بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

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

آنالیز فشار منفذی دینامیکی سد خاکی تحت بارگذاری زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک

استاد راهنما

دکتر مسعود عامل سخی

استاد مشاور

دکتر علی قنبری

اساتید داور

دکتر سعید تاریوردیلو **دکتر هادی بهادری**

نگارش وتنظیم

سمانه مشاری

بهمن ماه 1391

تقدیم

به روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم،

به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر،

به خواهرم که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است

و به همسرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم.

با سپاس

از استاد با کمالات و شایسته ؛ جناب آقای دکتر عامل سخی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد ارجمند جناب آقای دکتر قنبری که زحمت مشاوره این پایان نامه را متقبل شدند؛ از همه دوستان و همکلاسی ها که در طول این دوره همواره مرا یاری داده‌اند و به خصوص از خانواده‌ام که هر لحظه در کنارم بودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات

1-1مقدمه 1
2-1بیان مسئله 3
3-1هدف از انجام پروژه 4
4-1روش انجام تحقیق 4
5-1سیمای کلی رساله 4

فصل دوم: ویژگی زلزله‌های مختلف و بررسی خصوصیات نگاشت حوزه نزدیک

1-2مقدمه 6
2-2پارامترهای متداول در تشریح خصوصیات زلزله 6
1-2-2شتاب ماکزیمم 7
2-2-2محتوای فرکانس 7
3-2-2مدت زمان مؤثر زلزله 9
3-2مشخصات زلزله برای طراحی 10
4-2تعریف زلزله‌های حوزه نزدیک 11
1-4-2خصوصیات زلزله های حوزه نزدیک 12
2-4-2بررسی اهمیت تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها نسبت به تحلیل طیفی در زلزله‌های حوزه نزدیک 26
5-2تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی رفتار سدهای خاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک 26

فصل سوم: رفتار دینامیکی سدهای خاکی با تکیه اساسی بر فشار آب حفره‌ای

1-3مقدمه 28
2-3تأثیر زلزله بر سدهای خاکی 28
1-2-3انواع خسارت‌های ناشی از زلزله در سدهای خاکی 30
2-2-3مطالعه آماری پیرامون خرابی سدهای خاکی 31
3-3فشار آب حفره‌ای 33
1-3-3فشار آب حفره‌ای مثبت 33
2-3-3فشار آب حفره‌ای منفی 34
4-3فشار آب حفره‌ای سد در مراحل ساخت، آبگیری و بهره برداری 34

3-4-1تحلیل سد در مرحله ساخت 34
3-4-2تحلیل سد هنگام آبگیری مخزن 35
3-4-3تحلیل سد در حالت تراوش پایدار 37
3-5معیارهای ارزیابی پایداری سدهای خاکی در برابر بارهای دینامیکی 38
3-5-1تغییر شکل‌های دائمی ناشی از زلزله 38
3-5-2افزایش فشار آب منفذی ناشی از زلزله 39
3-5-3شکست هیدرولیکی 39
3-6رفتار دینامیکی مصالح تشکیل دهنده بدنه سد 43
3-6-1شاخص‌های عمومی رفتار خاک 43
3-6-2رفتار تنش کرنش خاک تحت بارهای سیکلی 46
3-6-3مدل خطی معادل 48
3-6-4تعیین مدول برشی و نسبت میرایی وابسته به کرنش 49
3-6-5مدل‌های غیر خطی سیکلی 54
3-6-6مقایسه مدل‌های خطی معادل و غیر خطی 57
3-6-7مدل‌های رفتاری پیشرفته 58

فصل چهارم: معرفی نرم افزار مورد استفاده، مدل سازی سد و نحوه انجام آنالیز دینامیکی سد

4-1مقدمه 59
4-2معرفی سد مورد مطالعه 59
4-2-1مشخصات مصالح سد 60
4-3معرفی نرم افزارPLAXIS 62
4-3-1زیر برنامه‌ها 63
4-3-2مرورکلی بر مدل‌های به کار رفته در نرم افزارPlaxis 64
4-3-3مدل هندسی 65
4-3-4المان‌های خاک 66
4-3-5المان بندی 67
4-3-6شرایط مرزی 68
4-4مدل سازی سد 68
4-5مدل سازی تحلیل دینامیکی 70
4-6مشخصات شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک و دور مورد استفاده در آنالیزهای دینامیکی 70

فصل پنجم: نتایج آنالیز دینامیکی و تجزیه و تحلیل آن‌ها

5-1مقدمه 76
5-2آنالیز دینامیکی سد خاکی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک 77
5-2-1بررسی رفتار سد در حین زلزله 77
5-2-2بررسی بزرگنمایی شتاب و اضافه فشار آب حفره‌ای حداکثر در حین زلزله 78
5-2-3مقادیر جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ای کل در انتهای زلزله 79
5-2-4بررسی فشار آب حفره‌ای و شکست هیدرولیکی در یک مقطع افقی از هسته 82
5-2-5رفتار سد تحت زلزله حوزه نزدیک 2N 84
5-2-6اثر تغییرات نفوذپذیری هسته و پوسته بر رفتار لرزه‌ای سد 87
5-2-7اثر تغییرات تراز آب مخزن در رفتار سد 90
5-3آنالیز دینامیکی سد خاکی تحت زلزله‌های حوزه دور 95
5-3-1بررسی بزرگنمایی شتاب و اضافه فشار آب حفره‌ای حداکثر در حین زلزله 95
5-3-2مقادیر جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ای کل در انتهای زلزله 96
5-3-3بررسی فشار آب حفره‌ای و شکست هیدرولیکی در یک مقطع افقی از هسته 97
5-3-4اثر تغییرات تراز آب مخزن در رفتار سد 98
5-3-5اثر تغییرات نفوذپذیری هسته و پوسته بر رفتار لرزه‌ای سد 102
5-4مقایسه رفتار سد تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور 104

