نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره پنجم / تابستان ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 5 / September 2015

بررسی تأثیر اینرسی رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی با استفاده از مدل اجزای محدود

لیلا سیفی[۱]
مجید پاسبانی خیاوی[*۲]
مرتضی علی قربانی[۳]

چکیده

در این تحقیق به بررسی تأثیر اینرسی رسوب بر نمایش لرزه‌ای سد بتنی وزنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش پرداخته می‌شود. برای بررسی رفتار لرزه‌ای، رسوب کف مخزن با فرض سیال معادل مدل‌سازی می‌شود. آب داخل مخزن به‌صورت یک سیال غیر لزج، تراکم پذیر با تغییر مکان‌های کوچک در نظر گرفته شده و سد نیز به‌صورت جامد الاستیک با رفتار خطی فرض می‌شود. با توجه به پیچیدگی سیستم سد- مخزن- فونداسیون-رسوب، از روش اجزای محدود به دلیل قابلیت مناسب در اعمال شرایط مرزی مختلف، برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده شده است. برای آنالیز لرزه‌ای سیستم مدل اجزای محدودی با استفاده از نرم‌افزار انسیس تهیه شده است. در استخراج معادلات حاکم بر دامنه‌ها، اثرات اندرکنش بین سد، مخزن، فونداسیون و رسوب در مدل لحاظ شده و شرایط مرزی متنوعی برای اعمال بر سیستم پیش‌بینی شده است. با توجه به تحریکات دینامیکی، آنالیز در حوزه زمان انجام گرفته و برای حل معادلات دینامیکی حاصل‌شده از روش نیومارک استفاده شده است که از لحاظ عددی به‌صورت غیر مشروط پایدار است. برای نشان دادن تأثیر اینرسی رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی، سد پاین‌فلت به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و زمین‌لرزه السنترو به مدل اعمال شده است. مدل موردنظر برای دو حالت مخزن بدون رسوب و مخزن با ۲۰ درصد حجمی رسوب مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آنالیزها، تأثیر اینرسی رسوب کف مخزن را بر افزایش پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

زلزله، اجزای محدود، اندرکنش، سد بتنی وزنی، رسوب

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی seyfi_l@yahoo.com
۲.* استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی pasbani@uma.ac.ir
۳. مربی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی gorbani@uma.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

مقدمه

سدهای بتنی از سازه‌های مهمی هستند که برای کنترل سیلاب و ذخیره آب به‌صورت وسیعی در جهان ساخته می‌شوند. با توجه به اینکه بیشتر این سدها در مناطق لرزه‌خیز ساخته شده‌اند، بنابراین در طراحی آن‌ها لازم است ملاحظات لرزه‌ای به‌صورت مناسبی در نظر گرفته شود. درنتیجه لازم است مهندسین درک کاملی از رفتار لرزه‌ای سدها داشته باشند. یکی از موارد مهمی که روی رفتار لرزه‌ای سدها اثر مهمی دارد اندرکنش سد، مخزن و رسوب است. اندرکنش سد و مخزن سبب تولید فشار هیدرودینامیکی علاوه بر فشار هیدرواستاتیکی می‌شود. این فشار هیدرودینامیکی به دلیل حرکت سد و اعمال نیرو از طرف سد بر مخزن به وجود می‌آید که 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 گرفتن چنین اثراتی مشخص می‌شود که آنالیز لرزه‌ای دقیق سدها موضوعی پیچیده است (احمدی و قره‌باغی (۱۳۷۲)، چوپرا[1] (۱۹۶۷ و ۱۹۶۸)). بنابراین ضروری است به طراحی لرزه‌ای دقیق سدها در مناطق لرزه‌خیزی مانند ایران توجه ویژه شود. به دلیل پیچیدگی سامانه سد بتنی، مخزن و رسوب، مدل اجزای محدود روش مهمی برای آنالیز دینامیکی است؛ زیرا نه تنها با استفاده از آن می‌توان هندسه‌های پیچیده را مدل کرد، بلکه شرایط مرزی متنوع مانند تغییر مکان‌های گرهی ناشی از امواج زلزله و نیروهای گرهی را می‌توان به‌صورت مناسب اعمال نمود. همچنین به وسیله روش اجزای محدود می‌توان امواج زلزله تابیده‌شده از دوردست فونداسیون را بر اساس تئوری موج به نیروها یا تغییر مکان‌های معادل گرهی تبدیل کرد. تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در مورد تأثیر رسوب روی فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن و پاسخ لرزه‌ای سدها محدود است و در بیشتر آن‌ها به همه عوامل مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای توجه نشده است. در بیشتر مطالعات، محققین از هندسه ساده برای دامنه‌ها استفاده کرده و آنالیز دینامیکی را در حوزه فرکانس انجام داده‌اند.

بر اساس تحقیقات فنوس[2] و چوپرا در سال ۱۹۸۵، اندرکنش آب مخزن با پی آن به‌وسیله استهلاک انرژی و رفتار مؤثر آن روی لایه رسوبی کف مخزن بیشتر مورد توجّه قرار گرفت. در روش پیشنهادی آن‌ها فرض می‌شود که امواج فشاری برخوردکننده به کف مخزن قبل از رسیدن به لایه‌های سنگی زیرین مستهلک‌شده و خواص مصالح لایه‌های رسوبی فقط برای ارزیابی انعکاس از مرزها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در مدل آن‌ها، ضخامت لایه به‌صورت دقیق مشخص نبوده و تأثیر مجاورت با بستر سنگی زیرین روی ضریب انعکاس برای کف مخزن نشان داده نمی‌شود. در نتیجه تقریب ساده آن‌ها، کاهش بیشتری را در پاسخ سد در حین جذب کف مخزن، نشان می‌دهد.

در ادامه مطالعات مربوط به پاسخ سیستم سد-مخزن-فونداسیون در مقابل زلزله، لطفی و همکاران در سال ۱۹۸۷ با استفاده از ترکیب روش گسسته سازی عناصر محدود و هایپرالمان[3]، فنی را برای بررسی تأثیر رسوب بر پاسخ هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که اگر لایه رسوب به‌صورت جامد ویسکوالاستیک در نظر گرفته شود تأثیر رفتار لایه رسوب در پاسخ لرزه‌ای به‌صورت دقیق نمایش داده نمی‌شود. همچنین در تحقیق ایشان نشان داده شد که تأثیر رسوبات در کاهش پاسخ دینامیکی سد نسبت به آنچه توسط فنوس و چوپرا با استفاده از تقریب ضریب انعکاس موج یک بعدی پیشنهاد داده بودند کمتر است.

حاتمی[4] (۱۹۹۶) تأثیر لایه رسوب در کاهش پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی را با استفاده از حل تحلیلی مدل یک بعدی و فرض لایه رسوب همگن با ضخامت ثابت نشان داد. او برای بررسی تأثیر رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سد برای حالت یک بعدی، مدلی را در حوزه فرکانس ارائه نمود. اگرچه مدل ارائه‌شده وی به راه‌حل ساده و تحلیلی منجر می‌شود ولی با استفاده از نتایج آن می‌توان تأثیر مشخصه‌های لایه رسوب را در پاسخ لرزه‌ای بررسی کرد. حاتمی با استفاده از مدل ارائه‌شده تأثیر پارامترهای مختلف را بر رفتار لرزه‌ای سد نشان داد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از

[1] Chopra
[2] Fenves
[3] Hyperelement
[4] Hatami

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

تحقیق وی نشان می‌دهد که درصد کاهش پاسخ سازه‌ای ناشی از ارتعاش قائم زمین در مقایسه با ارتعاش افقی بیشتر است. این اختلاف با افزایش مدول الاستیسیته رسوب کاهش می‌یابد. این رفتار در تحلیل لرزه‌ای سد بتنی وزنی تحت ارتعاش قائم زمین خیلی مهم است.

بوگاچا[1] و تاسولاس[2] در سال ۲۰۰۶ 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. مدل ارائه‌شده توسط بوگاچا و تاسولاس نیز دارای نواقص عمده‌ای است که از جمله آن‌ها می‌توان به منظور ننمودن اثرات شتاب و تغییر مکان سد بر پاسخ هیدرودینامیکی به دلیل صلب فرض نمودن سد اشاره کرد. در ادامه پاسبانی خیاوی[3] و همکاران در سال ۲۰۱۰ با فرض رسوب دوفازی 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.

با توجه به مرور انجام‌شده مشخص می‌شود که پاسخ لرزه‌ای سد بسته به میزان رسوب کف و حجم آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای تحلیل دقیق سد و بررسی تأثیر اینرسی رسوب بر رفتار دینامیکی سد لازم است برای دامنه شامل رسوب یک مدل‌سازی دقیق و مؤثری صورت گیرد.

برای بررسی رفتار دینامیکی دقیق سیستم سد بتنی وزنی- مخزن- رسوب، در این تحقیق مدل کاملی توسعه داده است. مهم‌ترین مشخصه‌های مدل اجزای محدود تهیه‌شده در این تحقیق به شرح زیر است:

- آنالیز دینامیکی به وسیله مدل تهیه‌شده در حوزه زمان انجام می‌شود. بنابراین می‌توان هم‌زمان سامانه‌های خطی و غیرخطی را به وسیله مدل آنالیز نمود.
- برای مدل اجزای محدود تهیه‌شده، می‌توان شرایط مرزی مختلفی نظیر تغییر مکان‌های گرهی و نیروهای گرهی را در نظر گرفت.
- اندرکنش بین دامنه‌های سد، مخزن و رسوب به‌طور مناسبی در مدل پیش‌بینی شده است.
- با توجه به انتخاب روش اجزای محدود و قابلیت‌های این روش می‌توان هندسه‌های پیچیده‌ای را به وسیله مدل تهیه‌شده مورد بررسی قرار داد.
- با توجه به اینکه در نمایش لرزه‌ای سدهای بتنی اثرات سختی فونداسیون مهم است، برای مدل‌سازی پی از مدل فونداسیون بدون جرم که اثرات اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون را به طرز مناسبی نمایش می‌دهد، استفاده شده است.
- از مدل سد می‌توان مسائلی در مکانیک جامدات که رفتار مصالح مشابه دارند، مانند مدل‌های تنش و کرنش مسطح را حل کرد.

بنابراین مطالعه حاضر، یک مدل‌سازی دقیق و مؤثری را از لحاظ عددی برای بررسی رفتار لرزه‌ای سد بتنی وزنی مورد توجه قرار می‌دهد. در مجموع مدل تهیه‌شده می‌تواند به‌طور مؤثری برای آنالیز برخی از سازه مهندسی که با محیط اطراف اندرکنش دارند، استفاده شود.

معادلات حاکم

در این بخش، ملاحظات سازه‌ای و هیدرودینامیکی مسئله فرمول‌بندی می‌شود. رسوب کف مخزن به‌صورت سیال معادل بر اساس تئوری حاکم بر مخزن نمایش داده می‌شود. درحالی‌که آب داخل مخزن، به‌صورت سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر و با تغییر مکان‌های کوچک فرض می‌شود. همچنین سد به‌صورت جامد الاستیک با رفتار خطی مصالح در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌سازی دامنه سد

معادله حاکم بر رفتار سد، معادله حرکت است. ولی برای در نظر گرفتن و تعریف کامل اندرکنش سیال و سازه، بار اعمال‌شده ناشی از فشار هیدرودینامیکی سیال در محل تماس سازه و سیال باید به معادلات سازه افزوده شود.

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = M\ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{F}^{Pr} \qquad (۱)$$

[1] Bougacha
[2] Tassoulas
[3] Pasbani Khiavi

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

در رابطه فوق، M= ماتریس جرم، C= ماتریس میرایی و K= ماتریس سختی سازه هستند. همچنین $\mathbf{u}$= بردار تغییر مکان نسبی، $\dot{\mathbf{u}}$= بردار سرعت، $\ddot{\mathbf{u}}$= بردار شتاب حرکت سازه، $\ddot{\mathbf{u}}_g$= بردار شتاب زمین و $\mathbf{F}^{Pr}$= بردار بار فشار هیدرودینامیکی واردشده از طرف مخزن بر سد در محل تماس.

مدل‌سازی دامنه مخزن

در مسائل مربوط به اندرکنش آکوستیکی سازه و سیال، معادله مربوط به دینامیک سازه لازم است همراه با معادلات ناویر- استوکس اندازه حرکت و پیوستگی سیال در نظر گرفته شود. با فرض اینکه آب داخل مخزن غیر لزج، تراکم ناپذیر و با تغییر مکان‌های کوچک است، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به معادله موج خلاصه می‌شوند. همچنین فشار اعمال‌شده از طرف سیال بر سازه در محل تماس، برای تشکیل ماتریس اندرکنش در نظر گرفته می‌شود.

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

در رابطهٔ فوق $c = \sqrt{K/\rho}$ و بیان‌کنندهٔ سرعت امواج صوتی در سیال است. معادلهٔ (۲) اساس مسائل مربوط به آکوستیک است و به معادلهٔ هلمهولتز[1] مشهور است که بر حسب فشار هیدرودینامیکی استخراج شده است (احمدی و قره‌باغی (۱۳۷۲)، پاسبانی خیاوی و همکاران (۱۳۹۴) و چوپرا (۱۹۷۰)).

فرمول‌بندی اجزای محدود معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم سد- مخزن- رسوب با استفاده از روش عناصر محدود به‌صورت ماتریسی بسط داده می‌شوند. معادله دینامیکی گسسته سازی شده سیستم سد می‌تواند با استفاده از عناصر سازه‌ای فرمول‌بندی شود. برای اعمال اثرات اندرکنش لازم است بار فشاری اعمال‌شده از طرف سیال و رسوب بر روی سازه به فرمول‌بندی اضافه شود. ماتریس‌های عناصر مخزن نیز با گسسته سازی معادله موج استخراج می‌شوند. در استخراج ماتریس‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها به‌صورت مشتقات مرتبه اول و دوم تغییر مکان‌ها بسط داده می‌شوند (پاسبانی خیاوی (۱۳۹۴) و زینکویچ[2] (۱۹۷۸)).

معادله اجزای محدود سد

معادله اجزای محدود دامنه سد به‌صورت زیر است:

$$[M_e]\{\ddot{u}_e\} + [C_e]\{\dot{u}_e\} + [K_e]\{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{Pr}\} \qquad (۳)$$

که در آن بردار بار فشاری از طرف سیال $\{F_e^{Pr}\}$، در محل تماس با انتگرال‌گیری بردار به دست می‌آید:

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\}P\{n\}dS \qquad (۴)$$

که در آن $\{N'\}$= توابع درون‌یابی به‌کاربرده شده برای گسسته سازی مؤلفه‌های تغییر مکان و $\{n\}$= بردار نرمال در محل تماس هستند.

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\}\{N\}^T\{n\}dS\{P_e\} \qquad (۵)$$

یا

$$\{F_e^{Pr}\} = [Re]\{P_e\} \qquad (۶)$$

که در آن:

$$[\mathrm{Re}]^{\mathrm{T}} = \int_{\mathrm{S}} \{\mathrm{N}'\}\{\mathrm{N}\}^{\mathrm{T}}\{\mathrm{n}\}\mathrm{dS} \qquad (۷)$$

جایگزینی معادله (۷) در (۳) معادله دینامیکی اجزای محدود سازه را به‌صورت زیر نتیجه می‌دهد:

$$[M_e]\{\ddot{u}_e\} + [C_e]\{\dot{u}_e\} + [K_e]\{u_e\} - [Re]\{P_e\} = \{F_e\} \qquad (۸)$$

معادله اجزای محدود سیال

معادله (۲) شامل فشار سیال و مؤلفه‌های تغییر مکان‌های سازه است که پارامترهای مجهول برای تحلیل هستند. توابع شکل تقریب اجزای محدود برای متغیرهای فشار و تغییر مکان به‌صورت زیر است:

$$P = \{N\}^T\{P_e\} \qquad (۹)$$

$$u = \{N'\}^T\{u_e\} \qquad (۱۰)$$

[1] Helmholtz

[2] Zienkiewicz

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

که در آن $\{N\}$= تابع شکل عنصر برای فشار، $\{N'\}$= تابع شکل عنصر برای تغییر مکان‌ها، $\{P_e\}$= بردار فشار گرهی و $\{u_e\}$= بردار تغییر مکان‌های گرهی هستند.

با استفاده از روابط (۹) و (۱۰)، مشتق دوم زمانی متغیرها و تغییرات فشار به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N\}^T\{\ddot{P}_e\} \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{u\} = \{N'\}^T\{\ddot{u}_e\} \quad (۱۲)$$

$$\delta P = \{N\}^T\{\delta P_e\} \quad (۱۳)$$

با به کار بردن عملگر $\{L\}$روی توابع شکل عنصر می‌توان نوشت:

$$[B] = \{L\}\{N\}^T \quad (۱۴)$$

با جایگزینی روابط (۹) و (۱۴) در معادله (۸)، معادله موج در شکل اجزای محدود به‌صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\int_V \frac{1}{c^2}\{\delta P_e\}^T\{N\}\{N\}^T dV\{\ddot{P}_e\} + \int_V \{\delta P_e\}^T\{B\}^T[B]dV\{P_e\} + \int_S \rho_0\{\delta P_e\}^T\{N\}\{n\}^T[N']dS\{\ddot{u_e}\} = 0 \quad (۱۵)$$

که در آن $\{n\}$ عمود بر مرزهای سیال است. جمله‌هایی که روی عنصر تغییر نمی‌کنند، می‌توانند بیرون انتگرال قرار گیرند. $\{\delta P\}$یک پارامتر اختیاری است که تغییرات فشار گرهی را نشان می‌دهد و در رابطه اخیر می‌تواند حذف شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{c^2}\int_V \{N\}\{N\}^T dV\{\ddot{P}_e\} + \int_V \{B\}^T[B]dV\{P_e\} + \rho_0\int_S \{N\}\{n\}^T[N']dS\{\ddot{u_e}\} = 0 \quad (۱۶)$$

با نوشتن معادله فوق به شکل ماتریسی می‌توان حالت گسسته معادله موج را به‌صورت زیر نوشت:

$$[M_e^P]\{\ddot{P}_e\} + [K_e^P]\{P_e\} + \rho_0[R_e]^T\{\ddot{u_e}\} = 0 \quad (۱۷)$$

در رابطه فوق $[M_e^P] = \frac{1}{C^2}\int_V \{N\}\{N\}^T dV$ ماتریس جرم سیال، $[K_e^P] = \int_V \{B\}^T[B]dV$ ماتریس سختی سیال و $\rho_0[R_e]^T\{\ddot{u_e}\} = \rho_0\int_S \{N\}\{n\}^T\{N'\}ds$ ماتریس جرم مربوط به اندرکنش سازه و سیال هستند.

آنالیز مدل

برای آنالیز لرزه‌ای سد بتنی مورد نظر از نرم‌افزار انسیس[1] استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت آنالیز لرزه‌ای با در نظر گرفتن هندسه نامنظم دامنه‌ها و اثرات اندرکنش مخزن و پی را دارد. برای این منظور اجزای مناسبی که رفتار تراکم‌پذیری سیال را نمایش دهد، پیش‌بینی شده است. به دلیل عمق و ارتفاع زیاد مخزن سد بتنی وزنی، از اثر امواج سطحی آب صرف‌نظر شده و تأثیر اندرکنش سد و مخزن در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مدل سد به‌صورت دوبعدی با رفتار تنش مسطح در نظر گرفته شده و اثرات اندرکنش با فونداسیون در مدل لحاظ شده است. برای گسسته سازی قسمت جامد از عناصر هشت گرهی SOLID182 و برای قسمت سیال از عناصر چهار گرهی FLUID29 برای سیال مجاور و غیر مجاور سازه استفاده شده است. با آنالیز مدل، مجهولات موردنظر که شامل تغییر مکان‌ها و تنش‌های سد و نیز فشار هیدرودینامیکی مخزن هستند، استخراج می‌شود.

مدل سد بتنی وزنی

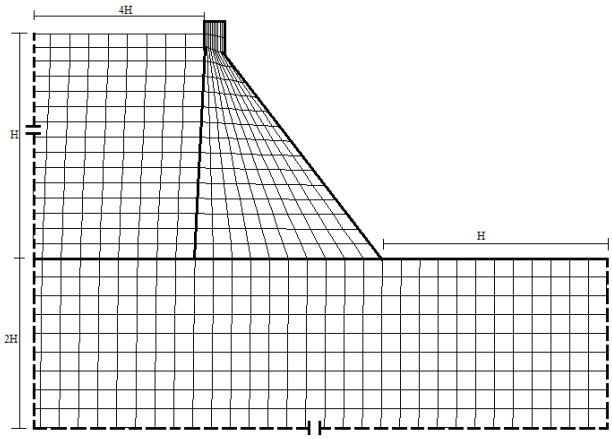
برای اینکه قابلیت و کاربرد مدل تهیه‌شده در بررسی رفتار لرزه‌ای سد بتنی وزنی واقع در مناطق لرزه‌خیز به‌طور مشخصی نشان داده شود، سد پاین‌فلت[2] به ارتفاع ۱۲۲ متر واقع در ایالت کالیفرنیای آمریکا به عنوان نمونه موردی برای این مطالعه انتخاب شده است. مشخصات هندسی مدل مورد نظر که یک سد بتنی وزنی با مخزن به ارتفاع ۱۱۶ است، در شکل (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مصالح سد از نوع بتن غیرمسلح با چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۲/۷۵ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ است. چگالی رسوب نیز با فرض سیال معادل برابر ۱۸۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

[1] Ansys

[2] Pine Flat

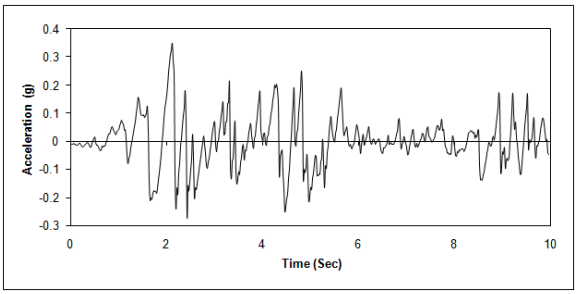
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

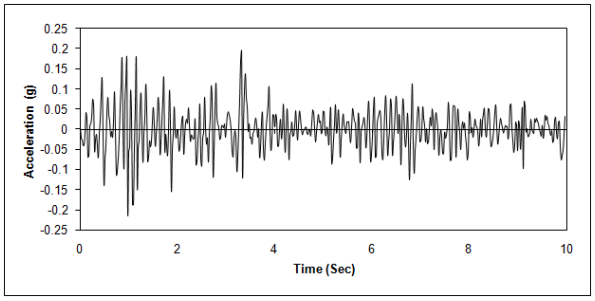


شکل (۱): گسسته سازی اجزای محدود بلندترین مونولیت غیر سرریز سد پاین‌فلت

به منظور آنالیز دینامیکی شتاب‌نگاشت السنترو انتخاب شده است. شکل (۲)، ۱۰ ثانیه اول مؤلفه افقی و قائم شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه السنترو را که در سال ۱۹۴۰ رخ داد، نشان می‌دهد. برای انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک[1] استفاده شده که پارامترهای آن به‌صورت $\beta = 0.001$ و $\gamma = 0.5$ انتخاب شده است. سرعت امواج فشاری در آب، ۱۴۳۸/۶۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای اعمال اثرات میرایی از روش ریلی و برای مرز دوردست قطع‌شده مخزن از شرط مرزی سامرفلد[2] استفاده شده است؛ همچنین گام زمانی برابر $\Delta t = 0.02$ در نظر گرفته شده است. همچنین حرکت فونداسیون در محل قطع، قید شده و حجم رسوب نیز برابر ۲۰ درصد حجم مخزن در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این مقدار رسوب قابل پیش‌بینی بوده و در برخی سدها مشاهده شده است.



الف–مؤلفه امتداد شمال– جنوب



ب– مؤلفه امتداد قائم

شکل (۲): شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه السنترو

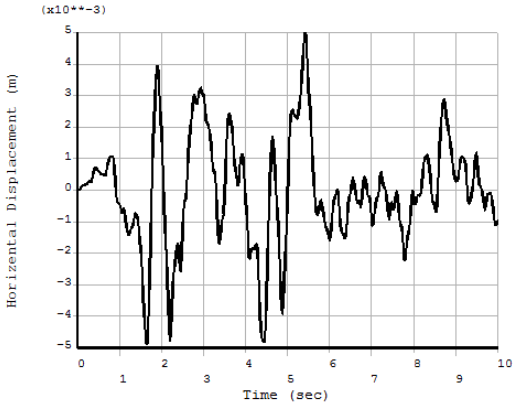
بعد از مدل‌سازی و انجام تحلیل دینامیکی، نتایج مربوط به پاسخ‌های تغییر مکان، تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد و فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن استخراج شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر لایه رسوب بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی است، مدل مورد نظر برای دو حالت سد با مخزن بدون رسوب و با ۲۰ درصد لایه رسوب مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل، با اعمال شتاب‌نگاشت افقی و قائم زمین‌لرزه السنترو برای دو حالت به‌صورت تاریخچه زمانی ارائه شده است. شکل (۳) نتایج مربوط به تغییر مکان افقی تاج سد را برای دو حالت نشان می‌دهند.

[1] Newmark

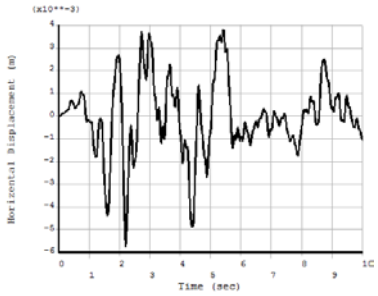
[2] Somerfeld

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]



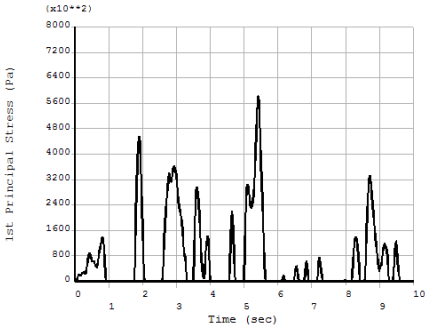
الف- مخزن بدون لایه رسوب



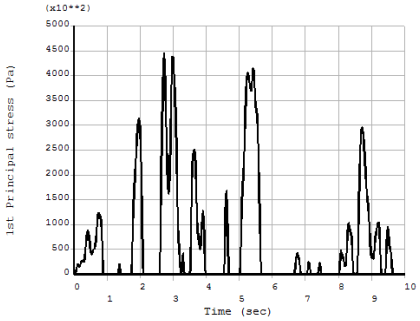
ب- مخزن با لایه رسوب

شکل (۳): تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تاج سد

با مقایسه منحنی می‌توان به افزایش تغییر مکان افقی تاج هنگامی که مخزن با لایه رسوب در نظر گرفته می‌شود، پی برد. همچنین برای بررسی وضعیت تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد نتایج مربوط به پاسخ تاریخچه زمانی تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل در نقطه بحرانی برای دو حالت مخزن بدون لایه رسوب و مخزن با لایه رسوب رسم شده و به‌صورت منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان به تأثیر وجود لایه رسوب در کف مخزن بر روی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی پی برد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد هنگامی‌که مخزن با لایه رسوب در نظر گرفته می‌شود پاسخ‌های مربوط به تنش‌ها افزایش می‌یابد.

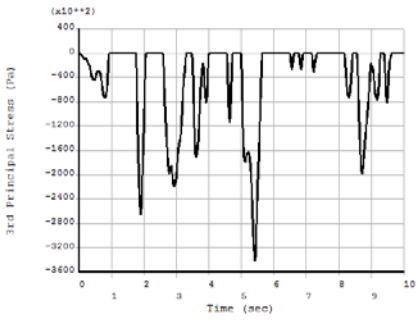


الف- مخزن بدون لایه رسوب

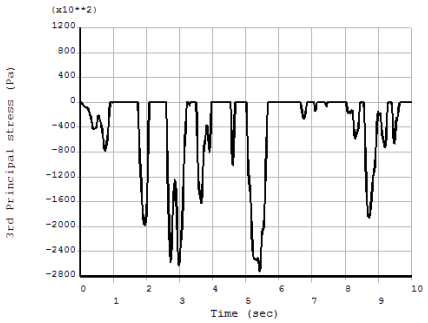


ب- مخزن با لایه رسوب

شکل (۴): تاریخچه زمانی تنش اصلی حداکثر در پاشنه سد



الف- مخزن بدون لایه رسوب



ب- مخزن با لایه رسوب

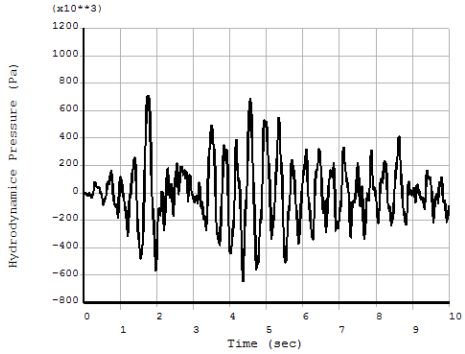
شکل (۵): تاریخچه زمانی تنش اصلی حداقل در پنجه سد

برای بررسی تأثیر وجود لایه رسوب بر روی فشار هیدرودینامیکی تولیدشده در مخزن با توجه به افزایش اینرسی توسط رسوب،

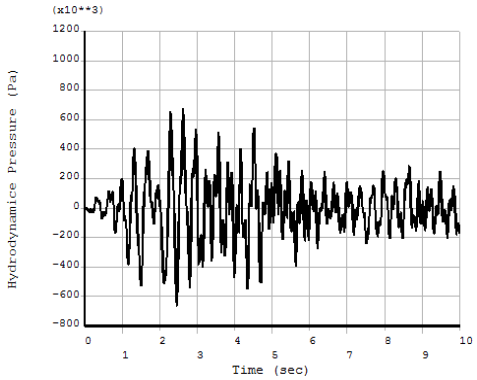
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

نتایج مربوط به فشار هیدرودینامیکی تولیدشده در پاشنه سد مورد مقایسه قرار گرفته است. منحنی‌های نمایش داده‌شده در شکل (۶) پاسخ تاریخچه‌های زمانی فشار هیدردینامیکی را برای دو حالت نشان می‌دهد.



الف- مخزن بدون لایه رسوب



ب- مخزن با لایه رسوب

شکل (۶): تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی تولیدشده در پاشنه سد

همان‌گونه که منحنی‌ها نشان می‌دهد، در مورد پاسخ مربوط به فشار هیدرودینامیکی نیز می‌توان گفت که وجود لایه رسوب در کف مخزن سبب افزایش فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن می‌شود. دلیل این امر بیشتر بودن چگالی رسوب به دلیل وجود ذرات خاک در آن است. در خاتمه برای بررسی مناسب‌تر تأثیر رسوب کف مخزن در افزایش پاسخ تغییر مکان و تنش‌ها، مقادیر عددی پاسخ‌ها به‌صورت جدول ارائه شده است. جدول (۱) مقادیر عددی پاسخ‌های حداکثر تغییر مکان افقی و تنش‌های اصلی را برای دو حالت فونداسیون نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقادیر عددی حداکثر پاسخ‌های برای شرایط مختلف مخزن

پاسخ سد	مخزن بدون رسوب	مخزن با ۲۰ درصد رسوب	درصد افزایش
حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد (متر)	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۵	۲۸/۲
حداکثر تنش اصلی کششی (مگا پاسکال)	۰/۴۵	۰/۵۸	۲۸/۸
حداکثر تنش اصلی فشاری (مگا پاسکال)	۰/۲۷۹	۰/۳۴	۲۱/۸
فشار هیدرودینامیکی (پاسکال)	۶۷۷۳۲۲	۷۰۹۱۶۶	۴/۷

با توجه به جدول شماره (۱) به‌روشنی می‌توان دریافت که هنگام در نظر گرفتن ۲۰ درصد لایه رسوب در کف مخزن، تغییر مکان تا حدود ۲۸٪ و تنش‌های تولیدشده در بدنه سد تا حدود ۲۸٪ قابل افزایش هستند. دلیل این امر افزایش اینرسی وارد بر بدنه سد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای حصول تحلیل قابل‌اطمینان و طراحی دقیق سد بتنی وزنی لازم است که اثرات رسوب کف در تحلیل‌ها حتماً لحاظ شود. کاری که در مطالعات پیشین به آن چندان توجهی نشده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نشان دادن اهمیت مدل‌سازی سد بتنی وزنی همراه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش و بررسی تأثیر اینرسی رسوب موجود در کف مخزن، سد پاین فلت به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با استفاده از مدل اجزای محدود تهیه‌شده به‌وسیله نرم‌افزار انسیس، مورد تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل لرزه‌ای، مؤلفه‌های افقی و قائم زمین‌لرزه السنترو به مدل تحمیل شد. بعد از تحلیل مدل، نتایج حاصل که تغییر مکان افقی و تنش‌های اصلی سد و نیز فشار هیدرودینامیکی تولیدشده در مخزن است، استخراج گردید. برای بررسی تأثیر رسوب، مدل برای دو حالت مخزن بدون لایه رسوب و با ۲۰ درصد حجمی لایه رسوب مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از مدل می‌توان به افزایش پاسخ تغییر مکان افقی و تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد هنگام در نظر گرفتن لایه رسوب پی برد. دلیل این امر تأثیر اینرسی رسوب و افزایش جرم حرکت داده شده با سد در هنگام وقوع زلزله است. بنابراین می‌توان گفت که در طراحی دقیق سدها لازم است به اثرات رسوب بر روی نمایش لرزه‌ای توجه شود. در خاتمه لازم به یادآوری است که به‌وسیله

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]

مدل تهیه‌شده می‌توان تأثیر پارامترهای دیگر نظیر اثر شیب کف مخزن و شیب وجه بالادست بر روی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی را بررسی کرد.

مراجع

۱- احمدی، م. ت. و قره‌باغی، م. (۱۳۷۲). "تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر- لاگرانژ." پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۲- پاسبانی خیاوی، م.، قربانی، م. و ابولی، ا. (۱۳۹۴). "بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی زلزله روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی دو قوسی با استفاده از مدل اجزای محدود"، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی. ۳۴- ۴۵ ,(۴)۲ .

3- Ansys user manual. (2007). Release 11.0 Documentation for ANSYS, SAS IP, Inc..

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

5- Chopra, A. K. (1967). “Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes. ” *Journal of engineering mechanics division*. 93(6), 205-223.

6- Chopra, A. K. (1968). “Earthquake behavior of reservoir-dam systems. ” *Journal of engineering mechanics division*. 94(6), 1475-1500.

7- Chopra, A. K. (1970). “Earthquake response of concrete gravity dams.” *Journal of engineering mechanics division*. 96, 443-454.

8- Fenves, G. and Chopra, A. K. (1985). “Effect of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams. ” *Earthquake engineering and structural dynamics*. 13(1), 13-31.

9- Hatami, K. (1996). “A model for reservoir bottom absorption effects in seismic response analysis of concrete dams.” 1995 student paper competition, EERI 48th annual meeting.

10- Lotfi, V., Roesset, M. and Tassoulas, J. L. (1987). “A technique for the analysis of the response of dams to earthquakes”. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 15(4), 463-490.

11- 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.

12- Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P. (1978). “Dynamic fluid-structure interaction: Numerical modeling of the coupled problem.” *John wiley, New york*. pp 185-193.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.5.0]