



University Of Qom

Investigating the Effect of Different Sediment Thicknesses on the Seismic Behavior of the Javeh Concrete Roller Dam at Different Reservoir Elevation Levels

Majid Pاسباني Khiavi¹ , Ehsan Teymouri², Amirmohammad Irannejad³

1. Corresponding author, Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: pasbani@uma.ac.ir
2. Ph.D. Graduated, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: Eteymouri@znu.ac.ir
3. Msc. Student, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: amirirannzhad@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 04 Jun 2025
Revised 14 Aug 2025
Accepted 16 Aug 2025
Published 16 Aug 2025

Keywords:
Roller Compacted
Concrete Dam,
Reservoir Sediment,
Seismic Analysis,
Interaction,
Reservoir Level.

ABSTRACT

Concrete dams are critical infrastructures, and their seismic safety assessment is of great importance. Among various influencing factors, the presence of sediment in dam reservoirs can significantly affect the seismic response of these structures. This study aims to investigate the impact of sediment on the dynamic behavior of concrete roller-compacted dams, using the Javeh Dam as a case study. Finite element analysis was performed using ANSYS software, with sediment layers ranging from 2 to 20 meters and reservoir levels set at 50%, 70%, and 100%. Key parameters evaluated include maximum horizontal displacement and the first and third principal stresses at the heel and toe of the dam. The results indicate that sediment thickness and water level can either increase or decrease stress and displacement depending on the specific conditions. At 50% and 70% reservoir levels, sediment presence had minimal influence on structural response. However, under full reservoir conditions, sediment thicknesses up to 7 meters increased stress and displacement values. Beyond 7 meters, these values began to decrease. Specifically, for sediment thicknesses of 2, 5, and 7 meters under full reservoir conditions, the first principal stress at the dam heel increased by 19.06%, 14.65%, and 5.20%, respectively, compared to the no-sediment case. These findings emphasize the importance of accounting for actual sediment conditions in seismic analysis and design of concrete dams to ensure structural integrity and safety.

Cite this article: Pasbani Khiavi M, Teymouri E, Irannejad A. Investigating the Effect of Different Sediment Thicknesses on the Seismic Behavior of the Javeh Concrete Roller Dam at Different Reservoir Elevation Levels. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 83-96. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13136.1629>



Introduction

Roller Compacted Concrete (RCC) dams, as a widely used and economical form of gravity dams, play a significant role in water resource management and energy generation. One often-overlooked factor in their seismic analysis is the effect of sediment accumulation in the reservoir, especially with varying water levels. This study aims to thoroughly evaluate the seismic behavior of RCC dams under varying sediment conditions. The Javeh RCC Dam was selected for modeling using ANSYS finite element software. Dynamic analyses incorporated the near-field Manjil earthquake. Scenarios involved sediment layers from 0 to 20 meters and reservoir levels at 50%, 70%, and 100% capacity.

Boundary Conditions

The boundary conditions of the dam and its surrounding reservoir are illustrated in Figure 1. The structural domain follows a Lagrangian formulation, governed by the equation:

$$\nabla \cdot \sigma - \rho_s \ddot{u} = 0 \quad (1)$$

Here, σ is the Cauchy stress tensor, u the displacement vector, and ρ the solid density.

The fluid domain is modeled using an Eulerian pressure-based formulation, assuming small displacements, inviscid flow, and neglecting spatial and temporal water density variations:

$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (2)$$

Where P is fluid pressure and C is the speed of sound in water. Three fluid boundary conditions include:

- S1 (Free Surface): $P = 0$, assuming negligible surface oscillations implying zero hydrodynamic pressure at water surface nodes.
- S2 (Structure–Fluid Interface): No flow through the interface due to dam surface impermeability, leading to zero relative velocity normal to the interface:

$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (3)$$

Where ρ is the fluid mass and n is the normal vector on S2.

- S3 (Far Field): A truncated boundary condition modeled by the Sommerfeld radiation condition, assuming plane wave propagation far from the structure:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \dot{p} \quad (4)$$



Fig1. Boundary conditions for the dam and reservoir

Modeling: Geometry and Loading

The height of the Javeh Dam is 99 meters, with a base width of approximately 58.97 meters at its lowest level and a crest width of 6 meters. One of the important features considered in the design of the model is the inclusion of a 14-meter-high foundation located upstream of the dam, which lies above the base level. In this study, the foundation is modeled as massless, and the sedimentary layers settled at the reservoir bed are considered as a soft and compressible medium. The material properties used to accurately simulate the interaction between the structure and its surrounding environment, as well as the system's dynamic response, are provided in Tables 1 and 2.

Table1. Material Properties of Dam System

Part	Young Modulus (GPa)	Poisson ratio	Mass density (Kg/m3)
Dam	31	0.2	2643
Foundation	16.86	0.2	0
Sediment	0.15	0.3	1360

Table2. Material Properties of Water

Part	Bulk Modulus (GPa)	Mass density (Kg/m ³)
Water	2.07	1000

Results

The presence and thickness of sediments at the reservoir bed have complex effects on the dam's dynamic response. When the reservoir water level is at 50 and 70% of its capacity, the influence of sediment on the dam's seismic behavior is minimal.

However, under full reservoir conditions, an increase in sediment thickness up to 7 meters leads to a significant rise in displacements and stresses. In this state, the maximum horizontal displacement for sediment thicknesses of 2, 5, and 7 meters increased by 19.06, 14.65, and 5.20%, respectively, compared to the no-sediment condition. This indicates a gradual reduction in the sediment's effect with increasing thickness.

Under full reservoir conditions, the presence of sediments causes a notable increase in principal stress values. Specifically, the first principal stress increased by 17.30, 7.33, and 2.20% for sediment thicknesses of 2, 5, and 7 meters, respectively, compared to the no-sediment case. Similarly, the third principal stress for the same thicknesses changed by 8.21, 2.21, and -5.77%, indicating the significant influence of sediment thickness on this parameter.

For the first principal stress, under 50% and 70% reservoir conditions, increasing sediment thickness led to a slight decrease in stress levels, though the changes were not significant. As for the third principal stress in these partial reservoir conditions, no clear trend was observed; the values did not follow a linear pattern with respect to sediment thickness and instead showed oscillatory variations.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions:

Majid Pاسباني Khiavi:

Conceptualization; Data management; Investigation; Methodology; Project

administration; Software; Supervision; Visualization; Writing–review and editing.

Ehsan Teymouri:

Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Writing the original draft.

Amirmohammad Irannejad:

Formal analysis; Investigation; Methodology; Software and Project administration; Validation and Data Extraction.

بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف رسوب بر رفتار لرزه‌ای سد بتنی غلتکی ژاوه در ترازهای ارتفاعی متفاوت مخزن

مجید پاسبانی خیای^۱، احسان تیموری^۲، امیرمحمد ایران‌نژاد^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: pasbani@uma.ac.ir

۲. فارغ‌التحصیل دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: Eteymouri@znu.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: amiriranzzhad@gmail.com

چکیده

سدهای بتنی جزو سازه‌های مهم بوده و ارزیابی ایمنی آن‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این میان وجود رسوبات ته‌نشین‌شده در مخازن سدها یکی از عوامل تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها محسوب می‌شود. از این رو در این تحقیق سعی بر بررسی جامع تأثیر رسوب بر رفتار دینامیکی سد بتنی غلتکی شده است بدین منظور سد بتنی غلتکی ژاوه به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی و آنالیز از روش اجزای محدود و نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. آنالیز با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف رسوب از ۲ تا ۲۰ متر و سه تراز مختلف مخزن شامل ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد انجام شده است. بیشینه تغییرمکان افقی، تنش‌های اصلی اول و سوم در نواحی پاشنه و پنجه مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت رسوب و تراز آب می‌تواند بسته به شرایط، منجر به افزایش یا کاهش مقادیر تنش و جابجایی شود. برای ترازهای ۵۰ و ۷۰ متری حضور رسوبات تأثیر چندانی بر پاسخ سازه ندارند. برای حالت مخزن پر حضور رسوبات در ضخامت‌های کم و تا ۷ متری مقادیر پاسخ‌ها را افزایش داده و پس از آن کاهش می‌دهد که در این میان بیشترین افزایش پاسخ برای حالت رسوب ۲ متری اتفاق می‌افتد. مقدار تغییرات بیشینه تنش اصلی اول برای ضخامت رسوب ۲، ۵ و ۷ متری نسبت به حالت بدون رسوب در پاشنه سد برای مخزن پر به ترتیب برابر با ۱۹/۰۶، ۱۴/۶۵ و ۵/۲۰ درصد است. این یافته‌ها ضرورت در نظر گرفتن شرایط واقعی رسوب در تحلیل‌های لرزه‌ای سدهای بتنی را برجسته می‌سازد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

کلیدواژه‌ها:

سد بتنی غلتکی،
رسوب مخزن،
تحلیل لرزه‌ای،
اندرکنش،
تراز مخزن.

استناد: پاسبانی خیای مجید، تیموری احسان، ایران‌نژاد امیرمحمد. بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف رسوب بر رفتار لرزه‌ای سد بتنی غلتکی ژاوه در ترازهای ارتفاعی متفاوت مخزن. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۸۳-۹۶.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.13136.1629>

۱- مقدمه

سدهای بتنی غلتکی (RCC) به عنوان یکی از گونه‌های رایج و اقتصادی سدهای وزنی، در پروژه‌های مدیریت منابع آب و تولید انرژی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. با توجه به قرارگیری بسیاری از سدهای ایران در نواحی با خطر نسبی بالای زلزله، تحلیل و ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها اهمیت بسزایی در طراحی ایمن و بهره‌برداری پایدار دارد. یکی از پارامترهای مهم اما کمتر مورد توجه در تحلیل‌های لرزه‌ای سدها تأثیر رسوبات انباشته‌شده در مخزن است.

رسوبات مخزن که در اثر فرایندهای طبیعی طی سال‌های بهره‌برداری در بستر انباشته می‌شوند نه تنها از حجم مفید مخزن می‌کاهند بلکه می‌توانند شرایط دینامیکی سد را به صورت قابل توجهی دگرگون سازند. این رسوبات با داشتن چگالی، مدول برشی، میرایی و سختی متفاوت نسبت به آب یا سنگ بستر، بر توزیع فشار هیدرودینامیکی، فرکانس طبیعی سیستم و میزان انتقال انرژی لرزه‌ای تأثیرگذار هستند. در حالی که اغلب مدل‌های کلاسیک تحلیل لرزه‌ای سدها تنها به اندرکنش سد و آب پرداخته‌اند وجود یک لایه رسوبی با مشخصات مکانیکی خاص می‌تواند الگوی پاسخ سازه‌ای سد را به طور چشم‌گیری تغییر دهد. رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی از دیرباز یکی از موضوعات کلیدی در مهندسی زلزله و سازه‌های هیدرولیکی بوده است. تحلیل‌های کلاسیک بیش‌تر بر اندرکنش بین سد و آب مخزن تمرکز داشته‌اند و اثر عوامل محیطی جانبی نظیر رسوبات را در مدل‌سازی لحاظ نکرده‌اند. با این حال مطالعات نوین نشان داده‌اند که لایه‌های رسوبی ته‌نشین‌شده در کف مخازن می‌توانند از طریق تغییر در جرم مؤثر، سختی محیط اطراف سد و الگوی انتشار امواج لرزه‌ای بر پاسخ کلی سد به طور معناداری اثرگذار باشند.

فنوس و چوپرا در مطالعه‌ای کلاسیک با بررسی تأثیر جذب انرژی در کف مخزن سد و نحوه پاسخ

هیدرودینامیکی آب، پایه‌ای برای تحلیل‌های دقیق‌تر در حضور لایه‌های غیرفشرده رسوبی ارائه دادند [۱]. ژائو و همکاران تأثیر رسوبات کف مخزن بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها حاکی تأثیرات قابل توجه رسوبات مخزن بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی داشت [۲]. سرکار و همکاران مدل سد کوینا به همراه مخزن و فونداسیون براساس رفتار غیرخطی بتن در کشش و احتساب اندرکنش سد، مخزن و پی تحت اثر زلزله کوینا تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که کاهش مدول الاستیسته پی باعث افزایش پاسخ جابجایی می‌گردد و نیز اگر ارتفاع مخزن کم‌تر از ۷۰ متر باشد تأثیر مخزن بر پاسخ سد ناچیز است [۳]. کلاته و قاملو تأثیر رسوبات انباشته شده در مخزن بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی تحت زمین زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور از گسل با استفاده مدل عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده از تحلیل حاکی از تأثیر قابل ملاحظه رسوبات انباشته شده در مخزن سد در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سد بتنی وزنی داشت [۴]. کلاته و همکاران تأثیر رسوب‌گذاری مخزن بر آسیب لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی غیرخطی را بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از زلزله‌های میدان دور و نزدیک استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که رسوب‌گذاری مخزن بر سطوح آسیب لرزه‌ای و شکنندگی لرزه‌ای سدهای وزنی تأثیر جزئی دارد [۵]. مالکی و همکاران رفتار رسوب بر پاسخ سدهای بتنی وزنی بررسی کردند. در این مطالعه پارامتر متغیر، ضخامت رسوب کف مخزن است. برای مدل‌سازی سد از مدل پلاستیسته آسیب بتن استفاده شده است. نتایج کار آن‌ها نشان داد رسوبات کف مخزن، مانند یک جاذب انرژی، پاسخ سازه سد را کاهش می‌دهند [۶]. یان و همکاران ضخامت‌های مختلف لای در پاسخ زلزله و رسوبات لایه‌ای با توزیع متفاوت با ضخامت‌های خاص برای پاسخ لرزه‌ای سد بتنی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تأثیر خواص فیزیکی یکسان با اشکال

مختلف توزیع بر پاسخ لرزه‌ای قابل توجه نیست، اما اشکال مختلف توزیع تأثیر بیشتری بر پاسخ لرزه‌ای سد دارند [۷]. پاسبانی خیابوی با تمرکز ویژه بر اثرات اینرسی رسوبات، نتیجه‌گیری کرد که در مدل‌سازی‌های دینامیکی دقیق در نظر گرفتن جرم و شتاب رسوب نقش کلیدی در پیش‌بینی پاسخ واقعی سد دارد [۸]. بایراکدار و همکاران اثرات رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی تحت اثر حرکت ناهمزمان افقی و عمودی زمین، از جمله اندرکنش سد-مخزن-رسوب-پی، بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که تغییر مقادیر مدول یانگ و ضخامت رسوب، مؤلفه تنش را کمی تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۹]. تیموری و عباسی اثرات تغییر تراز مخزن را بر رفتار لرزه‌ای برج آبگیر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آن‌ها حاکی از این بود که اثرات فرکانس بارگذاری علاوه بر تراز ارتفاعی مخزن می‌تواند در تعیین ماکزیمم پاسخ‌های سازه اثرات حیاتی و تعیین کننده داشته باشد [۱۰]. کلاته و قامتلو اثرات آپلیفت را بر آسیب لرزه‌ای سد بتنی‌وزنی شفارود تحت اثر زلزله‌های میدان دور و نزدیک مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان از تاثیر نسبی نیروی آپلیفت بر رفتار دینامیکی سد بتنی‌وزنی داشت بطوریکه سبب افزایش تخریب بدنه‌ی سد می‌گردد [۱۱]. آکوسه و شیمشک رفتار غیرخطی سد بتنی وزنی را با در نظرگرفتن اثرات رسوب مطالعه کردند. آن‌ها در این مطالعه مجموعه‌ای از آنالیزهای لرزه‌ای خطی و غیرخطی را با توجه به حضور رسوب مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. هودا و همکاران پاسخ دینامیکی سد بتنی غلتکی که در معرض حرکت افقی زمین قرار دارد، با در نظر گرفتن اندرکنش بین پی‌های انعطاف‌پذیر، آب مخزن و رسوبات کف مخزن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که رسوب کف مخزن تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای سد دارد. علاوه بر این، توزیع مجدد تنش‌ها در سطح مشترک لایه نازک با کاهش قابل توجه تنش‌ها وجود دارد [۱۳]. کارتال در سال ۲۰۱۲، یک تحلیل زلزله سه‌بعدی سدهای بتنی

غلتکی انجام داد. این مطالعه پاسخ زلزله سه‌بعدی یک سد را با در نظر گرفتن غیرخطی بودن هندسی ارائه می‌دهد. او نشان داد که اثر حرکت زمین بر روی سدهای بتنی غلتکی در منطقه زلزله‌خیز باید برای بحرانی‌ترین شرایط در نظر گرفته شود [۱۴]. کارتال و کارابولوت عملکرد لرزه‌ای سد بتنی غلتکی را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها شرایط مخزن پر و خالی سد سین^۱ در ترکیه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از اثرات قابل توجه فشارهای هیدروپنوماتیکی بر رفتار سد داشته و نشان دادند که در حالت غیرخطی تنش‌های کششی کم‌تری ایجاد می‌گردد [۱۵].

