بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه های هیدرولیکی

نام پایان‌نامه:

پایداری گوه های تکیه گاه سدهای بتنی قوسی تحت اثر بارهای لرزه ای

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر حسن میرزا بزرگ

نام دانشجو :

سید معین الدین حسینی

بهمن ۹۱

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای:

را با عنوان:

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما			
۲- استاد مشاور			
۳- استاد مشاور			
۴- استاد ممتحن			
۵- استاد ممتحن			
۶- نماینده گروه			

تقدیم

پدر و مادر عزیزم

تشکّر و قدردانی

تشکّر و قدردانی خود را از زحمات جناب آقای دکتر حسن میرزابزرگ که درطول مسیر این تحقیق و دوره تحصیلات کارشناسی ارشد که در حضورشان شاگردی نموده ام، را ابراز می دارم.

چکیده

سدهای بتنی قوسی به خاطر ساختار خاص سازه ای و بارهایی ناشی از رانش قوس و زلزله، به پی و تکیه گاه هایی با مقاومت زیاد نیاز دارند. بررسی شکست سدهای بتنی قوسی نشانگر آن است که عامل اصلی انهدام این نوع سد وقوع ناپایداری در توده سنگ تکیه گاه های آن بوده است. توجه به این موضوع اهمیت انجام تحلیل های مناسب و دقیق را به منظور حصول اطمینان از پایداری تکیه گاه های این نوع سد در مقابل بارهای وارد بر آن روشن می سازد. توده های سنگ عموماً در بردارنده انواع ناپیوستگی ها از قبیل گسل، دسته درزه ها و صفحات لایه بندی می باشند که در تحلیل پایداری تکیه گاه های سدها به عنوان مرزهای توده سنگ مورد بررسی و همچنین عناصر مقاوم در مقابل ناپایداری مورد توجه ویژه ای قرار دارند. تحقیقات مختلف نشان داده اند در بیشتر مواقع درزه ها بر میزان ایمنی از توده سنگ حاکمند. در این پایان نامه با بهره گیری از تئوری پایداری گوه های صخره ای که توسط لوند ارائه شده است و با استفاده از معیار مقاومت برشی موهر کولمب برای توده های صخره ای درزه دار و با در نظرگرفتن وزن گوه، بارهای وارد از طرف سد، پایداری تکیه گاه های سد بتنی قوسی بررسی می شود. و با بهره از تکنیک المان های محدود در فضای سه بعدی و المان های درز، پایداری گوه های تکیه گاه ها در شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار می گیرد.

کلید واژه: لوند، گوه سنگی، درزه، ناپیوستگی، سدبتنی دو قوسی،

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل ها..... ه
فهرست جدول ها..... ح
فصل اول- مقدمه و ساختار پایان نامه..... ۱
۱-۱-پیشگفتار..... ۱
۱-۲- اهداف پایان نامه..... ۴
۱-۳- ساختار پایان نامه..... ۵
فصل دوم - اصول مکانیک سنگ و صخره های درزه دار، مدلسازی پی و انتشار امواج ۶
۲-۱- مقدمه..... ۶
۲-۲- نوع محل و مشخصات هندسی سدهای قوسی..... ۷
۲-۲-۱- محل سد..... ۷
۲-۲-۲- انتخاب سد قوسی..... ۸
۲-۲-۳- مقطع قوس..... ۸
۲-۳- معرفی نا پیوستگی ها..... ۱۰
۲-۴- معیارهای گسیختگی..... ۱۰
۲-۴-۱- معیار گسیختگی موهر- کولمب..... ۱۲
۲-۴-۲- معیار هوک - براون..... ۱۲
۲-۴-۳- معیار دراکر- پراگر..... ۱۳
۲-۴-۴- معیار بارتن..... ۱۴
۲-۵- روشهای مدلسازی پی..... ۱۶
۲-۵-۱- روش مستقیم..... ۱۷
۲-۵-۲- روش زیرسازه..... ۱۷
۲-۶- انتشار امواج..... ۱۹
۲-۶-۱- امواج لرزه ای..... ۲۰
۲-۶-۱-۱-۱- موج P..... ۲۰
۲-۶-۱-۱-۲- موج S..... ۲۰
۲-۶-۱-۲-۱- موج رایلی..... ۲۱
۲-۶-۱-۲-۲- موج لاو..... ۲۲
۲-۷- روابط انتشار امواج در محیط های الاستیک جامد- روابط تنش و کرنش در حالت ۲ بعدی.....۲۳
۲-۸- فرمولبندی المان محدود برای مدلسازی انتشار امواج..... ۲۶

