

تخمین الگوهای خرابی و سناریوهای گسیختگی لرزه‌ای در سدهای وزنی بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی

محمدعلی ستوده^۱

محسن قائمیان*^۲

عبدالرضا سروقدمقدم^۳

چکیده

در حال حاضر رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد کامل‌ترین روش برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سازه‌ها است. چالش اصلی فرا روی توسعه این روش در سدهای وزنی بتنی، تعریف کیفی و کمی سطوح عملکرد سازه است. هدف اصلی این مقاله تخمین الگوهای خرابی و سناریوهای گسیختگی سد جهت ایجاد بستر لازم برای تعیین سطوح عملکرد لرزه‌ای آن است. از این رو با انتخاب سد وزنی پایین‌فلت به عنوان نمونه موردی، تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی بر روی سیستم سد- مخزن- فونداسیون صلب، تحت رکوردهای حوزه نزدیک دارای اثرات پیش‌روندگی، انجام شده است. سپس براساس نتایج بدست آمده نواحی بحرانی در بدنه‌ی سد با روشی نوین شناسایی و مجموعه‌ای از مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک در بدنه سد تعیین گردیده‌اند. اعتبار مسیرهای مذکور از طریق مقایسه با گزارش‌های منتشرشده در مراجع معتبر، بررسی و تأیید گردیده است. در این تحقیق مشاهده گردید که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، خرابی سازه در قالب الگوهای مشخص و محدودی رخ می‌دهد. همچنین تشکیل ترک کامل در بدنه‌ی سد فقط در چهار مسیر مشخص ممکن است که این رخداد به معنای گسیختگی نهائی سازه نیست. از این رو در این تحقیق علاوه بر تخمین الگوهای خرابی، سه سناریو گسیختگی برای سدهای وزنی بتنی شناسایی و تعریف گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که محدود نمودن پاسخ تغییرمکان سد و یا تغییرمکان نسبی آن به یک مقدار حدی محافظه‌کارانه می‌تواند سطح ایمنی این ابرسازه‌ها را تا حد زیادی ارتقا دهد.

واژه‌های کلیدی

مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد، سطوح عملکرد لرزه‌ای، مسیر ترک، نواحی بحرانی

۱. دکتری عمران - مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

*۲. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ghaemian@sharif.edu

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

مقدمه

میرزابزرگ (۲۰۱۴)) از جمله روش‌های پیشرفته تحلیل سازه‌ای می‌باشند.

چنین گستره‌ای از دانش مهندسی ما را قادر به اتخاذ رویکرد مهندسی مبتنی بر عملکرد^۶ در مواجهه با موضوع رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی می‌سازد. با این حال نقاط تاریکی در این گسترش مفهومی به حوزه مهندسی سد وجود دارد. یکی از ارکان مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد^۷ تعریف سطوح عملکرد^۸ سازه است. در خصوص سدهای وزنی بتنی جز تعاریفی کیفی مانند عدم رهاسازی یک‌باره آب مخزن تحت حداکثر زلزله محتمل، تاکنون سطوح عملکرد لرزه‌ای به‌صورت شفاف تعریف نشده‌اند (ستوده، قائمیان و سروقدمقدم (۲۰۱۸)). در سال‌های اخیر تحقیقات معدودی در راستای تعریف کیفی و کمی سطوح عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی انجام شده است. عالم‌باقری و قائمیان (۲۰۱۳ الف) با انجام تحلیل‌های پوش‌اور و دینامیکی فزاینده غیرخطی حالات خرابی را در سدهای وزنی بتنی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رفتار سد را به دو محدوده‌ی الاستیک و غیرالاستیک تقسیم نمودند و گسیختگی کامل را پس از حالت خرابی شروع ترک‌خوردگی در گردن سد در نظر گرفتند. حریری‌اردبیلی و ساوما (۲۰۱۴) شش سناریو برای رفتار لرزه‌ای سدهای وزنی بتنی و درنهایت گسیختگی آن‌ها پیشنهاد نمودند. آن‌ها شش حالت خرابی تعریف و حدود کمی برای وقوع آن‌ها در نظر گرفتند. سويسال^۹ و همکاران (۲۰۱۶) پنج حالت خرابی در سدهای وزنی بتنی تعریف نمودند. آن‌ها این پنج حالت خرابی را در راستای کمی‌سازی به پارامترهایی از پاسخ سازه مرتبط نموده و سناریوی رفتاری برای سد در نظر گرفتند. ستوده، قائمیان و سروقدمقدم (۲۰۱۸) موضوع تعیین سطوح عملکرد لرزه‌ای را در سدهای وزنی بتنی تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چهار سطح عملکرد شروع ترک‌خوردگی تراز پایه، حد تسلیم، شروع ترک‌خوردگی گردن سد و آستانه گسیختگی را تعریف و حدود کمی آن‌ها را با استفاده از تحلیل IDA و یک روش جامع آماری برای سد وزنی پایین‌فالت^{۱۰} تعیین نمودند.

حفاظت و نگهداری عالی از سدهای بتنی به دلایل متعددی از جمله محدودیت در منابع اقتصادی و زیست‌محیطی، مسائل سیاسی و اجتماعی و غیره اهمیت زیادی دارد. تجربیات زلزله‌های گذشته در خصوص سدهایی چون کوینا، سفیدرود، شینگ‌فینگ‌کیانگ و پاکویاما نشان دادند که سدهای بتنی در برابر بارهای لرزه‌ای سازه‌هایی آسیب‌پذیر هستند. وقوع زلزله‌های شدید منجر به ایجاد ترک‌های کششی بزرگی در بدنه‌ی سدهای بتنی می‌گردند که می‌توانند سازه را در وضعیت بحرانی قرار دهند. باینکه انهدام کامل هیچ سد بتنی بزرگی تحت بارهای لرزه‌ای تاکنون گزارش نشده، اما این ترک‌ها ظرفیت سازه را تا حد زیادی کاهش داده و امکان وقوع سازوکارهای گسیختگی مانند لغزش و یا واژگونی را افزایش می‌دهند. از این‌رو تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی با هدف پیش‌بینی مسیرهای رشد و توسعه ترک در بدنه‌ی سدهای بتنی انجام و مدل‌های شکست مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در فضای دو و سه‌بعدی ایجاد شده است (امیرپور و میرزا بزرگ (۲۰۱۴)). با این وجود مسئله تخمین رفتار لرزه‌ای سدها فقط به موضوع شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح ختم نمی‌شود. چراکه سدهای بتنی در یک سیستم سه‌گانه سد-مخزن-فونداسیون به تحریکات زمین‌لرزه پاسخ می‌دهند. تحلیل این سیستم سه‌گانه‌ی مختلط یک مسئله اندرکنشی پیچیده است که تلاش‌های زیادی در جهت حل آن صورت گرفته است (قائمیان، نورزاد و محمدنژاد (۲۰۱۷)). پیشرفت‌های حوزه‌ی مهندسی لرزه‌ای سد در کنار پیشرفت‌های دانش مهندسی کامپیوتر و افزایش توان محاسباتی موجب ارتقا روش‌های تحلیل سازه‌ای سدها شده است. روش‌هایی همچون تحلیل پلکانی چندگانه^۱ (MSA) (حریری‌اردبیلی و همکاران (۲۰۱۶))، تحلیل دینامیکی فزاینده^۲ (IDA) (عالم‌باقری و قائمیان (۲۰۱۳) الف و ب))، تحلیل ابری^۳ (CLA) (حریری‌اردبیلی و ساوما^۴ (۲۰۱۶)) و تحلیل زمان تداوم^۵ (ETA) (حریری‌اردبیلی و

^۶ Performance Based Engineering (PBE)

^۷ Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)

^۸ Performance levels

^۹ Soysal

^{۱۰} Pine Flat concrete gravity dam

^۱ Multiple Stripe Analysis (MSA)

^۲ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

^۳ Cloud Analysis (CLA)

^۴ Saouma

^۵ Endurance Time Analysis (ETA)

سناریو گسیختگی برای سدهای وزنی بتنی شناسایی و تعریف گردید. شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای محتمل گسیختگی با توجه به نقش مؤثر آن‌ها در تبیین و تعریف حالات خرابی^۲ و سطوح عملکرد سازه، گامی مهم در روند گسترش مفهومی رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد در سدهای وزنی بتنی به شمار می‌رود.

روش تحقیق

با توجه به مزایای متعدد روش IDA از جمله کارایی آن در ارزیابی لرزه‌ای و برآورد تقاضا و ظرفیت سازه‌های مختلف (وامواتسیکوس و کرنل^۴، ۲۰۰۲)، در این تحقیق از روش IDA برای ارزیابی لرزه‌ای سد وزنی بتنی پابین‌فلت و تعیین الگوهای خرابی آن استفاده شده است. فلوچارت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی در شکل (۱) ارائه گردیده است. در راستای انجام تحلیل‌های عددی، مدل اجزاءمحدود مقطع یکپارچه سد بدون هرگونه درز، ترک و صفحات مستعد لغزش و با لحاظ رفتار غیرخطی مصالح بتنی و صرف‌نظر از رفتار غیرخطی هندسی ایجاد گردیده است. تنها مود گسیختگی لحاظ شده اضافه تنش منجر به ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد است و از خردشدگی فشاری بتن چشم‌پوشی شده است. رفتار غیرخطی بتن سد با استفاده از مدل ترک پیوسته – مدل ترک پخش‌شده^۵ شبیه‌سازی شده است (باتاچارژی و لیگر^۶ (۱۹۹۳) و (۱۹۹۴)). مشخصات مصالح بتن سد در جدول (۱) درج گردیده است. در این مطالعه رفتار فشاری بتن، الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی مصالح

نام	نماینده	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	E_c	27.58	GPa
چگالی	ρ_c	2400.00	kg/m ³
نسبت پواسون	ν_c	0.20	----
مقاومت کششی	σ_t	2.70	MPa
مقاومت فشاری	σ_c	27.00	MPa
انرژی شکست	G_f	300.00	N/m
ضریب افزایش مقاومت دینامیکی	---	1.20	----

در این تحقیق از نرم‌افزار منبع باز NSAG-DRI برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سد بتنی وزنی استفاده

هدف اصلی این مقاله رفع برخی از دشواری‌های توسعه رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد در سدهای وزنی بتنی است. این هدف از طریق شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای گسیختگی سازه‌ی سد دنبال گردیده است. برای این منظور با استفاده از تحلیل IDA رفتار لرزه‌ای سد وزنی پابین‌فلت به‌طور کامل تعیین و منحنی‌های IDA و پروفیل‌های ترک^۱ استخراج گردیده‌اند. جهت انجام تحلیل IDA از ۲۶ رکورد حوزه نزدیک استفاده و مجموعاً ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده است. ویژگی‌های خاص رکوردهای حوزه نزدیک از جمله مدت‌زمان مؤثر کمتر آن‌ها نسبت به نگاشت‌های دور از گسل، وجود یک یا چند پالس ضربه‌ای با دامنه بزرگ و دوره تناوب زیاد در نگاشت سرعت، تجمع انرژی و انتقال آن در مدت‌زمان کوتاه به سازه از جمله مواردی هستند که منجر به پاسخ متفاوت سازه به تحریکات حوزه‌ی نزدیک زمین نسبت به حوزه‌ی دور می‌گردند. از این رو نخست به‌منظور اهمیت آگاهی از پاسخ‌های سیستم تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دوم در جهت کاهش تأثیرات ناشی از عدم قطعیت ذاتی ناشی از زمین‌لرزه، تحلیل‌ها صرفاً تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک دارای اثرات جهت‌پذیری انجام شده‌اند.

تعیین نواحی بحرانی در بدنه سد از طریق بررسی پارامتر تعدد ترک‌خوردگی المان‌های سازه از جمله نوآوری‌های این تحقیق است. پس از شناسایی نواحی بحرانی، موضوع محل شکل‌گیری اولین ترک و نحوه توسعه ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد مورد بررسی قرار گرفته و سپس مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک^۲ با بررسی کلیه پروفیل‌های ترک و تاریخچه ترک‌خوردگی المان‌های سازه، شناسایی و معرفی شده‌اند. گزارش‌های منتشرشده از وقایع طبیعی، نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی در مراجع معتبر، اعتبار مسیرهای ترک محتمل معرفی شده را تأیید می‌نمایند. بر مبنای مسیرهای ترک مذکور و با مشاهده، بررسی و دسته‌بندی پروفیل‌های ترک، الگوهای خرابی سد شناسایی شده‌اند. مطالعه‌ی الگوهای خرابی و رفتار لرزه‌ای سازه، سناریوهای گسیختگی مشخصی را نمایان می‌سازد. از این رو در این تحقیق سه

^۲. Damage states

^۴. Vamvatsikos and Cornel

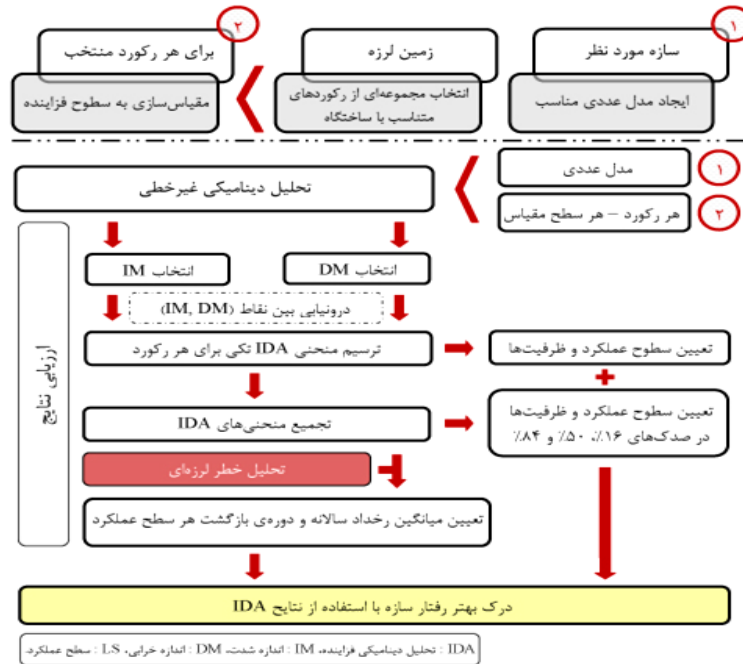
^۵. Smearred Crack Model

^۶. Bhattacharjee and Leger

^۱. Critical locations

^۲. Probable path of crack extension

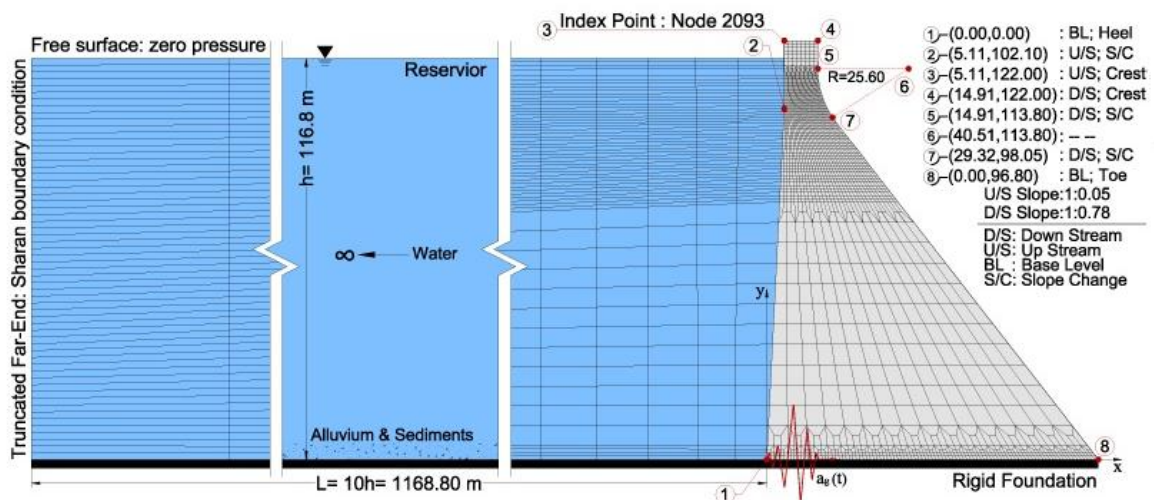
شده است (قائمیان ۲۰۰۸). علاوه بر اطلاعات ارائه شده، خصوص مدل‌سازی عددی و گزارش صحت‌سنجی توسط توضیحات بیشتر در مورد پارامترها و مشخصات تکمیلی در ستوده و همکاران (۲۰۱۸) ارائه گردیده است.



شکل (۱): فلوجارت روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) (ستوده و همکاران، ۲۰۱۸)

شکل (۲) نشان داده شده است. در این مطالعه اثر جذب امواج در کف مخزن با فرض محافظه‌کارانه‌ی ضریب انعکاس برابر ۰/۸۲ لحاظ گردیده است (شاران، ۱۹۸۶). همچنین از فشار برکنش و همچنین فشار آب منفذی داخل ترک‌ها صرف‌نظر گردیده است.

با استفاده از نرم‌افزار مذکور اندرکنش سد و مخزن در مدل‌سازی انجام شده لحاظ گردیده و معادلات کوپله سد - مخزن با استفاده از تکنیک staggered displacement حل شده‌اند. مش‌بندی اجزا محدود، مشخصات هندسی مخزن و شرایط مرزی آن به همراه مقطع بزرگ‌ترین مونولیت غیرسرریز شونده‌ی سد پایین‌فالت را با ارتفاع ۱۲۲ متر در



شکل (۲): مدل اجزای محدود بزرگ‌ترین مونولیت غیرسرریز شونده‌ی سد پایین‌فالت به همراه مخزن (ستوده و همکاران، ۲۰۱۸)

انتخاب رکورد زمین لرزه و مقیاس سازی زلزله
 به منظور انتخاب رکوردهای مناسب برای انجام تحلیل IDA، شتابنگاشت هر دو مؤلفه افقی ۱۳ زمین لرزه ثبت شده بر روی بستر سنگی و یا خاک سخت انتخاب شده اند (پی بر (۲۰۱۳)). تمام ۲۶ رکورد منتخب از نوع نزدیک گسل و دارای اثر جهت پذیری می باشند (بیکر (۲۰۰۷)). مشخصات رکوردهای منتخب در جدول (۲) درج گردیده است.

برای اعمال اثر میرایی از مدل میرایی الاستیک- ترد رایلی با صرف نظر از مؤلفه‌ی جرم سازه و محاسبه ضریب تناسب سختی با لحاظ نسبت میرایی بحرانی ۵٪ و مود اول سیستم سازه - مخزن قرار گرفته بر روی فونداسیون صلب استفاده شده است. این ضریب برابر ۰/۰۴۴ محاسبه گردیده است. گام‌های زمانی تحلیل دینامیکی برابر ۰/۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده و فقط مؤلفه افقی زلزله بر سازه و در پاشنه‌ی سد اعمال می گردد.

جدول (۲): لیست رکوردهای نزدیک گسل دارای اثر جهت پذیری منتخب

ردیف	نام زلزله	تاریخ	ایستگاه	M _s	فاصله از گسل	مقیاس	مرجع طبقه بندی
1	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	TCU046	7.6	14.34	1/A	CWB/USGS
2	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	CHY006	7.6	14.93	1/C	CWB/USGS
3	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	CHY035	7.6	18.12	1/C	CWB/USGS
4	Coalinga	1983/07/22	1651 Transmitter Hill	5.7	9.2	A	Gx.
5	Coyote Lake	1979/08/06	57383 Gilroy Array #6	5.6	3.1	B/B	Gx./USGS
6	Kocaeli, Turkey	1999/08/17	Gebze	7.8	17.0	A/A	Gx./USGS
7	Landers	1992/06/28	24 Lucerne	7.4	1.1	A/A	Gx./USGS
8	Mammoth Lakes	1980/05/25	54214 Long Valley dam (U/L Abut)	6.1	15.5	A	Gx.
9	Morgan Hill	1984/04/24	57217 Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.1	0.1	A	Gx.
10	Morgan Hill	1984/04/24	57383 Gilroy Array #6	6.1	11.8	B/B	Gx./USGS
11	Northridge	1994/01/17	24207 Pacoima Dam (D/S)	6.7	8.0	A	Gx.
12	Northridge	1994/01/17	24207 Pacoima Dam (U/L)	6.7	8.0	A/A	Gx./USGS
13	San Fernando	1971/02/09	279 Pacoima Dam	6.6	2.8	B	USGS

هر رکورد به ۱۰ سطح فزاینده‌ی Sa(5%, T1) از ۰/۱g تا ۱/۰g، با گام افزایشی ۰/۱g، مقیاس گردد. سپس این ضرایب مقیاس در شتابنگاشت زلزله ضرب گردیده‌اند.

نتایج و بحث

در این تحقیق از نتایج تحلیل IDA و همچنین هر یک از ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده برای ارزیابی لرزه‌ای سد وزنی بتنی پایین فلت و تعیین الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای گسیختگی آن استفاده شده است که در ادامه نتایج مذکور مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. لازم به ذکر است که به منظور پرهیز از تکرار مطالب از ارائه منحنی‌های IDA و بحث پیرامون آن‌ها در این مقاله خودداری شده و اطلاعات بیشتر در این خصوص در مقاله دیگر نگارندگان ارائه گردیده است (ستوده و همکاران (۲۰۱۸)).

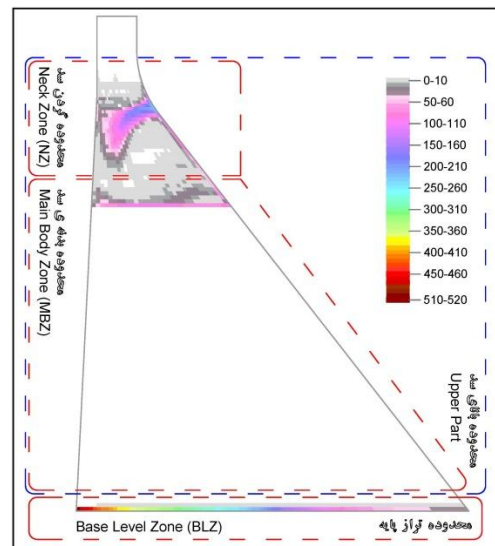
در این مطالعه هر زمین لرزه به بیست سطح فزاینده مقیاس شده است. عمل مقیاس سازی با پیگیری دو دیدگاه متفاوت انجام شده تا هم خصوصیات سازه و هم زلزله در تعیین سطوح بار لرزه‌ای لحاظ گردد. در دیدگاه اول، ایجاد شتابنگاشت‌هایی با دامنه‌های ضعیف تا قوی مورد نظر بوده است. از این رو هر رکورد به ۱۰ سطح فزاینده‌ی حداکثر شتاب زمین^۱ (PGA) از ۰/۱g تا ۱/۰g، با گام افزایشی ۰/۱g، مقیاس شده است. از طرف دیگر، مقدار شتاب طیفی زمین لرزه از خصوصیات زلزله همچون محتوای فرکانسی و دامنه‌ی ارتعاش آن و همچنین از خصوصیات سازه همچون میرایی و پریود ارتعاش آن تأثیر می پذیرد. لذا در دیدگاه دوم، انجام مقیاس سازی بر مبنای ایجاد سطوح فزاینده از مقدار شتاب طیفی در پریود مود اول ارتعاش سازه^۲ (Sa(5%, T1)) مورد نظر بوده است. بدین ترتیب بر اساس دیدگاه دوم، ۱۰ ضریب مقیاس برای هر رکورد به نحوی تعیین گردیده‌اند که

^۱ Peak Ground Acceleration (PGA)

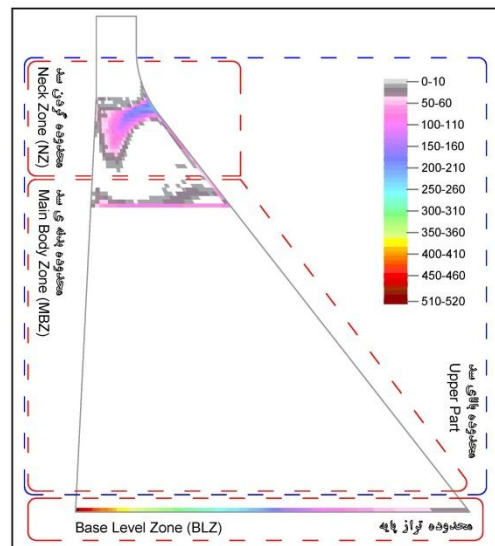
^۲ First mode Spectral Acceleration; Sa(5%, T1)

نواحی بحرانی در بدنه سدهای وزنی بتنی

معمولاً سدهای بتنی حتی تحت زلزله‌های نه‌چندان شدید، ترک‌خوردگی در محدوده تراز پایه را تجربه می‌نمایند. محدوده‌ی دیگری که مستعد ترک‌خوردگی تحت بارهای لرزه‌ای است محدوده‌ی بالای سد، خصوصاً ناحیه تغییر شیب در گردن سد است (قائمیان و قبارا، ۱۹۹۹). در این تحقیق به‌منظور شناسایی دقیق‌تر نواحی بحرانی در بدنه‌ی سد، تعداد ترک‌خوردگی هر المان سازه‌ای در ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام‌شده، موردبررسی قرار گرفته است. منظور از نواحی بحرانی، نواحی مستعد ترک‌خوردگی در بدنه‌ی سد می‌باشند. شکل (۳) فراوانی ترک‌خوردگی المان‌های سازه را با استفاده از طیف رنگ نشان می‌دهد.



شکل (۳-الف): نمایش تعداد ترک‌خوردگی المان‌های سازه



شکل (۳-ب): نمایش ترک‌خوردگی با فراوانی بیش از ۱۰ مرتبه

براساس شکل (۳) در شرایط مخزن پر و فونداسیون صلب، سه ناحیه بحرانی در بدنه‌ی سد شناسایی شده‌اند. محدوده‌ی تراز پایه^۱، محدوده‌ی بدنه سد^۲ و محدوده‌ی گردن سد^۳، سه ناحیه مستعد ترک‌خوردگی در سد وزنی می‌باشند. در این تحقیق به مجموع دو محدوده‌ی بدنه و گردن سد، محدوده‌ی بالای سد اطلاق می‌گردد. در شکل (۳-الف)، هر المانی که حتی یکبار هم ترک‌خوردگی را تجربه نموده، مشخص گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تعداد زیادی از المان‌ها کمتر از ۱۰ بار ترک خورده‌اند. گستردگی محدوده ترک‌خوردگی کمتر از ۱۰ بار، به دلیل تأثیرپذیری قابل توجه نتایج تحلیل دینامیکی از بار ورودی زلزله و تفاوت خصوصیات رکوردها است. همچنین مقیاس نمودن رکوردهای زمین‌لرزه می‌تواند موجب تغییر الگوی خرابی سازه گردد، به‌طوری‌که پروفیل‌های ترک دو مقیاس متوالی از یک رکورد، کاملاً با هم متفاوت باشند. چراکه مقیاس نمودن زمین‌لرزه با ضریب مقیاس بزرگ می‌تواند موجب تغییر خصوصیات حرکت زمین و در نتیجه ممکن است خطای سوگرفتنی^۴ رخ دهد. با توجه به اینکه در این مطالعه نتایج تحلیل سیستم تحت هر مقیاس از زمین‌لرزه به‌عنوان یک نمونه‌ی آماری مستقل موردتوجه قرار گرفته، لذا نگرانی در خصوص ایجاد سوگرفتنی نتایج وجود نخواهد داشت. به‌طوری‌که چنانچه به دلیل مقیاس سازی رکوردی خصوصیات ارتعاشی آن رکورد تغییر نماید، با توجه به ماهیت تصادفی زلزله، باز هم نتایج تحلیل صورت گرفته تحت آن رکورد به تنهایی ارزش مطالعاتی خواهد داشت.

شکل (۳-ب) توزیع رنگی فراوانی ترک‌خوردگی المان‌های با تعداد بیش از ۱۰ بار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد مستعدترین محدوده ترک‌خوردگی، محدوده‌ی تراز پایه است. تمام سطح مشترک سد و فونداسیون می‌تواند وقوع ترک‌های کششی را تجربه نماید. باین‌حال از فراوانی ترک‌خوردگی در تراز پایه از سمت بالادست (پاشنه) به سمت پائین‌دست (پنججه) کاسته می‌شود. همچنین ترک‌خوردگی در محدوده‌ی گردن سد بیشتر از محدوده‌ی بدنه‌ی سد است. در محدوده‌ی بالای سد، تعداد

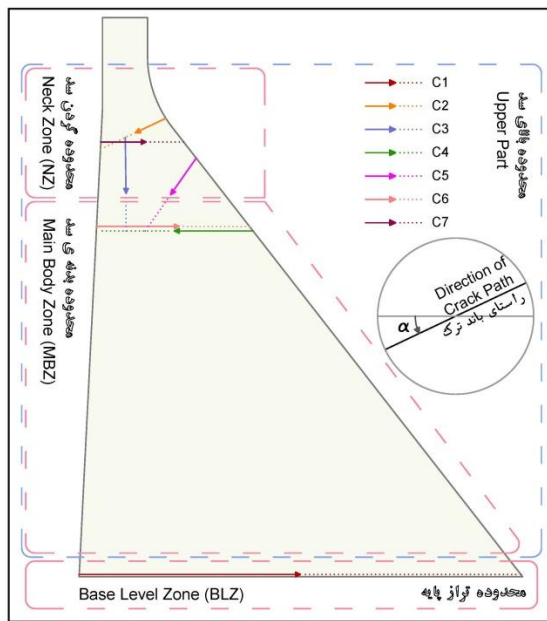
^۱. Base Level Zone (BLZ)

^۲. Main Body Zone (MBZ)

^۳. Neck Zone (NZ)

^۴. Bias due to scaling

ترک خوردگی در وجه پائین دست بیشتر از وجه بالادست است. حال آنکه در خرابی یکجا، تمامی پروفیل ترک در یک نوسان و در چند گام زمانی محدود بوجود می آید.



شکل (۴): نمایش شماتیک نواحی بحرانی و مسیرهای نفوذ ترک

مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک

پیش از بررسی الگوهای خرابی لازم است تا مسیرهای توسعه ترک در بدنه سد شناسایی و معرفی گردند. به منظور تعیین مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک، پروفیل های ترک کلیه تحلیل های انجام شده در زمان انتهای تحلیل مورد بررسی قرار گرفته اند. منظور از زمان انتهای تحلیل، پایان مدت رکورد زلزله و یا زمان تحقق معیار پایان تحلیل است. شکل (۴) مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک را در بدنه سد، براساس آنچه در پروفیل های ترک مشاهده شده، به طور شماتیک نشان می دهد. با هدف صحت سنجی مسیرهای ترک محتمل معرفی شده، مشاهدات صورت گرفته از ترک خوردگی سدهای وزنی بتنی در وقایع طبیعی و همچنین نتایج گزارش شده از مطالعات آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته اند. البته با توجه به کمبود اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی در خصوص خسارات لرزه ای سدهای بتنی، نتایج برخی از تحقیقات عددی نیز مدنظر بوده اند. بدین منظور مسیرهای ترک مشاهده شده در گزارش های مربوط به مشاهدات میدانی، نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی براساس مسیرهای محتمل ترک معرفی شده در جدول (۳) ارائه گردیده اند. با

شکل گیری و توسعه ترک های کششی

از جمله مسائل مورد توجه این تحقیق تعیین محل اولین ترک خوردگی در بدنه سد و چگونگی گسترش آن است. با بررسی نتایج کلیه تحلیل های انجام شده می توان موارد ذیل را در خصوص شکل گیری اولین ترک در بدنه سد بیان نمود:

- شکست اولین المان در اغلب تحلیل ها در محدوده بحرانی تراز پایه و در محل پاشنه سد بوده است.
- در موارد معدودی اولین المان ترک خورده در محل تغییر شیب پائین دست گردن سد واقع شده است.
- شکست اولین المان در هیچ یک از تحلیل ها در پنجه سد نبوده است.
- شکست اولین المان در هیچ یک از تحلیل ها در رویه بالادست محدوده بالای سد رخ نداده است.

برخی موارد دیگر که می توان با بررسی نتایج تحلیل ها از جمله پروفیل های ترک و ترتیب ترک خوردگی در خصوص توسعه ترک های کششی مطرح نمود، عبارتند از:

- در برخی از تحلیل ها که ترک کامل در تراز پایه شکل گرفته، باند ترک ابتدا از پاشنه تا نزدیکی پنجه سد نفوذ می نماید و سپس المان های محدوده پنجه سد دچار ترک خوردگی می شوند.
- تشکیل و رشد ترک در رویه پائین دست محدوده بحرانی بدنه سد، یا مانع تشکیل ترک در پنجه می گردد و یا سرعت نفوذ باند ترک در این ناحیه را کاهش می دهد.
- شروع ترک خوردگی از وجه بالادست محدوده بالای سد همواره بعد از تشکیل و رشد ترک در پاشنه سد رخ داده می دهد.

■ حرکت نوسانی سد به بالادست و پائین دست می تواند منجر به بروز خرابی به هر دو صورت تدریجی و یکجا گردد. معمولاً در شدت های پائین زمین لرزه، خرابی به صورت تدریجی و در شدت های بالا، خرابی به صورت یکجا در بدنه سد رخ می دهد. منظور از خرابی تدریجی، شکل گیری پروفیل ترک در نوسانات مختلف سد در جهات بالادست و پائین دست است.

توجه به جدول (۳) می‌توان چنین اظهار نمود که مسیرهای ترک محتمل معرفی شده دارای اعتبار کافی می‌باشند.

جدول (۳): مسیرهای نفوذ باند ترک گزارش شده در وقایع طبیعی، نتایج آزمایشگاهی و برخی مطالعات عددی

No.	Dam name	Dam type	Source	loading	Hor. com.	Ver. com.	Reservoir	Foundation	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Ref.	
۱	Koyna	GD	OE	1967 Koynanagar Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	[۱]	
۲	Koyna	GD	ER	sinusoidal motion	✓	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓	x	[۲] 1:20 scaled model.	
۳	Koyna	GD	ER	sinusoidal motion	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x	[۳] 1:150 scaled model.	
۴	Hsinfengkiang	BD	OE	1962 Heyuan Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	x	x	[۴]	
۵	Sefidrud	BD	OE	1992 Manjil Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	[۵]	
۶	Sefidrud	BD	ER	1992 Manjil Eq.	✓	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓	x	[۶] 1:30 scaled model.	
۷	Pine Flat	GD	ER	1952 Taft Lincoln Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	x	x	x	[۷] 1:100 scaled model.	
۸	Pine Flat	GD	NS	1940 El Centro Eq.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	[۸]	
۹	Typical section , 90 m Height	GD	NS	1989 Loma Prieta Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	[۹] [۱۰]	
۱۰				1988 Saguenay Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	x		Scaled PGA=0.65g.
۱۱				1985 Nahanni Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	x		Scaled PGA=0.57g.
۱۲				1989 Loma Prieta Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	✓	x		Furrier Modified. Scaled PGA=0.45g.
۱۳				1988 Saguenay Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	✓	x		Furrier Modified Scaled PGA=0.45g.
۱۴				1985 Nahanni Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	x		Furrier Modified Scaled PGA=0.65g.
۱۵				S1.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x		Synthetic record.
۱۶				S2.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x		Synthetic record.
۱۷				S3.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	✓	x	x		Synthetic record.
۱۸	Pine Flat	GD	NS	1952 Taft Lincoln Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	x	✓	x	x	[۱۱] Natural rec. x 1.5.	

GD: سد وزنی، BD: سد پشت‌بنددار، OE: واقعه طبیعی، ER: مطالعه آزمایشگاهی، NS: مطالعه عددی

[۱]: (چوپرا و چاکرابارتی، ۱۹۷۳)، [۲]: (ویلکلسکی و همکاران، ۲۰۰۱)، [۳]: (میریدا و مایتی، ۲۰۱۴)، [۴]: (NAP، ۱۹۸۵)، [۵]: (قائمقامی و قائمیان، ۲۰۰۸)، [۶]: (قائمقامی و قائمیان، ۲۰۱۰)، [۷]: (قبارا و قائمیان، ۱۹۹۸)، [۸]: (الآیدی و هال، ۱۹۸۹)، [۹]: (USACE، ۲۰۰۳)، [۱۰]: (لیگر و لیکلر، ۱۹۹۶)، [۱۱]: (قائمیان و قبارا، ۱۹۹۹).

الگوهای خرابی بدست آمده

در ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها و تعیین سطوح عملکرد آن‌ها، آگاهی از نحوه‌ی خرابی سازه اهمیت ویژه‌ای دارد. چراکه مودهای محتمل گسیختگی آن‌ها از این طریق قابل‌شناسایی خواهند بود؛ اما آنچه در مورد سدهای وزنی بتنی مطرح است، منحصربه‌فرد بودن این ابرسازه‌ها است. هر سدی در ساختگاهی یگانه ساخته می‌شود و از این رو ابعاد و ویژگی‌ها خاص خود را دارد. همچنین رکوردهای مختلف زلزله نیز تأثیرات متفاوتی بر سازه دارند. لذا ارائه یکسری

الگوهای مشخص در خصوص خرابی سدها، مشابه آنچه در مورد ساختمان‌ها وجود دارد، کاری دشوار است. در این تحقیق با استفاده از جامعه‌ی آماری نسبتاً بزرگ بدست آمده از ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده و براساس آنچه تاکنون ارائه گردید، الگوهای خرابی سد وزنی پایین‌فالت شناسایی گردیده‌اند. برای این منظور کلیه پروفیل‌های ترک مشابه دسته‌بندی شدند و مشاهده گردید که به جز حالتی که هیچ ترکی در سد رخ نمی‌دهد، ۲۲ الگوی خرابی در مورد سد وزنی پایین‌فالت وجود دارد. این ۲۲

می‌شوند. در الگوهای خرابی ۲ و ۳ ترک کامل در تراز پایه تشکیل شده است. در الگوی خرابی ۲ علاوه بر تراز پایه، دو باند ترک گردن سد و بدنه سد از رویه پائین دست آغاز شده‌اند. الگوی خرابی ۳ شامل سه الگوی فرعی است. ویژگی اصلی الگوی ۳، تشکیل ترک کامل در تراز پایه و همچنین وجود ترک آغاز شده از رویه‌ی بالادست محدود به بالای سد است. علیرغم اینکه در تمامی الگوهای خرابی اصلی ۱ تا ۱۰ باند ترک در تراز پایه وجود دارد، اما فقط در سه الگوی خرابی اول تشکیل ترک کامل در تراز پایه ممکن است.

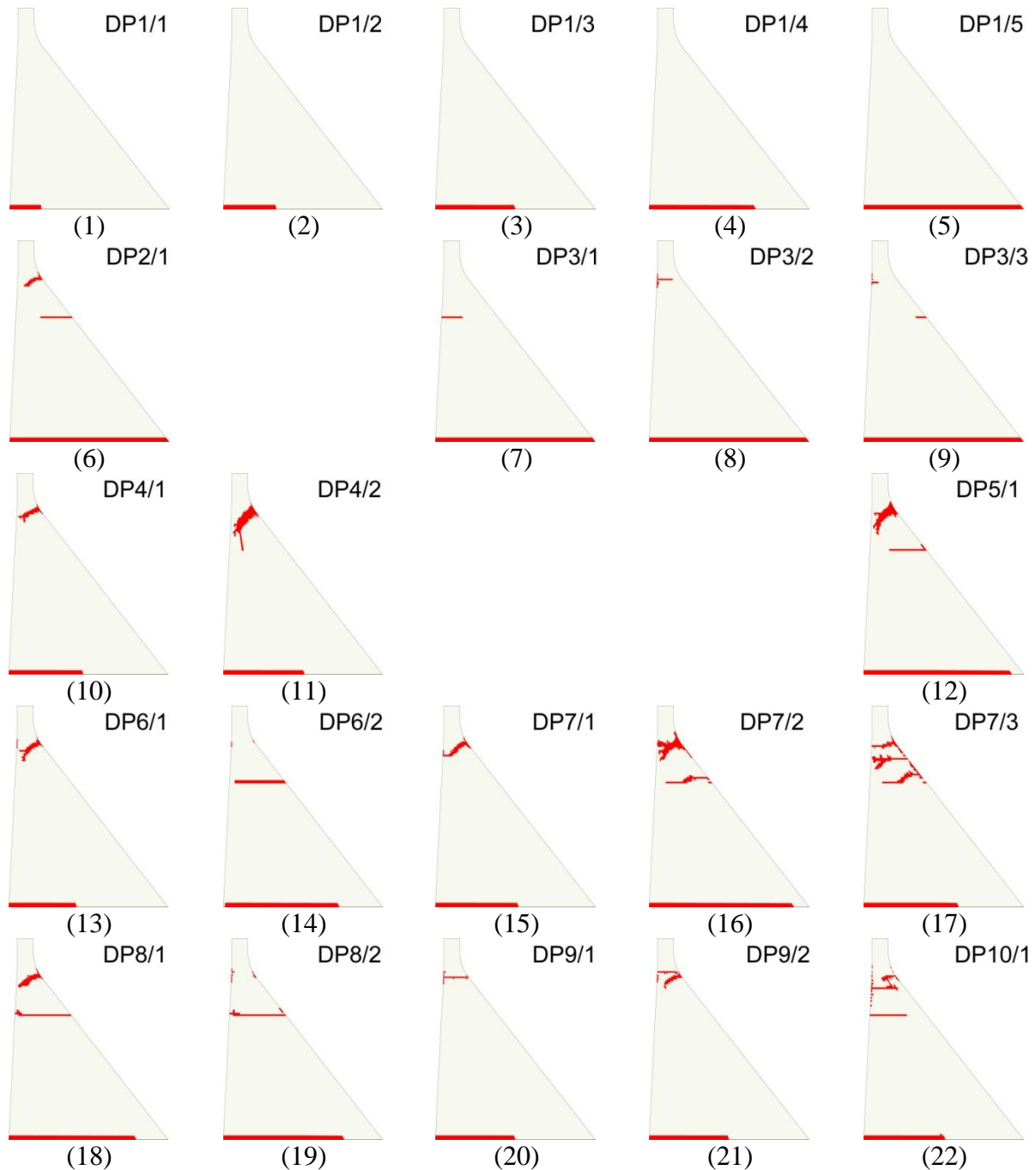
الگو نیز خود در غالب ۱۰ الگوی خرابی اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. جدول (۴) اطلاعات مربوط به ۱۰ الگوی خرابی اصلی و ۲۲ الگوی خرابی فرعی را براساس مسیرهای معرفی شده‌ی نفوذ باند ترک ارائه می‌دهد. هر الگوی خرابی می‌تواند شامل یک یا چند مسیر رشد ترک باشد. الگوهای خرابی در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. الگوی خرابی اصلی ۱ شامل ۵ الگوی فرعی است. در این الگو، خرابی سازه صرفاً در تراز پایه سد اتفاق افتاده است. الگوهای فرعی ۱ تا ۵ مربوط به نفوذ ترک در تراز پایه به ترتیب تا ۲۰٪، ۳۳٪، ۵۰٪، ۶۷٪ و ۱۰۰٪ طول تراز پایه

جدول (۴) معرفی الگوهای خرابی سد وزنی پایین‌فالت براساس مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک

ردیف	مشخصه اصلی	مشخصه فرعی	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	DP1	DP1/1	20%	x	x	x	x	x	x
2	DP1	DP1/2	33%	x	x	x	x	x	x
3	DP1	DP1/3	50%	x	x	x	x	x	x
4	DP1	DP1/4	67%	x	x	x	x	x	x
5	DP1	DP1/5	100%	x	x	x	x	x	x
6	DP2	DP2/1	100%	✓	x	✓	x	x	x
7	DP3	DP3/1	100%	x	x	x	x	x	✓
8	DP3	DP3/2	100%	x	x	x	x	✓	x
9	DP3	DP3/3	100%	x	x	✓	x	✓	x
10	DP4	DP4/1	✓	✓	x	x	x	x	x
11	DP4	DP4/2	✓	✓	✓	x	x	x	x
12	DP5	DP5/1	✓	✓	✓	✓	x	x	x
13	DP6	DP6/1	✓	✓	✓	x	x	✓	x
14	DP6	DP6/2	✓	✓	x	✓	x	✓	x
15	DP7	DP7/1	✓	100%	x	x	x	x	x
16	DP7	DP7/2	✓	100%	x	✓	x	x	x
17	DP7	DP7/3	✓	100%	x	✓	✓	x	x
18	DP8	DP8/1	✓	✓	x / ✓	100%	x	x	x
19	DP8	DP8/2	✓	✓	x	100%	x	✓	x
20	DP9	DP9/1	✓	x	x	x	x	100%	x
21	DP9	DP9/2	✓	✓	✓	x	x	100%	x
22	DP10	DP10/1	✓	✓	x / ✓	x	x	100%	✓

پائین دست آغاز می‌شوند. الگوی خرابی ۶ دارای دو الگوی فرعی است. ویژگی اصلی این الگو، ترک خوردگی رویه بالادست محدود به بالای سد، علاوه بر ترک‌های آغاز شونده از رویه‌ی پائین دست و ترک تراز پایه است.

الگوی خرابی ۴ مربوط به خرابی گردن سد بوده و در آن تمامی ترک‌های بخش بالای سد از وجه پائین دست آغاز شده‌اند. الگوی خرابی ۵ مشابه الگوی ۴ است، با این تفاوت که علاوه بر ترک گردن سد، ترک بدنه‌ی سد نیز در آن وجود دارد. در این الگو نیز تمامی ترک‌های بخش بالای سد از وجه

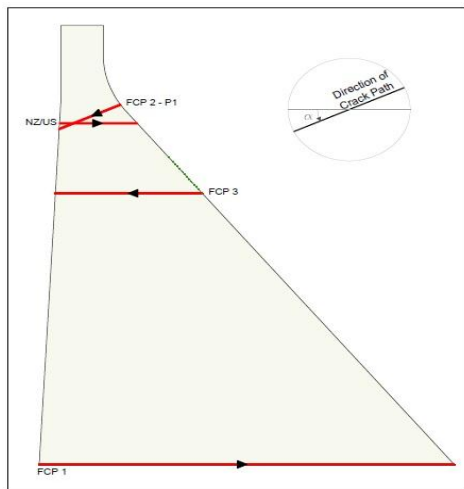


شکل (۵): الگوهای خرابی سد پائین‌فالت

داشته‌اند. الگوی خرابی ۸ دارای دو الگوی فرعی است. ویژگی اساسی این الگو تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی بدنه‌ی سد است. الگوی خرابی ۹ مربوط به تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد، توسط ترکی آغاز شونده از رویه بالادست است. در این الگو یا ترک رویه‌ی بالادست در کل عرض مقطع نفوذ می‌کند و یا با اتصال به ترکی دیگر، موجب تشکیل باند ترک کامل می‌شود. در الگوی خرابی ۹، ترک تراز

الگوی خرابی ۷ دارای چهار الگوی فرعی است. ویژگی اصلی این الگوی خرابی تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد است. در هر سه الگوی فرعی مربوط به الگوی ۷، باند ترک در تراز پایه سد وجود دارد. آنچه در این الگوی خرابی کاملاً واضح است این‌که تمامی ترک‌های محدوده‌ی بالای سد، ترک‌هایی هستند که از رویه‌ی پائین‌دست سد آغاز و نفوذ نسبتاً زیادی را در جهت مخالف (به سمت بالادست)

بنابراین پس از ایجاد وضعیت خرابی شدید (آستانه گسیختگی)، دو حالت می‌تواند رخ دهد. اول اینکه پاسخ سازه پس از رسیدن به سطح عملکرد آستانه گسیختگی در حدی نباشد که منجر به تشکیل سازوکارهای گسیختگی گردد. در حالت دوم، نیروی زلزله منجر به گسیختگی سد به سبب بروز خرابی خیلی شدید و کاهش سختی و مقاومت آن گردد.



شکل (۶): مسیرهای دارای امکان تشکیل ترک کامل

با توجه به موارد ذکر شده و بررسی پاسخ‌های دینامیکی سد، بررسی پروفیل‌های ترک در بدنه سد و بررسی الگوهای خرابی تعیین شده، گسیختگی کامل سازه مطابق با یکی از سناریوهای زیر می‌تواند اتفاق بیفتد:

- تشکیل ترک کامل در یکی از نواحی گردن یا بدنه‌ی سد و لغزش و یا واژگونی آزادانه‌ی بخش بالائی سد.
- تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی تراز پایه و لغزش کل سازه سد.
- تشکیل چند ترک کامل به‌واسطه گسترش ترک در بدنه سد در آن ایجاد می‌گردد و لغزش و یا واژگونی بخش‌های جداشده نسبت به هم.

این سناریوهای گسیختگی به‌صورت شماتیک در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

برای تشخیص وقوع گسیختگی در سد باید از یک معیار کمی استفاده نمود. این معیار می‌تواند یک یا ترکیبی از پارامترهای تقاضای مهندسی^۱ باشد. از جمله پارامترهای کنترلی که می‌توان در تشخیص سناریو گسیختگی از آن استفاده نمود، تغییرمکان افقی سازه در نقاط مشخص است. بدین‌صورت که

پایه تا محدوده‌های میانی تراز پایه از سمت بالادست به پائین دست نفوذ کرده است. همانند الگوی خرابی ۹، ویژگی اساسی الگوی ۱۰ تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد توسط ترکی آغاز شونده از رویه بالادست است. با این تفاوت که در الگوی ۱۰، در محدوده بالای سد باندهای ترک دیگری هم از وجه بالادست سد آغاز و به سمت پائین دست نفوذ کرده‌اند. در تمامی الگوهای خرابی ۷ تا ۱۰، ترک کامل تشکیل شده است.

الگوهای خرابی شناسایی شده نشان می‌دهند که امکان تشکیل ترک کامل فقط در مسیرهای C1، C2، C4 و C6 وجود دارد. این مسیرها در شکل (۶) معرفی شده‌اند. تشکیل ترک کامل در هر یک از این چهار مسیر علاوه بر بروز خرابی قابل توجه در سد، بیانگر مرحله قبل از گسیختگی است.

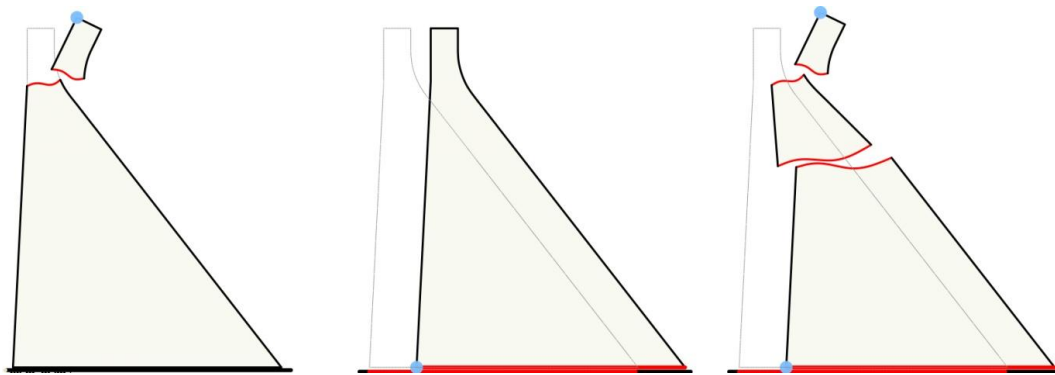
سناریوهای خرابی شناسایی شده

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید منحنی‌های IDA و الگوهای خرابی تعیین شده در این تحقیق مربوط به سطح عملکرد آستانه‌ی گسیختگی و یا سطوح عملکرد پائین‌تر از آن می‌باشند؛ زیرا کلیه نتایج در یکی از دو حالت اتمام مدت زلزله ورودی و یا زمان رخداد معیار اتمام تحلیل استخراج گردیده‌اند. در این تحقیق تشکیل ترک کامل یا خطای موازنه انرژی بیش از ۵٪ به‌عنوان معیار اتمام تحلیل و سطح خرابی آستانه گسیختگی (شدید) در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر کاملاً واضح است که گسیختگی کامل سد بعد از حالت خرابی شدید (آستانه گسیختگی) رخ می‌دهد. باین‌حال گسیختگی می‌تواند تحت همان رکورد منجر به وقوع حالت آستانه گسیختگی اتفاق بیفتد و یا می‌تواند تحت بارگذاری دیگر رخ دهد. لازم است که به مسئله گسیختگی سد در حالت اول توجه ویژه‌ای نمود. چراکه در این حالت تحت اثر نیروی زمین‌لرزه، معیار اتمام تحلیل می‌تواند در زمانی زودتر از زمان پایانی زلزله اتفاق بیفتد؛ بنابراین شاهد شرایطی متفاوت با واقعیت مسئله هستیم. در این حالت تحلیل عددی سازه در شرایطی متوقف شده است که در واقعیت مسئله، سازه‌ی سد همچنان تحت بارهای لرزه‌ای قرار دارد.

^۱. Engineering Demand Parameter (EDP)

برابر ۰/۰۸۸٪ در نظر گرفته شد. حریری اردبیلی و ساوموا (۲۰۱۴) به منظور سنجش کمی گسیختگی سدهای وزنی بتنی، مقدار ۰/۱٪ را به عنوان تغییرمکان نسبی معادل وقوع گسیختگی بر اساس قضاوت مهندسی بکار گرفته‌اند. ستوده و همکاران (۲۰۱۸) تغییرمکان معادل آستانه گسیختگی را در سد پایین فلت و در شرایط یکسان با فرضیات این تحقیق برابر ۵۲/۸۰ میلی‌متر تعیین نمودند. بدین ترتیب با توجه به ارتفاع ۱۲۲ متری سد پایین فلت می‌توان چنین اذعان داشت که تغییرمکان‌های نسبی بزرگ‌تر از ۰/۰۴۳٪ بعد از احراز شرایط حالت خرابی آستانه فروریزش می‌توانند منجر به گسیختگی سد گردند.

اگر پس از زمان وقوع معیار اتمام تحلیل، تغییرمکان افقی سازه کمتر از حداکثر پاسخ آن قبل از وقوع معیار مذکور باشد، گسیختگی رخ نداده و در غیر این صورت احتمال وقوع گسیختگی وجود خواهد داشت. ستوده (۱۳۹۶) نشان داد که پارامتر قدرمطلق حداکثر تغییرمکان تاج سد، پارامتری مناسب برای تخمین سطح عملکرد آستانه‌ی گسیختگی در سدهای وزنی بتنی است. به‌عنوان یک معیار می‌توان از یک مقدار حدی در خصوص تغییرمکان افقی و یا تغییرمکان نسبی بهره برد. الینگوود و تکیه (۲۰۰۱) برای تشخیص گسیختگی در انجام تحلیل شکنندگی سدهای وزنی از معیار حدی تغییرمکان نسبی برابر ۰/۱۸۸٪ استفاده نموده‌اند. در تحقیق انجام‌شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) این معیار



شکل (۷): نمایش شماتیک سناریوهای گسیختگی در سدهای وزنی بتنی

تراز پایه به معنای وقوع گسیختگی نهایی سد نیست و انهدام سد در اثر لغزش و یا واژگونی بخش بالای ترک کامل رخ می‌دهد. لذا سطح ایمنی لرزه‌ای این سازه‌های عظیم را می‌توان با محدود نمودن پاسخ تغییرمکان و یا تغییرمکان نسبی آن به یک مقدار حدی محافظه‌کارانه افزایش داد. از آنچه از مطالعه پاسخ‌های غیرخطی سد تحت اثر تحریکات حوزه‌ی نزدیک زمین مشاهده گردید، چنین برداشت می‌گردد که تجمع انرژی و انتقال آن در مدت‌زمان کوتاه و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه‌ی واقع در نزدیکی گسل، در مسیر پیشرو گسل، موجب دگرگونی توزیع رفتار غیرخطی سازه می‌گردد. بدین‌صورت که پاسخ سازه از حالت مودگونه که در آن یک یا چند مود تعیین‌کننده پاسخ نهایی سازه هستند (وضعیتی که عموماً تحت رکوردهای حوزه‌ی دور رخ می‌دهد)، خارج‌شده و به‌صورت موج‌گونه در می‌آید. در این

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش IDA ارزیابی لرزه‌ای و برآورد تقاضا و ظرفیت سد وزنی بتنی پایین‌فلت تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک صورت گرفت. مدل عددی این مطالعه شامل سیستم سازه - مخزن قرارگرفته بر روی فونداسیون صلب بود. همچنین وقوع ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد تنها مود گسیختگی لحاظ شده در این تحقیق بوده است. بررسی پروفیل‌های ترک بدست آمده از ۵۲۰ تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی انجام‌شده در این تحقیق نشان داد که می‌توان تعداد ۲۲ الگوی خرابی را در سدهای وزنی بتنی تحت بارهای لرزه‌ای حوزه نزدیک پالسیو متصور بود. همچنین بررسی الگوهای خرابی، سناریوهای گسیختگی مشخصی را نمایان ساختند. از این‌رو سه سناریو مختلف گسیختگی سد شناسایی گردیدند. این سناریوهای گسیختگی بیان می‌دارند که صرفاً تشکیل ترک کامل در بدنه سد و یا

- 8- Chopra AK, Chakrabarti P. (1973). The Koyna earthquake and the damage to Koyna Dam. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**: 381-397.
- 9- El-Aidi B, Hall J. (1998). Non-linear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Part 2: Behavior. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**: 853-865.
- 10- Ellingwood B, Tekie PB. (2001). Fragility analysis of concrete gravity dams. *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, **7**:41-48.
- 11- Ghaemmaghani AR, Ghaemian M. (2008). Experimental seismic investigation of Sefid-rud concrete buttress dam model on shaking table. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**:809-823.
- 12- Ghaemmaghani AR, Ghaemian M. (2010). Shaking table test on small-scale retrofitted model of Sefid-rud concrete buttress dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**:109-118.
- 13- Ghaemian, M. (2008). Manual of NSAG-DRI, a computer program for nonlinear seismic analysis of gravity dams including dam-reservoir-foundation interaction.
- 14- Ghaemian, M. and Ghojarah, A. (1999). Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction. *Engineering Structures*, **21**: 306-315.
- 15- Ghaemian, M. Noorzad, A. and MohammadNezhad, H. (2018). Assessment of foundation mass and earthquake input mechanism effect on dam-reservoir-foundation system response. *International Journal of Civil Engineering*; DOI: 10.1007/s40999-018-0325-9.
- 16- Ghojarah A, Ghaemian M. (1998). Experimental study of small scale dam models. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **124**:1241-1248.
- 17- Hariri-Ardebili, M. Mirzabozorg, H. (2014). Estimation of probable damages in arch dams subjected to strong ground motions using endurance time acceleration functions. *KSCCE Journal of Civil Engineering*; **18**:574-586.
- 18- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. (2014). Quantitative failure metric for gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**: 461-480; DOI: 10.1002/eqe.2481.
- 19- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. (2016). Probabilistic seismic demand model and optimal intensity measure for concrete dams. *Structural Safety*, **59**: 67-85.
- 20- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. Porter, K. (2016). Quantification of seismic potential failure modes in concrete dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **45**: 979-997; DOI: 10.1002/eqe.2697.
- 21- <http://peer.berkeley.edu/search/> [12 February 2013].
- 22- Leger, P. Leclerc, M. (1996). Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams. *Engineering Structures*, **18**(3):227-239.
- 23- Mridha S, Maity D. (2014). Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system. *Engineering Structures*, **80**(3): 289-297.

حالت پاسخ سازه توسط جمع اثرات امواج گذرنده از سازه تعیین می‌شود.

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها بخش مهمی از متدولوژی مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد است که با توجه به عملکرد سد وزنی بتنی در یک محیط سه‌گانه و عدم قطعیت‌های ذاتی^۱ و شناختی^۲ موجود موضوعی پیچیده است. حل این مسئله پیچیده با در نظر گرفتن خسارات مالی و جانی محتمل ناشی از گسیختگی سد اهمیتی دوچندان می‌یابد. لازمه‌ی توسعه این روش در سدهای وزنی بتنی آگاهی از عملکرد سازه به‌صورت کیفی و کمی است. شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای محتمل گسیختگی سد، مسیر تدوین و تبیین سطوح عملکرد سدها را به‌صورت شفاف هموار نموده و گامی اساسی در روند مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد است.

مراجع

- ۱- ستوده، محمدعلی. (۱۳۹۶). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سدهای وزنی بتنی با استفاده از منحنی شکنندگی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک. پایان‌نامه دکترا. گروه مهندسی عمران. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد علوم و تحقیقات تهران.
- 2- Alembagheri, M. and Ghaemian, M. (2013-A). Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **42**: 123-144.
- 3- Alembagheri, M. Ghaemian, M. (2013-B). Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**: 127-137.
- 4- Amirpour, A. and Mirzabozorg, H. (2014). Quantifying the qualitative limit-states using IDA approach in concrete arch dams. *Arabian Journal for Science and Engineering*; **39**: 7729 - 7740.
- 5- Baker J W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5):1486-1501.
- 6- Bhattacharjee SS, Leger P. (1993). Seismic Cracking and Energy Dissipation in Concrete Gravity Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**: 991-1007.
- 7- Bhattacharjee SS, Leger P. (1994). Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **120**: 1255-1271.

¹ Aleatory uncertainty

² Epistemic uncertainty

- 28- USACE, (2003). Em 1110-2-6051: Time–History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures. *Engineering Manual, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (USACE): Washington D.C. USA.*
- 29- Vamvatsikos, D. Cornel, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthq Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**: 491–514.
- 30- Wilcoski, J. Hall, RL. Gambill, JB. Matheu, EE. Chowdhury, MR. (2001). Seismic testing of a 1/20 scale model of Koyna dam. *Engineer Research and Development Center Champaign Construction Engineering Research Lab.*
- 31- Zhong, H. Lin, G. Li, X. Li, J. (2011). Seismic failure modeling of concrete dams considering heterogeneity of concrete. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**:1678–1689.
- 24- NATIONAL ACADEMY PRESS (NAP). (1985). Safety of Dams: Flood and Earthquake Criteria. *Committee on Safety Criteria for Dams, Water Science and Technology Board, National Research Council: Washington D.C. USA.*
- 25- Sharan S. (1986). Modeling of radiation damping in fluids by finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **23**:945–957.
- 26- Sotoudeh, M.A. Ghaemian, M. Sarvghad Moghadam, A. (2018). Determination of limit-states for near-fault seismic fragility assessment of concrete gravity dams. *Scientia Iranica*. DOI: 10.24200/sci.2018.20701.
- 27- Soysal B. F. Binici B. Arici Y. (2016). Investigation of the relationship of seismic intensity measures and the accumulation of damage on concrete gravity dams using incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **45**:719–737.

تخمین الگوهای خرابی و سناریوهای گسیختگی لرزه‌ای در سدهای وزنی بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی

محمدعلی ستوده^۱

محسن قائمیان*^۲

عبدالرضا سروقدمقدم^۳

چکیده

در حال حاضر رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد کامل‌ترین روش برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سازه‌ها است. چالش اصلی فرا روی توسعه این روش در سدهای وزنی بتنی، تعریف کیفی و کمی سطوح عملکرد سازه است. هدف اصلی این مقاله تخمین الگوهای خرابی و سناریوهای گسیختگی سد جهت ایجاد بستر لازم برای تعیین سطوح عملکرد لرزه‌ای آن است. از این رو با انتخاب سد وزنی پایین‌فلت به عنوان نمونه موردی، تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی بر روی سیستم سد- مخزن- فونداسیون صلب، تحت رکوردهای حوزه نزدیک دارای اثرات پیش‌روندگی، انجام شده است. سپس براساس نتایج بدست آمده نواحی بحرانی در بدنه‌ی سد با روشی نوین شناسایی و مجموعه‌ای از مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک در بدنه سد تعیین گردیده‌اند. اعتبار مسیرهای مذکور از طریق مقایسه با گزارش‌های منتشرشده در مراجع معتبر، بررسی و تأیید گردیده است. در این تحقیق مشاهده گردید که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، خرابی سازه در قالب الگوهای مشخص و محدودی رخ می‌دهد. همچنین تشکیل ترک کامل در بدنه‌ی سد فقط در چهار مسیر مشخص ممکن است که این رخداد به معنای گسیختگی نهائی سازه نیست. از این رو در این تحقیق علاوه بر تخمین الگوهای خرابی، سه سناریو گسیختگی برای سدهای وزنی بتنی شناسایی و تعریف گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که محدود نمودن پاسخ تغییرمکان سد و یا تغییرمکان نسبی آن به یک مقدار حدی محافظه‌کارانه می‌تواند سطح ایمنی این ابرسازه‌ها را تا حد زیادی ارتقا دهد.

واژه‌های کلیدی

مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد، سطوح عملکرد لرزه‌ای، مسیر ترک، نواحی بحرانی

۱. دکتری عمران - مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

*۲. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ghaemian@sharif.edu

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

مقدمه

حفاظت و نگهداری عالی از سدهای بتنی به دلایل متعددی از جمله محدودیت در منابع اقتصادی و زیست‌محیطی، مسائل سیاسی و اجتماعی و غیره اهمیت زیادی دارد. تجربیات زلزله‌های گذشته در خصوص سدهایی چون کوینا، سفیدرود، شینگ‌فینگ‌کیانگ و پاکویاما نشان دادند که سدهای بتنی در برابر بارهای لرزه‌ای سازه‌هایی آسیب‌پذیر هستند. وقوع زلزله‌های شدید منجر به ایجاد ترک‌های کششی بزرگی در بدنه‌ی سدهای بتنی می‌گردند که می‌توانند سازه را در وضعیت بحرانی قرار دهند. باینکه انهدام کامل هیچ سد بتنی بزرگی تحت بارهای لرزه‌ای تاکنون گزارش نشده، اما این ترک‌ها ظرفیت سازه را تا حد زیادی کاهش داده و امکان وقوع سازوکارهای گسیختگی مانند لغزش و یا واژگونی را افزایش می‌دهند. از این رو تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی با هدف پیش‌بینی مسیرهای رشد و توسعه ترک در بدنه‌ی سدهای بتنی انجام و مدل‌های شکست مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در فضای دو و سه‌بعدی ایجاد شده است (امیرپور و میرزا بزرگ (۲۰۱۴)). با این وجود مسئله تخمین رفتار لرزه‌ای سدها فقط به موضوع شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح ختم نمی‌شود. چراکه سدهای بتنی در یک سیستم سه‌گانه سد- مخزن- فونداسیون به تحریکات زمین‌لرزه پاسخ می‌دهند. تحلیل این سیستم سه‌گانه‌ی مختلط یک مسئله اندرکنشی پیچیده است که تلاش‌های زیادی در جهت حل آن صورت گرفته است (قائمیان، نورزاد و محمدنژاد (۲۰۱۷)). پیشرفت‌های حوزه‌ی مهندسی لرزه‌ای سد در کنار پیشرفت‌های دانش مهندسی کامپیوتر و افزایش توان محاسباتی موجب ارتقا روش‌های تحلیل سازه‌ای سدها شده است. روش‌هایی همچون تحلیل پلکانی چندگانه^۱ (MSA) (حریری اردبیلی و همکاران (۲۰۱۶))، تحلیل دینامیکی فزاینده^۲ (IDA) (عالم باقری و قائمیان (۲۰۱۳) الف و ب))، تحلیل ابری^۳ (CLA) (حریری اردبیلی و ساوموا^۴ (۲۰۱۶)) و تحلیل زمان تداوم^۵ (ETA) (حریری اردبیلی و

میرزابزرگ (۲۰۱۴)) از جمله روش‌های پیشرفته تحلیل سازه‌ای می‌باشند.

چنین گستره‌ای از دانش مهندسی ما را قادر به اتخاذ رویکرد مهندسی مبتنی بر عملکرد^۶ در مواجهه با موضوع رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی می‌سازد. با این حال نقاط تاریکی در این گسترش مفهومی به حوزه مهندسی سد وجود دارد. یکی از ارکان مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد^۷ تعریف سطوح عملکرد^۸ سازه است. در خصوص سدهای وزنی بتنی جز تعاریفی کیفی مانند عدم رهاسازی یک‌باره آب مخزن تحت حداکثر زلزله محتمل، تاکنون سطوح عملکرد لرزه‌ای به‌صورت شفاف تعریف نشده‌اند (ستوده، قائمیان و سروقدمقدم (۲۰۱۸)). در سال‌های اخیر تحقیقات معدودی در راستای تعریف کیفی و کمی سطوح عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی انجام شده است. عالم باقری و قائمیان (۲۰۱۳) الف) با انجام تحلیل‌های پوش‌اور و دینامیکی فزاینده غیرخطی حالات خرابی را در سدهای وزنی بتنی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رفتار سد را به دو محدوده‌ی الاستیک و غیرالاستیک تقسیم نمودند و گسیختگی کامل را پس از حالت خرابی شروع ترک‌خوردگی در گردن سد در نظر گرفتند. حریری اردبیلی و ساوموا (۲۰۱۴) شش سناریو برای رفتار لرزه‌ای سدهای وزنی بتنی و درنهایت گسیختگی آن‌ها پیشنهاد نمودند. آن‌ها شش حالت خرابی تعریف و حدود کمی برای وقوع آن‌ها در نظر گرفتند. سويسال^۹ و همکاران (۲۰۱۶) پنج حالت خرابی در سدهای وزنی بتنی تعریف نمودند. آن‌ها این پنج حالت خرابی را در راستای کمی‌سازی به پارامترهایی از پاسخ سازه مرتبط نموده و سناریوی رفتاری برای سد در نظر گرفتند. ستوده، قائمیان و سروقدمقدم (۲۰۱۸) موضوع تعیین سطوح عملکرد لرزه‌ای را در سدهای وزنی بتنی تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چهار سطح عملکرد شروع ترک‌خوردگی تراز پایه، حد تسلیم، شروع ترک‌خوردگی گردن سد و آستانه گسیختگی را تعریف و حدود کمی آن‌ها را با استفاده از تحلیل IDA و یک روش جامع آماری برای سد وزنی پایین‌فالت^{۱۰} تعیین نمودند.

^۶ Performance Based Engineering (PBE)

^۷ Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)

^۸ Performance levels

^۹ Soysal

^{۱۰} Pine Flat concrete gravity dam

^۱ Multiple Stripe Analysis (MSA)

^۲ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

^۳ Cloud Analysis (CLA)

^۴ Saouma

^۵ Endurance Time Analysis (ETA)

ترک، الگوهای خرابی سد شناسایی شده‌اند. مطالعه‌ی الگوهای خرابی و رفتار لرزه‌ای سازه، سناریوهای گسیختگی مشخصی را نمایان می‌سازد. از این رو در این تحقیق سه سناریو گسیختگی برای سدهای وزنی بتنی شناسایی و تعریف گردید. شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای محتمل گسیختگی با توجه به نقش مؤثر آن‌ها در تبیین و تعریف حالات خرابی^۳ و سطوح عملکرد سازه، گامی مهم در روند گسترش مفهومی رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد در سدهای وزنی بتنی به شمار می‌رود.

روش تحقیق

با توجه به مزایای متعدد روش IDA از جمله کارایی آن در ارزیابی لرزه‌ای و برآورد تقاضا و ظرفیت سازه‌های مختلف (وامواتسیکوس و کرنل^۴، ۲۰۰۲)، در این تحقیق از روش IDA برای ارزیابی لرزه‌ای سد وزنی بتنی پائین‌فلت و تعیین الگوهای خرابی آن استفاده شده است. فلوچارت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی در شکل (۱) ارائه گردیده است. در راستای انجام تحلیل‌های عددی، مدل اجزاءمحدود مقطع یکپارچه سد بدون هرگونه درز، ترک و صفحات مستعد لغزش و با لحاظ رفتار غیرخطی مصالح بتنی و صرف‌نظر از رفتار غیرخطی هندسی ایجاد گردیده است. تنها مود گسیختگی لحاظ شده اضافه تنش منجر به ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد است و از خردشدگی فشاری بتن چشم‌پوشی شده است. رفتار غیرخطی بتن سد با استفاده از مدل ترک پیوسته – مدل ترک پخش‌شده^۵ شبیه‌سازی شده است (باتاچارژی و لیگر^۶ (۱۹۹۳) و (۱۹۹۴)). مشخصات مصالح بتن سد در جدول (۱) درج گردیده است. در این مطالعه رفتار فشاری بتن، الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی مصالح

نام	نماینده	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	E_c	27.58	GPa
چگالی	ρ_c	2400.00	kg/m ³
نسبت پواسون	ν_c	0.20	----

هدف اصلی این مقاله رفع برخی از دشواری‌های توسعه رویکرد مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد در سدهای وزنی بتنی است. این هدف از طریق شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای گسیختگی سازه‌ی سد دنبال گردیده است. برای این منظور با استفاده از تحلیل IDA رفتار لرزه‌ای سد وزنی پائین‌فلت به‌طور کامل تعیین و منحنی‌های IDA و پروفیل‌های ترک^۱ استخراج گردیده‌اند. جهت انجام تحلیل IDA از ۲۶ رکورد حوزه نزدیک استفاده و مجموعاً ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده است. ویژگی‌های خاص رکوردهای حوزه نزدیک از جمله مدت‌زمان مؤثر کمتر آن‌ها نسبت به نگاشت‌های دور از گسل، وجود یک یا چند پالس ضربه‌ای با دامنه بزرگ و دوره تناوب زیاد در نگاشت سرعت، تجمع انرژی و انتقال آن در مدت‌زمان کوتاه به سازه از جمله مواردی هستند که منجر به پاسخ متفاوت سازه به تحریکات حوزه‌ی نزدیک زمین نسبت به حوزه‌ی دور می‌گردند. از این رو نخست به‌منظور اهمیت آگاهی از پاسخ‌های سیستم تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دوم در جهت کاهش تأثیرات ناشی از عدم قطعیت ذاتی ناشی از زمین‌لرزه، تحلیل‌ها صرفاً تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک دارای اثرات جهت‌پذیری انجام شده‌اند.

تعیین نواحی بحرانی در بدنه سد از طریق بررسی پارامتر تعدد ترک‌خوردگی المان‌های سازه از جمله نوآوری‌های این تحقیق است. پس از شناسایی نواحی بحرانی، موضوع محل شکل‌گیری اولین ترک و نحوه توسعه ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد مورد بررسی قرار گرفته و سپس مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک^۲ با بررسی کلیه پروفیل‌های ترک و تاریخچه ترک‌خوردگی المان‌های سازه، شناسایی و معرفی شده‌اند. گزارش‌های منتشرشده از وقایع طبیعی، نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی در مراجع معتبر، اعتبار مسیرهای ترک محتمل معرفی‌شده را تأیید می‌نمایند. بر مبنای مسیرهای ترک مذکور و با مشاهده، بررسی و دسته‌بندی پروفیل‌های

^۳. Damage states

^۴. Vamvatsikos and Cornel

^۵. Smearred Crack Model

^۶. Bhattacharjee and Leger

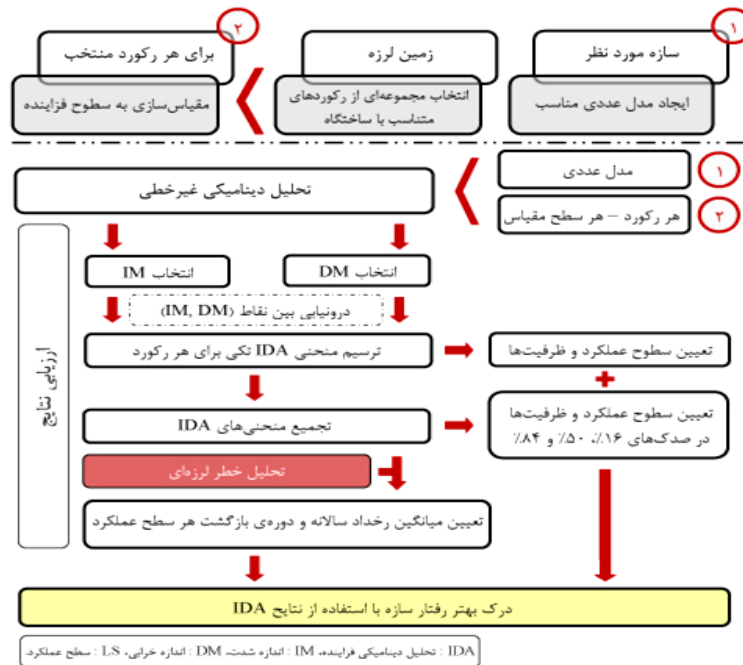
^۱. Critical locations

^۲. Probable path of crack extension

شده است (قائمیان ۲۰۰۸). علاوه بر اطلاعات ارائه شده، توضیحات بیشتر در مورد پارامترها و مشخصات تکمیلی در خصوص مدل‌سازی عددی و گزارش صحت‌سنجی توسط ستوده و همکاران (۲۰۱۸) ارائه گردیده است.

مقاومت کششی	σ_t	2.70	MPa
مقاومت فشاری	σ_c	27.00	MPa
انرژی شکست	G_f	300.00	N/m
ضریب افزایش مقاومت دینامیکی	---	1.20	----

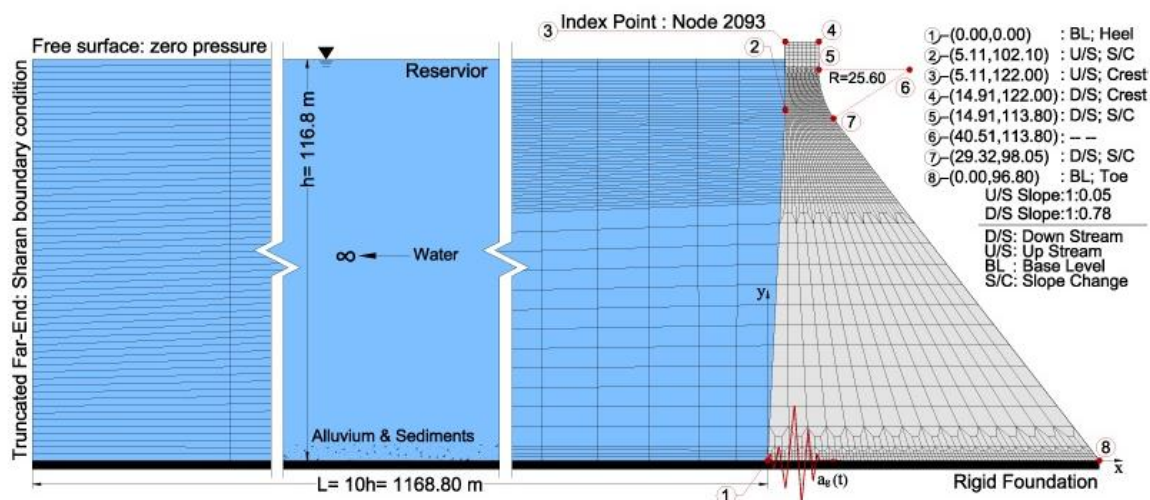
در این تحقیق از نرم‌افزار منبع باز NSAG-DRI برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سد بتنی وزنی استفاده



شکل (۱): فلوچارت روش تحلیل دینامیکی فراینده (IDA) (ستوده و همکاران، ۲۰۱۸)

شکل (۲) نشان داده شده است. در این مطالعه اثر جذب امواج در کف مخزن با فرض محافظه کارانه‌ی ضریب انعکاس برابر ۰/۸۲ لحاظ گردیده است (شاران، ۱۹۸۶). همچنین از فشار برکنش و همچنین فشار آب منفذی داخل ترک‌ها صرف‌نظر گردیده است.

با استفاده از نرم‌افزار مذکور اندرکنش سد و مخزن در مدل‌سازی انجام شده لحاظ گردیده و معادلات کوپله سد - مخزن با استفاده از تکنیک staggered displacement حل شده‌اند. مش‌بندی اجزا محدود، مشخصات هندسی مخزن و شرایط مرزی آن به همراه مقطع بزرگ‌ترین مونولیت غیرسرریز شونده‌ی سد پایین‌فالت را با ارتفاع ۱۲۲ متر در



شکل (۲): مدل اجزای محدود بزرگ ترین مونولیت غیرسرریز شونده‌ی سد پابین فلت به همراه مخزن (ستوده و همکاران، ۲۰۱۸)

انتخاب رکورد زمین لرزه و مقیاس سازی زلزله به منظور انتخاب رکوردهای مناسب برای انجام تحلیل IDA، شتاب‌نگاشت هر دو مؤلفه‌ی افقی ۱۳ زمین لرزه ثبت شده بر روی بستر سنگی و یا خاک سخت انتخاب شده‌اند (پی‌یر (۲۰۱۳)). تمام ۲۶ رکورد منتخب از نوع نزدیک گسل و دارای اثر جهت‌پذیری می‌باشند (بیکر (۲۰۰۷)). مشخصات رکوردهای منتخب در جدول (۲) درج گردیده است.

برای اعمال اثر میرایی از مدل میرایی الاستیک- ترد رایلی با صرف نظر از مؤلفه‌ی جرم سازه و محاسبه ضریب تناسب سختی با لحاظ نسبت میرایی بحرانی ۵٪ و مود اول سیستم سازه - مخزن قرار گرفته بر روی فونداسیون صلب استفاده شده است. این ضریب برابر ۰/۰۴۴ محاسبه گردیده است. گام‌های زمانی تحلیل دینامیکی برابر ۰/۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده و فقط مؤلفه افقی زلزله بر سازه و در پاشنه‌ی سد اعمال می‌گردد.

جدول (۲): لیست رکوردهای نزدیک گسل دارای اثر جهت‌پذیری منتخب

ردیف	نام زلزله	تاریخ	ایستگاه	M_s	فاصله از گسل	وضعیت بستر	مرجع طبقه‌بندی
1	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	TCU046	7.6	14.34	1/A	CWB/USGS
2	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	CHY006	7.6	14.93	1/C	CWB/USGS
3	Chi-Chi, Taiwan	1999/09/20	CHY035	7.6	18.12	1/C	CWB/USGS
4	Coalinga	1983/07/22	1651 Transmitter Hill	5.7	9.2	A	Gx.
5	Coyote Lake	1979/08/06	57383 Gilroy Array #6	5.6	3.1	B/B	Gx./USGS
6	Kocaeli, Turkey	1999/08/17	Gebze	7.8	17.0	A/A	Gx./USGS
7	Landers	1992/06/28	24 Lucerne	7.4	1.1	A/A	Gx./USGS
8	Mammoth Lakes	1980/05/25	54214 Long Valley dam (U/L Abut)	6.1	15.5	A	Gx.
9	Morgan Hill	1984/04/24	57217 Coyote Lake Dam (SW Abut)	6.1	0.1	A	Gx.
10	Morgan Hill	1984/04/24	57383 Gilroy Array #6	6.1	11.8	B/B	Gx./USGS
11	Northridge	1994/01/17	24207 Pacoima Dam (D/S)	6.7	8.0	A	Gx.
12	Northridge	1994/01/17	24207 Pacoima Dam (U/L)	6.7	8.0	A/A	Gx./USGS
13	San Fernando	1971/02/09	279 Pacoima Dam	6.6	2.8	B	USGS

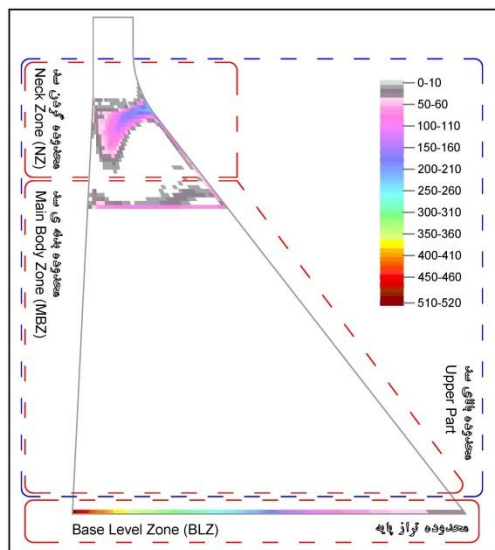
در این مطالعه هر زمین‌لرزه به بیست سطح فزاینده مقیاس شده است. عمل مقیاس‌سازی با پیگیری دو دیدگاه متفاوت انجام شده تا هم خصوصیات سازه و هم زلزله در تعیین سطوح بار لرزه‌ای لحاظ گردد. در دیدگاه اول، ایجاد شتاب‌نگاشت‌هایی با دامنه‌های ضعیف تا قوی موردنظر بوده است. از این رو هر رکورد به ۱۰ سطح فزاینده‌ی حداکثر شتاب زمین^۱ (PGA) از ۰/۱g تا ۱/۰g، با گام افزایشی ۰/۱g، مقیاس شده است. از طرف دیگر، مقدار شتاب طیفی زمین‌لرزه از خصوصیات زلزله همچون محتوای فرکانسی و دامنه‌ی ارتعاش آن و همچنین از خصوصیات سازه همچون میرایی و پریود ارتعاش آن تأثیر می‌پذیرد. لذا در دیدگاه دوم، انجام مقیاس‌سازی بر مبنای ایجاد سطوح فزاینده از مقدار شتاب طیفی در پریود مود اول ارتعاش سازه^۲ (Sa(5%, T1)) موردنظر بوده است. بدین ترتیب براساس دیدگاه دوم، ۱۰ ضریب مقیاس برای هر رکورد به نحوی تعیین گردیده‌اند که هر رکورد به ۱۰ سطح فزاینده‌ی Sa(5%, T1) از ۰/۱g تا ۱/۰g، با گام افزایشی ۰/۱g، مقیاس گردد. سپس این ضرایب مقیاس در شتاب‌نگاشت زلزله ضرب گردیده‌اند.

نتایج و بحث

در این تحقیق از نتایج تحلیل IDA و همچنین هر یک از ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده برای ارزیابی لرزه‌ای سد وزنی بتنی پایین‌فلت و تعیین الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای گسیختگی آن استفاده شده است که در ادامه نتایج مذکور مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که به منظور پرهیز از تکرار مطالب از ارائه منحنی‌های IDA و بحث پیرامون آن‌ها در این مقاله خودداری شده و اطلاعات بیشتر در این خصوص در مقاله دیگر نگارندگان ارائه گردیده است (ستوده و همکاران، ۲۰۱۸).

^۱. Peak Ground Acceleration (PGA)

^۲. First mode Spectral Acceleration; Sa(5%, T1)

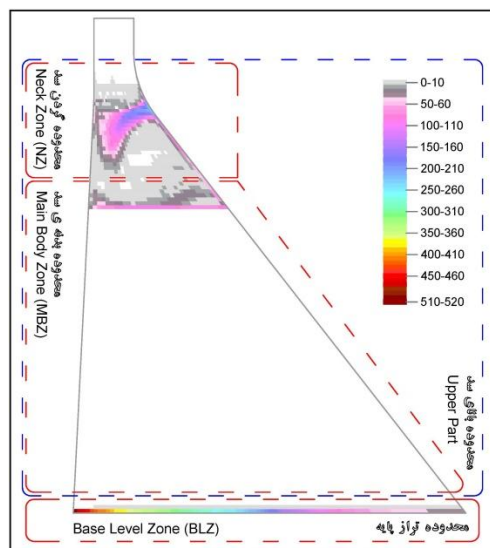


شکل (۳-ب): نمایش ترک خوردگی با فراوانی بیش از ۱۰ مرتبه

براساس شکل (۳) در شرایط مخزن پر و فونداسیون صلب، سه ناحیه بحرانی در بدنه‌ی سد شناسایی شده‌اند. محدوده‌ی تراز پایه^۱، محدوده‌ی بدنه سد^۲ و محدوده‌ی گردن سد^۳، سه ناحیه مستعد ترک خوردگی در سد وزنی می‌باشند. در این تحقیق به مجموع دو محدوده‌ی بدنه و گردن سد، محدوده‌ی بالای سد اطلاق می‌گردد. در شکل (۳-الف)، هر المانی که حتی یک بار هم ترک خوردگی را تجربه نموده، مشخص گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تعداد زیادی از المان‌ها کمتر از ۱۰ بار ترک خورده‌اند. گستردگی محدوده ترک خوردگی کمتر از ۱۰ بار، به دلیل تأثیرپذیری قابل توجه نتایج تحلیل دینامیکی از بار ورودی زلزله و تفاوت خصوصیات رکوردها است. همچنین مقیاس نمودن رکوردهای زمین‌لرزه می‌تواند موجب تغییر الگوی خرابی سازه گردد، به طوری که پروفیل‌های ترک دو مقیاس متوالی از یک رکورد، کاملاً با هم متفاوت باشند. چراکه مقیاس نمودن زمین‌لرزه با ضریب مقیاس بزرگ می‌تواند موجب تغییر خصوصیات حرکت زمین و در نتیجه ممکن است خطای سوگرفتگی^۴ رخ دهد. با توجه به اینکه در این مطالعه نتایج

نواحی بحرانی در بدنه سدهای وزنی بتنی

معمولاً سدهای بتنی حتی تحت زلزله‌های نه‌چندان شدید، ترک خوردگی در محدوده تراز پایه را تجربه می‌نمایند. محدوده‌ی دیگری که مستعد ترک خوردگی تحت بارهای لرزه‌ای است محدوده‌ی بالای سد، خصوصاً ناحیه تغییر شیب در گردن سد است (قائمیان و قبارا، ۱۹۹۹). در این تحقیق به منظور شناسایی دقیق‌تر نواحی بحرانی در بدنه‌ی سد، تعداد ترک خوردگی هر المان سازه‌ای در ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از نواحی بحرانی، نواحی مستعد ترک خوردگی در بدنه‌ی سد می‌باشند. شکل (۳) فراوانی ترک خوردگی المان‌های سازه را با استفاده از طیف رنگ نشان می‌دهد.



شکل (۳-الف): نمایش تعداد ترک خوردگی المان‌های سازه

^۱. Base Level Zone (BLZ)

^۲. Main Body Zone (MBZ)

^۳. Neck Zone (NZ)

^۴. Bias due to scaling

- در برخی از تحلیل‌ها که ترک کامل در تراز پایه شکل گرفته، باند ترک ابتدا از پاشنه تا نزدیکی پنجه‌ی سد نفوذ می‌نماید و سپس المان‌های محدوده‌ی پنجه سد دچار ترک‌خوردگی می‌شوند.
- تشکیل و رشد ترک در رویه‌ی پائین‌دست محدوده بحرانی بدنه سد، یا مانع تشکیل ترک در پنجه می‌گردد و یا سرعت نفوذ باند ترک در این ناحیه را کاهش می‌دهد.
- شروع ترک‌خوردگی از وجه بالادست محدوده‌ی بالای سد همواره بعد از تشکیل و رشد ترک در پاشنه سد رخ داده می‌دهد.
- حرکت نوسانی سد به بالادست و پائین‌دست می‌تواند منجر به بروز خرابی به هر دو صورت تدریجی و یکجا گردد. معمولاً در شدت‌های پائین زمین‌لرزه، خرابی به صورت تدریجی و در شدت‌های بالا، خرابی به صورت یکجا در بدنه سد رخ می‌دهد. منظور از خرابی تدریجی، شکل‌گیری پروفیل ترک در نوسانات مختلف سد در جهات بالادست و پائین‌دست است. حال آنکه در خرابی یکجا، تمامی پروفیل ترک در یک نوسان و در چند گام زمانی معدود بوجود می‌آید.

تحلیل سیستم تحت هر مقیاس از زمین‌لرزه به‌عنوان یک نمونه‌ی آماری مستقل موردتوجه قرار گرفته، لذا نگرانی در خصوص ایجاد سوگرفتگی نتایج وجود نخواهد داشت. به‌طوری‌که چنانچه به دلیل مقیاس سازی رکوردی خصوصیات ارتعاشی آن رکورد تغییر نماید، با توجه به ماهیت تصادفی زلزله، باز هم نتایج تحلیل صورت گرفته تحت آن رکورد به تنهایی ارزش مطالعاتی خواهد داشت.

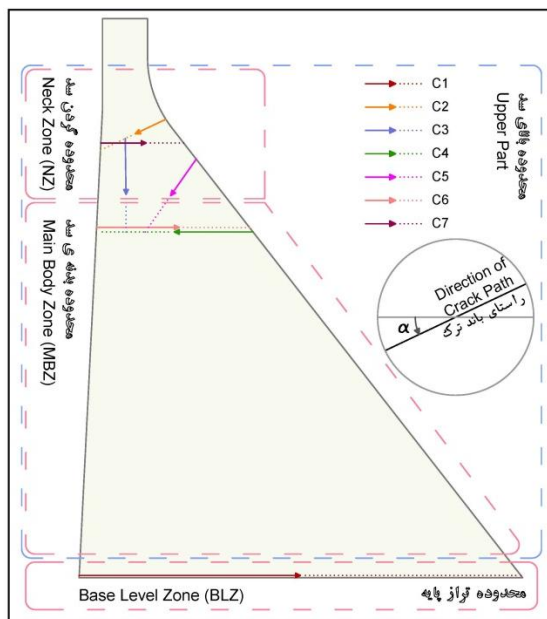
شکل (۳-ب) توزیع رنگی فراوانی ترک‌خوردگی المان‌های با تعدد بیش از ۱۰ بار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد مستعدترین محدوده ترک‌خوردگی، محدوده‌ی تراز پایه است. تمام سطح مشترک سد و فونداسیون می‌تواند وقوع ترک‌های کششی را تجربه نماید. با این حال از فراوانی ترک‌خوردگی در تراز پایه از سمت بالادست (پاشنه) به سمت پائین‌دست (پنجه) کاسته می‌شود. همچنین ترک‌خوردگی در محدوده‌ی گردن سد بیشتر از محدوده بدنه‌ی سد است. در محدوده بالای سد، تعدد ترک‌خوردگی در وجه پائین‌دست بیشتر از وجه بالادست است.

شکل‌گیری و توسعه ترک‌های کششی

از جمله مسائل موردتوجه این تحقیق تعیین محل اولین ترک‌خوردگی در بدنه سد و چگونگی گسترش آن است. با بررسی نتایج کلیه تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان موارد ذیل را در خصوص شکل‌گیری اولین ترک در بدنه سد بیان نمود:

- شکست اولین المان در اغلب تحلیل‌ها در محدوده بحرانی تراز پایه و در محل پاشنه سد بوده است.
- در موارد معدودی اولین المان ترک‌خورده در محل تغییر شیب پائین‌دست گردن سد واقع شده است.
- شکست اولین المان در هیچ‌یک از تحلیل‌ها در پنجه سد نبوده است.
- شکست اولین المان در هیچ‌یک از تحلیل‌ها در رویه بالادست محدوده بالای سد رخ نداده است.

برخی موارد دیگر که می‌توان با بررسی نتایج تحلیل‌ها از جمله پروفیل‌های ترک و ترتیب ترک‌خوردگی در خصوص توسعه ترک‌های کششی مطرح نمود، عبارتند از:



شکل (۴): نمایش شماتیک نواحی بحرانی و مسیرهای نفوذ ترک

مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک

پیش از بررسی الگوهای خرابی لازم است تا مسیرهای توسعه ترک در بدنه سد شناسایی و معرفی گردند. به‌منظور تعیین

مطالعات آزمایشگاهی موردتوجه قرار گرفته‌اند. البته با توجه به کمبود اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی در خصوص خسارات لرزه‌ای سدهای بتنی، نتایج برخی از تحقیقات عددی نیز مدنظر بوده‌اند. بدین منظور مسیرهای ترک مشاهده‌شده در گزارش‌های مربوط به مشاهدات میدانی، نتایج آزمایشگاهی و مطالعات عددی براساس مسیرهای محتمل ترک معرفی‌شده در جدول (۳) ارائه گردیده‌اند. با توجه به جدول (۳) می‌توان چنین اظهار نمود که مسیرهای ترک محتمل معرفی‌شده دارای اعتبار کافی می‌باشند.

مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک، پروفیل‌های ترک کلیه تحلیل‌های انجام‌شده در زمان انتهای تحلیل موردبررسی قرار گرفته‌اند. منظور از زمان انتهای تحلیل، پایان مدت رکورد زلزله و یا زمان تحقق معیار پایان تحلیل است. شکل (۴) مسیرهای محتمل نفوذ باند ترک را در بدنه‌ی سد، براساس آنچه در پروفیل‌های ترک مشاهده‌شده، به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. با هدف صحت سنجی مسیرهای ترک محتمل معرفی‌شده، مشاهدات صورت گرفته از ترک‌خوردگی سدهای وزنی بتنی در وقایع طبیعی و همچنین نتایج گزارش‌شده از

جدول (۳): مسیرهای نفوذ باند ترک گزارش‌شده در وقایع طبیعی، نتایج آزمایشگاهی و برخی مطالعات عددی

No.	Dam name	Dam type	Source	loading	Hor. comb.	Ver. comb.	Reservoir	Foundation	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Ref.
۱	Koyna	GD	OE	1967 Koynanagar Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	[۱]
۲	Koyna	GD	ER	sinusoidal motion	✓	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓	x	[۲] 1:20 scaled model.
۳	Koyna	GD	ER	sinusoidal motion	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x	[۳] 1:150 scaled model.
۴	Hsinfengkiang	BD	OE	1962 Heyuan Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	x	x	[۴]
۵	Sefidrud	BD	OE	1992 Manjil Eq.	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	[۵]
۶	Sefidrud	BD	ER	1992 Manjil Eq.	✓	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓	x	[۶] 1:30 scaled model.
۷	Pine Flat	GD	ER	1952 Taft Lincoln Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	x	x	x	[۷] 1:100 scaled model.
۸	Pine Flat	GD	NS	1940 El Centro Eq.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	[۸]
۹	Typical section , 90 m Height	GD	NS	1989 Loma Prieta Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	[۹] [۱۰]
۱۰				1988 Saguenay Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	x	
۱۱				1985 Nahanni Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	✓	x	x	x	
۱۲				1989 Loma Prieta Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	
۱۳				1988 Saguenay Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	
۱۴				1985 Nahanni Eq.	✓	x	✓	x	✓	x	x	✓	x	x	x	
۱۵				S1.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x	
۱۶				S2.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x	
۱۷				S3.	✓	x	✓	x	✓	✓	x	x	✓	x	x	
۱۸	Pine Flat	GD	NS	1952 Taft Lincoln Eq.	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	x	✓	x	x	[۱۱] Natural rec. x 1.5.

GD: سد وزنی، BD: سد پشت‌بنددار، OE: واقعه طبیعی، ER: مطالعه آزمایشگاهی، NS: مطالعه عددی

[۱]: (چوپرا و چاکرابارتی، ۱۹۷۳)، [۲]: (ویلکلسکی و همکاران، ۲۰۰۱)، [۳]: (میریدا و مایتی، ۲۰۱۴)، [۴]: (NAP، ۱۹۸۵)، [۵]: (قائمقامی و قائمیان، ۲۰۰۸)، [۶]: (قائمقامی و قائمیان، ۲۰۱۰)، [۷]: (قبارا و قائمیان، ۱۹۹۸)، [۸]: (الآیدی و هال، ۱۹۸۹)، [۹]: (USACE، ۲۰۰۳)، [۱۰]:

الگوهای خرابی بدست آمده

در ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها و تعیین سطوح عملکرد آن‌ها، آگاهی از نحوه‌ی خرابی سازه اهمیت ویژه‌ای دارد. چراکه مودهای محتمل گسیختگی آن‌ها از این طریق قابل‌شناسایی خواهند بود؛ اما آنچه در مورد سدهای وزنی بتنی مطرح است، منحصربه‌فرد بودن این ابرسازه‌ها است. هر سدی در ساختگاهی یگانه ساخته می‌شود و از این‌رو ابعاد و ویژگی‌ها خاص خود را دارد. همچنین رکوردهای مختلف زلزله نیز تأثیرات متفاوتی بر سازه دارند. لذا ارائه یکسری الگوهای مشخص در خصوص خرابی سدها، مشابه آنچه در مورد ساختمان‌ها وجود دارد، کاری دشوار است.

در این تحقیق با استفاده از جامعه‌ی آماری نسبتاً بزرگ بدست آمده از ۵۲۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام‌شده و براساس آنچه تاکنون ارائه گردید، الگوهای خرابی سد وزنی پایین‌فالت شناسایی گردیده‌اند. برای این منظور کلیه پروفیل‌های ترک مشابه دسته‌بندی شدند و مشاهده گردید که به جز حالتی که هیچ ترکی در سد رخ نمی‌دهد، ۲۲ الگوی خرابی در مورد سد وزنی پایین‌فالت وجود دارد. این ۲۲ الگو نیز خود در غالب ۱۰ الگوی خرابی اصلی طبقه‌بندی

می‌شوند. جدول (۴) اطلاعات مربوط به ۱۰ الگوی خرابی اصلی و ۲۲ الگوی خرابی فرعی را براساس مسیره‌ای معرفی‌شده‌ی نفوذ باند ترک ارائه می‌دهد. هر الگوی خرابی می‌تواند شامل یک یا چند مسیر رشد ترک باشد. الگوهای خرابی در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

الگوی خرابی اصلی ۱ شامل ۵ الگوی فرعی است. در این الگو، خرابی سازه صرفاً در تراز پایه سد اتفاق افتاده است. الگوهای فرعی ۱ تا ۵ مربوط به نفوذ ترک در تراز پایه به ترتیب تا ۲۰٪، ۳۳٪، ۵۰٪، ۶۷٪ و ۱۰۰٪ طول تراز پایه می‌شوند. در الگوهای خرابی ۲ و ۳ ترک کامل در تراز پایه تشکیل شده است.

در الگوی خرابی ۲ علاوه بر تراز پایه، دو باند ترک گردن سد و بدنه سد از رویه پائین‌دست آغاز شده‌اند. الگوی خرابی ۳ شامل سه الگوی فرعی است. ویژگی اصلی الگوی ۳، تشکیل ترک کامل در تراز پایه و همچنین وجود ترک آغازشده از رویه‌ی بالادست محدودده بالای سد است. علیرغم اینکه در تمامی الگوهای خرابی اصلی ۱ تا ۱۰ باند ترک در تراز پایه وجود دارد، اما فقط در سه الگوی خرابی اول تشکیل ترک کامل در تراز پایه ممکن است.

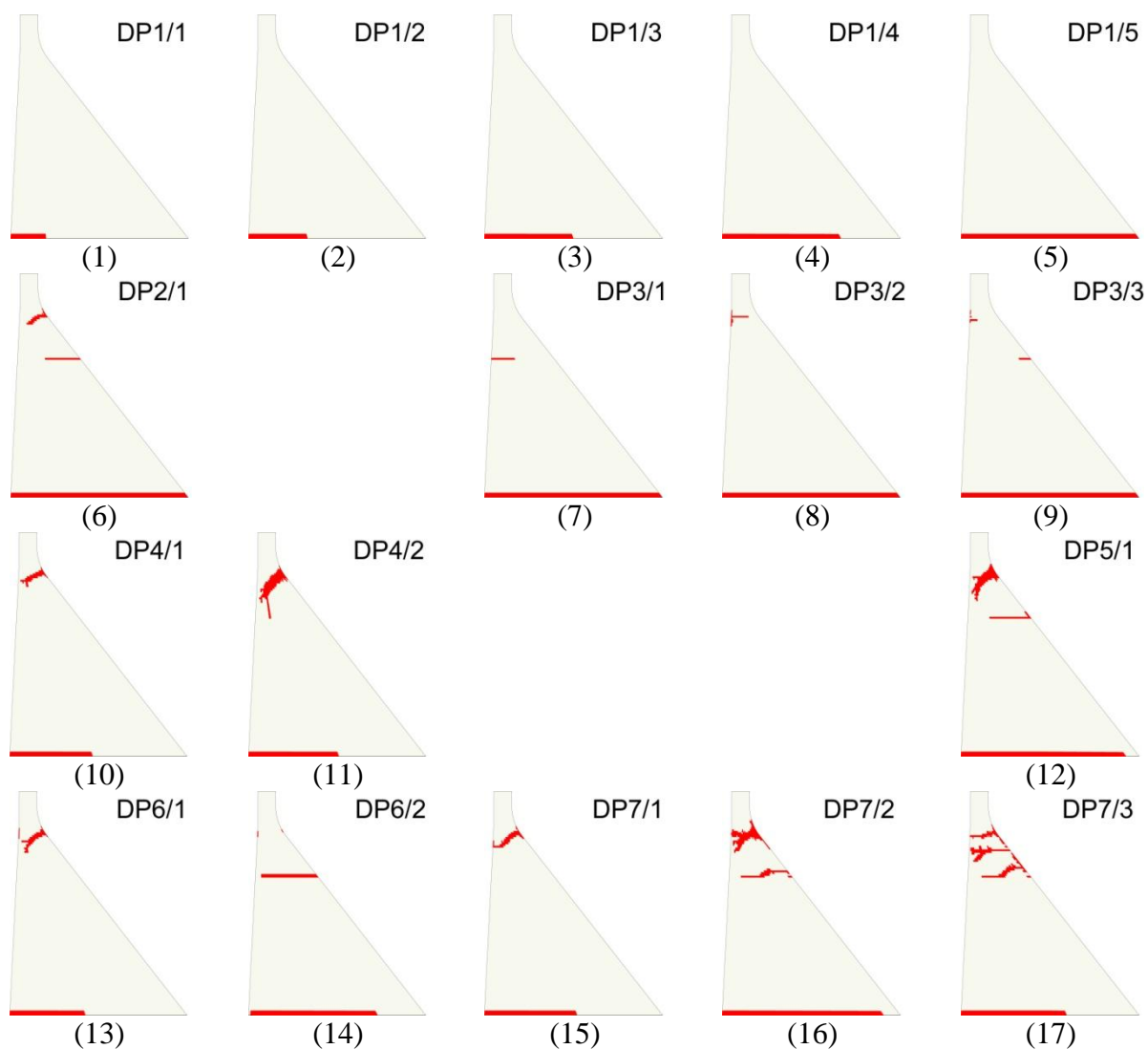
جدول (۴) معرفی الگوهای خرابی سد وزنی پایین‌فالت براساس مسیره‌ای محتمل نفوذ باند ترک

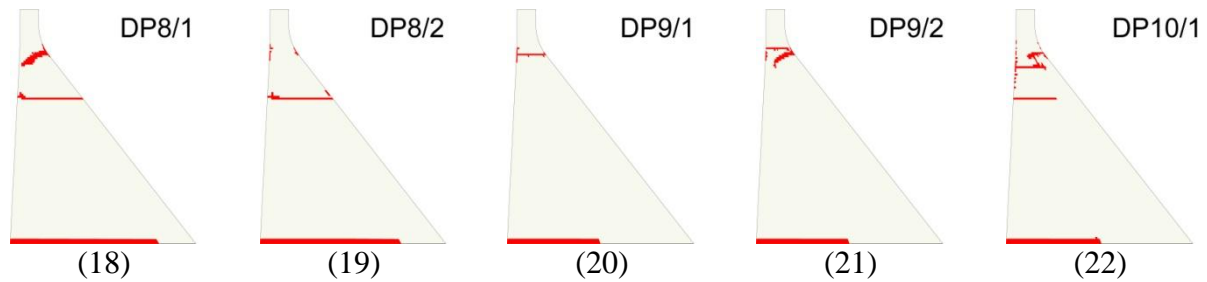
ردیف	مشخصه اصلی	مشخصه فرعی	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	DP1	DP1/1	20%	x	x	x	x	x	x
2	DP1	DP1/2	33%	x	x	x	x	x	x
3	DP1	DP1/3	50%	x	x	x	x	x	x
4	DP1	DP1/4	67%	x	x	x	x	x	x
5	DP1	DP1/5	100%	x	x	x	x	x	x
6	DP2	DP2/1	100%	✓	x	✓	x	x	x
7	DP3	DP3/1	100%	x	x	x	x	x	✓
8	DP3	DP3/2	100%	x	x	x	x	✓	x
9	DP3	DP3/3	100%	x	x	✓	x	✓	x
10	DP4	DP4/1	✓	✓	x	x	x	x	x
11	DP4	DP4/2	✓	✓	✓	x	x	x	x
12	DP5	DP5/1	✓	✓	✓	✓	x	x	x
13	DP6	DP6/1	✓	✓	✓	x	x	✓	x
14	DP6	DP6/2	✓	✓	x	✓	x	✓	x

15	DP7	DP7/1	✓	100%	×	×	×	×	×
16	DP7	DP7/2	✓	100%	×	✓	×	×	×
17	DP7	DP7/3	✓	100%	×	✓	✓	×	×
18	DP8	DP8/1	✓	✓	× / ✓	100%	×	×	×
19	DP8	DP8/2	✓	✓	×	100%	×	✓	×
20	DP9	DP9/1	✓	×	×	×	×	100%	×
21	DP9	DP9/2	✓	✓	✓	×	×	100%	×
22	DP10	DP10/1	✓	✓	× / ✓	×	×	100%	✓

پائین دست آغاز می‌شوند. الگوی خرابی ۶ دارای دو الگوی فرعی است. ویژگی اصلی این الگو، ترک خوردگی رویه بالادست محدودی بالای سد، علاوه بر ترک‌های آغاز شونده از رویه‌ی پائین دست و ترک تراز پایه است.

الگوی خرابی ۴ مربوط به خرابی گردن سد بوده و در آن تمامی ترک‌های بخش بالای سد از وجه پائین دست آغاز شده‌اند. الگوی خرابی ۵ مشابه الگوی ۴ است، با این تفاوت که علاوه بر ترک گردن سد، ترک بدنه‌ی سد نیز در آن وجود دارد. در این الگو نیز تمامی ترک‌های بخش بالای سد از وجه





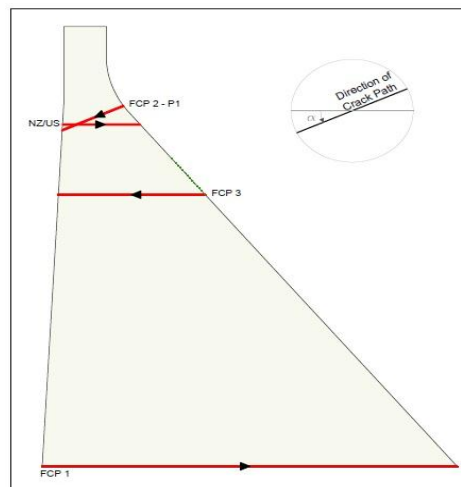
شکل (۵): الگوهای خرابی سد پائین فلت

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید منحنی‌های IDA و الگوهای خرابی تعیین‌شده در این تحقیق مربوط به سطح عملکرد آستانه‌ی گسیختگی و یا سطوح عملکرد پایین‌تر از آن می‌باشند؛ زیرا کلیه نتایج در یکی از دو حالت اتمام مدت زلزله ورودی و یا زمان رخداد معیار اتمام تحلیل استخراج گردیده‌اند. در این تحقیق تشکیل ترک کامل یا خطای موازنه انرژی بیش از ۵٪ به‌عنوان معیار اتمام تحلیل و سطح خرابی آستانه گسیختگی (شدید) در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر کاملاً واضح است که گسیختگی کامل سد بعد از حالت خرابی شدید (آستانه گسیختگی) رخ می‌دهد. با این حال گسیختگی می‌تواند تحت همان رکورد منجر به وقوع حالت آستانه گسیختگی اتفاق بیفتد و یا می‌تواند تحت بارگذاری دیگر رخ دهد. لازم است که به مسئله گسیختگی سد در حالت اول توجه ویژه‌ای نمود. چراکه در این حالت تحت اثر نیروی زمین‌لرزه، معیار اتمام تحلیل می‌تواند در زمانی زودتر از زمان پایانی زلزله اتفاق بیفتد؛ بنابراین شاهد شرایطی متفاوت با واقعیت مسئله هستیم. در این حالت تحلیل عددی سازه در شرایطی متوقف‌شده است که در واقعیت مسئله، سازه‌ی سد همچنان تحت بارهای لرزه‌ای قرار دارد. بنابراین پس از ایجاد وضعیت خرابی شدید (آستانه گسیختگی)، دو حالت می‌تواند رخ دهد. اول اینکه پاسخ سازه پس از رسیدن به سطح عملکرد آستانه گسیختگی در حدی نباشد که منجر به تشکیل سازوکارهای گسیختگی گردد. در حالت دوم، نیروی زلزله منجر به گسیختگی سد به سبب بروز خرابی خیلی شدید و کاهش سختی و مقاومت آن گردد.

الگوی خرابی ۷ دارای چهار الگوی فرعی است. ویژگی اصلی این الگوی خرابی تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد است. در هر سه الگوی فرعی مربوط به الگوی ۷، باند ترک در تراز پایه سد وجود دارد. آنچه در این الگوی خرابی کاملاً واضح است این‌که تمامی ترک‌های محدوده‌ی بالای سد، ترک‌هایی هستند که از رویه‌ی پائین‌دست سد آغاز و نفوذ نسبتاً زیادی را در جهت مخالف (به سمت بالادست) داشته‌اند. الگوی خرابی ۸ دارای دو الگوی فرعی است. ویژگی اساسی این الگو تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی بدنه‌ی سد است. الگوی خرابی ۹ مربوط به تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد، توسط ترکی آغاز شونده از رویه بالادست است. در این الگو یا ترک رویه‌ی بالادست در کل عرض مقطع نفوذ می‌کند و یا با اتصال به ترکی دیگر، موجب تشکیل باند ترک کامل می‌شود. در الگوی خرابی ۹، ترک تراز پایه تا محدوده‌های میانی تراز پایه از سمت بالادست به پائین‌دست نفوذ کرده است. همانند الگوی خرابی ۹، ویژگی اساسی الگوی ۱۰ تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی گردن سد توسط ترکی آغاز شونده از رویه بالادست است. با این تفاوت که در الگوی ۱۰، در محدوده بالای سد باندهای ترک دیگری هم از وجه بالادست سد آغاز و به سمت پائین‌دست نفوذ کرده‌اند. در تمامی الگوهای خرابی ۷ تا ۱۰، ترک کامل تشکیل شده است.

الگوهای خرابی شناسایی‌شده نشان می‌دهند که امکان تشکیل ترک کامل فقط در مسیرهای C1، C2، C4 و C6 وجود دارد. این مسیرها در شکل (۶) معرفی شده‌اند. تشکیل ترک کامل در هر یک از این چهار مسیر علاوه بر بروز خرابی قابل توجه در سد، بیانگر مرحله قبل از گسیختگی است.

پارامتر قدرمطلق حداکثر تغییرمکان تاج سد، پارامتری مناسب برای تخمین سطح عملکرد آستانه‌ی گسیختگی در سدهای وزنی بتنی است. به‌عنوان یک معیار می‌توان از یک مقدار حدی در خصوص تغییرمکان افقی و یا تغییرمکان نسبی بهره برد. الینگوود و تکیه (۲۰۰۱) برای تشخیص گسیختگی در انجام تحلیل شکنندگی سدهای وزنی از معیار حدی تغییرمکان نسبی برابر 0.1188% استفاده نموده‌اند. در تحقیق انجام‌شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) این معیار برابر 0.088% در نظر گرفته شد. حریری اردبیلی و ساوموا (۲۰۱۴) به‌منظور سنجش کمی گسیختگی سدهای وزنی بتنی، مقدار 0.1% را به‌عنوان تغییرمکان نسبی معادل وقوع گسیختگی براساس قضاوت مهندسی بکار گرفته‌اند. ستوده و همکاران (۲۰۱۸) تغییرمکان معادل آستانه گسیختگی را در سد پایین‌فالت و در شرایط یکسان با فرضیات این تحقیق برابر $52/80$ میلی‌متر تعیین نمودند. بدین ترتیب با توجه به ارتفاع 122 متری سد پایین‌فالت می‌توان چنین اذعان داشت که تغییرمکان‌های نسبی بزرگ‌تر از 0.43% بعد از احراز شرایط حالت خرابی آستانه فروریزش می‌توانند منجر به گسیختگی سد گردند.



شکل (۶): مسیرهای دارای امکان تشکیل ترک کامل

با توجه به موارد ذکرشده و بررسی پاسخ‌های دینامیکی سد، بررسی پروفیل‌های ترک در بدنه سد و بررسی الگوهای خرابی تعیین‌شده، گسیختگی کامل سازه مطابق با یکی از سناریوهای زیر می‌تواند اتفاق بیفتد:

- تشکیل ترک کامل در یکی از نواحی گردن یا بدنه‌ی سد و لغزش و یا واژگونی آزادانه‌ی بخش بالائی سد.

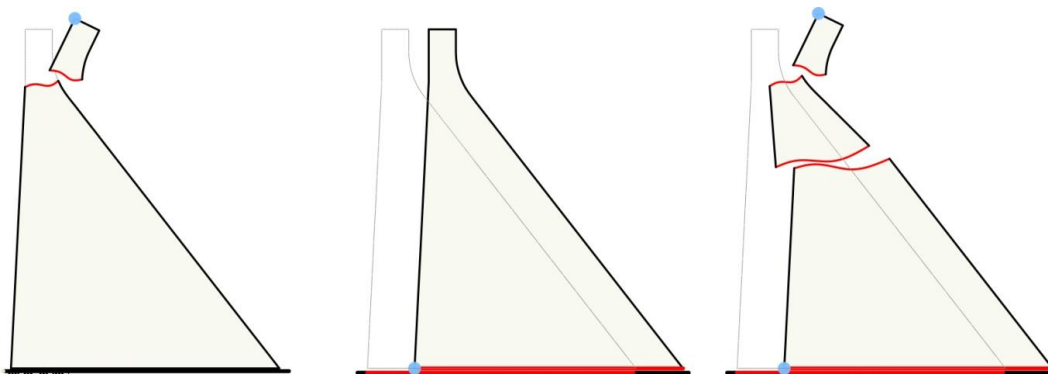
- تشکیل ترک کامل در ناحیه بحرانی تراز پایه و لغزش کل سازه سد.

- تشکیل چند ترک کامل به‌واسطه گسترش ترک در بدنه سد در آن ایجاد می‌گردد و لغزش و یا واژگونی بخش‌های جداشده نسبت به هم.

این سناریوهای گسیختگی به‌صورت شماتیک در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

برای تشخیص وقوع گسیختگی در سد باید از یک معیار کمی استفاده نمود. این معیار می‌تواند یک یا ترکیبی از پارامترهای تقاضای مهندسی^۱ باشد. از جمله پارامترهای کنترلی که می‌توان در تشخیص سناریو گسیختگی از آن استفاده نمود، تغییرمکان افقی سازه در نقاط مشخص است. بدین‌صورت که اگر پس از زمان وقوع معیار اتمام تحلیل، تغییرمکان افقی سازه کمتر از حداکثر پاسخ آن قبل از وقوع معیار مذکور باشد، گسیختگی رخ نداده و در غیر این صورت احتمال وقوع گسیختگی وجود خواهد داشت. ستوده (۱۳۹۶) نشان داد که

^۱ Engineering Demand Parameter (EDP)



شکل (۷): نمایش شماتیک سناریوهای گسیختگی در سدهای وزنی بتنی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش IDA ارزیابی لرزه‌ای و برآورد تقاضا و ظرفیت سد وزنی بتنی پایین‌فالت تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک صورت گرفت. مدل عددی این مطالعه شامل سیستم سازه - مخزن قرارگرفته بر روی فونداسیون صلب بود. همچنین وقوع ترک‌های کششی در بدنه‌ی سد تنها مود گسیختگی لحاظ شده در این تحقیق بوده است. بررسی پروفیل‌های ترک بدست آمده از ۵۲۰ تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی انجام‌شده در این تحقیق نشان داد که می‌توان تعداد ۲۲ الگوی خرابی را در سدهای وزنی بتنی تحت بارهای لرزه‌ای حوزه نزدیک پالسیو متصور بود. همچنین بررسی الگوهای خرابی، سناریوهای گسیختگی مشخصی را نمایان ساختند. از این رو سه سناریو مختلف گسیختگی سد شناسایی گردیدند. این سناریوهای گسیختگی بیان می‌دارند که صرفاً تشکیل ترک کامل در بدنه سد و یا تراز پایه به معنای وقوع گسیختگی نهایی سد نیست و انهدام سد در اثر لغزش و یا واژگونی بخش بالای ترک کامل رخ می‌دهد. لذا سطح ایمنی لرزه‌ای این سازه‌های عظیم را می‌توان با محدود نمودن پاسخ تغییرمکان و یا تغییرمکان نسبی آن به یک مقدار حدی محافظه‌کارانه افزایش داد. از آنچه از مطالعه پاسخ‌های غیرخطی سد تحت اثر تحریکات حوزه‌ی نزدیک زمین مشاهده گردید، چنین برداشت می‌گردد که تجمع انرژی و انتقال آن در مدت‌زمان کوتاه و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه‌ی واقع در نزدیکی گسل، در مسیر پیشرو گسل، موجب دگرگونی توزیع رفتار غیرخطی سازه می‌گردد. بدین صورت که پاسخ سازه از حالت مودگونه که در

آن یک یا چند مود تعیین‌کننده پاسخ نهایی سازه هستند (وضعیتی که عموماً تحت رکوردهای حوزه‌ی دور رخ می‌دهد)، خارج‌شده و به‌صورت موج‌گونه در می‌آید. در این حالت پاسخ سازه توسط جمع اثرات امواج گذرنده از سازه تعیین می‌شود.

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها بخش مهمی از متدولوژی مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد است که با توجه به عملکرد سد وزنی بتنی در یک محیط سه‌گانه و عدم قطعیت‌های ذاتی^۱ و شناختی^۲ موجود موضوعی پیچیده است. حل این مسئله پیچیده با در نظر گرفتن خسارات مالی و جانی محتمل ناشی از گسیختگی سد اهمیتی دوچندان می‌یابد. لازمه‌ی توسعه این روش در سدهای وزنی بتنی آگاهی از عملکرد سازه به‌صورت کیفی و کمی است. شناسایی الگوهای خرابی و تعیین سناریوهای محتمل گسیختگی سد، مسیر تدوین و تبیین سطوح عملکرد سدها را به‌صورت شفاف هموار نموده و گامی اساسی در روند مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد است.

مراجع

۱- ستوده، محمدعلی. (۱۳۹۶). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سدهای وزنی بتنی با استفاده از منحنی شکنندگی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک. پایان‌نامه دکترا. گروه مهندسی عمران. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد علوم و تحقیقات تهران.

2- Alembagheri, M. and Ghaemian, M. (2013-A). Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **42**: 123-144.

¹ Aleatory uncertainty

² Epistemic uncertainty

- functions. *KSCE Journal of Civil Engineering*; **18**:574–586.
- 18- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. (2014). Quantitative failure metric for gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**: 461–480; DOI: 10.1002/eqe.2481.
 - 19- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. (2016). Probabilistic seismic demand model and optimal intensity measure for concrete dams. *Structural Safety*, **59**: 67–85.
 - 20- Hariri-Ardebili, M. Saouma, V. Porter, K. (2016). Quantification of seismic potential failure modes in concrete dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **45**: 979–997; DOI: 10.1002/eqe.2697.
 - 21- <http://peer.berkeley.edu/search/> [12 February 2013].
 - 22- Leger, P. Leclerc, M. (1996). Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams. *Engineering Structures*, **18**(3):227-239.
 - 23- Mridha S. Maity D. (2014). Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system. *Engineering Structures*, **80**(3): 289-297.
 - 24- NATIONAL ACADEMY PRESS (NAP). (1985). Safety of Dams: Flood and Earthquake Criteria. *Committee on Safety Criteria for Dams, Water Science and Technology Board, National Research Council: Washington D.C. USA*.
 - 25- Sharan S. (1986). Modeling of radiation damping in fluids by finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **23**:945–957.
 - 26- Sotoudeh, M.A. Ghaemian, M. Sarvghad Moghadam, A. (2018). Determination of limit-states for near-fault seismic fragility assessment of concrete gravity dams. *Scientia Iranica*. DOI: 10.24200/sci.2018.20701.
 - 27- Soysal B. F. Binici B. Arici Y. (2016). Investigation of the relationship of seismic intensity measures and the accumulation of damage on concrete gravity dams using incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **45**:719–737.
 - 28- USACE, (2003). Em 1110-2-6051: Time–History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures. *Engineering Manual, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (USACE): Washington D.C. USA*.
 - 29- Vamvatsikos, D. Cornel, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthq Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**: 491–514.
 - 30- Wilcoski, J. Hall, RL. Gambill, JB. Matheu, EE. Chowdhury, MR. (2001). Seismic testing of a 1/20 scale model of Koyna dam. *Engineer Research and Development Center Champaign Construction Engineering Research Lab*.
 - 31- Zhong, H. Lin, G. Li, X. Li, J. (2011). Seismic failure modeling of concrete dams considering heterogeneity of concrete. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**:1678–1689.
 - 3- Alembagheri, M. Ghaemian, M. (2013-B). Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**: 127–137.
 - 4- Amirpour, A. and Mirzabozorg, H. (2014). Quantifying the qualitative limit-states using IDA approach in concrete arch dams. *Arabian Journal for Science and Engineering*; **39**: 7729 – 7740.
 - 5- Baker J W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5):1486–1501.
 - 6- Bhattacharjee SS. Leger P. (1993). Seismic Cracking and Energy Dissipation in Concrete Gravity Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**: 991–1007.
 - 7- Bhattacharjee SS. Leger P. (1994). Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **120**: 1255–1271.
 - 8- Chopra AK. Chakrabarti P. (1973). The Koyna earthquake and the damage to Koyna Dam. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**: 381-397.
 - 9- El-Aidi B. Hall J. (1998). Non-linear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Part 2: Behavior. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**: 853–865.
 - 10- Ellingwood B. Tekie PB. (2001). Fragility analysis of concrete gravity dams. *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, **7**:41–48.
 - 11- Ghaemmaghani AR. Ghaemian M. (2008). Experimental seismic investigation of Sefid-rud concrete buttress dam model on shaking table. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**:809–823.
 - 12- Ghaemmaghani AR. Ghaemian M. (2010). Shaking table test on small-scale retrofitted model of Sefid-rud concrete buttress dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**:109–118.
 - 13- Ghaemian, M. (2008). Manual of NSAG-DRI, a computer program for nonlinear seismic analysis of gravity dams including dam –reservoir- foundation interaction.
 - 14- Ghaemian, M. and Ghobarah, A. (1999). Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction. *Engineering Structures*, **21**: 306–315.
 - 15- Ghaemian, M. Noorzad, A. and MohammadNezhad, H. (2018). Assessment of foundation mass and earthquake input mechanism effect on dam–reservoir–foundation system response. *International Journal of Civil Engineering*; DOI: 10.1007/s40999-018-0325-9.
 - 16- Ghobarah A. Ghaemian M. (1998). Experimental study of small scale dam models. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **124**:1241–1248.
 - 17- Hariri-Ardebili, M. Mirzabozorg, H. (2014). Estimation of probable damages in arch dams subjected to strong ground motions using endurance time acceleration

Near-fault seismic damage patterns and failure scenarios prediction of concrete gravity dams using nonlinear incremental dynamic analysis

Mohammad Ali Sotoudeh¹

Mohsen Ghaemian^{*2}

Abdolreza Sarvghad Moghadam³

Abstract

Performance based earthquake engineering approach has been under evolution for seismic safety assessment of structures. Qualitative and quantitative definition of seismic performance levels is major challenge of concrete gravity dams. The main purpose of this article is damage patterns and failure scenarios prediction of structure while they prepare a suitable basement to determine dam seismic limit-states. Therefore nonlinear incremental dynamic analysis has been applied to dam-reservoir-rigid foundation system of Pine Flat gravity dam as a case study under the pulselike near-fault records. Then the critical zones of dam body have been recognized using a new way and a series of potential crack paths has been found. The mentioned above paths have been validated through comparing with authoritative published reports. We observed that the structure is damaged in certain patterns under near-fault records. Also formation of full crack in dam body is possible only in four paths before the possibility of total collapse. Hence three failure scenarios of concrete gravity dam have been defined in this research, in addition to damage patterns prediction. The results show that the safety level of concrete dam is increased substantially when the crest displacement response or drift ratio is limited to the conservative value.

Keywords

Performance-based earthquake engineering, seismic limit-states, crack path, critical zones

¹ candidate in the Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University (IAU), Tehran, Iran

² Professor in the Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor in the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran