

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۴۴۵



دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت تأثیر  
شکل هسته سد

نگارش:

پیام صراطی جنتی

اساتید راهنما:

دکتر میرعلی محمدی

دکتر محمد مناف پور

تذکرات وزارت معنی  
تسبیح درک

۱۳۸۹/۹/۸

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی

تابستان ۱۳۸۹

۱۴۶۴۰۵

بیان نامه خانم/ آقای سیام جراحی حبیبی به تاریخ... ۱۴۰۳/۰۴/۱۹ شماره ۲۰۳/۳۱۳۳. مورد پذیرش هیات محترم داوران بارتبه عالی. و نمره ۱۹. قرار گرفت.

نوزده

۱- دکتر سید علی محمدی

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران ۲: دکتر محمدمان بدر

۲- داور خارجی: دکتر حسین امانی

۳- داور داخلی: دکتر سعید طالبی

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی: جواد نورانی

نوزده

حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ می باشد.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزتر از جانم

که شمع وجودشان روشی بخش زندگیم است

## تقدیر و تشکر:

سپاس بیکران خداوند متعال را که بار دیگر فرصت اندیشیدن را به من داد و مرا در انجام و اتمام این رساله یاری نمود. در ابتدا با عنایت به کلام مولای متقیان علی (ع) که فرمود "هرکس حرفی به من بیاموزد مرا بنده خویش ساخته است" برخورد لازم می دانم که از اساتید راهنمای ارجمندم آقایان دکتر میرعلی محمدی و دکتر محمد مناف پور که با راهنمایی های ارزنده شان صمیمانه مرا در پیشرفت و ارائه رساله یاری کردند تقدیر و تشکر نمایم.

سپس از اساتید محترم دانشگاه ارومیه، آقایان دکتر حسین رضایی به عنوان داور خارجی و دکتر مسعود عامل سخی به عنوان داور داخلی و همچنین دکتر جواد نوری نیا نماینده محترم تحصیلات تکمیلی که زحمت داوری این رساله را تقبل نمودند تشکر و قدردانی می نمایم.

از دوستان عزیزم در رشته مهندسی سازه های هیدرولیکی و مهندسی سازه که همواره در انجام این پایان نامه مشوق من بودند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم و از درگاه خداوند متعال برای همگی آن ها آرزوی موفقیت دارم.

از شرکت سهامی آب منطقه ای آذربایجان غربی به ویژه مجری سد آق چای جناب آقای مهندس حاجی پور به دلیل همکاری در تهیه اطلاعات مورد نیاز سد آق چای نهایت سپاسگذاری را دارم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
I	فهرست مطالب
VI	فهرست جداول
VII	فهرست اشکال
۱	چکیده

## فصل اول: مقدمه

۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ سدهای خاکی
۳	۱-۲-۱ سدهای خاکی همگن
۳	۲-۲-۱ سدهای خاکی غیر همگن
۴	۱-۲-۲-۱ شکل و موقعیت قرارگیری هسته در مقطع سد
۴	۲-۲-۲-۱ ضخامت هسته مرکزی
۵	۳-۲-۲-۱ سدهای خاکی با هسته مرکزی قائم
۶	۴-۲-۲-۱ سدهای خاکی غیر همگن با هسته مایل
۷	۳-۱ بیان مسئله
۷	۴-۱ هدف از انجام پروژه
۸	۵-۱ روش انجام تحقیق
۸	۶-۱ سیمای کلی رساله

## فصل دوم: روش های تحلیل پایداری سدهای خاکی در برابر زلزله

۹	۱-۲ مقدمه
۹	۲-۲ تأثیر زلزله بر سدهای خاکی
۱۰	۳-۲ انواع خسارت های ناشی از زلزله در سدهای خاکی
۱۲	۴-۲ نمونه ای از سدهای خاکی که در اثر زلزله دچار خسارت شده اند
۱۲	۱-۴-۲ سد هبگن تحت اثر زلزله یلواستون غربی سال ۱۹۵۹
۱۲	۲-۴-۲ سد سن فرنادوی پایین تحت اثر زلزله سن فرنادو سال ۱۹۷۱

۱۳	..... ۳-۴-۲ سد کاسواتی تحت اثر زلزله گجرات سال ۲۰۰۱
۱۴	..... ۵-۲ معیارهای ارزیابی پایداری سدهای خاکی در برابر بارهای دینامیکی
۱۴	..... ۱-۵-۲ تغییر شکل های دائمی ناشی از زلزله
۱۴	..... ۲-۵-۲ افزایش فشار آب منفذی ناشی از زلزله
۱۵	..... ۳-۵-۲ شکست هیدرولیکی
۱۵	..... ۶-۲ روش های تحلیل دینامیکی سدهای خاکی
۱۶	..... ۱-۶-۲ روش شبه استاتیکی
۱۷	..... ۱-۱-۶-۲ انتخاب ضریب زلزله طراحی
۱۹	..... ۲-۱-۶-۲ محدودیت های روش شبه استاتیکی
۲۱	..... ۲-۶-۲ روش های آنالیز دینامیکی ساده شده
۲۱	..... ۱-۲-۶-۲ روش نیومارک
۲۳	..... ۲-۲-۶-۲ روش سارما
۲۷	..... ۳-۲-۶-۲ روش سید و مکدیسی
۳۰	..... ۴-۲-۶-۲ روش باریکه های برشی
۳۳	..... ۳-۶-۲ روش های آنالیز دینامیکی کامل
۳۳	..... ۱-۳-۶-۲ روش تک فازی یا تنش کل
۳۴	..... ۲-۳-۶-۲ روش دو فاز ساده شده یا تنش مؤثر ساده شده
۳۴	..... ۳-۳-۶-۲ روش کوپل دو فازی
۳۴	..... ۷-۲ نتیجه گیری