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که با وجود رشد توجه به نقش رسوبات در تحلیل‌های لرزه‌ای سدها در سال‌های اخیر، اغلب این پژوهش‌ها به بررسی تعداد محدودی از سناریوهای ضخامت رسوب محدود بوده و شرایط مختلف آبگیری و ترازهای گوناگون سطح آب مخزن را به صورت جامع لحاظ نکرده‌اند. علاوه بر این، تمرکز بیشتر این تحقیقات بر سدهای وزنی یا خاکی بوده و مطالعات جامع و اختصاصی بر روی سدهای بتنی غلتکی همچنان در سطح محدودی قرار دارد.

بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی دقیق و جامع رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی غلتکی با در نظر گرفتن اثرات ناشی از حضور رسوبات در ترازهای مختلف ارتفاعی مخزن است. در این راستا، سد بتنی غلتکی ژاوه به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مدل‌سازی عددی آن با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس^۲ انجام گرفته است. تحلیل‌های دینامیکی نیز با اعمال زلزله میدان نزدیک منجیل صورت پذیرفته است.

در قالب این تحقیق، مجموعه‌ای متنوع از سناریوها شامل ضخامت‌های مختلف رسوب (در بازه صفر تا ۲۰ متر) و ترازهای آب مخزن (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد

^۱ Cin

^۲ Ansys

$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (3)$$

که در رابطه بالا، ρ_F جرم سیال، η بردار عمود بر مرز S2 می باشد [۱۷].



شکل ۱- شرایط مرزی برای سد و مخزن

شرط مرزی قطع شده در انتهای دور مخزن توسط شرط مرزی سامرفیلد که براساس فرض انتشار امواج صفحه ای در سیال در فواصل دور از سازه می باشد تعریف می شود. شرط مرزی سامرفیلد برای مرز دور قطع شده به صورت زیر می باشد [۱۸]:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \dot{p} \quad (4)$$

۳- مواد و روش ها

در این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر ضخامت های مختلف رسوب بر رفتار لرزه ای سد بتنی غلتکی ژاوه از روش اجزای محدود^۳ در نرم افزار انسیس استفاده شده است. مدل سازی ها به صورت دوبعدی و در حالت کرنش صفحه ای انجام گرفته و شامل تحلیل های استاتیکی و دینامیکی بوده است. تحلیل استاتیکی با هدف بررسی توزیع تنش و جابجایی تحت فشار هیدرواستاتیکی آب مخزن و وزن سازه انجام شده است در حالی که تحلیل دینامیکی در حوزه زمان و با اعمال رکورد زلزله میدان نزدیک منجیل^۴ صورت گرفته تا پاسخ واقعی تری از عملکرد سازه در شرایط لرزه ای حاصل شود.

سناریوهای مدل سازی شامل موارد زیر بوده است:

(الف) ضخامت های مختلف رسوب: صفر، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر؛

ظرفیت) تعریف شده است. نتایج حاصل می تواند در بهینه سازی طراحی سدهای جدید، ارتقای دقت ارزیابی ایمنی سدهای موجود و نیز تدوین معیارهای پیشرفته تر برای تحلیل های لرزه ای سدهای بتنی غلتکی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- شرایط مرزی و معادلات حاکم

شرایط مرزی سد با مخزن پیرامونی در شکل ۱ نشان داده شده است. معادلات حاکم بر حوزه سازه براساس فرمولاسیون لاگرانژی و به شرح ذیل است [۱۶]:

$$\nabla \cdot \sigma - \rho_s \ddot{u} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا σ ، u و ρ_s به ترتیب تانسور تنش کوشی، بردار تغییر مکان و چگالی جامد می باشد. معادله حاکم بر حوزه سیال از فرمولاسیون اویلری بر پایه فشار با فرض جابجایی های کوچک، غیرلزوج بودن سیال صرف نظر از تغییرات زمانی و مکانی دانسیته آب استفاده می کند که به صورت زیر ارائه می شود [۱۷]:

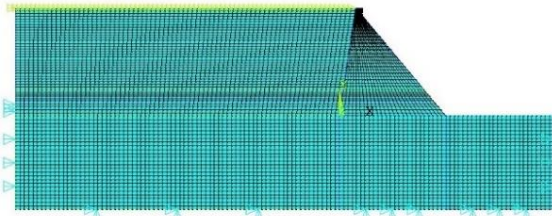
$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (2)$$

در رابطه بالا، P فشار سیال و C سرعت صوت در سیال می باشد. سه شرط مرزی اصلی برای سیال در شکل ۱ نشان داده شده است که عبارت از شرط مرزی سطح آزاد سیال S1، شرط مرزی اندرکنش سازه و سیال S2 و شرط مرز دور S3 می باشند. برای سطح آزاد سیال با نادیده در نظر گرفتن نوسانات سطحی شرط مرزی $P=0$ می تواند برای مرز S1 در نظر گرفته شود. به عبارت بهتر، مقادیر فشار هیدرو دینامیکی برای تمامی گره های سطح آب صفر تعیین می شود. شرط مرزی در مرز S2 با در نظر گرفتن عدم جریان در محل ارتباط سیال و سازه به دلیل نفوذناپذیری سطح سد می باشد. این فرض منجر به شرط عدم وجود سرعت نسبی در جهت عمود بر مرز مشترک سد و سیال می شود که بصورت زیر بیان می گردد:

³ Finite Element Method

⁴ Manjil

تعریف شده در این مدل سازی به گونه ای انتخاب شده اند که بتوانند امکان بررسی دقیق اثرات ناشی از رسوبات با ضخامت های مختلف در مخزن سد را در تحلیل های استاتیکی و دینامیکی فراهم نمایند.



شکل ۲- مدل المان محدود سد بتنی وزنی ژاوه

۴-۱- مشخصات مصالح در مدل سازی عددی

در راستای انجام تحلیل عددی دقیق رفتار لرزه ای سد بتنی غلتکی ژاوه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تمامی اجزای مدل شامل بدنه ی سد، پی، سیال مخزن و لایه های رسوبی به دقت در محیط مدل سازی اعمال شده اند. این مشخصات در راستای شبیه سازی صحیح اندرکنش سازه با محیط پیرامون و پاسخ دینامیکی سیستم، به صورت زیر اعمال شده اند:

۱- بدنه سد از بتن غلتکی با خواص مکانیکی مشخص مدل شده است. مقدار مدول یانگ برای این بخش برابر ۳۱ مگاپاسکال، نسبت پواسون برابر ۰/۲ و چگالی مصالح معادل ۲۶۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب لحاظ شده است.

۲- پی سد به عنوان بستر سنگی، با مدول یانگ برابر با ۱۶/۸۶ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۲ و بدون جرم مدل سازی گردیده است.

۳- لایه های رسوبی ته نشین شده در کف مخزن به عنوان محیطی با رفتار نرم و قابل تراکم در نظر گرفته شده اند. این رسوبات دارای چگالی معادل ۱۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ معادل ۱۵۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ هستند. نقش این لایه ها در انتقال و پراکنش امواج لرزه ای و تأثیر بر پاسخ سازه ای حائز اهمیت است.

(ب) ترازهای مختلف ارتفاع آب مخزن: ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد از ظرفیت کل مخزن؛

(پ) سرعت امواج در رسوب: ۱۵۵۰ متر بر ثانیه.

