

حل بسته اندرکنش سد و مخزن با احتساب لزجت و اثر جذب کف مخزن*

(یادداشت پژوهشی)

مریم یاسمی^(۱) بهرام نوائی نیا^(۲) جواد واتقی امیری^(۳) مهدی علیجانی اردشیر^(۴)

چکیده در این تحقیق حل بسته اندرکنش سد و مخزن با احتساب اثر ویسکوزیته سیال مخزن و جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن تحت بارهای هارمونیک ارائه می‌گردد. بدین منظور معادلات حاکم بر محیط مخزن و سد در محدوده فرکانس حل و با تغییر پارامترهای مختلف، پاسخ فشار هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن لزجت سیال باعث پیچیده‌تر شدن روابط می‌شود؛ پاسخ‌ها به مقدار لزجت، میزان ضریب جذب کف مخزن، پریود تحریک و نیز پریود طبیعی سیستم سد-مخزن وابسته است؛ با افزایش مدول الاستیسیته سد، تغییر مکان تاج سد و فشار هیدرودینامیک مخزن کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی حل بسته، ویسکوزیته سیال، سدهای بتنی وزنی، فشار هیدرودینامیک، اندرکنش سد و مخزن.

A Closed Form Solution of Dam Reservoir Interaction Considering Water Viscosity and Reservoir Bottom Absorption Effect

M. Yasami

B. Navayi Neya

J. Vaseghi Amiri

M. Alijani Ardeshir

Abstract This paper concentrates on the presentation of a closed form solution of dam-reservoir interaction considering reservoir viscosity and bottom absorption under harmonic excitations. For this purpose, the governing equations of dam-reservoir are solved in the frequency domain and using the obtained frequency response function, the effects of different parameters are considered on dam or hydrodynamic pressure response. The results show that consideration of reservoir viscosity creates an imaginary term and the responses depend on values of viscosity, bottom absorption, excited period and dam-reservoir period.

Key words Closed form Solution, Fluid Viscosity, Concrete Gravity Dam, Hydrodynamic Pressure, Dam Reservoir Interaction.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۲۸ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۴) فارغ التحصیل دکترای سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

مقدمه

طی چند دهه گذشته، سدهای بتنی زیادی در مناطق زلزله خیز ساخته شده است و انتظار می رود که تعداد زیادتری نیز در آینده ساخته شوند. این سدها دیر یا زود علاوه بر بارهای بهره برداری در معرض زمین لرزه های شدید نیز قرار خواهند گرفت؛ لذا ارزیابی لرزه ای و تأمین مقاومت لازم در برابر نیروهای زلزله برای چنین سازه هایی اجتناب ناپذیر می نماید.

در ارزیابی لرزه ای سدهای بتنی، فشار هیدرو دینامیک ناشی از وجود سیال مرتعش در مخزن سدها از اهمیت ویژه ای برخوردار است و مقادیر آن بر وجه بالادست سدها عمدتاً تابعی از عوامل مختلف نظیر شتاب زمین، شتاب بدنه سد، ارتفاع و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی سد و مخزن می باشد، که به این ترتیب دستگاه معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سد و مخزن مستقل از یکدیگر نیست و اصطلاحاً کوپله می باشند.

در حل معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم سد-مخزن پارامترهای زیادی تأثیرگذار می باشند که محققان با استفاده از روش های مختلف تحلیلی یا عددی به بررسی تعدادی از این پارامترها پرداختند. در این میان و برای نخستین بار حل معادله موج دو بعدی حاکم بر محیط مخزن در سدهای بتنی وزنی به منظور تعیین فشار هیدرو دینامیک مؤثر بر وجه بالادست سد تحت اثر شتاب تحریک هارمونیک افقی توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ ارائه گردید [1]. سپس کوتسوبو نشان داد پاسخ وسترگارد تنها هنگامی که پریود تحریک، بزرگ تر از پریود طبیعی مخزن باشد، معتبر است [2]. زنگار فشار هیدرو دینامیک را برای شکل های مختلف وجه بالادست سازه با فرض تراکم ناپذیری آب به روش شبیه سازی الکتریکی به دست آورد [3]. بوستامانته و همکاران اثر طول مخزن را برای بازه پریود تحریک عریض تر از بازه های قبلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای پریودهای تحریک بزرگ تر از پریود طبیعی مخزن، اثر طول مخزن ناچیز است ولی برای پریودهای

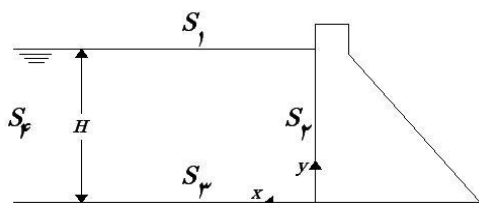
کوتاه تر، طول مدل شده مخزن نقش مهمی در حرکت هارمونیک بازی می کند. وی همچنین اثر امواج سطحی را برای تحریک هارمونیک بررسی نمود و خطای نادیده گرفتن امواج سطحی را به دست آورد [4]. چوپرا در سال ۱۹۶۷ فشار هیدرو دینامیک وارد بر سدهای با وجه بالادست قائم و صلب را برای شتاب تحریک افقی و قائم در محدوده فرکانس تعیین کرد و ضمن برطرف نمودن محدودیت پاسخ وسترگارد نشان داد که تأثیر امواج سطحی ناچیز ولی تراکم پذیری سیال مهم می باشد [5]. وی همچنین در ۱۹۷۰ پاسخ سد تحت اثر شتاب زلزله افقی زمین با مقدار دل خواه را با در نظر گرفتن اثر تراکم پذیری سیال و انعطاف پذیری سد ارائه نمود [6].

چاکر ابارتی و چوپرا فشار هیدرو دینامیک را در مخزن سد در اثر مؤلفه شتاب قائم زلزله به روش تحلیلی به دست آوردند و نشان دادند که این فشار به طور قابل ملاحظه ای به ضریب ارتجاعی مصالح سد وابسته است [7]. چاونگ پاسخ های تحلیلی برای سد صلب با وجه بالادست و کف مخزن شیب دار را برای مخزن با طول محدود و با نادیده گرفتن اثر تراکم پذیری سیال به دست آورد [8].

برخی محققان نیز به حل مسئله اندرکنش سد و مخزن در حوزه زمان پرداختند. تسای و همکاران با استفاده از ترکیب دو روش اجزای محدود و روش تحلیلی، پاسخ نیمه تحلیلی سیستم سد-مخزن را در حوزه زمان یافتند [9-11]. عطارنژاد و فرساد پاسخ دقیق سیستم سد-مخزن را در حوزه زمانی برای سد با ضخامت متغیر مورد بررسی قرار دادند و با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال، پاسخ ها را برای سد با مخزن خالی و پر برای چند زلزله ارائه نمودند [12].

اولین بررسی ها در مورد جذب امواج فشاری در اثر رسوبات کف مخزن توسط فنوس و چوپرا صورت گرفت و نشان داده شد که رسوبات موجود در کف مخزن نقش مهمی در بر آورد درست فشار هیدرو دینامیکی مؤثر بر سد ایفا می کند [13]. بوانانی و همکاران پاسخ نیمه تحلیلی را با در نظر گرفتن اثر جذب

شرایط مرزی محیط سیال. چهار شرط مرزی محیط مخزن را که در شکل (۱) با مرزهای S_1 و S_2 و S_3 و S_4 نشان داده شده‌اند با این فرض که مؤلفه افقی حرکت زمین عمود بر محور سد باشد و مخزن سد در امتداد بالادست تا بی‌نهایت ادامه یابد، به صورت زیر می‌توان بیان نمود.



شکل ۱ سیستم سد - مخزن و شرایط مرزی

شرط مرزی در سطح آزاد مخزن (S_1). به هنگام وقوع زلزله و به دلیل ارتعاشات سازه و مخزن، در سطح مخزن امواجی به وجود می‌آید که سطح مخزن را متلاطم می‌سازند. بنابراین در حالت کلی به دلیل وجود امواج سطحی ناشی از زلزله، فشار هیدرودینامیک در سطح آزاد مخزن صفر نمی‌باشد و شرط مرزی مربوط به آن را برای مرز (S_1) می‌توان به شکل زیر نشان داد [5].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + g \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

که در آن g شتاب گرانش می‌باشد. مطالعات بوتسامانته نشان می‌دهد که صرف نظر کردن از تأثیر امواج سطحی در مخازن سدها منجر به خطای زیادی در محاسبات نمی‌شود و معمولاً می‌توان با تقریب خوبی فشار در سطح آزاد مخزن را صفر در نظر گرفت [4].

شرط مرزی بین سد و مخزن (S_2). به منظور تأمین شرط عدم جدایی بین سد و مخزن، سیال در تماس دائمی با مرز جامد می‌باشد. بدین منظور بایستی مؤلفه سرعت نرمال در هر نقطه از مرز جامد، برابر با سرعت

کف مخزن در حالت شتاب افقی زلزله ارائه نمودند [14]. زینگالس فشار هیدرودینامیک موثر بر سد را با معادل سازی اثر لزجت سیال به شکل میرایی تعیین نمود [15]. نوایی نیا و علیجانی اردشیر نیز پاسخ فشار هیدرودینامیک مخازن سدهای بتنی را با احتساب لزجت سیال تحت شتاب تحریک افقی و قائم در محدوده فرکانس بدون لحاظ نمودن اثر اندرکنش سد و مخزن با احتساب اثر جذب کف با حل معادله دیفرانسیل حاکم بر مخزن و اعمال شرایط مرزی به طور دقیق به دست آوردند [16].

هدف از این تحقیق ارائه روشی تحلیلی برای تعیین پاسخ تغییر مکان سدهای بتنی وزنی با احتساب لزجت سیال مخزن، اندرکنش سد و مخزن و جذب امواج هیدرودینامیک توسط کف مخزن تحت شتاب تحریک افقی و قائم می‌باشد.

معادلات حاکم

معادله حاکم بر مخزن. معادله حاکم بر محیط مخزن سدهای بتنی با استفاده از روابط ناویر استوکس، رابطه پیوستگی و قانون لزجت استوکس به شکل زیر درمی‌آید [15-19].

$$\nabla^2 P + \frac{4}{3} \frac{\mu}{K} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 P) = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

که در آن P فشار هیدرودینامیک، μ لزجت، K مدول بالک، C سرعت امواج حجمی و t متغیر زمان می‌باشد. در به دست آوردن معادله فوق فرض شده است که سیال همگن، هموزن با رفتار خطی و حرکت آن غیرپیچشی و با دامنه کم است و جملات شتاب انتقالی سیال در روابط ناویر استوکس کوچک می‌باشد [19]. برای سدهای بتنی وزنی معادلات حاکم به حالت دوبعدی قابل تقلیل می‌باشد [13] که در ادامه با توجه به شرایط مرزی، حل معادله فوق به صورت تحلیلی ارائه می‌گردد.

وجود این رسوبات کف مخزن کاملاً صلب نمی‌باشد که این موضوع نیز خود باعث تغییر در فرکانس طبیعی مخزن می‌گردد. در این حالت شرط مرزی در کف مخزن به صورت $\frac{\partial P}{\partial y}(x,0,t) = q \frac{\partial P}{\partial t}(x,0,t)$ بیان می‌گردد که در آن $q = \frac{1}{CB}$ می‌باشد. β ضریبی است که به سرعت موج، میزان و نیز جنس رسوب کف مخزن بستگی دارد و مقدار آن می‌تواند بین ۱ (برای حالت جذب کامل امواج) تا بی‌نهایت (برای حالت انعکاس کامل امواج) تغییر نماید [13].

شرط مرزی در بالادست مخزن (S_2). با دور شدن از سد به سمت بالادست مخزن، فشار هیدرودینامیک به تدریج مستهلک می‌شود و در بی‌نهایت به سمت صفر میل می‌کند لذا فشار در بالادست مخزن برابر صفر فرض می‌گردد.

معادله حاکم بر سد

روش آنالیز مودال در دینامیک سازه‌های چند درجه آزادی، روشی سودمند برای محاسبه تغییر مکان سد با در نظر گرفتن چند مود ارتعاش می‌باشد. بر اساس مبانی آنالیز مودال برای سازه‌های چند درجه آزادی برای تحریکی در راستای x یا y ، تغییر مکان به صورت زیر می‌باشد [19]:

$$r_k^l(x, y, t) = \sum_{j=1}^m \phi_j^l(x, y) Y_j^l(t), \quad k = x, y; \quad l = x, y \quad (5)$$

که در آن $r_x^l(x, y, t)$ و $r_y^l(x, y, t)$ به ترتیب تغییر مکان افقی و قائم مود j ام ارتعاش سد نسبت به پایه سد، m تعداد مدهای مورد نظر، $\phi_j^x(x, y)$ و $\phi_j^y(x, y)$ به ترتیب مقادیر تغییر مکان افقی و قائم برای مود j ام ارتعاش سد بر بستر صلب با مخزن خالی و $Y_j^l(t)$ مختصات مودی مرتبط با این مدهای ارتعاشی می‌باشند.

با استفاده از روش آنالیز مودال، معادله دینامیکی حاکم بر حرکت سد تحت شتاب زمین برای مود j ام ارتعاشی به صورت معادله زیر حاصل می‌گردد [20].

نرمال در مرز سیال باشد. با فرض سرعت کم سیال و در نتیجه ناچیز بودن تنش برشی در تماس با جسم سد در مرز مشترک شرط مرزی در فصل مشترک سد صلب و مخزن $\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho a_n$ می‌باشد که در آن a_n شتاب وارد در یک نقطه دلخواه از مرز و n بردار عمود بر نقطه مورد نظر در وجه بالادست سد می‌باشد [18, 19, 20]. از آنجایی که در مطالعه حاضر بردار عمود بر مرز مشترک سد و مخزن در وجه بالادست سد به موازات محور x فرض می‌گردد در نتیجه شرط مرزی (S_2) به شکل زیر درمی‌آید:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho a_g^x(t) \delta_{xl} \quad (3)$$

که در آن δ_{xl} تابع دلتای کرنر و $l = x, y$ می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن، شتاب تحریک وارد بر سیال در این مرز به صورت مجموع مؤلفه افقی شتاب زلزله و شتاب ناشی از ارتعاشات سازه بیان می‌گردد [6, 19, 20]. لذا رابطه (۳) به شکل رابطه (۴) کامل خواهد شد.

$$\frac{\partial P}{\partial x}(0, y, t) = -\rho a_g^x(t) \delta_{xl} - \rho \phi_j^x(0, y) \ddot{Y}_j^l(t) \quad (4)$$

که در آن $\phi_j^x(0, y)$ تغییر مکان مود j ام ارتعاش سد در جهت x و $\ddot{Y}_j^l(t)$ شتاب مود j ام سازه می‌باشد.

شرط مرزی در کف مخزن (S_3). اگر کف مخزن افقی و صلب فرض گردد، در این صورت شرط مرزی وقتی که فقط شتاب افقی اعمال گردد به شکل $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ می‌باشد و به هنگام وارد شدن بار زلزله هیچ گونه تغییر شکلی در کف مخزن ایجاد نمی‌گردد و بار دینامیکی مستقیماً به سد انتقال می‌یابد [5, 12, 16]. اگر شتاب زلزله دارای مؤلفه قائم باشد شرط مرزی در کف مخزن به شکل $\frac{\partial P}{\partial y} = -\rho a_y$ به دست می‌آید که در آن a_y مؤلفه قائم شتاب زلزله می‌باشد [5, 16, 18, 19].

در اثر وجود رسوبات رودخانه‌ای در کف مخزن مقداری از انرژی زلزله جذب می‌گردد و در واقع به دلیل

معادله حاکم بر محیط مخزن نیز به فرم تابع پاسخ فرکانس مختلط با جای گذاری (۱۰) در (۱) به صورت رابطه زیر قابل بیان می باشد [18].

$$\nabla^2 \bar{p} + s^2 \bar{p} = 0 \quad (12)$$

که در آن s به صورت رابطه (۱۳) قابل تعریف می باشد.

$$s^2 = \frac{\omega^2 / C^2}{1 + \frac{4\mu}{3K} i\omega} \quad (13)$$

به علت خطی بودن معادلات حاکم و شرایط مرزی مسئله، با استفاده از اصل جمع آثار قوا پاسخ فشار هیدرودینامیک سیستم سد-مخزن تحت شتاب هارمونیک زمین برای ارتعاش سد در مودهای مختلف، به صورت زیر بیان می گردد.

$$\bar{p}^1(x, y, \omega) = \bar{p}_0^1(x, y, \omega) + \sum_{j=1}^m \bar{p}_j(x, y, \omega) \bar{Y}_j^1(\omega) \quad (14)$$

که عبارت اول معرف فشار هیدرودینامیک برای حرکت صلب سد و جملات بعدی فشار هیدرودینامیک ناشی از مودهای ارتعاشی سد انعطاف پذیر می باشد. معادلات (۱۱) و (۱۲) معادلات حاکم بر محیط سازه و مخزن تحت تحریک هارمونیک می باشند و به کمک شرایط مرزی باید حل گردند. براین اساس، شرایط مرزی مسئله برای تابع پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک به شکل زیر تبدیل می شود.

الف) وقتی تحریک، افقی و سد صلب باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{P}_0^x}{\partial x}(0, y, \omega) = -\rho \\ \frac{\partial \bar{P}_0^x}{\partial y}(x, 0, \omega) = i\omega q \bar{P}_0^x(x, 0, \omega) \\ \bar{P}_0^x(x, H, \omega) = 0 \\ \bar{P}_0^x(\infty, y, \omega) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

ب) وقتی تحریک، قائم و سد صلب باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{P}_0^y}{\partial x}(0, y, \omega) = 0 \\ \frac{\partial \bar{P}_0^y}{\partial y}(x, 0, \omega) = -\rho + i\omega q \bar{P}_0^y(x, 0, \omega) \\ \bar{P}_0^y(x, H, \omega) = 0 \\ \bar{P}_0^y(\infty, y, \omega) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$M_j [\ddot{Y}_j^1(t) + 2\xi_j \omega_j \dot{Y}_j^1(t) + \omega_j^2 Y_j^1(t)] = -L_j^1 a_j^1(t) + \int_0^H p^1(0, y, t) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (6)$$

که در آن زبک نسبت میرایی بحرانی مود زام سد، ω_j فرکانس طبیعی ارتعاش مود زام سد خالی روی پی صلب، $p^1(0, y, t)$ فشار هیدرودینامیک مؤثر بر وجه بالادست سد و H نیز ارتفاع سد می باشد. M_j جرم تعمیم یافته مود زام ارتعاش سد است و به صورت زیر می باشد [17].

$$M_j = \iint_A m(x, y) \{ [\varphi_j^x(x, y)]^2 + [\varphi_j^y(x, y)]^2 \} dx dy \quad (7)$$

در این رابطه $m(x, y)$ چگالی جرم می باشد و انتگرال نیز بر روی سطح مقطع عرضی سد تعریف می شود. L_j^1 نیز به صورت زیر تعریف می گردد [17].

$$L_j^1 = \iint_A m(x, y) \varphi_j^1(x, y) dx dy \quad (8)$$

پاسخ به تحریک هارمونیک زمین

پاسخ سیستم سد-مخزن به شتاب هارمونیک زمین $(e^{i\omega t})$ به صورت تابع پاسخ فرکانس مختلط قابل بیان می باشد که در آن ω فرکانس تحریک می باشد [17]. براین اساس مختصات مودی و فشار هیدرودینامیک مخزن به صورت زیر می باشد.

$$Y_j^1(t) = \bar{Y}_j^1(\omega) e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$p^1(x, y, t) = \bar{p}^1(x, y, \omega) e^{i\omega t} \quad (10)$$

با جای گذاری رابطه (۹) در (۶)، معادله حاکم بر حرکت سد برای مود زام ارتعاشی را می توان بر حسب توابع پاسخ فرکانس مختلط بازنویسی نمود [19].

$$M_j [-\omega^2 + i(2\xi_j \omega_j \omega) + \omega_j^2] \bar{Y}_j^1(\omega) = -L_j^1 + \int_0^H \bar{p}^1(0, y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (11)$$

$$\bar{p}(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} G_n(\omega) e^{k_n x} [e^{i\lambda_n y} + \frac{\lambda_n - \omega q}{\lambda_n + \omega q} e^{-i\lambda_n y}] \quad (19)$$

که برای n حالت مختلف از λ می توان به n جواب ممکن دست یافت [19]. G_n ضریبی است که با اعمال شرط مرزی بین سد و مخزن، تعیین می شود و به کمک آن پاسخ فشار هیدرودینامیک در محدوده فرکانس وقتی تحریک افقی و سد صلب است به شکل زیر به دست می آید.

$$\bar{p}_0^x(x, y, \omega) = -2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{[(\lambda_n^2 - (\omega q)^2)H + i\omega q]} \frac{I_{0n}}{\sqrt{\lambda_n^2 - s^2}} \gamma_n(y, \omega) e^{k_n x} \quad (20)$$

که در آن I_{0n} و تابع متعامد $\gamma_n(y, \omega)$ به صورت زیر به دست می آیند.

$$\gamma_n(y, \omega) = \frac{1}{2\lambda_n} [(\lambda_n + \omega q)e^{i\lambda_n y} + (\lambda_n - \omega q)e^{-i\lambda_n y}] \quad (21)$$

$$I_{0n}(\omega) = \frac{1}{H} \int_0^H \gamma_n(y, \omega) dy \quad (22)$$

و به طور مشابه پاسخ فشار هیدرودینامیک در محدوده فرکانس وقتی تحریک افقی ناشی از ارتعاش سد در مود ارتعاشی خود به صورت زیر می باشد.

$$\bar{p}_j^x(x, y, \omega) = -2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{[(\lambda_n^2 - (\omega q)^2)H + i\omega q]} \frac{I_{jn}}{\sqrt{\lambda_n^2 - s^2}} \gamma_n(y, \omega) e^{k_n x} \quad (23)$$

که در آن I_{jn} به صورت زیر می باشد.

$$I_{jn}(\omega) = \frac{1}{H} \int_0^H \gamma_n(y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (24)$$

رابطه (23) پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن در محدوده فرکانس تحت شتاب افقی زمین و با در نظر گرفتن اثر جذب کف می باشد. برای بررسی صحت محاسبات، با فرض صلب بودن کف مخزن و ناچیز بودن لزجت سیال و برای مود اول ارتعاشی سد، پاسخ

(پ) وقتی تحریک، شتاب افقی ناشی از ارتعاش سد در مود ارتعاشی خود باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{p}_j}{\partial x}(0, y, \omega) = -\rho \varphi_j^x(0, y) \\ \frac{\partial \bar{p}_j}{\partial y}(x, 0, \omega) = i\omega q \bar{p}_j(x, 0, \omega) \\ \bar{p}_j(x, H, \omega) = 0 \\ \bar{p}_j^x(\infty, y, \omega) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

به منظور حل معادله حاکم بر سیستم سد-مخزن با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن در حوزه فرکانس با توجه به این واقعیت که پاسخ سازه های پیوند کوتاه نظیر سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله اصولاً به شکل مود اول ارتعاشی آنها می باشد [13]، بدین جهت برای منظور نمودن اثر اندرکنش، با کمی تقریب می توان فرض نمود که دیواره سد انعطاف پذیر تحت شتاب تحریک به شکل مود اصلی خود که برای سدهای بتنی وزنی مود اول می باشد ارتعاش می کند. برای این منظور کافی است در روابط ارائه شده به ازای $z=0$ مقدار ۱ قرار داده شود. بدیهی است چنانچه $z=0$ در نظر گرفته شود فقط حرکت صلب سد مدنظر قرار می گیرد.

حل معادلات حاکم

پاسخ به تحریک افقی. معادله دیفرانسیل حاکم بر مخزن در محدوده فرکانس، معادله (۱۲)، به همراه یکی از شرایط مرزی (۱۵) الی (۱۷) یک مسئله اشتورم لیویل را تشکیل می دهند. پاسخ معادله دیفرانسیل (۱۲) با استفاده از روش جداسازی متغیرها و اعمال شرط مرزی انتشار در بالادست مخزن، سطح آزاد و نیز کف مخزن مقدار ویژه λ_n و $\bar{p}(x, y, t)$ به شکل معادلات (۱۸) و (۱۹) به دست می آیند.

$$e^{2i\lambda_n H} = -\frac{\lambda_n - \omega q}{\lambda_n + \omega q} \quad (18)$$

برای بررسی صحت محاسبات با ناچیز فرض کردن لزجت سیال و به دلیل اینکه ω همیشه بزرگتر از صفر می باشد می توان $|s|$ را به $\frac{\omega}{C}$ تبدیل کرد، در نتیجه،

$$\bar{p}_0^y(0, y, \omega) = \frac{-\rho C \sin \frac{\omega}{C}(H-y)}{\omega i \omega C \sin \frac{\omega}{C} H + \frac{\omega}{C} \cos \frac{\omega}{C} H} \quad (30)$$

که با پاسخ چوپرا [13,18] مطابقت کامل دارد. با به دست آوردن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جای گذاری در معادله حرکت سد، پاسخ سد در محدوده فرکانس به دست می آید.

$$M_j[-\omega^2 + i(2\xi_j \omega_j \omega) + \omega_j^2] \bar{Y}_j^y(\omega) = -L_j^y + \int_0^H [\bar{p}_0^y(0, y, \omega) + \bar{p}_j(0, y, \omega) \bar{Y}_j^y(\omega)] \varphi_j^x(0, y) dy \quad (31)$$

$$\bar{Y}_j^y(\omega) = -[L_j^y + B_0^y(\omega)] / -\omega^2 \{M_j + \text{Re}[B_1(\omega)]\} + i\omega \{i2\xi_j \omega_j \omega - \omega \text{Im}[B_1(\omega)]\} + \omega_j^2 M_j \quad (32)$$

$$B_0^y(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_0^y(0, y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (33)$$

$$B_1(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_j(0, y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (34)$$

رابطه (۳۲) پاسخ سد در محدوده فرکانس تحت شتاب قائم زمین و بالحاظ اثر جذب کف می باشد. برای بررسی صحت محاسبات چنانچه لزجت سیال ناچیز فرض گردد، پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال منطبق بر پاسخ چوپرا می گردد و در نتیجه پاسخ دینامیکی سد نیز در مود ارتعاشی اول سد بر پاسخ چوپرا [13, 21] انطباق کامل دارد که نشان دهنده صحت محاسبات فوق است.

نتایج

کف مخزن صلب. به منظور ارائه نتایج عددی، یک سد به شکل مثلث قائم الزاویه به ارتفاع ۵۰ متر که برابر ارتفاع

به دست آمده کاملاً بر پاسخ چوپرا [6,18] منطبق است. اکنون با مشخص شدن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جای گذاری در معادله حرکت سد، پاسخ سد در محدوده فرکانس به دست می آید.

$$M_j[-\omega^2 + i(2\xi_j \omega_j \omega) + \omega_j^2] \bar{Y}_j^x(\omega) = -L_j^x + \int_0^H [\bar{p}_0^x(0, y, \omega) + \bar{p}_j(0, y, \omega) \bar{Y}_j^x(\omega)] \varphi_j^x(0, y) dy \quad (25)$$

$$\bar{Y}_j^x(\omega) = -[L_j^x + B_0^x(\omega)] / -\omega^2 \{M_j + \text{Re}[B_1(\omega)]\} + i\omega \{i2\xi_j \omega_j \omega - \omega \text{Im}[B_1(\omega)]\} + \omega_j^2 M_j \quad (26)$$

که در آن

$$B_0^x(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_0^x(0, y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (27)$$

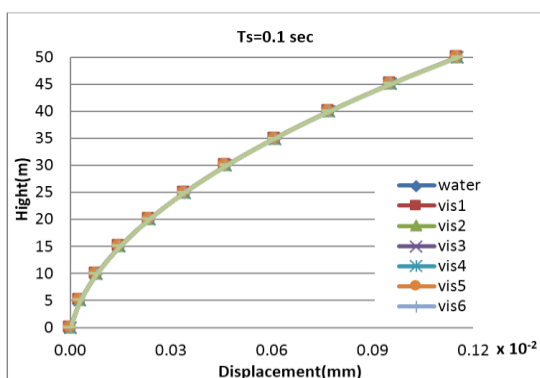
$$B_1(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_j(0, y, \omega) \varphi_j^x(0, y) dy \quad (28)$$

رابطه (۲۶) پاسخ سد در محدوده فرکانس تحت شتاب افقی زمین و بالحاظ اثر جذب کف می باشد. برای بررسی صحت محاسبات با فرض صلب بودن کف مخزن، پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال، بر پاسخ چوپرا منطبق می گردد و در نتیجه پاسخ دینامیکی سد نیز در مود ارتعاشی اول سد بر پاسخ چوپرا [13] انطباق کامل دارد که نشان دهنده صحت محاسبات فوق است.

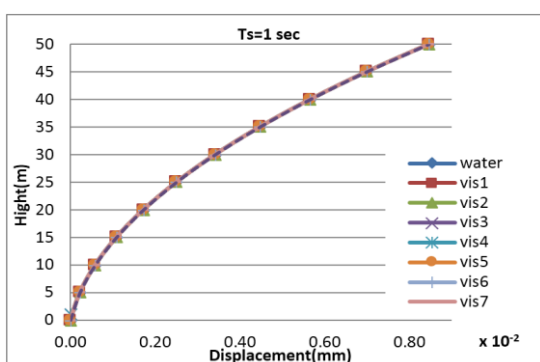
پاسخ به تحریک قائم

برای یافتن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک وقتی تحریک قائم و سد صلب است، نظیر آنچه در قسمت قبل بیان گردید، با استفاده از روش جداسازی متغیرها و با اعمال شرایط مرزی مسئله پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال مخزن در محدوده فرکانس به دست می آید.

$$\bar{p}_0^y(0, y, \omega) = \frac{-\rho \sin |s|(H-y)}{i\omega c \sin |s|H + |s| \cos |s|H} \quad (29)$$



(ب)



(ب)

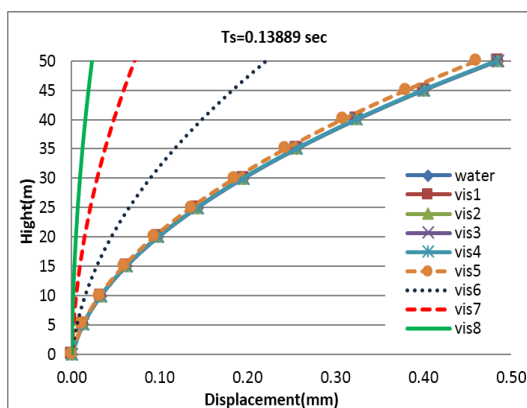
شکل ۲ تغییر مکان وجه بالادست سد به‌ازای سه پریود تحریک مختلف

همان‌طوری که از شکل (۲) پیداست مقادیر مختلف لزجت در پریود تحریک کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن بر پاسخ تغییر مکان سازه تقریباً بی‌تأثیرند، اما در پریود تحریک مساوی با پریود طبیعی مخزن، همان‌طور که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، لزجت بسته به مقدار آن تأثیر قابل‌توجهی روی پاسخ‌ها دارد.

همچنین از آنجا که برای محاسبه پریود تشدید با احتساب اثر اندرکنش روش تحلیلی وجود ندارد، نمودار پاسخ تغییر مکان تاج سدی به ارتفاع ۵۰ متر به‌ازای پریودهای تحریک مختلف برای سیال با دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و لزجتی معادل ۱۰ برابر لزجت آب با در نظر گرفتن اثر اندرکنش در شکل (۳) ارائه

مخزن می‌باشد مدنظر قرار گرفته است. لزجت آب مخزن که با water نشان داده می‌شود برای حرارت ۱۵ درجه سانتی‌گراد، مدول بالک آب، K برابر MPa ۲۰۷۰,۷، مدول الاستیسیته و نیز ضریب پواسون مصالح سد نیز به‌ترتیب برابر MPa ۲۰۰۰۰,۰ و ۰/۲ انتخاب گردیده است. برای حالت بدون اثر جذب کف، حداکثر پاسخ تغییر مکان وجه بالادست سد با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری سد در مود اول ارتعاش آن به‌ازای مقادیر مختلف لزجت سیال مخزن شامل water (لزجت آب ۱۵ درجه سانتی‌گراد) و vis1 تا vis8 به‌ترتیب سیالی با لزجت ۱۰ تا ۱۰^۸ برابر لزجت آب برای سه تحریک متفاوت ω که عبارتند از تحریک با پریود مساوی، کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن در شکل (۲) مقایسه شده‌اند که در آن T_s معرف پریود تحریک می‌باشد.

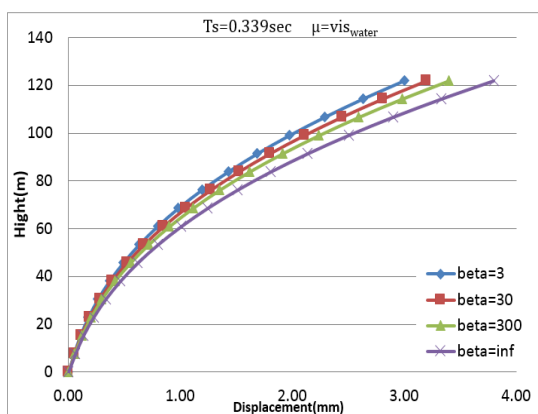
پریود تشدید برای سد صلب و مخزن غیرلزج، T_{Res} وقتی اتفاق می‌افتد که پاسخ فشار هیدرو دینامیک بینهایت گردد که در چنین حالتی برابر با $T_{Res} = \frac{4H}{nC}$ خواهد شد که با جایگذاری مقادیر عددی برای سد با ارتفاع ۵۰ متر و مخزن پر، پریود تشدید مخزن غیرلزج برابر با $T_{Res} = 0.13888$ sec می‌گردد [16, 18]. از طرف دیگر پریود طبیعی مخزن لزج برابر $T_{Res} = -0.000015 \pm 0.138889$ بدست می‌آید که با نتایج مراجع [16, 18] یکی می‌باشد



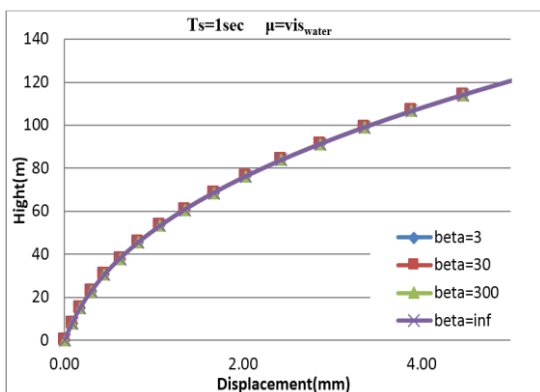
(الف)

گردیده است.

ملاحظه می شود که تشدید در پاسخ های سیستم سد-مخزن با سد انعطاف پذیر در پیودی بسیار نزدیک به پیود تشدید اصلی مخزن با سد صلب را نتیجه می دهد. بنابراین می توان با تقریب نسبتاً خوبی پیود تشدید سیستم سد-مخزن با سد انعطاف پذیر را با پیود تشدید مخزن در حالتی که سد صلب است برابر قرار داد.



(ب)

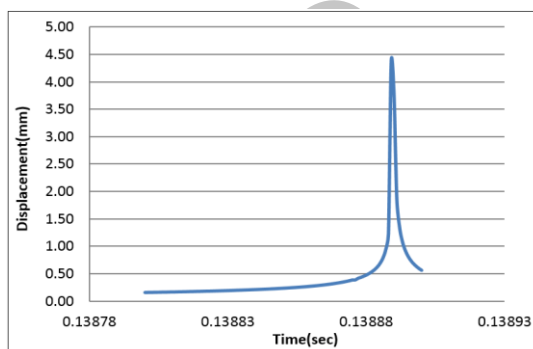


(پ)

شکل ۴- تغییر مکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به ازای مقادیر مختلف T_s و $\mu = \text{vis}_{\text{water}}$

شکل (۴) نشان می دهد در تحریک افقی سیستم سد-مخزن، به ازای مقادیر مختلف β و لزجت سیال برابر لزجت آب، جذب کف در پیود تحریک کمتر و یا بیشتر از پیود تشدید مخزن تأثیری روی پاسخ ها ندارد و فقط به ازای تحریکی برابر با پیود تشدید مخزن مقادیر پاسخ ها تحت تأثیر قرار می گیرند. این تأثیر به گونه ای است که با افزایش β تغییر مکان ها بزرگ تر می شوند.

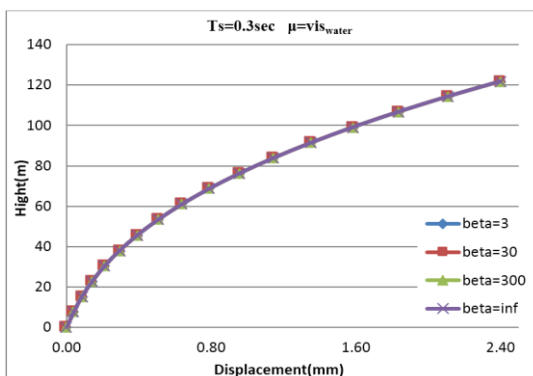
در شکل های (۵) و (۶) مقادیر حداکثر پاسخ های سد تحت شتاب هارمونیک افقی برای مود اول به ازای مقادیر مختلف لزجت سیال، در پیودهای مختلف



شکل ۳- تغییر مکان تاج سد به ازای پیودهای تحریک مختلف

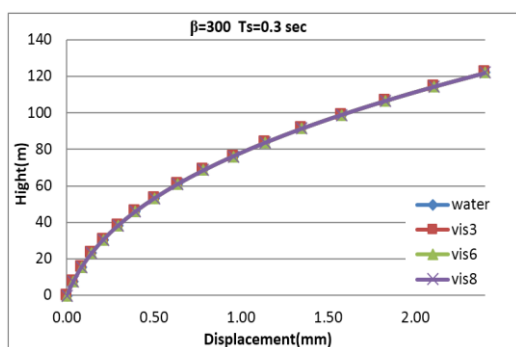
اثر جذب کف

تحریک افقی. در شکل (۴) اثر جذب کف بر حداکثر پاسخ ها در حالت تحریک افقی، برای سیال با لزجت آب و در پیود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پیود طبیعی مخزن نشان داده شده است. در این شکل ها $\mu = \text{vis}_{\text{water}}$ معرف سیال با لزجتی برابر لزجت آب می باشد.

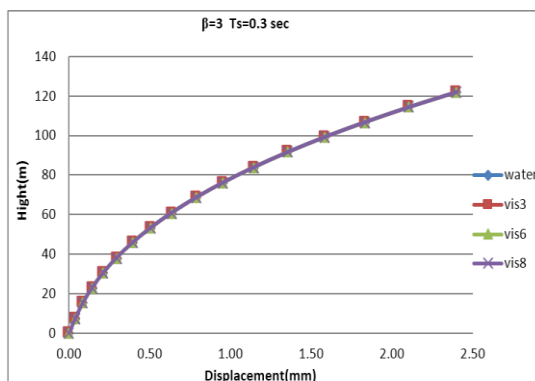


(الف)

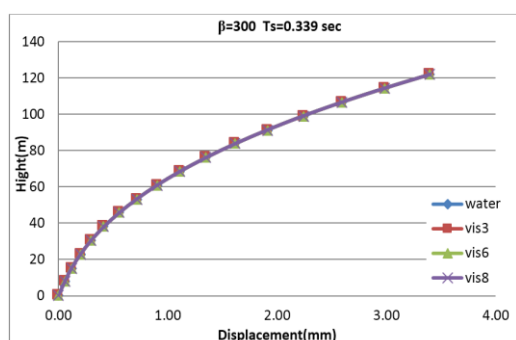
تحریک و برای دو مقدار متفاوت از β مقایسه شده است.



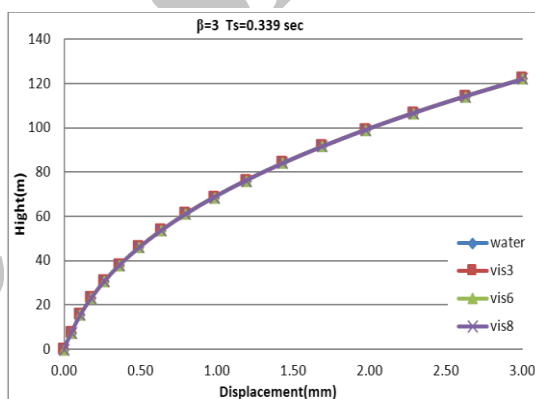
(الف)



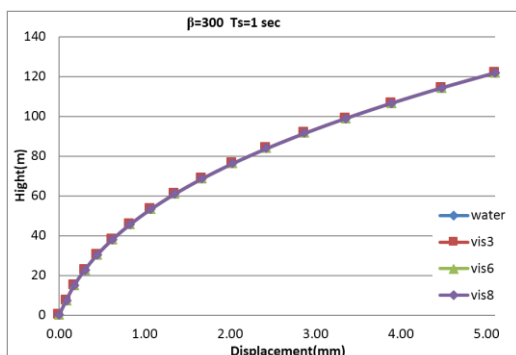
(الف)



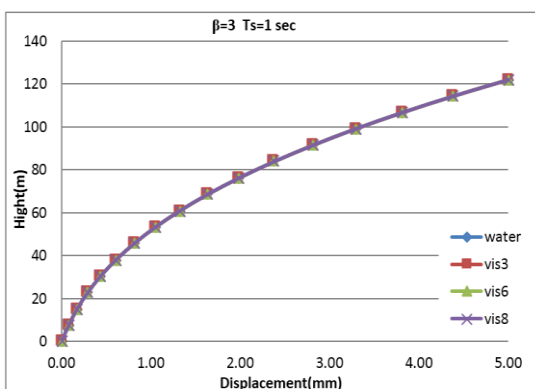
(ب)



(ب)



(پ)

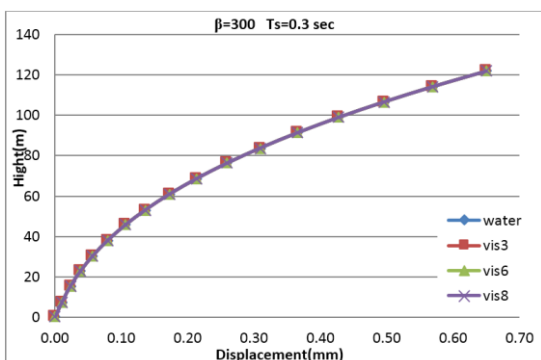


(پ)

شکل ۶ تغییر مکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به ازای مقادیر مختلف T_s و $\beta=300$

از شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان نتیجه گرفت که در تحریک افقی سیستم سد-مخزن و به‌ازای مقادیر مختلف β ، تأثیر هم‌زمان اثر جذب کف و لزجت سیال اثر کاهنده نسبت به هم دارند درحالی‌که در پی‌ریود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پی‌ریود تشدید مخزن،

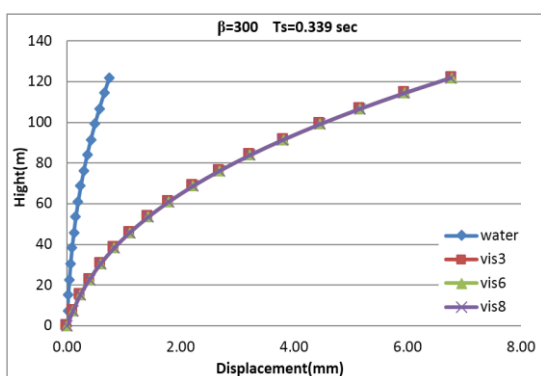
شکل ۵ تغییر مکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف T_s و $\beta=3$



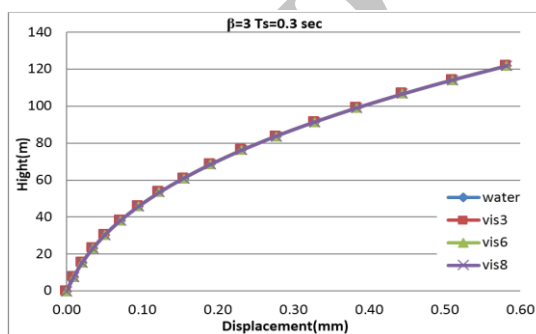
(الف)

تغییرات لزجت سیال و اثر جذب کف تأثیری روی پاسخها نمی گذارند لذا می توان نتیجه گرفت که اثر جذب کف باعث از بین رفتن تأثیر لزجت سیال می گردد.

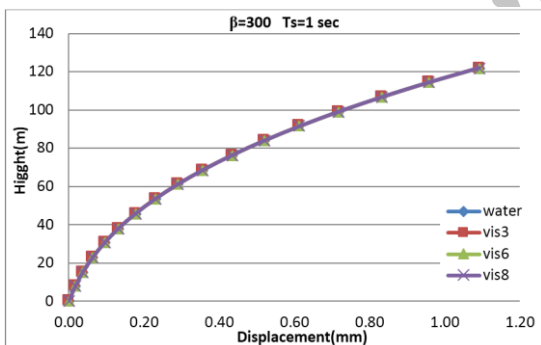
تحریک قائم. در شکل های (۷) و (۸) نیز پاسخهای سیال لزج تحت شتاب قائم برای مود اول برای مقادیر مختلف لزجت سیال در پریودهای مختلف تحریک و برای دو مقدار متفاوت از β مقایسه شده است.



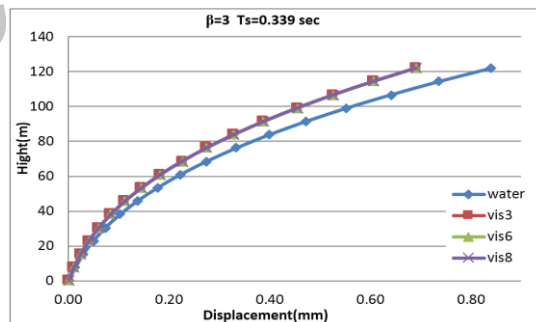
(ب)



(الف)



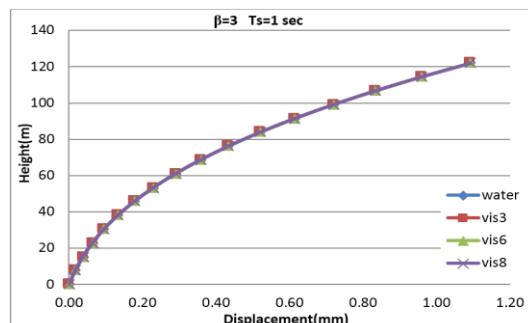
(پ)



(ب)

شکل ۸ تغییر مکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به ازای مقادیر مختلف T_s و $\beta=300$

در شکل (۹) تغییر مکان وجه بالادست سد در مودهای مختلف سازه با یکدیگر مقایسه گردیده اند که نشان می دهند که با ترکیب مودهای مختلف سازه نتایج به نتایج مود اول نزدیک می باشد یعنی مود اول ارتعاشی مود حاکم می باشد.



(پ)

شکل ۷ تغییر مکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به ازای مقادیر مختلف T_s و $\beta=3$

نتایج

در این تحقیق با ارائه روش تحلیلی، پاسخ سدهای بتنی وزنی تحت بارها رومونیک و در محدوده فرکانس ارائه گردید. کلیه تحلیل‌ها با فرض رفتار خطی مصالح سد و مخزن صورت گرفته است و معادلات حاکم بر محیط سد و مخزن که به ترتیب شامل معادله حرکت و معادله موج می‌باشد با احتساب انعطاف پذیری سد و لزجت مخزن به صورت تحلیلی حل شد و نتایج زیر حاصل گردید.

۱. برای تحریک هارمونیک سیستم سد-مخزن با انعطاف پذیری جسم سد با وجه بالادست قائم و کف مخزن افقی با احتساب لزجت مخزن، معادله دیفرانسیل حاکم به همراه شرایط مرزی حل دقیق دارد و می‌توان تابع پاسخ فرکانسی را به دست آورد.

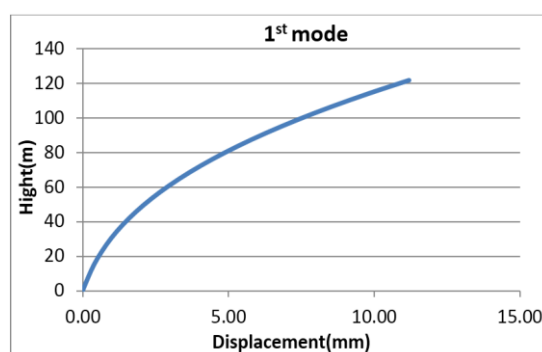
۲. در سیستم سد-مخزن، لزجت تنها در پریودهای تحریک نزدیک به پریود طبیعی سیستم تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌ها خواهد داشت.

۳. با تجزیه پاسخ فشار هیدرودینامیک به دو بخش حرکت صلب و انعطاف پذیر، هر یک از پاسخ‌ها تحت تأثیر لزجت قرار می‌گیرند، درحالی‌که در برآیند اثر لزجت به شدت ناچیز می‌گردد.

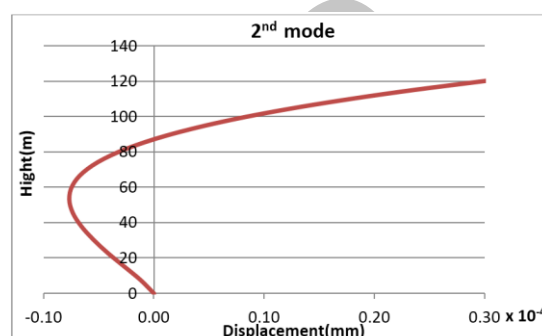
۴. تحریک سیستم سد-مخزن در پریود طبیعی منجر به تأثیر قابل توجه اثر لزجت بر پاسخ فشار هیدرودینامیک و پاسخ تغییر مکان سد می‌شود.

۵. برای تحریک افقی سیستم سد-مخزن، جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن سبب کاهش تأثیرگذاری اثر لزجت بر پاسخ‌ها در مقایسه با حالت بدون رسوب می‌گردد.

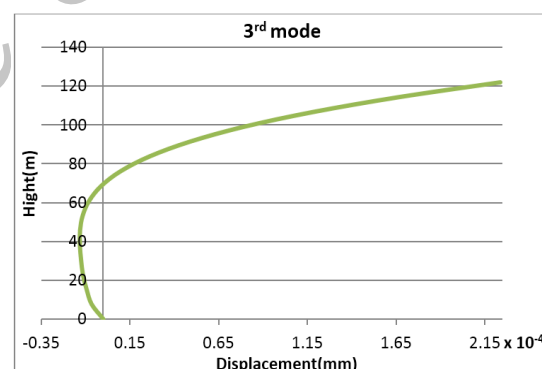
۶. در تحریک قائم، در صورت وجود جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن لزجت سیال مخزن به شدت بر پاسخ تغییر مکان سد تأثیر گذر می‌باشد، به طوری‌که با کاهش مقدار جذب انرژی کف، افزایش لزجت منجر به افزایش شدید تغییر مکان می‌شود.



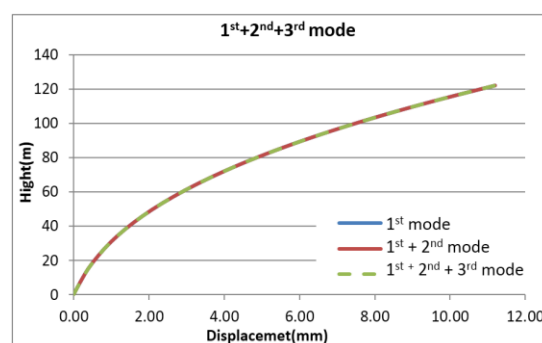
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۹ تغییر مکان وجه بالادست سد در مودهای مختلف سازه

مراجع

1. Westergaard, H.M., "Water Pressure on Dams During Earthquakes", *Transaction ASCE*, Vol. 98, PP. 418-433, (1933).
2. Kotsubo, S.m, "Dynamic Water Pressure on Dams due to Irregular Earthquakes", *Memoirs Faculty of Engineering, Kyushu university*, Fakuoka, Japan, Vol. 18, No. 4, (1959).
3. Zangar, C.N., "Hydrodynamic Pressure on Dams due to Horizontal Earthquake Effects", *U.S. Bureau of Reclamation, Engg*, Monograph No. 11, Denver, Colo., (1952).
4. Bustamante J.I., Rosenblueth, E., Herrera, I., and Flores, A., "Presion Hydrodynamic en Presasy Depositos", *Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica*, Vol. 11, No. 2, (1963).
5. Chopra, A.K., "Hydrodynamic Pressure on Dams during Earthquakes", *Proc., American Society of Civil Engineering, Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 93, No. 6, PP. 205-224, (1967).
6. Chopra, A.K., "Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", *Proc., American Society of Civil Engineering, Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 96, No. 4, PP. 443-454, (1970).
7. Chakrabarti, P., Chopra, A.K., "Hydrodynamic Pressure and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Component", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 1, No. 4, PP. 325-335, (1972).
8. Chwang, A. T., "Hydrodynamic Pressures on Sloping Dam during Earthquakes, Part2: Exact theory", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 87, PP. 343-348, (1987).
9. Tsai, C.S., Lee, G.C., Ketter, R.L., "A Semi-Analytical Method for Time-Domain Analyses of Dam-reservoir Interactions", *International journal for numerical method in engineering*, Vol.29, PP. 913-933, (1990).
10. Tsai, C. S., Lee, G. C., "Method for the Transient Analysis of Three-dimensional Dam-reservoir Interactions", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 116, No. 10, PP. 2151-2172, (1990).
11. Tsai, C.S., Lee, G.C., "Time-domain Analyses of Dam-reservoir System I: Exact Solution", *Journal of engineering mechanics*, (1991).
۱۲. عطارنژاد، ر.، فرساد، ع.، "حل بسته تحلیل اندرکنش سد و مخزن در حوزه زمان با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت سد"، مجله دانشکده فنی، دوره ۳۹، شماره ۳، صفحات ۳۴۰-۳۲۹، (۱۳۸۴).
13. Fenves, G., Chopra, A.K., "Effect of Reservoir Bottom Absorption on Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, PP. 809-829, (1983).
14. Bouaanani, N., Paultre, P., Proulx, J., "A Closed- from Formulation for Earthquake- induced Hydrodynamic Pressure on Dams", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, PP. 537-582, (2003).
15. Zingales, M., "Seismically Induced, Non-stationary Hydrodynamic Pressure in a Dam-reservoir System", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 18, No. 2, PP. 151-163, (2003).

16. Navayi Neya, B., Alijani Ardeshir, M., "An Analytical Solution for Hydrodynamic Pressure on Dams Considering the Viscosity and Wave Absorption of the Reservoir", *Arabian Journal of Science Engineering*, Vol. 38, No. 8, PP. 2023-2033, (2013).
17. Chopra, Anil K., "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", Fourth Edition, Prentice Hall-International Series, (2011).
۱۸. علیجانی اردشیر، م.، "تعیین فشار هیدرودینامیک در مخزن سدهای بتنی وزنی تحت اثر بار دینامیکی با احتساب ویسکوزیته سیال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۸).
۱۹. یاسمی، م.، "حل بسته اندرکنش سد و مخزن تحت بارهای دینامیکی با احتساب ویسکوزیته مخزن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، (۱۳۹۱).
۲۰. احمدی، م.ت.، نوایی نیا، ب.، "تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی"، مجله بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۶، شماره ۱-ب، (۱۳۷۴).
21. Fenves, G., Chopra, A., "Earthquake Analysis and Response of Concrete Gravity Dams", Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC-84/10, University of California, Berkeley, (1984).