بسم الله الرحمن الرحيم
كتبه ١٤١٧

دانشگاه تربیت معلم تهران
دانشکده فنی و مهندسی
گروه عمران

پایان نامه
جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

عنوان پایان نامه:

تحلیل لرزه‌ای سه بعدی سازه‌های خاکی- فولادی با استفاده از روش اجزای محدود

استاد راهنما:
دکتر علی فرهادی

استاد مشــاور:
دکتر مرتضی اسماعیلی

دانشجو:
احسان هومان

آذر ماه ۱۳۹۰

چکیده

در حدود سه دهه اخیر، استفاده از سازه‌های خاکی- فولادی در قالب‌های متنوعی از اعم از آبروها، زیر گذرها، روگذرها و همچنین پلهای راه و راه آهن مورد استقبال مهندسان عمران قرار گرفته‌است. بالا بودن سرعت اجراء و همچنین هزینه کمتر ساخت این پل‌ها بر جذابیت بکار گیری آنها در مقایسه با سایر انواع گزینه ای احداث پل افزوده است. یکی از مسائلی که از دیدگاه آئین نامه‌ای و همچنین تحقیقاتی در این سازه‌ها مورد توجه کمتری قرار گرفته است، موضوع تحلیل و طراحی لرزه‌ای آنهاست. با توجه به مدفون بودن این پل‌ها و اندرکنش خاک و ورق‌های موجدار فلزی در تامین باربری این سازه‌ها در قالب قوس‌های با اشکال مختلف، مساله تحلیل لرزه‌ای آنها از اهمیت و در عین حال پیچیدگی خاصی برخوردار است. در این پایان نامه به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های خاکی- فولادی، تعدادی مدل اجزای محدود سه بعدی با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی در برابر بارگذاری زلزله به کمک نرم افزار ABAQUS، مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای رفتار الاستیک و الاستو- پلاستیک، مدلسازی دو بعدی و سه بعدی، ارتفاع پوشش خاکریز، حداکثر شتاب زلزله، زاویه برخورد زلزله با سازه برای ۴ نوع دهانه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نیروهای داخلی بوجود آمده در قوس فولادی، در حالت الاستیک دو بعدی و الاستو- پلاستیک سه بعدی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین افزایش حداکثر شتاب زلزله اعمالی موجب افزایش مقادیر نیروهای داخلی می‌گردد. زاویه برخورد صفر بحرانی ترین حالت برای نسبت کمانش ورق‌های فولادی است. تغییرات ارتفاع پوشش خاکریز موجب افزایش حداکثر مقادیر نیروهای داخلی می‌گردد اما الگوی خاصی بر آن حاکم نیست.

فهرست مطالب مندرج

عنوان مطلب صفحه

فصل اول- کلیات

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- تعریف مسئله و بیان وضعیت فعلی موضوع ۱

۱-۳- ضرورت و اهمیت تحقیق ۲

۱-۴- روش و راه‌کار انجام تحقیق ۲

۱-۵- اهداف مورد نظر ۳

فصل دوم- مرور ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- بررسی روشهای تحلیل لرزهای سازههای خاکی- فولادی در آیین نامهها ۶

۲-۲-۱- آیین نامه آشتو (AASHTO 2010) ۶

۲-۲-۲- آیین نامه طراحی پل کانادا (CAN/CSA-S6-00) ۷

۲-۲-۳- دستورالعمل ASTM 2006 ..... ۹

۲-۲-۴-- استاندارد استرالیا (AS) و نیوزلند (NZS) ۹

۲-۲-۵- استاندارد BD12/01 ..... ۱۰

۲-۳- بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تحلیل لرزهای سازههای خاکی- فولادی ۱۰

۲-۳-۱- مقدمه ۱۰

۲-۳-۲- مطالعات عددی ۱۱

۲-۳-۳- مطالعات آزمایشگاهی ۲۸

فصل سوم- تحلیل دینامیکی پل خاکی-فولادی به روش اجزای محدود

۳-۱- مقدمه ۳۶

۳-۲- تحلیل اجزای محدود دینامیکی ۳۶

۳-۲-۱- معادل حرکت المانها ۳۶

۳-۲-۲- معادل تعادل دینامیکی ۳۸

۳-۲-۳- ملاحظات مربوط به گسسته سازی ۳۹

۳-۲-۴- شرایط مرزی ۳۹

۳-۳- مدلسازی مسئله ۴۱

۳-۳-۱- ساخت هندسه مسئله ۴۱

۳-۳-۲- انتخاب مدل رفتاری ۴۳

۳-۳-۳- تعیین نوع تحلیل ۴۹
۳-۳-۴- تعریف سطوح تماس ۵۰
۳-۳-۵- بارگذاری و شرایط مرزی ۵۵
۳-۳-۶- مش بندی ۵۷
۳-۳-۷- تحلیل ۵۹

فصل چهارم- نتایج تحلیل عددی پل خاکی- فولادی به روش اجزای محدود

۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- صحت سنجی مدل عددی ۶۰
۴-۲-۱- تحلیل شبه استاتیکی ۶۲
۴-۲-۲- تحلیل طیفی ۶۴
۴-۲-۳- تحلیل تاریخچه زمانی ۶۴
۴-۳- انتخاب پارامترهای تحلیل حساسیت به روش عددی ۶۷
۴-۴- بررسی اثر تحلیل حساسیت بر روی نیروهای داخلی ۶۷
۴-۴-۱- بررسی اثر رفتار غیرخطی و مدلسازی سه بعدی بر روی نیروهای داخلی ۶۸
۴-۴-۲- بررسی حداکثر شتاب زلزله اعمالی بر روی نیروهای داخلی قوس ۹۰
۴-۴-۳- بررسی زاویه برخورد زلزله به سازه بر روی نیروهای داخلی قوس ۹۲
۴-۴-۴- بررسی اثر رفتار ارتفاع پوشش خاکریز بر روی نیروهای داخلی ۱۰۲
۴-۵- بررسی اثر تحلیل حساسیت بر روی تغییرمکان‌ها ۱۰۶
۴-۶- بررسی اثر تحلیل حساسیت بر روی نسبت کمانش ورق فولادی ۱۱۵
۴-۶-۱- بررسی رفتار غیرخطی و مدلسازی سه بعدی بر روی نسبت کمانش ۱۱۵
۴-۶-۲- بررسی اثر زاویه برخورد بر نسبت کمانش ۱۲۱

فصل پنجم- جمع بندی و نتیجه گیری

۵-۱- مقدمه ۱۲۳
۵-۲- جمع بندی مطالب ارائه شده ۱۲۳
۵-۲-۱- اثر مدلسازی دو بعدی و سه بعدی ۱۲۳
۵-۲-۲- اثر رفتار الاستیک و الاستو- پلاستیک ۱۲۳
۵-۲-۳- اثر ارتفاع پوشش خاکریز ۱۲۴
۵-۲-۴- اثر حداکثر شتاب زلزله اعمالی ۱۲۴
۵-۲-۵- اثر زاویه برخورد زلزله ۱۲۴
۵-۳- ارائه پیشنهادات برای ادامه کار ۱۲۴

پیوست‌ها

پیوست الف- نمودار نیروهای داخلی سازه

پیوست ب- تغییرشکل سازه

پیوست ج- نمونه کدهای مدلسازی

فهرست اشکال

عنوان شکل صفحه

شکل ۱-۱- فلوچارت تحلیل اجزای محدود دینامیکی پل خاکی- فولادی ۵
شکل ۲-۱- هندسه دو بعدی مسئله ۱۱
شکل ۲-۲- مدل رفتاری غیر خطی ۱۲
شکل ۲-۳- نامگذاری نقاط در سازه ۱۳
شکل ۲-۴- هندسه قوس ۱۶
شکل ۲-۵- مش اجزای محدود برای ارتفاع پوشش خاک ۳ متری ۱۶
شکل ۲-۶- تغییرات مدول برشی با کرنش برشی ۱۷
شکل ۲-۷- تغییرات مدول الاستیسیته با عمق ۱۸
شکل ۲-۸- مدل زمین و سازه ۲۰
شکل ۲-۹- توزیع فشار دینامیکی خاک (مدل شماره ۲) ۲۰
شکل ۲-۱۰- توزیع نیروی محوری و لنگر خمش سازه ناشی از ارتعاش سینوسی با شتابg ۰/۲ .....۲۱
شکل ۲-۱۱- مقطع مدل عددی برای تحلیل دینامیکی ۲۲
شکل ۲-۱۲- هندسه و مش بندی مدل ۲۴
شکل ۲-۱۳- تاریخچه زمانی (شتاب ورودیg ۰/۲) ۲۵
شکل ۲-۱۴- تاریخچه زمانی (شتاب ورودیg ۰/۲۵) ۲۵
شکل ۲-۱۵- مدل اجزای محدود پل خاکی- فولادی ۲۶
شکل ۲-۱۶- نیروهای داخلی برای قوس $20.95m\times10.47m$ ۲۷
شکل ۲-۱۷- نیروهای داخلی برای قوس $20.95m\times10.47m$ ۲۸
شکل ۲-۱۸- محفظه خاک آزمایش میز لرزان ۲۹
شکل ۲-۱۹- نقاط اندازه گیری ۲۹
شکل ۲-۲۰- منحنی‌های وابسته به کرنش ۳۰
شکل ۲-۲۱- فشار خاک استاتیکی وارد بر مدل شماره ۱ .....۳۱
شکل ۲-۲۲- کرنش خمشی و محوری استاتیکی مدل شماره ۱ .....۳۱
شکل ۲-۲۳- توزیع حداکثر فشار خاک ناشی ناشی از ارتعاش سینوسی با شتابg۰/۲ .....۳۲
شکل ۲-۲۴- توزیع حداکثر کرنش سازه ناشی از ارتعاش سینوسی با شتابg۰/۲ .....۳۲
شکل ۲-۲۵- توزیع حداکثر فشار لرزه‌ای خاک بر روی مدل شماره ۱ ناشی از ارتعاشات زلزله کوبه ۳۳
شکل ۲-۲۶- ابعاد نمونه کالورت بتن مسلح ۳۴
شکل ۳-۱- تبدیل المان شش وجهی و چهار وجهی به المان مکعب مستطیلی و هرمی ۳۷
شکل ۳-۲- چهار نوع شرط مرزی در روش اجزای محدودالمان نامحدود ۴۰
شکل ۳-۳- هندسه مدل دوبعدی ۴۲

فهرست اشکال- ادامه

عنوان شکل | صفحه

شکل ۳-۴- ابعاد پی و دیوار ۴۲
شکل ۳-۵- مقطع استاندارد $400\ mm \times 150mm$ با ضخامت $6\ mm$ ۴۲
شکل ۳-۶- سطوح تسلیم تسلیم مدل دراکر- پراگر ۴۴
شکل ۳-۷- نمودار فشار تماس بر حسب فاصله تماس ۵۳
شکل ۳-۸- شتاب نگاشت ایستگاه نیس زلزله کوبه ۱۹۹۵ ..... ۵۶
شکل ۳-۹- مؤلفه‌های طولی و عرضی به صورت شرایط مرزی ۵۶
شکل ۳-۱۰- مش اجزای محدود مدل دو بعدی ۵۸
شکل ۳-۱۱- المان جامد ۸ گرهای مورد استفاده در مدلسازی سه بعدی ۵۹
شکل ۳-۱۲- مش اجزای محدود مدل سه بعدی ۵۹
شکل ۴-۱- طیف الاستیک مقیاس شده $NZS\ 4203$ با میرایی ۲۰٪ ۶۱
شکل ۴-۲- هندسه مدل $J.H.WOOD$ ۶۱
شکل ۴-۳- مدل مش بندی شده در مطالعه $J.H.WOOD$ ۶۲
شکل ۴-۴- مش بندی نصف مدل در نرم افزار آباکوس ۶۳
شکل ۴-۵- دیاگرام لنگر خمشی در حالت شبه استاتیکی برای ارتفاع خاکریز ۳ متر ۶۳
شکل ۴-۶- دیاگرام نیروی برشی برای حالت شبه استاتیکی و ۳ متر ارتفاع خاکریز ۶۴
شکل ۴-۷- لنگر خمشی برای حالت طیفی و ارتفاع خاکریز ۳ متر ۶۴
شکل ۴-۸- مدل برای تحلیل تاریخچه زمانی ۶۵
شکل ۴-۹- شتاب نگاشت مولفه طولی زلزله نیوزلند با حداکثر شتاب $0/2g$ ۶۵
شکل ۴-۱۰- نمودار لنگر در تحلیل تاریخچه زمانی در $t = 6\ sec$ برای سه حالت رفتار الاستیک با شرایط مرزی استاتیکی و شرایط مرزی فنر و میراگر و رفتار الاستو – پلاستیک بافنر و میراگر ۶۶
شکل ۴-۱۱- نمودار لنگر برای تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی در $t = 6\ sec$ و شرایط مرزی استاتیکی ۶۶
شکل ۴-۱۲- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/25g$ و ابعاد $14.13m \times 7.06m$ ۶۹
شکل ۴-۱۳- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/35g$ و ابعاد $14.13m \times 7.06m$ ۷۰
شکل ۴-۱۴- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/45g$ و ابعاد $14.13m \times 7.06m$ ۷۲
شکل ۴-۱۵- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/25g$ و ابعاد $16.60m \times 8.30m$ ۷۴
شکل ۴-۱۶- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/35g$ و ابعاد $16.60m \times 8.30m$ ۷۵
شکل ۴-۱۷- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/45g$ و ابعاد $16.60m \times 8.30m$ ۷۷
شکل ۴-۱۸- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/25g$ و ابعاد $20.95m \times 10.47m$ ۷۹
شکل ۴-۱۹- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/35g$ و ابعاد $20.95m \times 10.47m$ ۸۰
شکل ۴-۲۰- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه $0/45g$ و ابعاد $20.95m \times 10.47m$ ۸۲

فهرست اشکال- ادامه

عنوان شکل | صفحه

شکل ۴-۲۱- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه ۰/۲۵g و ابعاد *23.40m×11.70m* ۸۴
شکل ۴-۲۲- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه ۰/۳۵g و ابعاد *23.40m×11.70m* ۸۵
شکل ۴-۲۳- نمودار نیروهای داخلی برای شتاب پایه ۰/۴۵g و ابعاد *23.40m×11.70m* ۸۷
شکل ۴-۲۴- نمودار حداکثر لنگر خمشی نسبت به حداکثر شتاب برای ابعاد *14.13m × 7.06m* ۹۰
شکل ۴-۲۵- نمودار حداکثر لنگر خمشی نسبت به حداکثر شتاب برای ابعاد *16.60m×8.30m* ۹۰
شکل ۴-۲۶- نمودار حداکثر لنگر خمشی نسبت به حداکثر شتاب برای ابعاد *20.95m×10.47m* ۹۱
شکل ۴-۲۷- نمودار حداکثر لنگر خمشی نسبت به حداکثر شتاب برای ابعاد *23.40m×11.70m* ۹۱
شکل ۴-۲۸- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *14.13m × 7.06m* در مقطع z=0 m ۹۴
شکل ۴-۲۹- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *14.13m × 7.06m* در مقطع z=3 m ۹۵
شکل ۴-۳۰- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *14.13m × 7.06m* در مقطع z=6 m ۹۷
شکل ۴-۳۱- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *23.40m×11.70m* در مقطع z=0 m ۹۹
شکل ۴-۳۲- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *23.40m×11.70m* در مقطع z=3 m ۱۰۰
شکل ۴-۳۳- نمودار نیروهای داخلی بر حسب طول قوس برای مؤلفه طولی و عرضی زلزله با حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ارتفاع پوشش خاکی ۱/۵ متر برای ابعاد *23.40m×11.70m* در مقطع z=6 m ۱۰۲
شکل ۴-۳۴- نمودار حداکثر نیروهای داخلی بر حسب زاویه برخورد برای *14.13m × 7.06m* ۱۰۳
شکل ۴-۳۵- نمودار حداکثر نیروهای داخلی بر حسب زاویه برخورد برای *23.40m×11.70m* ۱۰۵
شکل ۴-۳۶- تغییر مکان افقی بر حسب دهانه برای حالت الاستیک دوبعدی ۱۰۶
شکل ۴-۳۷- تغییر مکان قائم بر حسب دهانه برای حالت الاستیک دوبعدی ۱۰۷
شکل ۴-۳۸- تغییر مکان افقی بر حسب دهانه برای حالت الاستیک سه بعدی ۱۰۸
شکل ۴-۳۹- تغییر مکان قائم بر حسب دهانه برای حالت الاستیک سه بعدی ۱۰۹
شکل ۴-۴۰- تغییر مکان افقی بر حسب دهانه برای حالت الاستو- پلاستیک دوبعدی ۱۱۰
شکل ۴-۴۱- تغییر مکان قائم بر حسب دهانه برای حالت الاستو- پلاستیک دوبعدی ۱۱۱
شکل ۴-۴۲- تغییر مکان افقی بر حسب دهانه برای حالت الاستو- پلاستیک سه بعدی ۱۱۲
شکل ۴-۴۳- تغییر مکان قائم بر حسب دهانه برای حالت الاستو- پلاستیک سه بعدی ۱۱۳
شکل ۴-۴۴- نمودار نسبت کمانش بر حسب طول قوس برای قوس 14.13m×7.06m ۱۱۶

فهرست اشکال- ادامه

عنوان شکل صفحه

شکل ۴-۴۵- نمودار نسبت کمانش بر حسب طول قوس برای قوس $16.60m \times 8.30m$ ۱۱۸
شکل ۴-۴۶- نمودار نسبت کمانش بر حسب طول قوس برای قوس $20.95m \times 10.47m$ ۱۱۹
شکل ۴-۴۷- نمودار نسبت کمانش بر حسب طول قوس برای قوس $23.40m \times 11.70m$..... ۱۲۰
شکل ۴-۴۸- نمودار نسبت کمانش بر حسب زاویه برخورد زلزله برای قوس $14.13m \times 7.06m$ ۱۲۱
شکل ۴-۴۹- نمودار نسبت کمانش بر حسب زاویه برخورد زلزله برای قوس $23.40m \times 11.70m$ ۱۲۱

فهرست جداول

عنوان جدول — صفحه

جدول ۲-۱- پارمترهای مدل رفتاری مصالح خاکی ۱۳
جدول ۲-۲- حداکثر مقادیر پاسخ (تحلیل خطی) ۱۳
جدول ۲-۳- حداکثر مقادیر گرهای (تحلیل خطی) ۱۴
جدول ۲-۴- حداکثر مقادیر المانها (تحلیل خطی) ۱۴
جدول ۲-۵- مدول الاستیسته سکانت برای لایه‌های مختلف خاک ۱۸
جدول ۲-۶- مشخصات خاک بر بر اساس روش نامگذاری متحد برای مدل هایپربولیک ۲۲
جدول ۲-۷- مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی و آزمایشگاهی ۲۳
جدول ۲-۸- مشخصات مکانیکی مصالح خاک ۲۴
جدول ۲-۹- مشخصات نمونه مورد آزمایش ۳۳
جدول ۲-۱۰- خلاصه مطالعات لرزهای سازه‌های خاکی- فولادی و آبروهای بتنی ۳۵
جدول ۳-۱- پارامترهای هندسی مدل ۴۳
جدول ۳-۲- طبقه بندی خاک برای مقادیر E_s (CHBDC 2006)..... ۴۷
جدول ۳-۳- مقادیر E_s برای انواع خاکها ((CHBDC 2006 ..... ۴۷
جدول ۳-۴- چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر اساس دسته بندی متحد..... ۴۷
جدول ۳-۵- چسبندگی خاک بر اساس دسته بندی متحد ۴۸
جدول ۳-۶- نسبت میرایی مصالح..... ۴۹
جدول ۴-۱- مدول الاستیسیته لایه‌های خاک ۶۲
جدول ۴-۲- مقادیر حداکثر لنگر خمشی به ازای حداکثر شتاب ۰/۲۵g..... ۸۸
جدول ۴-۳- مقادیر حداکثر نیروی محوری به ازای حداکثر شتاب ۰/۲۵g..... ۸۸
جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر نیروی برشی به ازای حداکثر شتاب ۰/۲۵g ۸۹
جدول ۴-۵- مقادیر حداکثر لنگر خمشی به ازای حداکثر شتاب ۰/۴۵g..... ۸۹
جدول ۴-۶- مقادیر حداکثر نیروی محوری به ازای حداکثر شتاب ۰/۴۵g..... ۸۹
جدول ۴-۷- مقادیر حداکثر نیروی برشی به ازای حداکثر شتاب ۰/۴۵g ۸۹
جدول ۴-۸- تغییرمکان افقی برای حداکثر شتاب ۰/۲۵gدر حالت الاستیک دو بعدی و سه بعدی ۱۱۴
جدول ۴-۹- تغییرمکان افقی برای حداکثر شتاب ۰/۲۵gدر الت الاستو-پلاستیک دو بعدی و سه بعدی.....۱۱۴
جدول ۴-۱۰- تغییرمکان افقی برای حداکثر شتاب ۰/۴۵gدر حالت الاستیک دو بعدی و سه بعدی..... ۱۱۴
جدول ۴-۱۱- تغییرمکان افقی برای حداکثر شتاب ۰/۴۵gدر حالت الاستو-پلاستیک دو بعدی و سه بعدی....۱۱۴
جدول ۴-۱۲- مشخصات مقطع ورق موجدار..... ۱۱۵

۱

فصل اول

[کلیات]

سازه‌های خاکی- فولادی، سازه‌هایی هستند که شامل دو جزء اصلی فولاد و خاک می باشند اندرکنش خاک و فولاد باعث پایداری و توزیع مناسب بارها در اطراف حلقه فولادی می گردد. در سازههای خاکی- فولادی جزء خاکی نقش عمده باربری را داشته و حلقه‌های فولادی باعث توزیع مناسب بارهای وارده به صورت شعاعی می‌گردد. در نتیجه مجوعه در برابر بارهای قائم مقاومت می‌نماید. این سیستم در آغاز به عنوان لوله‌های آبرو به کار برده شده است و طی سه دهه اخیر و توسعه تکنولوژی ساخت ورق‌های فولادی موجدار، هم اکنون به عنوان پل‌های راه و راه آهن تا دهانه ۲۷متر به کار گرفته میشود.

۱-۱- مقدمه

سازه‌های خاکی- فولادی، سازه‌هایی هستند که شامل دو جزء اصلی فولاد و خاک می باشند. جزء فولادی به صورت صفحات موجداریست که معمولاً به شکل حلقه و به عنوان اسکلت سازه عمل می نماید. اندرکنش خاک و فولاد باعث پایداری و توزیع مناسب بارها در اطراف حلقه فولادی می گردد. در سازه‌های خاکی- فولادی جزء خاکی نقش عمده باربری را داشته و حلقه‌های فولادی باعث توزیع مناسب بارهای وارده به صورت شعاعی می‌گردد. حلقه فولادی در اثر بارگذاری تمایل به تغییر شکل در جهت عرضی را دارد لذا نیروهای جانبی خاک فعال شده و باعث جلوگیری از تغییرشکل حلقه فولادی می‌گردد. در نتیجه مجوعه در برابر بارهای قائم مقاومت می نماید. این سیستم در آغاز به عنوان لوله‌های آبرو به کار برده شده است و طی سه دهه اخیر و توسعه تکنولوژی ساخت ورق‌های فولادی موجدار، هم اکنون به عنوان پل‌های راه و راه آهن تا دهانه ۲۷متر به کار گرفته می‌شود.

۱-۲- تعریف مسئله و بیان وضعیت فعلی موضوع

با توجه به شکل قوسی ورق‌ها به هنگام استفاده به عنوان پل، از مسائل بسیار حائز اهمیت در تحلیل و طراحی این سازه‌ها، از بین رفتن یا ایجاد اختلال در پدیده قوس زدگی[1] ایجاد شده بین خاک و ورق فولادی در هنگام اعمال بار نامتقارن زلزله می‌باشد. با مراجعه به آیین نامه‌های مرتبط به طراحی سازه‌های خاکی- فولادی ملاحظه می‌شود که روابط ارائه شده برای منظور نمودن رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها بعضاً بسیار ساده بوده و جزئیات دقیق رفتار دینامیکی این سازه‌ها را در بر نمی‌گیرد. از طرف دیگر با مراجعه به پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نیز مشاهده می‌شود که تحقیقات بسیار کمی در این خصوص صورت گرفته است.یکی از مسائل حائز اهمیتی که در تحقیقات حاضر در دنیا به آن پرداخته نشده است، رفتار واقعی سه بعدی این سازه‌ها است. در بخش تحقیقاتی بررسیهای انجام شده نشان می دهد که مطالعات جامعی بر روی رفتار لرزه‌ای این نوع سازه ها صورت نگرفته است. به طور کلی می‌توان مطالعات محدود صورت گرفته را به دو دسته آزمایشگاهی و عددی تقسیم بندی کرد. در میان روش‌های عددی روش اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفته است.

Krauthammer & Chen (1986) به مطالعه رفتار لرزه‌ای کالورت‌های بتن مسلح مدفون با درنظرگیری اندرکنش خاک و سازه به روش اجزای محدود و بررسی اثر عمق قرار گیری کالورت‌ها پرداخته و چنین نتیجه گرفته است که با افزایش عمق قرارگیری سازه، تنش‌های بوجود آمده در گوشه‌های کالورت افزایش یافته است. *Wood & Jenkins (2000)* با مدلسازی اجزای محدود دو بعدی قوس بتنی به صورت شبه استاتیکی و طیفی به بررسی تأثیرات سختی خاک اطراف بر روی مقادیر تلاش‌های داخلی پرداخته و چنین نتیجه گرفته است که تمامی این تلاش‌ها نسبت تغییرات سختی خاک حساس هستند. *Esmaeili and Abdulrazagh (2010)* با مطالعه رفتار لرزه‌ای پل‌های خاکی- فولادی راه آهن تحت بارگذاری زلزله به صورت شبه

[1] arching

استاتیکی و با استفاده از روش اجزای محدود چنین بیان نموده اند که روش شبه استاتیکی روش مناسب و دقیقی برای ارزیابی اثرات زلزله بر روی سازه‌های خاکی- فولادی می‌باشد. در قسمت آزمایشگاهی انجام دو آزمایش میز لرزان و سانتریفیوژ در میان مطالعات دیده می‌شود.*Che A.L et al. (2006)* با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش میز لرزان ورق موجدار از جنس وینیل کلراید و تحلیل اجزای محدود دو بعدی ادعا نموده است که مقادیر حداکثر فشار خاک بر روی ورق موجدار در حالت استاتیکی و دینامیکی تفاوت قابل توجهی ندارند. Seungho *et al. (2006)* یک تونل با ورق‌های فولادی موجدار را با استفاده از روش‌های شبه استاتیکی آیین نامه طراحی پل‌های بزرگراهی کانادا (*CHBDC*)، دینامیکی تاریخچه زمانی و آزمایشگاهی تحلیل کرده و مقایسه‌ای بین نتایج روش‌های مختلف صورت داده است. *Koji ITO et al (2006)* به منظور مقایسه نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی کالورت‌های بتن مسلح مدفون در خاک، از روش عددی اجزای محدود استفاده نموده و بیان داشته که روش عددی توانایی خوبی در پیش بینی رفتار لرزه‌ای کالورت های بتن مسلح مدفون دارد.

۱-۳- ضرورت و اهمیت تحقیق

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته به نظر می‌رسد تا کنون تحقیق جامعی که شرایط واقعی سازه‌های خاکی- فولادی را در برگیرد صورت نگرفته است. بنابراین شرایط مذکور ضرورت انجام این تحقیق را بیش از پیش مشخص می‌نماید. این موضوع با مراجعه به آیین نامه‌های طراحی موجود و سابقه اندک پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه قابل توضیح می‌باشد. در اغلب فعالیت‌های صورت گرفته به صورت آزمایشگاهی یا توسعه مدل‌های عددی رفتار سازه‌ها بیشتر کرنش مسطح و دو بعدی منظور شده است. حال اینکه اجرای خاکریزهای طرفین این پل‌ها رفتار آنها قطعاً به شرایط سه بعدی نزدیک‌تر خواهد کرد. لذا موضوع بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های خاکی- فولادی با استفاده از روش اجزاء محدود در حوزه زمان موضوع اصلی مطالعه حاضر قرار گرفته است.

۱-٤- روش و راه‌کار انجام تحقیق

با توجه به قابلیت‌های نرم افزار اجزای محدود *ABAQUS* در انجام تحلیل‌های دینامیکی در حوزه زمان از یک‌سو و ارائه مدل‌های رفتاری مناسب جهت مدلسازی خاک و ورق‌های فولادی، استفاده از این ابزار جهت انجام مدلسازی به شرح زیر مناسب به نظر می‌رسد:

۱- ساخت هندسه مسئله
۲- تعریف مشخصات مصالح (انتخاب مدل رفتاری)
۳- تعیین نوع تحلیل (استاتیکی-دینامیکی، خطی- غیرخطی و ...)
۴- تعریف سطوح تماس در صورت وجود
۵- بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

۶- مش بندی مدل
۷- تحلیل
۸- ارائه خروجی‌ها

شکل (۱-۱) فلوچارت تحلیل اجزای محدود پل خاکی- فولادی را نشان می‌دهد.

به طور کلی فرضیات صورت گرفته در انجام پایان نامه حاضر را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:
۱- درنظر گرفتن رفتار الاستو- پلاستیک برای خاک
۲- استفاده از شتاب نگاشت یک زلزله مشخص
۳- عدم درنظر گرفتن شیب ترانشه‌های اطراف سازه
۴- استفاده از فنر و میراگر به عنوان شرایط مرزی

۱-۵- اهداف مورد نظر

۱- توسعه مدل سه بعدی اندرکنش خاک و سازه به منظور بررسی رفتار دینامیکی واقعی سازه خاکی- فولادی و تبیین متدولوژی آن
۲- بررسی اثر پارامترهای زیر بر رفتار لرزه‌ای سازه خاکی- فولادی
۲-۱- بررسی رفتار الاستیک و الاستو- پلاستیک
۲-۲- بررسی رفتار دوبعدی و سه بعدی
۲-۳- بررسی اثر پوشش خاک
۲-۴- بررسی اثر تغییرات حداکثر شتاب اعمالی
۲-۵- بررسی اثر زاویه برخورد زلزله با سازه بر رفتار ورق‌های فولادی

به منظور پوشش موارد مطرح شده، پایان نامه حاضر در ۵ فصل به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

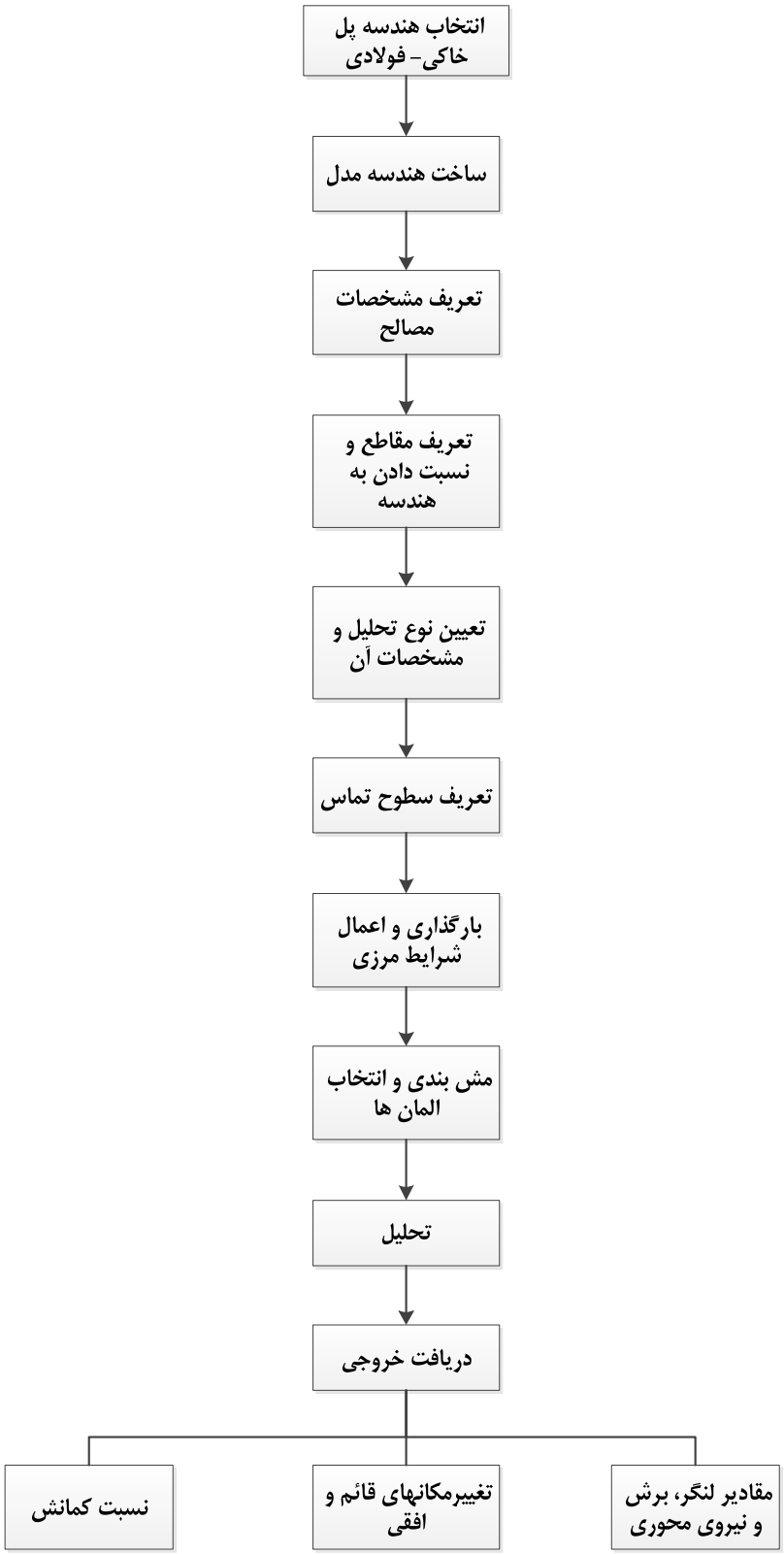
در فصل اول که فصل جاری می‌باشد ابتدا مقدمه‌ای در مورد سازه‌های خاکی-فولادی ذکر شده و سپس به بیان اهمیت موضوع و وضعیت فعلی آن در ادبیات فنی پرداخته می‌شود. در ادامه پس از بیان فرضیات انجام شده در تحقیق حاضر، متدولوژی تحقیق بیان شده و آنگاه پروسه اجرای آن ذکر می‌شود.

در فصل دوم به مرور ادبیات فنی در زمینه تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های خاکی- فولادی پرداخته می‌شود. این بررسی ابتدا در میان آیین نامه‌های موجود در زمینه تحلیل و طراحی این سازه‌ها صورت گرفته و سپس به مقالات و پژوهش‌های موجود پرداخته می‌شود. در پایان نیز کاستی‌های این پژوهش‌ها بیان می‌گردد.

در فصل سوم به جزئیات روند مدلسازی و تحلیل در نرم افزار *ABAQUS* پرداخته می‌شود. هندسه مدل، مشخصات مصالح، سطوح تماس، نحوه مش بندی مدل، شرایط مرزی و بارگذاری و ... در این فصل به تفکیک مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل چهارم نتایج حاصل از تحلیل مدل ارائه می‌گردد. نتایج مذکور در سه قالب نیروهای داخلی، تغییرمکان‌ها، نسبت کمانش گنجانده شده است و در قالب گراف‌ها و جداول ارائه می‌گردد.

در فصل پنجم جمع بندی بر آنچه در این پایان نامه ارائه شده است، صورت می‌گیرد. نتیجه گیری از نتایج ارائه شده در فصل چهارم صورت گرفته و سرانجام پیشنهاداتی برای ادامه کار صورت می‌گیرد.



شکل ۱-۱- فلوچارت تحلیل اجزای محدود دینامیکی پل خاکی- فولادی

۲

فصل دوم

[مرور ادبیات فنی]

به طور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل لرزه ای سازه های خاکی – فولادی محدود است. بیشتر مطالعات بر روی رفتار دینامیکی این نوع سازه ها تحت بار متحرک صورت گرفته است. اما با توجه به هندسه و عملکرد سازه های خاکی– فولادی، از تحقیقات انجام شده بر روی سازه های زیر زمینی کم عمق نظیر کالورت های بتنی نیز می توان استفاده نمود.

۲-۱- مقدمه

به طور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل لرزه‌ای سازه‌های خاکی – فولادی محدود است. بیشتر مطالعات بر روی رفتار دینامیکی این نوع سازه‌ها تحت بار متحرک وسیله نقلیه صورت گرفته است. اما با توجه به هندسه و عملکرد سازه‌های خاکی– فولادی، از تحقیقات انجام شده بر روی سازه‌های زیر زمینی کم عمق نظیر کالورت‌های بتنی نیز می‌توان استفاده نمود. در این فصل ابتدا روش‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌های خاکی– فولادی در آیین نامه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس مروری بر مطالعات صورت گرفته بر روی تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیر زمینی و خاکی– فولادی و یا سایر سازه‌های مدفون صورت می‌پذیرد.

۲-۲- بررسی روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌های خاکی– فولادی در آیین نامه‌ها

دستورالعمل‌های مورد نیاز برای تحلیل و طراحی سازه‌های خاکی– فولادی در آیین نامه‌هایی چون ASTM، AASHTO، BD، AS/NZS و CHBDC وجود دارد. در این آیین نامه‌ها تحلیل و طراحی این نوع سازه‌ها در قالب «سازه‌های مدفون» مطرح گردیده است. از میان روش‌های موجود برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها یعنی روش شبه استاتیکی، روش شبه دینامیکی (طیفی) و روش تاریخچه زمانی، روش اول یعنی روش شبه استاتیکی در آیین نامه‌ها در ابتدای امر مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر سادگی این روش می‌باشد. به همین منظور در ادامه به بررسی روش تحلیل لرزه‌ای این آیین نامه‌ها می‌پردازیم.

۲-۲-۱- آیین نامه آشتو (*AASHTO 2010*)

انجمن اداره بزرگراه‌های ایالتی آمریکا فصل سوم از «دستورالعمل طراحی پل آشتو LRFD» با عنوان «بار و ضرایب بار» به تشریح تمامی بارهای وارده بر پل‌ها از جمله بار زلزله اختصاص داده است. در بند ۳-۱۰ این آیین نامه روش محاسبه با استاتیکی معادل زلزله آورده شده است.

بار زلزله به صورت حاصلضرب پاسخ لرزه‌ای الاستیک C_{sm} در وزن معادل سازه تعریف می‌شود. وزن معادل تابعی از وزن واقعی سازه و هندسه و نوع آن می‌باشد. دستورالعمل‌های طراحی و جزئیات طرح در این آیین نامه به گونه‌ای تنظیم شده است که سازه‌های طراحی شده حداقل خسارت در اثر وقوع زلزله متحمل شوند.

ارتعاشات طراحی زلزله و نیروهای توصیه شده در این آیین نامه بر مبنای یک احتمال وقوع کم در حین عمر معمول سازه قرار گرفته است. پل‌های طراحی شده بر اساس این آیین نامه ممکن است خساراتی را متحمل شوند اما می‌بایست دارای احتمال فروریختگی کمی باشند. اصول استفاده شده در این دستورالعمل عبارتند از:

- در اثر وقوع زلزله‌های خفیف تا متوسط اعضای سازه‌ای می‌بایست در محدوده الاستیک باقی مانده و خسارات کمی را متحمل شوند.
- شدت واقعی نیروها و ارتعاشات زمین باید در طراحی مورد استفاده قرار گیرند.
- در اثر وقوع زلزله شدید کل یا قسمتی از پل نباید به طور کلی دچار فروریختگی شود. خرابی‌های رخ داده باید به گونه‌ای باشند که به آسانی قابل تشخیص و بر طرف کردن باشند.