(ت) رکورد زلزله منجیل با بیشینه شتاب حدود ۰/۶۳g در راستای افقی؛

(ث) برای بررسی تأثیر ضخامت لایه رسوب بر پاسخ سازه ای لایه رسوب در کف مخزن به صورت مجزا و با خواص مکانیکی متفاوت از آب و بدنه سد تعریف شده است.

(ج) اندرکنش میان سد، آب، رسوب و فونداسیون با در نظر گرفتن خواص هیدرودینامیکی و رفتار غیرخطی نسبی در شرایط واقعی مدل سازی شده است.

در ادامه با اعمال شرایط فوق اقدام به ارزیابی تغییرات جابجایی تاج سد، تنش های اصلی اول و سوم در نواحی بحرانی شامل پاشنه و پنجه سد پرداخته شده است.

۴- معرفی مدل مورد مطالعه

سد بتنی غلتکی ژاوه یکی از سازه های آبی مهم در ایران به شمار می رود که با هدف تأمین آب برای مصارف کشاورزی و همچنین مهار و کنترل سیلاب ها احداث شده است. موقعیت جغرافیایی این سد در منطقه ای با خطر بالای زلزله قرار دارد که آن را به گزینه ای مناسب جهت تحلیل های لرزه ای و ارزیابی رفتار دینامیکی سدهای بتنی تبدیل کرده است. در این مطالعه، جهت انجام تحلیل های عددی مدل هندسی سد با توجه به شکل ۲ به صورت دوبعدی طراحی و پیاده سازی شده است. ارتفاع سد برابر با ۹۹ متر بوده و در پایین ترین تراز، عرض بدنه آن حدود ۹۷/۵۸ متر است این در حالی است که عرض تاج سد ۶ متر می باشد. یکی از ویژگی های مهم در طراحی مدل لحاظ کردن فونداسیونی به ارتفاع ۱۴ متر در بالادست سد می باشد که بالاتر از تراز پایه قرار دارد. هندسه و ابعاد

۴- چگالی مخزن ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب،
سرعت انتشار موج صوتی ۱۴۴۰ متر بر ثانیه، با
فرض سیال تراکم ناپذیر لحاظ شده است.

۴-۲- گسسته سازی مدل و تعیین شبکه بندی بهینه

در تحلیل عددی به روش اجزای محدود، تبدیل هندسه پیوسته سازه به اجزای کوچک تر یا مش نقش کلیدی در دقت و پایداری نتایج دارد. این فرایند به صورت مستقیم بر رفتار عددی مدل و کیفیت پاسخ های تحلیلی تأثیر می گذارد. در این پژوهش مدل سازی هندسی سد بتنی غلتکی ژاوه به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم افزار انسیس انجام شده است. هدف از این بخش بررسی تأثیر اندازه المان ها بر دقت نتایج عددی و انتخاب الگوی بهینه مش بندی برای تحلیل های بعدی بوده است.

جهت بررسی این موضوع پنج الگوی متفاوت مش بندی با اندازه المان های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور افزایش دقت تحلیل شبکه بندی به صورت غیریکنواخت انجام شد به گونه ای که در نواحی حساس مانند تاج، پاشنه و پنجه سد و محل های تماس بدنه با فونداسیون یا رسوبات از المان های ریزتر استفاده گردید. برای مصالح جامد نظیر بتن سد و فونداسیون از المان های دوبعدی Plane82 و برای مدل سازی سیال مخزن و رسوبات از المان Fluid29 بهره گرفته شد.

از جمله شاخص های کلیدی مورد ارزیابی جابجایی افقی تاج سد و تنش های بحرانی در ناحیه پاشنه و پنجه بودند. در جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل پنج حالت مختلف مش بندی آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود با ریزتر شدن مش، تغییرات پاسخ مدل کاهش

می یابد. با افزایش تعداد المان ها پاسخ مدل به مقدار واقعی تری نزدیک می شود. در حالی که مقدار جابجایی در مش بندی اول برابر ۰/۰۵۸۱ متر بود این مقدار در مش بندی پنجم به حدود ۰/۰۶۳۵ متر رسید. از مش ۳ به بعد تغییرات در مقادیر پاسخ ها ناچیز بوده و روند به حالت همگرایی عددی می رسد. در نهایت، جهت دقت بیش تر مش بندی شماره ۵ به عنوان الگوی بهینه شبکه بندی با ۷۱۲۵ المان و با بازه ابعادی المان ها بین ۵ تا ۱۰ متر در نظر گرفته شده است.

۴-۳- بارگذاری

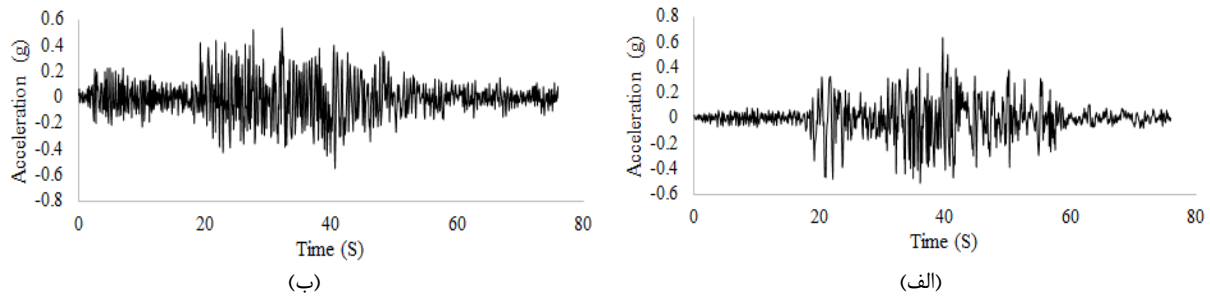
در این مطالعه از زلزله منجیل که در ایستگاه آبر ثبت شده است استفاده شده است. در دسته بندی زلزله ها این زمین لرزه جزو زمین لرزه های میدان نزدیک در نظر گرفته شده است که بیشنه شتاب افقی آن برابر با ۰/۶۳g است [۱۹]. در شکل ۳ نمودار تاریخچه زمانی شتاب های افقی و قائم زلزله مذکور ارائه شده است.

۵- تحلیل ها و نتایج

با هدف بررسی رفتار لرزه ای سد بتنی غلتکی ژاوه تحت شرایط مختلف تحلیل های عددی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی بر روی مدل های مختلف انجام گرفته است. در تحلیل استاتیکی، توزیع فشار هیدرواستاتیکی مخزن مورد ارزیابی قرار گرفته و در تحلیل دینامیکی، پاسخ سازه به تحریکات زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سد، فونداسیون، سیال و رسوبات بررسی شده است.

جدول ۱- مقایسه پاسخ های مدل تحت مش بندی های مختلف

شماره مش بندی	جابجایی افقی تاج سد (cm)	تنش کششی در پاشنه (MPa)	تنش فشاری در پنجه (MPa)
۱	۵/۸	۵/۴۴	۱۱/۳۰
۲	۶/۱۷	۶/۱۰	۱۱/۶۰
۳	۶/۳۰	۶/۷۱	۱۲/۰۷
۴	۶/۳۴	۶/۸۰	۱۲/۵۰
۵	۶/۳۵	۶/۸۲	۱۲/۶۷



شکل ۳- شتاب نگاشت زلزله منجیل، الف) مولفه افقی، ب) مولفه قائم

۵-۱- تحلیل استاتیکی

تحلیل‌ها به صورت دوبعدی و در حوزه زمان انجام شده‌اند. در مدل سازی حاضر تأثیر رسوبات تجمع یافته در کف مخزن با ضخامت‌های مختلف (صفر، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر) در تراز ارتفاعی ۱۰۰ درصد مخزن و ضخامت‌های (صفر، ۲، ۵ و ۷ متر) در ترازهای ۷۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اصلی مورد ارزیابی در این تحلیل شامل جابجایی افقی و تنش‌های اصلی اول و سوم در نواحی حساس سد مانند پاشنه و پنجه می‌باشد.

۵-۲-۱- اثرات تراز رسوب

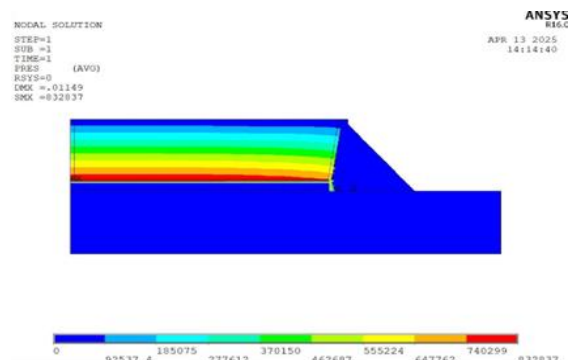
در شکل ۵، روند تغییرات حداکثر تغییر مکان افقی برای مخزن کامل با حضور ترازهای ارتفاعی مختلف رسوب ارائه شده است. ماکزیمم مقدار تغییر مکان افقی سد برابر با ۰/۰۶۳۵ متر می‌باشد. با توجه به شکل ۵ و تحلیل نمودار مربوطه در راستای افقی، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت رسوبات از صفر تا ۲ متر، مقدار جابجایی به طور قابل توجهی افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود برابر با ۰/۰۷۵۶ متر، می‌رسد که نشانگر ۱۹ درصد افزایش در مقدار ماکزیمم تغییر مکان افقی می‌باشد. پس از آن با افزایش ضخامت رسوبات به ۵ و سپس ۷ متر، مقدار جابجایی افقی روند کاهشی پیدا می‌کند که این موضوع بیانگر پدیده میرایی و جذب انرژی لرزه‌ای توسط توده رسوبی است. این روند کاهش تا ضخامت ۲۰ متر ادامه یافته و کمترین مقدار جابجایی افقی معادل ۰/۰۴۹۷ متر، در این حالت مشاهده می‌شود که نشانگر

در این بخش تحلیل استاتیکی با هدف بررسی رفتار اولیه سد تحت اثر فشار هیدرواستاتیکی ناشی از آب موجود در مخزن انجام گرفته است. فشار مذکور به صورت تابعی از عمق آب محاسبه شده و در راستای قائم بر بدنه سد اعمال گردیده است. رابطه مورد استفاده برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک به صورت زیر است:

$$P = \rho gh \quad (1)$$

که در آن، P فشار هیدرواستاتیک (Pa)، ρ چگالی آب، g شتاب گرانش و h عمق یا ارتفاع ستون آب می‌باشد. توزیع این فشار در امتداد ارتفاع سد به صورت خطی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در پایین‌ترین تراز مخزن اعمال شده است.

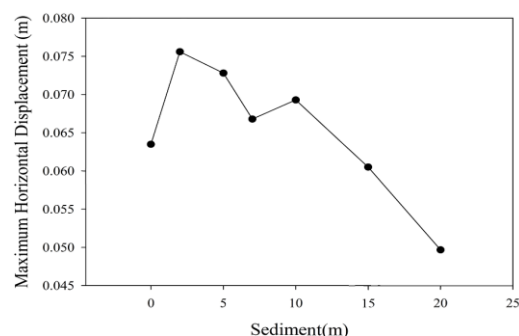
مطابق نتایج حاصل از مدل سازی و مطابق با شکل ۴، مقدار بیشینه فشار هیدرواستاتیک در پای دیواره مخزن برابر با ۰/۸۳۳ مگاپاسکال به دست آمده است که نشانگر دقت مدل سازی می‌باشد.



شکل ۴- توزیع فشار هیدرواستاتیک در داخل مخزن سد

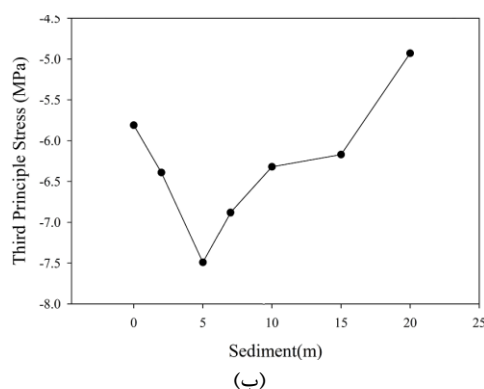
۵-۲- تحلیل دینامیکی

کاهش ۲۱/۷ درصدی در مقدار ماکزیمم تغییرمکان افقی است.

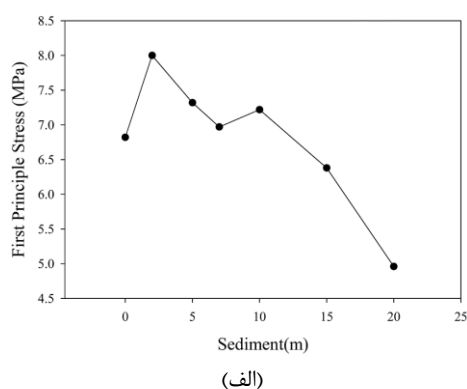


شکل ۵- نمودار جابجایی افقی تاج سد در تراز ۱۰۰ درصد

در ادامه در شکل ۶ نمودار تغییرات ماکزیمم تنش اصلی اول و سوم در پاشنه سد برای حالت مخزن پر با حضور رسوبات در ترازهای ارتفاعی مختلف ارائه شده است. با بررسی داده های شکل ۶، مربوط به تغییرات تنش های اصلی در ناحیه پاشنه سد بتنی غلتکی ژاوه در برابر درصدهای مختلف رسوب تأثیر قابل توجه ضخامت رسوبات بر رفتار تنش های بحرانی سد مشهود است. در حالت بدون رسوب مقدار تنش اصلی اول معادل ۶/۸۲ مگاپاسکال است که با افزایش رسوب تا ۲ متر این مقدار به ۸/۰۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه نشان دهنده اثر تشدید اینرسی رسوبات است که موجب افزایش بار دینامیکی وارد بر سد می شود. در حالت های ۵ و ۷ متر رسوب، با اینکه تنش اصلی اول کاهش یافته اما هنوز بیشتر از حالت بدون رسوب می باشد



شکل ۶- نمودار تنش های در پاشنه سد، الف) تنش اصلی اول، ب) تنش اصلی سوم

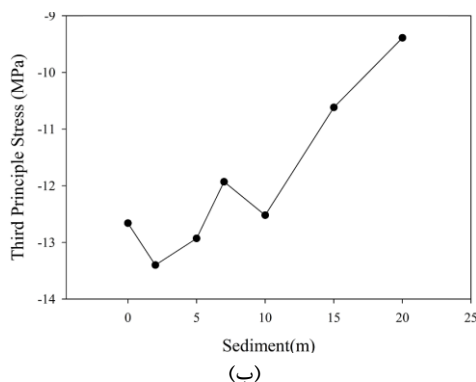


الف)

ادامه یافته و تنش کششی به بیشینه مقدار خود یعنی ۱۳/۹۶ مگاپاسکال رسیده است که نمایانگر افزایش ۲۵

این افزایش اولیه ناشی از اثر تشدید اینرسی رسوبات است. در حالت رسوب ۵ متر این روند افزایش

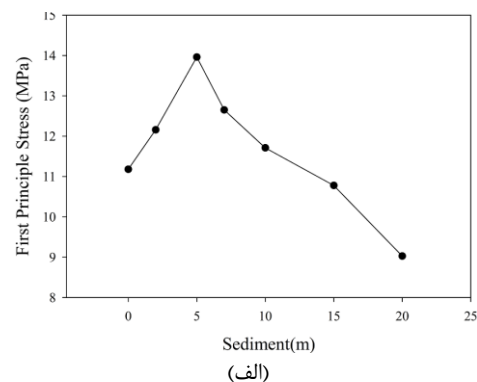
دیگر، تنش اصلی سوم در حالت بدون رسوب برابر $12/63$ مگاپاسکال است. با افزایش ضخامت رسوبات به 2 متر این مقدار به $13/70$ مگاپاسکال افزایش یافته و در حالت 5 متر رسوب به $12/94$ مگاپاسکال تغییر می‌کند. پس از آن مقدار تنش فشاری به صورت تدریجی کاهش یافته و در حالت 20 متر رسوب به کمترین مقدار خود یعنی $9/39$ مگاپاسکال می‌رسد که این روند کاهش، بیانگر کاهش اثرات فشاری مخرب و افزایش پایداری سازه است.



شکل ۷- نمودار تنش‌های در پنجه سد. الف) تنش اصلی اول، ب) تنش اصلی سوم

در این بخش اثرات همزمان تراز ارتفاعی مخزن و تراز رسوب بر رفتار لرزه‌ای سد بتنی غلتکی ژاوه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در شکل ۹، روند تغییرات ماکزیمم تغییرمکان افقی، تنش اصلی اول و تنش اصلی سوم برای هر سه حالت مخزن و ضخامت‌های رسوب مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ و قسمت الف شکل ۹، مشخص است که برای مخزن با تراز ارتفاعی 50 و 70 درصد تراز ارتفاع کل سد حضور رسوبات تاثیر خاصی بر مقدار بیشینه تغییرمکان افقی ندارد. برای تنش اصلی اول با توجه به جدول ۲ و قسمت ب شکل ۹ مشخص می‌گردد که در پاشنه سد با افزایش تراز ارتفاعی رسوب ماکزیمم مقدار تنش اصلی اول کاهش پیدا می‌کند که مقدار این کاهش برای مخزن 50 درصد و مخزن 70 درصد در حالت رسوب 2 متری نسبت به مخزن بدون رسوب به ترتیب $0/72$ و $4/48$ درصد و در حالت رسوب 7 متری نسبت به مخزن بدون رسوب به ترتیب برابر با $3/1$ و $10/13$ درصد است. اما برای مخزن پر حضور رسوب

درصدی در مقدار ماکزیمم تنش اصلی اول می‌باشد. در ترازهای بالاتر از 5 متر رسوب کاهش تدریجی در تنش کششی مشاهده می‌شود به طوری که در حالت 20 متر رسوب مقدار تنش به $9/02$ مگاپاسکال کاهش یافته است که نشانگر کاهش $19/32$ درصدی در مقدار ماکزیمم تنش اصلی اول است. این کاهش بیانگر اثر میرایی و جذب انرژی توسط لایه‌های ضخیم تر رسوب است که موجب تخفیف فشارهای وارده بر سازه می‌شود. از سوی



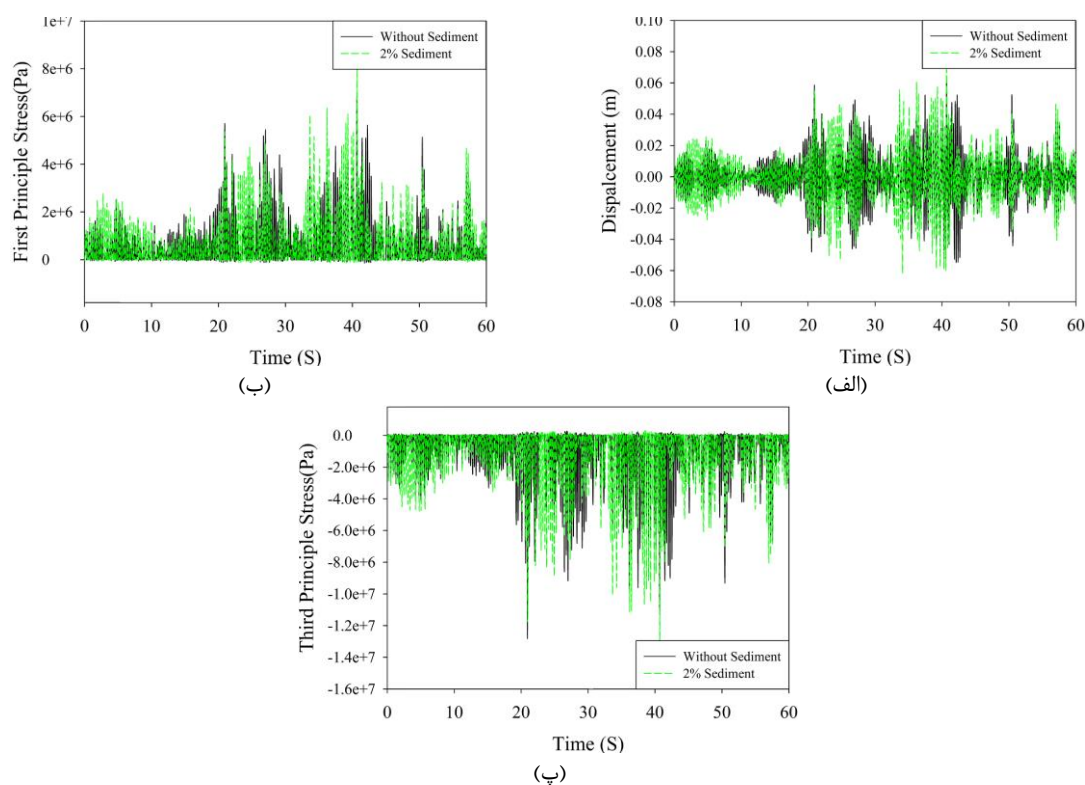
در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که رسوبات کف مخزن نقش دوگانه‌ای در پاسخ لرزه‌ای سد ایفا می‌کنند. در ضخامت‌های کم تأثیر اینرسی اولیه رسوبات باعث افزایش تنش‌های بحرانی در ناحیه پنجه و پاشنه سد شده و می‌تواند ریسک آسیب سازه را افزایش دهد. اما با افزایش ضخامت رسوبات خاصیت جذب انرژی و میرایی این لایه‌ها منجر به کاهش قابل توجه تنش‌ها می‌گردد.

در ادامه در شکل ۸، نمودار تاریخچه زمانی برای ماکزیمم تغییرمکان افقی، تنش اصلی اول در پاشنه سد و تنش اصلی سوم در پنجه سد برای حالت بدون رسوب، 2 متر رسوب ارائه شده است. با توجه شکل مذکور مشخص می‌گردد که حضور رسوب تا 2 متر تراز ارتفاعی سد نه تنها سبب تغییرات در الگوی پاسخ تاریخچه زمانی ماکزیمم پاسخ‌های سازه می‌گردد بلکه زمان رخداد ماکزیمم پاسخ‌های سازه را نیز می‌تواند دستخوش تغییرات قابل توجهی قرار دهد.

۳-۴- اثرات همزمان ضخامت رسوب و تراز مخزن

۵۰ درصد و ۷۰ درصد ندارد اما برای مخزن با تراز ۷۰ درصد و رسوب ۷ متری سبب کاهش ملموسی به میزان ۲ درصد می‌گردد. برای مخزن پر حضور رسوب سبب افزایش ماکزیمم تنش اصلی سوم تا تراز ۵ متری رسوب شده و پس از آن مقدار تنش اصلی سوم کاهش پیدا می‌کند.

سبب افزایش ماکزیمم مقدار تنش اصلی اول شده است که بیشترین مقدار این افزایش برای رسوب با ضخامت ۲ متر اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به جدول ۲ و قسمت پ شکل ۹ مشخص می‌گردد که برای تنش اصلی سوم مطابق تنش اصلی اول حضور رسوبات مخزن تاثیر خاصی بر ماکزیمم مقدار تنش اصلی سوم در حالت مخزن با تراز



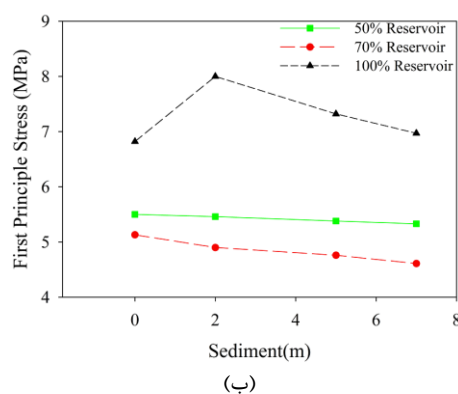
شکل ۸- نمودار پاسخ‌های ماکزیمم سد برای مخزن پر. الف) تغییر مکان افقی، ب) تنش اصلی اول، پ) تنش اصلی سوم

جدول ۲- مقایسه پاسخ‌های مدل‌های مختلف با ترازهای متفاوت مخزن برای ضخامت‌های مختلف رسوب