فصل ششم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

6-1خلاصه و نتیجه گیری 108
6-2ارائه پیشنهاداتی جهت ادامه روند تحقیقات 110

منابع 111
پیوست الف 118

فهرست جداول

عنوان جدول صفحه

جدول 2-1: پارامترهای کلیدی در تعریف طیف پاسخ شتاب قائم برای زلزله در حوزه دور و نزدیک به گسل 24
جدول 3-1 خلاصه‌ای از اثرات زلزله بر روی سدهای خاکی 29
جدول 3-2: سدهای آسیب دیده در اثر شکست هیدرولیکی 32
جدول 4-1: پارامتر های استفاده شده در مرحله تحلیل دینامیکی سد مسجد سلیمان 61
جدول 4-2: مشخصات شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک انتخاب شده برای تحلیل دینامیکی سد 71
جدول 4-3: مشخصات شتابنگاشت‌های حوزه دور انتخاب شده برای تحلیل دینامیکی سد 71
جدول 4-4:مشخصات نگاشت حوزه نزدیک 2N 71
جدول 5-1: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطهB 81
جدول 5-2: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطه E 81
جدول 5-3: مقادیر R_u در نقاط مختلف هسته تحت زلزله‌های حوزه نزدیک 82
جدول 5-4: ماکزیمم فشار آب حفره‌ای اضافی در حین زلزله در طرفین هسته 83
جدول 5-5: فشار آب حفره‌ای ماندگار در انتهای زلزله در طرفین هسته 83
جدول 5-6: مقادیر پارامتر R_u در انتهای زلزله در طرفین هسته 83
جدول 5-7: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطهB 87
جدول 5-8: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطه E 87
جدول 5-9: مقادیر Ru در نقاط مختلف هسته تحت زلزله‌های حوزه نزدیک 87
جدول 5-10: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطهB 96
جدول 5-11: رفتار سد در انتهای زلزله در نقطه E 96
جدول 5-12: مقادیر R_u در نقاط مختلف هسته تحت زلزله‌های حوزه دور 97
جدول 5-13: ماکزیمم فشار آب حفره‌ای اضافی در طرفین هسته 97
جدول 5-14:فشار آب حفره‌ای ماندگار در انتهای زلزله 98
جدول 5-15: پارامتر R_u در انتهای زلزله در طرفین هسته 98

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل صفحه

شکل 2-1: طیف دامنه فوریه برای شتاب نگاشت زلزله‌های ناغان و طبس (به ترتیب از راست به چپ) 8
شکل 2-2: مدت زمان مؤثر برای زلزله‌های مختلف 9
شکل 2-3: منحنی‌های ارائه شده توسط محققین مختلف برای بیان محدوده نزدیک گسل 12
شکل 2-4: شکل هندسی گسل در حال گسیختگی و مسیر تا ایستگاه لرزه‌ای 15
شکل 2-5: تغییرات آزیموتی تابع زمانی چشمه برای گسیختگی یک گسل در جهات مختلف. 15
شکل 2-6: نمودار شماتیک انواع جهت پذیری در امتداد گسیختگی نسبت به ساختگاه 16
شکل 2-7 : منطقه Imperial Valley که موقعیت کانون زلزله، ایستگاه های ثبت رکورد و نگاشت‌های ثبت شده در سال 1979 17
شکل 2-8 : طیف پاسخ هموار شده مؤلفه عمود بر گسل سه نگاشت حوزه نزدیک به همراه نگاشت حوزه دور Taft 19
شکل 2-9: نمودار شماتیک نشان دهنده جهت پدیده‌های جهت پذیری و تغییرمکان ماندگار برای گسلش امتداد لغز و شیب لغز 20
شکل 2-10: نمودار شماتیک تاریخچه زمانی پالس جهت پذیری و تغییرمکان ماندگار گسلش امتداد لغز و شیب لغز به صورت جدا از هم و ترکیب شده باهم 21
شکل 2-11: مؤلفه سرعت در ایستگاه Tcc068 در زلزله Chi Chi 1999 که به دو مؤلفه ناشی از اثر Fling-Step و اثر دینامیکی تفکیک شده است 21
شکل 2-12: نمودار اثر فرا دیواره 22
شکل 2-13: طیف پاسخ در زلزله حوزه نزدیک به گسل برای میرایی 2٪ 23
شکل 2-14: طیف پاسخ در زلزله حوزه نزدیک به گسل برای میرایی 2٪ 24
شکل 2-15: طیف پاسخ در زلزله حوزه دور از گسل برای میرایی 2٪ 25
شکل 3-1: معمول‌ترین نوع خسارت ایجاد شده 31
شکل 3-2: فشار حفره‌ای روی یک خط هم پتانسیل 34
شکل 3-3: تأثیر آبگیری مخزن بر یک سد ناحیه بندی شده 36
شکل 3-4: فرضیات به کار رفته در تشخیص ترک هیدرولیکی (مقایسه فشارهای هیدرواستاتیک با تنش‌های کل قائم 38
شکل 3-5: تغییر خصوصیات خاک با کرنش برشی و مدل رفتاری استفاده شده‌ی متناظر با آن 44