## فصل سوم : عوامل مؤثر در رفتار دینامیکی سدهای خاکی

۳۶	..... ۱-۳ مقدمه
۳۶	..... ۲-۳ ویژگی های زلزله اعمال شده
۳۶	..... ۱-۲-۳ پیش بینی مشخصات زلزله برای طراحی
۳۷	..... ۲-۲-۳ پارامترهای متداول در تشریح خصوصیات زلزله
۳۸	..... ۱-۲-۲-۳ شتاب ماکزیمم
۳۸	..... ۲-۲-۲-۳ محتوی فرکانس
۴۰	..... ۳-۲-۲-۳ مدت زمان مؤثر زلزله

۴۱	..... ۳-۳ اثرات سه بعدی ناشی از شکل و هندسه دره
۴۳	..... ۴-۳ رفتار دینامیکی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد
۴۳	..... ۱-۴-۳ رفتار تنش کرنش خاک تحت بارهای سیکلی
۴۵	..... ۲-۴-۳ شاخص های عمومی رفتار خاک
۴۸	..... ۳-۴-۳ مدل خطی معادل
۴۹	..... ۴-۴-۳ تعیین مدول برشی و نسبت میرایی وابسته به کرنش
۵۳	..... ۵-۴-۳ مدل های غیر خطی سیکلی
۵۵	..... ۶-۴-۳ مقایسه مدل های خطی معادل و غیرخطی
۵۶	..... ۷-۴-۳ مدل های رفتاری پیشرفته

### فصل چهارم : معرفی نرم افزارهای مورد استفاده در تحقیق

۵۷	..... ۱-۴ مقدمه
۵۷	..... ۲-۴ معرفی بسته نرم افزاری Geostudio
۵۸	..... ۱-۲-۴ نرم افزار Sigma/w
۵۹	..... ۲-۲-۴ نرم افزار Slope/w
۶۰	..... ۳-۲-۴ نرم افزار Quake/w
۶۱	..... ۱-۳-۲-۴ معرفی سختی ثابت خاک
۶۲	..... ۲-۳-۲-۴ معرفی سختی خاک به صورت تابعی از تنش
۶۲	..... ۳-۳-۲-۴ مدل های رفتاری مصالح در نرم افزار Quake/w
۶۲	..... ۱-۳-۳-۲-۴ مدل الاستیک خطی
۶۳	..... ۲-۳-۳-۲-۴ مدل خطی معادل
۶۴	..... ۴-۳-۲-۴ منحنی کاهش سختی
۶۵	..... ۵-۳-۲-۴ منحنی نسبت میرایی
۶۶	..... ۶-۳-۲-۴ محاسبه تغییر مکان های دائمی ناشی از زلزله
۶۸	..... ۳-۴ نرم افزار PLAXIS
۶۹	..... ۱-۳-۴ مرور کلی بر مدل های به کار رفته در نرم افزار PLAXIS
۶۹	..... ۱-۱-۳-۴ مدل الاستیک خطی
۷۰	..... ۲-۱-۳-۴ مدل موهر-کلمب (MC)



۷۰	..... ۳-۱-۳-۴ مدل خاک سخت شونده (HS)
۷۰	..... ۴-۱-۳-۴ مدل خاک نرم شونده (SS)
۷۱	..... ۵-۱-۳-۴ مدل خزش خاک نرم (SSC)
۷۱	..... ۲-۳-۴ توصیف مدل رفتاری خاک سخت شونده مورد استفاده در تحلیل
۷۲	..... ۱-۲-۳-۴ رابطه هذلولی برای آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد
۷۳	..... ۲-۲-۳-۴ پارامترهای مدل خاک سخت شونده
۷۴	..... ۳-۲-۳-۴ مدول سختی $E_{50}^{ref}$ و $E_{oed}^{ref}$ و $m$
۷۵	..... ۳-۳-۴ معادله اساسی رفتار دینامیکی
۷۷	..... ۴-۳-۴ حل معادلات دینامیکی حرکت
۷۷	..... ۱-۴-۳-۴ به کار بستن طرح انتگرال در Plaxis
۷۸	..... ۲-۴-۳-۴ سرعت های موج
۷۸	..... ۳-۴-۳-۴ مرحله زمانی بحرانی

### فصل پنجم : مدل سازی و نحوه انجام آنالیز دینامیکی سد (با مطالعه یک نمونه سد موردی)

۸۰	..... ۱-۵ مقدمه
۸۰	..... ۲-۵ معرفی سد آق چای
۸۳	..... ۳-۵ مدل رفتاری مصالح مورد استفاده در سد
۸۳	..... ۱-۳-۵ مدل الاستیک غیر خطی (مدل هذلولی)
۸۵	..... ۲-۳-۵ پارامترهای مورد نیاز در تحلیل دینامیکی به روش خطی معادل
۸۷	..... ۳-۳-۵ پارامترهای مدل خاک سخت شونده
۹۲	..... ۴-۵ تعیین پارامترهای میرایی مصالح
۹۴	..... ۵-۵ انتخاب زمین لرزه جهت انجام تحلیل دینامیکی
۹۵	..... ۶-۵ روش تحقیق
۹۶	..... ۷-۵ تحلیل دینامیکی سد با استفاده از بسته نرم افزاری Geostudio
۹۸	..... ۱-۷-۵ مدل سازی مراحل ساخت سد
۱۰۱	..... ۲-۷-۵ مدل سازی حالت تراوش پایدار
۱۰۲	..... ۳-۷-۵ آنالیز دینامیکی
۱۰۳	..... ۸-۵ تحلیل دینامیکی سد با استفاده از نرم افزار Plaxis

۱۰۳	..... مدل سازی شرایط پس از ساخت ۱-۸-۵
۱۰۵	..... مدل سازی حالت تراوش پایدار ۲-۸-۵
۱۰۶	..... انجام تحلیل دینامیکی ۳-۸-۵

### فصل ششم: ارائه نتایج آنالیز دینامیکی و تجزیه و تحلیل آن ها

۱۰۸	..... ۱-۶ مقدمه
۱۰۸	..... ۲-۶ نتایج تحلیل دینامیکی انجام شده توسط نرم افزار Quake/w
۱۰۸	..... ۱-۲-۶ توزیع تغییر مکان
۱۲۴	..... ۲-۲-۶ توزیع تنش ها در بدنه سد
۱۲۷	..... ۳-۲-۶ توزیع شتاب ها در بدنه سد
۱۳۰	..... ۳-۶ نتایج تحلیل دینامیکی انجام شده توسط نرم افزار Plaxis
۱۳۰	..... ۱-۳-۶ توزیع تغییر مکان ها
۱۳۸	..... ۲-۳-۶ بررسی شکست برشی در هسته سد
۱۴۰	..... ۳-۳-۶ توزیع اضافه فشار آب منفذی
۱۴۷	..... ۴-۳-۶ ارزیابی وقوع ترک هیدرولیکی
۱۵۰	..... ۵-۳-۶ توزیع شتاب در بدنه سد
۱۵۴	..... ۴-۶ مقایسه نتایج به دست آمده از دو نرم افزار Plaxis و Geostudio

### فصل هفتم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱۵۶	..... ۱-۷ خلاصه و نتیجه گیری
۱۵۹	..... ۲-۷ ارائه پیشنهادات برای تکمیل مطالعات
۱۶۰	..... فهرست منابع

## فصل دوم:

- جدول (۱-۲) خسارات ناشی از زلزله بر سدهای خاکی ..... ۱۰
- جدول (۲-۲) ضریب زلزله پیشنهادی مهندسین ارتش آمریکا ..... ۱۸
- جدول (۳-۲) ضریب زلزله پیشنهادی کمیته ملی سدهای بزرگ ژاپن ..... ۱۸
- جدول (۴-۲) ضریب زلزله پیشنهادی راهنمای کارهای رودخانه ای ژاپن ..... ۱۸

## فصل چهارم:

- جدول (۱-۴) روش های تعادل حدی موجود در برنامه Slope/w و معادلات استاتیک مربوطه ..... ۶۰

## فصل پنجم:

- جدول (۱-۵) مشخصات فنی سد آق چای ..... ۸۰
- جدول (۲-۵) پارامترهای ژئوتکنیکی سد آق چای بر اساس مدول هذلولی ..... ۸۵
- جدول (۳-۵) خصوصیات مصالح در آنالیز دینامیکی ..... ۸۵
- جدول (۴-۵) پارامترهای مدل خاک سخت شونده مورد استفاده در آنالیز ..... ۹۲
- جدول (۵-۵) فرکانس های اصلی سد ..... ۹۳
- جدول (۶-۵) بیشینه شتاب افقی برای سطوح مختلف زلزله در ساختگاه سد ..... ۹۴
- جدول (۷-۵) ضرایب اطمینان سد در حالت های مختلف ..... ۱۰۰

## فصل ششم:

- جدول (۱-۶) مقادیر شتاب های بحرانی، تغییر مکان ها و ضرایب اطمینان برای سطوح لغزش مختلف ..... ۱۲۱
- جدول (۲-۶) نتایج تحلیل اضافه فشار آب منفذی برای هسته با زوایای شیب مختلف ..... ۱۴۵
- جدول (۳-۶) نتایج مربوط به بررسی شکست هیدرولیکی در مقاطع مختلف ..... ۱۴۸
- جدول (۴-۶) جمع بندی نتایج آنالیز دینامیکی برای زوایای مختلف هسته ..... ۱۵۴

## فصل اول :

شکل (۱-۱): شکل و موقعیت قرارگیری هسته در مقطع سدهای خاکی ..... ۴

## فصل دوم :

- شکل (۱-۲): معمول ترین نوع خسارت ایجاد شده در اثر زلزله ..... ۱۱
- شکل (۲-۲): مقطع سد سن فرناوندی پایین بعد و قبل از زلزله ..... ۱۳
- شکل (۳-۲): نیروهای شبه استاتیکی مؤثر بر گوه لغزشی ..... ۱۶
- شکل (۴-۲): ضرایب زلزله مورد استفاده در روش شبه استاتیکی حاصل از روش های گوناگون ..... ۱۹
- شکل (۵-۲): بلوک لغزشی صلب بر روی سطح شیبدار (در روش نیومارک) ..... ۲۱
- شکل (۶-۲): تخمین شتاب تسلیم به روش ساده شده : (a) لغزش سطحی (b) لغزش عمیق ..... ۲۲
- شکل (۷-۲): نمودار تغییرات شتاب ، سرعت ، جابجایی با زمان در روش نیومارک ..... ۲۳
- شکل (۸-۲): هندسه سد در روش سارما ..... ۲۴
- شکل (۹-۲): سطوح لغزش و طیف ضرائب زلزله  $k_m$  ..... ۲۵
- شکل (۱۰-۲): منحنی ارائه شده توسط سارما برای محاسبه مقدار  $\bar{a}_1$  ..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲): نمودار  $\frac{1}{c} \frac{4X_m}{K_m T^2 g}$  در مقابل  $k_c/k_m$  ..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲): مقایسه روش های آنالیز دینامیکی Coupled و Decoupled ..... ۲۸
- شکل (۱۳-۲): تغییرات شتاب حداکثر میانگین با عمق سطح لغزش برای سدها و خاکریزها ..... ۲۹
- شکل (۱۴-۲): تغییرات جابجایی دائمی با شتاب گسیختگی برای زلزله هایی با بزرگای مختلف ..... ۲۹
- شکل (۱۵-۲): مدل به کار رفته در روش باریکه های برشی ..... ۳۰

## فصل سوم :

- شکل (۱-۳): طیف دامنه فوریه برای شتاب نگاشت زلزله های ناغان و طیس ..... ۳۹
- شکل (۲-۳): مدت زمان مؤثر برای زلزله های مختلف ..... ۴۰
- شکل (۳-۳): اثر شکل دره برپریود طبیعی سد ..... ۴۱
- شکل (۴-۳): پاسخ سد به تحریک هارمونیک. الف) برای دره نیم استوانه ای، مقایسه تحلیل دو بعدی و سه بعدی (ب) ..... ۴۲
- اثر شکل دره برضریب تشدید تاج ..... ۴۲

- شکل (۳-۵): مقایسه توزیع ماکزیمم متغیرهای پاسخ لرزه ای سد در آنالیز دو بعدی و سه بعدی در ارتفاع سد ..... ۴۲
- شکل (۳-۶): توصیف اثرات کرنش برشی روی نسبت میرایی و مدول برشی ..... ۴۴
- شکل (۳-۷): تعریف مدول برشی  $G$  و نسبت میرایی  $k$  ..... ۴۵
- شکل (۳-۸): تغییر خصوصیات خاک با کرنش برشی و مدل رفتاری استفاده شده متناظر با آن ..... ۴۶
- شکل (۳-۹): تغییرات خصوصیات رفتاری خاک تحت بارهای سیکلی با افزایش سطح کرنش ..... ۴۷
- شکل (۳-۱۰): مدول برشی سکانت  $G_{sec}$  و تانژانت  $G_{tan}$  ..... ۴۸
- شکل (۳-۱۱): منحنی اصلی نشانگر مدول برشی ..... ۴۹
- شکل (۳-۱۲): مقادیر  $k_2$  برای ماسه با دانسیته های نسبی متفاوت ..... ۵۱
- شکل (۳-۱۳): مقادیر  $k_2$  برای خاک های شنی ..... ۵۱
- شکل (۳-۱۴): مدول برشی برجای رس های اشباع ..... ۵۱
- شکل (۳-۱۵): نسبت میرایی برای ماسه ..... ۵۲
- شکل (۳-۱۶): نسبت میرایی برای رس های اشباع ..... ۵۲
- شکل (۳-۱۷): منحنی باربرداری و بارگذاری بر پایه قوانین میسینگ ..... ۵۳

### فصل چهارم :

- شکل (۴-۱): تغییرات ضریب اطمینان در برابر زمان ..... ۶۱
- شکل (۴-۲): تغییرات  $G$  با هر مرتبه از تکرار در طی وقوع زلزله ..... ۶۳
- شکل (۴-۳): نمودار نسبت میرایی در مقابل کرنش برش ..... ۶۴
- شکل (۴-۴): نمودار شتاب میانگین متناظر با هر گام زمانی در طی وقوع زلزله ..... ۶۶
- شکل (۴-۵): نمودار سرعت در برابر زمان برای توده مستعد لغزش ..... ۶۷
- شکل (۴-۶): نمودار جابجایی در برابر زمان برای توده مستعد لغزش ..... ۶۷
- شکل (۴-۷): شبکه جریان رسم شده در داخل سد خاکی ..... ۶۹
- شکل (۴-۸): رابطه هذلولی تنش کرنش در بارگذاری اولیه برای آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد ..... ۷۳
- شکل (۴-۹): تعریف  $E_{oed}^{ref}$  در نتایج آزمایش ادنومتر ..... ۷۵
- شکل (۴-۱۰): تغییرات نسبت میرایی بحرانی نرمال شده با فرکانس زاویه ای ..... ۷۶

### فصل پنجم :

- شکل (۵-۱): نمایی از عملیات خاکریزی سد آق چای ..... ۸۱

- شکل (۲-۵): مقطع عرضی بحرانی سد آق چای ..... ۸۲
- شکل (۳-۵): رفتار تنش - کرنش غیر خطی خاک ..... ۸۴
- شکل (۴-۵): نمودار تغییرات مدول برشی ماکزیمم در مقابل تغییرات کرنش برشی ..... ۸۷
- شکل (۵-۵): نمودار تغییرات نسبت میرایی در مقابل تغییرات کرنش برشی ..... ۸۷
- شکل (۶-۵): مقطع آزمایش سه محوری مدل شده در نرم افزار plaxis ..... ۸۸
- شکل (۷-۵): نحوه مدل سازی آزمایش سه محوری در نرم افزار plaxis ..... ۸۹
- شکل (۸-۵): نتیجه واسنجی و مقایسه تنش انحرافی - کرنش محوری در مصالح پوسته مدل با آزمایشگاه برای فشار محصور کننده ۲۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع ..... ۸۹
- شکل (۹-۵): نتیجه واسنجی و مقایسه تنش انحرافی - کرنش محوری در مصالح پوسته مدل با آزمایشگاه برای فشار محصور کننده ۷۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع ..... ۹۰
- شکل (۱۰-۵): نتیجه واسنجی و مقایسه تنش انحرافی - کرنش محوری در مصالح پوسته مدل با آزمایشگاه برای فشار محصور کننده ۱۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع ..... ۹۰
- شکل (۱۱-۵): نتیجه واسنجی و مقایسه تنش انحرافی - کرنش محوری در مصالح هسته مدل با آزمایشگاه برای فشار محصور کننده ۲۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع ..... ۹۱
- شکل (۱۲-۵): نتیجه واسنجی و مقایسه تنش انحرافی - کرنش محوری در مصالح هسته مدل با آزمایشگاه برای فشار محصور کننده ۴۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع ..... ۹۱
- شکل (۱۳-۵): مقطع سد در نرم افزار Sap2000 ..... ۹۳
- شکل (۱۴-۵): سه مود اول ارتعاشی سد ( از بالا به پایین ) ..... ۹۳
- شکل (۱۵-۵): مولفه طولی شتاب نگاشت زلزله منجیل ..... ۹۵
- شکل (۱۶-۵): طیف پاسخ و طیف فوریه مولفه طولی شتاب نگاشت زلزله منجیل ..... ۹۵
- شکل (۱۷-۵): مقطع سد با زوایای مختلف هسته از قائم به مایل ..... ۹۷
- شکل (۱۸-۵): کانتورهای تغییر مکان قائم سد برای هسته با زوایای ۹۰، ۵۴ و ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۹۸
- شکل (۱۹-۵): کانتورهای تغییر مکان افقی سد برای هسته با زوایای ۷۵ و ۶۲ درجه نسبت به افق ..... ۹۹
- شکل (۲۰-۵): کانتورهای تنش قائم کل برای هسته قائم و هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۹۹
- شکل (۲۱-۵): بررسی پایداری شیب بالادست سد در حالت تخلیه سریع مخزن به روش تعادل حدی ..... ۱۰۰
- شکل (۲۲-۵): توزیع فشار آب حفره ای در حالت تراوش پایدار برای هسته با زوایای ۹۰ و ۶۲ نسبت افق ..... ۱۰۱
- شکل (۲۳-۵): مقطع سد با هسته قائم در حالت تراوش پایدار ..... ۱۰۱
- شکل (۲۴-۵): مقادیر تنش قائم مؤثر پس از پر شدن مخزن برای هسته با زوایای ۷۵ و ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۰۲

- شکل (۵-۲۵): نمای کلی هندسه و شبکه المان بندی شده سد با هسته قائم ..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۶): مقطع بزرگ نمایی شده شبکه اجزای محدود سد در اطراف هسته ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۷): توزیع تنش های قائم کل پس از ساخت برای هسته قائم و هسته با زاویه ۵۴ درجه نسبت به افق ... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۸): فشار آب حفره ای محاسبه شده در حالت تراوش پایدار برای هسته های با زاویه ۹۰، ۷۵ و ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۰۵
- شکل (۵-۲۹) نمودار درجه اشباع برای نقاط مختلف سد در حالت هسته قائم ..... ۱۰۶
- شکل (۵-۳۰): توزیع تنش مؤثر در حالت تراوش پایدار برای هسته های با زاویه ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق ..... ۱۰۶

### فصل ششم:

- شکل (۶-۱): سطوح لغزش  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  واقع در شیب بالا دست ..... ۱۰۹
- شکل (۶-۲): سطوح لغزش  $S_4$  و  $S_5$  واقع در شیب پایین دست ..... ۱۱۰
- شکل (۶-۳): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{1,42}$  ..... ۱۱۱
- شکل (۶-۴): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{1,90}$  ..... ۱۱۲
- شکل (۶-۵): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{2,42}$  ..... ۱۱۳
- شکل (۶-۶): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{2,90}$  ..... ۱۱۴
- شکل (۶-۷): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{3,42}$  ..... ۱۱۵
- شکل (۶-۸): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{3,90}$  ..... ۱۱۶
- شکل (۶-۹): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{4,42}$  ..... ۱۱۷
- شکل (۶-۱۰): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{4,90}$  ..... ۱۱۸
- شکل (۶-۱۱): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{5,42}$  ..... ۱۱۹
- شکل (۶-۱۲): نمودار شتاب، ضریب اطمینان، سرعت و جابجایی در برابر زمان برای سطح لغزش  $S_{5,90}$  ..... ۱۲۰
- شکل (۶-۱۳): مقادیر ماکزیمم تغییر مکان های افقی و قائم در برابر زاویه محور هسته نسبت افق ..... ۱۲۳
- شکل (۶-۱۴): تغییرات اضافه تنش های افقی، قائم و برشی ایجاد شده در اثر زلزله در وسط ارتفاع هسته قائم ..... ۱۲۵
- شکل (۶-۱۵): توزیع تنش های افقی در ابتدای زلزله، زمانی که شتاب زلزله در تاج سد به ماکزیمم مقدار خود می رسد و همچنین در انتهای زلزله برای مایل ترین هسته ..... ۱۲۶
- شکل (۶-۱۶): نمودار توزیع شتاب در تاج سد برای هسته با زاویای ۴۲ و ۶۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۲۷
- شکل (۶-۱۷): نمودار توزیع شتاب در تاج سد برای هسته با زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق ..... ۱۲۸
- شکل (۶-۱۸): نمودار ماکزیمم شتاب مطلق افقی در تاج سد در مقابل زاویه هسته نسبت به افق ..... ۱۲۸

- شکل (۶-۱۹): توزیع شتاب افقی برای سد با هسته قائم ..... ۱۲۹
- شکل (۶-۲۰): توزیع تغییر مکان های قائم برای هسته با زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۱
- شکل (۶-۲۱): توزیع تغییر مکان های قائم برای هسته با زاویه ۷۵ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۱
- شکل (۶-۲۲): توزیع تغییر مکان های قائم برای هسته ها با زاویه ۶۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۱
- شکل (۶-۲۳): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۲
- شکل (۶-۲۴): توزیع تغییر مکان های قائم برای هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۲
- شکل (۶-۲۵): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۲
- شکل (۶-۲۶): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۷۵ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۳
- شکل (۶-۲۷): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۶۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۳
- شکل (۶-۲۸): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۳
- شکل (۶-۲۹): توزیع تغییر مکان های افقی برای هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۳۴
- شکل (۶-۳۰): نمودار تغییرات تغییر مکان قائم در مقابل زاویه محور هسته نسبت به افق ..... ۱۳۴
- شکل (۶-۳۱): تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق .. ۱۳۵
- شکل (۶-۳۲): تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق .. ۱۳۶
- شکل (۶-۳۳): تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۶۲ درجه نسبت به افق .. ۱۳۶
- شکل (۶-۳۴): تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۶۲ درجه نسبت به افق .. ۱۳۷
- شکل (۶-۳۵): تاریخچه زمانی تغییر مکان قائم نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق .. ۱۳۷
- شکل (۶-۳۶): تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه واقع در تاج سد برای هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق .. ۱۳۸
- شکل (۶-۳۷): توزیع کرنش برشی در انتهای زلزله برای هسته با زوایای مختلف نسبت به افق ..... ۱۳۹
- شکل (۶-۳۸): توزیع اضافه فشار آب منفذی در انتهای زلزله برای هسته با زوایای مختلف نسبت به افق ..... ۱۴۱
- شکل (۶-۳۹): نمودار تغییرات ماکزیمم اضافه فشار آب منفذی در مقابل زاویه محور هسته نسبت به افق ..... ۱۴۲
- شکل (۶-۴۰): توزیع ضریب بیش تحکیم یافتگی در حالت استاتیکی برای هسته ها با زوایای ۹۰ و ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۲
- شکل (۶-۴۱): تغییرات اضافه فشار آب منفذی در برابر زمان برای هسته قائم ..... ۱۴۳
- شکل (۶-۴۲): تغییرات اضافه فشار آب منفذی در برابر زمان برای هسته با زاویه ۷۵ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۳
- شکل (۶-۴۳): تغییرات اضافه فشار آب منفذی در برابر زمان برای هسته با زاویه ۶۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۳
- شکل (۶-۴۴): تغییرات اضافه فشار آب منفذی در برابر زمان برای هسته با زاویه ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۴
- شکل (۶-۴۵): تغییرات اضافه فشار آب منفذی در برابر زمان برای هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۵