تراز مخزن (درصد)	تراز رسوب (متر)	تغییر مکان افقی (متر)	تنش اصلی اول در پاشنه (مگاپاسکال)	تنش اصلی سوم در پنجه (مگاپاسکال)
۵۰	صفر	۰/۰۴۸۹	۵/۵۰	۹/۲۱
	۲	۰/۰۴۹۲	۵/۴۶	۹/۰۰
	۵	۰/۰۴۸۹	۵/۳۸	۹/۱۰
	۷	۰/۰۴۸۸	۵/۳۳	۹/۱۸
۷۰	صفر	۰/۰۴۷۸	۵/۱۳	۱۰/۳۰
	۲	۰/۰۴۸۱	۴/۹۰	۱۰/۳۲
	۵	۰/۰۴۸۹	۴/۷۶	۱۰/۳۵
	۷	۰/۰۴۹۲	۴/۶۱	۱۰/۱۰
۱۰۰	صفر	۰/۰۶۳۵	۶/۸۲	۱۲/۶۶
	۲	۰/۰۷۵۶	۸/۰۰	۱۳/۷۰
	۵	۰/۰۷۲۸	۷/۳۲	۱۲/۹۴
	۷	۰/۰۶۶۸	۶/۹۷	۱۱/۹۳

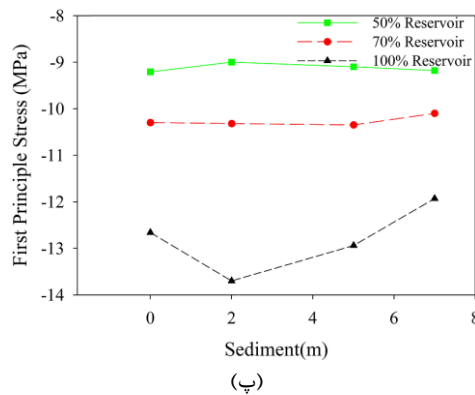
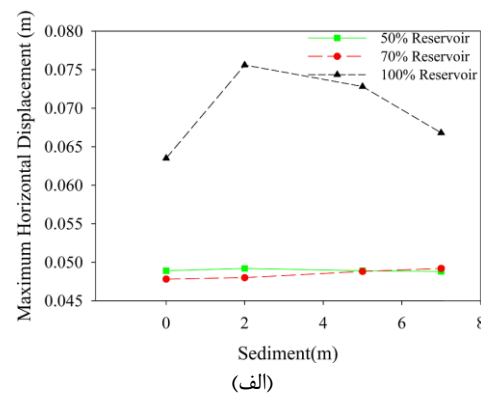
بیشترین تغییرات خود را به دلیل حضور رسوب در حالت مخزن پر تجربه می‌کند که برای رسوب تا تراز ۵ متر مقادیر پاسخ‌ها افزایش یافته و پس از آن با افزایش تراز رسوب مقدار پاسخ‌ها روند نزولی به خود می‌گیرد.

در ادامه در شکل ۱۰، نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی، تنش اصلی اول در پاشنه سد و تنش اصلی سوم در پنجه سد ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۲ مشخص می‌گردد که اثرات رسوب بر پاسخ سازه در ترازهای ارتفاعی بالای مخزن معنی‌دار می‌باشد

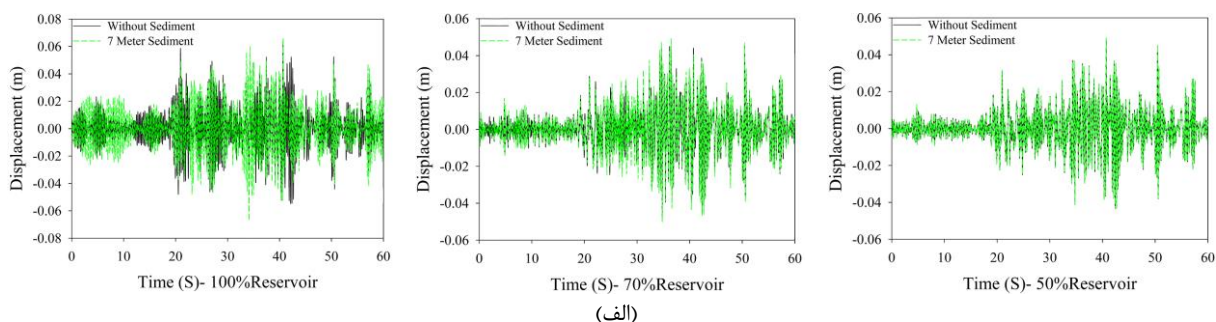


با توجه به جدول ۲ و نتایج ارائه شده مشخص است که اثرات رسوب بر رفتار لرزه‌ای سد بتنی غلتکی زاوه برای ماکزیمم تغییرمکان افقی تنها در حالت مخزن پر سبب تغییرات ملموس بر رفتار سازه می‌گردد و در سایر حالات اثرات مهمی بر رفتار سازه نمی‌گذارد.

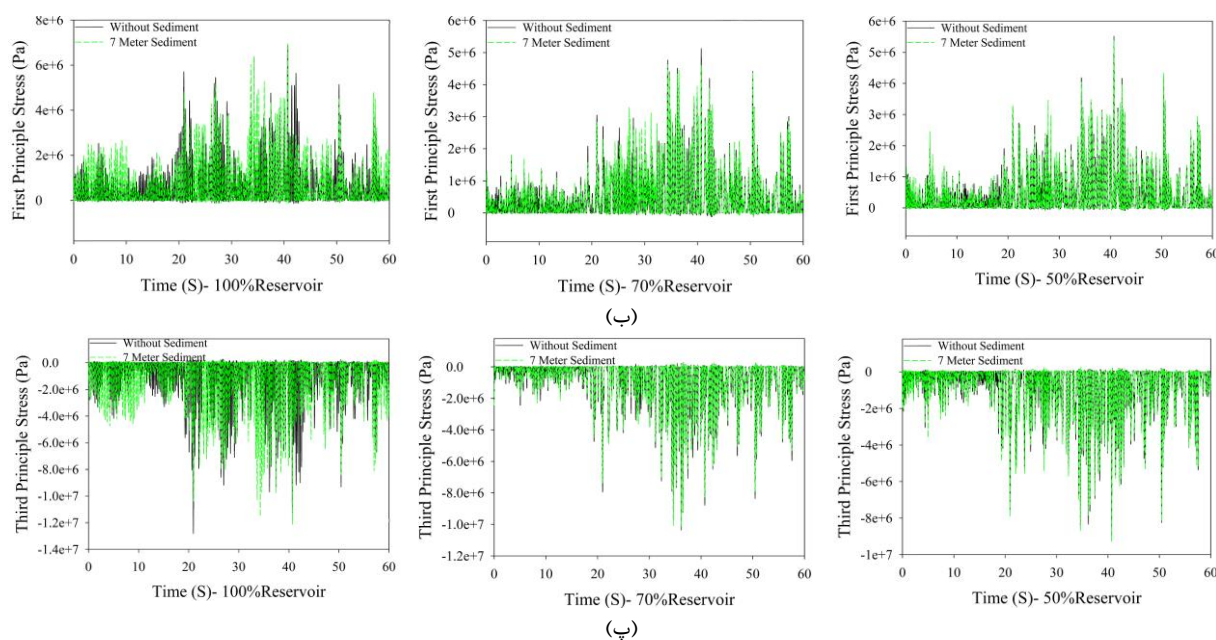
برای تنش اصلی اول به غیر از مدل با مخزن پر، در سایر حالات حضور رسوبات سبب کاهش تنش اصلی اول شده است. همچنین برای تنش اصلی سوم در محل پنجه سد، روند تغییرات مقادیر بیشینه تنش اصلی سوم



شکل ۹- نمودار پاسخ‌های ماکزیمم سد برای ترازهای ارتفاعی مختلف مخزن با تغییرات ضخامت رسوب. الف) تغییرمکان افقی، ب) تنش اصلی اول، پ) تنش اصلی سوم



شکل ۱۰- نمودار مقایسه تاریخچه زمانی برای مدل‌ها مختلف مخزن در حالت بدون رسوب و رسوب ۷ متری. الف) تغییرمکان افقی، ب) تنش اصلی اول در پاشنه، پ) تنش اصلی سوم در پنجه



شکل ۱۰- ادامه

۴- نتیجه گیری

سد ناچیز است. اما در شرایط مخزن پر، افزایش ضخامت رسوب تا ۷ متر منجر به افزایش قابل توجه تغییرمکان و تنش‌ها می‌شود. در این حالت بیشینه تغییرمکان افقی در ضخامت‌های ۲، ۵ و ۷ متری رسوب به ترتیب ۱۹/۰۶، ۱۴/۶۵ و ۵/۲۰ درصد بیشتر از حالت بدون رسوب گزارش شده است که نشان‌دهنده کاهش تدریجی اثرگذاری رسوب با افزایش ضخامت آن است.

(پ) برای تنش اصلی اول، در شرایط مخزن ۵۰ و ۷۰ درصدی، با افزایش ضخامت رسوب، مقدار تنش اندکی کاهش یافته که تغییرات آن چندان قابل توجه نیست. برای تنش اصلی سوم و در حالت مخزن ۵۰ و ۷۰ درصدی تغییرات خاصی در تنش اصلی سوم رخ نداده است اما مقدار آن با تغییرات ضخامت رسوب رابطه خطی نداشته و به صورت نوسانی تغییر می‌کند.

(ت) در شرایط مخزن پر، حضور رسوبات باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر تنش‌های اصلی شده است. به ترتیبی که تنش اصلی اول در ضخامت‌های ۲، ۵ و ۷ متری نسبت به حالت بدون رسوب به ترتیب ۱۷/۳۰، ۷/۳۳ و ۲/۲۰

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی غلتکی با در نظر گرفتن اثرات ناشی از حضور رسوبات در مخزن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، در این مطالعه تأثیر ضخامت لایه‌های رسوبی بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی غلتکی ژاوه در شرایط مختلف عملکردی مخزن بررسی شده است. برای این منظور، هفت ضخامت مختلف از رسوبات و سه تراز متفاوت سطح آب (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مخزن) در مدل‌سازی عددی لحاظ گردیده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

(الف) برای شرایط حضور رسوب تا تراز ۱۰ متری مقادیر پاسخ‌های سازه افزایش پیدا می‌کند که بیشترین میزان این افزایش پاسخ‌ها برای رسوب با تراز ارتفاعی ۲ متر می‌باشد و همچنین با افزایش تراز ارتفاعی رسوب به بیش از ۱۰ متر مقادیر بیشینه پاسخ‌ها روند نزولی پیدا می‌کند.

(ب) حضور و ضخامت رسوبات در بستر مخزن تأثیرات پیچیده بر پاسخ دینامیکی سد دارد. در شرایطی که سطح آب مخزن در ترازهای ۵۰ و ۷۰ درصد قرار دارد، تأثیر رسوب بر رفتار لرزه‌ای

لرزه‌ای سدهای بتنی غلتکی تأکید دارد. به‌ویژه در مراحل طراحی اولیه و ارزیابی ایمنی، بی‌توجهی به حضور رسوب خصوصاً در ضخامت‌های پایین می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست از عملکرد لرزه‌ای سازه گردد.

درصد افزایش یافته است. همچنین تنش اصلی سوم در همین ضخامت‌ها به ترتیب ۸/۲۱، ۲/۲۱ و ۵/۷۷- درصد تغییر داشته است که حاکی از تأثیر معنادار ضخامت رسوب بر این پارامتر می‌باشد.

(ث) در مجموع، نتایج این پژوهش بر اهمیت در نظر

گرفتن شرایط واقعی رسوبات در تحلیل‌های

References

- [1] Fenves GL, Chopra AK. Effects of Reservoir Bottom Absorption on Earthquake Response of Concrete Gravity Dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1983; 14(5): 587–605. doi: 10.1002/eqe.4290110607
- [2] Zhao C, Xu TP, Valliappan S. Seismic response of concrete gravity dams including water-dam-sediment-foundation interaction. *Computers & Structures*. 1995; 54(4): 705-715. doi: 10.1016/0045-7949(94)00367-C
- [3] Sarkar DK, Paul L, Stempniewski L. Influence of Reservoir and Foundation on the Nonlinear Dynamic Response of Concrete Gravity Dams. *ISCT Journal of Earthquake Technology*. 2007; 44: 377-389.
- [4] Kalateh F, Gamatlo A. Investigation of Sediment in the reservoir on Seismic Damage of Concrete Gravity Dam in the Near-Fault and Far-Fault Ground Motions. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2020; 7(2): 130-150. doi: 10.22065/jsce.2018.121313.1488 [In Persian]
- [5] Kalateh F, Gamatlo A, Kheyri M. Investigating the Reservoir Sediment Effects on Seismic Damage of Concrete Gravity Dams Using Nonlinear Incremental Dynamic Analysis (NIDA). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024; 48: 1947-1963. doi: 10.1007/s40996-024-01466-x
- [6] Maleki M, Ghodousi M, Moradloo AJ. Effect of sedimentary layers on the seismic response of concrete dams. *Hydrogeology*. 2024; 8(2): 137-143. doi: 10.22034/hydro.2024.52496.1288
- [7] Yan Y, Li Z, Zhang W, Wei Y, Wang W, Liu B. Study on the influence of layered sediment on seismic responses of concrete dam with ADINA. 4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA), Suzhou, China 2021, 691-697. doi: 10.1109/ISTTCA53489.2021.9654576
- [8] Pasbani Khiavi M, Ghorbani MA, Seyfi, L. Investigation of the effect of sediment inertia on the seismic response of concrete gravity dams using finite element modeling. *Iranian Journal of Dams and Hydropower Plants*. 2015; 2(5): 65-73. [In Persian]
- [9] Bayraktar A, Akkose M, Adanur S. The effects of sediment on earthquake response of concrete gravity dams to asynchronous ground motion. *Journal of Hydraulic Research*. 2010; 43(6): 710-719. doi: 10.1080/00221680509500391
- [10] Teymouri E, Abbasi S. Impact of reservoir height and internal water level on dynamic behavior of cylindrical intake tower under loading with different frequencies. *Sādhanā*. 2025 Jun; 50(2): 1-23. doi: 10.1007/s12046-025-02731-z
- [11] Kalateh F, Ghamatloo A. Investigation of Uplift force effects on Seismic Damage of Concrete Gravity Dam in the Near-Fault and Far-Fault Ground Motions: Case Study Shafaroud Dam. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2017; 6(1): 202-221. doi: 10.22065/jsce.2017.93011.1271
- [12] Akkose M, simsek E. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. *Applied Mathematical Modelling*. 2010; 34(11): 3685-3700. doi: 10.1016/j.apm.2010.03.019
- [13] Huda AM, Jaafar MS, Noorzaei J, Waleed, AT, Mohammed TA. Modelling the Effects of Sediment on the Seismic Behaviour of Kinta Roller Compacted Concrete Dam. *Pertanika J. Sci. & Technol*. 2010; 18 (1): 43-59.
- [14] Kartal ME. Three-dimensional earthquake analysis of roller-compacted concrete dams. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2012; 12: 2369-2388. doi: 10.5194/NHESS-12-2369-2012
- [15] Kartal ME, Karabulut M. Earthquake performance evaluation of three-dimensional roller compacted concrete dams. *Earthquakes and Structures*. 2018; 14(2): 167-178. doi: 10.12989/eas.2018.14.2.167
- [16] Chakrabarti P, Chopra AK. Hydrodynamic effects in earthquake response. *Journal of Structural Division*. 1974; 100(6): 1211-1221. doi: 10.1061/JSDEAG.0003801
- [17] Fenves G, Chopra AK. Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*.

- 1985; 13(1): 13-31. **doi: 10.1002/eqe.4290130104**
- [18] Sommerfeld A. Partial Differential Equations in Physics. Vol. 1, Academic Press, New York, 1949.
- [19] Hajhoseyni J, Moradlou J. Comparison of near-filed and far-filed earthquakes on nonlinear response of concrete gravity dams. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2015 Feb 20; 44(77): 25-38. [In Persian]