵۷
۴-۲ فونداسیون روی سطح خاک همسانگرد نیمه بی‌نهایت ۶۳
فصل پنجم: مدلسازی اجزا محدود سه بعدی سازه و خاک در Ansys ٦٦
۵-۱ مقدمه ۶۷
۵-۲ نحوه مدلسازی با سه درجه آزادی ۶۷
۵-۳ طبقه بندی خاک در زیر سازه ۶۸
۵-۴ انتخاب مدل خاک برای تحلیل دینامیکی ۶۹
۵-۵ نحوه مدلسازی و المان بندی به کمک ANSYS ۷۰
۵-۶ مدل با ابعاد ۵×۵ متر ۷۱
۵-۶-۱ در نظر گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه ۷۴
۵-۷ مدل با ابعاد ۱۰×۱۰ متر ۷۸
۵-۷-۱ در نظر گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه ۸۰

۵-۷-۲ تاثیرات پیچش ۸۳
۵-۷-۲-۱ نتایج تحلیل ۸۳
۵-۷-۳ در نظر گرفتن اثرات اندرکنش ۸۵
۵-۸ مدل با ابعاد ۱۰×۲۰ متر ۸۹
۵-۸ مدل با ابعاد ۱۰×۳۰ متر ۹۱
۵-۸ مدل با ابعاد ۱۰×۴۰ متر ۹۳
۵-۸ جمع بندی نتایج ۹۵
نتیجه گیری و پیشنهادها **۹۶**
منابع ۹۸

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱ باز توزیع نیروهای قاب بواسطه اندرکنش خاک-سازه ۱۴
شکل۲-۲ اندرکنش کینماتیک ۱۶
شکل ۲-۳ اثر موج عبوری ۱۶
شکل ۲-۴ تحلیل روش مستقیم اندرکنش خاک-سازه. کل مساله مدل شده و پاسخ در ۲۱
شکل ۲-۵ روش زیر سازه برای تحلیل مساله خاک-سازه ۲۲
شکل ۲-۶ مدل فنر وینکلر گسسته. ۲۴
شکل۲-۷ مدل فنرهای الاستوپلاستیک جدا برای فونداسیون صلب ۲۴
شکل۲-۸ مدل نوسانی ساده برای تحلیل اندرکنش اینرسی تحت تحریک جانبی ۲۵
شکل ۲-۹ نسبت طول پریود و ضریب میرایی فونداسیون برای سازه با یک درجه آزادی ۲۸
شکل ۲-۱۰ تاثیر میرایی فونداسیون و طول پریود بر شتاب طیفی ۲۸
شکل ۲-۱۱ ضریب میرایی و سختی فونداسیون برای نیم فضای الاستیک و ویسکوالاستیک ۳۰
شکل ۲-۱۲دامنه توابع انتقال بین حرکت میدان آزاد و حرکت ورودی فونداسیون ۳۵
شکل ۲-۱۳ نتایج رگرسیون خطی بین κ_a و V ۳۷
شکل ۲-۱۴ دامنه تابع انتقال برای فونداسیون استوانه ای مدفون ارائه شده ۳۹
شکل ۲-۱۵ استفاده از طیف تقاضا و ظرفیت برای تعریف نقطه عملکرد ۴۳
شکل۳-۱ تاثیر موج برشی بر حرکات شالوده ساختمان ۴۹
شکل۳-۲ مدل یک درجه آزادی جرم و فنر پیچشی ۵۰
شکل ۳-۳ طیف پیچشی برای Vs=۱۵۰m/s و d=۱۰m ۵۳
شکل ۳-۴ میزان متوسط طیف پیچشی برای Vs=۱۵۰m/s ۵۳
شکل ۳-۵ میزان متوسط طیف پیچشی برای Vs=۲۷۵m/s ۵۴
شکل۳-۶ میزان متوسط طیف پیچشی برای Vs=۵۶۰m/s ۵۴
شکل ۴-۱ جابجایی عمودی صفحه قرار گرفته روی سطح خاک روی محیط ۵۸
شکل۴-۲ الگوی انتشار موج و مخروط‌های مربوطه در لایه خاک و محیط نیمه بی‌نهایت ۵۹

شکل۴-۳ ضرایب سختی دینامیکی عمودی روی لایه خاک سخت تر از محیط نیمه بی‌نهایت ۶۲
شکل۴-۴ صفحه روی سطح خاک همسانگرد نیمه بی‌نهایت ۶۴
شکل ۴-۵ مدل مخروط و المان‌های مجزای معادل a) مخروط b) مدل المان مجزا برای انتقال c) مدل المان مجزا برای چرخش ۶۴
شکل ۴-۶ مخروط‌ها برای درجات آزادی مختلف با نسبت راس ، سرعت انتشار موج و تغییر شکل مربوطه ۶۵
شکل ۵-۱ نمای سه بعدی و پلان ساختمان مورد مطالعه ۷۱
شکل ۵-۲ سازه با تکیه‌گاه ثابت ۷۲
شکل ۵-۳ تغییر شکل حاصل از مد سوم سازه مدل شده در ANSYS ۷۲
شکل ۵-۴ طیف‌های افقی مربوط به ۱۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل ۷۳
شکل ۵-۵ مدل نیم فضا و المان محدود برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه ۷۴
شکل ۵-۶ مد پیچشی سازه قرار گرفته روی خاک نوع III ۷۶
شکل ۵-۷ نتایج تحلیل طیفی سازه با تکیه گاه ثابت و چهار نوع خاک ۷۸
شکل ۵-۸ نمای سه بعدی و پلان ساختمان مورد مطالعه ۷۹
شکل ۵-۹ مود سوم در سازه با تکیه گاه ثابت ۷۹
شکل ۵-۱۰ مدل نیم فضا و المان محدود برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه ۸۰
شکل ۵-۱۱ نتایج تحلیل طیفی سازه با تکیه گاه ثابت و چهار نوع خاک ۸۲
شکل ۵-۱۲ مدل تحلیلی پیچش ۸۴
شکل۵-۱۳ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۱ ۸۷
شکل ۵-۱۴ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۲ ۸۷
شکل ۵-۱۵ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۳ ۸۸

شکل ۵-۱۶ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۴ ۸۸
شکل۵-۱۷ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۱ ۸۹
شکل ۵-۱۸ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۲ ۸۹
شکل ۵-۱۹ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۳ ۹۰
شکل ۵-۲۰ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۴ ۹۰
شکل۵-۲۱ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۱ ۹۱
شکل ۵-۲۲ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۲ ۹۱
شکل ۵-۲۳ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۳ ۹۲
شکل ۵-۲۴ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۴ ۹۲
شکل۵-۲۵ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۱ ۹۳
شکل ۵-۲۶ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۲ ۹۳
شکل ۵-۲۷ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۳ ۹۴
شکل ۵-۲۸ مقایسه بین خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای مدل با تکیه‌گاه ثابت و مدل با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای خاک نوع ۴ ۹۴

شکل ۵-۲۹ متوسط خروج از مرکزیت‌های بدست آمده با توجه به نوع خاک و بعد شالوده ۹۵

فهرست جدول ها

جدول ۳-۱: تقسیم بندی انواع خاک‌ها بر اساس سرعت موج برشی ۵۲

جدول ۴-۱ مفاهیم کلیدی برای مدلسازی یک فونداسیون سه بعدی روی سطح خاک همسانگرد نیمه بی‌نهایت بوسیله مخروط ۶۵

جدول ۵-۱ مشخصات خاک زیر سازه ۶۸

جدول ۵-۲ خصوصیات مدل مورد مطالعه ۷۱

جدول۵-۳ زمان‌های تناوب سازه ۷۲

جدول ۵-۴ حداکثر جابجایی‌های مرکز جرم سازه در تحلیل طیفی ۷۳

جدول ۵-۵ خصوصیات مدل فنر و میراگر ۷۵

جدول ۵-۶ ضرایب سختی و میرایی و جرم بر اساس درجات آزادی ۷۶

جدول ۵-۷ زمان‌های تناوب سازه در دو حالت با تکیه‌گاه ثابت و مدل نیم فضا و المان محدود ۷۷

جدول ۵-۸ جابجایی‌های مرکز جرم مدل از تحلیل طیفی در جهت x و y ۷۷

جدول ۵-۹ خصوصیات مدل مورد مطالعه ۷۹

جدول ۵-۱۰ ضرایب سختی و میرایی و جرم بر اساس درجات آزادی ۸۱

جدول ۵-۱۱ زمان‌های تناوب سازه در دو حالت با تکیه‌گاه ثابت و مدل نیم فضا و المان محدود ۸۱

جدول ۵-۱۲ جابجایی‌های مرکز جرم مدل از تحلیل طیفی در جهت x و y ۸۲

جدول ۵-۱۳ شتاب‌های زاویه‌ای وممان‌های بدست آمده از طیف‌های پیچشی برای خاک نوع ۱ ۸۴

جدول ۵-۱۴ حداکثر جابجایی لبه و خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای ایجاد این جابجایی ۸۵

جدول ۵-۱۵ خصوصیات پیچشی مربوط به سازه ۸۵

جدول ۵-۱۶ مقایسه خروج از مرکزیت‌های بدست آمده برای سازه با پایه ثابت و سازه قرار گرفته بر روی خاک نوع ۴ ۸۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در تحلیل دینامیکی سازه‌ها غالبا تکیه‌گاه سازه صلب در نظر گرفته شده و از انعطاف پذیری خاک زیر شالوده صرف نظر می‌شود. در این حالت پاسخ سازه‌ها در مقابل بارهای استاتیکی و دینامیکی تابع خواص دینامیکی سازه می‌باشد و به خواص خاک در زیر شالوده بستگی ندارد. در سازه‌های نرمی که بر روی خاک سخت قرار گرفته‌اند خواص دینامیکی سازه کمتر از خاک زیر آن تاثیر می‌پذیرد بنابراین فرض سازه با پایه ثابت برای سازه‌های نرم که بر روی خاک سخت قرار گرفته‌اند می‌تواند قابل قبول باشد، اما برای سازه‌های سخت که بر روی خاک نرم قرار گرفته‌اند صحیح نمی باشد. این موضوع می‌تواند در سازه‌های با اهمیت زیاد اثرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. به عنوان مثال در طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای مساله اندرکنش خاک و سازه حتما باید در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن این اثرات، سیستم جدیدی از خاک و سازه تشکیل خواهد شد که خواص دینامیکی سیستم جدید با سازه‌ی با پایه‌ی گیردار متفاوت می‌باشد و لذا پاسخ آن نیز متفاوت خواهد بود این پدیده که به اندرکنش خاک و سازه موسوم است از بیش از سه دهه‌ی قبل توجه مهندسین را به خود جلب کرده است.

در سال‌های گذشته با بررسی خسارات در زلزله‌های حادث شده، این موضوع روشن شده که یکی از دلایل مهم خرابی‌ها، مساله پیچش در ساختمان‌ها بوده است. محققان پس از بررسی این مشاهدات سعی به در نظر گرفتن مساله پیچش در سازه‌ها کردند. پس از بررسی‌های متعدد پیچش در سازه‌ها را به دو صورت پیچش طبیعی و اتفاقی تقسیم بندی کرده‌اند که پیچش طبیعی در اثر فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی ایجاد می‌شود، اما پیچش اتفاقی به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که یکی از آنها مولفه‌های پیچشی حرکت زمین نسبت به محور عمودی است. از میان حرکات مختلف زمین تاثیر مولفه‌های پیچشی حرکت زمین آن چنان که باید تاکنون مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. حتی امروزه با گذشت ۴۰ سال بعد از بوجود آمدن کامپیوترها و توانایی محاسبه با روش‌های عددی قدرتمند، بیشتر محققان هنوز از در نظر گرفتن مولفه‌های پیچشی حرکت زمین چشمپوشی می‌کنند.

طیف پاسخ در سال های اخیر در تخمین اثرات حاصل از بارهای دینامیکی بر سازه‌ها، خصوصا بارهای ناشی از زلزله کاربرد زیادی پیدا کرده است. به طور خلاصه طیف پاسخ نمودار پاسخ حداکثر (جابجایی، سرعت و شتاب) تمام سیستم‌های تک درجه آزادی به یک بارگذاری خاص است. در مراجع مطالعات متعددی بر روی تاثیر حرکات مختلف زمین بر روی سازه‌ها انجام شده است. این

حرکات شامل مولفه‌های افقی، مولفه‌های چرخشی حول محور موازی با سطح زمین و مولفه‌های پیچشی حول محور عمود بر سطح زمین می‌باشند. مولفه‌های افقی حرکت زمین به علت بزرگ بودن ابعاد پی برخی از ساختمان‌ها و کم بودن سرعت موج برشی در برخی از خاک‌ها، در نواحی مختلف شالوده مساوی نیستند و این مساله باعث ایجاد شتاب پیچشی در سازه می‌گردد.
در این پایان نامه سعی شده است که تاثیر حرکات مختلف زمین بر روی پیچش سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بررسی گردد.

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه اندرکنش خاک و سازه

کارهای تحقیقی انجام گرفته در زمینه اندرکنش خاک-سازه از چندین دهه پیش به طور جدی شروع شده است. و فرایند مذکور در عصر حاضر نیز در حال پیگیری است. ولی شاید بتوان گفت که تا اواخر دهه شصت . اوایل دهه هفتاد قرن بیست میلادی کار تحقیقاتی بر روی اندرکنش خاک-سازه انجام نگرفته بود.

اولین تحقیق بنیادی در زمینه اندرکنش خاک-سازه توسط ایان لی و هاوارد هریسون در سال ۱۹۷۰، تحت عنوان مقاله‌ای با عنوان تئوری اندرکنش پی و سازه انجام گرفت [۱]. نویسندگان این مقاله ضمن پرداختن به کارهای موردی گذشته و روش‌های ارائه شده در آن‌ها جهت تحلیل اندرکنش خاک-سازه به تحقیق در مورد سازه‌های با نرمی متوسط پرداخته و دو روش جهت بررسی اندرکنش در سازه‌های مزبور ارائه دادند. در روش اول تغییر مکان‌ها و دوران گره‌های اتصال روسازه به پی و نیروها و لنگرهای بوجود آمده در گره‌های مذکور را به عنوان مجهول فرض کرده وبا استفاده از اصل سازگاری برای روسازه و پی مجهولات فوق بدست می‌آیند. در روش دوم یک پروسه سعی و خطا جهت تعیین نیروها در روسازه و پی و توزیع فشار خاک زیر پی ارائه شده است. در انتها رابطه معروف طول مشخصه برای ارزیابی طبیعت پی‌ها به صورت $\lambda L = \sqrt[4]{\frac{KL^4}{4EI}}$ ارائه می‌شود که L عرض پی، K ضریب عکس العمل بستر، EI سختی خمشی پی و λL طول مشخصه پی می‌باشد. نویسندگان این مقاله ضمن ترجیح دادن مدل وینکلر برای نمایش خاک زیر سازه بدلیل سادگی آن در مقایسه با دیگر

مدل‌های خاک نتیجه‌گیری کردند که برای سازه‌های معمول با بار سرویس، فرض رفتار ارتجاعی برای سازه یک فرض معقول می‌باشد.

تحقیق بعدی در خصوص بحث اندرکنش استاتیکی در سال ۱۹۷۲ تحت عنوان تحلیل اندرکنش خاک-فونداسیون توسط پیتر براون و ایان لی صورت گرفت[۲]. نویسندگان مقاله ضمن تاکید بر اهمیت تحلیل اندرکنش خاک-سازه به مقایسه تحلیل سازه با و بدون اثر اندرکنش آن با خاک می-پردازند. نویسندگان این مقاله نتیجه‌گیری می‌کنند که رفتار سازه با کاهش سختی خاک دارای انحراف نسبت به فرض تکیه‌گاه صلب می‌شود که این امر نشان دهنده اهمیت سختی نسبی روسازه نسبت به خاک تکیه‌گاهی در نتایج تحلیل می‌باشد.

کینگ و چاندراسکاران در سال ۱۹۷۴ مقاله‌ای با عنوان تحلیل اندرکنش قاب فضایی چند طبقه با پی رادیه واقع بر یک لایه رس ناهمگن ارائه نمودند. محققان این مقاله با استفاده از تکنیک اجزا محدود خاک و سازه را مدل نموده و تحلیل اندرکنش را بر روی کل مجموعه خاک-سازه انجام دادند[۳].

در سال ۱۹۷۶ آقایان فاکاشی، میاهارا و جان اراتودیس مقاله‌ای با عنوان تحلیل ماتریسی اندرکنش پی-سازه ارائه نمودند. در این مقاله نویسندگان به استخراج ماتریس سختی برای سازه و همچنین پی پرداختند و روابط حاصل را برای تحلیل اندرکنش چند سازه معمول به کار گرفتند[۴].

مقاله بعدی در سال ۱۹۸۶ توسط پیتر براون و سای یو تحت عنوان بارگذاری تدریجی و اندرکنش سازه-پی ارایه گردید. محققان در این مقاله به بررسی بارگذاری مرحله‌ای(ساخت تدریجی) ساختمان بر باز توزیع بارها بین ستون‌های روسازه و نشست‌های تفاضلی پرداختند در حالی که در همگی مطالعات قبلی فرض شده بود که بار دفعتا بر سازه وارد می‌شود ولی در واقعیت بار به صورت تدریجی و همزمان با ساخت سازه بر آن وارد می‌شود[۵].

در سال ۱۹۸۷ آلام، رائو و سابرامنیا مقاله‌ای تحت عنوان جزیی تکیه‌گاه و اندرکنش خاک-قاب-سازه ارایه نمودند که طی آن، محققین به بررسی نشست و دوران جزیی پای ستون‌های طبقه همکف سازه در نتایج نیروی پی و روسازه پرداختند[۶].

در سال ۱۹۹۰ آقایان ویلادکار، گادبول و نورزایی مقاله‌ای با عنوان اندرکنش خاک-سازه در قاب-های صفحه‌ای با استفاده از المان‌های نامحدود ارایه نمودند. نویسندگان این مقاله به مدل جدیدی برای نمایش خاک تکیه‌گاهی سازه پرداختند به طوری که در این مدل خاک مجاور سازه با استفاده از المان محدود و خاک در فاصله دورتر از سازه، با المان نامحدود نمایش داده شد. محققان مذکور مرز انتقال از المان محدود به المان نامحدود جهت نمایش خاک تکیه‌گاهی سازه را حدود ۲/۵ برابر عرض پی سازه ذکر می‌کنند و نتیجه‌گیری کردند که فرض رفتار خطی و غیر خطی برای خاک تکیه‌گاهی منجر به نتایج متفاوتی برای نیروها هم در سازه و هم در خاک می‌شود و بنابراین ضرورت دارد که تحلیل غیر خطی اندرکنش با توجه به اهمیت سازه حتی‌الامکان صورت گیرد[۷].

آقایان ویلادکار، گادبول و نورزایی در سال ۱۹۹۱ مقاله‌ای تحت عنوان اندرکنش قاب سازه‌ای-پی رادیه-خاک با در نظر گرفتن سختی دال طبقه ارایه نمودند. در این مقاله نویسندگان به اهمیت اندرکنش خاک-پی-سازه اشاره کردند و همچنین اثر سختی دال طبقه را در تحلیل اندرکنش دارای اهمیت دانستند[۸].

آلام، رائو وسابرامنیا در سال ۱۹۹۱ مقاله دیگری تحت عنوان اندرکنش خاک-قاب-سازه و مدل وینکلر منتشر کردند. در این مقاله سعی بر مقایسه بین مدل‌های وینکلر و نیم‌فضای ارتجاعی بوسینسک در تحلیل اندرکنش بوده است[۹].

نورزایی در سال ۱۹۹۱ در مقاله‌ای تحت عنوان اندرکنش غیر خطی خاک-سازه در سازه‌های قابی با در نظر گرفتن خصوصیات غیر خطی خاک سطحی شالوده سازه به بررسی کلی اثر مذکور در تحلیل اندرکنش پرداخت[۱۰].

ویلادکار، گادبول و نورزایی در سال ۱۹۹۳ در مقاله‌ای با عنوان اثر سخت شوندگی کرنشی بر اندرکنش خاک–سازه در سازه‌های قابی به بررسی اثر در نظر گرفتن خاصیت سخت شوندگی کرنشی و رفتار الاستوپلاستیک خاک با معیار دراگر–پراگر پرداختند. برای حد تسلیم مصالح در نتایج تحلیل اندرکنشی خاک–سازه در قاب‌های ساختمانی تحلیل شده در دو حالت رفتار ارتجاعی–خطی والاستوپلاستیک خاک شالوده سازه تا حدود ۳۶٪ بار نهایی بر هم منطبق می‌باشند و برای مقادیر بالاتر بار وارده، اختلاف در نتایج بدست آمده بیشتر می‌گردد[۱۱].

همچنین در همین سال ویلادکار، گادبول و نورزایی در مقاله‌ای تحت عنوان تحلیل الاستوپلاستیک اندرکنش خاک–سازه در سازه‌های قابی با فرض رفتار الاستوپلاستیک کامل برای خاک شالوده قاب سازه‌ای به تحلیل اندرکنش خاک سازه پرداختند و نتیجه گیری نمودند که در اثر اندرکنش قاب سازه‌ای با شالوده آن معمولا نیروها و ممان‌های خمشی از ستون‌های داخلی قاب به ستون‌های خارجی آن منتقل می‌شود. همچنین محققان این مقاله بیان می‌دارند که در اثر اندرکنش، خاک زیر سازه در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند، اما خاک واقع در زیر لبه‌های خارجی سازه کاملا جاری می‌شود[۱۲].

در سال ۱۳۷۸ حمزه شکیب و مهرداد صدرنشین در مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی مقررات پیچش آیین-نامه‌های لرزه‌ای با توجه به تاثیر اندرکنش خاک–سازه، تاثیر پارامترهای سازه‌ای را در پاسخ ساختمان-های نامتقارن با استفاده از تحلیل غیر کشسان دینامیکی و با در نظر گرفتن تاثیر اندرکنش خاک–سازه برای گروهی از زلزله‌های واقعی ایران بررسی کردند. سپس خروج از مرکزیت طراحی حاصل از تحلیل با خروج از مرکزیت طراحی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای ایران، آمریکا، نیوزیلند، کانادا، مکزیک، استرالیا و اروپا مقایسه شده و با استناد به نقش پارامترهای مهم سازه‌ای با ملحوظ کردن انعطاف پذیری پایه، معادله‌ای برای خروج از مرکزیت طراحی پیشنهاد کردند.

در این مقاله به منظور بررسی تاثیر اندرکنش خاک–سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های نامتقارن معادله‌ای برای خروج از مرکزیت طراحی پیشنهاد شد. به منظور محاسبه لنگر پیچشی ناشی از عدم تقارن پاسخ غیر کشسان، مدل ایده‌آل یک طبقه با ۸ درجه آزادی تحت یک گروه ده تایی شتاب‌نگاشت زلزله‌های