

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



بسمه تعالی



## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشنا

آقای سید ژيان حسینی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی حساسیت ها و راهکارهای کاهش خسارت لرزه ای در طرح سدهای بتنی پشتبنددار در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی پیشنهاد می کنند.

اعضا	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استاد	دکتر محمد تقی احمدی	استاد راهنما
	دانشیار	دکتر مهدی شفیعی فر	استاد ناظر
	استادیار	دکتر محمد حیدرزاده	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر محسن قائمیان	استاد ناظر
	استادیار	دکتر محمد حیدرزاده	مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)



### آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمدتقی احمدی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.


ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

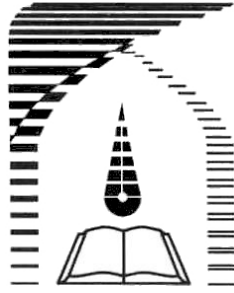
ماده ۶: اینجانب سید ژيان حسینی دانشجوی رشته مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: سید ژيان حسینی

تاریخ و امضا:



۹۰،۱۲،۲۲



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران – سازه‌های هیدرولیکی

بررسی حساسیت‌ها و راهکارهای کاهش خسارت لرزه‌ای در طرح سدهای بتنی پشتبنددار

سید ژيان حسینی

استاد راهنما

دکتر محمدتقی احمدی

زمستان ۱۳۹۰

**تقدیم به**

**مادره: عزیزترینم**

و

روح پدر بزرگوارم، که هرچند سالهاست در میان ما  
نیست اما یادش برای همیشه با من خواهد بود ...

و

**برادر عزیز و خواهران مهربانم**

**به پاس محبت‌ها، کمک‌ها، راهنمایی‌ها و**

**گذشت‌هایشان**



## چکیده

سدهای بتنی پشتبنددار همانند دیگر سازه‌ها، در معرض آسیب‌های احتمالی ناشی از زلزله هستند و تا کنون تعدادی از آنها از جمله سدهای سفیدرود در ایران، هسینفنگ کیانگ در چین و هونیکه در ژاپن، در اثر زلزله‌های رخ داده، متحمل خسارت‌هایی شده‌اند. پس از بروز حوادث ذکر شده، تحقیقاتی در مورد آنها صورت گرفته که در آنها به ذکر خسارات حاصل، اکتفا شده و مسئله‌ی بررسی رفتار لرزه‌ای و سنجش حساسیت این سدها نسبت به عوامل مختلف، مورد توجه قرار نگرفته است. در این پایان‌نامه برای بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی پشتبنددار، بلندترین پایه‌ی سد بتنی پشتبنددار سفیدرود بصورت سه‌بعدی ولی با صرفنظر کردن از اثر زلزله‌ی عرضی در دره‌ی ساختگاه سد و صرفاً تحت زلزله‌های طولی و قائم تحلیل شده است. پی بصورت بدون جرم مدل شده و اندرکنش سد با پی و مخزن در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی جذب امواج هیدرودینامیک در کف و انتهای مخزن لحاظ و شتاب‌نگاشت‌های اعمالی به سازه با توجه به شرایط ساختگاه سد سفیدرود مقیاس شده‌اند. برای تعیین شرایط اولیه‌ی قبل از وقوع زلزله، یک سری تحلیل‌های استاتیکی تفصیلی تحت بارهای وزن، فشار هیدرواستاتیک، فشار برکنش و حرارت محیطی انجام شده است؛ سپس بارگذاری دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی ناشی از زلزله‌ی طولی و قائم در دره‌ی ساختگاه سد صورت گرفته و رفتار غیرخطی سد در برابر عوامل مختلف، نظیر سناریوهای مختلف بارگذاری لرزه‌ای، مشخصات مصالح بدنه‌ی سد و پی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که چهار منطقه از بدنه‌ی سد شامل محل تغییر شیب بدنه در پایاب، و محل‌های پاشنه، پنجه و لبه‌ی پشتبند، مناطق حساس و آسیب‌پذیر سد می‌باشند. تنش‌های فشاری (با حداکثر مقدار در محدوده‌ی پنجه) در بدنه‌ی سد معمولاً بسیار کمتر از مقاومت فشاری بتن خواهند بود و در نتیجه احتمال شکست فشاری تقریباً منتفی است اما در مورد تنش‌های کششی (با حداکثر مقدار در محدوده‌ی پاشنه) و تنش‌های برشی (با حداکثر مقدار در محدوده‌ی پنجه) وضعیت متفاوتی حاکم است و احتمال آسیب سد تحت آن تنش‌ها در این مناطق وجود دارد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان گفت که احداث سدهای بتنی پشتبنددار در شرایطی که مدول نرمی خیلی کم است، در ساختگاه‌های لرزه‌خیز، شکست موضعی در محل تغییر شیب پایاب، پاشنه و پنجه‌ی سد ایجاد می‌کند و در چنین شرایطی، انتخاب سد بتنی پشتبنددار گزینه‌ی مناسبی نیست. همچنین خسارت برشی در سطح تماس سد و پی به رکورد زلزله‌ی اعمالی وابستگی زیادی دارد و افزایش مدول نرمی باعث کاهش آن می‌گردد ولی مقاومت فشاری بتن، اثر چندانی در این مورد ندارد. در اثر تغییر نسبتاً کوچک ایجاد شده در هندسه‌ی پایه‌ی سد سفیدرود؛ با گرد کردن ناپیوستگی ناگهانی در محل تغییر شیب پایاب، تنش‌ها غالباً با کاهش قابل توجه مقدار مواجه می‌شوند و در بیشتر حالات، تمرکز تنش‌های فشاری و برشی از محدوده‌ی کوچکی در اطراف پنجه‌ی سد بصورت توزیع گسترده‌تر تنش بر روی پشتبند تغییر پیدا می‌کند.

**کلید واژه:** سد بتنی پشتبنددار، تحلیل دینامیکی غیرخطی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، سد سفیدرود



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علایم و نشانه‌ها.....	د.....
فهرست جدول‌ها.....	ز.....
فهرست شکل‌ها.....	ح.....
<b>فصل ۱- مقدمه</b> .....	۱.....
۱-۱- تعریف مسئله، ضرورت، اهداف و سؤالات تحقیق.....	۱.....
۱-۲- فرضیات.....	۱.....
۱-۳- مواد و روش انجام تحقیق.....	۱.....
۱-۴- نوآوری.....	۲.....
۱-۵- ساختار پایان‌نامه.....	۲.....
<b>فصل ۲- سدهای پشتبنددار، تاریخچه، رفتار و حوادث تجربه شده</b> .....	۴.....
۱-۲- تاریخچه‌ی سدهای پشتبنددار.....	۴.....
۱-۱-۲- سدهای پشتبنددار با دال تخت.....	۵.....
۲-۱-۲- پشتبندهای پیوسته.....	۶.....
۲-۲- انواع سدهای پشتبنددار و اجزای آنها.....	۸.....
۳-۲- سدهای پشتبنددار ایران.....	۱۰.....
۴-۲- حوادث سدهای پشتبنددار.....	۱۲.....
۱-۴-۲- انواع شکست و حوادث در سدهای پشتبنددار.....	۱۲.....
۲-۴-۲- نمونه‌های شکست و حوادث در سدهای پشتبنددار و چندقوسی.....	۱۲.....
۱-۲-۴-۲- سد Olef.....	۱۲.....
۲-۲-۴-۲- سد Gleno.....	۱۳.....
۳-۲-۴-۲- سد Honenike.....	۱۴.....
۴-۲-۴-۲- سد Komoro.....	۱۴.....
۵-۲-۴-۲- سد Vega De Tera.....	۱۵.....
۶-۲-۴-۲- سد Ljusne.....	۱۶.....
۷-۲-۴-۲- سد Selsfors.....	۱۷.....
۸-۲-۴-۲- سد Ashley یا Pittsfield.....	۱۷.....
۹-۲-۴-۲- سد Ayers Island.....	۱۸.....
۱۰-۲-۴-۲- سد Elwha یا Olympic Power Company.....	۱۸.....
۱۱-۲-۴-۲- سد Los Verjels.....	۱۹.....
۱۲-۲-۴-۲- سد Mountain Dell.....	۱۹.....
۱۳-۲-۴-۲- سد Overholser.....	۲۰.....

۲۰	..... Stony River سد ۱۴-۲-۴-۲
۲۰	..... Waddell سد ۱۵-۲-۴-۲
۲۱	..... آمار کلی حوادث سدهای بتنی در ایالات متحدهی امریکا ۳-۴-۲
۲۲	..... رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی و پشتبنددار ۵-۲
۲۲	..... ترک خوردگی در سدهای بتنی ۶-۲
۲۴	..... ترک خوردگی، علل شکل‌گیری و انواع آن ۱-۶-۲
۲۵	..... جمع‌بندی ۷-۲
<b>۲۶</b>	<b>فصل ۳- سوابق مطالعاتی در مورد سدهای پشتبنددار ۳-۲-۳</b>
۲۶	..... مطالعه‌ی ترک‌های حرارتی در سدهای پشتبنددار ۱-۳
۳۵	..... بررسی ترک‌خوردگی سدهای وزنی پشتبنددار توخالی ۲-۳
۳۹	..... بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای پشتبنددار ۳-۳
۳۹	..... مطالعات انجام شده در مورد سد سفیدرود پس از وقوع زلزله‌ی ۲۱ ژوئن ۱۹۹۰ منجیل ۱-۳-۳
۳۹	..... معرفی سد سفیدرود و شرایط بوجود آمده در اثر زلزله‌ی ۲۱ ژوئن ۱۹۹۰ منجیل ۱-۱-۳-۳
۴۴	..... مطالعات صورت گرفته برای بررسی ترک‌خوردگی سد سفیدرود پس از زلزله ۲-۱-۳-۳
۵۰	..... ترمیم سد سفیدرود، پس از زلزله و مدل‌سازی‌های انجام شده بر اساس آن ۳-۱-۳-۳
۵۴	..... سد Hsinfengkiang و شرایط آن پس از وقوع زلزله‌ی ۱۹ مارس ۱۹۶۲ ۲-۳-۳
۵۸	..... جمع‌بندی ۴-۳
<b>۶۰</b>	<b>فصل ۴- مدل‌سازی، روابط حاکم و صحت‌سنجی ۴-۲-۴</b>
۶۰	..... مدل‌سازی عددی ۱-۴
۶۰	..... استفاده از روش‌های صریح و ضمنی در مدل‌سازی عددی ۱-۱-۴
۶۱	..... جزئیات مدل‌سازی سیستم سد-مخزن-پی ۲-۱-۴
۶۳	..... مدل هندسی و المان‌های بکار رفته در شبکه‌بندی ۲-۴
۶۷	..... ایجاد سطح تماس بین سد و پی ۳-۴
۶۸	..... مدل اصطکاکی در سطح تماس ۱-۳-۴
۶۹	..... مشخصات سطح تماس ۲-۳-۴
۷۰	..... تحلیل حرارتی به منظور تعیین نحوه‌ی توزیع حرارت در بدنه‌ی سد ۴-۴
۷۲	..... روابط حاکم در تحلیل حرارتی ۱-۴-۴
۷۶	..... تحلیل مقادیر ویژه ۵-۴
۸۰	..... رفتار دینامیکی سیستم‌های سد و مخزن ۶-۴
۸۱	..... شرایط مرزی محیط سیال ۷-۴
۸۱	..... شرط مرزی بالادست مخزن (S1) ۱-۷-۴
۸۳	..... شرط مرزی کف مخزن (S2) ۲-۷-۴
۸۵	..... شرط مرزی سطح آزاد مخزن (S3) ۳-۷-۴
۸۶	..... شرط مرزی اندرکنش سد و مخزن (S4) ۴-۷-۴

۸-۴	صحت‌سنجی مدل مورد استفاده.....	۸۶
۹-۴	جمع‌بندی.....	۸۹
<b>فصل ۵</b>	<b>حساسیت‌سنجی و تحلیل پارامتریک.....</b>	<b>۹۰</b>
۱-۵	مقدمه و کلیات.....	۹۰
۲-۵	تاریخچه‌ی پاسخ کمیت‌های مختلف.....	۱۰۰
۳-۵	بررسی نتایج تحلیل‌های ذکرشده و بحث در مورد آنها.....	۱۰۹
۱-۳-۵	تنش کششی در محل تغییر شیب پایین‌دست.....	۱۱۰
۲-۳-۵	تنش کششی در پاشنه‌ی سد.....	۱۱۱
۳-۳-۵	تنش کششی در پنجه‌ی سد.....	۱۱۲
۴-۳-۵	تنش فشاری در پنجه‌ی سد.....	۱۱۴
۵-۳-۵	خلاصه‌ی نتایج مربوط به مقادیر DCR.....	۱۱۵
۶-۳-۵	تنش‌های برشی در بدنه‌ی سد.....	۱۱۶
۷-۳-۵	بررسی معیار شکست دراگر-پراگر در بدنه‌ی سد.....	۱۱۷
۸-۳-۵	پایداری در مقابل لغزش و بحث در مورد پارامتر ایمنی برشی F.....	۱۲۳
۹-۳-۵	تنش نرمال در سطح تماس سد و پی.....	۱۲۴
۱۰-۳-۵	نتیجه‌ی کلی حاصل از تحلیل نتایج در مورد پارامترهای DCR و F.....	۱۲۶
۴-۵	کرنش‌های حداکثر در بدنه‌ی سد.....	۱۲۶
۵-۵	توزیع فشار هیدرواستاتیکی و فشار هیدرودینامیکی روی وجه بالادست سد.....	۱۲۷
۶-۵	تغییر جزئی در هندسه‌ی سد؛ گرد کردن محل تغییر شیب پایین‌دست.....	۱۲۸
<b>فصل ۶</b>	<b>نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....</b>	<b>۱۳۰</b>
۱-۶	نتایج.....	۱۳۰
۲-۶	پیشنهادات.....	۱۳۲
۱۳۳	فهرست مراجع.....	۱۳۳
۱۳۵	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی.....	۱۳۵
۱۳۸	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی.....	۱۳۸

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ماتریس سختی	K
ماتریس میرایی	C
ماتریس جرم	M
نیروی دینامیکی	f(t)
جابجایی نسبی	a
سرعت	$\dot{a}$
شتاب	$\ddot{a}$
گام زمانی در تحلیل دینامیکی	$\Delta t$
پریود نوسان مود nام	$T_n$
کوچکترین طول موج حاصل از امواج فشار هیدرودینامیک	$\lambda_{min}$
بیشترین فرکانس امواج حامل عمده انرژی زلزله	$\overline{\omega}_u$
سرعت انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط سیال	$V_S$
تنش اصطکاکی حدی	$\tau_{lim}$
ضریب اصطکاک در سطح تماس سد و پی	$\mu_c$
فشار نرمال در سطح تماس سد و پی	$P_n$
چسبندگی در سطح تماس سد و پی	b
تنش برشی در سطح تماس سد و پی	$\tau$
پارامتر ایمنی برشی در سطح تماس سد و پی	F
میانگین سالیانه‌ی دمای هوا	$T_{1a}$
میانگین دمای هوا در سردترین ماه‌های سال	$T_{a,min}$
میانگین دمای هوا در گرمترین ماه‌های سال	$T_{a,max}$
دامنه‌ی تغییرات سالیانه‌ی دمای هوا	$T_{2a}$
دمای هوا	$T_a$
دوره‌ی تناوب تغییرات دما (یک سال)	$t_n$
تراز آب در مخزن (از کف مخزن)	Z
عمق مخزن	H
عمق آب عمیق	$H - H_1$
دمای آب عمیق	$T_{w0}$
دمای میانگین سالیانه‌ی سطح آب	$T_{lw1}$

$T_{1w}$	میانگین سالیانه‌ی دمای آب در عمقی کمتر از عمق آب عمیق در مخزن
$T_{w1,min}$	میانگین دمای آب در سردترین ماه‌های سال
$T_{w1,max}$	میانگین دمای آب در گرمترین ماه‌های سال
$T_{2w1}$	دامنه‌ی تغییرات دمای سطح آب
$T_{2w}$	دامنه‌ی تغییرات دمای آب مخزن نسبت به میانگین سالیانه در عمق کمتر از عمق آب عمیق
$T_w$	دمای آب
$a_0$	ضریب ماتریس جرم در میرایی رایلی
$a_1$	ضریب ماتریس سختی در میرایی رایلی
$\xi_n$	نسبت میرایی مود nام
$\omega_n$	فرکانس زاویه‌ای مود nام
$f_i$	فرکانس طبیعی مود iام
$\theta_r$	نسبت فرکانس طبیعی مخزن به فرکانس زاویه‌ای مود اول سد
$\omega_1^r$	فرکانس طبیعی مخزن
$\omega_1^s$	فرکانس زاویه‌ای مود اول سد
$T_1$	پریود طبیعی (مود اول) سد
p	فشار هیدرودینامیک
x	فاصله از سد
f	تابع شکل موج
m	پارامتر نوع موج
t	زمان
$\varepsilon$	نسبت دامنه‌ی موج پس‌رو به دامنه‌ی موج پیش‌رو (ضریب بازتاب موج از مرز)
$\beta$	ضریب انکسار موج در کف مخزن
$\rho$	جرم حجمی
$\rho v$	امپدانس آکوستیکی
v	سرعت انتشار موج در محیط
$\mu$	آدمیتانس مرزی
q	نوعی ضریب میرایی
$\ddot{u}_{gn}$	شتاب زمین در جهت عمود بر کف مخزن
g	شتاب ثقل
$a_{ns}$	شتاب وجه بالادست سد در جهت عمود بر سطح سد
n	بردار عمود بر سطح سد
$v_u$	بردار سرعت سیال در محل تماس با وجه بالادست سد
$f_c'$	مقاومت فشاری بتن

$f'_t$	مقاومت کششی بتن
$E_c$	مدول ارتجاعی بتن
$\gamma$	وزن مخصوص بتن
$\varphi$	زاویه اصطکاک داخلی بتن
$c$	چسبندگی بتن
$E_r$	مدول ارتجاعی سنگ پی
$\sigma_{ij}$	تانسور تنش
$I_1$	نامتغیر اول تانسور تنش
$I_2$	نامتغیر دوم تانسور تنش
$I_3$	نامتغیر سوم تانسور تنش
$\sigma_m$	تنش متوسط
$\delta_{ij}$	دلتای کرونیکر
$s_{ij}$	تانسور تنش انحرافی
$J_1$	نامتغیر اول تانسور تنش انحرافی
$J_2$	نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی
$J_3$	نامتغیر سوم تانسور تنش انحرافی
$f(I_1, J_2)$	معیار شکست دراکر-پراگر
$y$	عمق آب از سطح مخزن

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۱.....	جدول ۱-۲: آمار کلی حوادث سدهای بتنی در ایالات متحده‌ی امریکا.....
۲۱.....	جدول ۲-۲: سدهای بتنی پشتبنددار حادثه‌دیده در ایالات متحده‌ی امریکا.....
۳۲.....	جدول ۱-۳: مشخصات سد لتیان و مخزن آن.....
۳۵.....	جدول ۲-۳: خلاصه‌ای از سدهای وزنی پشتبنددار توخالی در ایتالیا.....
۵۱.....	جدول ۳-۳: مراحل توصیه شده برای دوباره پرکردن مخزن سد سفیدرود، پس از زلزله.....
۷۱.....	جدول ۱-۴: مشخصات حرارتی بتن و اطلاعات دمایی ناحیه‌ی سد سفیدرود.....
۷۷.....	جدول ۲-۴: نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای سیستم با مخزن خالی.....
۷۸.....	جدول ۳-۴: نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای سیستم با مخزن پر.....
۱۰۰.....	جدول ۱-۵: حالت‌های در نظر گرفته شده برای انجام مطالعات پارامتریک.....
۱۰۰.....	جدول ۲-۵: (مقادیر استاتیکی) پارامترهای مورد نیاز در تحلیل‌ها، محاسبه شده بر اساس مقدار مقاومت فشاری بتن.....
۱۰۰.....	جدول ۳-۵: مقدار DCR تنش‌های مختلف در مناطق حساس بدنه‌ی سد مطابق حالت‌های جدول ۱-۵.....
۱۱۵.....	.....

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۲: مقطع افقی پشتبند در طرح‌های Marcello و Noetzli
۹	شکل ۲-۲: مقطع سد پشتبنددار
۹	شکل ۳-۲: انواع سدهای پشتبنددار
۱۰	شکل ۴-۲: سد سفیدرود
۱۰	شکل ۵-۲: سد لتیان
۱۱	شکل ۶-۲: سد اکباتان
۱۱	شکل ۷-۲: سد میناب
۱۴	شکل ۸-۲: سد Gleno
۱۶	شکل ۹-۲: سد Vega De Tera
۲۳	شکل ۱۰-۲: سد پشتبنددار. a: پلان، b: مقطع عرضی v-1 (مخزن خالی)، c: مقطع عرضی v-1 (مخزن پر)، RH: نیروی برآیند (از ترکیب بار اصلی)، RE: نیروی برآیند (از ترکیب بار استثنایی)
۲۳	شکل ۱۱-۲: سد چندقوسی، a: پلان، b: elevation سد، c: مقطع عرضی قائم v-1، d: مقطع عرضی افقی H-1
۲۴	شکل ۱۲-۲: ترک‌خوردگی در امتداد یک درز ناپیوسته‌ی سنگ پی
۲۵	شکل ۱۳-۲: نواحی محتمل ترک‌خوردگی در a: سد پشتبنددار، b: سد چندقوسی
۲۷	شکل ۱-۳: موقعیت ترک‌های مشاهده شده در سد پشتبنددار در اثر حرارت
۲۷	شکل ۲-۳: تغییر شکل سد پشتبنددار در اثر حرارت تابستانی (شکل سمت چپ) و حرارت زمستانی (شکل سمت راست)
۲۸	شکل ۳-۳: تنش‌های کششی اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b: بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت تابستانی در مدل دوبعدی)
۲۸	شکل ۴-۳: تنش‌های کششی اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b: بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت زمستانی در مدل دوبعدی)
۲۹	شکل ۵-۳: تنش‌های اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b: بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت تابستانی در مدل سه‌بعدی)
۲۹	شکل ۶-۳: تنش‌های اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b: بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت زمستانی در مدل سه‌بعدی)
۳۰	شکل ۷-۳: دمای حداکثر در تابستان (و زمستان) در هوا، آب و سنگ در مونولیت دارای دیوار عایق



- شکل ۳-۸: a : تنش‌های اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b : بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت تابستانی با وجود دیوار عایق)..... ۳۱
- شکل ۳-۹: a : تنش‌های اصلی حداکثر در بدنه‌ی سد، b : بتن ترک‌خورده (در اثر حرارت زمستانی با وجود دیوار عایق)..... ۳۱
- شکل ۳-۱۰: محدوده و وسعت ترک در پشتبند ۱۱-۱۰ سد لتیان..... ۳۳
- شکل ۳-۱۱: هندسه‌ی پشتبند ۱۱-۱۰ سد لتیان..... ۳۳
- شکل ۳-۱۲: سد Malga Bissina..... ۳۶
- شکل ۳-۱۳: ترک‌های نوعی: روی وجه پایین‌دست (نوع ۱)، بالای تونل نظارت (نوع ۲)، روی دیوار جانبی (نوع ۳) در سدهای وزنی پشتبنددار توخالی..... ۳۷
- شکل ۳-۱۴: نمای پایین‌دست سد Sabbione (سمت چپ) و نمای بالادست سد Malga Bissina (سمت راست)..... ۳۷
- شکل ۳-۱۵: المان شماره ۸ سد Pantano d'Avio، مراحل (سال‌های) ساخت و ترکیب سیمان..... ۳۸
- شکل ۳-۱۶: تغییرات دمایی مؤثر متوسط در بتن و تغییرات ساده شده (سمت چپ) و تغییر دما در بخش‌های مختلف مدل (سمت راست) بلندترین مونولیت یک سد وزنی پشتبنددار توخالی، در تحلیل حرارتی تحت گرمای هیدراسیون..... ۳۸
- شکل ۳-۱۷: نقشه‌ی موقعیت سد سفیدرود..... ۴۰
- شکل ۳-۱۸: نمای پایین‌دست سد بتنی پشتبنددار سفیدرود پس از زلزله‌ی ۱۹۹۰..... ۴۰
- شکل ۳-۱۹: نقشه‌ی گسل نشان‌دهنده‌ی نواحی گسیختگی مشخص (ساختمان سد سفیدرود)..... ۴۱
- شکل ۳-۲۰: ترک‌های سمت چپ پشتبند شماره ۱۵ سد سفیدرود..... ۴۳
- شکل ۳-۲۱: الگوهای ترک‌خوردگی در بلندترین مونولیت سد سفیدرود..... ۴۴
- شکل ۳-۲۲: طرح کلی درزهای اجرایی در مدل سد سفیدرود..... ۴۸
- شکل ۳-۲۳: ترک‌خوردگی مدل سد سفیدرود..... ۴۹
- شکل ۳-۲۴: مهارهای پس‌کشیده در پشتبندهای ۲۳-۸ سد سفیدرود..... ۵۱
- شکل ۳-۲۵: کارهای ترمیمی روی سد سفیدرود، پس از زلزله..... ۵۲
- شکل ۳-۲۶: الگوی تزریق در مدل کوچک‌مقیاس (ترک‌خورده‌ی) سد سفیدرود (شکل سمت چپ) و کابل های پس‌کشیده‌ی نصب شده روی مدل سد سفیدرود (شکل سمت راست)..... ۵۳
- شکل ۳-۲۷: سد Hsinfengkiang..... ۵۵
- شکل ۴-۱: پشتبند شماره ۲۲ سد سفیدرود..... ۶۴
- شکل ۴-۲: المان حرارتی solid87 و المان سازه‌ای solid92..... ۶۵
- شکل ۴-۳: المان آکوستیکی fluid30..... ۶۵
- شکل ۴-۴: مدل سد-پی-مخزن مورد استفاده در تحلیل‌ها..... ۶۶
- شکل ۴-۵: نحوه‌ی شبکه‌بندی سیستم سد-مخزن-پی..... ۶۶

- شکل ۴-۶: شبکه‌بندی بکار رفته در بدنه‌ی سد ..... ۶۷
- شکل ۴-۷: المان 170 tarege ..... ۶۸
- شکل ۴-۸: المان 174 conta ..... ۶۸
- شکل ۴-۹: مدل اصطکاکی کولمب ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: سیکل حرارتی سالیانه ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۱: توزیع حرارت در بدنه‌ی سد در فصل تابستان (اواسط مرداد ماه)، نتیجه‌ی تحلیل حرارتی ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲: توزیع حرارت در بدنه‌ی سد در فصل زمستان (اواسط بهمن ماه)، نتیجه‌ی تحلیل حرارتی ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۳: تغییرات دمای آب بالادست سد سفیدرود در تابستان (سمت چپ) و در زمستان (سمت راست) ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴: تغییر مکان سد به سمت بالادست در نمای دوبعدی در اثر بارگذاری حرارتی تابستانی ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۵: ارتباط بین نسبت میرایی و فرکانس (زاویه‌ای) در میرایی رایلی ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶: شکل موده‌های اول تا هشتم سیستم با مخزن پر ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷: سیستم سد-مخزن-پی و شرایط مرزی چهارگانه در مخزن ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۸: تعبیر فیزیکی شرط مرزی سومرفلد ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۹: کانتورهای تنش کششی حداکثر در بدنه‌ی سد در تحلیل خطی تحت اثر بارهای استاتیکی (وزن، فشار هیدرواستاتیکی آب، فشار برکنش و حرارت تابستانی) و زلزله‌ی آب‌بر (مقیاس شده به 0.714g) ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۰: تنش‌های کششی اصلی، ناشی از رکورد آب‌بر مقیاس شده ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۱: کانتورهای تنش فشاری حداکثر در بدنه‌ی سد در تحلیل خطی تحت بارهای استاتیکی (وزن، فشار هیدرواستاتیکی آب، فشار برکنش و حرارت تابستانی) و زلزله‌ی مقیاس شده‌ی آب‌بر ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۲: نمودار شتاب-زمان مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت آب‌بر، مقیاس شده به 0.714g ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۳: نمودار شتاب-زمان مؤلفه‌ی قائم مقیاس شده‌ی شتاب‌نگاشت آب‌بر ..... ۸۸
- شکل ۵-۱: طیف‌های پاسخ ساختگاه سد سفیدرود و زلزله‌های مقیاس شده ..... ۹۲
- شکل ۵-۲: نمودارهای شتاب-زمان مؤلفه‌های افقی و قائم مقیاس شده‌ی رکورد آب‌بر ..... ۹۴
- شکل ۵-۳: نمودارهای شتاب-زمان مؤلفه‌های افقی و قائم مقیاس شده‌ی زلزله‌ی نورتریج ..... ۹۵
- شکل ۵-۴: نمودارهای شتاب-زمان مؤلفه‌های افقی و قائم مقیاس شده‌ی زلزله‌ی کولینگا ..... ۹۶
- شکل ۵-۵: کانتورهای تنش کششی حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال در تحلیل خطی برای حالت رکورد آب‌بر و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال ..... ۹۷
- شکل ۵-۶: کانتورهای تنش فشاری حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال در تحلیل خطی برای حالت رکورد آب‌بر و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال ..... ۹۷
- شکل ۵-۷: کانتورهای تنش فونمیزس حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال در تحلیل خطی برای حالت رکورد آب‌بر و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال ..... ۹۸

شکل ۵-۸: کانتورهای حاصل در سطح تماس سد و پی برای پارامتر ایمنی برشی  $F$  در تحلیل خطی برای حالت رکورد آبر و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال.....۹۹

شکل ۵-۹: تاریخچه‌ی پاسخ تغییر مکان افقی نقطه‌ی وسط تاج سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶ از جدول ۵-۱).....۱۰۱

شکل ۵-۱۰: تاریخچه‌ی پاسخ تغییر مکان قائم نقطه‌ی وسط تاج سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶ از جدول ۵-۱).....۱۰۱

شکل ۵-۱۱: تاریخچه‌ی پاسخ شتاب افقی تاج سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۲

شکل ۵-۱۲: تاریخچه‌ی پاسخ شتاب قائم تاج سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۰ از جدول ۵-۱).....۱۰۲

شکل ۵-۱۳: تاریخچه‌ی پاسخ تنش کششی بیشینه در محل تغییر شیب پایین دست سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۳

شکل ۵-۱۴: تاریخچه‌ی پاسخ تنش فشاری بیشینه در محل تغییر شیب پایین دست سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۲ از جدول ۵-۱).....۱۰۳

شکل ۵-۱۵: تاریخچه‌ی پاسخ تنش فون میزس بیشینه در محل تغییر شیب پایین دست سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۲ از جدول ۵-۱).....۱۰۴

شکل ۵-۱۶: تاریخچه‌ی پاسخ تنش کششی بیشینه در پاشنه‌ی سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۴

شکل ۵-۱۷: تاریخچه‌ی پاسخ تنش کششی بیشینه در پنجه‌ی سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۵

شکل ۵-۱۸: تاریخچه‌ی پاسخ تنش فشاری بیشینه در پنجه‌ی سد برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۵

شکل ۵-۱۹: کانتورهای تنش کششی حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۶

شکل ۵-۲۰: کانتورهای تنش فشاری حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۵ از جدول ۵-۱).....۱۰۷

شکل ۵-۲۱: کانتورهای تنش فون میزس حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۸ از جدول ۵-۱).....۱۰۷

شکل ۵-۲۲: کانتورهای جابجایی افقی حداکثر بدنه‌ی سد بر حسب میلیمتر برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶ از جدول ۵-۱)..... ۱۰۸

شکل ۵-۲۳: کانتورهای جابجایی قائم حداکثر بدنه‌ی سد بر حسب میلیمتر برای حالت زلزله‌ی نورتریج و مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال (حالت شماره ۱۶ از جدول ۵-۱)..... ۱۰۸

شکل ۵-۲۴: مقدار DCR برای تنش کششی در محل تغییر شیب پایین‌دست در مدول نرمی برابر یک ..... ۱۱۰

شکل ۵-۲۵: مقدار DCR برای تنش کششی در محل تغییر شیب پایین‌دست در مدول نرمی برابر ۱۱۰.۵ ..... ۱۱۰

شکل ۵-۲۶: مقدار DCR برای تنش کششی در محل تغییر شیب پایین‌دست در مدول نرمی برابر ۱۰ ..... ۱۱۰

شکل ۵-۲۷: مقدار DCR برای تنش کششی در پاشنه‌ی سد در مدول نرمی برابر یک ..... ۱۱۱

شکل ۵-۲۸: مقدار DCR برای تنش کششی در پاشنه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۵ ..... ۱۱۱

شکل ۵-۲۹: مقدار DCR برای تنش کششی در پاشنه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۱۰ ..... ۱۱۲

شکل ۵-۳۰: مقدار DCR برای تنش کششی در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر یک ..... ۱۱۲

شکل ۵-۳۱: مقدار DCR برای تنش کششی در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۵ ..... ۱۱۳

شکل ۵-۳۲: مقدار DCR برای تنش کششی در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۱۰ ..... ۱۱۳

شکل ۵-۳۳: مقدار DCR برای تنش فشاری در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر یک ..... ۱۱۴

شکل ۵-۳۴: مقدار DCR برای تنش فشاری در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۵ ..... ۱۱۴

شکل ۵-۳۵: مقدار DCR برای تنش فشاری در پنجه‌ی سد در مدول نرمی برابر ۱۰ ..... ۱۱۴

شکل ۵-۳۶: کانتورهای تنش فونمیزس حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال ( در مدول نرمی برابر یک و مقاومت فشاری بتن برابر ۱۷ مگاپاسکال، شکل سمت چپ: با رکورد آب‌بر و سمت راست: با زلزله‌ی نورتریج)..... ۱۱۶

شکل ۵-۳۷: کانتورهای تنش فونمیزس حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال ( در مدول نرمی برابر ۵ و مقاومت فشاری بتن برابر ۲۵ مگاپاسکال، شکل سمت چپ: با رکورد آب‌بر و سمت راست: با زلزله‌ی نورتریج)..... ۱۱۶

شکل ۵-۳۸: کانتورهای تنش فونمیزس حداکثر در بدنه‌ی سد بر حسب پاسکال ( در مدول نرمی برابر ۱۰ و مقاومت فشاری بتن برابر ۳۵ مگاپاسکال، شکل سمت چپ: با رکورد آب‌بر و سمت راست: با زلزله‌ی نورتریج)..... ۱۱۷

شکل ۵-۳۹: معیارهای دراگر-پراگر و موهر-کولمب ..... ۱۱۹

شکل ۵-۴۰: کاهش وسعت نواحی آسیب‌پذیر سد، با افزایش مقاومت فشاری بتن (از بالا به پایین، مقاومت‌های فشاری ۱۷، ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال؛ در حالت مدول نرمی برابر یک و اعمال زلزله‌ی منجیل) ..... ۱۲۱