

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٥٨٣١ - ٢٠٢٣٣١٦



دانشکده مهندسی عمران  
گروه آب  
گرایش سازه‌های هیدرولیکی

پایان نامه

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

عنوان

تحلیل پاسخ سیستم اندرکنشی سد - مخزن - فونداسیون  
با استفاده از شرط مرزی لایه کاملاً سازگار (PML)

استاد راهنما

دکتر رضا تارینژاد

استاد مشاور

دکتر محمدعلی لطف‌الهی یقین ۳ ۱۳۸۹/۹/

پژوهشگر

محمدحسین احمدی

شهریور ۸۹

۱۴۵۸۳۱

به پاس تبصیر عظیم و انسانیشان از کله اثار و از خودگذشتگی، به پاس حافظه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است، به پاس قلب های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهاشان به شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که مرکز فروکش می کند این مجموعه را به پروماد عزیزم تقدیم می کنم.

آنان که وجودم برایشان همه نخب بود و وجودشان برایم همه مهر،

توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشاں سپید گشت تا رویم سپید باشد،

آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلاشان و روشنی رویشان سرمایه های جاودانی زندگی من است،

آنان که راستی قائم در شکستی قاتلان تجلی یافت،

در برابر وجود کرامیشان زانوی ادب بر زمین می زخم و بادلی علواز عشق، محبت و خضوع بردستان بوسه می زخم.

تقدیر و شکر:

شکر و سپاس پروردگار عالم را که مرا موفق گردانید تا در عرصه علم و دانش، پله های سعادت و تعالی را طی کنم و در این راه پرفراز و نشیب خالصانه و دلوزانه تاثیر کوچکی داشته باشم، را بر خود واجب می دانم.

از پدر دلوز و مادر مهربانم که صورانه مرا تحمل کرده و اصلی ترین مشوق های من در این راه بودند کمال شکر و قدردانی را دارم.

بهترین سپاس و قدردانی را از برادر و خواهرانم که در این راه همواره در کنارم بودند و در تمامی مشکلات همراهیم کرده اند می نمایم.

بهترین شکر اتم را تقدیم استاد که تقدیرم، آقای دکتر رضائاری نژاد می نمایم که در طول این دوره تحصیلی با صبر و حوصله یاریم نموده و همواره پشتیبان و راه گشایم بودند.

در نهایت از خانم مهندس محمدی و دوستان عزیزم آقایان نیاطلمیان، نبی اله شیری، سید خدیو، حسین ذاکری، افشین وطن خواه،

ناصر پور قربان، محمد مروتی، محمد ایزدی، کورش قهری، سیروس پرآون، جمال شافعی، فرسنگ محنی، مهدی رحمتی، جلال منطری

، سید حسین حسینی، هادی الماسی، محسن امیری، نادر دلشاد و سایر دوستانم که در این راه صمیمانه یاریم کردند شکر نموده و از خداوند

متعال برایشان آرزوی موفقیت و توفیق روز افزون و سلامتی را دارم.

نام خانوادگی: احمدی	نام: محمد حسین
عنوان پایان نامه: تحلیل پاسخ سیستم اندرکنشی سد- مخزن- فونداسیون با استفاده از شرط مرزی لایه کاملاً سازگار (PML)	
استاد راهنما: دکتر رضا تازی نژاد	
استاد مشاور: دکتر محمد علی لطفالهی یقین	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: عمران
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	دانشگاه: تبریز
گرایش: سازه‌های هیدرولیکی	تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۸۹
تعداد صفحات: ۱۶۴	
واژه نامه: اندرکنش سد و مخزن و فونداسیون، شرط مرزی دوردست، لایه کاملاً سازگار (PML)، فشار هیدرودینامیک، تحلیل لرزه‌ای	
<p><b>چکیده:</b> در آنالیز لرزه‌ای سیستم‌های پیچیده‌ای مثل سد و مخزن و فونداسیون معمولاً با محیط‌های نامحدود مواجه هستیم. با توجه به غیر ممکن بودن مدلسازی این نوع محیط‌ها با روش‌های مرسوم عددی معمولاً محیط، به محیطی محدود تبدیل می‌شود و در انتهای قطع شده از محیط اصلی شرط مرزی مناسب بکار گرفته می‌شود. شرایط مرزی متعددی مانند شرط شاران یا سومرفلد وجود دارند که برای این آنالیزها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از جدیدترین شرایط مرزی ارائه شده لایه کاملاً سازگار می‌باشد. این شرط مرزی برای نخستین بار توسط برنگر برای جذب امواج الکترومغناطیس ارائه شد. برنگر معادلات ماکسول را بازنویسی کرد و ضریب جدیدی را برای رسانایی و تفکیک محیط‌ها و زیرمجموعه‌های غیرفیزیکی این محیط جدید ارائه داد. با معادلات جدید بدست آمده و تحت شرایط خاص سازگاری، برنگر ثابت کرد که امواجی که به این محیط وارد می‌شوند، بدون هیچ انعکاسی به محیط جدید وارد شده و به صورت توانی مستهلک می‌شوند. مدت کوتاهی پس از معرفی این شرط بسیاری از محققین تئوری برنگر را برای سایر رشته‌های مهندسی و نظری بسط دادند.</p>	

## ادامه چکیده فارسی

در این پایان‌نامه شرط مرزی *PML* برای مدل‌سازی مرز دور دست مخزن سد استفاده شده است و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از آنالیز با سایر شرایط مرزی مقایسه شده است. برای این منظور نخست کد کامپیوتری به زبان *Matlab* برای تحلیل سیستم‌های سد مخزن و فونداسیون توسعه داده شده است. در این کد، شرط مرزی *PML* به عنوان نوع خاصی از المان در قالب کد المان محدود تعریف شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که مدل‌سازی سیستم سد و مخزن با این شرط مرزی به حجم حافظه کمتر و زمان تحلیل کوتاه‌تر نسبت به شرایط مرزی قبلی نیاز دارد. مطالعات پارامتریک به منظور نحوه استفاده بهینه از شرط مرزی *PML* در سیستم‌های اندرکنشی انجام شده و پیشنهادات مفیدی در خصوص مدل‌سازی بهینه این شرط مرزی ارائه شده است.

عنوان ..... صفحه

### فصل اول : مقدمه و بررسی منابع

- ۱-۱ مقدمه: ..... ۲
- ۲-۱ مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده: ..... ۶
- ۳-۱ تعریف مسأله و بیان سؤالات اصلی تحقیق: ..... ۱۱

### فصل دوم : روش‌های حل سیستم سد و مخزن

- ۱-۲ مفاهیم اندرکنش دینامیکی سد و مخزن: ..... ۱۴
- ۲-۲ معادلات حاکم بر سیستم سد و مخزن: ..... ۱۵
- ۳-۲ روشهای حل معادلات حاکم: ..... ۱۶
- ۱-۳-۲ حل وسترگارد: ..... ۱۷
- ۲-۳-۲ روش جرم افزوده: ..... ۱۹
- ۳-۳-۲ حل چوپرا: ..... ۱۹
- ۴-۲ حل معادلات حاکم بر محیط مخزن به وسیله روش‌های عددی: ..... ۲۱
- ۱-۴-۲ رویکرد لاگرانژی: ..... ۲۱
- ۲-۴-۲ رویکرد اوپلری: ..... ۲۳
- ۵-۲ مروری بر شرایط مرزی تقریبی در سیستم سد و مخزن: ..... ۲۶
- ۱-۵-۲ شرط مرزی کف مخزن: ..... ۲۶
- ۱-۱-۵-۲ شرط ارائه شده توسط چوپرا و هال برای کف مخزن ..... ۲۸
- ۲-۵-۲ مرز بالا دست مخزن: ..... ۳۰

- ۳۰..... شرط وسترگارد: ۱-۲-۵-۲
- ۳۰..... شرط مرزی سومرفلد: ۲-۲-۵-۲
- ۳۲..... شرط شاران: ۳-۲-۵-۲
- ۳۳..... شرط مرزی بین سد و مخزن: ۳-۵-۲
- ۳۴..... شرط مرزی سطح آزاد مخزن: ۴-۵-۲
- ۳۶..... اعمال شرایط مرزی در روشهای عددی: ۶-۲
- ۳۷..... روش المان مرزی: ۱-۶-۲
- ۳۷..... روش المان مرزی مستقیم و غیر مستقیم: ۱-۱-۶-۲
- ۴۰..... مزایای استفاده از روش المان مرزی: ۲-۱-۶-۲
- ۴۲..... معایب روش المان مرزی: ۳-۱-۶-۲
- ۴۳..... روش المان محدود: ۲-۶-۲
- ۴۴..... تحلیل سازه‌ها به روش المان محدود (FEM): ۱-۲-۶-۲
- ۴۶..... روند عمومی روش المان محدود: ۲-۲-۶-۲
- ۴۷..... دستگاه معادلات ماتریسی حرکت دینامیکی سیستم ناپیوسته: ۳-۶-۲
- ۴۷..... دستگاه معادلات دینامیکی محیط سازه: ۱-۳-۶-۲
- ۴۷..... دستگاه معادلات دینامیکی محیط سیال: ۲-۳-۶-۲
- ۵۱..... روش حل معادلات کوپله سیستم: ۳-۳-۶-۲

### فصل سوم : شرط مرزی لایه کاملاً سازگار (PML)

- ۵۶..... شرط مرزی لایه کاملاً سازگار (PML): ۱-۳
- ۵۷..... معادلات اساسی: ۱-۱-۳



- ۲-۳ اعمال *PML* به روش المان محدود: ..... ۶۲
- ۳-۳ استفاده از *PML* برای معادله هلمهولتز با فرضیات ساده‌سازی شده: ..... ۶۳
- ۴-۳ استفاده از *PML* برای محیط نیمه بینهایت زیر یک پی نواری صلب: ..... ۶۷

#### فصل چهارم : کد المان محدود توسعه یافته

- ۱-۴ مقدمه ..... ۷۱
- ۲-۴ آشنایی با محیط *Matlab* : ..... ۷۲
- ۳-۴ معرفی کد نوشته شده و زیربرنامه‌های موجود در آن: ..... ۷۳
- ۴-۴ الگوریتم پیاده‌سازی *PML* : ..... ۷۷

#### فصل پنجم : نتایج و بحث

- ۱-۵ مقدمه: ..... ۸۰
- ۲-۵ مشخصات هندسی سد: ..... ۸۱
- ۳-۵ مشخصات مصالح سد: ..... ۸۲
- ۴-۵ مدل انتخاب شده برای سیستم سد و مخزن: ..... ۸۳
- ۵-۵ تحلیل سد تحت زلزله تفت و مقایسه نتایج: ..... ۸۵
- ۱-۵-۵ صحت سنجی تنش‌ها با نتایج مرجع [۳۵]: ..... ۸۸
- ۶-۵ تحلیل سد تحت زلزله ناغان: ..... ۸۸
- ۶-۵ تحلیل بر اساس زلزله السنترو: ..... ۹۳
- ۷-۵ تحلیل سد با استفاده از شرط مرزی *PML* : ..... ۹۷
- ۱-۷-۵ نتایج حاصل از تحلیل سد با استفاده از *PML* تحت زلزله ناغان: ..... ۹۹

۵-۷-۲ نتایج حاصل از تحلیل سد با استفاده از *PML* تحت زلزله السنترو:..... ۱۰۲

### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه:..... ۱۱۴

۶-۲ نتایج حاصل از پژوهش حاضر:..... ۱۱۵

۶-۳ پیشنهادات برای پژوهش‌های بعدی:..... ۱۱۶

منابع و مراجع:..... ۱۱۸

کد تهیه شده برای تحلیل‌های انجام گرفته:..... ۱۲۳

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) سد سنت فرانسیس قبل و بعد از خرابی ..... ۲
- شکل (۲-۱) سد کوینا و سد سفیدرود ..... ۳
- شکل (۱-۲) روشهای تحلیل مسائل عمومی ..... ۴۵
- شکل (۲-۲) مدل سد و شروط مرزی ..... ۵۰
- شکل (۳-۲) فلوجارت حل معادلات سد و مخزن ..... ۵۴
- شکل (۱-۳) نمای کلی *PML* ..... ۵۶
- شکل (۲-۳) مستهلک شدن امواج در لایه *PML* ..... ۵۹
- شکل (۳-۳) محیط اصلی همراه با محیط *PML* اضافه شده ..... ۶۳
- شکل (۴-۳) قسمت حقیقی و مجازی حل برای  $\theta = \frac{3\pi}{8}$  ..... ۶۶
- شکل (۵-۳) ضریب انعکاس برای توابع کاهنده و ضخامت‌های مختلف ..... ۶۶
- شکل (۶-۳) پی صلب بر روی محیط الاستیک نیمه بینهایت ..... ۶۷
- شکل (۷-۳) مدلسازی المان محدود زیر پی و *PML* ..... ۶۷
- شکل (۸-۳) مدل پی به همراه توابع کاهنده اعمالی ..... ۶۸
- شکل (۹-۳) مقایسه نتایج حاصل از *PML* با حل دقیق و روش دثپات برای پی صلب [۳۱] ..... ۶۹
- شکل (۱-۴) صفحه اصلی *Matlab* ..... ۷۲
- شکل (۱-۵) سد پایین فلت ..... ۸۲
- شکل (۲-۵) مدل سد پایین فلت ..... ۸۳
- شکل (۳-۵) رکورد زلزله السنترو ..... ۸۳
- شکل (۴-۵) رکورد زلزله ناغان ..... ۸۴

- شکل (۵-۵) رکورد زلزله تفت..... ۸۴
- شکل (۶-۵) مقایسه تغییرمکان افقی تاج سد با نتایج دکتر احمدی..... ۸۶
- شکل (۷-۵) مقایسه تغییرمکان افقی تاج سد با نتایج دکتر قائمیان..... ۸۶
- شکل (۸-۵) مقایسه تنش برشی: نمودار سمت راست نتایج مرجع [۳۵]، سمت چپ نتایج کد نوشته شده..... ۸۷
- شکل (۹-۵) مقایسه تنش افقی: نمودار سمت چپ نتایج مرجع [۳۵]، سمت راست نتایج کد نوشته شده..... ۸۷
- شکل (۱۰-۵) مقایسه تنش قائم: نمودار سمت چپ نتایج مرجع [۳۵]، سمت راست نتایج کد نوشته شده..... ۸۸
- شکل (۱۱-۵) مقایسه تنش برشی بدون در نظر گرفتن اندرکنش: نمودار سمت راست نتایج مرجع [۳۵]، سمت چپ نتایج کد نوشته شده..... ۸۸
- شکل (۱۲-۵) مقایسه تنش قائم بدون در نظر گرفتن اندرکنش: نمودار سمت راست نتایج مرجع [۳۵]، سمت چپ نتایج کد نوشته شده..... ۸۹
- شکل (۱۳-۵) مقایسه تنش افقی بدون در نظر گرفتن اندرکنش: نمودار سمت راست نتایج مرجع [۳۵]، سمت چپ نتایج کد نوشته شده..... ۸۹
- شکل (۱۴-۵) تغییرمکان افقی تاج سد تحت زلزله ناغان با در نظر گرفتن اندرکنش..... ۹۰
- شکل (۱۵-۵) تغییرمکان افقی تاج سد تحت زلزله ناغان بدون اندرکنش..... ۹۰
- شکل (۱۶-۵) تغییرمکان عمودی تاج سد تحت زلزله ناغان..... ۹۱
- شکل (۱۷-۵) تغییرمکان افقی پاشنه سد تحت زلزله ناغان..... ۹۱
- شکل (۱۸-۵) فشار هیدرودینامیک در وجه سد، تحت زلزله ناغان..... ۹۲
- شکل (۱۹-۵) فشار هیدرودینامیک در بالادست مخزن تحت زلزله ناغان..... ۹۲

- شکل (۲۰-۵) تغییر مکان افقی تاج سد تحت زلزله سنترو..... ۹۴
- شکل (۲۱-۵) تغییر مکان افقی تاج سد تحت زلزله سنترو بدون در نظر گرفتن اندرکنش..... ۹۴
- شکل (۲۲-۵) تغییر مکان عمودی تاج سد تحت زلزله سنترو..... ۹۵
- شکل (۲۳-۵) تغییر مکان افقی پاشنه سد تحت زلزله سنترو..... ۹۵
- شکل (۲۴-۵) فشار هیدرودینامیک در وجه سد تحت زلزله سنترو..... ۹۶
- شکل (۲۵-۵) فشار هیدرودینامیک در بالادست سد تحت زلزله سنترو..... ۹۶
- شکل (۲۶-۵) مدلسازی سد و مخزن با *PML*..... ۹۹
- شکل (۲۷-۵) تغییر مکان افقی تاج سد تحت زلزله ناغان، *PML*..... ۱۰۰
- شکل (۲۸-۵) تغییر مکان عمودی تاج سد تحت زلزله ناغان، *PML*..... ۱۰۰
- شکل (۲۹-۵) تغییر مکان افقی پاشنه سد تحت زلزله ناغان، *PML*..... ۱۰۰
- شکل (۳۰-۵) مقایسه تغییر مکان افقی تاج سد حاصل از *PML* و شرط شاران..... ۱۰۱
- شکل (۳۱-۵) مقایسه تغییر مکان عمودی تاج سد حاصل از *PML* و شرط شاران..... ۱۰۱
- شکل (۳۲-۵) مقایسه تغییر مکان افقی پاشنه سد حاصل از *PML* و شرط شاران..... ۱۰۲
- شکل (۳۳-۵) تغییر شکل افقی تاج سد با شرط *PML*..... ۱۰۲
- شکل (۳۴-۵) تغییر شکل عمودی تاج سد با شرط *PML*..... ۱۰۳
- شکل (۳۵-۵) تغییر شکل افقی پاشنه سد با شرط *PML*..... ۱۰۳
- شکل (۳۶-۵) مقایسه تغییر شکل افقی تاج سد با شرط *PML* و شرط شاران..... ۱۰۳
- شکل (۳۷-۵) مقایسه تغییر شکل عمودی تاج سد با شرط *PML* و شرط شاران..... ۱۰۴
- شکل (۳۸-۵) مقایسه تغییر شکل افقی پاشنه سد با شرط *PML* و شرط شاران..... ۱۰۴
- شکل (۳۹-۵) مقایسه تنش برشی: نمودار سمت راست نتایج با شرط شاران، سمت چپ نتایج با *PML*..... ۱۰۵

- شکل (۴۰-۵) مقایسه تنش افقی: نمودار سمت راست نتایج با شرط شاران، سمت چپ نتایج با *PML*  
 ۱۰۵.....
- شکل (۴۱-۵) مقایسه تنش قائم: نمودار سمت راست نتایج با شرط شاران، سمت چپ نتایج با *PML*  
 ۱۰۶.....
- شکل (۴۲-۵) نمودار ستونی تغییر مکان برای زلزله ناغان.....  
 ۱۰۷.....
- شکل (۴۳-۵) نمودار ستونی تغییر مکان برای زلزله السنترو.....  
 ۱۰۸.....
- شکل (۴۴-۵) قسمت حقیقی فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۰۹.....
- شکل (۴۵-۵) قسمت مجازی فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۰۹.....
- شکل (۴۶-۵) فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۱۰.....
- شکل (۴۷-۵) فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۱۰.....
- شکل (۴۸-۵) مقایسه ماکزیمم فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۱۱.....
- شکل (۴۹-۵) مقایسه ماکزیمم فشار هیدرودینامیک در مرز دوردست.....  
 ۱۱۱.....

- جدول (۱-۵) مشخصات هندسی سد پایین فلت ..... ۸۱
- جدول (۲-۵) مشخصات مصالح سد ..... ۸۲
- جدول (۳-۵) مقایسه حداکثر تغییر مکان در تحلیل استاتیکی و دینامیکی ..... ۹۳
- جدول (۴-۵) تحلیل پارامتری *PML* ..... ۹۸
- جدول (۵-۵) درصد خطا برای تحلیل با پارامترهای مختلف *PML* ..... ۹۹
- جدول (۶-۵) مقایسه ماکزیمم تنش‌ها برای شروط *PML* و *Sharan* تحت زلزله السنترو ..... ۱۰۷
- جدول (۷-۵) مقایسه ماکزیمم تغییر مکان‌ها برای *PML* و *Sharan* تحت زلزله ناغان ..... ۱۰۷
- جدول (۸-۵) مقایسه ماکزیمم تغییر مکان‌ها برای *PML* و *Sharan* تحت زلزله السنترو ..... ۱۰۸
- جدول (۹-۵) مقایسه پارامترهای تحلیل *PML* با شاران ..... ۱۱۲

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع



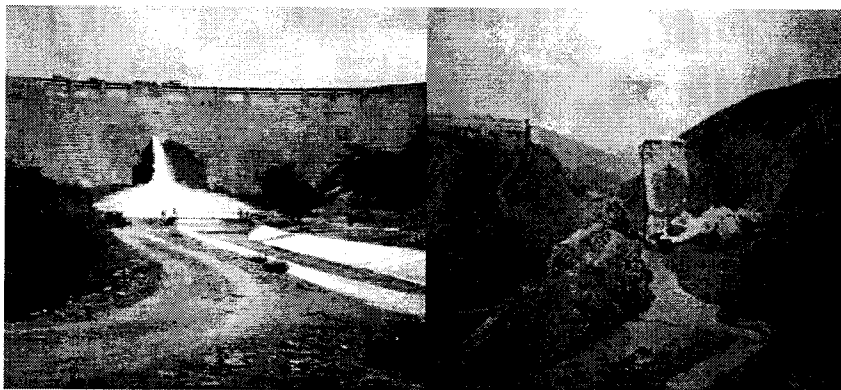
## ۱-۱ مقدمه:

مسأله ایمنی سدهای بتنی در برابر زلزله در سال‌های اخیر مورد توجه روز افزونی قرار گرفته و به عنوان عاملی عمده در طراحی سدهای جدید و برآورد ایمنی سدهای موجود در نواحی زلزله‌خیز مطرح شده است. افزایش اهمیت این موضوع عمدتاً به دو دلیل بوده است:

۱. خطرات ناشی از آسیب دیدگی سد به سبب افزایش جمعیت ساکن در نواحی پایین دست اکثر سدها همواره در حال افزایش است.

۲. با بروز زلزله‌های متعدد در نواحی مختلف جهان و افزایش میزان آگاهی در مورد طبیعت پیچیده حرکات زمین لرزه، تدابیر ایمنی اندیشیده شده در گذشته ناکافی به نظر می‌رسند و ضرورت انجام تحقیقات مداوم در این زمینه احساس می‌شود.

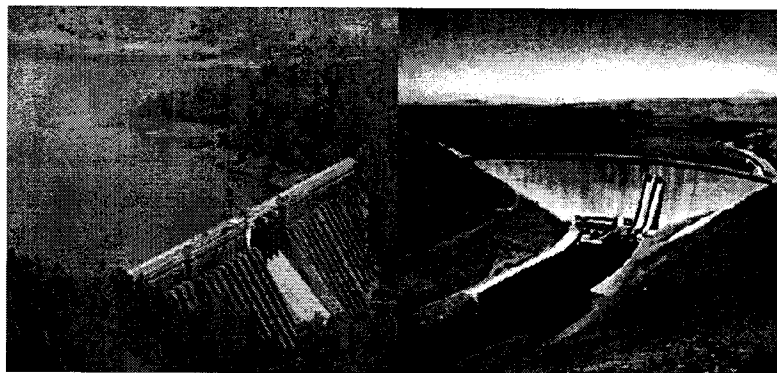
از سال ۱۹۲۸ و به دنبال شکست سد سنت فرانسیس<sup>۱</sup> در کالیفرنیا، مشکلات خرابی سدهای بزرگ توجه بسیاری را به خود جلب نمود و زمینه ساز انجام تحقیقاتی گسترده در این زمینه شد.



شکل (۱-۱) سد سنت فرانسیس قبل و بعد از خرابی

<sup>۱</sup> Saint Francis

بررسی حوادث متعددی که از آن زمان تاکنون برای انواع مختلف سدها در بسیاری از نقاط جهان رخ داده اهمیت این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. در این زمینه می‌توان به دو سد بتنی هسین فنگ کیانگ<sup>۱</sup> در چین و کوینا<sup>۲</sup> در هند اشاره نمود که در دهه ۱۹۶۰ در اثر زلزله، آسیب‌های جدی به آنها وارد گردید. نمونه دیگر سد سفیدرود است که در زلزله سال ۱۳۶۹ دچار آسیب دیدگی شد.



شکل (۱-۲) سد کوینا و سد سفیدرود

البته آمار موجود در این زمینه نشان می‌دهد که تا کنون هیچ سد بتنی در اثر زلزله دچار شکست کامل نشده است، در حقیقت تا به حال تنها دلیل تخریب سدهای بتنی شکستگی در پی آنها بوده است. با این حال این تاریخچه نسبتاً خوب به هیچ وجه از اهمیت مسأله ایمنی سدهای بتنی در برابر زلزله نمی‌کاهد زیرا تاکنون هیچ سدی در برابر شدیدترین زلزله محتمل در حالت مخزن پر قرار نگرفته است.

در تلاش‌های اولیه برای تأثیر زلزله، سدها به صورت صلب و بر روی یک بستر صلب در نظر گرفته می‌شدند. به این ترتیب نیروی مؤثر بر هر بخش سازه از حاصلضرب شتاب زلزله در جرم آن بخش بدست می‌آمد. بسیاری از سدهای بتنی وزنی موجود با استفاده از همین روش‌های ساده،

<sup>1</sup> Hsin Feng Kuang

<sup>2</sup> Koyuna Dam

طراحی و تحلیل شده‌اند. در این روش‌ها نیروی زلزله به سادگی با نیروهای استاتیک جایگزین شده و با فشارهای هیدرواستاتیک و بارهای ثقلی ترکیب می‌شود. این روش‌های سنتی طراحی ایجاب می‌کنند که یک ضریب اطمینان قابل توجه در برابر واژگونی، لغزش و افزایش تنش (تحت تمام حالات بارگذاری محتمل) مورد نظر قرار گرفته و تنش‌های فشاری کمتر از مقادیر مجاز باشند. تنش‌های کششی اغلب مجاز نیستند و حتی اگر وجود داشته باشند، احتمال ترک خوردگی بتن به صورت جدی مدنظر قرار نمی‌گیرد. در این روش‌ها معمولاً باور بر این است که تنش عامل تعیین کننده‌ای در طراحی سدهای بتنی وزنی نیست و بیشتر بر ارضای معیارهای پایداری واژگونی و لغزش تأکید می‌شود.

از اواخر دهه ۱۹۶۰ با بکارگیری روش المان محدود<sup>۱</sup>، پیشرفت در روش‌های تحلیل دینامیک، و دستیابی به کامپیوترهای سریع و پرحافظه، روش تحلیل پاسخ سدها به زلزله دستخوش تغییرات سریعی شد. از این دوره خواص ارتجاعی و همچنین جرم مصالح سد در مدل‌های ریاضی در نظر گرفته شد و مشخص گردید که خصوصیات ارتعاشی سد (فرکانس و شکل مودها) در پاسخ سد به زلزله نقشی تعیین کننده دارند.

از سوی دیگر، آنچه که تحلیل پاسخ سدهای بتنی به زلزله را از مسائل معمولی دینامیک سازه‌ها پیچیده‌تر می‌سازد، اندرکنش سازه سد با محیط اطرافش در هنگام زلزله است: اندرکنش سازه با آب موجود در مخزن و همچنین اندرکنش آن با پی سنگی انعطاف پذیر.

در روش‌های ابتدایی برای در نظر گرفتن اثر مخزن بر سدهای بتنی در هنگام زلزله، آب به صورت تراکم ناپذیر فرض می‌شد. نشان داده شده است که اثر آب در این حالت برابر با جرمی افزوده بر بدنه سد می‌باشد که همفاز با سد به نوسان در می‌آید. تحقیقات بعدی نشان دادند که برای قابل

---

<sup>۱</sup>Finite Element

قبول بودن این فرض باید نسبت فرکانس طبیعی مخزن به فرکانس طبیعی سد به حد کافی بزرگ باشد (در مورد سدهای وزنی بزرگتر از ۲). اما چنین شرطی معمولاً در سدهای بتنی صادق نمی‌باشد، از اینرو امروزه تراکم پذیری آب را عاملی با اهمیت در تعیین پاسخ زلزله برای اکثر سدهای بتنی در نظر می‌گیرند. در نتیجه برای در نظر گرفتن تأثیر امواج هیدرودینامیک بر پاسخ سد به زلزله باید بطور همزمان مخزن را نیز مدل کرد.

امروزه به دلیل قابلیت روش اجزاء محدود در تعریف مدل‌های ریاضی با اشکال هندسی پیچیده و مصالح مختلف، در مدلسازی سدهای بتنی معمولاً از این روش استفاده می‌شود. روش اجزاء محدود برای حل معادلات مخزن می‌تواند هماهنگی مناسبی بین روش‌های حل معادلات سد و مخزن پدید آورده و به میزان زیادی از پیچیدگی مسئله بکاهد، اما مدل کردن مخازن بزرگ و نامحدود با این روش با دشواری‌هایی همراه است. از آنجا که گنجاندن کل مخزن در مدل کاری پر هزینه و غیر عملی است، ناگزیر باید مدل را در فاصله مناسبی از بدنه سد قطع نمود. در هنگام زلزله، امواج فشاری ایجاد شده در آب به سمت بالادست مخزن منتشر شده و همراه با خود انرژی را از محیط دور می‌کنند، اما در مدل اجزاء محدود، این مرز قطع شده در حالت عادی با جلوگیری از انتشار امواج، موجب انعکاس آنها به داخل محیط می‌شود. در نتیجه باید با اعمال یک شرط مرزی انتشاری مناسب در این ناحیه، مدل عددی را هرچه بیشتر به شرایط واقعی مسأله نزدیک نمود.

اندرکنش<sup>۱</sup> سد با بستر سنگی انعطاف پذیر نیز وضعیت کم و بیش مشابهی دارد، در این حالت امواج تنشی که در اثر زلزله در پی بوجود می‌آیند به سوی محیط نامحدود منتشر شده و انرژی را با خود دور می‌کنند. مشکل اصلی در اینجا نیز مدل کردن بخش محدودی از پی است به گونه‌ای که شرایط واقعی مسأله را به وجود آورد.

<sup>۱</sup> Interaction