Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant

نشریه علمی سد و نیروگاه برق‌آبی

6th Year / No. 21 / September 2019

سال ششم / شماره بیست و یکم / تابستان ۱۳۹۸

شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح CMD در آنالیز لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی

تارا علی‌یاری[۱]

میثم فاضلی[۲]

چکیده

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سدها به نام سدهای CMD (سد با مصالح سیمانته شده) مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. ایده اصلی این سدها از آنجا آغاز می‌شود که به جای حداقل کردن حجم مصالح بدنه و نیاز به افزایش کیفیت‌های فیزیکی آن‌ها، حجم بیشتری از مصالح ولی با هزینه واحد کمتر را استفاده نماییم. در این نوع سد اگرچه حجم بدنه افزایش می‌یابد ولیکن با کاهش مقاومت مورد نیاز بتن، مصرف سیمان کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. مصالح این نوع سد به دلیل تفاوت در مقدار سیمان موجود، رفتاری مابین رفتار سدهای خاکی و سدهای بتنی متعارف داشته که به روشنی مشخص نمی‌باشد و آنالیز رفتار آن به خصوص تحت بارگذاری دینامیکی و در ناحیه غیرخطی مصالح همچنان مبهم است. در این تحقیق سد توبتسو به عنوان نمونه مطالعاتی یک سد CMD، انتخاب شده و با اعمال شتاب زلزله با مقادیر مختلف شتاب ماکزیمم و با استفاده از رویکرد پلاستیسیته خرابی بتن در نرم افزار آباکوس، تحت آنالیز دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شروع ترک‌خوردگی در این سد از ناحیه پاشنه آن بوده و با افزایش میزان شتاب زلزله اعمالی عمده ترک‌ها در قسمت یک سوم پایین ارتفاع سد از تراز پی در وجه بالادست و پایین دست سد به وجود می‌آید. به دلیل شکل‌پذیری بالای مصالح، این سد در پاسخ، رفتار ترد و شکننده از خود نشان نداده و در هنگام افزایش شتاب زلزله اعمالی، رفتار این مصالح نرم بوده و دچار شکست ناگهانی نمی‌گردد و توانایی حفظ پایداری خود را از دست نداده است.

واژه‌های کلیدی

سدهای(CMD(Cemented Material Dam، آنالیز لرزه‌ای، مدل رفتاری غیر خطی مصالح، مدل پلاستیسیته خرابی بتن

۱. دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد عمران- زلزله، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران tara.aliyari@yahoo.com

۲. دانشکده عمران ، معماری و هنر ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران Maysam.fazeli57@gmail.com

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۳

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون بشر به سدسازی و همچنین پیشرفت و توسعه این صنعت، مهندسین همواره سعی در حرکت به سمت دو عامل کاهش هزینه‌ها و کاهش آسیب به محیط‌زیست را دارند. ایده اصلی سدهای CMD از آنجا آغاز می‌شود که به‌جای حداقل کردن حجم مصالح بدنه و نیاز به افزایش کیفیت‌های فیزیکی آن‌ها، حجم بیشتری از مصالح ولی با هزینه واحد کمتر را استفاده نماییم. در این نوع سد، اگرچه حجم بدنه افزایش می‌یابد ولیکن با کاهش مقاومت موردنیاز بتن، مصرف سیمان کاهش زیادی خواهد داشت.

در پایان قرن بیستم، سد شن و ماسه سیمانته شده به‌عنوان گونه جدیدی از سد که فواید سدهای با رویه بتنی و سدهای بتنی وزنی را یکجا دارد، توجه متخصصین در سراسر دنیا را بیش‌ازپیش به خود جلب نمود. ایده سد CSG[۱] در سال ۱۹۷۰ توسط رافائل[۲] برای اولین بار در کنفرانس "تسریع در ساخت بتن" در کالیفرنیا مطرح گردید. او استفاده از مصالح شن و ماسه سیمانی را برای ساخت سدها پیشنهاد کرد. در سال ۱۹۷۲، کنون[۳] با ایده "ساخت سد بتنی توسط روش تراکم خاک" مفاهیم طراحی سد CSG را توسعه داد. در سال ۱۹۷۳، مفات[۴] در یازدهمین نشست بین‌المللی سد، ایده استفاده از بتن ضعیفی که در بستر جاده‌ها، در دهه ۱۹۵۰ در انگلستان استفاده می‌شد را برای ساخت سد بتنی پیشنهاد نمود.

در سال ۲۰۰۴، فوجیساوا[۵] گزارشی در مورد "سد CSG ذوزنقه‌ای شکل و خواص مصالح CSG" ارائه نمود. همچنین به معرفی فرازبند ناگاشیما[۶] پرداخت که برای اولین بار از فنّاوری ساخت CSG بهره برده بود. به دلیل تفاوت مقدار سیمان موجود در سدهای CMD و خاص بودن نوع این سد رفتار مصالح آن (نمودار تنش-کرنش مصالح)، خصوصاً در ناحیه غیرخطی و تحت آنالیز لرزه‌ای، مجهول بوده و احتیاج به تحقیق، بررسی و مدل‌سازی دارد.

مدل‌سازی

مبانی آنالیز لرزه‌ای

در آنالیزهای لرزه‌ای، پاسخ سازه در طول زمان تغییر می‌کند. در این تحلیل‌ها، زمان یک کمیت فیزیکی حقیقی بوده و نیروهای اینرسی در معادلات تعادل دینامیکی سازه حضور دارند و نیروهای داخلی، ناشی از تغییر شکل و حرکت (اینرسی) سازه می‌باشند. در بارگذاری لرزه‌ای، پایه سازه تحت تأثیر تحریکات لرزه‌ای قرارگرفته و پاسخ سازه در زمان تغییر می‌کند. در این تحقیق جهت انجام تحلیل لرزه‌ای از روش تحلیل تاریخچه زمانی استفاده‌شده است.

تحلیل تاریخچه زمانی، واقع‌گرایانه‌ترین روش موجود هست که پاسخ متغیر سازه سد در طی تحریکات واقعی زلزله را محاسبه می‌کند. برای تحلیل تاریخچه زمانی نیاز به حل عددی معادلات حرکت سازه سد در طول زمان است. برای حل معادلات حرکت لازم است که از آن‌ها در بازه‌های زمانی کوچک انتگرال‌گیری شده و با برهم‌نهی پاسخ در بازه‌های کوچک پشت سر هم پاسخ سازه در کل مدت بارگذاری لرزه‌ای محاسبه شود.