۲-۸-۱-فرمول بندی مستقیم ۲۶
۲-۸-۳- فرمول بندی مینیمم انرژی پتانسیل کل ۲۶
۲-۸-۳- فرمول بندی مانده وزنی ۲۶
۲-۹- شرایط لازم برای عدم انعکاس امواج در مرزها ۲۸
۲-۱۰- مدلسازی شرایط مرزی در محیطهای نیمه بینهایت ۲۹
۲-۱۱- انواع متداول شرایط مرزی ۳۰
۲-۱۱-۱- شرط مرزی ویسکوز(Lysmer) ۳۰
۲-۱۱-۲- مدل مخروطی ۳۷
۲-۱۱-۳- شرط مرزی چند جهته ۳۹
۲-۱۱-۴- شرط مرزی مجانبی مضاعف ۴۲
۲-۱۱-۵- شرط مرزی مجانبی مضاعف چند جهته ۴۲
فصل سوم - تحلیل پایداری گوه سنگی ۴۵
۳-۱- مقدمه ۴۵
۳-۲- بررسی سه بعدی گوه های سنگی چهاروجهی به روش لوند ۴۵
۳-۳- فرضیات اساسی ۴۶
۳-۳-۱- تغییر شکل ناپذیری ۴۶
۳-۳-۲- سطوح مستوی – حجم ۴۷
۳-۳-۳- عدم وجود کشش ۴۷
۳-۳-۴- عدم وجود گشتاور ۴۷
۳-۳-۵- نوع گسیختگی ۴۷
۳-۴- نحوه انتخاب گوه ها ۴۸
۳-۵- هندسه ۴۸
۳-۶- سیستم مختصات ۴۸
۳-۷- نیروها ۴۹
۳-۸- تعیین نوع گسیختگی ۵۰
۳- ۹- مطالعه بردار نرمال و بردار یکه صفحات ۵۵
۳-۱۰- لغزش ۵۷
۳-۱۰-۱- لغزش گوه ای ۵۸
۳-۱۰-۱-۱- مسائل دو بعدی لغزش ۶۱
۳-۱۰-۱-۱-۱- لغزش گوه سنگی تکیه بر یک گسستگی ۶۱
۳-۱۰-۱-۲- مسائل سه بعدی لغزش ۶۲
۳-۱۰-۱-۲-۱- لغزش گوه سنگی تکیه بر دو گسستگی ۶۲
۳-۱۰-۱-۳- مرکز گرانش و حجم ۶۳
۳-۱۰-۱-۴- بررسی حالت های مختلف ۶۷
۳-۱۰-۱-۴-۱- لغزش موازی خط فصل مشترک دو گسستگی ۶۷

۳-۱۰-۱-۴-۲- لغزش به موازات گسستگی D_i ۶۷
۳-۱۰-۴-۱-۳- لغزش به موازات گسستگی D_j ۶۸
۳-۱۰-۲- لغزش صفحه ای ۶۸
۳-۱۰-۳- لغزش دایره ای ۶۹
۳-۱۰-۴- لغزش واژگونی ۶۹
۳-۱۱- محاسبه بارهای وارده ۷۰
۳-۱۱-۱- محاسبه وزن ۷۰
۳-۱۱-۲- محاسبه نیروی برکنش ۷۰
۳-۱۱-۳- محاسبه عکس العمل بدنه سدها ۷۱
۳-۱۱-۴- محاسبه نیروی زلزله ۷۲
۳-۱۱-۴-۱- اثر زلزله بر روی توده گوه ۷۲
۳-۱۱-۴-۲- اثر زلزله بر روی آب مخزن و افزایش نیروی رانشی سد ۷۳
۳-۱۱-۴-۳- اثر زلزله بر روی وزن قسمتی از بدنه که روی گوه وارد می شود ۷۴
۳-۱۲- تعیین ضریب اطمینان در مقابل لغزش ۷۴
۳-۱۳- روش نیومارک ۷۵

فصل چهارم - مدل المان محدود سد و تعریف بارگذاری ۷۸
۴-۱- مقدمه ۷۸
۴-۱- معرفی سد ۷۸
۴-۱-۱- مشخصات هندسی سد ۷۹
۴-۱-۲- تعریف گوه ۸۰
۴-۲- مدلسازی ۸۱
۴-۲-۱-المان های مدلسازی در مدل المان محدود سد و دریاچه ۸۱
۴-۲-۲- مشخصات مصالح ۸۴
۴-۲-۳- بارگذاری ۸۵
۴-۳- ضریب اطمینان لغزش ۸۷
۴-۳-۱- محاسبه تغییر مکان گوه بر اساس روش نیومارک ۸۸
۴-۴- مدل المان محدود ۹۰
۴-۵- جابجایی گوه بدون مرزهای میراگر ۹۱
۴-۶- تأثیر جذب انرژی در انتهای دور پی ۹۳

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۶
پیوست ۱۰۲
پ-۱-۱- مقدمه ۹۸
پ-۱-۲- بار مرده ۹۸
پ-۱-۲-۱- نحوه اعمال بار مرده در روش FEM ۹۸

پ-۱-۳-بارگذاری هیدرولیکی ۹۹
پ-۱-۳-۱- بارهای معمولی آب ۹۹
پ-۱-۳-۱-۱- نحوه اعمال بار آب در روش FEM ۹۹
پ-۱-۳-۲- بار سیلاب ۱۰۱
پ-۱-۳-۳- برکنش ۱۰۱
پ-۱-۳-۳-۱-نحوه اعمال بار برکنش در روش FEM ۱۰۱
پ-۱-۴- بار رسوب ۱۰۲
پ-۱-۵-بار یخ ۱۰۳
پ-۱-۵-۱- بار استاتیکی یخ ۱۰۳
پ-۱-۵-۲- برخورد یخ (بار دینامیکی یخ) ۱۰۳
پ-۱-۵-۳- نحوه اعمال بار یخ در روش FEM ۱۰۳
پ-۱-۶- بار هیدرولیکی سرریزها ۱۰۳
پ-۱-۷- بار باد ۱۰۴
پ-۱-۷-۱-بار باد روی سطح مخزن ۱۰۴
پ-۱-۷-۲- بار موج سطحی مخزن ۱۰۴
پ-۱-۶- بارگذاری حرارتی ۱۰۴
پ-۱-۶-۱- معادلات کلی انتقال حرارت ۱۰۴
پ-۱-۷- بارگذاری زمین لرزه ۱۰۴
پ-۱-۷- ۱- ارزیابی ایمنی لرزه ای ۱۰۵
پ-۱-۷- ۲- ورودی طیف پاسخ زمین لرزه ۱۰۵
پ-۱-۷-۳- نحوه تولید طیف پاسخ ساختگاه ۱۰۶
پ-۱-۷-۴- ورودی تاریخچه شتاب-زمان زمین لرزه ۱۰۶
پ-۱-۸- ترکیب بارها ۱۰۶
پ-۱-۸-۲-ترکیب بارگذاری غیرعادی ۱۰۷
پ-۱-۸-۳-ترکیب بارگذاری فوق‌العاده ۱۰۷
پ-۱-۹-ضرایب اطمینان ۱۰۷
فهرست مراجع ۱۰۸

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ : نحوه اعمال و زاویه نیروی فشاری سد بتنی قوسی به تکیه گاه ۹
شکل ۲-۲ : دوایر موهر تنش درآزمایش سه محوری و معیار شکست ۱۲
شکل ۲-۳ : معیار شکست هوک- براون ۱۳
شکل ۲-۴ : پروفیل زبری و مقدار JRC معادل با هریک از پروفیل ها ۱۴
شکل ۲-۵ : ارزیابی مقاومت فشاری درزه از طریق سختی اشمیت ۱۵
شکل ۲-۶ : حرکت زمین ناشی از امواج طولی ۲۰
شکل ۲-۷ : حرکت زمین ناشی از امواج برشی ۲۱
شکل ۲-۸ : حرکت سطحی زمین ناشی از امواج رایلی ۲۲
شکل ۲-۹ : حرکت سطحی زمین ناشی از امواج لاو ۲۲
شکل ۲-۱۰ : تنشهای نرمال σ و تنشهای برشی τ اعمال شده به المان در محیط الاستیک ۲۳
شکل ۲-۱۱ : تغییرات تنش در المان ۲ بعدی در محیط الاستیک ۲۴
شکل ۲-۱۲ : نحوه انتشار امواج پسرونده و پیشرونده بعداز تحریک ۲۸
شکل ۲-۱۳ : نحوه مدلسازی شرایط مرزی ویسکوز ۳۰
شکل ۲-۱۴ : تغییرات نسبت انرژی بر حسب زاویه برخوردهای مختلف امواج p ۳۱
شکل ۲-۱۵ : تغییرات نسبت انرژی بر حسب زاویه برخوردهای مختلف برای امواج S ۳۲
شکل ۲-۱۶ : المان خطی ۳۳
شکل ۲-۱۷ : نحوه اعمال میراگرها در شرایط مرزی ویسکوز در حالت ۲ بعدی ۳۴
شکل ۲-۱۸ : بردارهای عمود و مماس بر المان خطی ۳۵
شکل ۲-۱۹ : المان خطی دو گره ای ۳۶
شکل ۲-۲۰- الف و ب : نیروهای اعمال شده به المان مدل مخروطی ۳۷
شکل ۲-۲۱ : نحوه مدلسازی شرایط مرزی در روش مدل مخروطی ۳۹
شکل ۲-۲۲ : جهت های جذب امواج در روش شرط مرزی چند جهته ۳۹
شکل ۲-۲۳ : مقایسه دامنه امواج انعکاسی در دو روش شرط مرزی ویسکوز و شرط مرزی چند جهته. ۴۱
شکل ۲-۲۴ : راستای انتشار موج نسبت به محورهای مختصات ۴۳
شکل ۲-۲۵ : مش بندی در نزدیکی مرز در روش مجانبی مضاغف چند جانبه ۴۳
شکل ۳-۱ : هندسه گوه سنگی سه وجهی و بارهای قابل اعمال بر آن ۴۵
شکل ۳-۲- الف و ب: حالت های بررسی شده توسط لوند در بررسی ایمنی در مقابل لغزش ۴۶
شکل ۳-۳ : سیستم مختصات کروی ۴۹
شکل ۳-۴ : نیروی عمود برآیند وارد بر صفحات ۵۱
شکل ۳-۵ : راستای نیروی Driving Force در لغزش صفحات دوم وسوم ۵۲

شکل ۳-۶ : حالت های ممکن لغزش گوه سنگی ۵۴
شکل ۳-۷ : لغزش گوه ای ۵۸
شکل ۳-۸ : تصویر حرکت های ممکن گوه سنگی در شیب های سنگی..... ۵۹
شکل ۳-۹- ج و د : تصویر حرکت گوه سنگی در پی و تکیه گاه سد بتنی قوسی..... ۶۰
شکل ۳-۱۰ : گوه سنگی در حالت دو بعدی که روی یک گسستگی می لغزد..... ۶۱
شکل ۳-۱۱ : گوه سنگی سه بعدی که به دو گسستگی تکیه دارد..... ۶۲
شکل ۳-۱۲ : هندسه گوه سنگی ۶۳
شکل ۳-۱۳- الف و ب :تجزیه برآیند R..... ۶۶
شکل ۳-۱۴- الف : لغزش به موازات فصل مشترک دو گسستگی..... ۶۷
شکل ۳-۱۴- ب :لغزش به موازات صفحه D_i ۶۷
شکل ۳-۱۴- ج :لغزش به موازات D_j ۶۸
شکل ۳-۱۵ : لغزش صفحه ای..... ۶۸
شکل ۳-۱۶ : لغزش دایره ای..... ۶۹
شکل ۳-۱۷ : لغزش واژگونی ۷۰
شکل ۳-۱۸ : توزیع فشار برکنش در گوه سنگی..... ۷۱
شکل ۳-۱۹ : توزیع فشار هیدرودینامیک ۷۳
شکل ۳-۲۰ : نمایش بلوک صلب لغزنده نیومارک..... ۷۶
شکل ۳-۲۱ : انتگرال گیری از شتاب تسلیم در به دست آوردن سرعت و تغییر مکان..... ۷۷
شکل ۴-۱ : ساختگاه سد لوزان..... ۷۸
شکل ۴-۲ : سد لوزان ۷۹
شکل ۴-۳ : مدل المان محدود سد و هندسه گوه..... ۸۰
شکل ۴-۴ : المان solid185..... ۸۱
شکل ۴-۵ : المان contac52..... ۸۲
شکل ۴-۶ : المان Fluid30..... ۸۳
شکل ۴-۷ : المان Combin14..... ۸۳
شکل ۴-۸ : اعمال بارگذاری بر مقطع گوه..... ۸۵
شکل ۴-۹ : مؤلفه شتاب در جهت X (جهت اتصال بدنه به تکیه گاه های کناری) ۸۶
شکل ۴-۱۰ : مؤلفه شتاب در جهت Y (جهت عمود بر بدنه سد بتنی قوسی)..... ۸۶
شکل ۴-۱۱ : مؤلفه شتاب در جهت Z (جهت بالادست – پایین دست سد بتنی قوسی)..... ۸۶
شکل ۴-۱۲ : ضریب اطمینان در برابر لغزش در طول زمان زلزله ۸۷
شکل ۴-۱۳ : جابجایی گوه در جهت X بر اساس روش نیومارک..... ۸۹
شکل ۴-۱۴ : جابجایی گوه در جهت Y بر اساس روش نیومارک..... ۸۹
شکل ۴-۱۵ : تاریخچه زمانی جابجایی گرهی افقی گوه با استفاده از روش Couple Dofs ۹۱
شکل ۴-۱۶ : تاریخچه زمانی جابجایی گرهی قائم گوه با استفاده از روش Couple Dofs ۹۱

شکل ۴-۱۷ : تاریخچه زمانی جابجایی گرهی افقی گوه با استفاده از المان های درز ۹۲
شکل ۴-۱۸ : تاریخچه زمانی جابجایی گرهی قائم گوه با استفاده از المان های درز ۹۲
شکل ۴-۱۹ : مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی گرهی افقی گوه با استفاده از روش Couple Dofs با مرز ثابت و مرز جاذب انرژی ۹۴
شکل ۴-۲۰ : مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی گرهی قائم گوه با استفاده از روش Couple Dofs با مرز ثابت و مرز جاذب انرژی ۹۴
شکل ۴-۲۱ : مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی گرهی افقی گوه با استفاده از المان های درز با مرز ثابت و مرز جاذب انرژی ۹۵
شکل ۴-۲۲ : مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی گرهی قائم گوه با استفاده از المان های درز با مرز ثابت و مرز جاذب انرژی ۹۵
شکل پ-۱-۱ : اعمال بار مرده بصورت مرحله ای در سدهای قوسی ۹۹
شکل پ-۱-۲ : سطح فرعی و تجمع سازگار نیروهای گرهی مطابق با فشار سطحی یکنواخت وارد بر المان‌های سه بعدی خطی و درجه دو ۱۰۰
شکل پ-۹-۳ : فرآیند اعمال برکنش بین سد قوسی و پی ۱۰۱
شکل پ-۱-۴ : اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (دره U شکل) ۱۰۲
شکل پ-۱-۵ : اثر رسوب بر تغییر مکان سد در ارتفاع (دره V شکل) ۱۰۲
شکل پ-۱-۶ : پیشنهاد USBR در مورد نحوه‌ی تحلیل سدها با توجه به ویژگی ساختگاه و فاصله‌رو مرکزی و بزرگی زلزله ۱۰۵
شکل پ-۱-۷ : مقایسه طیف پاسخ هموار و طیف اصلاح شده تاریخچه شتاب زمان با میرایی 5% ۱۰۵
شکل پ-۱-۸ : تولید طیف پاسخ ساختگاه ۱۰۶

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱ : مشخصات سد لوزان..... ۷۹
جدول ۴-۲ : مشخصات صفحات محدود کننده گوه ۸۰
جدول ۴-۳ : مشخصات مصالح ۸۴
جدول پ-۱-۷ :ضرایب ایمنی برای سدها در ترکیب‌های مختلف بارگذاری بر اساس مرجع FERC....۱۰۷

فصل اول- مقدمه و ساختار پایان نامه

۱-۱-پیشگفتار

از جمله سازه های مهندسی که بر روی توده های سنگی مستقر می شود سد بتنی قوسی است. در این سدها، تکیه گاه ها شامل توده های سنگ، دربردارنده ناپیوستگی هایی مانند درزه و گسل می باشد. رفتار این ناپیوستگی ها در پایداری و همچنین تنش های موجود در تکیه گاه ها و تنش های ایجاد شده در سدهای بتنی بسیار مؤثر است. مقاومت سنگ سالم در توده سنگ و رفتار ناپیوستگی ها در آن و امتداد آنها نسبت به بارهای اعمال شده در تحلیل های فوق اهمیت بسزایی دارد و در نظر نگرفتن این عوامل در طراحی ها ممکن است خرابی هایی را در سدها به وجود آورد[۱]. از جمله این خرابی ها می توان خرابی سد مالپاست[1] در جنوب فرانسه را نام برد. این سد بتنی دو قوسی که ۶۱ متر ارتفاع داشت در سال ۱۹۵۴ ساخته شد و در سال ۱۹۵۹ به دلیل کاهش مقاومت برشی پی سد، خراب شد و باعث مرگ ۳۴۰ نفر شد. گسلی که در زیر پی قرار داشت علت اصلی خرابی سد گزارش شده بود.

علاوه بر پایداری های استاتیکی، لازم است پایداری سدهای بتنی در مناطقی که امکان وقوع زلزله وجود دارد ارزیابی گردد. بررسی سوابق شکست سدهای بتنی قوسی نشانگر آن است که عامل اصلی انهدام این نوع سد وقوع ناپایداری در توده سنگ تکیه گاه های آن بوده است. توجه به این موضوع اهمیت انجام تحلیل های مناسب و دقیق را به منظور حصول اطمینان از پایداری تکیه گاه های این نوع سد در مقابل بارهای وارد بر آن روشن می سازد. توده های سنگ عموماً در بردارنده انواع ناپیوستگی ها از قبیل گسل ها، دسته درزه ها و صفحات لایه بندی می باشند که در تحلیل پایداری تکیه گاه های سدها به عنوان مرزهای توده سنگ مورد بررسی و همچنین عناصر مقاوم در مقابل ناپایداری مورد توجه ویژه ای قرار دارند. علاوه بر ناپیوستگی های طبیعی موجود در توده سنگ، صفحات برشی ثانویه که ممکن است در اثر اعمال بار به توده سنگ تشکیل شوند، به صورت ناپیوستگی های فرضی موجود در توده سنگ در تحلیل پایداری تکیه گاه های سد ها مورد توجه قرار می گیرند[۷].

[1] Malpasset Dam

با توجه به اهمیت سازه های عظیمی که در ساختگاه های سنگی احداث می شود لزوم مطالعه خواص مکانیکی و مقاومتی سنگ در ارتباط با پایداری این سازه ها کاملاً معلوم است. در مهندسی سنگ، توده سنگ به مجموعه ای از بلوک های سنگی سالم گفته می شود که به وسیله ی صفحاتی موسوم به ناپیوستگی از یکدیگر جدا شده اند، ناپیوستگی ها معمولاً مقاومت کششی ندارند. جابه جایی ها و تغییر مکان ها در محیط توده های سنگی معمولاً شامل حرکت و دوران بلوک های سنگی سالم در امتداد یا حول درزه ها است. تاکنون روش های مختلفی برای تحلیل پایداری تکیه گاه های سنگی توسعه یافته اند که به دو دسته کلی شامل روش های تحلیلی ساده و روش های عددی نسبتاً پیچیده قابل تقسیم می باشد. یک دسته از روش های ساده و کارآمد برای تحلیل پایداری تکیه گاه روش های مبتنی بر تحلیل تعادل حدی بلوک های سنگی می باشند.

مراحل کلی فرآیند تحلیل پایداری با استفاده از این روش های عبارتند از: تعریف گوه های سنگی محدود به چند صفحه ناپیوستگی، تعیین ساز و کار گسیختگی و محاسبه زاویه اصطکاک آستانه ناپایداری و یا ضریب اطمینان موجود در برابر لغزش گوه. معمولاً حرکت یا دوران بلوک های سنگی سالم در امتداد یا حول درزه ها باعث گسیختگی توده سنگ و ناپایداری سازه های متکی بر آن ها می شود. بنابراین در بحث ساختگاه های توده سنگی و سازه های متکی به آن ها نگاه ویژه ای به نقش درزه ها و خواصشان وجود دارد. بدیهی است با توجه به نوع جابه جایی ها در توده سنگ (لغزش یا دوران بلوک سنگی سالم) الگوی هندسی درزه ها و زاویه ای که با هم می سازند تأثیر بسزایی بر روی کمیت و کیفیت حرکت بلوک های سنگی خواهد داشت. بنابراین امتداد دسته درزه ها از پارامترهای هندسی مهم درزه ها در بحث پایداری توده سنگ درزه دار است[۱۵].

از مسائل مهم در برآورد ایمنی و پایداری سدهای قوسی بررسی اندرکنش تکیه گاه با بدنه بتنی می باشد که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. در این تحلیل ها، سازه و تکیه گاه یک سیستم دینامیکی مرکب را تشکیل می دهد که به تحریک زلزله پاسخ می دهد، این اندرکنش در تنش ها و جابجایی به وجود آمده ناشی از بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مؤثر می باشد ولازم است مسئله اندرکنش در مدلسازی لحاظ شود. در یک روش کلی، به منظور بررسی اندرکنش خاک و سازه، از جرم پی صرفنظر کرده و ماتریس سختی پی وارد معادلات می شود و ضریب میرایی معینی برای آن در نظر گرفته می شود، که این فرضیات ساده کننده و محافظه کارانه می باشد. در دهه های اخیر، استفاده از تکنیک المان محدود و تولید برنامه های تحلیل سازه، کاربرد روشهای مدلسازی پی و در نظر گرفتن جرم پی در پاسخ لرزه ای سد، انتشار موج در پی، استفاده از تکنیک المانهای مرزی با شرایط و مشخصات نزدیک به واقعیت، تعمیم روش مکانیک شکست و سایر فرضیات

برای تحلیل رفتار دقیق تر غیرخطی سازه و نتایج حاصله، لزوم مدلسازی دقیق تر را اثبات می کند[۸]. مدلسازی پی به دو صورت انجام می گیرد:

الف) روش تکیه گاه بدون جرم:

امواج برای انتشار نیاز به یک محیط جرم دار دارند. بنابراین اگر ما برای مدلسازی محیط آن را بدون جرم در نظر بگیریم، به نوعی از انتشار امواج در آن محیط صرف نظر کرده ایم. با توجه به بالا رفتن حجم محاسبات به دلیل در نظر گرفتن جرم تکیه گاه، یک روش پیشنهادی برای کاهش حجم محاسبات این است که از انتشار امواج در تکیه گاه صرف نظر شده و تنها سختی آن در مدلسازی در نظر گرفته شود. انرژی امواج زلزله پس از برخورد با سازه و انعکاس به سمت محیط بینهایت رفته و دیگر به سازه بر نمی گردند. اما در این روش به خاطر صرفنظر کردن انرژی امواج در خاک، از اثری که تکیه گاه در جذب امواج دارد صرفنظر می شود.