شکل 3-6: تغییرات خصوصیات رفتاری خاک تحت بارهای سیکلی با افزایش سطح کرنش 45
شکل 3-7: توصیف اثرات کرنش برشی روی نسبت میرایی و مدول برشی 46
شکل 3-8: تعریف مدول برشی G و نسبت میرایی ζ 47
شکل 3-9: مدول برشی سکانت $G\sec$ و تانژانت $G\tan$ 49
شکل 3-10: منحنی اصلی نشانگر مدول برشی 50
شکل 3-11: مقادیر $k2$ برای ماسه با دانسیته‌های نسبی متفاوت 52
شکل 3-12: مقادیر $k2$ برای خاک‌های شنی 52
شکل 3-13: مدول برشی بر جای رسهای اشباع 53
شکل 3-14: نسبت میرایی برای ماسه 53
شکل 3-15: نسبت میرایی برای رسهای اشباع 54
شکل 3-16: منحنی باربرداری و بارگذاری بر پایه قوانین میسینگ 55
شکل 4-1: نمایی از سد مسجد سلیمان 60
شکل 4-2: نمونهای از مسائل تقارن محوری (راست) و کرنش صفحهای (چپ) 66
شکل 4-3: موقعیت گرهها و نقاط تنش در المان‌های خاک 67
شکل 4-4 : المان‌بندی سد مسجد سلیمان (الف) - المان بندی کلی سد به همراه پی در نظر گرفته شده در تحلیل، (ب) - نمایی نزدیک‌تر از مقطع سد به همراه المان‌بندی انجام شده 69
شکل 4-5: محدوده PGV/PGA و T_m در نگاشت‌های حوزه نزدیک و دور 72
شکل 4-6: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 1N 73
شکل 4-7: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 3N 73
شکل 4-8: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 4N 73
شکل 4-9: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 1F 74
شکل 4-10: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 5F 74
شکل 4-11: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 8F 74
شکل 4-12: نگاشت شتاب و سرعت زلزله 2N 75
شکل 5-1: نقاط جانمایی شده بر روی هسته سد 77
شکل 5-2: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد تحت زلزله‌های مختلف حوزه نزدیک 78
شکل 5-3: بیشترین اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در ارتفاع سد حین زلزله‌های مختلف حوزه نزدیک 79
شکل 5-4: نمونه‌ای از نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای در انتهای زلزله 80
شکل 5-5: نمونه‌ای از نتایج فشار آب حفره‌ای کل در انتهای زلزله 80
شکل 5-6: الف) نمونه‌ای از نتایج جابه‌جایی افقی در انتهای زلزله ب) نمونه‌ای از نتایج جابه‌جایی قائم در انتهای زلزله 80

شکل 5-7: فشار آب حفره‌ای کل در انتهای زلزله در تراز آب 140 متری 82
شکل 5-8: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر زمان در طرفین هسته 84
شکل 5-9: تغییرات R_u در یک مقطع افقی در هسته 84
شکل 5-10: بزرگنمایی شتاب در زلزله 2N در مقایسه با دیگر رکوردهای حوزه نزدیک 86
شکل 5-11: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد تحت زلزله های حوزه نزدیک با PGA 0/15 86
شکل 5-12: اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در زلزله 2N در حین زلزله در مقایسه با دیگر رکوردهای حوزه نزدیک 86
شکل 5-13: فشار آب حفره‌ای کل ایجاد شده توسط زلزله 2N در انتهای زلزله در مقایسه با دیگر رکوردهای حوزه نزدیک 87
شکل 5-14: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در هر زلزله با تغییر نفوذ پذیری هسته 88
شکل 5-15: تغییرات اضافه فشار آب حفرهای در هر زلزله با تغییر نفوذ پذیری پوسته 89
شکل 5-16: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زلزله 1N با کاهش و افزایش 100 برابری مقدار اولیه نفوذ پذیری هسته و پوسته 90
شکل 5-17: تغییرات بزرگنمایی شتاب در هر زلزله با تغییر تراز آب مخزن 91
شکل 5-18: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد در تراز های آب 33، 66، 99، 132، 140 متری تحت زلزله‌های مختلف حوزه نزدیک 92
شکل 5-19: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در هر زلزله با تغییر تراز آب مخزن 93
شکل 5-20: بیشترین اضافه فشار آب حفره‌ای در ارتفاع سد برای هر تراز آب، تحت زلزله‌های مختلف حوزه نزدیک 94
شکل 5-21: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد تحت زلزله‌های حوزه دور 95
شکل 5-22: اضافه فشار آب حفرهای در ارتفاع سد در حین زلزله حوزه دور 95
شکل 5-23: فشار آب حفره‌ای کل در انتهای زلزله حوزه دور در تراز آب 140 متری 97
شکل 5-24: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد در تراز های آب 33، 66، 99، 132، 140 متری تحت زلزله‌های مختلف حوزه دور 99
شکل 5-25: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد در یک زلزله ثابت با افزایش تراز آب مخزن 100
شکل 5-26: اضافه فشار آب حفرهای ماکزیمم در حین زلزله‌های مختلف حوزه دور در ارتفاع سد برای هر تراز آب 101
شکل 5-27: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در هر زلزله با تغییر نفوذ پذیری هسته 102
شکل 5-28: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در هر زلزله با تغییر نفوذ پذیری پوسته 103
شکل 5-29: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد 105
شکل 5-30: ماکزیمم فشار آب حفره‌ای اضافی در حین زلزله در ارتفاع هسته 105

شکل 5-31: فشار آب حفره‌ای ماندگار در ارتفاع هسته 106
شکل 5-32: Ru محاسبه شده در انتهای زلزله در ارتفاع هسته 106
شکل 5-33:مقایسه تغییرات R_u با تغییر ضریب نفوذپذیری تحت زلزله‌های دور و نزدیک در نقاط C و E در ارتفاع هسته سد 107

شکل‌های پیوست

شکل الف-1: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی قائم در ارتفاع به پی سد در حین زلزله تحت زلزله حوزه نزدیک 118
شکل الف-2: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی افقی در ارتفاع به پی سد در حین زلزله در بالا دست سد تحت زلزله حوزه نزدیک 119
شکل الف-3: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی افقی در ارتفاع به پی سد در حین زلزله در پایین دست سد تحت زلزله حوزه نزدیک 120
شکل الف-4: جابه‌جایی قائم ماندگار در انتهای زلزله تحت زلزله حوزه نزدیک 121
شکل الف-5: جابه‌جایی افقی ماندگار در انتهای زلزله تحت زلزله حوزه نزدیک 122
شکل الف-6: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی قائم در ارتفاع به پی سد در حین زلزله تحت زلزله حوزه دور 123
شکل الف-7: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی افقی در ارتفاع به پی سد در حین زلزله در بالا دست سد تحت زلزله حوزه دور 124
شکل الف-8: نسبت ماکزیمم جابه‌جایی افقی در ارتفاع به پی سد در حین زلزله در پایین دست سد تحت زلزله حوزه دور 125
شکل الف-9: جابه‌جایی قائم ماندگار در انتهای زلزله تحت زلزله حوزه دور 126
شکل الف-10: جابه‌جایی افقی ماندگار در انتهای زلزله تحت زلزله حوزه دور 127

چکیده:

در این تحقیق فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور در هسته سد خاکی بررسی شده است. در حین زلزله فشار آب حفره‌ای هسته با توجه به خصوصیات مصالح و خصوصیات زلزله وارد شده تغییر می‌کند. در صورتی که فشار آب حفره‌ای در حین زلزله افزایش یافته و پس از زلزله مدت زیادی در هسته سد باقی بماند می‌تواند منجر به فرسایش داخلی مصالح و ایجاد ترک هیدرولیکی در سد شود. برای بررسی این عامل بر روی یک نمونه واقعی، سد مسجد سلیمان که یک سد خاکی- سنگریزه‌ای با هسته رسی می‌باشد، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با اعمال نگاشت‌های حوزه نزدیک و حوزه دور رفتار دینامیکی سد بررسی شده است.

آنالیز دینامیکی سد مسجد سلیمان با مدل سازی سد و استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل با معیار تسلیم موهر کلمب در یک تحلیل کوپل تغییر مکان-فشار آب حفره‌ای و با استفاده از نرم افزار اجزا محدود Plaxis 8/5 انجام شده است. از عوامل تأثیر گذار در مقدار فشار آب حفره‌ای هسته سد نفوذپذیری و تراز آب مخزن می‌باشد که برای بررسی آن‌ها 6 نفوذپذیری هسته و نفوذپذیری پوسته در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که نفوذپذیری هسته و پوسته 10، 50 و 100 برابر مقدار اولیه نفوذ پذیری افزایش و 10، 50 و 100 برابر مقدار اولیه نفوذپذیری کاهش داده شده است. برای بررسی تراز آب مخزن با توجه به این که ارتفاع تاج سد از کف رودخانه 150 متر می‌باشد، رفتار دینامیکی سد در حالت‌هایی که تراز آب در ارتفاع‌های 33، 66، 99، 132 و 140 متری قرار دارد بررسی شده است.

