

تحلیل دینامیکی اندرکنش سد و مخزن با در نظر گرفتن اثرات امواج سطحی،
جذب کف مخزن و مولفه قائم شتاب زمین

محمود عبدالمهی* و رضا عطارنژاد
دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۰۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۰۹/۲۲)

چکیده -

واژگان کلیدی

**Dynamic Analysis of Dam-Reservoir Interaction Considering
the Effects of Free Surface Waves and Reservoir Bottom
Absorption and Vertical Component of Earthquake**

M. Abdollahi and R. Attarnejad

Tehran University, Department of Civil Engineering

Abstract: *In this paper, time domain dynamic analysis of dam-reservoir interaction is presented using finite difference method. A semi-implicit scheme is used for the discretization of the governing equation of dam, and an explicit scheme is used for the discretization of the governing equation of fluid. Water is considered compressible but its internal viscosity is neglected. A Sommerfeld's radiation condition at the infinity boundary of the fluid domain is implemented. To verify the proposed method,*

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: abdollahima@aut.ac.ir

numerical examples are given to be compared with the existing solutions. The result shows a good agreement with semi-analytical solution. Finally, the effects of reservoir bottom absorption, the free surface waves of the reservoir and the vertical component of earthquake are analyzed and the results are presented.

Keywords: Dam-reservoir interaction, explicit method, semi-implicit method, hydrodynamic pressure, reservoir bottom absorption; free surface waves

۱- مقدمه

وسیله روش انتگرال حلقوی منفرد مجزا (DSC) ارائه کردند. سازه سد با یک تیر طره ای با مقطع ثابت و مخزن با یک محیط همگن غیر چسبنده نیمه بی نهایت مدل شد. سیال تراکم پذیر در نظر گرفته شد و از اثر امواج سطحی نیز صرف نظر شد.

نث [۱۶] این مسئله را به روش تفاضل محدود با صرف نظر کردن از اثر جذب انرژی توسط کف مخزن و مولفه قائم زلزله و با در نظر گرفتن سد صلب تحلیل کرد. هونگ و چن [۱۷] از روش تفاضل محدود برای تعیین فشار هیدرودینامیکی غیر خطی وارد بر سد صلب استفاده کردند. چن [۱۸] با فرض سد صلب و استفاده از روش تفاضل محدود، مقدار فشار هیدرودینامیکی را برای مخزن با شکل دلخواه به دست آورد.

هدف از این نوشتار، ارائه یک حل عددی برای تحلیل دینامیکی اندرکنش سد و مخزن با احتساب اثرات توام جذب کف مخزن، امواج سطحی و مولفه قائم شتاب زمین با روش تفاضل محدود است. در این تحلیل دو بعدی از نظریه تیر اویلر برنولی برای استخراج معادله حاکم بر سد استفاده می شود و اثرات امواج سطحی، جذب کف مخزن و مولفه قائم شتاب زمین نیز در تحلیل در نظر گرفته می شود. برای شرایط مرزی دوردست مخزن نیز از شرایط مرزی سامرفیلد استفاده شده و نتایج به دست آمده ارائه می شود.

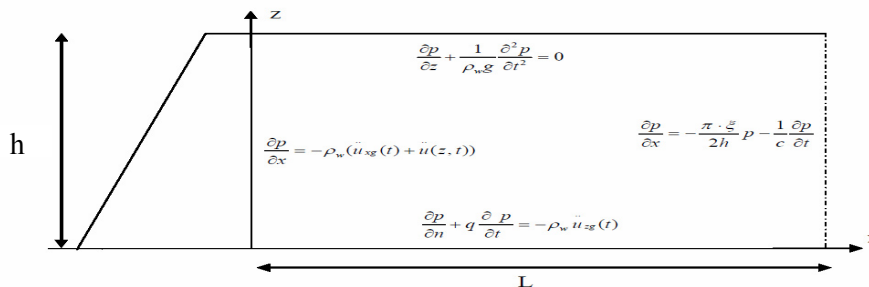
۲- فرمول بندی مسئله

به منظور ساده سازی مدل به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده و در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱ معادله حاکم بر سد

معادله حرکت برای یک تیر غیر منشوری طره به صورت زیر تعیین می شود:

محاسبه فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر سد در طول زلزله در تحلیل و طراحی سد از اهمیت زیادی برخوردار است. حرکت سد ناشی از تحریک زمین با تولید فشار هیدرودینامیکی و امواج سطحی در مخزن همراه خواهد بود. وسترگارد اولین کسی بود که فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد صلب را با فرض وجه قائم پایین دست و ارتعاشات هارمونیک زمین به صورت تحلیلی به دست آورد که به روش جرم افروده شناخته می شود [۱]. بعد از کار کلاسیک وسترگاد، زنگار و هافی [۲] و زینکوویچ و نث [۳] مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد را با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال به دست آوردند. در ادامه زینکوویچ و نیوتن [۴] از روش اجزای محدود برای تعیین پاسخ دینامیکی سازه غوطه ور در سیال با فرض سیال تراکم ناپذیر استفاده کردند. چوپرا [۵] برای تعیین فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد صلب با فرض وجه پایین دست قائم و ارتعاشات هارمونیک حل تحلیلی را ارائه کرد. ساینی و همکاران [۶]، چوپرا [۷]، هال و چوپرا [۸] و فنوز و چوپرا [۹] تاثیر مواد رسوبی ته مخزن را در تحلیل دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. لطفی و همکاران [۱۰] این مسئله را در حوزه فرکانس توسط روش اجزای محدود مطالعه کردند. حل دینامیکی اندرکنش سد و مخزن در حوزه زمان توسط محققان زیادی از جمله شاران [۱۱]، تسای و همکاران [۱۲]، می تی [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۲] تسای به روش نیمه تحلیلی و با استفاده از روش تبدیل لاپلاس مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با مقطع ثابت را تعیین کردند. عطارنژاد و فرساد [۱۴] با بسط روش تسای مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با مقطع متغیر را محاسبه کردند. رحمتی و عطارنژاد [۱۵] تحلیل اندرکنش سد و مخزن در دامنه زمان به صورت نیمه تحلیلی به



شکل ۱- سیستم سد بتنی و مخزن

فشار هیدرودینامیکی از حل معادله موج (۶) در دامنه مخزن، تحت شرایط مرزی زیر به دست می‌آید.

در وجه مشترک سد و مخزن:

$$\left. \frac{\partial p(x, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_w (\ddot{u}_{gx}(t) + \ddot{u}(z, t)) \quad (۷)$$

برای انتهای دور مخزن:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} p = 0 \quad (۸)$$

اما به منظور تعیین فشار هیدرودینامیکی بر روی سد بر اثر زلزله به منظور کاهش حجم محاسبات، مخزن باید در یک فاصله مناسبی از سد قطع شود. در مرز قطع شده، شرایط مرزی شاران یا سامرفیلد مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرط مرزی سامرفیلد بر این اصل استوار است که حرکت امواج به صورت جبهه موج در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی شاران بر اساس انعکاس امواج هیدرودینامیکی از مرز قطع شده به دست آمده است [۱۹]. بدین منظور شرط مرزی در انتهای دور به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\pi \cdot \xi}{2h} p - \frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (۹)$$

که $\xi = 0$ ، شرط مرزی سامرفیلد و $\xi = 1$ ، شرط مرزی شاران را بیان می‌کند.

در کف مخزن:

تأثیرات مواد کف مخزن (رسوب) به صورت گسترده توسط محققان بی‌شماری از جمله در مراجع [۲۰-۲۵] مورد بررسی قرار گرفته است. شرط مرزی کف مخزن برای تحلیل به

$$\frac{\partial}{\partial z} (EI(z) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z}) + \rho A(z) \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (۱)$$

$= \rho A(z) u(t) - p(x=0, z, t)$
در این رابطه E مدول الاستیسیته تیر و I ممان اینرسی است. جرم خطی تیر به صورت $\rho A(z)$ در نظر گرفته شده و جابه‌جایی نسبی سد نسبت به زمین در جهت x با u و شتاب افقی زمین با \ddot{u}_{gx} و فشار هیدرودینامیکی با p نشان داده می‌شود.

سد و مخزن در ابتدای شتاب حرکت زمین در حالت سکون در نظر گرفته می‌شوند. برای یک تیر طره شرایط مرزی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} u(z=0) = 0, u'(z=0) = 0 \\ u''(z=h) = 0, u'''(z=h) = 0 \end{aligned} \quad (۲)$$

فشار هیدرودینامیکی در سیستم دو بعدی مخزن با استفاده از معادله اویلر و معادله پیوستگی و معادله حالت به دست می‌آید.

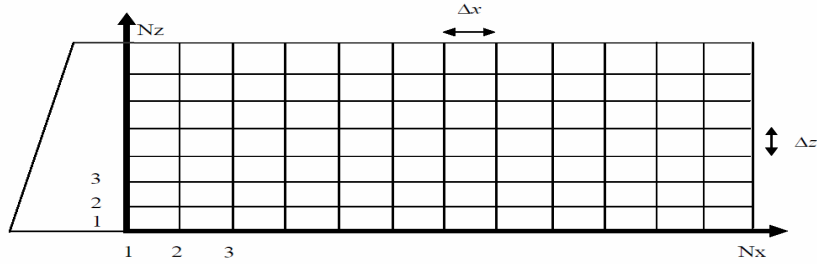
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_w c^2 \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad \text{معادله پیوستگی} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho_w} \vec{\nabla} p = 0 \quad \text{معادله اویلر} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{c} \frac{\partial p_w}{\partial t} = 0 \quad \text{معادله حالت} \quad (۵)$$

در روابط بالا v سرعت ذره سیال، ρ_w چگالی آب و c سرعت صوت در آب است. آب، همگن و غیر لزج و با تراکم پذیری خطی و جریان غیر چرخشی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از معادلات (۳) تا (۵):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (۶)$$



شکل ۲- تصویر نقاط گره ای و مدل سد و مخزن در روش تفاضل محدود

صورت زیر در نظر گرفته می شود.

می شوند:

$$p(z, t)|_{t=0} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial p(z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial n} + q \frac{\partial p}{\partial t} \right) \Big|_{z=0} = -\rho_w \ddot{u}_{gz}(t) \quad (10)$$

در معادله بالا q ضریب استهلاک است که به عنوان پارامتر پایه برای تعیین مشخصات مواد کف مخزن مورد استفاده قرار می گیرد و توسط فنوز و چوپرا به صورت زیر ارائه شده است [۲۵] و \ddot{u}_{gz} مولفه زلزله در راستای قائم است.

۳- گسسته سازی معادلات

۳-۱- گسسته سازی معادله حاکم بر سد

شکل (۲) مدل گسسته سازی شده مخزن را نشان می دهد. تعداد نقاط گره ای در جهت x برابر N_x و در جهت z برابر N_z است. سطح مقطع و ممان اینرسی سازه سد در امتداد محور z به صورت زیر تغییر می کند:

$$I(z) = \frac{1}{12}(\alpha + \beta z)^3, \quad A(z) = \alpha + \beta z \quad (17)$$

که:

$$\beta = \frac{A_1 - A_0}{h}, \quad \alpha = A_0 \quad (18)$$

اندیس 0 و 1 مقادیر را به ترتیب در $z=0$ و $z=h$ نشان می دهد. برای گسسته سازی معادله حاکم بر سد از روش نیمه ضمنی با دقت مرتبه دوم استفاده می شود. با انتخاب نقطه k به عنوان نقطه مبنا گسسته سازی معادله حاکم بر سد به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned} & (d_0 - d_1)u_{k-2}^{n+1} - (4d_0 - 2d_1 - d_2)u_{k-1}^{n+1} + \\ & (1 + 6d_0 - 2d_2)u_k^{n+1} - (4d_0 + 2d_1 - d_2)u_{k+1}^{n+1} \\ & + (d_0 + d_1)u_{k+2}^{n+1} = \Theta_k^n \end{aligned} \quad (19)$$

که:

$$q = \frac{1 - \alpha}{c(1 + \alpha)} \quad (11)$$

در این معادله α ضریب انعکاس موج است که بین 0 تا 1 تغییر می کند.

در کف مخزن اگر از اثر جذب انرژی و مولفه افقی قائم زلزله صرف نظر شود، شرط مرزی جدید به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$\frac{\partial p(x, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (12)$$

در سطح آزاد مخزن:

با در نظر گرفتن اثر امواج سطحی، شرط مرزی مربوطه به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) \Big|_{z=h} = 0 \quad (13)$$

با صرف نظر از امواج سطحی:

$$p|_{z=h} = 0 \quad (14)$$

سد و مخزن در ابتدای زلزله در حالت سکون در نظر گرفته

صریح با دقت مرتبه دوم استفاده می‌کنیم. با انتخاب نقاط k و i به عنوان نقاط مبنا، خواهیم داشت:

$$p_{i,k}^{n+1} = 2p_{i,k}^n - p_{i,k}^{n-1} + Fz \left(p_{i,k+1}^n - 2p_{i,k}^n + p_{i,k-1}^n \right) + Fx \left(p_{i+1,k}^n - 2p_{i,k}^n + p_{i-1,k}^n \right) \quad (28)$$

در معادله بالا i از ۲ تا $Nx-1$ و k از ۲ تا $Nz-1$ تغییر خواهد کرد و

$$Fz = \frac{\Delta t^2 c^2}{\Delta z^2}, \quad Fx = \frac{\Delta t^2 c^2}{\Delta x^2} \quad (29)$$

برای گره‌های دیگر معادلات گسسته سازی شده به صورت زیر خواهد بود.

در کف مخزن:

$$p_{i,1}^{n+1} = \frac{1}{1 - Fz * Fq} \left(2p_{i,1}^n - p_{i,1}^{n-1} + Fz \left(2p_{i,2}^n - 2p_{i,k}^n - Fq * p_{i,1}^n + 2\rho_w \Delta z \ddot{u}_{gz}^n \right) + Fx \left(p_{i+1,1}^n - 2p_{i,1}^n + p_{i-1,1}^n \right) \right) \quad (30)$$

که i از ۲ تا $Nx-1$ تغییر خواهد کرد و

$$Fq = \frac{2\Delta z q}{\Delta t}$$

در مرز قطع شده مخزن:

$$p_{Nx,k}^{n+1} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2\Delta t c}{\Delta x} \right)} \left(\frac{H2 + Fx(2p_{Nx-1,k}^n + p_{Nx,k}^n)}{\left(\frac{-\pi \Delta x \xi}{h} + \frac{2\Delta x}{c\Delta t} - 2 \right)} \right) \quad (31)$$

که k از ۲ تا $Nz-1$ تغییر خواهد کرد و

$$H2 = 2p_{Nx,k}^n - p_{Nx,k}^{n-1} + Fz \left(p_{Nx,k+1}^n - 2p_{Nx,k}^n + p_{Nx,k-1}^n \right) \quad (32)$$

در سطح آزاد مخزن:

$$p_{i,Nz}^{n+1} = \frac{1}{1 - Fz \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2}} \left(H3 + Fz \left(2p_{i,Nz-1}^n - 2p_{i,Nz}^n + \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2} (p_{i,Nz-1}^{n-1} - 2p_{i,Nz}^n) \right) \right) \quad (33)$$

و

$$H3 = 2p_{i,Nz}^n - p_{i,Nz}^{n-1} + Fx \left(p_{i+1,Nz}^n - 2p_{i,Nz}^n + p_{i-1,Nz}^n \right) \quad (34)$$

و $i = 2, \dots, Nx-1$

$$\Theta_k^n = 2u_k^n - u_k^{n-1} - (d_0 - d_1)u_{k-2}^n + (4d_0 - 2d_1 - d_2)u_{k-1}^n - (6d_0 - 2d_2)u_k^n + (4d_0 + 2d_1 - d_2)u_{k+1}^n - (d_0 + d_1)u_{k+2}^n - \Delta t^2 \ddot{u}_{gx}^n - \frac{\Delta t^2}{m^k} p_{1,k}^n \quad (20)$$

و k بین 3 تا $Nz-2$ تغییر می‌کند. در این رابطه اندیس k بر موقعیت مکانی و اندیس n بر موقعیت زمانی دلالت دارد و

$$d_0 = \frac{E(\alpha + \beta z)^3 \Delta t^2}{24m_k \Delta z^4} \quad (21)$$

$$d_1 = \frac{E\beta(\alpha + \beta z)^2 \Delta t^2}{8m_k \Delta z^3}$$

$$d_2 = \frac{E\beta^2(\alpha + \beta z)\Delta t^2}{4m_k \Delta z^2}$$

برای گره ۲ داریم:

$$(7d_0 - d_1 - 2d_2 + 1)u_2^{n+1} - (4d_0 + 2d_1 - d_2)u_3^{n+1} + (d_0 + d_1)u_4^{n+1} = \Theta_2^n \quad (22)$$

که:

$$\Theta_2^n = 2u_2^n - u_2^{n-1} - (7d_0 - d_1 - 2d_2)u_2^{n+1} + (4d_0 + 2d_1 - d_2)u_3^n - (d_0 + d_1)u_4^n - \Delta t^2 \ddot{u}_{gx}^n - \frac{\Delta t^2}{m^k} p_{1,2}^n \quad (23)$$

برای گره با مشخصات Nz و $Nz-1$ به ترتیب داریم:

$$\Theta_2^n 2u_2^n - u_2^{n-1} - (7d_0 - d_1 - 2d_2)u_2^{n+1} + (4d_0 + 2d_1 - d_2)u_3^n - (d_0 + d_1)u_4^n - \Delta t^2 \ddot{u}_{gx}^n - \frac{\Delta t^2}{m^k} p_{1,2}^n \quad (24)$$

که

$$\Theta_{Nz-1}^n = 2u_{Nz-1}^n - u_{Nz-1}^{n-1} - (d_0 - d_1)u_{Nz-3}^n + (4d_0 - 2d_1 - d_2)u_{Nz-2}^n - (5d_0 - d_1 - 2d_2)u_{Nz-1}^n + (2d_0 - d_2)u_{Nz}^n - \Delta t^2 \ddot{u}_{gx}^n - \frac{\Delta t^2}{m^k} p_{1,Nz-1}^n \quad (25)$$

و

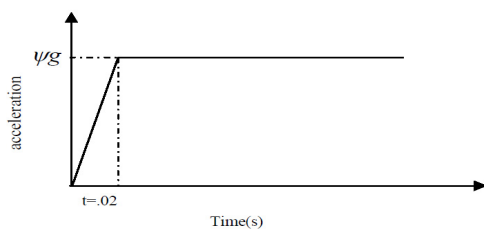
$$2d_0 u_{Nz-2}^{n+1} - 4d_0 u_{Nz-1}^{n+1} + (2d_0 + 1)u_{Nz}^{n+1} = \Theta_{Nz}^n \quad (26)$$

که

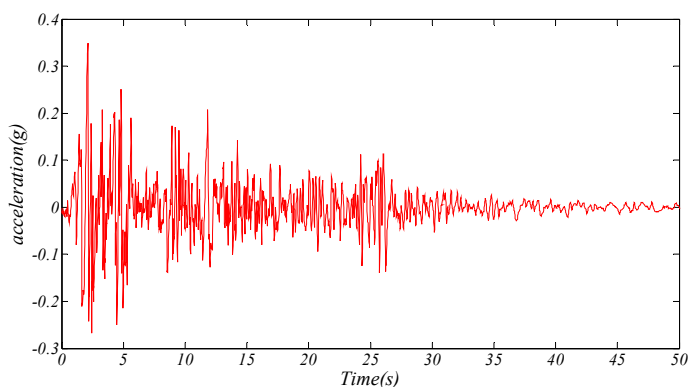
$$\Theta_{Nz}^n = 2u_{Nz}^n - u_{Nz}^{n-1} - d_0 \left(2u_{Nz-2}^n - 4u_{Nz-1}^n + 2u_{Nz}^n \right) - \Delta t^2 \ddot{u}_{gx}^n - \frac{\Delta t^2}{m^k} p_{1,Nz}^n \quad (27)$$

۳-۲- گسسته سازی معادله حاکم بر مخزن:

برای گسسته سازی معادله موج حاکم بر سیال از روش



شکل ۳- شتاب خطی



شکل ۴- مولفه افقی شمالی-جنوبی زلزله السترو

$$p_{N_x, N_z}^{n+1} = \frac{1}{\left(1 - Fz \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2} + Fx \frac{2\Delta x}{c \Delta t}\right)} \quad (38)$$

$$\left(H5 + Fx \left(2p_{N_x-1, N_z}^n + p_{N_x, N_z}^n \left(\frac{-\pi \Delta x \xi}{h} + \frac{2\Delta x}{c \Delta t} - 2 \right) \right) \right) \quad \text{که}$$

$$H5 = 2p_{N_x, N_z}^n - p_{N_x, N_z}^{n-1} + Fz(2p_{N_x, N_z}^n - 2p_{N_x, N_z-1}^n) + \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2} (p_{N_x, N_z}^{n-1} - 2p_{N_x, N_z}^n) \quad (39)$$

برای گره با مشخصات $i=N_x$ و $k=1$

$$p_{N_x, 1}^{n+1} = \frac{1}{1 - Fz Fq + Fx \frac{2\Delta x}{c \Delta t}} \quad (40)$$

$$\left(H6 + Fx \left(2p_{N_x-1, 1}^n + p_{N_x-1, 1}^n \left(\frac{-\pi \Delta x \xi}{h} + \frac{2\Delta x}{c \Delta t} - 2 \right) \right) \right) \quad \text{که}$$

در سطح مشترک سد و مخزن:

$$p_{1, k}^{n+1} = 2p_{1, k}^n - p_{1, k}^{n-1} + Fz \left(p_{1, k+1}^n - 2p_{1, k}^n + p_{1, k-1}^n \right) + Fx \left(2p_{2, k}^n - 2p_{1, k}^n + 2\rho \Delta x (\ddot{u}_{gx}^n + \ddot{u}_k^n) \right) \quad (35)$$

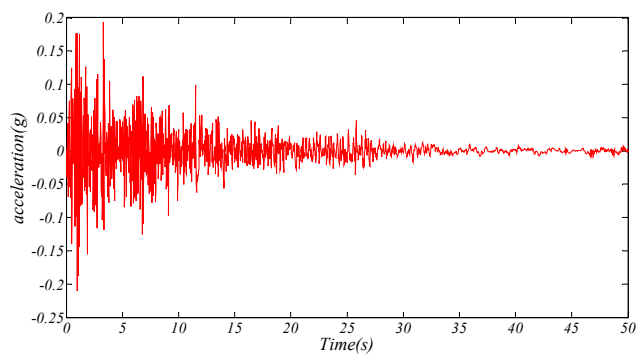
برای گره با مشخصات $i=1$ و $k=1$:

$$p_{1, 1}^{n+1} = \frac{1}{1 - Fz Fq} \left(H4 + Fx \left(2p_{2, 1}^n - 2p_{1, 1}^n + 2\rho \Delta x (\ddot{u}_{gx}^n + \ddot{u}_1^n) \right) \right) \quad (36)$$

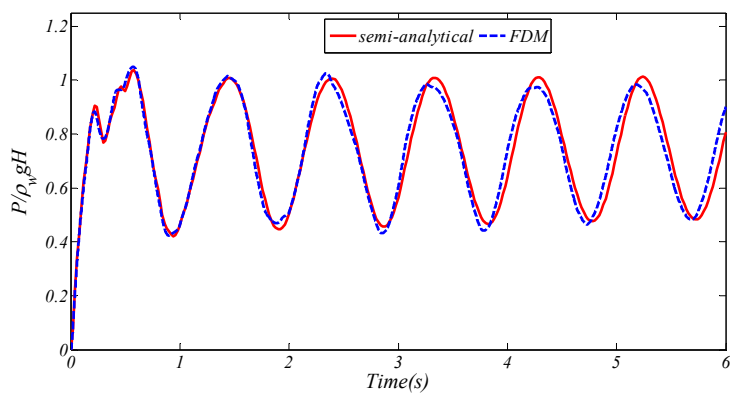
که

$$H4 = 2p_{1, 1}^n - p_{1, 1}^{n-1} + Fz \left(2p_{1, 2}^n - 2p_{1, 1}^n - Fq p_{1, 1}^n \right) + 2\rho_w \Delta z \ddot{u}_{gz}^n \quad (37)$$

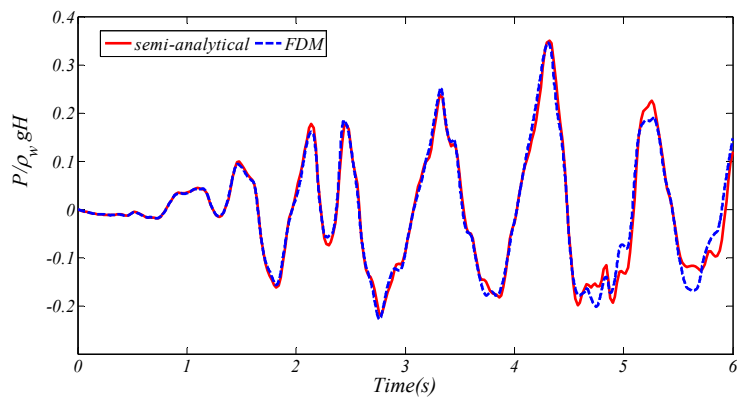
برای گره با مشخصات $i=N_x$ و $k=N_z$



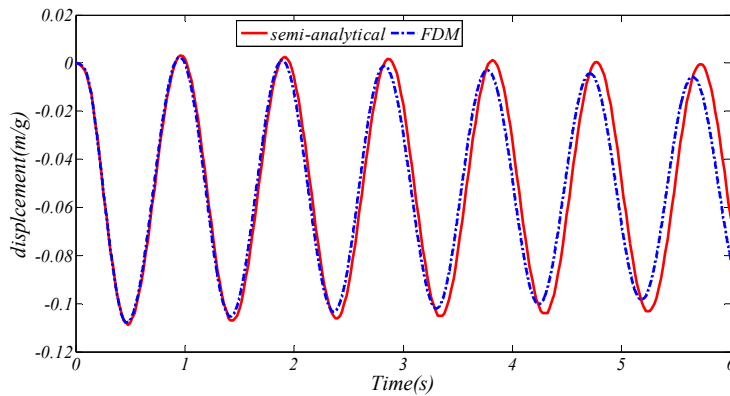
شکل ۵- مولفه قائم زلزله الاسترو



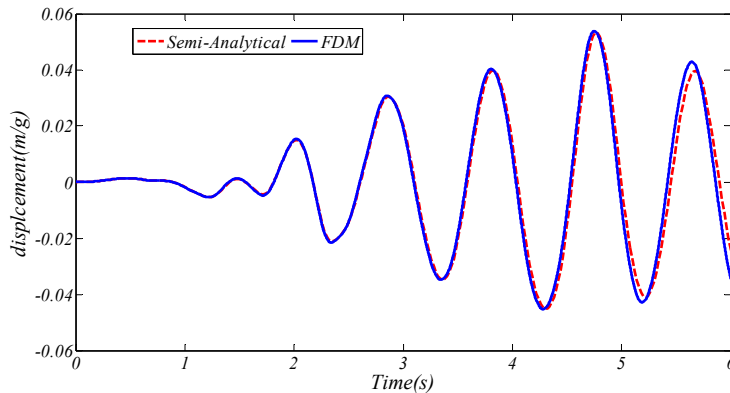
شکل ۶- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد تحت شتاب رمپ



شکل ۷- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد تحت شتاب زلزله الاسترو



شکل ۸- جابه جایی تاج سد تحت شتاب رمپ



شکل ۹- جابه جایی تاج سد تحت شتاب زلزله الاسترو

۴-مثال عددی

در ابتدا به منظور تعیین دقت روش ارائه شده، یک مثال با روش مذکور حل شده و نتایج با روش تحلیلی ارائه شده توسط عطارنژاد در ادبیات فنی مقایسه می‌شود. سسپس اثرات توأم امواج سطحی، جذب کف مخزن و مولفه قائم شتاب زمین در مثال جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در تمام تحلیل‌ها مشخصات مخزن به صورت چگالی سیال برابر $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ و سرعت موج برابر $c = 1439 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شده و مخزن به صورت افقی فرض می‌شود. چگالی بتن ۲,۴ تن بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود و سیستم سد و مخزن تحت

$$H6 = 2p_{N_x,1}^n - p_{N_x,1}^{n-1} \quad (41)$$

$$+ Fz \left(2p_{N_x,2}^n - 2p_{N_x,1}^n - Fq p_{N_x,1}^n + 2\rho_w \Delta z \ddot{u}_{gz}^n \right)$$

برای گره با مشخصات $i=1$ و $k=Nz$:

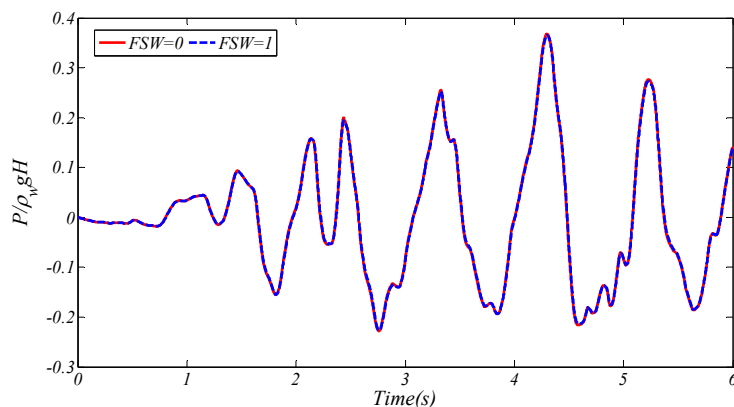
$$p_{1,Nz}^{n+1} = \frac{1}{1 - Fz \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2}} \quad (42)$$

$$\left(H7 + Fx \left(2p_{2,Nz}^n - 2p_{1,Nz}^n + 2\rho \Delta x (\ddot{u}_{gx}^n + \ddot{u}_{Nz}^n) \right) \right)$$

که

$$H7 = 2p_{1,Nz}^n - p_{1,Nz}^{n-1} \quad (43)$$

$$+ Fz \left(2p_{1,Nz-1}^n - 2p_{1,Nz}^n + \frac{2\Delta z}{\rho_w g \Delta t^2} \cdot (-2p_{1,Nz}^n + p_{1,Nz-1}^n) \right)$$



شکل ۱۰- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف FSW تحت مولفه افقی زلزله ال‌سنترو

فاکتور اصلی صورت گرفته و به منظور خلاصه‌سازی تنها به ارائه‌ی نتایج اکتفا می‌شود. با توجه به آزمون‌های همگرایی مقادیر مناسب برای مقادیر مختلف Δt , Δx , Δz و L به ترتیب برابر $9m$, $8/33m$, $0,0005s$ و $5H$ تعیین شده است. برای شرط مرزی دور مخزن نیز از شرط مرزی سامرفیلد استفاده خواهد شد.

با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده، مقادیر فشار هیدرودینامیکی در پاشنه سد و جابه‌جایی تاج سد تحت شتاب رمپ و شتاب زلزله ال‌سنترو در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. در شکل‌های مربوط به فشار هیدرودینامیکی مقادیر فشار به صورت بی بعد زیر نشان داده شده است:

$$\frac{P}{\rho_w g h}$$

در این رابطه g شتاب جاذبه زمین است. همان‌طور که در این شکلها مشخص است نتایج به دست آمده از روش تفاضل محدود (FDM) با نتایج نیمه تحلیلی به دست آمده از مطالعات عطارنژاد و فرساد تطابق مناسبی را از خود نشان می‌دهد.

۴-۲- سد با مقطع متغییر و با در نظر گرفتن اثرات امواج

سطحی و جذب کف مخزن و مولفه قائم زلزله

در این مثال مشخصات سد و مخزن مشابه مثال قبل است

شتاب خطی با مقدار $\psi=1$ ، شکل (۳) و مولفه شمالی- جنوبی زلزله ال‌سنترو ۱۹۴۹ شکل (۴) قرار دارد که در امتداد پایین دست و بالادست سد اعمال می‌شود.

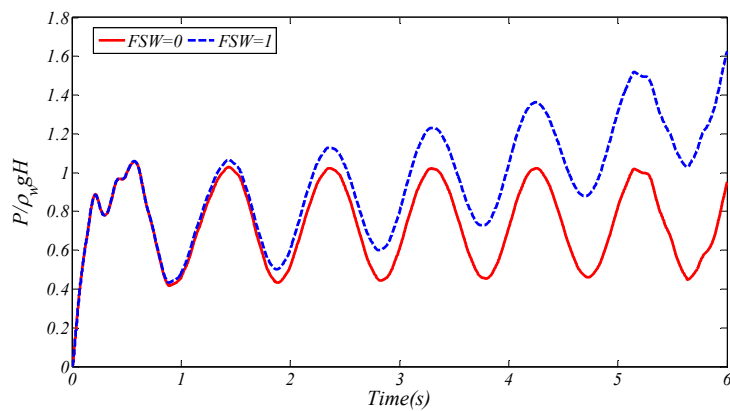
۴-۱- سد با مقطع متغییر

در این مثال سدی که توسط روش نیمه تحلیلی در مرجع [۱۴] آورده شده است را در نظر می‌گیریم. ارتفاع سد برابر ۱۸۰ متر و سطح مقطع و ممان اینرسی سد نیز به صورت زیر تعیین می‌شود.

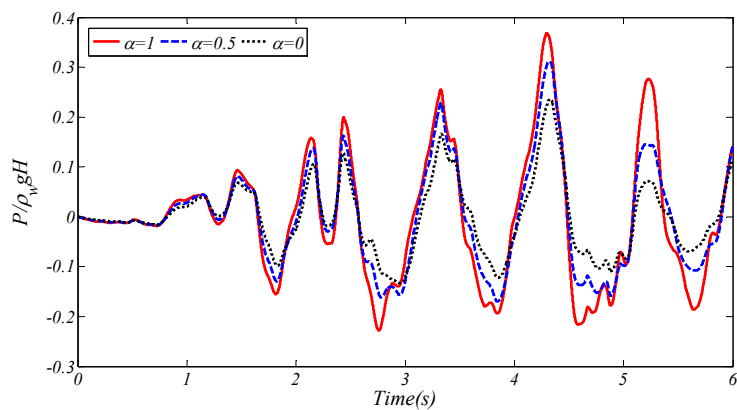
$$I(z) = \frac{1}{12} \left(25 - \frac{z}{9} \right)^3 \frac{m^4}{m}$$

$$A(z) = \left(25 - \frac{z}{9} \right) \frac{m^2}{m}$$

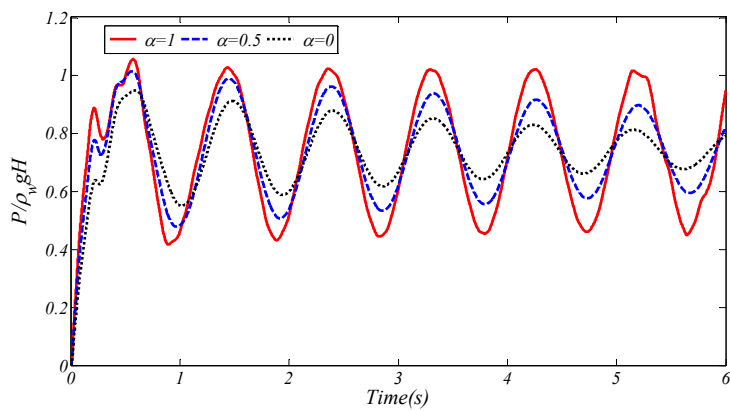
برای تحلیل پایداری معادلات گسسته سازی شده در تفاضل محدود روش‌های مختلفی از جمله ون-نیومن و یا تحلیل اغتشاشات گسسته وجود دارد. ولی به علت پیچیده بودن معادلات حاکم بر سیستم و داشتن شرایط مرزی فراوان استفاده از این روش‌ها چندان مناسب نیست و بهتر است به روش سعی و خطا تعیین شود. چهار فاکتور اصلی در گسسته سازی شامل شبکه‌بندی سیستم، موقعیت مرز قطع شده مخزن نسبت به سد، نوع شرط مرزی و گام‌های زمانی است. برای تعیین پاسخ سیستم با دقت مناسب آزمایش‌های همگرایی برای چهار



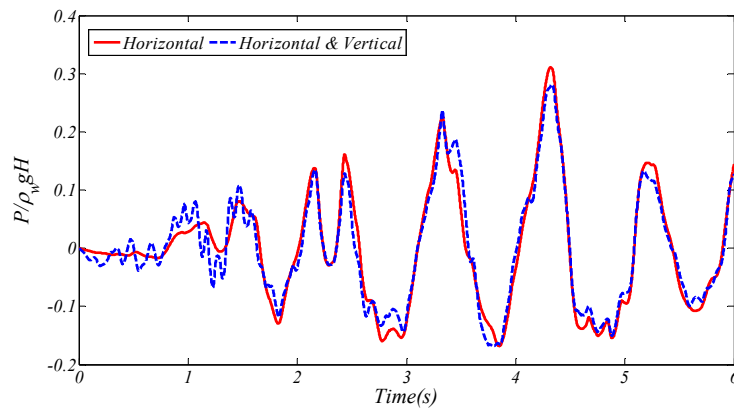
شکل ۱۱- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف FSW تحت شتاب رمپ



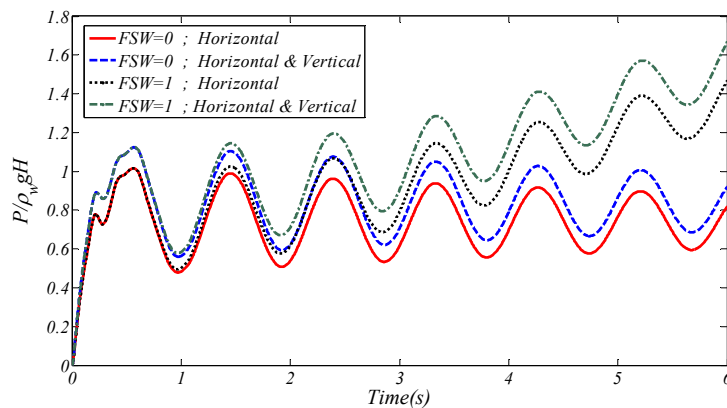
شکل ۱۲- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف ضریب انعکاس امواج تحت زلزله افقی زلزله السترئو



شکل ۱۳- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف ضریب انعکاس امواج تحت شتاب خطی



شکل ۱۴- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف ضریب انعکاس امواج تحت شتاب خطی

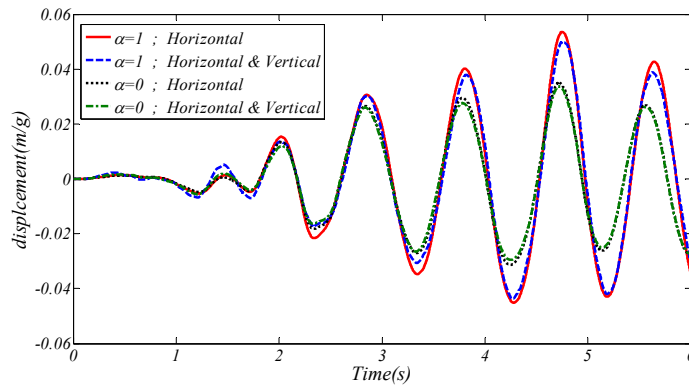


شکل ۱۵- فشار هیدرودینامیکی در پاشنه‌ی سد برای مقادیر مختلف ضریب انعکاس امواج تحت شتاب خطی

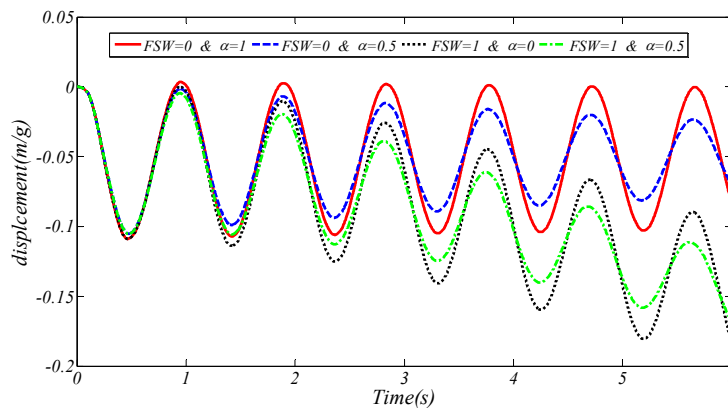
سیستم در معرض شتاب خطی قرار دارد، مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند.

مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد برای مقادیر مختلف ضریب انعکاس امواج (α) در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. برای ضریب انعکاس امواج (α), از آنجا که مقادیر α تا ۱ گستره وسیعی از مواد ته مخزن را شامل می‌شود، نتایج برای سه مقدار ($\alpha=1$) و ($\alpha=0.5$) و ($\alpha=0$) در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود که اثر انعکاس کف تاثیر به سزایی در مقدار فشار

ولی اثرات جذب کف مخزن، امواج سطح آزاد و مولفه قائم شتاب زمین نیز در نظر گرفته می‌شود. در این مثال مقادیر Δt , Δx , Δz و L برابر مقادیر انتخاب شده در مرحله قبل در نظر گرفته می‌شوند. اثر امواج سطحی بر فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل‌ها $FSW=0$ نشان از صرف نظر کردن از اثر امواج سطحی و $FSW=1$ نشان از در نظر گرفتن اثر امواج سطحی است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، اثر امواج سطحی بر پاشنه سد در حالتی که سیستم در معرض زلزله الاسترو قرار دارد قابل صرف نظر کردن است ولی وقتی که



شکل ۱۶- مقادیر جابه‌جایی تاج سد بر حسب زمان تحت زلزله الاسترو



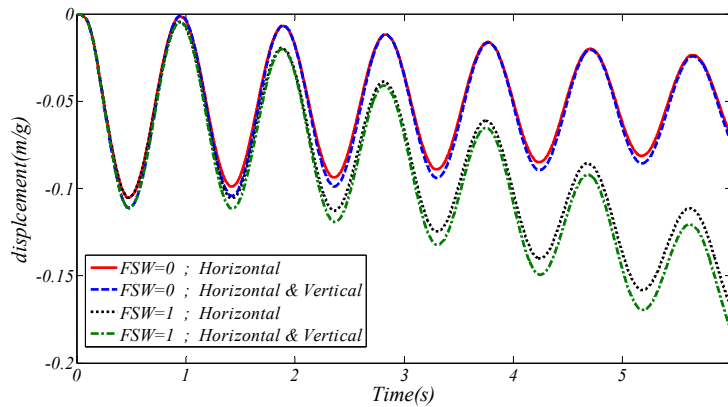
شکل ۱۷- مقادیر جابه‌جایی تاج سد بر حسب زمان تحت شتاب افقی خطی

هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد تحت شتاب خطی افقی ($\psi=1$) و وشتاب خطی قائم ($\psi=0.1$) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد پاشنه سد وقتی سیستم تحت شتاب خطی قرار دارد افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

مقادیر جابه‌جایی تاج سد برای عوامل مختلف اثر امواج سطحی و امواج سطحی مخزن و مولفه‌های افقی و قائم زلزله در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش‌های قبل نشان داده شد وقتی سیستم سد و مخزن تحت زلزله الاسترو قرار دارد، اثر مولفه قائم زلزله بر روی فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد کم است ولی اثر جذب انرژی

هیدرودینامیکی به وجود آمده در پاشنه سد و در نتیجه بر جابه‌جایی تاج سد در اثر مولفه افقی حرکت زمین دارد به طوری که با کاهش ضریب امواج انعکاس از ۱ به ۰ مقدار ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد در حالتی که سیستم در معرض شتاب افقی زلزله الاسترو کاهش محسوسی را از خود نشان می‌دهد.

تأثیر مولفه قائم شتاب حرکت زمین بر فشار هیدرودینامیکی در پاشنه سد و جابه‌جایی در تاج سد با فرض در نظر گرفتن ضریب انعکاس امواج برابر ۰/۵ و اثر امواج سطحی در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است وقتی سیستم تحت زلزله الاسترو قرار دارد تأثیر مولفه قائم زلزله قابل ملاحظه نیست. مقدار فشار



شکل ۱۸- مقادیر جابه‌جایی تاج سد بر حسب زمان تحت شتاب خطی و $\alpha = 0.5$

دوبعدی مدل شد. برای گسسته سازی معادلات از روش نیمه ضمنی برای معادله حاکم بر سد و از روش صریح برای معادله حاکم بر سیال استفاده شد. برای مرز دور دست مخزن در مدل سازی از شرایط مرزی سامرفیلد استفاده شد. تاثیرات هم‌زمان مواد کف مخزن در جذب انرژی و امواج سطحی مخزن و مولفه قائم زلزله در تحلیل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که وقتی سیستم سد و مخزن تحت زلزله الاسترو قرار دارد، اثر جذب انرژی توسط مخزن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ سیستم قرار دارد. در حالی که اثر مولفه قائم زلزله و اثر امواج سطحی مخزن تاثیر چندانی بر پاسخ سیستم ندارد. علاوه بر این وقتی سیستم تحت شتاب خطی قرار دارد اثر امواج سطحی مخزن بسیار قابل ملاحظه بوده و این در حالی است که اثر جذب انرژی توسط کف مخزن تاثیر چندانی بر پاسخ سیستم ندارد.

توسط کف مخزن قابل ملاحظه است که تاثیرات مورد نظر بر روی جابه‌جایی تاج سد در شکل (۱۶) نشان داده شده است. از طرفی وقتی سیستم در معرض شتاب خطی قرار دارد اثر امواج سطحی مخزن و شتاب قائم زلزله تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر فشار هیدرودینامیکی وارد بر وجه سد دارد که اثرات مذکور در جابه‌جایی تاج سد در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تحلیل دینامیکی اندرکنش سد و مخزن در دامنه زمان توسط روش تفاضل محدود ارائه شد. سد بتنی وزنی به صورت یک تیر طره و سیستم سد و مخزن به صورت

مراجع

1. Westergaard, H. M., "Water Pressure on Dams During Earthquakes," *Transactions (ASCE)*, Vol. 98, pp. 418-472, 1933.
2. Zangar, C.N., and Haeferi R.J., "Electric Analog Indicates Effects of Horizontal Earthquake Shock on Dams," *Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 54-55, 1952.
3. Zienkiewicz, O.C., and Nath, B., "Earthquake Hydrodynamic Pressures on Arch Dams an Electric Analogue Solution," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 25, pp. 165-176, 1963.
4. Zienkiewicz, O.C and Newton, R.E, "Coupled Vibrations of a Structure Submerged in a Compressible Fluid," *International Symposium on Finite Element Techniques, Stuttgart, Germany*, pp. 359-379, 1969.
5. Chopra, A.T, "Hydrodynamic Pressures on Dams during Earthquakes," *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 93, pp. 205-223, 1967.

6. Saini, S., Bettess P., Zienkiewicz O.C., "Coupled Hydrodynamic Response of Concrete Dams Using Finite and Infinite Elements," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, pp. 363-374, 1978.
7. Chopra, A.K., and Chakrabarti P., "Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Fluid-Foundationrock Interaction," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp. 363-383, 1981.
8. Hall, J.F., and Chopra A.K., "Two Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 305-332, 1982.
9. Fenves, G., and Chopra A.K., "Effects of Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction on Frequency Response Functions for Concrete Gravity Dams," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, pp. 13-31, 1985.
10. Lotfi, V., Roesset J. M. and Tassoulas J. L., "A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, pp. 463-490, 1987.
11. Sharan, S.K., "Time Domain Analysis of Infinite Fluid Vibration," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, pp. 945-958, 1987.
12. Tsai, C.S., Lee G.C., and Ketter R.L., "A Semi-Analytical Method for Time Domain Analyses for Dam Reservoir Interactions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 913-933, 1990.
13. Maity, D., Bhattacharyya S.K., "Time Domain Analysis of Infinite Reservoir by Finite Element Method Using a Novel far-Boundary Condition," *International Journal of Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 32, pp. 85-96, 1999.
۱۴. عطارنژاد، ر، فرساد، ع.ر، « حل بسته اندرکنش سد و مخزن در حوزه زمان با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت سد»، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۳، ص ۳۲۹-۳۴۰، ۱۳۸۴
۱۵. کریمی، ک، عطارنژاد، ر، اندرکنش سد و مخزن در دامنه زمان به وسیله روش انتگرال حلقوی منفرد مجز (DSC)، نشریه دانشکده فنی، شماره ۴۲، ص ۴۹۷-۵۰۸، ۱۳۸۷.
16. Nath, B., "Coupled Hydrodynamic Response of a Gravity Dam," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 48, pp. 245-257, 1971.
17. Hung, T.K., and Chen B.F., "Nonlinear Hydrodynamic Pressure on Dams," *Journal of Engineering mechanics(ASCE)* Vol. 116, pp. 1372-1391, 1990.
18. Chen, B.F., "Nonlinear Hydrodynamic Pressure on Dam Faces with Arbitrary Reservoir Shapes," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, pp. 404,413, 1994.
19. Sharan, S., "Modelling of Radiation Damping in Fluids by Finite Elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 23, pp. 945-957, 1986.
20. Hanna, Y.G., Humar J.L., "Boundary Element Analysis of Fluid Domain," *Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE)*, Vol. 108, pp. 436-450, 1982.
21. Humar, J.L., and Roufaiel M., "Finite Element Analysis of Reservoir Vibration," *Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE)*, Vol. 109, pp. 215-230, 1983.
22. Cheng, A., "Effect of Sediment on Earthquake Induced Reservoir Hydrodynamic Response," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 112, pp. 654-664, 1986.
23. Bougacha, S., Tassoulas, J.L., "Seismic Analysis of Gravity Dams. I: Modelling of Sediments," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, 1991, pp. 1826-1837.
24. Hatami, K., "Effect of Reservoir Bottom on Earthquake Response of Concrete Dams," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 16, pp. 407-415, 1997.
25. Fenves, G., and Chopra AK., "Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Bottom Absorption Dam-Water-Foundation Rock Interaction," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, pp. 663-683, 1997.