معادلات حرکت

یک مونولیت سد بتنی وزنی بر روی بستر صلب بدون آب درون مخزن را تحت اثر زلزله که در راستای پایه سد تغییر نمی‌کند، در نظر می‌گیریم. این مونولیت یک سیستم چند درجه آزادی با دو درجه آزادی (جابجایی در راستای x و y) برای هر نقطه گرهی است. معادلات حرکت برای این مونولیت سد که توسط سیستم المان محدود دوبعدی صفحه‌ای مدل‌سازی شده است عبارت است از:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F(t)\} - [M]\{1x\}\, ax\, g(t) - [M]\{1y\}\, ay\, g(t)$$

در معادله شماره (۱)، [M]، [C] و [K] به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی ویسکوز و سختی برای سیستم

---

[۱] Cemented Sand and Gravel
[۲] Raphael
[۳] Cannon
[۴] Moffat
[۵] Fujisawa
[۶] Nagashima

المان‌محدود سازه سد است. ماتریس‌های سختی و جرم سازه از ماتریس‌های متناظر یکایک المان‌های محدود با روش اسمبل مستقیم به دست می‌آیند. $\{u\}$ بردار جابجایی‌های نقاط گرهی نسبت به حرکت میدان آزاد زلزله است.

$a^x g(t)$ و $a^y g(t)$ مؤلفه‌های افقی (x) و عمودی (y) شتاب‌های میدان- آزاد زلزله هستند. $\{F(t)\}$ بردار نیروهای خارجی عمل‌کننده بر روی سازه است که در مورد سدهای بتنی، بردار $\{F(t)\}$ می‌تواند به نیروهای هیدرودینامیکی $\{F_P\}$ و برآیند سایر نیروهایی که برسازه سد عمل می‌کنند $\{F_1\}$، تقسیم‌بندی شود؛ بنابراین فرم نهایی معادله حرکت به شکل فرمول شماره (۲) می‌شود که در آن $f_{ix}(t)$ و $f_{iy}(t)$ به ترتیب نیروهای عمل‌کننده بر روی گره i ام در راستاهای y و x می‌باشند:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F_P(t)\} + \{F_1(t)\} - [M]\{1^x\} a^x{}_g(t) - [M]\{1^y\} a^y{}_g(t) \quad (۲)$$

جهت تخمین و در نظرگیری تقریبی میرایی، از روش رایلی (میرایی رایلی) استفاده‌شده است. در این روش ماتریس میرایی به شکل مجموع خطی ماتریس‌های جرم و سختی درنظرگرفته می‌شود:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (۳)$$

در این صورت مقدار میرایی در مودهای طبیعی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2\,\omega n} + \frac{\beta\,\omega n}{2} \quad (۴)$$

اندرکنش آب و سد در آنالیز لرزه‌ای

مخزن آب ذخیره‌شده در پشت سد علاوه بر اعمال نیروی هیدرواستاتیک به بدنه سد در شرایط سرویس، دارای اندرکنش دینامیکی با بدنه سد در طی تحریکات لرزه‌ای است. این اندرکنش دینامیکی بر پاسخ سد و همچنین مخزن تأثیر داشته و اغلب سبب افزایش پاسخ سد می‌شود. در مدل‌سازی آب موجود در مخزن می‌توان سیال را به شکل تراکم ناپذیر در نظر گرفت، هرچند که تحلیل‌ها و پژوهش‌های متعددی نشان از اثرات قابل‌توجه تراکم‌پذیری آب مخزن بر پاسخ و رفتار سیستم کوپله سد- مخزن دارد. این پژوهش‌ها همچنین نشان داده‌اند که اثرات کاویتاسیون در مخزن و نیز امواج سطحی مخزن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. برای مدل‌سازی سیستم سد- مخزن می‌توان از روش زیرسازه[۱] که در آن سد را با استفاده از المان‌محدود و مخزن را با استفاده از روش مکانیک محیط‌های پیوسته، به شکل نوارهایی با طول بی‌نهایت در نظر می‌گیرد، مدل-سازی کرد. همچنین می‌توان هر دو قسمت سد و مخزن را با به‌کارگیری المان‌محدود مدل‌سازی نمود و اندرکنش دینامیکی بین آن‌ها را تعریف کرد. در این حالت نیازمند قطع کردن و بریدن مخزن در فاصله محدودی از بدنه سد هستیم. در عمل، امواج فشاری که به سمت بالادست مخزن منتشر می‌شوند، از محدوده سیستم خارج‌شده و میرا می‌گردند. درنتیجه بایستی شرایط مرزی مناسب، به انتهای دور بریده‌شده[۲] مخزن اعمال کرد تا از برگشت امواج فشاری پس از برخورد به این مرز بریده‌شده، جلوگیری کند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی‌های ارائه‌شده در این تحقیق از روش دوم، یعنی مدل‌سازی سد و مخزن با به‌کارگیری المان‌محدود و در نظرگیری اندرکنش بین آن‌ها، استفاده‌شده است.

مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح در نرم‌افزار آباکوس

مدل پلاستیسیته خرابی بتن[۳] در نرم‌افزار آباکوس توانایی مدل‌سازی رفتار بتن و سایر مصالح شبه ترد[۴] در همه انواع سازه‌ها را دارد. این مدل از مفاهیم الاستیسیته خرابی همسانگرد به همراه پلاستیسیته فشاری و کششی همسانگرد برای بیان رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. این مدل متشکل از ترکیب پلاستیسیته چندسختی غیرهمبسته[۵] و الاستیسیته خرابی اسکالر برای توصیف خرابی برگشت‌ناپذیر که در طی پروسه‌های شکست رخ می‌دهد، است و به کاربر امکان کنترل بازیابی سختی را در طی چرخه‌های بازگشت بار می‌دهد و می‌تواند حساس به تغییرات نرخ کرنش تعریف شود. همچنین این مدل نیازمند رفتار همسانگرد در محدوده الاستیک خطی مصالح

---

[۱] Substructure techniqe
[۲] Truncated far-end
[۳] Concrete damaged plasticity
[۴] Quasi-brittle
[۵] Non associated multi-hardening plasticity

است. سختی کششی در مدل پلاستیسیته خرابی بتن از پارامترهای لازم می‌باشد. این پارامتر هم به‌وسیله رابطه تنش-کرنش پس از شکست و هم با اعمال ضابطه انرژی شکست ترک‌خوردگی قابل مدل‌سازی است.

رفتار غیرخطی مصالح ترد و شبه ترد

مصالح ترد و شبه ترد مانند بتن غیرمسلح و مصالح CMD، مصالحی مستعد ترک‌خوردگی می‌باشند. بر اساس معیار شکست رانکین[۱] اگر تنش اصلی ماکزیمم (کششی) در نقطه‌ای از این مصالح از مقاومت کششی آن بیشتر شود، بتن دچار ترک‌خوردگی می‌شود. راستای این ترک‌خوردگی عمود بر راستای تنش اصلی ماکزیمم است. رفتار پس از شکست[۲] برای کرنش مستقیم با سختی کششی مدل می‌شود که امکان تعریف رفتار نرم شدگی کرنشی مصالح ترک‌خورده را می‌دهد.

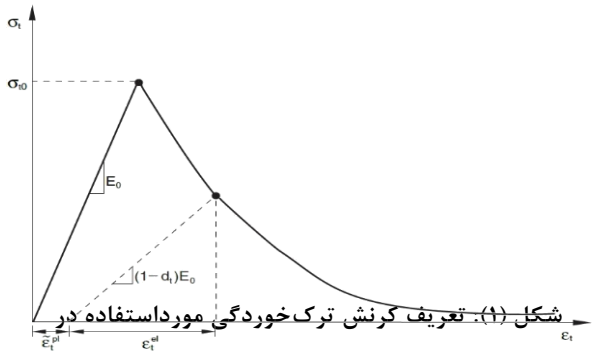
رابطه تنش- کرنش پس از شکست

در بتن مسلح تعیین رفتار پس از شکست در حالت کلی به معنای تعریف تنش پس از شکست به‌عنوان تابعی از کرنش ترک‌خوردگی می‌باشد. کرنش ترک‌خوردگی عبارت است از کرنش کل منهای کرنش الاستیک متناظر با مصالح خراب نشده یعنی:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \qquad (۵)$$

که در آن:

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0 \qquad (۶)$$



شکل (۱): تعریف کرنش ترک‌خوردگی مورداستفاده در داده‌های سختی کششی

داده‌های سختی کششی برحسب کرنش ترک‌خوردگی، $\tilde{\varepsilon}^{ck}_t$، باید معین شوند. هنگامی‌که اطلاعات مربوط به باربرداری موجود باشد، این اطلاعات باید برحسب نمودارهای خرابی کششی d_t - $\tilde{\varepsilon}^{ck}_t$، آن‌چنان‌که در ادامه توضیح داده خواهد شد، فراهم شوند. آباکوس به شکل خودکار کرنش ترک‌خوردگی را به مقادیر کرنش پلاستیک معادل به شکل معادله شماره (۵) تبدیل می‌کند:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{dt}{(1-dt)}\,\frac{\sigma t}{E0} \qquad (۵)$$

مدل‌سازی مخزن سد

تنها درجه آزادی در مخزن سد، مقدار فشار دینامیکی در گره‌های مدل المان‌محدود مخزن است. در نرم‌افزار آباکوس، محیط و مصالح آکوستیک[۳] دارای این خصوصیت بوده و برای مدل‌سازی مخزن سد مناسب می‌باشد. این محیط توانایی مدل‌سازی انتقال امواج فشاری را در محیطی همچون مخزن سد دارا می‌باشد. محیط آکوستیک، یک محیط الاستیک (معمولاً سیال) است که در آن تنش برشی وجود نداشته و فشار، متناسب با کرنش حجمی می‌باشد. مشخصات الاستیک مصالح آب شامل چگالی به مقدار ۱۰۰۰ kg/m^3 و مدول بالک به مقدار ۲/۰۷ Gpa است.

---

۱ Rankin failure criterion
۲ Post-failure
3. Acoustic medium

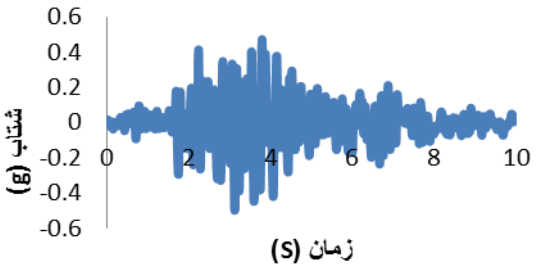
جدول (۱): مشخصات پلاستیک مصالح بتن

مصالح	نوع	پارامتر	مقدار
بتن	Concrete damaged plasticity	زاویه اتساع Dilation) (Angle	۳۶/۳۱
		Eccentricity	۰
		fb0/fc0	۱/۱۶
		K	۰
		Viscosity Parameter	۰

صحت‌سنجی

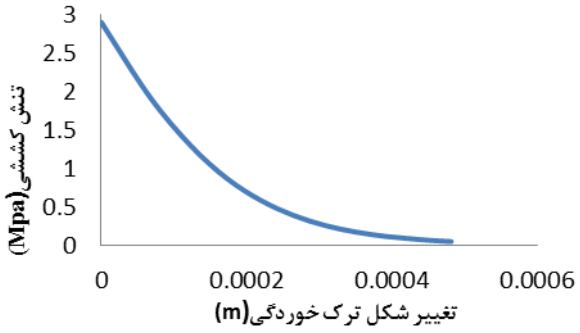
مدل‌سازی سد بتنی وزنی کوینا

سد کوینا، یک سد وزنی با ارتفاع تقریبی ۱۰۳ متر و عرض پایه ۷۰ متر واقع بر رودخانه کوینا در کشور هندوستان می‌باشد. این سد در سال ۱۹۶۷ تحت زلزله‌ای شدید به نام کوینا با بزرگی ۶/۵ قرارگرفته و دچار ترک‌خوردگی‌های گسترده می‌شود. ازآنجاکه این سد از معدود سدهای بتنی است که تحت زلزله واقعی دچار ترک‌خوردگی شده است، موردتوجه بسیاری از پژوهشگران، جهت مطالعات و جستجو-های گسترده بر روی رفتار غیرخطی بتن و دست‌یابی به پروفیل‌های واقعی ترک‌خوردگی سدهای بتنی تحت اثر زلزله‌های واقعی قرارگرفته است. در شکل (۲) مؤلفه افقی زلزله کوینا مشاهده می‌گردد.

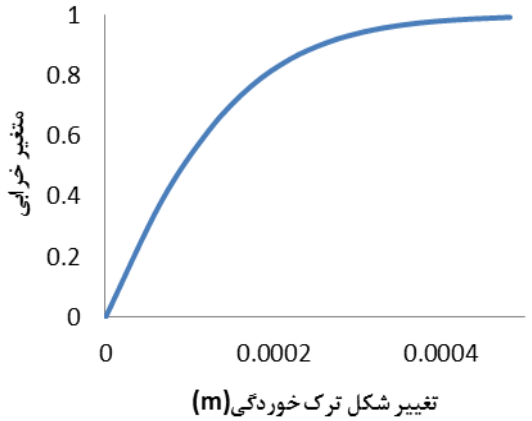


شکل (۲): مؤلفه طولی زلزله ۱۹۶۷ کوینا

رفتار کششی بتن در ناحیه غیرخطی، با استفاده از رویکرد پلاستیسیته خرابی بتن و نمودارهای تنش-جابجایی و هم-چنین داده‌های متغیر خرابی تعریف‌شده است. باتوجه به این‌که مقادیر تنش‌های فشاری در بدنه سد به‌مراتب کمتر از مقدار فشار ماکزیمم است، برای رفتار غیرخطی بتن تنها متغیر خرابی کششی درنظرگرفته شده و متغیر خرابی فشاری صفر منظور گردیده است، به‌عبارت‌دیگر رفتار بتن در فشار خطی فرض شده است. مشخصات رفتار ناحیه الاستیک بتن با مقادیر چگالی $2630\ kg/m^3$، مدول یانگ ۳۰ GPa و نسبت پواسون ۰/۲ درنظرگرفته شده‌است. پارامترهای رفتاری ناحیه پلاستیک بتن با استفاده از رویکرد پلاستیسیته خرابی بتن در جدول (۱) و داده‌های سختی کششی مصالح و داده-های متغیر خرابی کششی بتن در اشکال (۳) و (۴) مشاهده می‌گردد.



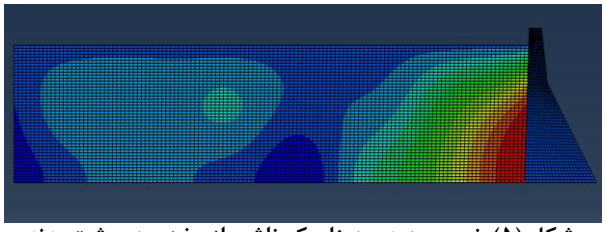
شکل (۳): نمودار رفتاری کششی بتن برحسب تنش کششی – تغییر شکل ترک‌خوردگی



شکل (۴): نمودار تغییرات متغیر خرابی برحسب تغییر شکل ترک‌خوردگی

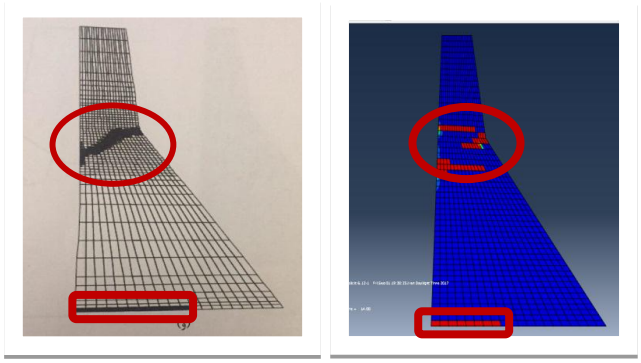
جهت تعیین پارامترهای میرایی، تمام مودهای نوسان که مجموع جرم‌های مؤثر در آن‌ها بیش‌تر از ۹۰ درصد جرم کل

سازه است درنظرگرفته می‌شود. با انجام تحلیل مودال این سد، مجموع جرم‌های مؤثر مودی یک تا سه، ۹۲ درصد است. با در نظرگیری میرایی ۵٪ (ξ = ۰/۰۵)، برای مودهای طبیعی ω_1 = ۲۲/۳۵ تا ω_3 = ۶۱/۶۴ و با استفاده از فرمول‌های شماره (۷) و (۸)، مقدار ضرایب متناسب با جرم (α) و سختی (β)، به ترتیب برابر با ۱/۶۴ و ۰/۰۰۱۲ به دست می‌آید. هم‌چنین باتوجه به این‌که مخزن آب ذخیره‌شده در پشت سد، علاوه بر اعمال نیروی هیدرواستاتیکی به بدنه سد در شرایط سرویس، دارای اندرکنش دینامیکی با بدنه سد در طی تحریکات لرزه‌ای است و این اندرکنش دینامیکی بر پاسخ سد و همچنین مخزن تأثیر گذاشته و اغلب سبب افزایش پاسخ سد می‌شود، مخزن سد در این مدل‌سازی نیز لحاظ شده و در شکل (۵) نیروی هیدرودینامیکی موجود ناشی از مخزن در پشت سد مشاهده می‌گردد.



شکل (۵): نیروی هیدرودینامیک ناشی از مخزن در پشت بدنه سد

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، در نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل، شامل پروفیل ترک‌خوردگی تحت زلزله کوینا در این مدل‌سازی، همانند نتایج واقعی و نتایج سایر محققان، سد بتنی وزنی کوینا در نواحی پاشنه و گردن سد دچار ترک‌خوردگی شده است.

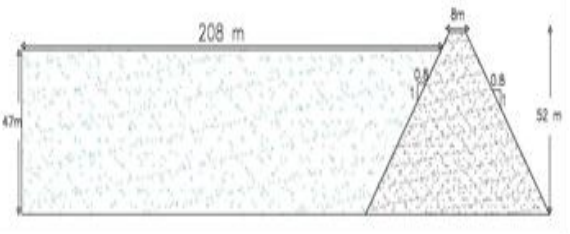


(الف) (ب)

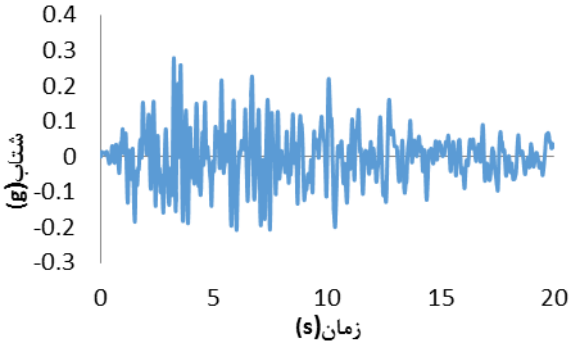
شکل (۶): پروفیل ترک‌خوردگی سد کوینا در الف) نرم‌افزار آباکوس و ب) بر اساس پژوهش‌ها Calayir & Karaton

شبیه‌سازی لرزه‌ای غیرخطی سد توبتسو

سد توبتسو، یک سد ذوزنقه‌ای شکل با مصالح سیمانته شده با ارتفاع تقریبی ۵۲ متر و عرض پایه حدود ۹۲ متر واقع بر قسمت میانی رودخانه توبتسو در کشور ژاپن می‌باشد. (شکل ۷). در این آنالیز، تحلیل لرزه‌ای این سد تحت رکورد افقی زلزله سن‌فرناندو (شکل ۸) با در نظرگیری اثرات هیدرودینامیکی و اندرکنش سد- مخزن انجام‌شده است. مشخصات رفتار ناحیه الاستیک مصالح CMD با مقادیر چگالی ۱۹۰۰ kg/m^3، مدول یانگ ۲ GPa و نسبت پواسون ۰/۳ درنظرگرفته شده‌است و باتوجه به شبه ترد بودن مصالح CMD، جهت مدل‌سازی ناحیه غیرخطی رفتار این مصالح نیز از رویکرد پلاستیسیته خرابی بتن استفاده‌شده است. مشخصات رفتار ناحیه پلاستیک این مصالح در جدول شماره (۲) مشاهده می‌گردد و جهت تعریف رفتار کششی این مصالح در ناحیه غیرخطی، مطابق با شکل شماره (۹)، از نمودار تنش-کرنش ترک‌خوردگی استفاده‌شده است.



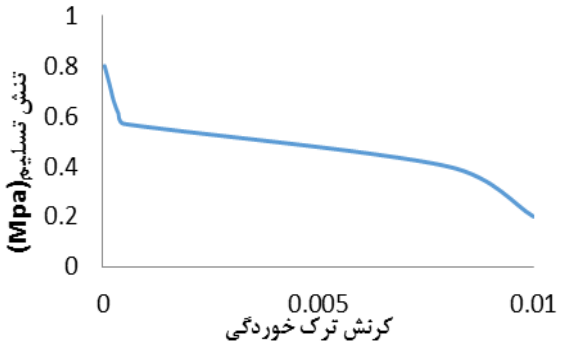
شکل (۷): ابعاد سد و مخزن



شکل (۸): مؤلفه طولی زلزله سن فرناندو

جدول(۲): مشخصات پلاستیک مصالح CMD

مشخصات پلاستیک	
نوع	Concrete damaged plasticity
زاویه اتساع (Dilation Angle)	۱۵
Eccentricity	۰/۱
fb0/fc0	۱/۱۶
K	۰/۶۶۶
Viscosity Parameter	۰



شکل (۹): نمودار رفتاری کششی مصالح CMD برحسب تنش تسلیم – کرنش ترک‌خوردگی

تعیین متغیر خرابی کششی و پارامترهای میرایی مصالح CMD

جهت تعیین مقادیر متغیر خرابی کششی، با در نظر گرفتن مقدار صفر برای مقادیر کرنش پلاستیک در فرمول شماره (۵)، فرمول شماره (۶) جهت محاسبه مقادیر متغیر خرابی کششی ماکزیمم، به دست می‌آید. مقادیر متغیر خرابی در هر مرحله بر اساس این فرمول محاسبه‌شده‌اند و در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردند.

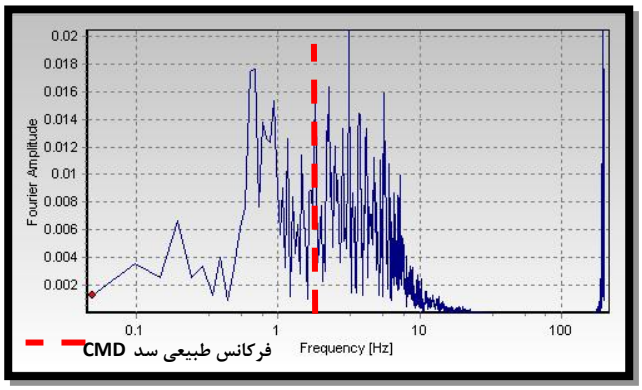
$$dt = \frac{E_0\,\varepsilon_t^{ck}}{\sigma_t + E_0\,\varepsilon_t^{ck}} \qquad (۶)$$

شکل (۱۰): مقادیر متغیر خرابی برحسب کرنش ترک‌خوردگی

هم‌چنین با انجام تحلیل مودال این سد، مجموع جرم‌های مؤثر مودی یک تا پنج، ۹۱ درصد است. با در نظرگیری میرایی ۵٪ (ξ = ۰/۰۵)، برای مودهای طبیعی ω_1= ۲۳/۰۷ تا ω_3= ۳۹/۲۶، مقدار ضرایب متناسب با جرم (α) و سختی (β)، به ترتیب برابر با ۱/۴۵۵ و ۰/۰۰۲ به دست می‌آید.

بررسی محتوای فرکانسی زلزله سن فرناندو از طریق طیف فوریه

در تحلیل و طراحی لرزه‌ای، تجزیه‌وتحلیل محتوای فرکانسی امواج ارتعاشی زمین از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌منظور مطالعه محتوای فرکانسی، آنالیز طیفی با استفاده از تبدیل فوریه در نرم‌افزار Sei smoSi gnal انجام‌شده است. طیف فوریه اهمیت فرکانس‌های موجود را بدون اطلاعاتی در زمینه زمان وقوع این فرکانس‌ها نشان می‌دهد. از طرفی طیف فوریه میزان انرژی امواج ناشی از ارتعاشات زمین را در فرکانس‌های مختلف بیان می‌کند و برخلاف

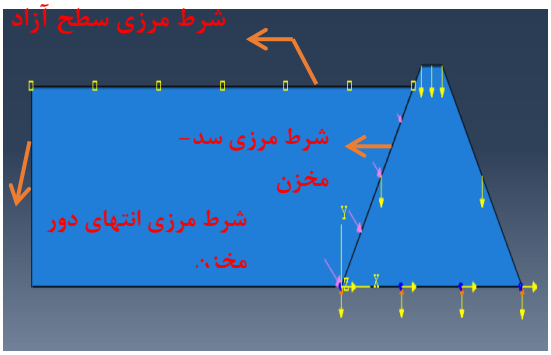


شکل (۱۱): نمودار طیف فوریه زلزله سن فرناندو

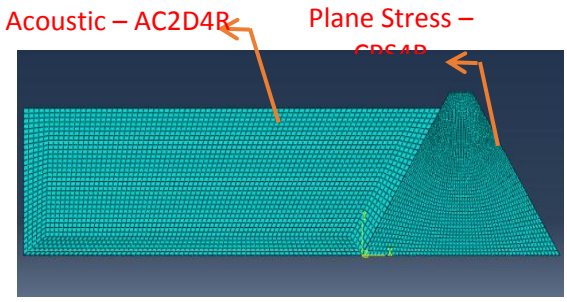
طیف‌های جابجایی، سرعت و شتاب که از طیف‌های وابسته به زمان می‌باشند، طیف فوریه ویژگی‌های تکان زمین را بر اساس محتوای فرکانسی آن‌ها بیان می‌کند. طیف فوریه مربوط به زلزله سن فرناندو توسط نرم‌افزار SeismoSignal محاسبه‌شده و در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به تحلیل مودال انجام‌شده در نرم‌افزار آباکوس برای سد توبتسو، فرکانس طبیعی مود اول برای این سد ۳/۶۷ هرتز است و باتوجه به نمودار طیف فوریه این زلزله، این فرکانس در محدوده فرکانس بالا و پریود پایین این زلزله می‌باشد.

بارگذاری، شرایط مرزی و مش‌بندی مدل

در این مدل‌سازی بارگذاری‌های استاتیکی شامل وزن بدنه سد و نیروی هیدرواستاتیکی اعمال‌شده به وجه بالادست سد ناشی از وجود دریاچه، علاوه بر بارگذاری لرزه‌ای لحاظ شده‌اند. باتوجه به آنالیز استاتیکی و لرزه‌ای در این مدل‌سازی، پی صلب فرض شده و بنابراین لازم است تا کف سد هنگام اعمال بارگذاری‌های استاتیکی گیردار بوده و سپس با شروع اعمال بار لرزه‌ای، تنها در راستای محور x بازشده تا محدودیتی جهت اعمال بار لرزه‌ای نباشد. جهت مش‌بندی بدنه سد و مخزن از المان‌های چهاروجهی استفاده‌شده است. در اشکال شماره (۱۲) و (۱۳) بارهای اعمال‌شده و شرایط مرزی لحاظ شده در مدل و همچنین مدل به‌صورت مش‌بندی شده مشاهده می‌گردد.

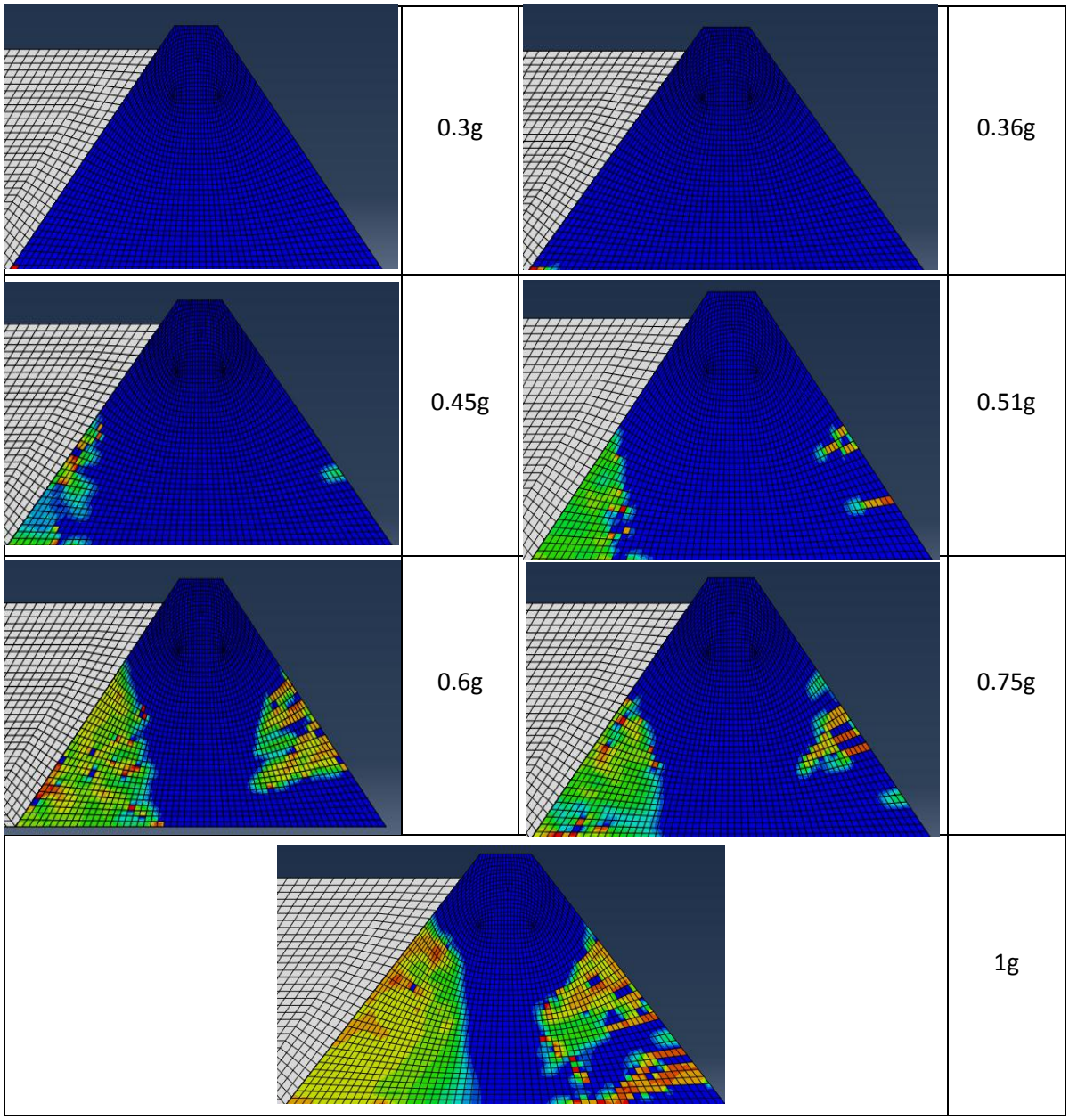


شکل (۱۲): بارگذاری و شرایط مرزی اعمال‌شده به سد توبتسو



شکل (۱۳): مش‌بندی بدنه سد و مخزن سد توبتسو و المان‌های استفاده‌شده

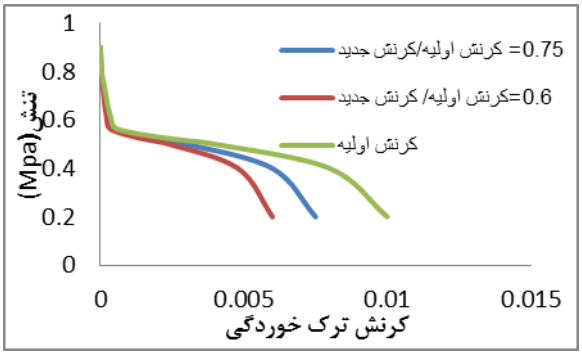
نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز غیرخطی سد توبتسو تحت زلزله سن فرناندو، شامل پروفیل‌های ترک‌خوردگی مقطع سد با افزایش میزان شتاب اعمالی طی ۷ مرحله، در ادامه مشاهده می‌گردد. در نتایج حاصل از این مدل‌سازی، شروع ترک‌خوردگی با شتاب زلزله سن‌فرناندو که دارای شتاب ماکزیمم ۰/۳g است، ایجاد ترک در ناحیه پاشنه سد بوده و با افزایش شتاب زلزله اعمالی به حدود g ۰/۵، شاهد شروع ترک‌خوردگی در وجه پایین‌دست و همچنین در قسمت یک‌سوم پایین ارتفاع سد از تراز پی در وجه بالادست می‌باشیم. با افزایش بیشتر شتاب زلزله، طی سه مرحله تا شتاب ماکزیمم ۱g، ترک‌ها به سمت داخل بدنه گسترش می‌یابد. چنانچه مشاهده می‌گردد، سد توبتسو در هر مرحله تنها دچار افزایش مساحت ترک‌خوردگی شده و به مرحله شکست نرسیده و مشکلی ازنظر پایداری پیدا نکرده است. به دلیل شکل‌پذیری این مصالح، این سد رفتار ترد و شکننده از خود نشان نداده و در هنگام افزایش شتاب زلزله اعمالی، رفتار این مصالح نرم بوده و دچار شکست ناگهانی نمی‌گردد. همچنین ترک‌های ایجادشده، بیشتر به‌صورت میکرو ترک بوده و دارای پارامتر خرابی با درصد خرابی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد هستند که این نتایج نزدیک به نتایج به‌دست‌آمده در مقاله "Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam" که به بررسی رفتار غیرخطی لرزه‌ای سدهای Hardfill با مدل رفتاری خرابی ماکروسکوپیک پرداخته است، می‌باشد. در شکل (۱۴)، شروع ترک‌خوردگی و نحوه‌ی گسترش آن در هر مرحله با افزایش شتاب ماکزیمم زلزله اعمالی (زلزله سن فرناندو)، مشاهده می‌گردد.



شکل (۱۴): نحوه گسترش ترک تحت زلزله سن فرناندو

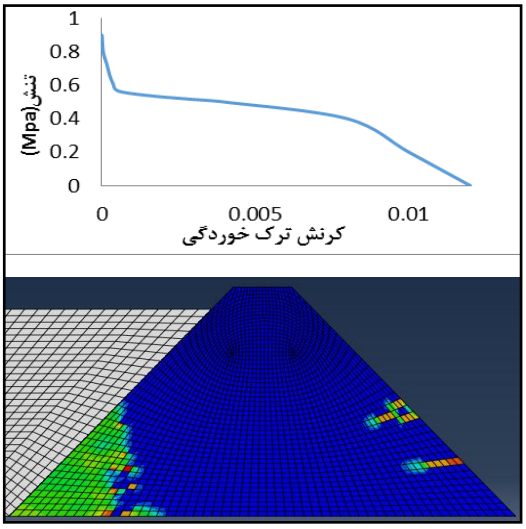
آنالیز حساسیت مدل رفتاری مصالح CMD با در نظر گرفتن خاصیت تردی در رفتار مصالح مورداستفاده در این نوع سدها

جهت بررسی اثر میزان تردی مصالح CMD بر روی پاسخ سد، در این بخش مطابق با شکل (۱۵)، مصالح با رفتار به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد تردتر را درنظرگرفته و سد توبتسو با اعمال شرایط بارگذاری یکسان و در نظرگیری زلزله سن-فرناندو (با شتاب ماکزیمم g ۰/۵)، با سه حالت مدل رفتاری ذکرشده آنالیز گردیده است.



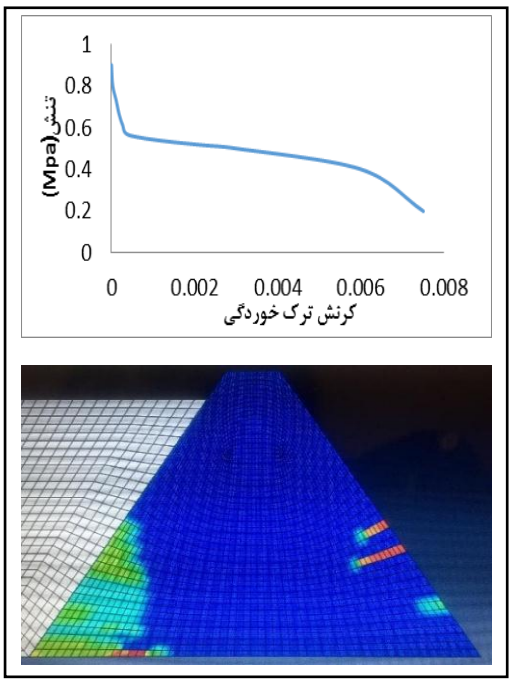
شکل (۱۵): مقایسه رفتار تنش-کرنش ترک‌خوردگی مصالح CMD با دو حالت ۲۵ و ۴۰ درصد تردتر

بنا بر آنالیزهای صورت‌گرفته، با افزایش خاصیت تردی مصالح، میزان ترک‌خوردگی در بدنه سد افزایش‌یافته و هم-چنین نوع ترک از حالت پخش‌شونده و میکروترک، به حالت متمرکزتر تغییر یافته‌است. موارد ذکرشده به همراه نمودارهای رفتاری هر حالت در اشکال (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) مشاهده می‌گردد.

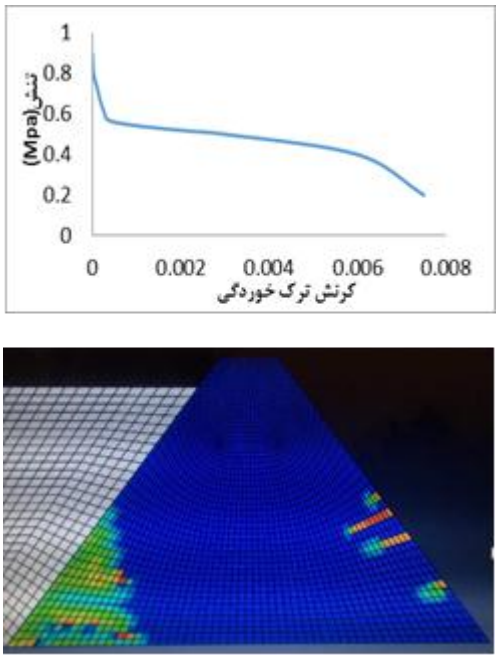


شکل (۱) رفتار تنش-کرنش ترک‌خوردگی مصالح CMD با افزایش تردی مصالح به میزان ۴۰ درصد به همراه پروفیل ترک‌خوردگی س

شکل (۱۶): رفتار تنش-کرنش ترک‌خوردگی مصالح CMD به همراه پروفیل ترک‌خوردگی سد



شکل (۱۷): رفتار تنش-کرنش ترک‌خوردگی مصالح CMD با افزایش تردی مصالح به میزان ۲۵ درصد به همراه پروفیل ترک‌خوردگی سد



نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای سدهای CMD (سد با مصالح سیمانته شده) در محدوده رفتار غیرخطی مصالح این سد، باتوجه به مزایای این نوع سد بوده است. مزایای این نوع از سدها از طرفی استفاده حداکثر از مصالح موجود در سایت باتوجه به دامنه گسترده اندازه دانه‌بندی مصالح این سد، کاهش هزینه ساخت به دلیل کاهش استفاده از ماشین‌آلات و هم‌چنین کاهش مقدار سیمان مصرفی به دلیل افزایش حجم مصالح ولی با مقاومت کمتر و از طرف دیگر عدم نیاز به سنگ پی با مشخصات مکانیکی بالا می-باشد.

باتوجه به مزایای یادشده، در این تحقیق پاسخ یک سد CMD (سد توبتسو به‌عنوان نمونه مطالعاتی)، تحت زلزله سن‌فرناندو موردبررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که محل شروع ترک‌خوردگی در این سد در ناحیه پاشنه آن است. جهت دست‌یابی به درک بهتر از رفتار این مصالح و بررسی چگونگی گسترش ترک در بدنه سد، طی شش مرحله شتاب زلزله اعمالی افزایش‌یافته است که بنا بر آنالیزهای صورت گرفته مشاهده می‌گردد که ترک‌های ایجادشده بیشتر به‌صورت میکرو ترک بوده و دارای پارامتر خرابی با درصد خرابی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد هستند که با افزایش شتاب زلزله اعمالی به سمت داخل بدنه گسترش‌یافته و عمده ترک‌ها در قسمت یک‌سوم پایین ارتفاع سد از تراز پی در وجه بالادست و پایین‌دست سد به وجود می‌آید. هم‌چنین جهت افزایش دقت در شبیه‌سازی رفتار مصالح این سد، آنالیز حساسیت با بررسی اثر خاصیت تردی مصالح بر روی پاسخ بدنه سد صورت گرفته و مشخص گردید که با افزایش خاصیت تردی، علاوه برافزایش مساحت ترک‌خوردگی، نوع ترک‌ها نیز از ترک‌های پخش‌شونده و میکرو ترک به حالت متمرکزتری تغییر می‌یابد.

به دلیل شکل‌پذیری و رفتار نرم این مصالح در محدوده غیرخطی تنش-کرنش و هم‌چنین شکل ذوزنقه‌ای بدنه این سد، سد توانایی حفظ پایداری خود را در شتاب‌های بالای زلزله نیز از دست نداده است و رفتار ترد و شکننده از خود نشان نمی‌دهد و در هنگام افزایش شتاب زلزله اعمالی، رفتار این مصالح نرم بوده و دچار شکست ناگهانی نمی‌گردد. از بررسی‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که سدهای CMD می‌توانند در مناطق با لرزه‌خیزی بالا به‌عنوان گزینه ای مناسب از حیث ایمنی استاتیکی و دینامیکی، در سدسازی معرفی گردند.

مراجع

۱- عالم باقری، محمد و سید کاظمی، محمد (۱۳۹۳). مدل‌سازی عددی سدهای بتنی وزنی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS.

۲- نورزاد، علی و زاهدی، حسین (۱۳۹۱). طرح و محاسبه سدهای ذوزنقه‌ای با مصالح شن و ماسه. تهران: کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.

۳- عارفیان، امیر (۱۳۹۴). ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدها با مصالح سیمانته شده. پایان‌نامه دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.

4- Calayir Y, Karaton M. (2005). A continuum damage damage concrete model for earthquake analysis of concrete gravity dam-reservoir systems. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 857-869

5- Arefian, A. Noorzad, A. Ghaemian, M. Hosseini, A. (2016). “Seismic evaluation of Cemented Material Dam”.

6- Raphael, J. M. (1970). “The optimum gravity dam. Rapid Construction of Concrete Dams”, ASCE, New York, 221-247.

7- Fujisawa, T. Nakamura, A., Kwasaki, H., Hirayama, D., Yamaguchi, Y., and Sasaki, T. (2004). “Material Properties of CSG for the Seismic Design of Trapezoid-Shaped CSG Dam”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 391-393-

8- Fujisawa, T., Sasaki, T., (2012). Development of the Trapezoidal CSG Dam. Japan Dam Engineering Centre, Hydropower & Dams, Issue Three, (In Japan).

9- ABAQUS Analysis User’s Manual (version 6.11)

10- Xiong, K. Weng, Y. HE, Y. (2013). “Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam”, Water Science and Engineering Journal.

11- Alembagharei M, Ghaemian M. (2013). “Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and and damage indexes”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 165-205.