تحلیل ترک در ارتباط با پایداری سدهای وزنی‌بتنی با استفاده از نرم‌افزار CADAM (مطالعه موردی: سد تنظیمی دز)

علی بهشتی[۱*] ، حسن کیامنش[۲]

۱) شرکت مهندسین مشاور آبساران، تهران، ایران

۲) دکتری عمران آب، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

***نویسنده مسئول: Beheshti_a@ymail.com**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۵**

چکیده

مطالعه حاظر به بررسی تنش و تحلیل ترک در سدهای وزنی-بتنی تحت شتاب ثابت حاصل از زمین‌لرزه در راستای افقی و زلزله‌های القایی تولید شده از جانب مخزن سد پرداخته است. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار CADAM انجام شد. هدف اصلی از محاسبات تنش، تعیین میزان کشش طول شکاف می‌باشد که بر اثر نیروهای اینرسی موجود در سد ایجاد می‌شوند و تأثیر این تنش‌ها بر پایداری سد بتنی می‌باشد. نرم‌افزار CADAM در سال ۲۰۰۳ در دانشگاه مونترال و برای تحلیل سدهای بتنی در حالات مختلف طراحی شده است. در این مقاله به تحلیل شکاف و تأثیر آن بر پایداری سد وزنی‌بتنی با بیشینه زلزله ۰/۲۸ g پرداخته شد و نتایج آن در هر درز اجرایی به صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفت. در تمامی درزها حداقل ضریب ایمنی در برابر پایداری (حداقل ۱/۳) حاصل شد. با مشاهده جداول نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که پایداری سد تنظیمی‌دز برای شتاب زلزله افقی معادل ۰/۲۸ g مناسب بوده هر چند ترک‌هایی در بدنه سد بوجود می‌آید اما باعث خرابی سد نمی‌شوند و تمامی پارامترهای بدست آمده در حالت زلزله و حالت عادی قابل قبول می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، نرم‌افزار CADAM، سدهای وزنی‌بتنی، سد تنظیمی دز.

مقدمه

سد وزنی اساسا یک سازه بتنی صلب است که به طور عمده توسط وزن خود در مقابل نیروهای وارده، مقاومت می‌کند. این سدها معمولاً در پلان مستقیم هستند، اما گاهی اوقات برای سازگاری با شرایط توپوگرافی محل به صورت خمیده یا زاویه‌دار نیز ساخته می‌شوند. اینگونه سدها، متداول‌ترین نوع سدهای وزنی‌بتنی، و ساده‌ترین نوع از نظر طراحی و ساخت هستند. سد پایدار، سازه‌ای وزنی است که علاوه بر وزن خود از وزن آب بر وجه بالادست نیز برای ایجاد پایداری سد استفاده می‌کند. بارهای زیر، عموماً در طراحی سدهای بزرگ و وزنی در نظر گرفته می‌شوند: بار مرده، فشار خارجی آب، فشار بالابرنده، فشار رسوب و خاک، نیروهای زمین‌لرزه، فشار یخ، فشار باد، درجه حرارت، فشار پائین اتمسفر، و عکس‌العمل پی (بیرامی، ۱۳۸۷). همچنین بطور معمول، شرایط بارگذاری ذیل در امر طراحی مد نظر قرار خواهد گرفت: ۱) شرایط ساخت: سد تکمیل شده، اما آب در مخزن و پایاب وجود ندارد؛ بار بر رویه پایین‌دست وارد می‌شود. ۲) شرایط ساخت با زمین‌لرزه: شتاب زمین‌لرزه در جهت پایین‌دست سد؛ آب در مخزن با بار باد در بالادست سد وجود ندارند. ۳) شرایط عملکرد نرمال: تراز مخزن در بالای دریچه‌های بسته سرریز یا در تاج سرریز سد، زمانی که تاج سرریز بدون دریچه می‌باشد؛ همراه با حداقل پایاب، بار مرده، و فشار برکننده موجود. ۴) شرایط سیلابی: مخزن و پایاب در ترازهای سیلاب حداکثر می‌باشد. فشارهای پایاب در مقابل مقاطع سرریز باید بر اساس ارتفاع تخلیه‌کننده انرژی تعیین شود؛ با این وجود، باید فشار کامل پایاب در تعیین فشارهای برکننده استفاده شود. ۵) شرایط عملکرد نرمال با زمین لرزه: شتاب زمین‌لرزه در جهت بالادست سد می‌باشد؛ سایر بارهای شرایط عملکرد نرمال، به غیر از فشار یخ، وجود دارند. سدهای بتنی از جمله سازه‌های هستند که شکست آنها به ویژه در هنگام زلزله خسارات جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد. تحلیل سدهای بتنی در برابر نیروهای خارجی و داخلی وارد بر آنها از دیر باز مورد توجه محققین و کارشناسان علم مهندسی سد بوده است و در این میان نحوه تحلیل دقیق میدان تنش‌های ایجاد شده در بدنه سد حایز اهمیت می‌باشد. هیچ سد بتنی بزرگی تا به حال در اثر زلزله و حرکت زمین بطور کامل شکسته نشده است، با وجودیکه سدهای بسیاری هستند که زمین لرزه‌های قوی را تجربه کرده‌اند. Ghanaat و Anjana (۲۰۱۲) در مقاله‌ای، طراحی سد با استفاده از روش مهندسی ارتش آمریکا ارائه نمودند. در این مقاله از نشریات ارتش آمریکا استفاده شده است و نتایج خود را با نتایج حاصله از برنامه‌های ANSYS و HEC RAS و دو برنامه لرزه‌نگاری مقایسه نموده‌لند. حیرانی و وثوقی‌فرد (۱۳۸۴) در مقاله‌ای طراحی لرزه‌ای سد را مطرح نمودند. این مطالعه بر اساس تأثیر زلزله بر روی سد است. نورزاد و نیک‌خواه (۱۳۸۲) پایداری سدها در اثر زمین لرزه‌های شدید را مورد بحث قرار دادند. این مطالعه با استفاده از آنالیز دینامیکی سدها با روش‌های سنتی طراحی شده و نتایج آن با اطلاعات بدست آمده از آنالیز نرم‌افزار ANSYS را مورد کنکاش قرار داده است. در سال ۱۹۶۷ سد کوینا که ۳۴۰ فوت ارتفاع دارد و یک سد وزنی در کشور هندوستان می‌باشد پس از زلزله‌ای با بزرگی ۴/۶ ریشتر سالم مانده است. بیشینه شتاب در افق g ۰/۵۱ عمود بر محور سد و شتاب ماکزیمم عمودی g ۰/۳۶ در سد اندازه‌گیری شد. ترک‌های قابل ملاحظه‌ای در هر دو

سطوح یکپارچه و غیر سرریزی بالادست و پایین‌دست ایجاد شد و بخش‌های یکپارچه سرریزی دچار خرابی نگشته‌اند(کمان‌بدست و منظوری، ۱۳۸۹). سد کریستال اسپرینگس یک سد قوسی وزنی با ارتفاع ۱۵۴ فوت که تنها ۰/۲۵ مایل از گسل سان آندراس فاصله دارد پس از زلزله ۱۹۰۶ سان فرانسیسکو با بزرگی حدوداً ۳/۸ ریشتر هیچ خرابی ظاهری در آن پدیدار نگشت (کمان‌بدست و منظوری، ۱۳۸۹). در سال ۱۹۹۵ سدهای سنگاری و آونو که در ۱۵ کیلومتری و ۳۰ کیلومتری شمال کانون زلزله در کوبی در ژاپن قرار دارند تحت زلزله‌ای به بزرگی ۲/۷ریشتر لرزانیده‌اند، اما هیچ‌گونه خرابی در آنها رخ نداده است (کمان بدست و منظوری، ۱۳۸۹). هدف از این تحقیق بررسی نتایج بدست آمده از نرم افزار CADAM و پیش بینی رفتار سازه سد بتنی RCC برای بیشترین شتاب گرانشی در منطقه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نیروهای اینرسی بوجود آمده بوسیله زلزله، از حاصلضرب جرم در شتاب محاسبه می‌شوند. تقویت دینامیکی نیروهای اینرسی در ارتفاع سد وابسته به میزان انعطاف‌پذیری آن، نادیده در نظرگرفته می‌شود. پس سیستم فونداسیون مخزن سد، به عنوان سیستم سخت (صلب) با دوره لرزش معادل صفر در نظر گفته می‌شود. مرحله آغازین قبل از زلزله: محاسبات هر زلزله در حالت سکون جهت تعیین موقعیت اولیه (آغازین)، قبل از اینکه نیروی اینرسی محرک زلزله به کار برده شود، شروع می‌شود. اگر ترک‌خوردگی در جایی باشد که شرایط بار ثابت باشد، طول شکاف و فشارهایی که بعداً مقدارشان افزایش یافته به عنوان شرایط اولیه برای محاسبات درنظر گرفته خواهد شد. هدف اصلی از محاسبات، تعیین تنش و میزان کشش طول شکاف می‌باشد که بر اثر نیروهای اینرسی که در سد بکار می‌روند، بوجود می‌آید. باید حداکثر مقدار شتاب زمین در محاسبات فشار تعیین شود. در این روش فرض می‌شود که شتاب می‌تواند شکاف سد را بوجود آورد. به هر حال تا زمانی که این شکاف برای دوره زمانی کوتاهی عمل کند، برای گسترش قابل توجه جابجایی‌ها در طول نقشه سد، مدت زمان کافی وجود نخواهد داشت. اگر جابجایی قابل توجهی وجود نداشته باشد، پایداری دینامیکی مورد توجه قرار خواهد گرفت. به هر حال اگر جاذبه مولکولی همزمان و توامان با محاسبات تعیین شده باشد ممکن است در اثر باز یا بسته‌تر شدن شکاف از بین رود. معمولاً برای انجام محاسبات پایداری مقدار شتاب تقویت شده را بین ۰/۶۷ تا ۰/۵ بیشترین مقدار شتاب در نظر می‌گیرند، به عبارت دیگر ضریب اطمینان میزان جابجایی با توجه به طول شکاف محاسبه می‌شود که این از محاسبات فشاری تعیین می‌گردد. فشارهای هیدرودینامیکی اعمال شده بر سد به عنوان وزن افزوده بر طبق فرمول‌های وسترگارد عمل می‌کند. گزینه‌هائی به قرار ذیل مقید شده‌اند: ۱) تصحیح به خاطر تراکم آب: بر طبق دوره‌ی غالب شتاب پایه سنگی یک فاکتور تصحیح جهت قوانین وسترگارد به کار می‌رود. (USACE, 1987). ۲) شیب سطح بالادست: فشارهای هیدرودینامیکی که در جهت جریان به سوی سطح فعالیت می‌کنند در جهت مخالف مخزن شتاب می‌گیرند. برای تبدیل این فشارها به سیستم مختصات جهانی دو گزینه وجود دارد که می‌توان یا از کسینوس مربع زاویه سطح بالادست عمودی (Cornell, 1968) یا کار استخراج شده از USBR

(1987) مطابق با آنچه Ambraseys و Meville (۱۹۸۲) ارائه داده‌اند تهیه کرد. ۳) عمق مخزن ماورای فشار افزوده شده وسترگارد: این روش اجازه می‌دهد که برخی از راهبردهای ایمنی سد مورد آزمایش قرار بگیرند. برای مثال در عمق بیشتر از ۶۰ متر، تغییرات فشار هیدرودینامیکی زیادی به نسبت عمق وجود ندارد. مقدار ارزشی محاسبه شده در عمق ۶۰ متری برای جائی در انتهای مخزن از نقطه تا کف مخزن ثابت باقی می‌ماند. فشار عمودی بایستی اثر تغییرات وزن حجمی آب متأثر از فشار هیدروستاتیکی عمودی بر سطح سد را کاهش یا افزایش دهد. با حذف فشار هیدروستاتیکی نمی‌توان بر شتاب عمودی اثر گذاشت گرچه کاربر ممکن است این گزینه را با بررسی جعبه خاص، فعال کند. تحلیل شبه‌دینامیکی بر اساس واکنش روش اسپکتر (طیف‌ها، زنجیرها) می‌باشد. تحلیل‌های شبه‌دینامیکی از نظر مفهومی مشابه تحلیل‌های شبه‌استاتیکی می‌باشند، بجز اینکه نیروهای اینرسی تقویت شده دینامیکی را در طول ارتفاع سد، تعیین کند گرچه نوسان طبیعی نیروهای اینرسی تقویت شده، در نظر گرفته نمی‌شود. آنچه که محاسبه می‌شود فشارها و تحلیل‌های پایداری هستند که همراه نیروهای اینرسی بکار برده شده در همان امتداد قرار دارند. با توجه به اینکه روش شبه‌دینامیکی نوسان طبیعی نیروهای زمین‌لرزه را تعیین نمی‌کند می‌توان از دو روش برای انجام دادن ارزیابی ایمنی استفاده کرد: الف) تحلیل تنش با بکار بردن نوک طیف‌های مقدار شتاب، ب) تحلیل ثبات با بکار بردن مقادیر شتاب طیف‌های نگه داشته شده. فرض بر این است که در این تحلیل‌ها، تقویت دینامیکی فقط در شتاب صخره‌ای افقی به کار برده می‌شود. دوره لرزشی سد در جهت عمودی، بطور مؤثر جهت حذف جنبش عمودی زمین در طول ارتفاع سد کوچک در نظر گرفته می‌شود. برای اطمینان از درستی روش شبه‌دینامیکی ساختار به لایه‌های نازکی جهت تعیین تلفیق عددی تقسیم می‌شوند. کاربر ممکن است بیشتر از ۳۰۱ بخش را مشخص کند. انعطاف‌پذیری دینامیکی ساختار بتن دینامیکی یانگ الگوبرداری می‌شود (E_S). الاستیسیته بتن سد تنظیمی دز در قسمت سخت (انعطاف‌ناپذیر) فنداسیون، بدون واکنش مخزن، جهت محاسبه رطوبت فونداسیون مخزن لازم است. هرگونه تغییراتی در پارامترهای اساسی بر دوره نهایی لرزش و رطوبت سیستم فونداسیون مخزن سد تأثیر می‌گذارد و در این روش کاربرد خواهد داشت. بنابراین قوانین را بدون شتاب طیف ارزیابی می‌کند. ضریب انعکاس امواج (a) نسبت دامنه فشار امواج هیدرودینامیکی انعکاس یافته به نسبت امواج فشار انتشار یافته عمودی که به مخزن خورده باشد. میزان ($a = 1$) نشان‌دهنده انعکاس کامل موج‌های فشاری باشد و مقدار کمتر از آن برای a نشان‌دهنده مواد قابل جذب می‌باشد. سرعت موج‌های فشار در آب، در حقیقت سرعت صدا در آب است که عموماً ۱۴۴۰ متر بر ثانیه می‌باشد. وسترگارد مراحل توده را با امکان تصحیح رویه شیب‌دار اضافه کرد. سد مورد مطالعه سد تنظیمی دز در استان خوزستان، شهرستان دزفول با ارتفاع ۲۰ متر و حداکثر ارتفاع مخزن ۱۷/۸ متر و حداکثر تراز پایین‌دست سد ۱۵/۲ متر است. در این مطالعه سد تنظیمی دز با بیشترین شتاب گرانشی زمین در استان خوزستان مورد مطالعه قرار گرفت که برابر g ۰/۲۸ می‌باشد.

نتایج و بحث

در جدول۱ تمامی پارامترهای پایداری محاسبه شده توسط نرم‌افزار CADAM نمایش داده شده است. با مشاهده جدول زیر می‌توان به این نتیجه رسید که پایداری این سد برای شتاب زلزله افقی معادل ۰/۲۸ g مناسب بوده هر چند ترک‌هایی در بدنه سد بوجود می آید اما باعث خرابی سد نمی‌شوند و تمامی پارامترهای بدست آمده در حالت زلزله و حالت عادی قابل قبول است.

جدول ۱: پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار CADAM

usual combination (stability analysis)							
uplift	safety factors						
final force (KN)	uplifting	overturning		siding		joint	
		toward d/s	toward u/s	residual	peak	upstream elevation(m)	id
	>100	>100	>100	>100	>100	139.2	1
	>100	>100	>100	>100	>100	138.2	2
74	0.101	0.101	0.101	>100	>100	137.2	3
167	0.061	0.061	0.062	79.312	>100	136.2	4
271	0.048	0.048	0.049	53.76	76.777	135.2	5
385	0.041	0.041	0.044	41.803	59.7	134.2	6
509	0.037	0.037	0.042	35.388	50.539	133.2	7
642	0.035	0.035	0.043	32.099	45.842	132.2	8
785	0.034	0.034	0.046	30.098	42.984	131.2	9
936	0.033	0.033	0.048	28.745	41.052	130.2	10
1097	0.033	0.033	0.052	27.764	39.651	129.2	11
1268	0.033	0.033	0.055	27.017	38.585	128.2	12
1447	0.033	0.033	0.059	26.428	37.743	127.2	13
1636	0.034	0.034	0.063	25.949	37.059	126.2	14
1834	0.034	0.034	0.067	25.552	36.492	125.2	15
2041	0.034	0.034	0.07	25.217	36.013	124.2	16
2258	0.035	0.035	0.074	24.929	35.602	123.2	17
2484	0.035	0.035	0.077	24.679	35.245	122.2	18
2719	0.035	0.035	0.081	24.459	34.931	base	19
	1.2	1.2	1.2	1.5	3	requred	

نتیجه‌گیری

مطالعه حاظر به بررسی تنش و تحلیل ترک در سدهای وزنی‌بتنی تحت شتاب ثابت حاصل از زمین‌لرزه در راستای افقی و زلزله‌های القایی تولید شده از جانب مخزن سد پرداخته است. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار CADAM انجام شد. هدف اصلی از محاسبات تنش، تعیین میزان کشش طول شکاف می‌باشد که بر اثر نیروهای اینرسی موجود در سد ایجاد می‌شوند و تأثیر این تنش‌ها بر پایداری سد بتنی می‌باشد. نرم‌افزار CADAM در سال ۲۰۰۳ در دانشگاه مونترال و برای تحلیل سدهای

بتنی در حالات مختلف طراحی شده است. این مقاله تحلیل شکاف و تأثیر آن بر پایداری سد وزنی‌بتنی با بیشینه زلزله ۰/۲۸ g است و نتایج آن در هر درز اجرایی به صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفت. در تمامی درزها حداقل ضریب ایمنی در برابر پایداری (حداقل ۱/۳) حاصل شد. با مشاهده جداول نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که پایداری سد تنظیمی‌دز برای شتاب زلزله افقی معادل ۰/۲۸ g مناسب بوده هر چند ترک‌هایی در بدنه سد بوجود می‌آید اما باعث خرابی سد نمی‌شوند و تمامی پارامترهای بدست آمده در حالت زلزله و حالت عادی قابل قبول می‌باشند.

منابع

ابریشمی، ج. و وهاب رجایی، ن. (۱۳۸۴). سدهای بتنی طرح و اجرا، انتشارات آستان قدس رضوی.

بیرامی، م. ک. (۱۳۸۷). سازه‌های انتقال آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ هفتم، زمستان۱۳۸۷.

حیرانی، ز. (۱۳۸۴). بررسی مسائل لرزه‌ای سدهای وزنی‌بتنی و خاکی بر اساس مشاهدات. اولین همایش بین‌المللی زلزله و سبک‌سازی ساختمان، دوم و سوم مهرماه۱۳۸۴.

کمان بدست، ا. ع. و آقامجیدی، ر. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری سدخاکی مارون توسط نرم افزار ANSYS. اولین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برق آبی تهران، ۱۹ بهمن ۱۳۹۰، تهران، ایران.

کمیته ملی سدهای بزرگ ایران. (۱۳۷۷). مهندسی پیشرفته در طراحی، ساخت و بازسازی سدها، جلد دوم.

نورزاد، ع و نیک‌خواه، م. (۱۳۸۲). بررسی و آنالیز دینامیکی سدهای طراحی شده با روش‌های سنتی (مطالعه موردی سد Koyna).۲۳ و ۲۴ اردیبهشت ماه، تهران.

Ambraseys, N. N. and Meville, C. P. (1982). A History of persian earthquakes,cambridge press, London.

CADAM. (2001). User's Manual, Version 1.4.3, April 2001.

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull Seis Soc Am, 58(5), pp: 1586-1606.

FERC, (Federal Energy Regulatory Commission). (1991). Engineering Guidelines for Evaluation of Hydropower Projects, Chapter III, Gravity Dams. Federal Energy Regulatory Commission, Office of Hydropower Licensing, Report No. FERC 0119-2, Washington D, USA.

Ghanaat, Y. and Anjana, K. (2012). Chodgar Sesmic Design and Evaluation of Concrete Dams, An Engrineering Manual.

Johangara, F. and Lotfi, V. (1991). Dynamic analysis of concrete gravity dams by combination of boundary elements method and finite element method. First International conference on seismology and earthquake engineering Tehran.

Kaila, K. L. and Narian, H. (1971). A New Approach for the preparation of quantitative seismicity maps. Bull Seic Soc Amer, 61(1), p: 275-91.

Khoshnudian, F. And Lotfi, V. (1991). Dynamic analysis of concrete gravity dams by combination of boundary elements method and finite element method. First international conference on seismology and earthquake engineering .Tehran .p.261-268

Lo, K. Y., Ogawa, T., Lukajic, B., Tsui, K. K. and Wang, S. (1990). Evaluation of Strength Parameters of Concrete-rock Interface for Dam Safety Assessment, Canadian Dam Safety Conference, Toronto, pp. 71-94.

Sila Tripati, B., Ramalingeswara, S., Shashikala, R., Vijendra, R. and Vijay, Kh. (2009). Analysis of timber and coating material on an iron anchor recovered off Aguada Bay, Goa. Current Science, 97(9), pp. 1361-1368.

Tao, W., Xianqian, Z. and Jianmin, Z. (2008). Research on choice of dam foundation elevation in hydropower engineering.

USBR, (United States Bureau of Reclamation). (1987). Design of Small Dams. Denver, Colorado.

Zienkiewicz, O. C. (1963). Stress analysis of Hydraulic Structures, including Pore Pressures Effects. Water Power, March, pp. 104-108.

Crack analysis related to the stability of gravity and concrete dams using CADAM software (Case study: Dez regulatory dam)

Ali Beheshti[*1], Hassan Kiamanesh[2]

1) Absaran consulting engineers, Tehran, Iran

2) PhD in Water Civil Engineering, Khuzestan Water and Electricity Organization, Ahvaz, Iran.

[*]**Correspondence Author:** Beheshti_a@ymail.com

Received Date: 2021. 04. 14 **Accepted Date: 2021. 08. 27**

Abstract

The present study investigates the stress and crack analysis in weighted concrete dams under constant acceleration resulting from earthquakes in the horizontal direction and induced earthquakes generated by the dam reservoir. This analysis was performed using CADAM software. The main purpose of stress calculations is to determine the amount of tensile length of the gap that is created by the inertial forces in the dam and the effect of these stresses on the stability of the concrete dam. CADAM software was developed in 2003 at the University of Montreal to analyze concrete dams in a variety of situations. In this paper, the gap and its effect on the stability of the concrete weight barrier with a maximum earthquake of 0.28 g were analyzed and the results were analyzed separately in each executive joint. In all joints, the minimum coefficient of safety against stability (at least 1.3) was obtained. Looking at the tables of results, it can be concluded that the stability of the regulating dam is suitable for acceleration of horizontal earthquake equal to 0.28 g. They are acceptable in earthquake and normal conditions.

Keywords: Stability analysis, CADAM software, Concrete weight dams, Dose control dam.