ب) روش تکیه جرم دار:

در این روش با در نظر گرفتن جرم تکیه گاه انتشار امواج در آن محیط در نظر گرفته می شود. در این روش مسئله اصلی مدلسازی شرایط مرزی می باشد. تکیه گاه با استفاده از روش های عددی مدلسازی می شود اما به دلیل بی نهایت بودن پی در حالت واقعی می بایست شرایط مرزی به نحوی باشد که جاذب امواج انعکاس زلزله باشند و مانع بازگشت آن به سیستم گردند[۲۸]. برای مدلسازی شرایط مرزی روشهای زیر استفاده می شوند:

- شرط مرزی ویسکوز (Lysmer در سال ۱۹۶۹) بر اساس انتشار یک بعدی امواج
- مدل مخروطی بر اساس مدلسازی محیط نیمه بینهایت با یک مخروط نیمه بینهایت
- شرط مرزی چند جهته که مدل کاملتری از روش ویسکوز با قابلیت تغییر جهت جذب موج می باشد
- شرط مرزی مجانبی مضاعف با قابلیت جذب امواج با فرکانس پایین توسط روش شبه استاتیک
- شرط مرزی مجانبی مضاعف چند جهته با قابلیت تفکیکی هر دو روش

که یکی از متداول ترین آنها، مرز جاذب لزج می باشد. این مرز که اولین بار توسط لایزمر معرفی گردید از دو میراگر متعامد تشکیل شده است، تا بتواند امواج برخوردی در هر جهت را جذب کند. بدین ترتیب، مرز انتهایی پی با یک سری میراگرهای بی نهایت کوچک متعامد که در طول مرز گسترده شده اند، مدل می گردد تا مانع بازگشت امواج به داخل سیستم گردد. در این تحقیق از شرط مرزی ویسکوز Lysmer به دلیل توانایی

مدلسازی جذب کامل اغلب امواج برخوردی با زوایای مختلف برای مدلسازی انتهای دور پی استفاده شده است[۲۲].

در سال۱۹۷۳ لوند[1] مقاله ای را منتشر نمود که در آن یک روش تعادل حدی، برای پایداری تکیه گاه های سنگی ارائه شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به بعضی روش های متداول تحلیل پایداری این است که در آن به جای استفاده از یک کمیت ساده مانند ضریب اطمینان، از تحلیل حساسیت زاویه اصطکاک آستانه لغزش نسبت به تغییرات فشار برکنش بر وجوه ناپیوستگی استفاده می شود. این تحلیل حساسیت ابزاری قدرتمند برای تشخیص عوامل مؤثرتر، بر پایداری تکیه گاه ها می باشد. با مشخص شدن پارامترهای مؤثرتر بر پایداری، مطالعات تکمیلی جهت تعیین دقیق تر این پارامترها انجام می گیرد. مزیت دیگر استفاده از این روش این است که طبیعت حاکم بر رفتار و سازوکار ناپایداری توده سنگ را به نحو مناسبی تشریح می نماید، که این ویژگی در طراحی تمهیداتی برای پایدارسازی تکیه گاه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در حال حاضر تحلیل پایداری تکیه گاه های سدها عموماً با استفاده از روش های تعادل حدی انجام می گیرد. در مقاله منتشر شده توسط لوند، از بیان ترسیمی برای تشریح سازوکارهای مختلف ناپایداری استفاده شده است که فلسفه حاکم بر این روش را به خوبی تشریح می نماید[۱].

۱-۲- اهداف پایان نامه

در این پایان نامه با بهره گیری از تئوری پایداری گوه های صخره ای که توسط لوند ارائه شده است و با استفاده از معیار مقاومت برشی موهر کولمب برای توده های صخره ای درزه دار و با در نظرگرفتن وزن گوه، بارهای وارد از طرف سد، پایداری تکیه گاههای سد بتنی قوسی بررسی می شود. و با بهره از تکنیک المان های محدود در فضای سه بعدی و المان های درز، پایداری گوه های تکیه گاه ها در شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار می گیرد. اهداف مهم زیر محور مطالعات و بررسی قرار گرفته است:

- بررسی لغزش گوه محدود به صفحات ناپیوستگی تحت اثر بارهای ناشی از رانش قوس و زلزله
- مدل سازی درزه موجود در توده پی
- اعمال شرط مرزی مناسب جهت جذب انرژی در انتهای دور

[1] P.Londe 1973

- تأثیر خصوصیات و نحوه مدلسازی پی سدهای بتنی قوسی، بررسی اثر جذب انرژی و در نظر گرفتن جرم پی در پاسخ لرزه ای

با توجه به گسترش روز افزون صنعت سد سازی در ایران، تحلیل مناسب پایداری تکیه گاه های این سدها اهمیت حیاتی دارد. بنابراین نتایج کار این پایان نامه برای طراحی سدهای جدید و نیز اطمینان یافتن از حاشیه ایمنی سدهای موجود، که تا مدتها از مهمترین پروژه های کشور هستند، مستقیماً رهگشا خواهد بود.

۱-۳- ساختار پایان نامه

پایان نامه دارای پنج فصل می باشد، که عبارت است از :

فصل اول شامل مقدمه، لزوم انجام این مطالعه، اهداف و دیدگاه کلی پایان نامه می باشد و همچنین ساختار آن را شرح می دهد.

فصل دوم اصول مکانیک سنگ و صخره های درزه دار، مدلسازی پی و انتشار امواج زلزله را بررسی می کند. در این فصل پس از ارائه تاریخچه و شرح مختصری از روشهای مختلف مدلسازی پی در سدهای بتنی و روابط حرکت و انتشار امواج، نقاط قوت و ضعف این روشها بررسی می شود. در نهایت فرمول بندی المان محدود برای حرکت موج در پی و انواع شرایط مرزی در محیطهای نیمه بی نهایت تشریح می گردد.

فصل سوم شامل تئوری اصلی پایان نامه و نحوه بارگذاری و حالت های مختلف لغزش گوه و به دست آوردن ضریب اطمینان در برابر لغزش تشریح شده است.

فصل چهارم شامل معرفی سد لوزان در کشور سوئیس، مشخصات مصالح و نحوه مدلسازی و اعمال بارگذاری توسط برنامه MATLAB و ANSYS می باشد.

در نهایت در فصل پنجم نتایج تحلیل ها با شرایط مختلف ارائه و ارزیابی خواهند شد. ارائه پیشنهادات بخش انتهایی این فصل می باشد.

فصل دوم - اصول مکانیک سنگ و صخره های درزه دار، مدلسازی پی و انتشار امواج

۲-۱- مقدمه

سدهای قوسی که مهمترین و پیچیده ترین نوع سد بتنی هستند از یک معماری خاص سرچشمه گرفته انـد، توجه به قوسهای فشاری بود که به مهار آب رودخانه تعمیم پیدا کرد. اولین سد قوسی سدی در سوریه است کـه در ۱۵۰۰ سال پیش با مصالح بنایی ساخته شده بود. در اواخر قرن گذشته در آمریکا سد قوسی به صـورت یـک سازه قابل محاسبه درآمد، که در آن اثر مقاومت قوس را با اثر مقاومت کنسول تیر طره ای ترکیـب کردنـد. آنهـا شبکه متعامدی از قوس ها و تیرها را در نظر گرفتند که غیر از قوس، اثر کنسول نیـز در محاسـبات آمـده اسـت. این نوع سدها در ۲۰ الی ۳۰ سال اول قرن بیستم عملکرد خوبی از خود نشان دادند. تکیه گاه ها در ایـن سـدها شامل توده های سنگی دارای ناپیوستگی هـایی ماننـد درزه و گسـل مـی باشـند، کـه رفتـار آنهـا در پایـداری و همچنین تنش های موجود در تکیه گاه ها و تنش های ایجاد شده در سد بتنی بسیار مؤثر است. مقـاوت سـنگ سالم در توده سنگ و رفتار ناپیوستگی ها در آن و امتداد آنها نسبت به بارهای اعمال شده در تحلیل هـای فـوق اهمیت بسزایی، دارد در نظر نگرفتن این عوامل در طراحی ها ممکن است خرابیهایی در سد به وجود آورد[۱۶].

مطالعات آماری محققین نشان می دهد که سدهای بتنی دو قوسی معمولاً در نواحی لرزه خیز سـاخته شـده و اکثراً نیز عملکرد مطلوب داشته اند. به عنوان یک نمونه از سدهای بتنی دوقوسی کـه آسـیب جـدی در زلزلـه دیده است میتوان به سد پاکویما[1] در امریکا اشاره نمود. در زلزله شدید سن فرناندو در سال ۱۹۷۱ این سد بتنی دو قوسی به ارتفاع ۱۱۵ متر در ۵ کیلومتری منبع زلزله واقع بود. حداکثر شتاب منبع زلزله 0.6g گـزارش شـد، شتاب در نزدیکی تاج سد به 1.25g هم رسید این زلزله باعث ایجاد ترک بین تکیه گاه سد و جناح چپ سد شد که بازشدگی حدود ۱cm و گستردگی ۱۵ متر را از تاج سد تا پایین به همراه داشت به هـر حـال سـد بـه کلـی تخریب نشد و قابلیت خود را از دست نداد. در زلزله ۲۷ فوریه ۱۹۶۱ در ژاپن که در آن شتاب حداکثر $1.8\ m/s^2$

[1] Pacoima