

تحلیل لرزه‌ای خطی و غیرخطی سد بتن غلتکی جگین

مجتبی غرویⁱ؛ علی نورزادⁱⁱ

چکیده

به تازگی مطالعات گسترده و آزمایش‌های جامعی در زمینه‌ی تعیین پارامترهای مکانیک شکست بتن سد به منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی آغاز شده است. اما در مورد بتن غلتکی در سدها، این مطالعات در مراحل ابتدایی خود می‌باشد. در این مقاله، از روش‌های آماری برای بهبود نتایج حاصل از آزمایش‌های فشاری و کشش مستقیم بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر سد جگین استفاده شده و مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و انرژی شکست در سن و درجه اطمینان‌های مختلف محاسبه شده‌اند. از نتایج حاصله در تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی استفاده می‌شود. برای در نظر گرفتن امکان رفتار غیرایزوتروپیک بتن بدنه‌ی سدهای بتن غلتکی، مدلی عددی بر اساس روابط حاکم بر روش ترک پخش شده (Smearred Crack) پیشنهاد گردید. تحلیل لرزه‌ای خطی و غیرخطی مدل المان محدود دو بُعدی سد بتن غلتکی جگین انجام گرفت. بیشینه‌ی تنش‌های کششی و متعاقب آن پیدایش ترک در بدنه‌ی سدها در نواحی شامل پاشنه‌ی سد، نزدیک گلوگاه سد در پایین‌دست همچنین در محل تغییر شیب بدنه در بالادست مشاهده شد. با اعمال مدل مذکور، ترک‌خوردگی بیشتر در نواحی فوقانی نزدیک گلوگاه سد رخ داد و به طور کلی توسعه‌ی آسیب به ترازهای بالاتر بدنه منتقل شد.

کلمات کلیدی: انرژی شکست - تحلیل لرزه‌ای خطی و غیرخطی - سد بتن غلتکی (RCC)

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۶/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۸/۲۰

ⁱ استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران: Gharavi@iust.ac.ir
ⁱⁱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی سازه و ژئوتکنیک، دانشکده‌ی مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (عباسپور)، تهران، ایران، noorzad@wrm.ir

۱- مقدمه

به دلیل اهمیت پدیده‌ی شکست در مواد شبه‌ترد، محققان بسیاری تلاش کرده‌اند تا تئوری‌های مکانیک شکست را برای بتن به کار گیرند تا به مدلی مناسب برای سدهای بتنی دست یابند. شبیه‌سازی عددی سدهای بتنی نیازمند تعیین خصوصیات شکست است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای شکست، انرژی مخصوص شکست یا به اختصار انرژی شکست می‌باشد؛ ولی بیشتر آزمایش‌های مربوط به تعیین انرژی شکست بر روی بتن معمولی انجام گرفته است.

در دهه‌های اخیر برای طراحی و یا برای ارزیابی سدهای موجود با توجه به معیار ایمنی، انجام آنالیز غیرخطی بر پایه‌ی تئوری مکانیک شکست توصیه شده است [۱۲]. برای انجام آنالیز غیرخطی به انرژی مورد نیاز برای تشکیل ترک، توانایی جذب انرژی و اثر بُعد برای تعیین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی احتیاج داریم [۱].

بتن معمولی و بتن مورد استفاده در ساخت سد، در طبیعت و اندازه‌ی سنگدانه با یکدیگر اختلاف اساسی دارند. دانه‌های خرد شده‌ی مورد استفاده در یک سد بتنی ممکن است مقاومت کمتری نسبت به دانه‌های گردگوشه در بتن معمولی داشته باشند.

چوپرا (Chopra) و همکارانش در سال ۱۹۷۲ به عنوان اولین قدم با استفاده از تحلیل الاستیک خطی، رفتار لرزه‌ای و پیش‌بینی ایجاد ترک در سدها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق سدهای بتنی وزنی کوینا در هندوستان و پایین فلت در ایالات متحده آمریکا بدون در نظرگرفتن اندرکنش دریاچه و پی تحت زلزله‌ی کوینا به سال ۱۹۶۷، مورد مطالعه قرارگرفتند [۵].

اولین تحلیل غیرخطی المان محدود سدهای بتنی وزنی توسط پال (Pal) در سال ۱۹۷۴ انجام شد. سد کوینا با فرض صلب بودن پی و بدون در نظرگرفتن دریاچه با به کارگیری مدل ترک پخش شده با معیار مقاومت شکست مصالح مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاصل از این تحقیق بستگی زیادی به خصوصیات مصالح و اندازه‌ی المان‌ها داشت [۱۰].

رشر (Rescher) در سال ۱۹۹۰ نشان داد که اکثر سدهای بتنی وزنی حتی تحت شرایط بارگذاری بهره‌برداری و زلزله‌های متوسط، ترک‌خوردگی را تجربه خواهند نمود [۱۱]. بنابراین، فرض رفتار خطی برای پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی مناسب نمی‌باشد. نتایج حاصله از تحلیل غیرخطی سدهای بتنی وابستگی زیادی به روش مورد استفاده در مدل‌سازی اندرکنش سد، دریاچه و پی آن دارد.

قائمیان و گُبارا (Ghobarah) در سال ۱۹۹۹، تحلیل لرزه‌ای غیرخطی دو بُعدی سد بتنی وزنی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد و دریاچه ارایه نمودند. در این تحقیق از مدل ترک پخش شده برای نشان دادن پاسخ سد و ترک‌خوردگی بدنه‌ی آن استفاده شده است. اندرکنش سد و دریاچه در حوزة زمان بررسی شده و نتایج با حالتی که جرم افزوده به کار رفته، مورد مقایسه قرارگرفته است. تفاوت‌های مشاهده شده، اهمیت مدل کردن دریاچه جهت بررسی پاسخ واقعی سد را نشان می‌دهد [۸].

کالایر (Calayir) و کاراتن (Karaton) در سال ۲۰۰۵، پاسخ شکست لرزه‌ای دو بُعدی سد بتنی وزنی با اثر اندرکنش سد و دریاچه را بررسی کردند. فرمول‌بندی لاگرانژ برای سیستم دینامیکی سازه و سیال در حوزة زمان را ارایه

دادند. از مدل ترک چرخشی هم‌محور شامل رفتار نرم‌شدگی بتن استفاده نمودند.

در این مقاله، سد بتنی وزنی کوینا تحت زلزله کوینا مورد تحلیل دینامیکی خطی قرار گرفت. کانتور دو بُعدی حداکثر تنش‌های کششی اصلی بزرگ‌ترین بلوک سد، نشان می‌داد که در پنجه و گلوگاه سد نسبت به نقاط دیگر مقطع، بیشترین تنش‌های کششی اصلی به وجود می‌آید. تحلیل لرزه‌ای غیرخطی انجام شده، نتایجی مشابه با خرابی واقعی سد را آشکار می‌ساخت [۴].

در دهه‌های گذشته به کارگیری بتن غلتکی (RCC) در صنعت سدسازی انقلابی ایجاد کرد. اهدافی هم چون سرعت بالای ساخت و نیز اقتصادی بودن طرح باعث گردید که این گونه سازه‌ها در کانون توجه مهندسان قرار گیرد.

چوهان (Chuhan) و همکارانش در سال ۲۰۰۲ نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتن غلتکی و تحلیل شکست غیرخطی سدهای بتن غلتکی را ارایه نمودند. در این تحقیق نمونه‌هایی از بتن غلتکی مصرفی در ساخت سد لانگتان (Longtan) در چین تهیه شد. با انجام آزمایش بر روی آن‌ها، پارامترهای غیرخطی موردنیاز و منحنی تنش-کرنش در کشش جهت استفاده در تحلیل غیرخطی به دست آمد.

بزرگ‌ترین بلوک سد با معیار شکست غیرخطی و گسیختگی فشار-برش تحت تحلیل لرزه‌ای غیرخطی قرار گرفت. تفاوت مقاومتی بتن بدنه‌ی سد و درزه در یک حالت تقریبی بررسی شده است. نتایج حاصله، ترک‌های به وجود آمده در مناطق مربوط به پنجه‌ی سد و قسمت‌های فوقانی در محل تغییر شیب بدنه در پایین دست سد و گسترش آن تا سطح بالادست را نشان داده است [۶].

زوهویی (Zuohui) در سال ۲۰۰۴، مدلی عددی برای شبیه‌سازی رفتار بتن سدهای بتن غلتکی را ارایه نمود که در آن روابط تنش-کرنش با ساختار چند لایه‌ای جهت توصیف رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک، مدل شده است. به عنوان نمونه‌ی عملی، مدل المان محدود سد لانگتان با چهار طرح اختلاط مختلف از بتن غلتکی با خواص مقاومتی متفاوت در قسمت‌های مختلف بدنه، تحلیل شد. لازم به ذکر است که در قسمت اتصال سد با پی از بتن حجیم استفاده گردیده است.

در این مقاله از آنجا که برای نواحی بالایی مقطع سد در قسمت بالادست، بتنی با خاصیت ایزوتروپیک و در قسمت

۳- اعمال روند آماری تصحیح داده‌ها بر نتایج آزمایش‌های فشاری و کششی بتن غلتکی سد جگین

سد جگین اولین سد بتن غلتکی در ایران بوده که در منطقه‌ی بسیار خشک بشاگرد در جنوب ایران بر روی رودخانه‌ی فصلی جگین (دارای رژیم سیلابی) ساخته شده است. این سد در ۲۵۰ کیلومتری شرق بندرعباس و ۶۱ کیلومتری شمال بندر جاسک قرار دارد. سد جگین با حجم مخزن ۲۰۰ میلیون مترمکعب، ۷۸ متر ارتفاع داشته و طول تاج آن ۲۵۳ متر است.

در طراحی سد جگین برای قسمت داخلی بدنه‌ی سد، از بتن غلتکی با مقاومت مشخصه‌ی 12 Mpa به نام RCC_2 و برای قسمت بیرونی، از بتن غلتکی با مقاومت مشخصه‌ی 20 Mpa به نام RCC_1 استفاده شده است.

در این سد، نمونه‌های بتن غلتکی تحت آزمایش‌های فشاری و کشش مستقیم قرار گرفته‌اند. آزمایش فشاری در آزمایشگاه سد جگین بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر، برای دو طرح اختلاط RCC_1 و RCC_2 و در سن‌های ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۸۲ روزه و آزمایش کشش مستقیم در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر، برای طرح اختلاط RCC_2 و در سن‌های ۵۶، ۶۱ و ۹۱ روزه انجام شده است.

در این تحقیق از نتیجه‌های آزمایش فشاری و کشش مستقیم، برای تعیین پارامترهای شکست بتن غلتکی استفاده شده است. میانگین و بازه‌ی اطمینان مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و انرژی شکست بتن غلتکی سد جگین در درجه‌های اطمینان و سن‌های مختلف، با استفاده از الگوریتم آماری پیشنهادی [۳]، تخمین زده شده و در جدول (۱) پارامترهای مورد نیاز برای انجام تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی ارائه شده‌اند.

۴- مدل‌های عددی مورد استفاده در تحلیل

۴-۱- مدل ترک پخش شده

روش ترک پخش شده بر اساس رفتار شکست غیرخطی بتن شامل خصوصیات اصلی چون در نظرگیری ماتریس تنش- کرنش صفحه‌ای الاستیک برای رفتار پیش از

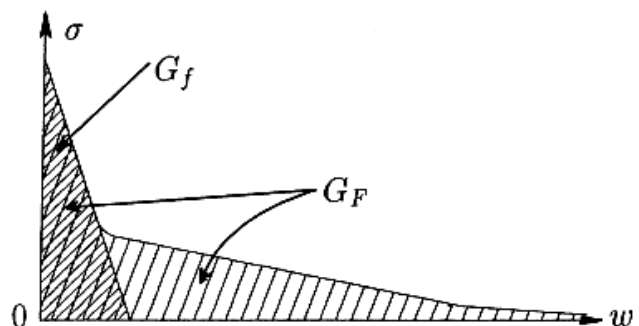
پایین‌دست آن بتن غلتکی با خاصیت غیرایزوتروپیک در نظر گرفته شده، در نتیجه در کانتور تنش محاسبه شده بین این دو نوع ماده، ناپیوستگی ایجاد شد. بنابراین جهت حل این مشکل، میانگین این تنش‌ها در دو طرف فصل مشترک جهت ارایه‌ی جواب یکتا (Unique Value) در آن نقاط مشترک ارایه گردید [۱۳].

در این تحقیق پارامترهای مکانیک شکست بتن مورد مطالعه قرار گرفته و برای تعیین انرژی مخصوص شکست بتن غلتکی، از نتیجه‌های آزمایش فشاری و کشش مستقیم که بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر سد جگین انجام گرفته، استفاده می‌شود. البته ذکر این مطلب ضروری است که تخمین پارامترهای شکست بتن از هر روشی که صورت گیرد، هیچ‌گاه جایگزین مطمئنی برای آزمایش‌های مکانیک شکست نخواهد بود. از نتایج حاصله در تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی استفاده می‌شود.

۲- تخمین انرژی شکست

انرژی شکست بتن در مدل ترک به هم پیوسته مطابق شکل (۱) به دو قسمت تقسیم می‌شود: ۱- سطح زیر نمودار شیب اولیه‌ی منحنی نرم‌شدگی (G_f) - ۲- سطح کل زیر نمودار منحنی نرم‌شدگی (G_F).

G_F به اندازه و شکل نمونه حساس است. برای جلوگیری از بروز خطا در محاسبه‌ی G_F ، باید نقطه‌ی انتهایی منحنی نرم‌شدگی را با دقت بسیار زیادی تعیین کرد. اما G_f مستقل از اندازه و هندسه‌ی سازه بوده و تعیین مقدار آن با خطای کمتری همراه می‌باشد. از G_f برای به دست آوردن بار حداکثر و از G_F برای محاسبه‌ی انرژی تلف شده در طول شکست سازه و تعیین انتهای منحنی نرم‌شدگی استفاده می‌شود [۲].



شکل (۱): منحنی نرم‌شدگی در مدل ترک به هم پیوسته و معرفی انرژی شکست

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{f_1\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\} = \{F_1\} + [Q]\{P\} \quad (1)$$

$$[G]\{\ddot{P}\} + [C']\{\dot{P}\} + [K']\{P\} = \{F_2\} - \rho[Q]^T\{\ddot{U}\} \quad (2)$$

که در آن $[M]$ و $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، $[G]$ و $[C']$ و $[K']$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی دریاچه، $\{U\}$ و $\{P\}$ به ترتیب بردارهای فشار هیدرودینامیکی و تغییر مکان، $\{\ddot{U}_g\}$ شتاب زمین، $\{F_1\}$ بردار نیروی حجمی و هیدرواستاتیک، $\{F_2\}$ مولفه‌ی نیرو ناشی از شتاب در مرزهای سد-دریاچه و دریاچه-پی می‌باشد. با انتگرال‌گیری مستقیم از معادلات حرکت حاکم بر سد و دریاچه از روش حل تغییر مکان متناوب (Staggered Displacement) استفاده شده است.

۵- روند تحلیل‌ها و نتایج آن

در این تحقیق، مدل المان محدود سد و دریاچه‌ی بزرگترین بلوک سد بتن غلتکی جگین تهیه شده و تحت تحلیل دینامیکی خطی قرار گرفته است. تحلیل لرزه‌ای غیرخطی سازه مذکور با بکارگیری تئوری حاکم بر مدل ترک پخش شده انجام شده و در نهایت به منظور بررسی رفتار ارتوتروپیک بتن در بارگذاری لرزه‌ای، با اعمال مدل پیشنهادی (اعمال اثر درزه) که برگرفته از روابط حاکم بر مدل ترک پخش شده می‌باشد، تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تکرار شده است.

۵-۱- مدل المان محدود و پارامترهای مورد

استفاده در تحلیل

شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی هندسه‌ی بزرگترین مقطع سد بتن غلتکی جگین می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، دو نوع بتن با مشخصات مقاومتی متفاوت (مطابق جدول (۱)) تحت عناوین RCC_1 و RCC_2 به ترتیب در رویه‌ی بالادست و سایر قسمت‌های بدنه استفاده شده است.

شکل (۳) مدل المان محدود مقطع مذکور و دریاچه‌ی آن را نمایش می‌دهد. شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب مولفه‌ی افقی و قائم شتاب رکوردهای زلزله‌ی کوینا و کوبه مورد استفاده در تحلیل‌های لرزه‌ای خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد.

نرم‌شدگی (Pre-softening) بتن، بقای انرژی شکست، رفتار غیرخطی حین فاز نرم‌شدگی بتن که در آن باند ترک در راستای عمود بر کرنش‌های اصلی ظاهر می‌شود و در نهایت باز و بسته شدن ترک‌ها که حین شرایط بارگذاری معکوس (Reverse Loading) رخ می‌دهد.

به سبب نوع اجرای سدهای بتن غلتکی که به صورت لایه به لایه‌ی افقی بر روی هم انجام می‌گیرد، امکان ضعف مقاومتی در راستای عمود بر فصل مشترک لایه‌ها (درزهای افقی) در قیاس با بتن سد به وجود می‌آید که در این حالت، دیگر بتن بدنه‌ی سد دارای رفتار ایزوتروپیک نمی‌باشد. از این رو در مدل المان محدود یک حالت پیش فرض در المان‌ها جهت تاثیر اثر درزه با استفاده از مدل فوق در نظر گرفته شد به طوری که رفتار این المان‌ها در قسمت نرم‌شدگی نمودار تنش-کرنش بتن بررسی گردیده و خواص سختی ارتوتروپیک با سه پارامتر زیر در المان‌ها تعیین می‌گردد:

E_n : مدول یانگ در راستای عمود بر صفحه‌ی نرم‌شدگی بتن می‌باشد.

E_p : مدول یانگ در راستای موازی با صفحه‌ی نرم‌شدگی بتن که معادل با مقدار ایزوتروپیک اولیه می‌باشد.

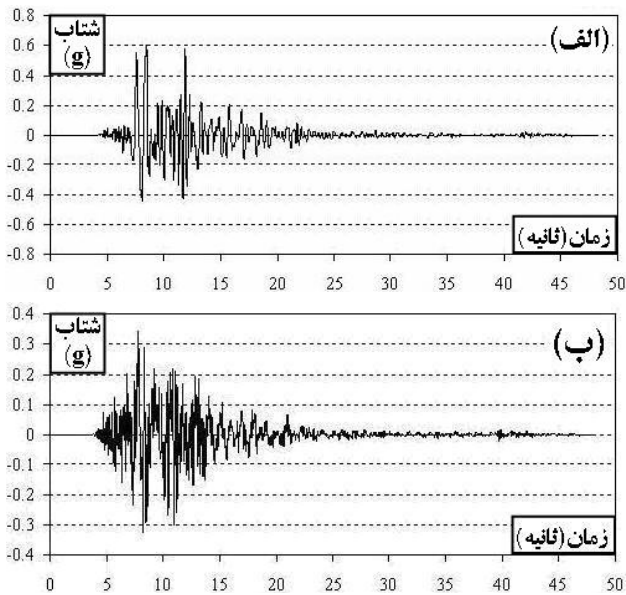
θ_p : زاویه‌ی بین راستای عمود بر صفحه‌ی نرم‌شدگی و محور X مختصات کلی می‌باشد.

با میانگین‌گیری از مقادیر موجود در مراجع مختلف که از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده از سدهای بتن غلتکی حاصل گردیده است، پارامتر E_n برابر با $0.8E_p$ در نظر گرفته شده است [۶]، [۷]، [۹]، [۱۲].

با توجه به لایه‌های افقی بتن غلتکی بدنه‌ی سد و محور X مختصات کلی که در راستای افق می‌باشد، پس $\theta_p = 90^\circ$ خواهد بود. با این پیش فرض، ماتریس سختی المان‌ها هنگام شروع تحلیل لرزه‌ای، محاسبه شده و مقاومت کششی در راستای عمود بر صفحه‌ی نرم‌شدگی (درز) متناسب با تغییر سختی، کاهش می‌یابد.

۴-۲- مدل اندرکنش سد و دریاچه

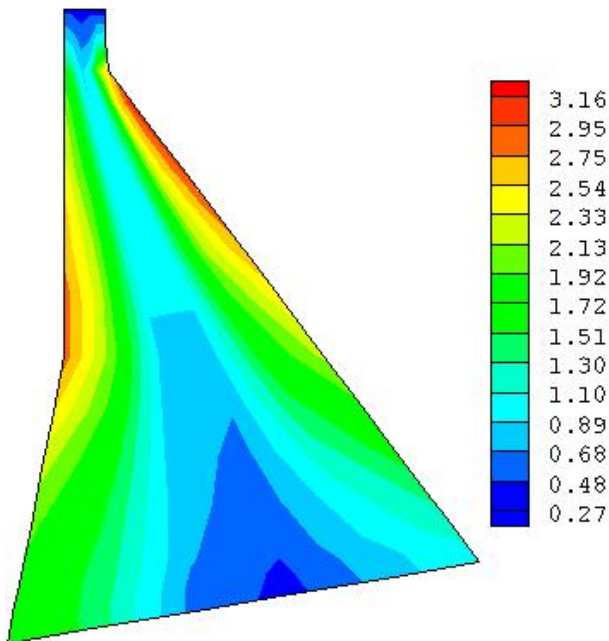
اندرکنش سد-دریاچه، یک مساله‌ی کوپله شامل دو معادله‌ی دیفرانسیل از مرتبه‌ی ۲ می‌باشد که با روابط ذیل بیان می‌شود:



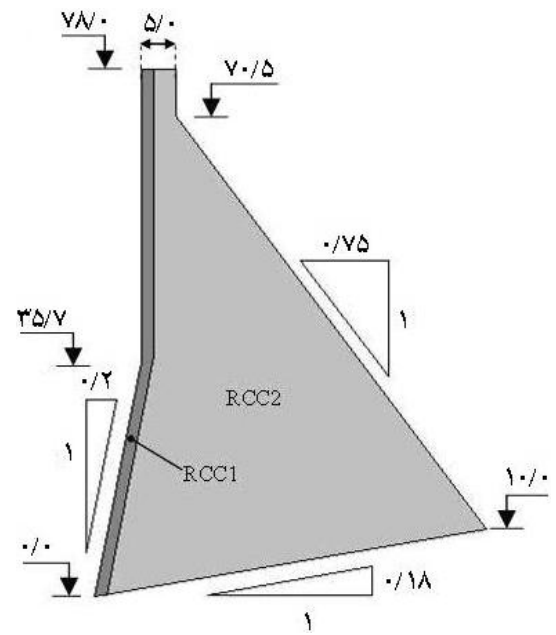
شکل () : رکوردهای زلزله‌ی Kobe : الف- مولفه‌ی افقی شتاب
ب- مولفه‌ی قائم شتاب

۵-۲- نتایج تحلیل‌ها

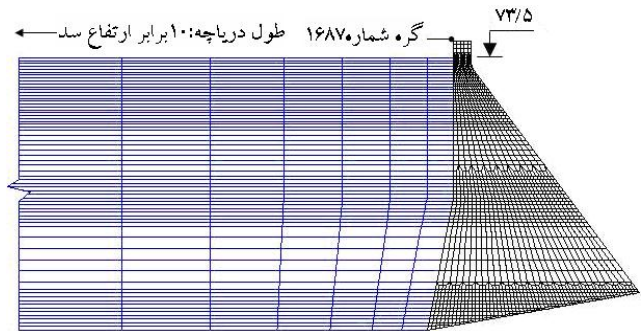
شکل‌های (۶) و (۷) پوش بیشینه‌ی تنش‌های کششی اصلی بدنه‌ی سد بتن غلتکی وزنی جگین در تحلیل دینامیکی خطی تحت زلزله‌های کوینا و کوبه را نشان می‌دهند. در شکل‌های (۸) و (۹) نحوه‌ی ترک‌خوردگی بدنه‌ی سد جگین در تحلیل لرزه‌ای غیرخطی تحت زلزله‌ی کوبه بدون و با اثر درزه (رفتار غیرایزوتروپیک بتن) نمایش داده شده است.



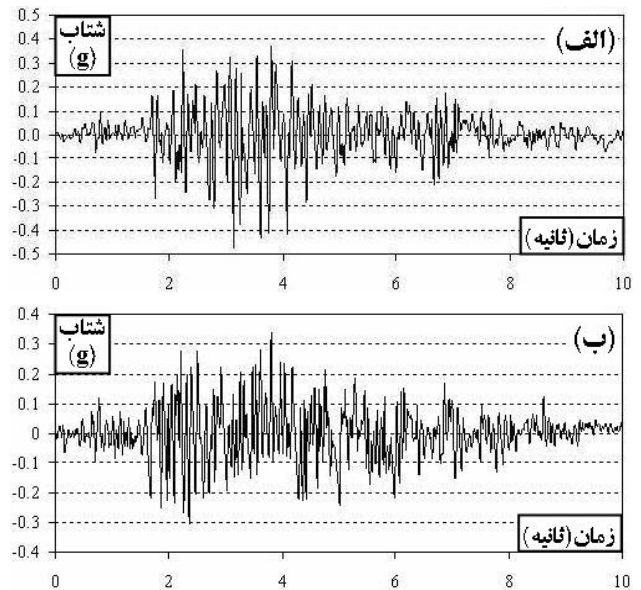
شکل () : بیشینه‌ی تنش‌های کششی اصلی بدنه‌ی سد بتن غلتکی جگین در تحلیل دینامیکی خطی تحت زلزله‌ی Koyna



شکل () : بزرگ‌ترین بلوک سد بتن غلتکی وزنی جگین



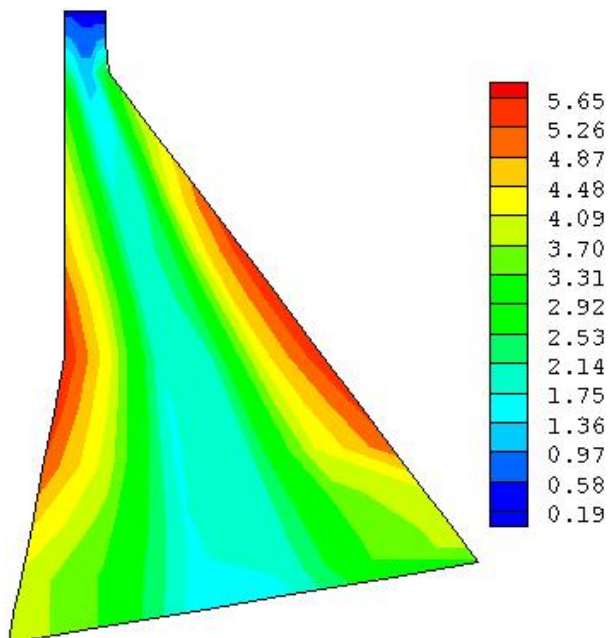
شکل () : مدل المان محدود سیستم سد و دریاچه‌ی بزرگ‌ترین بلوک سد بتن غلتکی وزنی جگین



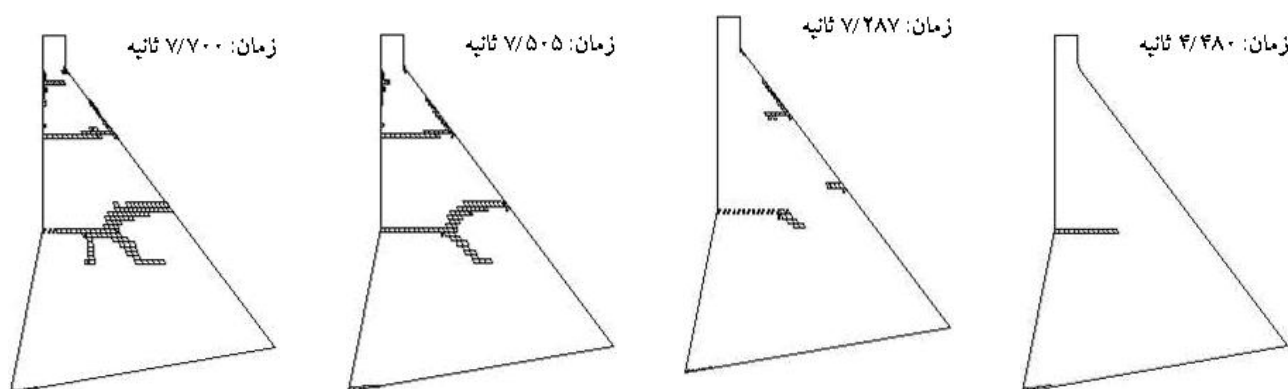
شکل () : رکوردهای زلزله‌ی Koyna : الف- مولفه‌ی افقی شتاب
ب- مولفه‌ی قائم شتاب

۶- نتیجه

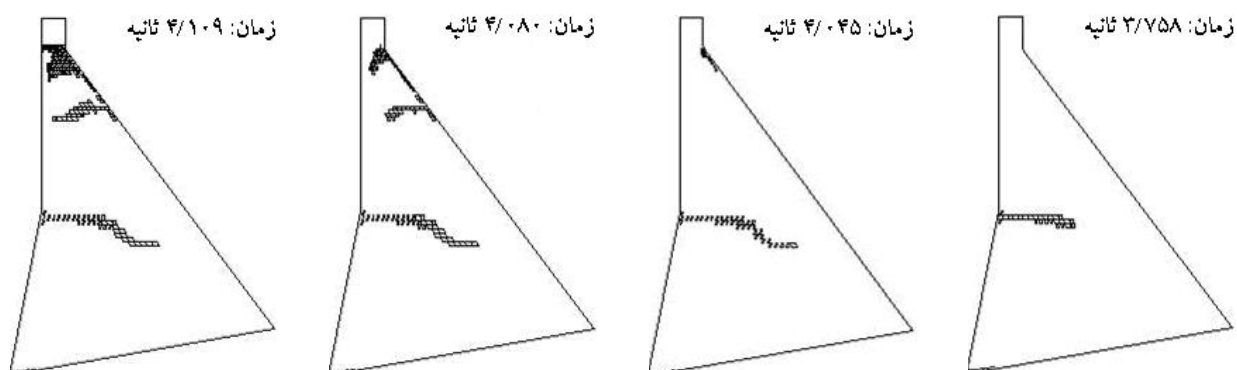
یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در ساخت سدهای بتنی وزنی به طور حتم امکان‌پذیری استفاده از بتن غلتکی می‌باشد که باعث کاهش هزینه و اقتصادی شدن ساخت این گونه سازه‌ها به سبب روش اجرای سریع آن شده است. با توسعه‌ی سریع استفاده از چنین تکنولوژی در صنعت ساخت سدها، مطالعات آزمایشگاهی و عددی جهت تعیین مصالح و نسبت اختلاط آن، خواص مکانیکی و پارامترهای شکست بتن غلتکی اهمیت بسیاری یافته است. همچنین بررسی عملکرد واقع‌بینانه‌ی سدهای بتنی وزنی و بتن غلتکی در بارگذاری‌های لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است.



شکل (۷): بیشینه‌ی تنش‌های کششی اصلی بدنه‌ی سد بتن غلتکی جگین در تحلیل دینامیکی خطی تحت زلزله‌ی Kobe



شکل (۸): نحوه‌ی ترک‌خوردگی بدنه‌ی سد بتن غلتکی جگین در تحلیل لرزه‌ای غیرخطی تحت زلزله‌ی Kobe



شکل (۹): نحوه‌ی ترک‌خوردگی بدنه‌ی سد بتن غلتکی جگین در تحلیل لرزه‌ای غیرخطی با اثر درزه (رفتار غیرایزوتروپیک بتن) تحت زلزله‌ی Kobe

جدول (۱): پارامترهای مورد نیاز به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی بتن غلتکی سد جگین

Parameters	RCC ₁	RCC ₂
Tensile Strength (MPa)	1.7	1.4
Elastic Modulus (GPa)	21	20
Fracture Energy (N/m)	96	84
Poisson Ratio	0.2	0.2
Unit Weight (Kg/m ³)	2450	2450

۷- مراجع

- [۱] Bazant, Z. P.; "Concrete Fracture Models: Testing and Practice", Journal of Engineering Fracture Mechanics, vol. 69, p.p. 165-205, 2002.
- [۲] Bazant, Z. P.; Giraudon, E. B.; "Statistical Prediction of Fracture Parameters of Concrete and Implications for Choice of Testing Standard", Journal of Cement and Concrete Research, vol. 32, p.p. 529-556, 2002.
- [۳] Berton, R.; Mazloumi, A.; Ghaemian, M.; "Estimation of Fracture Parameters Using Experimental Test Results for Nonlinear Seismic Analysis of Jahgin RCC Gravity Dam", Journal of Dam Engineering, vol. xx, pp. 5-38, 2009.
- [۴] Calayir, Y.; Karaton, M.; "Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Reservoir Interaction", Journal of Computers and Structures, vol. 83, p.p. 1595-1606, 2005.
- [۵] Chopra, A. K.; Chakrabarti, P.; "The Earthquake Experience at Koyna Dam and Stresses in Concrete Gravity Dams", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 1, p.p. 151-164, 1972.
- [۶] Chuhan, Z.; Guanglun, W.; Shaomin, W.; Yuexing, D.; "Experimental Tests of Rolled Compacted Concrete and Nonlinear Fracture Analysis of Rolled Compacted Concrete Dams", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 14(2), p.p. 108-115, 2002.
- [۷] Dunstan, M. R. H.; Aldecoa, R. I.; "Quality Control in RCC Dams Using the Direct Tensile Test on Jointed Cores, Roller Compacted Concrete Dams", Berga et al. (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, p.p. 943-950, 2003.
- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی خطی بزرگ ترین بلوک سد بتن غلتکی جگین نشان می‌دهد که بیشینه تنش‌های کششی اصلی در محل تغییر شیب بدنه در بالادست و در محدوده‌ی میانی و نزدیک به تاج در سطح پایین‌دست اتفاق می‌افتد.
- در تحلیل لرزه‌ای غیرخطی تحت شتاب‌های افقی و قائم زلزله‌ی کوبه با در نظرگیری رفتار ایزوتروپیک بتن (یعنی بدون اثر درزه) مشاهده می‌شود که ترک به صورت افقی از محل تغییر شیب مقطع سد در بالادست به داخل بدنه گسترش یافته و با گذشت زمان در محدوده‌ی مذکور از دوسمت بالادست و پایین‌دست، سرتاسر مقطع را دربر می‌گیرد. البته در تراز بالاتر واقع در پایین گلوگاه سد نیز ترک در سرتاسر مقطع رخ می‌دهد.
- با در نظرگیری رفتار ارتوتروپیک بتن (یعنی اعمال اثر درزه) باز هم توسعه‌ی ترک از محل تغییر شیب مقطع در بالادست به داخل بدنه به صورت افقی و مایل رخ می‌دهد. همچنین آسیب زیادی در محل گلوگاه سد مشاهده شده که به مرور سراسر مقطع را در محدوده‌ی مذکور دربر می‌گیرد.
- نتیجه‌گیری کلی از تحلیل‌های غیرخطی انجام شده بیانگر آن است که با اعمال اثر درزه، توسعه‌ی بیشتر ترک به ترازهای بالاتر بدنه منتقل شده و آسیب زیادی نزدیک به گلوگاه سد اتفاق می‌افتد.

- Rescher, O.; “*Importance of Cracking in Concrete Dams*”, Journal of Engineering Fracture Mechanics, vol. 35(3), p.p. 503-524, 1990.
- US Army Corps of Engineers.; “*Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams*”, Engineer Pamphlet (EP), No.1110-2-12, 1995.
- Zuohui, P.; “*Material Model of High Roller Compacted Concrete Dam*”, Journal of Dam Engineering, vol. 12, p.p. 143-166, 2004.
- [۱۱] Ghaemian, M.; Ghobarah, A.; “*Nonlinear Seismic Response of Concrete Gravity Dams with Dam-Reservoir Interaction*”, Journal of Engineering Structures, vol. 21, p.p. 306-315, 1999. [۸]
- [۱۲] Li, Q.; Zhang, F.; Zhang, W.; Yang, L.; “*Fracture and Tension Properties of Roller Compacted Concrete Cores in Uniaxial Tension*”, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 14(5), p.p. 366-373, 2002. [۹]
- [۱۳] Pal, N.; “*Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams*”, Report No. EERC 74-14, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974. [۱۰]