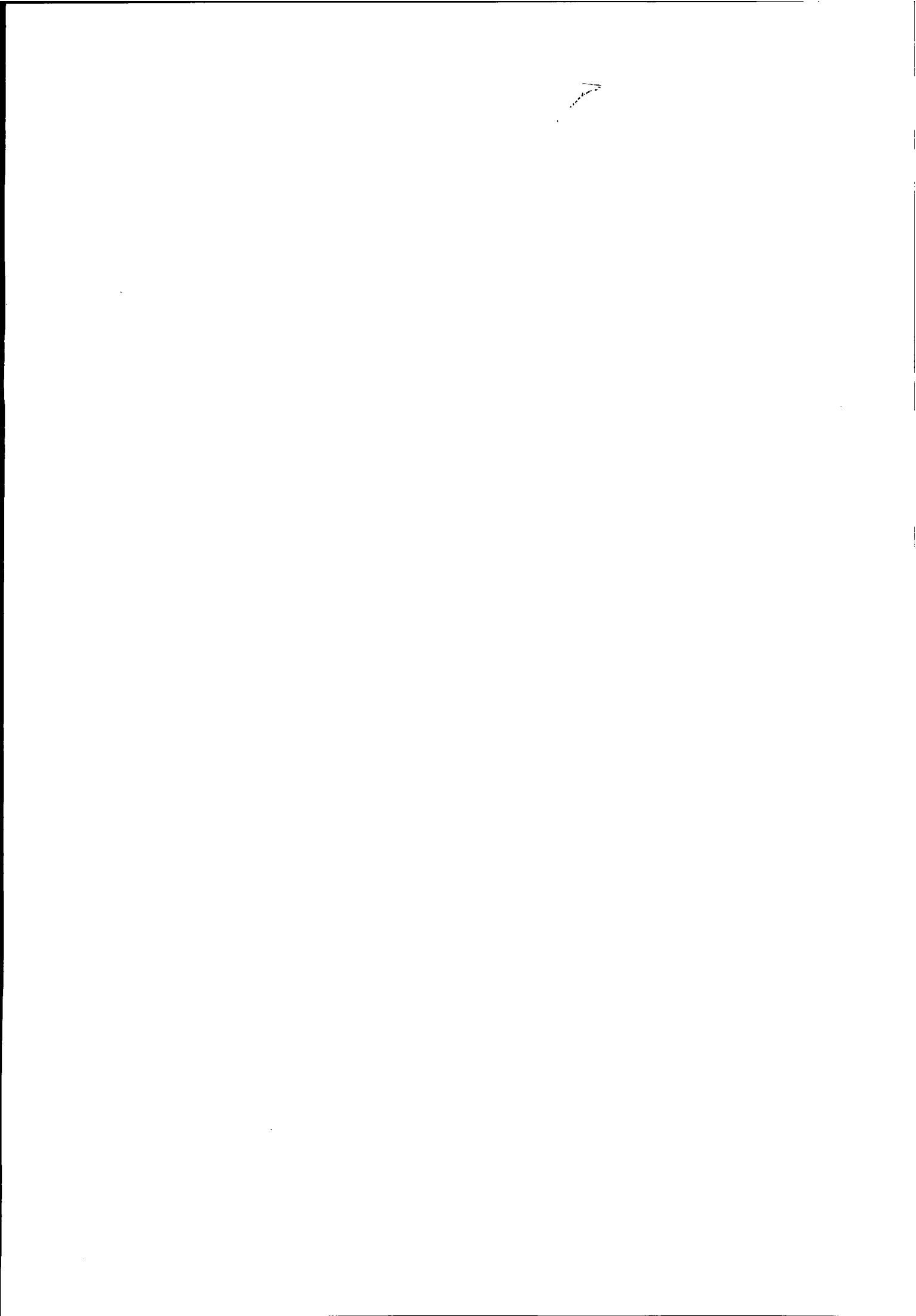
- شکل (۶-۴۶): تاریخچه زمانی تغییرات کرنش حجمی برای هسته قائم ..... ۱۴۶
- شکل (۶-۴۷): تاریخچه زمانی تغییرات ضریب فشار آب حفره ای در هسته قائم ..... ۱۴۸
- شکل (۶-۴۸): تاریخچه زمانی تغییرات ضریب فشار آب حفره ای برای هسته با زوایای ۷۵، ۶۲ و ۵۴ درجه نسبت به افق ..... ۱۴۹
- شکل (۶-۴۹): تاریخچه زمانی تغییرات ضریب فشار آب حفره ای در هسته با زاویه ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۵۰
- شکل (۶-۵۰): تغییرات ماکزیمم شتاب تاج سد در مقابل زاویه محور هسته نسبت به افق ..... ۱۵۱
- شکل (۶-۵۱): تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد برای هسته قائم و هسته با زاویه ۷۵ درجه نسبت به افق ..... ۱۵۱
- شکل (۶-۵۲): تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد برای هسته با زوایای ۶۲، ۵۴ و ۴۲ درجه نسبت به افق ..... ۱۵۲
- شکل (۶-۵۳): توزیع شتاب افقی حداکثر در امتداد ارتفاع هسته با زوایای مختلف نسبت به افق ..... ۱۵۳

## چکیده:

در این تحقیق تأثیر شکل هسته رسی بر روی پایداری دینامیکی سدهای خاکی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور دست یابی به این هدف، عوامل و پدیده هایی که در شرایط دینامیکی می توانند منجر به ناپایداری و گسیختگی در سد شوند بر روی شکل های مختلف هسته مورد بررسی قرار گرفته اند. این پدیده ها شامل تغییر مکان های افقی و قائم، اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در هسته، ضریب فشار آب حفره ای، کرنش های برشی به وجود آمده در هسته و توزیع شتاب در نقاط مختلف بدنه سد می باشد. برای بررسی این عوامل بر روی یک نمونه واقعی، سد آق چای در استان آذربایجان غربی که سدی خاکی با هسته رسی مرکزی می باشد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با تغییر زاویه شیب هسته آن از قائم به هسته های مایل، تأثیر شکل هسته رسی بر روی رفتار دینامیکی سدهای خاکی بررسی گردیده است. به این ترتیب ۵ نوع هسته با زوایای محور ۹۰، ۷۵، ۶۲، ۵۴ و ۴۲ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شده است که تمامی این مقاطع در حالت استاتیکی پایدار بوده و دارای حجم یکسانی از مصالح هسته می باشند.

آنالیز دینامیکی سد آق چای با استفاده از نرم افزارهای Geostudio 2004 و Plaxis 8.2 که از معروف ترین نرم افزارهای ژئوتکنیک می باشند و به ترتیب از مدل خطی معادل و مدل خاک سخت شونده برای مصالح بدنه سد استفاده می کنند، انجام شده است. در نرم افزار Geostudio آنالیز دینامیکی بدون در نظر گرفتن اضافه فشار آب منفذی ناشی از زلزله و با استفاده از روش تنش کل انجام شده است. ولی در نرم افزار Plaxis به دلیل استفاده از مدل خاک سخت شونده که یک مدل رفتاری پیشرفته است، اضافه فشار آب منفذی ناشی از زلزله در هسته سد محاسبه و آنالیزها بر اساس روش تنش مؤثر انجام گرفته است.

نتایج تحلیل های دینامیکی نشان می دهد که با مایل شدن هسته سد میزان تغییر مکان های قائم آن کاهش چشمگیری پیدا می کند. همچنین بررسی اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در اثر زلزله نشان می دهد که با کاهش زاویه تمایل هسته سد مقدار اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در آن نسبت به هسته قائم ابتدا به طور قابل توجهی افزایش یافته و سپس روند کاهشی را طی می کند. به طوری که در هسته با زاویه محور ۶۲ درجه نسبت به افق بیشترین فشار آب منفذی ایجاد شده و پس از آن کاهش یافته به طوری که در مایلترین هسته مقدار اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده کمتر از مقدار متناظر آن در هسته قائم است. بررسی کرنش های برشی ایجاد شده در هسته ها نیز نشان می دهد که با مایل شدن هسته سد مقدار کرنش برشی کاهش و به تبع آن احتمال بروز شکست برشی متفی می شود. در نهایت پس از تجزیه و تحلیل های صورت گرفته بر روی اشکال مختلف هسته سد، چنین نتیجه گیری می شود که با مایل شدن هسته سد عملکرد آن در برابر زلزله بهتر می شود و لذا در هنگام طراحی سدها، هسته مایل بر هسته قائم ارجحیت دارد. لازم به ذکر است که مایل شدن هسته سد تا حدی می تواند ادامه یابد که پایداری سد را در دیگر حالت های بحرانی به خطر نیندازد.



# فصل اول

## مقدمه

### ۱- مقدمه:

به طور متوسط در هر ده سال، یک زلزله بزرگ بخش هایی از ایران را به ویرانی کشانیده است. اگر تعداد زلزله های کوچکتر و خسارات ناشی از آنها را نیز در نظر بگیریم خواهیم دید که زلزله و خسارات ناشی از آن، همواره به صورت تهدیدی جدی علیه آسایش و اقتصاد مردم کشور ما بوده است. از سوی دیگر در سال های اخیر، زلزله های بزرگی که در کشورهای پیشرفته دنیا رخ داده است با تلفات جانی و مالی ناچیز همراه بوده و در اکثر موارد تعداد کشته شدگان از چند نفر تجاوز نکرده است. وقوع چنین حوادثی بیانگر آن است که برخورد علمی و مهندسی با مسئله زلزله می تواند در کاهش خطرات و خسارات ناشی از آن بسیار موثر باشد. بدین ترتیب طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله به عنوان یکی از اهداف مهم جامعه مهندسی ایران به شمار می رود.

با توجه به اینکه تعداد سدهای جدید از نوع خاکی، رو به افزایش می رود و ارتفاع آن ها به اندازه های غیر قابل انتظاری رسیده است و در برخی موارد مخازن آنها دارای ظرفیت های بسیار زیاد می باشد، لذا چندین دهه است که اطمینان از ایمنی این نوع سدها ذهن طراحان و محققین را به خود مشغول ساخته است. هر چند موضوع آسیب پذیری سدهای خاکی از زمان های قبل مورد توجه بوده است ولی پیچیدگی های رفتاری این گونه سازه های خاکی در شرایط مختلف هندسی و فیزیکی و نیز تفاوت ویژگی های زلزله موجب می شود که مطالعات دقیق تر با ابزار محاسباتی قوی تر، نتایج جدید یا متفاوتی از وضعیت رفتاری بدنه سد را در مقابل زلزله نشان دهند. سیر پیشرفت روش های تحلیلی بررسی لرزه ای سدهای خاکی از ساده ترین روش به نام روش شبه استاتیکی آغاز شده و به تحلیل های پیچیده با مدل های رفتاری پیشرفته منتهی شده است.

در طراحی لرزه ای سدهای خاکی به طور معمول حفظ آب ذخیره شده در پشت سد هنگام وقوع زلزله و در بدترین حالت رها شدن آب مخزن سد به شیوه ای که منجر به خسارت جانی نشود مد نظر قرار می گیرد و سدها با این الزامات طراحی می شوند. دریافت ما از شدت ریسک زلزله در بسیاری از مناطق در نتیجه داده های لرزه ای به دست آمده در دهه های اخیر و پژوهش های زمین شناختی، لرزه زمین شناختی و تاریخی دستخوش تغییر گردیده است.