ماکزیمم فشار آب حفره‌ای که در هسته سد در حین زلزله به وجود می‌آید تحت زلزله‌های مختلف حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در انتهای زلزله، فشار آب حفره‌ای که در هسته در اثر زلزله ایجاد شده کاملاً از بین نرفته و با گذشت زمان کم می‌شود. با بررسی نتایج تحلیل‌ها مشاهده می‌شود که ماکزیمم فشار آب حفره‌ای که در اثر زلزله‌های حوزه نزدیک در هسته سد و به خصوص در نقاط کم ارتفاع هسته در حین زلزله ایجاد می‌شود بیش از مقادیر ایجاد شده توسط زلزله‌های حوزه دور می‌باشد. با این حال این فشار آب حفره‌ای در زلزله‌های حوزه نزدیک، سریع‌تر محو شده و مقدار فشار آب حفره‌ای باقی مانده در انتهای زلزله در هر دو حوزه تقریباً یکسان است. با این حال در نقاطی از ارتفاع هسته، احتمال وقوع ترک هیدرولیکی در سدهایی که تحت زلزله حوزه دور قرار گرفته‌اند بیشتر از حوزه نزدیک است. کاهش نفوذپذیری هسته و افزایش نفوذپذیری پوسته در حالت کلی باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در حین زلزله در هسته سد می‌شود. با افزایش نفوذپذیری هسته و کاهش نفوذپذیری پوسته، فشار آب حفره‌ای با توجه به مقدار کل آن تغییر چندان زیادی ندارد. با افزایش تراز آب مخزن، فشار آب حفره‌ای در ارتفاع سد، به خصوص ارتفاع‌های پایین هسته سد افزایش می‌یابد. روند تغییرات با تغییر نفوذپذیری و تراز آب مخزن در زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک مشابه است.

فصل اول
کلیات

1-1 مقدمه

سد خاکی سازه‌ای است که برای مهار آب به روی رودخانه احداث می‌شود. با توجه به این که گاهی در مناطق لرزه خیز نیاز مبرم به احداث سد وجود دارد، لذا طراحی لرزه‌ای سدها از موارد اجتناب ناپذیر در طراحی سدها می‌باشد. سوابق مربوط به رفتار سدها در برابر زلزله موجب شده که در بسیاری از موارد سدهای موجود با زلزله-های مورد نظر بار دیگر بررسی شوند. ارزیابی درست و واقع‌گرایانه از کارایی و پایداری سد خاکی در برابر زلزله، نیازمند تحلیل پاسخ دینامیکی برای تعین تنش‌های دینامیکی و تغییر شکل‌های ایجاد شده است. بررسی زلزله ورودی و ارزیابی مشخصات آن از جمله فاکتورهای مهم در رفتار سد خاکی می‌باشد. شتاب نگاشت‌های ثبت شده از زمین‌لرزه‌های اخیر نشانگر ویژگی‌های متفاوت زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور است. پارامترهای موثر زیادی عملکرد سدهای خاکی را در برخورد با زلزله تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. یکی از پارامترهای موثر بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی آثار ناشی از ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی در حین زلزله در بدنه سد می‌باشد. عوامل متعددی از جمله سطح آب مخزن، خصوصیات خاک بدنه سد، نفوذپذیری، کرنش و تنش‌های موجود و... تأثیر گذار است.

میزان خرابی ایجاد شده در اثر وقوع زمین لرزه به عوامل بسیاری از جمله مکانیزم شکست گسل، فاصله گسل تا محل، نوع خاک و خصوصیات رکورد زلزله شامل محتوای فرکانسی، مدت زمان، دامنه و همچنین به خصوصیات دینامیکی سازه وابسته است. شاید تا 2 دهه قبل بحث مربوط به فاصله کانون زلزله تا محل مخاطب چندانی نداشت و تنها به صورت کلی و در موارد خاصی چون روابط کاهندگی به آن پرداخته می‌شد ولی پس از زلزله-های مخربی همچون کوبه[1] (1995)، نورتریج[2] (1994)، چی چی[3] (1999) توجه محققین به زلزله‌های حوزه نزدیک گسل و خصوصیات منحصر به فرد آن‌ها جلب شد. هر چند به طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های حوزه نزدیک تعریف نمود اما به طور معمول فرض می‌گردد جنبش‌های ثبت شده در فاصله‌ای کمتر از 20 کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های حوزه نزدیک می‌باشند. استوارت[4]

[1] Kobe
[2] Northridge
[3] Chi Chi
[4] Stewart

در سال 2001 محدوده فاصله 20 تا 60 کیلومتری از محل گسل تا ساختگاه را به عنوان محدوده بالایی پیشنهاد کرد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تأثیر حوزه نزدیک بیشتر از 20 کیلومتر می‌باشد و حد بالایی پیشنهاد شده توسط استوارت منطقی‌تر می‌باشد. هر چند آیین نامه UBC97 این فاصله را 15 کیلومتر می‌داند (Stewart, et al., 2001).

زلزله‌های حوزه نزدیک خواص و ویژگی‌هایی دارند که آن‌ها را از زلزله‌های دور متمایز می‌کنند. وجود حرکت پالس گونه با پریود بلند در ابتدای رکوردها، تجمع انرژی و انتقال آن به سازه در مدت زمان کوتاه، اعمال نیروی ضربه گونه به سازه، بزرگ‌تر بودن مؤلفه عمود بر جهت گسل نسبت به مؤلفه موازی گسل، نسبت بیشینه سرعت به بیشینه شتاب بالا را می‌توان از ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل بر شمرد. در کنار اثرات جهت‌پذیری و سایر اثرات متمایزکننده زلزله‌های حوزه نزدیک از زلزله‌های معمولی، زلزله‌های حوزه نزدیک شدیدتر از زلزله‌های معمولی ثبت شده طی یک رخداد مشابه و تحت شرایط ساختگاهی یکسان می‌باشند، زیرا نزدیکی به چشمه لرزه‌ای اجازه کاهندگی قابل توجه به زلزله را نمی‌دهد. بنابراین، تاریخچه زمانی شتاب این نوع زلزله‌ها دارای محتوای فرکانسی بسیار بالایی با دامنه بزرگ و زمان دوام کوتاه می‌باشد. علاوه بر آن، روابط کاهندگی اصلاح شده که اثرات جهت پذیری را نیز وارد می‌کنند، نشان می‌دهد که برای مقادیر یکسان بزرگا و مسافت، ویژگی های پالس-مانند زلزله حوزه نزدیک در ناحیه جهت‌پذیری پیش رونده ممکن است به طور قابل ملاحظه مقادیر طیف پاسخ الاستیک بزرگ‌تری را در مقایسه با آن‌ها بدون اثر جهت پذیری ایجاد نمایند (Somerville, et al., 1997).

از جمله تحقیقاتی که بر روی سدها انجام شده مطالعه بر روی سد بتنی قوسی است که نشان می‌دهد به دلیل اثر جهت پذیری زلزله، تغییرات تنش در قوس و پایه سد بسیار زیاد می‌باشد(Ohmachi & Jalali, 1999) . در مطالعه دیگر که اخیراً انجام شده از 5 نوع سد بتنی، در سیستم پی- مخزن برای برآورد عملکرد لرزه‌ای آن‌ها تحت رکورد های زلزله‌های حوزه نزدیک و دور استفاده شده است(Bayraktar, et al., 2009) . در مطالعه‌ای نشان داده شده است که با دور شدن از مرکز زلزله، پریود شتاب کاهش پیدا می‌کند و اثر آن بر روی سد های با پریود بلند کمتر می‌شود و اثر زلزله های دور از گسل بر روی سد های کوتاه بیشتر می‌شود. در این مطالعه ملاک ارزیابی پاسخ، تنها شتاب تاج سد بوده است و علت تغیر در شتاب تاج سد نیز مشخص نشده است که به کدام یک از ویژگی‌های حوزه نزدیک ارتباط دارد(شاه نظری و همکاران، 1387). تحقیقات انجام شده در مورد اثرات ساختگاهی نیز نشان می‌دهد که وضعیت هندسی لایه‌ها و عمق سنگ بستر و سختی خاک، جنبش‌های ثبت شده زمین از جمله دامنه و پریود پالس ورودی را تغییر می‌دهد(Rodriguez-Marek & Bray, 2006) .

فشار آب حفره‌ای در بدنه سد خاکی در سدهای همگن و یا در هسته سدهای خاکی ناهمگن در ضمن احداث سد و بلافاصله پس از اتمام سد، از مباحث مورد توجه پژوهشگران و طراحان سدهای خاکی بوده است زیرا فشار آب موجود در خاک، در هر حال موجب کاهش دادن ایمنی و پایداری سد می‌شود و دانستن مقدار آن در بررسی

و تخمین پایداری یا لغزش بدنه سد خاکی ضروری است و به همین علت ظرف 40 سال گذشته انـدازی گیـری-های متعددی صورت گرفته و رابطه‌های تجربی یا نظریه خاصی پیشنهاد گردیده است. از آنجا که ایـن فشـار آب مربوط به آب مخزن سد و حرکت زه نیست بلکه مربوط به شرایط تراکم خاک و وجود آب‌های درون منافذ خاک در هنگام احداث سد می‌باشد و در این حالت وضعیت خاک اشباع کامل نیست؛ لذا بررسی فشار آب حفـره‌ای در این شرایط به حالت غیر اشباع خاک وابسته است و در این راستا تحقیقات مرتبط بـا انجـام گرفتـه اسـت. نقـش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در ضمن ساخت بدنه سد خاکی (یا هسته آن) تا بحرانی‌ترین حالت آن ممکن اسـت تا آن حدی قابل توجه باشد که روی پایداری بدنه سد تأثیر مهمی داشته باشد در عین حال ممکـن اسـت پدیـد آمدن این فشار آب، ناچیز با صفر باشد. میزان بزرگی این فشار آب در نقاط مختلف مقطع سـد تـابع نـوع خـاک، میزان نفوذپذیری آن، درصد تراکم، درصد اشباع و وضعیت هندسی مقطع و فاصله هر نقطه تـا سـطوح زهکشـی است.

یکی از پدیده‌های محتمل در سدهای خاکی که منجر به نشست ناخواسته و حتی آسیب رسانی بـا تخریـب سـد خاکی می‌شود، پدیده شکست هیدرولیکی[1] در بخش کم نفوذ پذیر سد خاکی مثـل مغـزه آن اسـت. در حقیقـت فشار آب حفره‌ای بیش از حد می‌تواند موجب ترک درونی در هسته سد گردد و از این محـل تـرک خـوردگی، زه متمرکز شود و مسیر مناسبی برای حرکت آب فراهم گردد و در صورتی که عواملی چون فیلتـر از شسـته شـدن خاک جلوگیری نکند، ممکن است به تخریب سد منجر گردد.

شرارد[2] در سال 1986 نظر می‌دهد که در حال حاضر دلایل کافی برای پذیرفتن این واقعیت وجـود دارد و حتـی در سدهایی که نشست‌های نامساوی آن‌ها مشاهده نمی‌شود، وقوع شکست هیـدرولیکی کـاملاً محتمـل اسـت. از جمله مقالات اولیه در مورد شکست هیـدرولیکی را مـی‌تـوان مقـالات .Kjaernsli(1968) , Vaughan et al (1970) و Vaughan (1971) دانست. بعداً پژوهشگران دیگری روی این موضوع تحقیق نمودند و ازجمله مـی-توان به Vaughan (1976)، Sherard (1985)و Kulhawy and Gurtowski (1970)اشاره نمود) وفائیان , 1385).

1-2 بیان مسئله

همان طور که در واقعیت مشاهده می‌شود، زلزله می‌تواند باعث ایجاد خرابی‌هایی در سدهای خاکی گـردد. یکـی از عواملی که می‌تواند در سد خاکی خرابی ایجاد کند، افزایش فشار آب حفره‌ای هسته سـد خـاکی-سـنگریزه‌ای است که موجب ترک هیدرولیکی، فرسایش درونی و نهایتاً ناپایداری سد می‌شود. برای بررسی رفتـار سـد در اثـر زلزله و به خصوص تغییرات فشار آب حفره‌ای در هسته سد و نتایج حاصل از تغییرات آن، یک مدل واقعی از سـد

[1] Hydraulic Fracture or hydrofracture
[2] Sherard

خاکی-سنگریزه‌ای مدل شده است و با اعمال زلزله‌های مختلف حوزه دور و نزدیک و تغییر دادن تراز آب مخـزن و تغییر ضریب نفوذپذیری هسته و پوسته سد، رفتار سد مورد مطالعه قرار گرفته است.

1 - 3 هدف از انجام پروژه

تعیین اثر فشار آب حفره ای اضافی بر رفتار سد خاکی حین زلزله گسل دور و نزدیک

بررسی تأثیر سطح آب مخزن در رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

بررسی تأثیر ضرایب نفوذپذیری مختلف پوسته بالادست در رفتار دینامیکی سدهای خاکی

1 - 4 روش انجام تحقیق

1- مروری بر کارهای قبلی در خصوص این موضوع

2- جمع آوری شتاب نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک

3- جمع آوری پارامترهای استاتیکی و دینامیکی سد مسجد سلیمان به عنوان مطالعه موردی

4- آشنایی با نرم افزار مورد نیاز برای تحلیل‌ها

5- انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بر مبنای مفروضات در نظر گرفته شده برای بررسی موارد مختلف

6- مطالعه و بررسی نتایج بدست آمده و تحلیل آن‌ها

7- جمع بندی و تهیه متن اصلی پایان نامه

1 - 5 سیمای کلی رساله

مطالب این تحقیق در قالب شش فصل به شرح زیر ارائه گردیده است:

-فصل اول شامل ارائه کلیات مطالب می‌باشد.

-در فصل دوم ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قـرار گرفتـه و شـرایط گسـل و محـل قرارگیـری شتاب نگار نسبت به گسل و تأثیراتی که این حالات بر روی نگاشت ثبت شده می‌گذارد شرح داده شده اسـت. در انتهای فصل به تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی تحت زلزله‌های حـوزه نزدیـک اشاره شده است.

-در فصل سوم وضعیت فشار آب حفره‌ای در هسته در مراحل مختلـف عمـر سـد و اثـرات زیـاد بـودن فشـار آب حفره‌ای در پایداری سد شرح داده شده است همچنین در این فصل به بیـان عـواملی کـه در تحلیـل دینـامیکی

سدهای خاکی موثر هستند، پرداخته شده و در انتهای فصل نیز به مطالعات انجام شده بـر روی سـدهایی کـه در اثر زلزله و افزایش فشار آب حفره‌ای دچار خرابی شده‌اند اشاره شده است.

-در فصل چهارم به معرفی سد مسجد سلیمان، بررسی نرم افزار مورد استفاده در این تحقیـق و همچنـین نحـوه مدل سازی و انجام تحلیل‌ها پرداخته شده است و سپس به نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌ها معرفـی شـده است.

-در فصل پنجم نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به تفصیل آورده شده است.

-در فصل ششم جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه گردیده است.

2 فصل دوم
ویژگی زلزله‌های مختلف و بررسی خصوصیات نگاشت‌های حوزه نزدیک

2 - 1 مقدمه

سدهای خاکی سازه‌های عظیم سه بعدی و غیر همگن هستند که از چند نوع مصالح با خواص مختلف ساخته می‌شوند و پیش بینی رفتار دینامیکی آن‌ها در مقابل زلزله بسیار پیچیده می‌باشد. تنوع خواص دینامیکی بدنه سد و گوناگونی جنس و ضخامت شالوده که می‌توانند در انتقال، تضعیف و تقویت امواج زلزله نقش اساسی داشته باشند، وجود یا عدم وجود گسل فعال در محدوده محور سد، ویژگی‌های زلزله مانند فاصله مرکز زلزله تا سد، شدت و طول زمان وقوع زلزله، نوع و امتداد امواج رسیده به سد و محتوای فرکانسی امواج، همه از عواملی هستند که در پاسخ دینامیکی سد نقش به سزایی دارند؛ لذا رفتار سازه متأثر از خصوصیات زلزله اعمال شده به آن می‌باشد و خصوصیات زلزله‌ها با دور و نزدیک شدن فاصله ایستگاه دریافت کننده امواج و مرکز زلزله تغییر می‌کند. خصوصیات جنبش‌های حوزه نزدیک مستقیماً وابسته به مکانیزم چشمه لرزه‌ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جهت لغزش گسل می‌باشد. مهم‌ترین خصوصیات متمایز کننده جنبش‌های حوزه نزدیک تولید پالس‌هایی به علت اثر جهت‌پذیری و اثر تغییر مکان ماندگار می‌باشد. این نوع پالس‌های حرکت عموماً به صورت یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان و اغلب در تاریخچه زمانی سرعت دیده می‌شوند. در این فصل به اختصار به شرح ویژگی‌های نگاشت زلزله عوامل تأثیرگذار در پاسخ سازه‌ها و خصوصیات بارز نگاشت‌های حوزه نزدیک و بررسی اثرات چند زلزله در گذشته با خصوصیات متفاوت بر روی تعدادی از سدها پرداخته شده است.

2 - 2 پارامترهای متداول در تشریح خصوصیات زلزله

پارامترهای حرکات زمین، اساس تشریح خصوصیات حرکت زمین به صورت فشرده و کیفی می‌باشند. پارامترهای بسیاری جهت مشخص نمودن دامنه، محتوای فرکانس و مدت زمان حرکات نیرومند زمین پیشنهاد شده‌اند که برخی از آن‌ها فقط یکی از خصوصیات فوق را توصیف می‌نمایند. در حالی که برخی دیگر دو و یا حتی سه خصوصیت را تشریح می‌کنند. به علت پیچیدگی حرکات زمین در زلزله تعریف یک پارامتر منفرد که دقیقاً کلیه خصوصیات مهم حرکت زمین را توصیف کند غیر ممکن می‌باشد. در این قسمت مهم‌ترین پارامترهای مشخص کننده خصوصیات حرکت زمین را بررسی می‌کنیم.

2-2-1 شتاب ماکزیمم

متداول‌ترین معیار دامنه در یک حرکت زمین شتاب افقی ماکزیمم (PHA) است. PHA برای یک مؤلفه حرکت، بزرگ‌ترین مقدار (قدر مطلق) شتاب افقی به دست آمده از آن شتاب نگاشت است. شتاب‌های افقی معمولاً به علت رابطه طبیعی آن‌ها با نیروی اینرسی جهت تشریح حرکات زمین استفاده می‌شوند. در واقع بزرگ‌ترین نیروهای دینامیکی حاصل در انواع سازه‌های اصلی (یعنی سازه‌های خیلی صلب) رابطه نزدیکی با PHA دارند. در مهندسی زلزله به شتاب‌های قائم توجه کمتری نسبت به شتاب‌های افقی می‌گردد زیرا وزن سازه‌ها در مقابل نیروهای دینامیکی ناشی از شتاب‌های قائم حاشیه اطمینان مناسبی ایجاد می‌کند.

حرکات زمین با شتاب ماکزیمم بالا معمولاً و نه همیشه مخرب‌تر از حرکات با شتاب ماکزیمم پایین‌تر می‌باشد. شتاب‌های ماکزیمم خیلی بزرگ که برای فاصله بسیار کوتاهی از زمان ادامه می‌یابند، خرابی کمتری در انواع مختلف سازه‌ها ایجاد می‌کنند. تا کنون تعداد زیادی زلزله با شتاب ماکزیمم بیش از 0/5 g به وقوع پیوسته، اما خرابی مهمی در سازه‌ها به وجود نیامده است زیرا شتاب ماکزیمم با فرکانس بسیار بزرگ رخ داده و مدت زلزله طولانی نبوده است. اگرچه شتاب ماکزیمم پارامتر بسیار مفیدی است، اما هیچ اطلاعی در خصوص محتوای فرکانس یا مدت حرکت به دست نمی‌دهد؛ لذا جهت ارائه خصوصیات دقیق حرکت زمین به داده‌های بیشتری نیاز است.

2-2-2 محتوای فرکانس

با یک تحلیل ساده می‌توان پی برد که پاسخ دینامیکی اجسام اثر پذیر مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و خاکریزها به فرکانسی که تحت آن بارگذاری شده‌اند، حساس است. زلزله‌ها بارگذاری پیچیده‌ای با مؤلفه‌های حرکت در یک محدوده وسیعی از فرکانس‌ها ایجاد می‌کنند. محتوای فرکانس نحوه توزیع دامنه حرکات زمین را در فرکانس-های مختلف تشریح می‌نماید. محتوای فرکانس تکان زمین را می‌توان با تبدیل متغیر حرکت از حوزه زمان به حوزه فرکانس به وسیله تبدیل فوریه بررسی کرد.

هر تابع پریودیک (یعنی هر تابعی که در فواصل زمانی ثابت عیناً تکرار شود) را می‌توان با بهره گیری از تحلیل فوریه به صورت مجموع یک سری از عبارات هارمونیک ساده با فرکانس، دامنه و فاز مختلف بیان نمود. با استفاده از سری فوریه یک تابع پریودیک $\alpha(t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(\omega_n t + \emptyset n) \qquad (1\text{-}2)$$

در این رابطه $\emptyset_n, C_n$ به ترتیب دامنه فاز و زاویه n امین هارمونی از سری فوریه می‌باشند. تبدیل متناهی فوریه $F(\omega)$ یک شتاب نگاشت $\alpha(t)$ از رابطه زیر به دست می‌آید: