

بررسی تأثیر رفتار غیرخطی مصالح بدنه سد بر نمایش لرزه‌ای سد بتن غلتکی

مجید پاسبانی خیاوی^{۱*}

محمد جلالی میناآباد^۲

چکیده

در این تحقیق، به بررسی تأثیر رفتار غیرخطی بتن در نمایش لرزه‌ای سد بتن غلتکی پرداخته می‌شود. مدل غیرخطی مصالح، به دلیل استفاده از تمام ظرفیت سازه، رفتار نزدیک به واقعیت را از خود نشان داده و مناسب‌ترین روش برای طراحی محسوب می‌شود. لذا در این مقاله، با معرفی مدل مناسب برای بیان رفتار غیرخطی بتن غلتکی، برای مدل‌سازی و تحلیل از نرم‌افزار انسیس که مبتنی بر روش اجزاءمحدود است، استفاده شده و اندرکنش بین مخزن، سد و فونداسیون در مدل لحاظ شده است. با توجه به رفتار سد بتنی غلتکی، مدل‌سازی به صورت دوبعدی انجام شده و تحلیل دینامیکی با استفاده از روش تاریخچه زمانی با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله Northridge در حالت خطی و غیرخطی انجام شده است. برای بررسی دقیق تأثیر رفتار غیرخطی بتن پاسخ فشار هیدرودینامیکی در کف مخزن، تغییر مکان تاج سد، تنش اصلی اول و تنش اصلی سوم به عنوان پاسخ‌های بحرانی انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی تأثیر رفتار غیرخطی روی پاسخ‌های خروجی، نتایج در دو حالت خطی و غیرخطی به صورت تاریخچه زمانی بررسی شده و اختلاف بین پاسخ‌ها مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی

سد بتن غلتکی، رفتار غیرخطی، روش اجزاءمحدود، اندرکنش

۱- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی. pasbani@uma.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

مقدمه

گریب^۸ و تیناوی^۹ (۱۹۹۳ و ۱۹۹۵) تئوری مکانیسم خرابی غیرایزوتروپیک را در تحلیل غیرخطی لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی بکار بردند. این مدل قادر به توصیف باز و بسته شدن ترک با استفاده از مشخصات المان مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و انرژی شکست می‌باشد. در مطالعه آن‌ها مخزن به روش جرم افزوده مدل شد.

فنوس^{۱۰} و چوپرا (۱۹۸۴) سد پاین‌فلت را با استفاده از مدل ترک اندود و معیار شکست کششی بررسی نمودند که در آن پروفیل‌های ترک حاصل بسیار پراکنده بوده و به دلیل آزادسازی ناگهانی انرژی در المان‌های شکسته کوچک، در مدل آن‌ها ناپایداری عددی مشاهده شد.

در زمینه تحقیق در مورد رفتار لرزه‌ای سد بتن غلتکی چوهان^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۲) نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتن غلتکی و تحلیل شکست غیرخطی سدهای بتن غلتکی را ارائه نمودند. در این تحقیق نمونه‌هایی از بتن غلتکی مصرفی در ساخت سد لانگتان^{۱۲} در چین تهیه شد. با انجام آزمایش بر روی آن‌ها، پارامترهای غیرخطی موردنیاز و منحنی تنش-کرنش در کشش جهت استفاده در تحلیل غیرخطی بدست آمد. بزرگ‌ترین بلوک سد با معیار شکست غیرخطی و گسیختگی فشار-برش تحت تحلیل لرزه‌ای غیرخطی قرار گرفت. نتایج حاصل، ترک‌های به وجود آمده در مناطق مربوط به پنجه‌ی سد و قسمت‌های فوقانی در محل تغییر شیب بدنه در پایین‌دست سد و گسترش آن تا سطح بالادست را نشان داده است.

میرزابزرگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعات خود یک مدل خرابی غیرایزوتروپیک را به منظور تحلیل پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی پیشنهاد نمودند. در مدل آن‌ها اندرکنش دینامیکی بین مخزن و سازه با استفاده از روش Staggered displacement موردبررسی قرار گرفت.

زوهویی^{۱۴} (۲۰۰۴) مدل عددی برای شبیه‌سازی رفتار بتن سدهای بتن غلتکی را ارائه نمود که در آن از روابط تنش-

در سال‌های اخیر سد بتن غلتکی به علت ویژگی‌ها و مزیت‌هایی که در مقایسه با سایر سدها دارد، موردتوجه اکثر طراحان و مهندسان قرار گرفته است. مزیت‌هایی شامل سرعت بالا در اجرا، سهولت در اجرا و عدم لزوم داشتن ماشین‌آلات پیچیده در اجرای آن، از مهم‌ترین آن‌ها محسوب می‌شود. از این رو، اطلاع از خصوصیات و رفتار بتن غلتکی برای امر طراحی بسیار مهم و تأثیرگذار بوده و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است.

در مراحل اولیه مطالعات در مورد تحلیل غیرخطی سدها، چوپرا^۱ و چاکرابارتی^۲ (۱۹۷۲) موقعیت پروفیل‌های ترک را با استفاده از تحلیل الاستیک خطی پیش‌بینی نمودند. در مطالعه آن‌ها، سد کوینا^۳ و سد پاین‌فلت^۴ بدون در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی با مخزن و پی موردبررسی قرار گرفتند.

در ادامه مطالعات آنالیز غیرخطی به روش اجزاءمحدود پال^۵ (۱۹۷۴) سد کوینا را تحلیل کرد. در مدل وی فونداسیون صلب فرض شده و از اثرات اندرکنش صرف‌نظر شده است. همچنین از رابطه غیرخطی برای تنش-کرنش و ضابطه مقاومت برای جوانه‌زنی و رشد ترک و مدل ترک اندود استفاده شده است.

باتاچارجی^۶ و لگر^۷ (۱۹۹۳) یک روش برای تحلیل غیرخطی برای سیستم سد - مخزن - فونداسیون در سدهای بتنی وزنی در حوزه فرکانس ارائه نمودند که در آن اثر مخزن با استفاده از ماتریس‌های جرم افزوده، میراگرها و فنرها مدل شده است. آن‌ها در تحقیق خود مدل ترک اندود را به کار بردند و با استفاده از مدل ترک چرخشی و فرض صلب بودن

پی، سد کوینا را مدل کردند. مدل آن‌ها به دلیل انجام تحلیل در حوزه فرکانس، برای آنالیز غیرخطی مناسب نیست.

۸. Ghrib

۹. Tinawi

۱۰. Fenves

۱۱. Chuhan

۱۲. Longtan

۱۳. Mirzabozorg

۱۴. Zuohui

۱. Chopra

۲. Chakrabarti

۳. Koyana

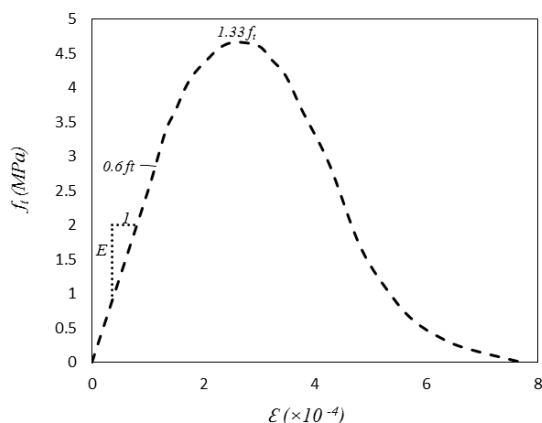
۴. Pine flat

۵. Pal

۶. Bhattacharjee

۷. Leger

غلطکی بر نمایش لرزه‌ای سد پرداخته می‌شود. برای این منظور مدل موردنظر برای دو حالت رفتار خطی و غیر-خطی با استفاده از نرم‌افزار انسیس^۵ مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل با هم مقایسه می‌شود. رفتار غیرخطی مصالح با توجه به آیین‌نامه ارتش امریکا (۱۹۹۵) به صورت نمودار تنش- کرنش کششی بتن غلتکی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): نمودار تنش- کرنش کششی بتن سد

معادلات حاکم

با در نظر گرفتن شرایط هیدرودینامیکی حاکم بر سیستم، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- با توجه به شرایط حاکم بر مدل سد بتن غلتکی و شکل هندسی مخزن، مسئله به صورت دوبعدی در نظر گرفته می‌شود.

- با توجه به اینکه هدف اصلی تحقیق، بررسی تأثیر رفتار غیرخطی بتن بر پاسخ هیدرودینامیکی سد است، بنابراین مصالح سد به صورت غیرخطی در نظر گرفته می‌شود.

- با توجه به شرایط حاکم بر مسئله، برای مدل مخزن، معادله حاکم بر سیال ناویر- استوکس می‌باشد که در آن سیال به صورت غیر چرخشی، غیر لزج و با تراکم پذیری خطی فرض شده و تغییر مکان‌های آن کوچک در نظر گرفته می‌شود. همچنین از اثرات امواج وزنی در سطح آزاد صرف نظر شده و فشار در سطح سیال برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

- تحلیل به صورت تاریخچه زمانی انجام می‌گیرد.

کرنش با ساختار چندلایه‌ای جهت توصیف رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک، استفاده شده است. به عنوان نمونه‌ی عملی، مدل اجزاء محدود سد لانگتان^۱ با چهار طرح اختلاط مختلف از بتن غلتکی با خواص مقاومتی متفاوت در قسمت‌های مختلف بدنه، تحلیل شد. در مطالعه آن‌ها از آنجا که برای نواحی بالایی مقطع سد در قسمت بالادست، بتنی با خاصیت ایزوتروپیک و در قسمت پایین دست آن بتن غلتکی با خاصیت غیرایزوتروپیک در نظر گرفته شده است، در نتیجه در شمارگر 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 ارائه جواب واحد در آن نقاط مشترک ارائه گردید. کارواخال^۲ و همکاران (۲۰۰۹) نیز یک روش احتمالاتی برای ارزیابی بارهای هیدرولیکی و مقاومت برشی بتن غلتکی فشرده (RCC) در سدهای وزنی پیشنهاد دادند.

کارتال^۳ (۲۰۱۲) از یک مدل سه بعدی برای تحلیل لرزه سد بتن غلتکی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی بتن استفاده کرد. وی با به کار بردن مدل سخت‌شوندگی دوخطی و چندخطی برای بیان رفتار غیرخطی مصالح بتن و فونداسیون نتایج را با استفاده از مدل اجزاء محدود استخراج کرد و پاسخ تغییر مکان و تنش‌های اصلی را برای رفتارهای خطی و غیرخطی مصالح با در نظر گرفتن مخزن خالی و پر مقایسه کرد. قائدی^۴ و همکاران (۲۰۱۶) از مدل پلاستیسیته آسیب بتن برای بیان رفتار غیرخطی کششی بتن در تحلیل لرزه‌ای سد بتن غلتکی استفاده کردند. آن‌ها دو نوع مدل سد را با گالری و بدون گالری در نظر گرفته و تأثیر شکل و اندازه گالری را در روند گسترش ترک بررسی کردند. قائدی و همکاران (۲۰۱۸) در ادامه از مدل پلاستیسیته آسیب بتن برای بررسی تأثیر انعطاف پذیری فونداسیون بر رفتار لرزه‌ای سد بتن غلتکی استفاده کرده و پاسخ‌های سد را برای دو حالت فونداسیون صلب و فونداسیون انعطاف پذیر با هم مقایسه کردند.

با توجه به اهمیت رفتار غیرخطی مصالح در تحلیل سدهای بتنی، در این تحقیق به بررسی تأثیر رفتار غیرخطی بتن

۱. Longtan

۲. Carvajal

۳. Kartal

۴. Ghaedi

۳) $P = 0$ برای حل معادلات دینامیکی از روش نیومارک استفاده می‌شود.

برای بخش‌های مختلف سد از مدل تنش مسطح استفاده می‌شوند.

$$\rho \vec{a}_{ns} = - \frac{\partial P}{\partial n} \quad (۴)$$

در معادله فوق a_{ns} بردار شتاب سد یا فونداسیون در مرز مشترک با مخزن است و n بردار یکه عمود بر سطح سد یا فونداسیون و به سمت سیال است.

در انتهای دوردست مخزن از شرط مرزی استهلاک سامرفلد^۲ استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود (پاسبانی و همکاران، ۱۳۸۸):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (۵)$$

در رابطه‌ی فوق نیز C سرعت انتشار امواج صوتی است.

فرمول‌بندی اجزاء محدود معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم سد-مخزن-فونداسیون به صورت ماتریسی و با استفاده از روش اجزاء محدود، بسط داده می‌شوند. معادله دینامیکی گسسته‌سازی شده سیستم سد می‌تواند با استفاده از المان‌های سازه‌ای فرمول‌بندی شود. برای اعمال اثرات اندرکنش لازم است بار فشاری اعمال شده از طرف مخزن بر روی سد به فرمول‌بندی اضافه شود. ماتریس‌های اجزاء محدود مخزن نیز با گسسته‌سازی معادله موج استخراج می‌شوند. در استخراج ماتریس‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها به صورت مشتقات مرتبه اول و دوم تغییر مکان‌ها بسط داده می‌شوند (زینکوویچ^۳ و بتس^۴، ۱۹۷۸). معادلات گسسته‌سازی شده به صورت هم‌زمان با استفاده از روش تکراری سعی و خطا حل شده و نتایج مورد نظر برای سیستم استخراج می‌شود. اثر اندرکنش سد و مخزن نیز با نوشتن معادلات کوپله‌ی سد و مخزن که شامل دو معادله دیفرانسیلی از مرتبه‌ی دوم است در نظر گرفته می‌شود. معادله دینامیکی سد و

۱) $M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = M\ddot{u}_g + F^{Pr}$ در رابطه فوق، M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی و K ماتریس سختی سازه می‌باشد. u بردار تغییر مکان نسبی و \ddot{u}_g بردار شتاب زمین است. F^{Pr} بار فشاری وارد شده از طرف مخزن بر سد در محل تماس می‌باشد.

مدل‌سازی دامنه سد

معادله حاکم بر رفتار سدها، معادله حرکت است. ولی برای در نظر گرفتن کامل اثر اندرکنش سیال و سازه، بار اعمال شده ناشی از فشار هیدرو دینامیکی سیال در محل تماس سد و مخزن باید به معادلات سازه مطابق رابطه (۱) افزوده شود.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = M\ddot{u}_g + F^{Pr} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی و K ماتریس سختی سازه می‌باشد. u بردار تغییر مکان نسبی و \ddot{u}_g بردار شتاب زمین است. F^{Pr} بار فشاری وارد شده از طرف مخزن بر سد در محل تماس می‌باشد.

مدل‌سازی دامنه مخزن

در مسائل مربوط به اندرکنش آکوستیکی سازه و سیال، معادله مربوط به دینامیک سازه باید همراه با معادلات ناویر-استوکس، اندازه حرکت و معادله پیوستگی سیال در نظر گرفته شود. با فرض اینکه آب داخل مخزن سد مورد مطالعه غیر لزج، تراکم ناپذیر و همراه با تغییر مکان‌های کوچک است، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به معادله موج خلاصه می‌شوند. همچنین فشار اعمال شده از طرف سیال بر سازه در محل تماس، برای تشکیل ماتریس اندرکنش در نظر گرفته می‌شود (هوآنگ^۱، ۱۹۹۰).

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (۲)$$

در رابطه فوق $c = \sqrt{k/\rho_0}$ سرعت امواج صوتی در سیال، ρ_0 جرم مخصوص سیال، k مدول سختی سیال، P فشار هیدرو دینامیکی و t زمان می‌باشد.

شرایط مرزی حاکم بر سیستم

در سطح آزاد مخزن از اثرات امواج سطحی صرف نظر شده و فشار در سطح آب مخزن صفر فرض می‌شود؛ یعنی:

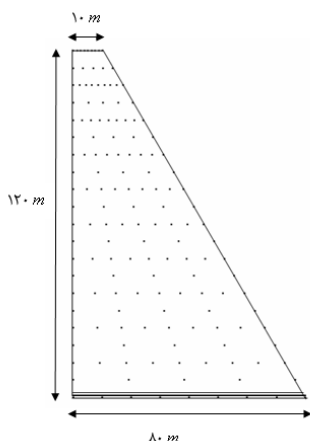
۱. Sommerfeld

۲. Zienkiewicz

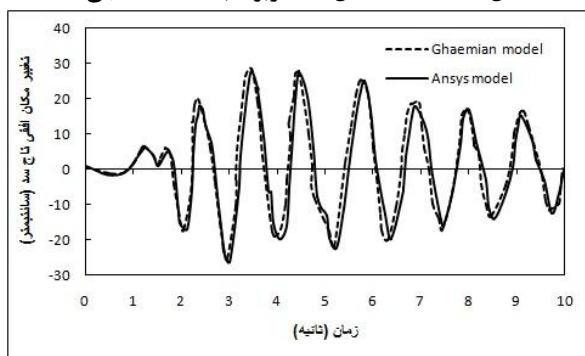
۳. Bettess

۴. Hwang

توسط قائمیان با استفاده از روش عددی و شبکه‌بندی متناوب با اعمال شتاب‌نگاشت السنترو^۳ مورد آنالیز قرار گرفته، انتخاب شده است. مشخصات هندسی مدل موردنظر که یک سد بتنی وزنی با مخزن کاملاً پر است، در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن کلیه ابعاد به متر می‌باشد. مدول الاستیسیته، وزن واحد حجم و ضریب پواسون بتن به ترتیب ۳۴۳۰ مگا پاسکال، ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۲ و فرکانس اساسی سد ۶/۸۳۷ رادیان بر ثانیه است. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان تاج سد برای مدل و نرم‌افزار انسیس در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل می‌توان به دقت و قابلیت مناسب نرم‌افزار انسیس در حل مسئله اندرکنش سد و مخزن پی برد.



شکل (۲): هندسه مدل سد مربوط به صحت سنجی



شکل (۳): مقایسه تاریخیچه زمانی تغییر مکان حداکثر تاج سد

مطالعه موردی

به‌عنوان مطالعه موردی، مدل دوبعدی سد بتن غلتکی واتانا^۴ انتخاب شده است. علاوه بر تعریف رفتار غیرخطی بتن برای سازه سد با استفاده از نمودار تنش-کرنش، وزن

مخزن به‌صورت زیر بیان می‌شود (قائمیان^۱ و گبارا^۲، ۱۹۹۹):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f_1\} - \quad (6)$$

$$[M]\{\ddot{u}_g\} + [Q]\{P\} = [F_1] + [Q]\{P\}$$

$$[G]\{\ddot{P}\} + [\dot{C}]\{\dot{P}\} + [\dot{K}]\{P\} = \{F_2\} - \rho[Q]^T\{\ddot{u}\} \quad (7)$$

که در آن، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه است. همچنین، $[G]$ ، $[\dot{C}]$ و $[\dot{K}]$ نشان‌دهنده ماتریس معادل جرم، میرایی و سختی مخزن است. Q ماتریس کوپله و $\{f_1\}$ بردار مجموع نیروی استاتیکی و نیروی جسمی نظیر وزن سد است، که به بدنه سد وارد می‌شود. $\{F_2\}$ مجموع نیروهایی است که در اثر شتاب پایه $\{\ddot{u}_g\}$ در مرز سد-مخزن و شتاب کل $\{\ddot{U}\}$ در مرز سد-فونداسیون ایجاد می‌شود. $\{P\}$ فشار هیدرودینامیکی وارد بر مرز سد و دریاچه و ρ نیز چگالی آب است. ماتریس کوپل مربوط به فشار مخزن و نیروهای تماس بین سد-مخزن به شرح زیر است:

$$[Q]\{P\} = \{f\} \quad (8)$$

که در آن $\{f\}$ بردار نیروی وارد بر سازه ناشی از فشار هیدرودینامیکی است.

برای یک المان در مرز اندرکنش سد و مخزن، کار انجام‌شده توسط فشار هیدرودینامیکی برابر است با کار معادل نیروهای گرهی در مرز تماس که ماتریس کوپل را برای یک المان به شرح زیر ارائه می‌دهد:

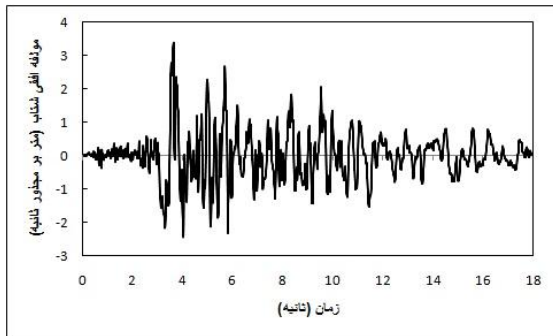
$$[Q]^e = \int_{s_e} \{N_n^s\} \{N^f\}^T ds \quad (9)$$

که در آن $\{N^f\}$ بردار تابع شکل سیال و $\{N_n^s\}$ تابع شکل نرمال سازه در مرز تماس است. $[Q]$ ماتریس کوپل کل می‌باشد که از جمع تمامی ماتریس‌های کوپل المان‌ها بدست می‌آید.

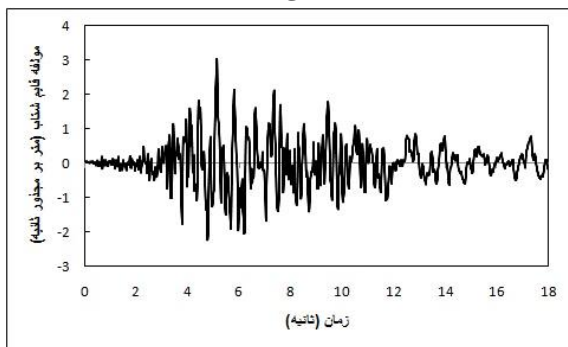
ارزیابی و صحت سنجی نرم‌افزار

برای ارزیابی و صحت سنجی نتایج آنالیز دینامیکی نرم‌افزار انسیس، یک مدلی از سد بتنی وزنی که در سال ۱۹۹۸

۱۱/۴ کیلومتر بود و بزرگی آن ۶/۷ در مقیاس Mw اعلام شده است. مؤلفه‌های افقی و قائم این زلزله در شکل (۵) و (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۵): مؤلفه افقی زلزله Northridge



شکل (۶): مؤلفه قائم زلزله Northridge

برای بررسی تأثیر رفتار غیرخطی مصالح در تحلیل دینامیکی از تعریف رفتار بتن غلتکی با استفاده منحنی تنش- کرنش کششی بتن استفاده شد و با اعمال شتاب‌نگاشت زلزله Northridge و در نظر گرفتن شرایط ذکر شده مدل موردنظر به صورت خطی و غیرخطی تحلیل شده و نتایج موردنظر حاصل شده است که از مقایسه آن‌ها می‌توان تفاوت مقادیر پاسخ‌ها در دو حالت را به خوبی مشاهده کرد.

نتایج تحلیل

پس از تحلیل مدل، با استفاده منحنی‌های پاسخ سازه به صورت تاریخچه زمانی به مقایسه روند تغییرات پاسخ‌ها در دو حالت خطی و غیرخطی پرداخته می‌شود. در شکل- های (۷) تا (۱۰) روند این تغییرات نمایش داده شده است. در شکل (۷) تغییرات فشار هیدرودینامیکی در کف مخزن در طول زمان اعمال زلزله در دو حالت خطی و غیرخطی به خوبی نشان داده شده است.

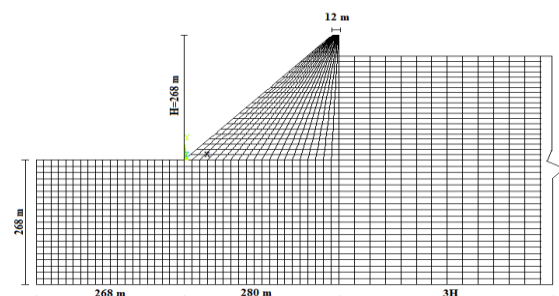
همان طوری که ملاحظه می‌شود تغییرات فشار هیدرودینامیکی ناشی از تأثیر رفتار غیرخطی از یک زمان مشخصی آغاز شده و تا پایان اعمال زلزله ادامه دارد.

واحد حجم و ضریب پواسون آن نیز به ترتیب ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۲۵ و مدول الاستیسیته فونداسیون ۳۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۳۰ است. لازم به ذکر است که برای فونداسیون از مدل فونداسیون بدون جرم استفاده شده است. سرعت امواج فشاری در آب نیز ۱۴۴۰ متر بر ثانیه و چگالی آن ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

آنالیز مدل

برای آنالیز لرزه‌ای سد بتن غلتکی موردنظر از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت آنالیز لرزه‌ای با در نظر گرفتن هندسه نامنظم دامنه‌ها و اثرات اندرکنش مخزن و فونداسیون را دارا می‌باشد. برای انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک استفاده شده که پارامترهای آن به صورت $\beta = 0.25$ و $\gamma = 0.5$ می‌باشد. گام زمانی برابر $\Delta t = 0.02$ انتخاب شده و برای اعمال اثرات میرایی روش ریلی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای گسسته سازی مدل سد و فونداسیون از المان Plane183 که یک المان غیرخطی نیز محسوب می‌شود و برای آب از المان Fluid29 که المان مناسب برای نمایش خاصیت تراکم‌پذیری سیال است، استفاده شده است (انسیس، ۲۰۰۷). برای مدل اجزاءمحدود، طول مخزن سه برابر ارتفاع سد و ارتفاع فونداسیون نیز به اندازه‌ی یک برابر ارتفاع سازه سد در نظر گرفته شده است. برای دوردست از شرط مرزی سامرفلد استفاده شده است. هندسه و گسسته سازی اجزاءمحدود مدل موردنظر در شکل (۴) نمایش داده شده است:



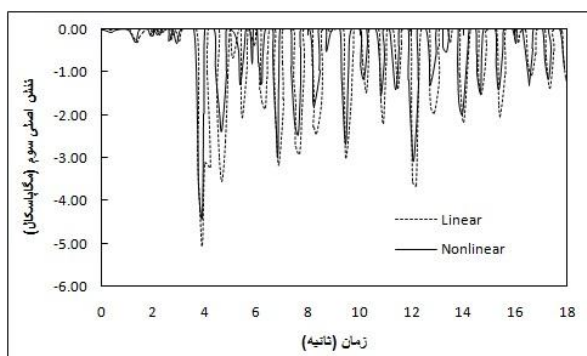
شکل (۴): هندسه مدل سد و گسسته سازی اجزاءمحدود

شتاب‌نگاشت اعمال شده در این مدل، زلزله Northridge است. این زمین‌لرزه، در تاریخ ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ میلادی در آمریکا، منطقه Northridge رخ داد. ژرفای این زلزله

شکل (۹): پاسخ تاریخچه زمانی تنش کششی در پاشنه سد در دو حالت خطی و غیرخطی

با توجه به منحنی خروجی تنش کششی در پاشنه سد این نکته حائز اهمیت است که بیشینه تنش کششی ایجادشده در بدنه سد از حداکثر تنش موجود در نمودار تنش- کرنش کششی بتن تجاوز نکرده است و در واقع می‌توان گفت که بتن از رفتار غیرخطی تبعیت کرده و اختلاف در پاسخها در دو حالت خطی و غیرخطی نیز به‌وضوح این تأثیر را نشان می‌دهد.

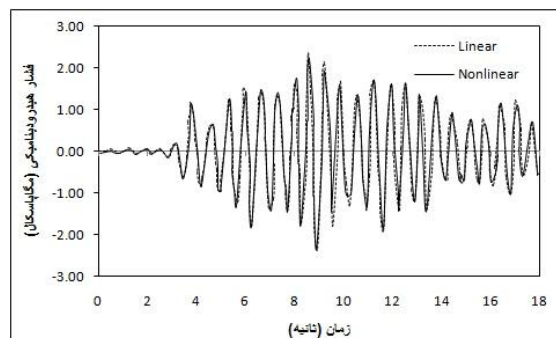
در انتها، تنش اصلی سوم (فشاری) ایجادشده در پنجه سد در دو حالت خطی و غیرخطی و به‌صورت تاریخچه زمانی در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل (۱۰): پاسخ تاریخچه زمانی تنش فشاری در پنجه سد در دو حالت خطی و غیرخطی

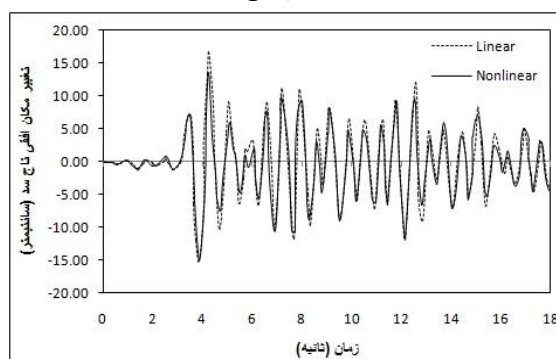
همان‌طوری که ملاحظه می‌شود ماکزیمم تنش فشاری ایجادشده در بدنه سد در دو حالت خطی و غیرخطی اختلاف فراوانی با یکدیگر نداشته و تفاوت ناچیزی در مقایسه با اختلاف در تنش کششی مشاهده می‌شود که می‌توان به اهمیت رفتار غیرخطی بتن هنگام مواجه شدن با تنش کشش پی برد.

در ادامه برای بررسی دقیق‌تر تأثیر رفتار غیرخطی در تحلیل مدل و اهمیت استفاده از کل ظرفیت بتن، مقادیر خروجی پاسخها به‌صورت عددی برای چهار پاسخ اصلی شامل فشار هیدرودینامیکی، جابجایی، تنش کششی و تنش فشاری در جدول شماره ۱ خلاصه شده است.



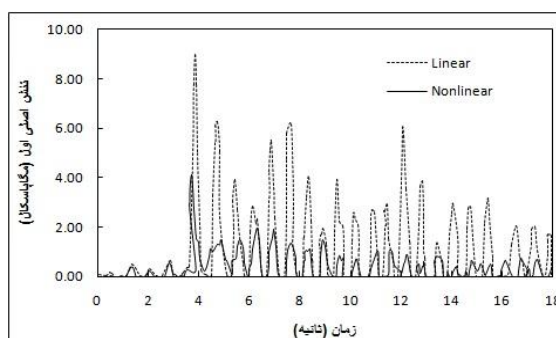
شکل (۷): پاسخ تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی حداکثر در کف مخزن در دو حالت خطی و غیرخطی

در شکل شماره (۸) نمودار تغییر مکان تاج سد به‌صورت تاریخچه زمانی در دو حالت خطی و غیرخطی نمایش داده شده است که تفاوت بین پاسخها قابل مشاهده است.



شکل (۸): پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج سد در دو حالت خطی و غیرخطی

با توجه به شکل فوق، بیشینه جابجایی تاج سد در حالت خطی بیشتر از غیرخطی می‌باشد و از یک زمان معینی سازه وارد رفتار غیرخطی شده و تفاوت در مقادیر پاسخها مشاهده می‌شود. در ادامه و در شکل (۹) تغییرات تنش اصلی اول (تنش کششی) که یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی سدها محسوب می‌گردد، به‌صورت تاریخچه زمانی در دو حالت خطی و غیرخطی، نمایش داده شده است.



جدول (۱): مقادیر عددی حاصل از تحلیل خطی و غیرخطی

مدل مورد مطالعه

پاسخها	حداکثر پاسخ در حالت خطی	حداکثر پاسخ در حالت غیرخطی
فشار هیدرودینامیکی (MPa)	۱/۹۹	۱/۸۳
جابجایی (Cm)	۱۶/۸۰	۱۵/۰۰
تنش کششی (MPa)	۹/۹۴	۴/۴۶
تنش فشاری (MPa)	۵/۰۷	۴/۸۲

شکل (۱۲): درصد اختلاف پاسخهای خروجی در دو حالت خطی و غیرخطی

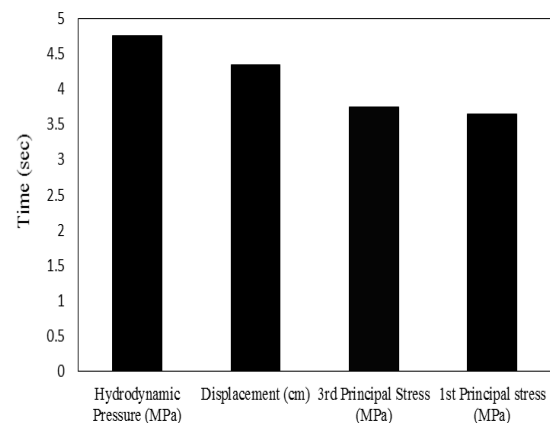
نتیجه گیری

در این تحقیق، با تعریف رفتار غیرخطی بتن غلتکی در حالت کششی، به تحلیل لرزه‌ای سد بتن غلتکی واتانا پرداخته شد. با تعریف شرایط حاکم بر مسئله و در نظر گرفتن اندرکنش بین سد و مخزن مدل موردنظر به صورت خطی و غیرخطی تحلیل و بررسی شد. زلزله اعمال شده به سد، شتاب‌نگاشت زلزله Northridge است که به صورت دو مؤلفه افقی و قائم به مدل موردنظر اعمال شده است. برای بررسی تأثیر رفتار غیرخطی بر سازه، پاسخهای بحرانی سازه برای دو حالت موردبررسی و مقایسه قرار گرفت. فشار هیدرودینامیکی حداکثر در کف مخزن، جابجایی افقی تاج سد، تنش اصلی اول در پاشنه سد و تنش اصلی سوم در پنجه سد به عنوان پاسخهای بحرانی سد در نظر گرفته شدند. در انتها با بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی در دو حالت خطی و غیرخطی به خوبی نقاط شروع رفتار غیرخطی در پاسخهای خروجی مختلف مشخص شد و اختلاف بین پاسخها در دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر در تنش کششی رخ داده است به طوری که اختلاف بین پاسخها در دو حالت خطی و غیرخطی برای تنش کششی تقریباً ۵۶ درصد است در حالی که این اختلاف برای تنش فشاری کمترین مقدار و در حدود ۶ درصد می‌باشد.

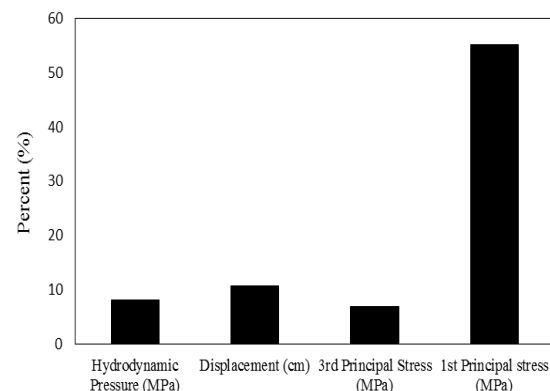
نکته قابل توجه با در نظر گرفتن تمامی پاسخها شروع تأثیر رفتار غیرخطی سازه در پاسخهای مختلف هنگام اعمال بار زلزله است. در انتها از نمودار میله‌ای جهت نشان دادن شروع رفتار غیرخطی سازه در پاسخهای مختلف و همچنین نمایش درصد اختلاف پاسخهای سد استفاده شده که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) این تغییرات نمایش داده شده است.

مراجع

- ۱- پاسبانی خیاوی، م. مصطفی قره‌باغی، ا؛ و عابدی، ک. (۱۳۸۸). "بررسی اثرات شرط مرزی دوردست بر فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن به روش عناصر محدود"، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۳۹(۲): ۱۱-۲۰.
- 2- Ansys user manual, (2007), Release 11.0 documentation for ANSYS, SAS IP, Inc.
- 3- Bhattacharjee, S.S. and Leger, P. (1993). "Seismic cracking and energy dissipation in concrete gravity dams". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 22: 991-1007.
- 4- Carvajal, C. Peyras, L. Bacconnet, J. and Becue, P. (2009). "Probability modeling of shear strength parameters of RCC gravity dams for reliability analysis of structural safety". European Journal of Environmental and Civil Engineering, 13:91-119.
- 5- Chopra, A.K. and Chakrabarti, P. (1972). "The earthquake experience at Koyna Dam and stresses in



شکل (۱۱): زمان شروع رفتار غیرخطی پاسخها



- concrete gravity dams". Earthquake engineering and structural dynamics, 1:151-164.
- 6- Chuhan, Z. Guanglun, W. Shaomin, W. and Yuexing, D. (2002). "Experimental tests of rolled compacted concrete and Nonlinear fracture analysis of rolled compacted concrete dams". Journal of Materials in Civil Engineering, 14(2): 108-115.
 - 7- Engineering and design seismic design provisions for roller compacted concrete dams, (1995), Department of the army U.S. army corps of engineers Washington, DC 20314-1000, Pamphlet No. 1110-2-12, 30 september.
 - 8- Fenves, G. and Chopra, A.K. (1984). "Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction". Earthquake engineering and structural dynamics, 12(5): 663-680.
 - 9- Ghaedi, K. Jameel, M. Ibrahim, Z. and Khanzaei, P. (2016). "Seismic analysis of roller compacted concrete (RCC) dams considering effect of sizes and shapes of galleries". KSCE Journal of Civil Engineering, 20(1):261-272.
 - 10- Ghaedi, K. Hejazi, F. Ibrahim, Z. and Khanzaei, P. (2018). "Flexible Foundation Effect on seismic analysis of roller compacted concrete (RCC) dams using finite element method". KSCE Journal of Civil Engineering, 22(4):1275-1287.
 - 11- Ghaemian, M. and Ghobarah, A. (1998). "Staggered solution schemes for dam-reservoir interaction". Journal of fluid and structures, 12: 933-948.
 - 12- Ghaemian, M. and Ghobarah, A. (1999). "Nonlinear seismic analysis of concrete gravity dams including dam reservoir interaction". Engineering structures, 21: 306-315.
 - 13- Ghrib, F. and Tinawi, R. (1993). "An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams". earthquake engineering and structural dynamic, 24: 157-173.
 - 14- Ghrib, F. and Tinawi, R. (1995). "Nonlinear behavior of concrete dams using damage mechanics". Journal of Engineering Mechanics, 121(4): 513-527.
 - 15- Hwang, H.H.M. and Jaw, J.W. (1990). "Probabilistic damage analysis of structures". ASCE journal of structural engineering, 116: 1992-2007.
 - 16- Kartal, M. E. (2012). "Three-dimensional earthquake analysis of roller-compacted concrete dams". Natural Hazards and Earth System Sciences, 12: 2369-2388.
 - 17- Mirzabozorg, H. Ghaemian, M. and Kianoush, M.R. (2004). "Damage mechanics approach in seismic analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction". European earthquake engineering, 3: 17-24.
 - 18- Pal, N. (1974). "Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams". Report NO. EERC 74-14, earthquake engineering research center, University of California, Berkeley.
 - 19- Zienkiewicz, O.C. and Bettess, P. (1978). "Dynamic fluid-structure interaction: Numerical modeling of the coupled problem". John wiley, New York, 185-193.
 - 20- Zuohui, P. (2004). "Material Model of High Roller Compacted Concrete Dam". Journal of Dam Engineering, 12: 143-166.

Investigation of Nonlinear Behavior of Material on Seismic Performance of Roller Compacted Concrete Dam

Majid Pasbani Khiavi ^{*1}
Mohammad Jalali ²

Abstract

In this research, the effect of nonlinear behavior of concrete on seismic performance of roller compacted concrete (RCC) is discussed. Nonlinear behavior of material shows the real behavior due to use of all structural capacity and it is considered the most appropriate method for design. So in this paper, with proper definition of nonlinear behavior of RCC, the Ansys software based of finite element method has been used for modeling and analysis considering dam-reservoir-foundation interaction. Due to behavior of roller concrete dam, two-dimensional model has been selected and the dynamic analysis carried out in time domain applying the Northridge earthquake components for linear and nonlinear cases. For investigation of the effect of nonlinear behavior on the output results, the maximum hydrodynamic pressure, dam crest displacement, tensile stress in heel and compressive stress in the toe of dam have been selected as critical responses. Finally, for accurate evaluation of the effect of nonlinear behavior on output responses, the results have been obtained as time history curves for both linear and nonlinear states and the difference of responses have been determined.

Keywords

RCC dam, nonlinear behavior, finite element method, interaction

1. Associate professor of civil engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, pasbani@uma.ac.ir

2. M. Sc. Student of civil engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili