هیدروژئولوژی، سال هشتم، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۲
Hydrogeology, Volume 8, No. 2, Winter 2024

# تاثیر حجم آب مفید بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی

**مهرنوش ملکی[۱]، حسام قدوسی [۲*]، امیرجواد مرادلو[۳]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۲- استادیار سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۳- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
*نویسنده مسئول: Ghodousi_he@Yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

## چکیده

سدها سازه‌های خاصی هستند که چنانچه یک سد بر اثر وقوع رخدادهای طبیعی و انسانی، نظیر زلزله دچار شکست گردد، خسارات جبران‌ناپذیر جانی، مالی و زیست محیطی بسیاری ایجاد شده و از طرف دیگر منابع انرژی آن، از دسترس خارج می‌گردد. بنابراین منطقی است که با صرف هزینه‌های بیشتر در مرحله مطالعه و طراحی این سازه‌های پراهمیت، از وقوع خسارات بعدی ناشی از شکست آن‌ها، جلوگیری به‌عمل آورد. در این تحقیق به بررسی رفتار رسوب بر پاسخ سدهای بتنی وزنی پرداخته شده است. پارامتر متغیر، ضخامت رسوب کف مخزن می‌باشد. برای مدل‌سازی سد از مدل پلاستیسیته آسیب بتن استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی سیستم سد مخزن پی رسوب، از روش اجزای محدود به دلیل قابلیت مناسب در اعمال شرایط مرزی مختلف، برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده شده است. مدل مورد نظر برای چهار حالت بدون رسوب و رسوب با ضخامت ۱۰ و ۱۵ متر شبیه‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این آنالیزها نشان دهنده تاثیر زیاد رسوب کف مخزن بر پاسخ سازه سد تحت بار زلزله می‌باشد. با بررسی نتایج انرژی تلف شده در اثر خرابی و خرابی ایجاد شده در اثر اعمال بار لرزه‌ای، ابتدا رسوبات کف مخزن مانند یک جاذب انرژی باعث کاهش پاسخ سازه سد می‌شوند اما در ادامه با افزایش ارتفاع، رسوبات موجب افزیش پاسخ لرزه‌ای سد می‌شوند. جابجایی نسبی تاج سد در جهت رودخانه، در حالت وجود رسوب با عمق ۱۵ متر، برابر ۶/۳۵ سانتی‌متر می‌باشد که این میزان در مقایسه با حالت رسوب با عمق ۱۰ متر، حدود ۱۴ درصد افزایش داشته است.

**کلیدواژگان**: آباکوس، پلاستیسیته، تاج سد، تحلیل غیرخطی، رسوب، سدهای بتنی وزنی.

## مقدمه

سدها سازه‌های خاصی هستند، که به علت هزینه‌های بالای ساخت و در اختیار داشتن منابع عظیم انرژی، نیازمند توجه ویژه‌ای در تحلیل و طراحی می‌باشند. چنانچه یک سد بر اثر وقوع رخدادهای طبیعی و انسانی، نظیر زلزله دچار شکست گردد، خسارات جبران‌ناپذیر جانی، مالی و زیست محیطی زیادی ایجاد شده و از طرف دیگر منابع انرژی آن، از دسترس خارج می‌گردد. در سدها آب داخل مخزن به صورت یک سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر با تغییر مکان‌های کوچک در نظر گرفته شده و سد نیز با رفتار غیرخطی فرض می‌شود. با توجه به پیچیدگی سیستم سد- مخزن-پی-رسوب، در این تحقیق از روش اجزای محدود به دلیل قابلیت مناسب در اعمال شرایط مرزی مختلف، برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده شده است.

سدهای بتنی از سازه‌های مهمی هستند که برای کنترل سیلاب و ذخیره آب به‌صورت وسیعی در جهان ساخته می‌شوند. سدهای بتنی وزنی در کنار مزایای زیادی که دارند، همواره به عنوان یک خطر بالقوه نیز شناخته می‌شوند. در هنگام زلزله‌های با شدت بالا، ترک‌خوردگی عمیق سدهای بتنی وزنی و شکست سد باعث رها شدن آب پشت سد و

ایجاد سیلاب‌های بسیار بزرگ شده و تلفات مالی و جانی زیادی در مناطق پایین دست سد بوجود می‌آورد. از این رو مدل‌سازی نزدیک به واقعیت مجموعه‌ی سد بتنی و تحلیل دقیق اندرکنشی که میان اجزای سد موجود می‌باشد، از طرفی باعث افزایش ایمنی سد شده و از طرف دیگر هزینه-های زیاد ناشی از ساخت سد را کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه اغلب سدها در مناطق لرزه‌خیز ساخته می‌شوند، بنابراین در طراحی آن‌ها لازم است ملاحظات لرزه‌ای به‌صورت مناسبی در نظر گرفته شود. یکی از موارد مهمی که بر رفتار لرزه‌ای سدها تأثیر قابل توجهی دارد. اندرکنش سد، مخزن و رسوب می‌باشد. اندرکنش سد و مخزن موجب ایجاد فشار هیدرودینامیکی علاوه بر فشار هیدرواستاتیکی می‌شود. فشار هیدرودینامیکی به دلیل حرکت سد و اعمال نیرو از طرف سد بر مخزن به وجود می‌آید و سبب تولید امواج فشاری می‌شود. به همین ترتیب رسوب سبب افزایش اینرسی اعمال‌شده بر روی سد به دلیل تغییر مکان ذرات آب و خاک می‌شود. با در نظر اثر متقابل نیروها آنالیز لرزه‌ای سدها مبحث پیچیده‌ای می‌باشد که تحلیل و بررسی آن‌ها بدون استفاده از مدل‌های ریاضی تقریباً غیر ممکن است. هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار لایه رسوبی بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی است که با توجه به مدل‌سازی کامل رسوب و در نظر گرفتن اندرکنش بین سد مخزن رسوب پی با استفاده از یک مدل ریاضی پیشرفته به نام مدل پلاستیسیته آسیب بتن مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق برای خصوصیات مصالح سد، با توجه به تغییر ضخامت لایه رسوبی امکان دستیابی به نتایج بهتری نسبت به تحقیقات پیشین را فراهم می‌نماید. سلیمانگلی و همکاران (۱۴۰۲) بررسی برهمکنش رودخانه چهل‌چای و آب زیرزمینی در بخش شرقی دشت گرگان را بررسی کردند. با توجه به نتایج مشخص شد که در ابتدای ورود رودخانه به دشت انحنای منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در جهت حرکت رودخانه چهل‌چای می‌باشد. اما در ادامه شکل انحنای خطور تراز آب زیرزمینی تغییر می‌کند و به مرور خلاف جهت حرکت رودخانه چهل‌چای می‌شود که این امر بیانگر آن است که آبخوان رودخانه را تغذیه می‌کند. روزبهانی و همکاران (۱۴۰۲) مطالعه عددی سد خاکی در نرم افزار آباکوس و مقایسه نتایج نرم‌افزار با قرائت‌های ابزار دقیق انجام دادند. با توجه به نتایج مشخص شد که فشار آب حفره‌ای در تحلیل دینامیکی ۳۹ درصد بیش‌تر از تحلیل شبه‌استاتیکی است. حداکثر نسبت فشار آب حفره‌ای (ru) در هسته سد برابر ۰/۲۴ به‌دست آمد. بدین ترتیب با توجه به نسبت فشار آب حفره‌ای به‌دست آمده، شکست هیدرولیکی در هسته رخ نخواهد داد.

PasbaniKHiavi et al., (2010) با فرض رسوب دو فازی شامل ذرات آب و خاک، تأثیر اینرسی رسوب را بر روی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی با استفاده از مدل اجزای محدود مورد توجه قرار دادند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها تأثیر اینرسی رسوب را بر افزایش پاسخ لرزه‌ای نشان داد. Bougacha and Tassoulas, (2006) تحقیق کامل‌تری را در ارتباط با تأثیر رسوب بر پاسخ هیدرودینامیکی مخزن انجام دادند. آن‌ها برای مدل‌سازی دامنه رسوب را به‌صورت محیط دو فازی شامل ذرات آب و خاک در نظر گرفتند.

Hosseini and Ahmadi, (2014) با بررسی و تحلیل حساسیت لرزه‌ای سدهای بتنی پشت بنددار، نشان دادند که احتمال وقوع تنش و شکست کششی در نقاط حساس این سدها، مخصوصا در بدنه سد با افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای Seyfi et al., 2015، با بررسی تأثیر اینرسی رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی با استفاده از مدل اجزای محدود، تأثیر اینرسی رسوب کف را نشان دادند. با بررسی تحلیل غیرخطی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی تحت نیروی لرزه‌ای، مشاهده شد که دامنه بسامد موج لرزه‌ای می‌تواند تأثیر قابل توجهی در پاسخ سد داشته باشد (Poul and Zerva, 2018). مدل‌سازی عددی سازه‌های بتن آرمه و سازه‌های ترکیبی با درنظر گرفتن تخریب بتن و کاهش مقاومت آن در حضور بار لرزه‌ای نشان داد که با حضور بارهای مخرب، سازه بتنی فشرده شده و پس از مدتی دچار تنش‌های غیرخطی می‌گردد ( Kmiecik and Kamiński, 2011). هدف از این تحقیق به بررسی رفتار رسوب بر پاسخ سدهای بتنی وزنی می‌باشد. همچنین از مدل پلاستیسیته آسیب بتن برای مدل‌سازی سد استفاده خواهد. از روش اجزای محدود به دلیل قابلیت مناسب در اعمال شرایط مرزی مختلف، برای مدل‌سازی و تحلیل، با توجه به پیچیدگی سیستم سد مخزن پی رسوب، استفاده خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

سد بتنی وزنی مورد مطالعه سد شفارود می‌باشد که هندسه آن در شکل ۱ ارائه شده است. ارتفاع سد ۱۴۲/۹، ضخامت تاج سد ۱۳/۳۲ متر و عمق و طول مخزن به ترتیب ۱۳۶ متر و ۲۸۰ متر می‌باشد. ابعاد پی مدل شده نیز به طول ۷۰۰ و ضخامت ۲۰۰ می‌باشد. سد مخزنی شفارود در غرب گیلان منطقه پونل رضوانشهر برروی رودخانه شفارود و در فاصله ۲/۵ کیلومتری شهرستان رضوانشهر و ۶۵ کیلومتری کلان شهر رشت احداث می‌گردد. کارفرما سد شرکت آب منطقه‌ای گیلان و اهداف پروژه، تأمین آب برای آبیاری ۱۲۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی و تأمین آب شهری و صنعتی می‌باشد.

مشخصات سد بدین شرح می‌باشد:

- ارتفاع: ۱۴۲/۹ متر
- طول تاج :۳۹۴ متر
- ظرفیت مخزن :۱۵۰ میلیون متر مکعب

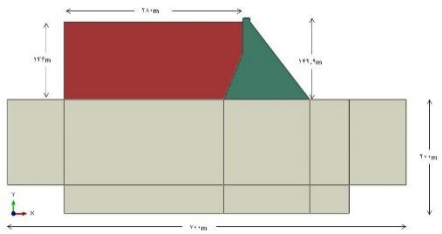
از اهداف این طرح می‌توان به تأمین آب شرب شهرستان‌های رضوانشهر، پره سر و تالش در افق ۱۴۲۵ به میزان ۲۳/۱ میلیون متر مکعب در سال، تأمین آب کشاورزی به میزان ۲۳/۹ میلیون متر مکعب درسال، تأمین آب صنایع به میزان ۱۰ میلیون مترمکعب در سال، تولید انرژی برق آبی (دو واحد نیروگاهی هرکدام به ظرفیت ۲/۳ مگاوات ساعت)، کنترل سیلاب های فصلی، توسعه آبزی پروری و اشتغال‌زایی در منطقه اشاره کرد.

در این پژوهش، پی سد به‌عنوان یک محیط نیمه بی‌نهایت سه بعدی با ابعاد دلخواه مدل شده است. به‌طوری‌که ضرایب سختی و میرایی مستقل از فرکانس پی با استفاده از متوسط خصوصیات وابسته به فرکانس آن بدست آمده است. دریاچه سد نیز با استفاده از اجزای محدود مدل‌سازی شده است. فرمول بندی اجزای محدود مورد استفاده در این تحقیق، براساس درجات آزادی جابجایی می‌باشد. با تأمین شرایط مرزی مناسب در انتهای دور دریاچه و همچنین در کف آن، شرایط عدم انعکاس موج از انتهای دور دریاچه و جذب آن در کف مدل‌سازی شده است. نواحی نزدیک به سد با المان‌های مرزی و انتهای دور دریاچه، با حل نیمه تحلیلی اجزاء محدود، مدل‌سازی شده است. برای تحلیل‌های سه بعدی نیز همانند آنچه در زمینه تحلیل‌های دو بعدی عنوان شد، برنامه‌های نیرومندی برای لحاظ کردن اثر اندرکنش سد و دریاچه ارائه شده‌اند که معروف‌ترین آن‌ها EACD-3D می‌باشد.

در این تحقیق ابتدا مدل‌سازی توسط نرم افزار اجزای محدودی Abaqus انجام و سپس به منظور انجام آنالیز مودال، مشخصات مکانیکی مصالح به‌کار رفته به مدل معرفی گردید. سپس آنالیز مودال، جهت محاسبه فرکانس‌های سازه و اشکال مودی انجام گردید و ضرایب میرایی رایلی محاسبه شد. ضرایب میرایی رایلی در مرحله تحلیل دینامیکی سد به‌عنوان اطلاعات مورد نیاز جهت انجام تحلیل به مدل معرفی می‌شوند. لازم به‌ذکر است، چنانچه در محیط Propertyاز یک سطح مقطع Solid بهره برده شود، المان‌های در نظر گرفته شده برای تحلیل با حرف C آغاز خواهد شد. اگر هدف مدل‌سازی یک مسئله سه بعدی باشد، بلافاصله عدد ۳ پس از حرف C ظاهر خواهد شد. المان‌های کرنش صفحه‌ای و تنش صفحه‌ای به ترتیب با حروف PE و PS نشان داده می‌شوند. همچنین بر اساس تعداد نقاط میان-یاب موجود در هر المان، یک عدد به نامگذاری مربوطه اضافه خواهد شد. به‌عنوان مثال CPE3 نشان‌دهنده المان کرنش صفحه‌ای ۳ نقطه‌ای خطی با سطح مقطع Solid می‌باشد.

### شرایط مرزی برای حل معادله هلمهولتز

به‌طور کلی برای حل معادله حاکم بر دریاچه، چه در مدل‌های سه بعدی و چه در فضای دو بعدی، چهار شرط مرزی باید بررسی شود که عبارتند از: مرز بین سد و دریاچه، مرز بین دریاچه و دیواره اطراف و بستر دریاچه، سطح آزاد دریاچه و انتهای دور مخزن (شکل ۱).



**شکل ۱ - ابعاد هندسی سیستم سد- مخزن-پی در محیط نرم افزار ABAQUS.**

**Figure 1- Geometric dimensions of the dam-reservoir-foundation system in the ABAQUS software environment.**

### معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار دریاچه

با درنظر گرفتن یک حجم کنترل در زمان t و استفاده از اصول پیوستگی جرم، مومنتوم خطی و اصل stock، می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار دریاچه سد را نوشت. می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار دریاچه سد را بصورت زیر نوشت.

$$\frac{\overrightarrow{dv}}{dt} = -\vec{\nabla}p+\mu\nabla^2+\vec{B} \qquad (۱)$$

که در آن، $\rho$ دانسیته سیال، $\vec{v}$ میدان سرعت، $p$ فشار، $\mu$ ویسکوزیته سیال، $\vec{B}$ بردار نشان دهنده نیروهای حجمی وارد بر المان سیال مانند وزن سیال و t معرف زمان می باشد

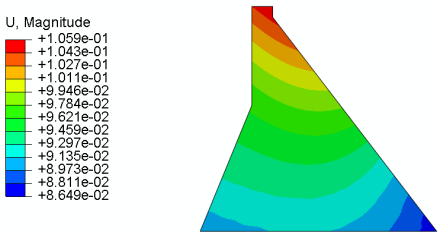
## نتایج و بحث

### شبیه سازی و تحلیل مدل

مرحله اول، تحلیل استاتیکی سد تحت اثر بار وزن و نیروی هیدرواستاتیک و مرحله دوم، تحلیل لرزه‌ای تحت رکورد افقی و عمودی زلزله می‌باشد. در کل چهار تحلیل که حالت اول بدون مدل‌سازی المان رسوب و دو حالت دیگر مدل‌سازی رسوب با ضخامت‌های ۱۰ و ۱۵ متر می‌باشد. ابتدا بارهای استاتیکی به شکل کاملاً آرام اعمال خواهند شد تا به ماکزیمم مقدار خود برسند و تا پایان تحلیل ادامه خواهند داشت و بارهای دینامیکی نیز یک ثانیه بعد از به ماکزیمم مقدار رسیدن بارهای استاتیکی (جهت حذف ارتعاشات احتمالی ناشی از بارگذاری استاتیکی) به سازه اعمال می‌شوند.

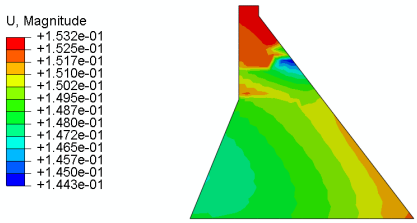
### پاسخ سازه در حالت بدون رسوب

در شکل‌های ۲ و ۳ تغییر مکانی سازه ناشی از بارگذاری همزمان استاتیکی و دینامیکی ناشی از مولفه طولی و عمودی زلزله کوینا بر روی سد بتنی وزنی شفارود نشان داده شده‌اند. جهت بررسی و مقایسه راحت‌تر جابجایی، مقادیر تاریخچه زمانی جابجایی برحسب سانتی‌متر نوشته شده‌اند. که بیشترین مقدار جابجایی ۵/۹۰ سانتی متر در لحظه ۴/۳۰ ثانیه می‌باشد.




شکل ۲-کانتور جابجایی برآیند در لحظه t=2s.

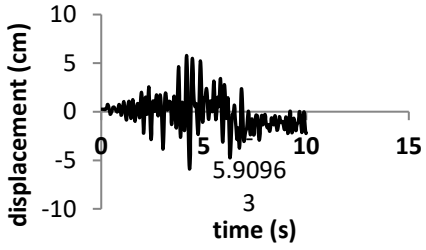
**Figure 2- Contour of displacement of the result at the moment t=2s.**




شکل ۳- کانتور جابجایی برآیند در لحظه t=4s.

**Figure 3- contour of displacement of the result at the moment t=4s.**

همچنین، شکل ۴ تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد برحسب سانتی متر را نشان می‌دهد. این شکل بیان گر این نکته است که ماکزیمم مقدار این جابجایی نسبت به حالت استاتیک به مقدار بسیار زیادی افزایش پیدا کرده است. تاریخچه زمانی مربوط به مینیمم تنش اصلی، با مقادیر منفی نشان دهنده روند تغییرات فشاری برای المان‌های مذکور می‌باشد و تاریخچه زمانی ماکزیمم تنش اصلی، با مقادیر مثبت، نشان دهنده روند تغییرات تنش کششی برای المان‌های مذکور می‌باشد.

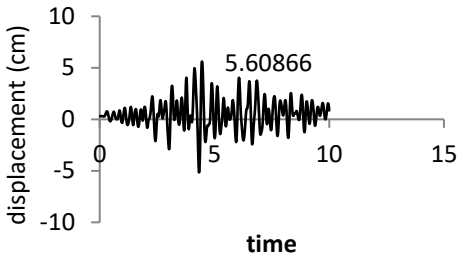



شکل۴-تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد برحسب سانتی متر بدون رسوب.

**Figure 4- Time history of the relative displacement of the dam crest in centimeters without sedimentation.**

### پاسخ سازه در حالت وجود رسوبات با عمق۱۰ متر

مطابق شکل۵، جابجایی ماکزیمم تاج سد در طول تاریخچه زمانی، ۵/۶۰ سانتی متر می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون رسوب کاهش پیدا کرده است.

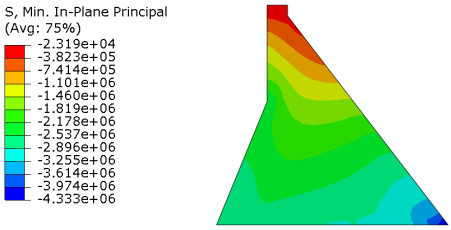



شکل۵- تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد برحسب سانتی متر با وجود رسوب(عمق۱۰).

**Figure 5- Time history of the relative displacement of the dam crest in centimeters with the presence of sediment (depth 10).**

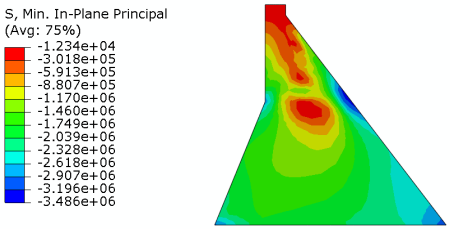
با مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی ماکزیمم در پنجه سد در حالت بدون رسوب با حالت وجود رسوب به عمق ۱۰ متر، مقادیر منحنی کاهش می‌یابد. این بدین معناست که پاسخ سازه برای این متغیر، نسبت به حالت بدون رسوب کاهش پیدا کرده است. جابجایی ماکزیمم تاج سد در طول تاریخچه زمانی، ۵/۶۰ سانتی متر می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون رسوب کاهش پیدا کرده است.

خروجی‌های تاریخچه زمانی جابجایی تاج سد، ماکزیمم و مینیمم تنش اصلی در پاشنه و پنجه سد (به‌ترتیب) و انرژی تلف شده در اثر خرابی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۶ و ۷ مقادیر تنش فشاری مقایسه شده است. مطابق این دو شکل، منطقه آبی رنگ بیانگر تنش فشاری زیاد در پنجه سد می‌باشد.




شکل۶- کانتور تنش اصلی حداقل در لحظه t=2s (با رسوب).

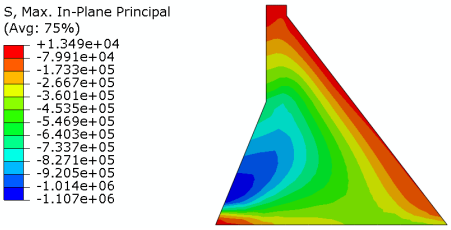
**Figure 6- Main stress contour at least at the moment t=2s (with precipitation).**




شکل۷- کانتور تنش اصلی حداقل در لحظه t=10s (با رسوب).

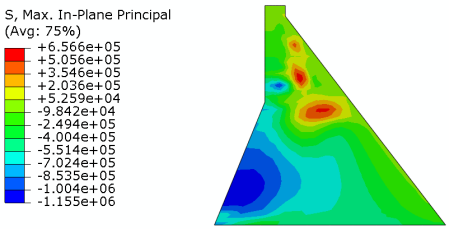
**Figure 7- Main stress contour at least at the moment t=10s (with precipitation).**

همچنین شکل‌های ۸ و ۹ میزان تنش فشاری مقایسه شده‌اند. مطابق این شکل‌ها، تنش فشاری حداکثر در ناحیه پاشنه سد وارد می‌شود و همین عامل می‌تواند موجب ایجاد ترک در پاشنه سد شود (منطقه آبی رنگ).




شکل۸- کانتور تنش اصلی حداکثر در لحظه t=2s.

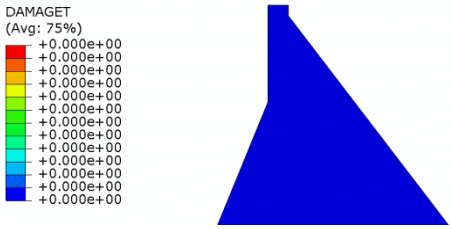
**Figure 8- The main maximum stress contour at the moment t=2s.**




شکل ۹- کانتور تنش اصلی حداکثر در لحظه t=10s.

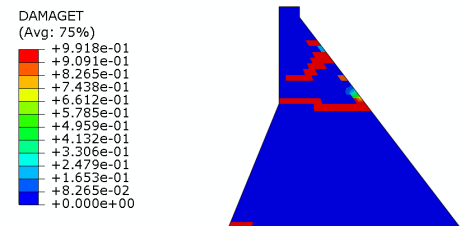
**Figure 9- The main maximum stress contour at the moment t=10s.**

نتایج همچنین نشان می‌دهد که با اعمال بار زلزله در حالت با وجود رسوب نسبت به حالت بدون رسوب، ماکزیمم مقدار انرژی تلف‌شده در اثر خرابی در کل مدت آنالیز سد کاهش می‌یابد و در نتیجه پایداری سد در این حالت افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای خرابی کششی را با گذر زمان نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مشخص است که ناحیه بالا و پاشنه سد به علت تحمل تنش‌های کششی زیاد دچار آسیب و ترک‌خوردگی شده است.




شکل۱۰- کانتور خرابی کششی در لحظه t=2 s.

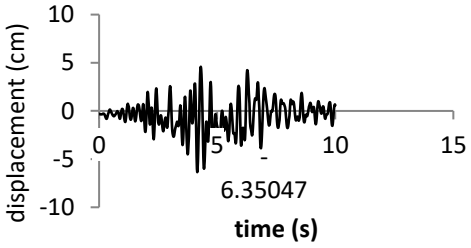
**Figure 10- Tensile failure contour at the moment t=2 s.**




شکل۱۱- کانتور خرابی کششی در لحظه t=10 s.

**Figure 11- Tensile failure contour at the moment t=10 s.**

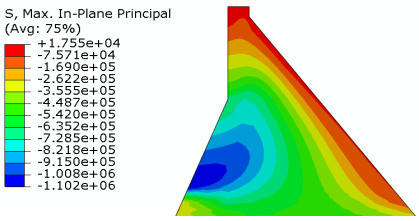
در این پژوهش شبیه‌سازی برای رسوبات با عمق ۱۵ متر نیز انجام شد و نتایج مشابهی از خود نشان داد. طبق تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد برحسب سانتی متر در جهت رودخانه، در حالت وجود رسوب با عمق ۱۵ متر شکل ۱۲، جابجایی ماکزیمم تاج سد در طول تاریخچه زمانی ۶/۳۵ سانتی متر می‌باشد که در مقایسه با حالت عمق رسوب ۱۰ متر شکل ۵، افزایش پیدا کرده است.




شکل۱۲- تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد برحسب سانتی متر، با عمق رسوب۱۵ متر.

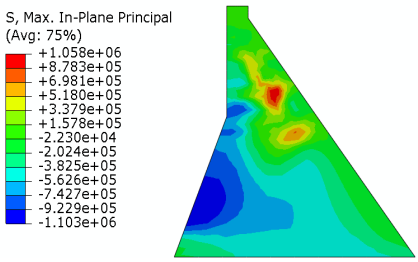
**Figure 12- Time history of the relative displacement of the dam crest in centimeters, with a sedimentation depth of 15 meters.**

از نتایج مهم بررسی در کانتور تنش اصلی ماکزیمم در حالت وجود رسوب با عمق ۱۵ متر می‌توان به مقایسه تغییر محل افزایش تنش‌های کششی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اشاره نمود. هرچه عمق رسوب بیشتر می‌شود مرکز تجمع تنش‌های کششی که در پاشنه سد بود، به تراز بالاتری منتقل می‌شود. نتایج کلی نیز بیانگر آن است که مقدار انرژی تلف شده توسط خرابی در تحلیل دوم نسبت به تحلیل اول، کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده جذب انرژی توسط رسوب کف مخزن می‌باشد. نتایج این تحقیق با نتایج پژوهشگران دیگر مانند (Bougacha and Tassoulas, 2006 ;2010 ,al. et PasbaniKHiavi) نیز از نظر تأثیر لایه‌های رسوبی بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی همسو می‌باشد.




شکل۱۳- کانتور تنش اصلی ماکزیمم در لحظه t=2 s با رسوب عمق۱۵متر.

**Figure 13- The contour of the main maximum stress at the moment t=2 s with sediment depth of 15 meters.**




شکل۱۴- کانتور تنش اصلی ماکزیمم در لحظه t=10 s.

**Figure 14- The contour of the main maximum stress at the moment t=10 s.**

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از بررسی‌های به عمل آمده، به‌منظور نمایش ترک‌ها، مناطق مستعد ترک و جهت آن‌ها و همچنین برآورد میزان خرابی در سازه سدهای بتنی وزنی از مدل پلاستیسیته آسیب بتن استفاده شد و نتایج آن تحلیل گردید. مدل مورد نظر برای چهار حالت بدون رسوب و رسوب با ضخامت۱۰ و ۱۵ متر شبیه‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفته است. دریاچه سد نیز با استفاده از اجزای محدود مدل‌سازی شده است. فرمول‌بندی اجزای محدود مورد استفاده در این تحقیق، براساس درجات آزادی جابجایی می‌باشد. با تأمین شرایط مرزی مناسب در انتهای دور دریاچه و همچنین در کف آن، شرایط عدم انعکاس موج از انتهای دور دریاچه و جذب آن در کف مدل‌سازی شده است. ابتدا مدل‌سازی توسط نرم افزار اجزای محدودی Abaqus انجام و سپس به‌منظور انجام آنالیز مودال، مشخصات مکانیکی مصالح به‌کار رفته به مدل معرفی گردید. سپس آنالیز مودال، جهت محاسبه فرکانس‌های سازه و اشکال مودی انجام گردید و ضرایب میرایی رایلی محاسبه شد.

با مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی ماکزیمم در پنجه سد در حالت بدون رسوب با حالت وجود رسوب به عمق ۱۰ متر، مقادیر منحنی کاهش می‌یابد. این بدین معناست که پاسخ

سازه برای این متغیر، نسبت به حالت بدون رسوب کاهش پیدا کرده است. جابجایی ماکزیمم تاج سد در طول تاریخچه زمانی ۵/۶۰ سانتی متر می‌باشد که در مقایسه با حالت بدون رسوب کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد جابجایی نسبی تاج سد در جهت رودخانه، در حالت وجود رسوب با عمق ۱۵ متر، برابر ۶/۳۵ سانتی‌متر می‌باشد که این میزان در مقایسه با حالت رسوب با عمق ۱۰ متر، حدود ۱۴ درصد افزایش داشته است. همچنین نتایج نشان داد هرچه عمق رسوب افزایش یابد مرکز تجمع تنش-های کششی که از پاشنه سد به ترازهای بالاتر منتقل می-شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با اعمال بار زلزله در حالت با وجود رسوب نسبت به حالت بدون رسوب، ماکزیمم مقدار انرژی تلف شده در اثر خرابی در کل مدت آنالیز سد کاهش می‌یابد و در نتیجه پایداری سد در این حالت افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای خرابی کششی را با گذر زمان نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مشخص است که ناحیه بالا و پاشنه سد به‌علت تحمل تنش‌های کششی زیاد دچار آسیب و ترک‌خوردگی شده است.

## منابع

حسینی، س.، احمدی، م.، ۱۳۹۳. بررسی و تحلیل حساسیت لرزه ای سدهای بتنی. مهندسی عمران، ۱۴(۲)، ص۵۵-۶۸.

زین العبادی روزبهانی، م.، مظاهری، ا.ر.، بیرانوند، ب.، ۱۴۰۲. مطالعه عددی سد خاکی در نرم افزار آباکوس و مقایسه نتایج نرم‌افزار با قرائت‌های ابزار دقیق. هیدروژئولوژی، ۸(۲): ۲۹-۴۱.

سلیمانگلی، ح.، قره محمودلو، م.، جندقی، ن.، عباسی، محمد.، ۱۴۰۲. بررسی برهمکنش رودخانه چهل‌چای و آب زیرزمینی در بخش شرقی دشت گرگان. هیدروژئولوژی، ۸(۲): ۴۲-۵۷

سیفی، ل.، پاسبانی خیاوی، م.، علیقربانی. م.، ۱۳۹۴. تأثیر اینرسی رسوب بر پاسخ لرزه ای سد بتنی ثقلی با استفاده از مدل المان محدود. سد و نیروگاه ایران، ۲(۵): ۶۵-۷۳.

Bougacha, S. and Tassoulas, J. L., 2006. Dam–water–sediment–rock systems: Seismic analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 26(6-7), 680–693.

Bougacha, S. and Tassoulas, J.L., 1991. Effects of sedimentary material on the response of concrete gravity dams. Earthquake engineering & structural dynamics, 20(9), 849-858.

Kmiecik, P. and Kamiński, M., 2011. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11(3), 623-636.

PasbaniKHiavi, M., MostafaGharabaghi, A. R. and Abedi, K., 2010. Dynamic analysis of porous media in time domain using a finite element model. Journal of porous media. 13(10), 895-910.

Poul, M.K. and Zerva, A., 2018. Nonlinear dynamic response of concrete gravity dams considering the deconvolution process. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109, 324-338.