حل بستهٔ اندر کنش سد و مخزن بااحتساب لزجت و اثر جذب کف مخزن * (یادداشت پژوهشی)

مریم یاسمی (۱) بهرام نوائینیا (۲) جواد واثقی امیری (۳) مهدی علیجانی اردشیر (^{۱)}

چکیده در این تحقیق حل بستهٔ اندرکنش سد و مخزن بااحتساب اثر ویسکوزیتهٔ سیال مخزن و جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن تحت بارهای هارمونیک ارائه میگردد. بادین منظور معادلات حاکم بر محیط مخزن و سد در محدودهٔ فرکانس حل و باتغییر پارامترهای مختلف، پاسخ فشار هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد که درنظر گرفتن لزجت سیال باعث پیچیدهتر شدن روابط می شود؛ پاسخها به مقدار لوجت، میزان ضریب جذب کف مخزن، پریود تحریک و نیز پریود طبیعی سیستم سد-مخزن وابسته است؛ باافزایش مدول الاستیسیته سد، تغییرمکان تاج سد و فشار هیدرودینامیک مخزن کاهش می یابد.

واژههای کلیدی حل بسته، ویسکوزیتهٔ 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, exited period and dam-reservoir period.

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

Email: Navayi@nit.ac.ir

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

⁽۱) كارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتى نوشيرواني، بابل.

⁽۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

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

⁽٤) فارغ التحصيل دكتراي سازه، دانشگاه صنعتي نوشيرواني، بابل.

کوتاهتر، طول مدلشدهٔ مخزن نقش مهمی در حرکت هارمونیک بازی میکند. وی همچنین اثر امواج سطحی را برای تحریک هارمونیک بررسی نمود و خطای نادیده گرفتن امواج سطحی را بهدست آورد [4]. چوپرا در سال ۱۹۳۷ فشار هیدرو دینامیک وارد بر سدهای با وجه بالادست قائم و صلب را برای شتاب تحریک افقی و قائم در محدودهٔ فرکانس تعیین کرد و ضمن برطرف نمودن محدودیت پاسخ وسترگارد نشان داد که تأثیر امواج سطحی ناچیز ولی تراکمپذیری سیال مهم میباشد [5]. وی همچنین در ۱۹۷۰ پاسخ سد تحت اثر شتاب زلزلهٔ افقی زمین با مقدار دلخواه را با درنظر گرفتن اثر تراکمپذیری سیال و انعطافپذیری سد ارائه نمود [6].

چاکرابارتی و چوپرا فشار هیدرودینامیک را در مخزن سد در اثر مؤلفهٔ شتاب قائم زلزله بهروش تحلیلی بهدست آوردند و نشان دادند که این فشار بهطور قابل ملاحظهای به ضریب ارتجاعی مصالح سد وابسته است [7]. چاونگ پاسخهای تحلیلی برای سد صلب با وجه بالادست و کف مخزن شیبدار را برای مخزن با طول محدود و با نادیده گرفتن اثر تراکم پذیری سیال به دست آورد [8].

برخی محققان نیز به حل مسئلهٔ اندرکنش سد و مخزن در حوزهٔ زمان پرداختند. تسای و همکاران بااستفاده از ترکیب دو روش اجزای محدود و روش تحلیلی، پاسخ نیمه تحلیلی سیستم سد- مخزن را در حوزهٔ زمان یافتند [11-9]. عطارنژاد و فرساد پاسخ دقیق سیستم سد- مخزن را در حوزهٔ زمانی برای سد با ضخامت متغیر موردبررسی قرار دادند و با درنظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال، پاسخها 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 برآورد درست فشار هیدرودینامیکی مؤثر بر سد ایفا می کند [13]. بوانانی و همکاران پاسخ نیمه تحلیلی را با درنظر گرفتن اثر جذب

مقدمه

طی چند دههٔ گذشته، سدهای بتنی زیادی در مناطق زلزلهخیز ساخته شده است و انتظار میرود که تعداد زیادتری نیز در آینده ساخته شوند. این سدها دیر یا زود علاوهبر بارهای بهرهبرداری درمعرض زمین لرزه های شدید نیز قرار خواهند گرفت؛ لذا ارزیابی لرزهای و تأمین مقامت لازم دربرابر نیروهای زلزله برای چنین سازههایی اجتناب ناپذیر می نماید.

در ارزیابی لرزهای سدهای بتنی، فشار هیدرودینامیک ناشی از وجود سیال مرتعش در مخزن سدها از اهمیت ویژهای 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 سـد-مخزن پارامترهای زیادی تأثیر گذار میباشند که محققان بااستفاده از روش های مختلف تحلیلی یا عددی به بررسی تعدادی از این پارامترها پرداختند. در این میان و برای نخستینبار حل معادلـهٔ مـوج دوبعـدی حـاکم بـر محيط مخزن در سدهاي بتني وزني بهمنظور تعيين فشار هیدرودینامیک مؤثر بر وجـه بالادسـت سـد تحـت اثـر شتاب تحریک هارمونیک افقمی توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ ارائه گردید [1]. سیس کوتسوبو نشان داد پاسخ وسترگارد تنها هنگامیکه پریود تحریک، بزرگتـر از پریود طبیعی مخزن باشد، معتبر است [2]. زنگار فشار هیدرودینامیک را برای شکل های مختلف وجه بالادست سازه با فرض تراكمناپذیري آب بهروش شبیهسازی الکتریکی بـهدسـت آورد [3]. بوسـتامانته و همکاران اثر طول مخزن را برای بازهٔ پریود تحریک عریض تر از بازههای قبلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای پریودهای تحریک بزرگتر از پریود طبیعی مخزن، اثر طول مخزن ناچیز است ولی برای پریودهای

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

هدف از این تحقیق ارائهٔ روشی تحلیلی برای تعیین پاسخ تغییرمکان سدهای بتنی وزنی بااحتساب لزجت سیال مخزن، اندرکنش سد و مخزن و جذب امواج هیدرودینامیک توسط کف مخزن تحت شتاب تحریک افقی و قائم می باشد.

معادلات حاكم

معادلهٔ حاکم بر مخزن. معادلهٔ حاکم بر محیط مخزن سدهای بتنی بااستفاده از روابط ناویر استوکس، رابطهٔ پیوستگی و قانون لزجت استوکس بهشکل زیر درمیآید [15-19].

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

که در آن P فشار هیدرودینامیک، µ لزجت، K مدول بالک، C سرعت امواج حجمی و t متغیر زمان میباشد. در بهدست آوردن معادلهٔ فوق فرض شده است که سیال همگن، هموژن با رفتار خطی و حرکت آن غیرپیچشی و با دامنهٔ 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 درادامه باتوجه به شرایط مرزی، حل معادلهٔ فوق به صورت تحلیلی ارائه می گردد.

شرایط مرزی محیط سیال. چهار شرط مرزی محیط مخزن را که در شکل (۱) با مرزهای S_۱ و S_۲ و S_۲ و s_۲ نشان داده شدهاند با این فرض که مؤلفهٔ افقی حرکت زمین عمود بر محور سد باشد و مخزن سد در امتداد بالادست تا بینهایت ادامه یابد، به صورت زیر می توان بیان نمود.



شکل ۱ سیستم سد -مخزن و شرایط مرزی

شرط مرزی در سطح آزاد مخزن (۲۵). به هنگام وقوع زلزله و بهدلیل ارتعاشات سازه و مخزن، در سطح مخزن امواجی بهوجود می آید که سطح مخزن را متلاطم می سازند. بنابراین در حالت کلی بهدلیل وجود امواج سطحی ناشی از زلزله، فشار هیدرودینامیک در سطح آزاد مخزن صفر نمی باشد و شرط مرزی مربوط به آن را برای مرز (۵۱) می توان به شکل زیر نشان داد [5].

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

که در آن g شتاب گرانش میباشد. مطالعات بوتسامانته نشان میدهد که صرفنظر 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 درنظر گرفت [4].

شرط مرزی بین سد و مخزن (۶۲). به منظور تأمین شرط عدم جدایی بین سد و مخزن، سیال در تماس دائمی با مرز جامد می باشد. بدین منظور بایستی مؤلفهٔ سرعت نرمال در هر نقطه از مرز جامد، برابر با سرعت وجود این رسوبات کف مخزن کاملاً صلب نمیباشد که این موضوع نیز خود باعث تغییر در فرکانس طبیعی مخزن می گردد. در این حالت شرط مرزی در کف مخزن بهصورت (x,0,t) $\frac{\mathrm{P}}{\partial t}(x,0,t)$ = $q\frac{\mathrm{D}}{\partial t}$ بیان می گردد که در آن $\frac{1}{\mathrm{C}\beta}$ = pمیباشد. β ضریبی است که بهسرعت موج، میزان و نیز جنس رسوب کف مخزن بستگی دارد و مقدار آن می تواند بین ۱ (برای حالت جذب کامل امواج) تا بی نهایت (برای حالت انعکاس کامل امواج) تغییر نماید [13].

شرط مرزی در بالادست مخزن (۶۶). با دور شدن از سد به سمت بالادست مخزن، فشار هیدرودینامیک بهتدریج مستهلک میشود و در بینهایت بهسمت صفر میل میکند لذا فشار در بالادست مخزن برابر صفر فرض میگردد.

معادلهٔ حاکم بر سد

روش آنالیز مودال در دینامیک سازه های چند درجه آزادی، روشی سودمند برای محاسبهٔ تغییرمکان سد با درنظر گرفتن چند مود ارتعاش میباشد. براساس مبانی آنالیز مودال برای سازه های چند درجه آزادی برای تحریکی در راستای x یا y، تغییر مکان به صورت زیر میباشد [19]:

$$r_{k}^{l}(x, y, t) = \sum_{j=1}^{m} \phi_{j}^{k}(x, y) Y_{j}^{l}(t), \ k = x, y; \ l = x, y$$

بااستفاده از روش آنالیز مودال، معادلـهٔ دینـامیکی حاکم بر حرکت سد تحت شتاب زمـین بـرای مـود j ام ارتعاشیبه صورت معادلهٔ زیر حاصل میگردد [20]. نرمال در مرز سیال باشد. با فرض سرعت کم سیال و درنتیجه ناچیز بودن تنش برشی در تماس با جسم سد در مرز مشترک شرط مرزی در فصل مشترک سد صلب و مخزن a_n میباشد که در آن a_n شتاب وارد در یک نقطهٔ دلخواه از مرز و n بردار عمود بر نقطهٔ موردنظر در وجه بالادست سد میباشد [18,19, 20]. از آنجایی که در مطالعهٔ حاضر بردار عمود بر مرز مشترک سد و مخزن در وجه بالادست سد به موازات محور x فرض می گردد درنتیجه شرط مرزی (Sr) به شکل زیر در می آید:

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{x}} = -\rho \mathbf{a}_{g}^{x}(t) \boldsymbol{\delta}_{xi} \tag{(7)}$$

که در آن _x تابع دلتای کرنکر و I = x,y میباشد. برای درنظر گرفتن اثـر انـدرکنش سـد و مخـزن،

برای ترکیر ترین کور سیال در این مرز به صورت شتاب تحریک وارد بر سیال در این مرز به صورت مجموع مؤلفهٔ افقی شتاب زلزله و شتاب ناشی از ارتعاشات سازه بیان می گردد [6,19,20]. لذا رابطهٔ (۳) به شکل رابطهٔ (٤) کامل خواهد شد.

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

که در آن ((0,y تغییرمکان مود زام ارتعاش سد درجهت x و (^xi(t) شتاب مود زام سازه میباشد.

شرط مرزی در کف مخزن (۳%). اگر کف مخزن افقی و صلب فرض گردد، در این صورت شرط مرزی وقتی که فقط شتاب افقی اعمال گردد به شکل $0 = \frac{\partial P}{\partial y}$ می باشد و به هنگام وارد شدن بار زلزله هیچ گونه تغییر شکلی در کف مخزن ایجاد نمی گردد و بار دینامیکی مستقیماً به سد انتقال می یابد [5,12,16]. اگر شتاب زلزله دارای مؤلفهٔ قائم باشد شرط مرزی در کف مخزن به شکل $\rho_{a} = -\rho_{a}$ به دست می آید که در آن v_{a} مؤلفهٔ قائم شتاب زلزله می باشد [5,16,18, 19].

مقداری از انرژی زلزله جذب میگردد و درواقع بهدلیل

www.SID.ir

$$\begin{split} M_{j}[\ddot{Y}_{j}^{l}(t) + 2\xi_{j}\omega_{j}\dot{Y}_{j}^{l}(t) + \omega_{j}^{2}Y_{j}^{l}(t)] = \\ - L_{j}^{l}a_{g}^{l}(t) + \int_{0}^{H}p^{l}(0, y, t)\,\phi_{j}^{x}(0, y)dy \end{split} \tag{7}$$

که در آن _أکم نسبت میرایی بحرانی مود j ام سد، _أ۵ فرکانس طبیعی ارتعاش مود j ام سد خالی روی پی صلب، (p)¹(0, y, t) فشار هیدرودینامیک مؤثر بر وجه بالادست سد و H نیز ارتفاع سد میباشد. _م جرم تعمیمیافتهٔ مود jام ارتعاش سد است و به صورت زیر میباشد [17].

$$\begin{split} \mathbf{M}_{j} &= \iint_{A} \mathbf{m}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \{ [\phi_{j}^{\mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^{2} + [\phi_{j}^{\mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^{2} \} \, d\mathbf{x} \, d\mathbf{y} \quad (\mathsf{Y}) \\ & \text{ sc list of } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{M}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{y} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list } \mathbf{x} \in \mathsf{sc list } \mathbf{x} \\ & \text{ sc list$$

$$\mathbf{Y}_{j}^{1}(t) = \overline{\mathbf{Y}}_{j}^{1}(\omega)\mathbf{e}^{i\omega t} \tag{9}$$

$$p^{1}(x, y, t) = \overline{p}^{1}(x, y, \omega)e^{i\omega t} \qquad (1 \cdot)$$

با جایگذاری رابطهٔ (۹) در (٦)، معادلهٔ حاکم بر
حرکت سد برای مود j ام ارتعاشی را میتوان برحسب
توابع پاسخ فرکانس مختلط بازنویسی نمود [19].
$$M_{j}[-\omega^{2} + i(2\xi_{j}\omega_{j}\omega) + \omega_{j}^{2}]\overline{Y}_{j}^{1}(\omega) = -L_{j}^{1} + \int_{0}^{H} \overline{p}^{1}(0, y, \omega) \phi_{j}^{x}(0, y) dy$$
(11)

 $\frac{\partial \overline{P}_{0}^{y}}{\partial y}(x,0,\omega) = -\rho + i\omega q \ \overline{P}_{0}^{y}(x,0,\omega)$

 $\frac{\partial \overline{P}_{0}^{y}}{\partial x}(0, y, \omega) = 0$

 $\overline{P}_0^y(x, H, \omega) = 0$ $\overline{P}_0^x(\infty, y, \omega) = 0$

$$\nabla^2 \overline{p} + s^2 \overline{p} = 0 \tag{11}$$

که در آن s بهصورت رابطهٔ (۱۳) قابل تعریف میباشد.

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

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

$$\overline{p}^{l}(x,y,\omega) = \overline{p}_{0}^{l}(x,y,\omega) + \sum_{j=l}^{m} \overline{p}_{j}(x,y,\omega) \ \overline{\ddot{Y}}_{j}^{l}(\omega) \ (\ \mbox{(} \ \mbox{(} \ \mbox{(} \ \mbox{(} \ \mbox{(} \ \mbox{)} \ \mbox{)} \)$$

که عبارت اول معرف فشار هیـدرودینامیک بـرای حرکت صلب سد و جملات بعدی فشار هیدرودینامیک ناشی از مودهای ارتعاشی سد انعطاف پذیر می باشد. معادلات (۱۱) و (۱۲) معادلات حـاکم بـر محیط سازه و مخزن تحت تحریک هارمونیک می باشـند و به کمک شرایط مرزی بایـد حـل گردنـد. بـراین اسـاس، شرایط مرزی مسئله بـرای تـابع پاسـخ فرکانسـی فشـار شرایط مرزی مسئله بـرای تـابع پاسـخ فرکانسـی فشـار الف) وقتی تحریک، افقی و سد صلب باشد. الف) وقتی تحریک، افقی و سد صلب باشد. (۱۵) $\frac{\partial \overline{P}_{0}^{x}}{\partial x}(x,0,\omega) = i o q \overline{P}_{0}^{x}(x,0,\omega)$ $\overline{P}_{0}^{x}(x,H,\omega) = 0$ $\overline{P}_{0}^{x}(x,y,\omega) = 0$

ب) وقتى تحريك، قائم و سد صلب باشد.

(17)

$$\begin{split} \overline{p}(x, y, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n(\omega) e^{k_n x} \\ &[e^{i\lambda_n y} + \frac{\lambda_n - \omega q}{\lambda_n + \omega q} e^{-i\lambda_n y}] \end{split}$$

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 محدودهٔ فرکانس وقتی تحریک افقی و سد صلب است به شکل زیر بهدست می آید. $\overline{p}_0^x(x, y, \omega) = -2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{[(\lambda_n^2 - (\omega q)^{2})H + i\omega q]}$ $\frac{I_{0n}}{\sqrt{\lambda_n^2 - s^2}} \gamma_n(y, \omega) e^{k_n x}$

$$\gamma_{n}(y,\omega) = \frac{1}{2\lambda_{n}} [(\lambda_{n} + \omega q)e^{i\lambda_{n}y} + (\lambda_{n} - \omega q)e^{-i\lambda_{n}y}] \quad (\Upsilon \Upsilon)$$

$$\begin{split} \mathbf{I}_{0n}\left(\boldsymbol{\omega}\right) &= \frac{1}{H} \int_{0}^{H} \gamma_{n}(\mathbf{y},\boldsymbol{\omega}) d\mathbf{y} \tag{(YY)} \end{split}$$

$$I_{jn}(\omega) = \frac{1}{H} \int_{0}^{H} \gamma_{n}(y,\omega) \, \phi_{j}^{x}(0,y) \, dy \tag{75}$$

رابطهٔ (۲۳) پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن در محدودهٔ فرکانس تحت شتاب افقی زمین و با درنظر گرفتن اثر جذب کف میباشد. برای بررسی صحت محاسبات، با فرض صلب بودن کف مخزن و ناچیز بودن لزجت سیال و برای مود اول ارتعاشی سد، پاسخ

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{P}_{j}}{\partial x}(0,y,\omega) = -\rho \phi_{j}^{x}(0,y) \\ \frac{\partial \overline{P}_{j}}{\partial y}(x,0,\omega) = i\omega q \ \overline{P}_{j}(x,0,\omega) \\ \overline{P}_{j}(x,H,\omega) = 0 \\ \overline{P}_{0}^{x}(\infty,y,\omega) = 0 \end{cases}$$
(1V)

به منظور حل معادلهٔ حاکم بر سیستم سد-مخزن با درنظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن در حوزهٔ فرکانس باتوجه به این واقعیت که پاسخ سازههای پریود کوتاه نظیر سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله اصولاً به شکل مود اول ارتعاشی آنها میباشد [13]، بدین جهت برای منظور نمودن اثر اندرکنش، با کمی تقریب می توان فرض نمود که دیوارهٔ سد انعط اف پذیر تحت شتاب تحریک به شکل مود اصلی خود که برای سدهای بتنی وزنی مود اول میباشد ارتعاش میکند. برای این منظور کافی است در روابط ارائه شده به ازای j مقدار ۱ قرار داده شود. بدیهی است چنانچه 0= درنظر گرفته شود فقط حرکت صلب سد مدنظر قرار می گیرد.

$$e^{2i\lambda_{n}H} = -\frac{\lambda_{n} - \omega q}{\lambda_{n} + \omega q}$$
(1A)

برای بررسی صحت محاسبات با ناچیز فرض کردن لزجت سیال و بهدلیل اینکه ۵ همیشه بزرگتر از صفر میباشد می توان (s) را به $\frac{\omega}{C}$ تبدیل کرد، درنتیجه،

$$\overline{p}_{0}^{y}(0, y, \omega) = \frac{-\rho C}{\omega} \frac{\sin \frac{\omega}{C} (H - y)}{i\omega C \sin \frac{\omega}{C} H + \frac{\omega}{C} \cos \frac{\omega}{C} H)}$$
(\mathcal{T})

که با پاسخ چوپرا [13,18] مطابقت کامل دارد. با بهدست آوردن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جایگذاری در معادلهٔ حرکت سد، پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس بهدست میآید.

$$\begin{split} &M_{j}[-\omega^{2}+i(2\xi_{j}\omega_{j}\omega)+\omega_{j}^{2}]\overline{Y}_{j}^{y}(\omega)=-L_{j}^{y}+\\ &\int_{0}^{H}[\overline{p}_{0}^{y}(0,y,\omega)+\overline{p}_{j}(0,y,\omega)\overline{\dot{Y}_{j}^{y}(\omega)}]\,\phi_{j}^{x}(0,y)dy \end{split} \tag{71}$$

$$\begin{split} &\overline{Y}_{j}^{y}(\omega) = -[L_{j}^{y} + B_{0}^{y}(\omega)] / \\ &- \omega^{2} \{M_{j} + Re[B_{1}(\omega)]\} + i\omega \{i2\xi_{j}\omega_{j}\omega - \omega Im[B_{1}(\omega)]\} \\ &+ \omega_{j}^{2}M_{j} \end{split}$$

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

$$B_1(\omega) = - \int_0^H \overline{p}_j(0, y, \omega) \, \phi_j^x(0, y) dy \tag{7$1}$$

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

نتايج

کف مخزن صلب. بهمنظور ارائهٔ نتایج عددی، یک سد بهشکل مثلث قائمالزاویه بهارتفاع ۵۰ متر که برابر ارتفاع بهدست آمده کاملاً بر پاسخ چوپرا [6,18] منطبق است. اکنون با مشخص شدن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جایگذاری در معادلهٔ حرکت سد، پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس بهدست می آید.

$$\begin{split} & M_{j}[-\omega^{2}+i(2\xi_{j}\omega_{j}\omega)+\omega_{j}^{2}]\overline{Y}_{j}^{x}(\omega)=-L_{j}^{x}+\\ & \int_{0}^{H}[\overline{p}_{0}^{x}(0,y,\omega)+\overline{p}_{j}(0,y,\omega)\overline{\dot{Y}_{j}^{x}(\omega)}]\,\varphi_{j}^{x}(0,y)dy \end{split} \tag{70}$$

$$\begin{split} \overline{Y}_{j}^{x}(\omega) &= -[L_{j}^{x} + B_{0}^{x}(\omega)] / \\ &- \omega^{2} \{M_{j} + \text{Re}[B_{1}(\omega)]\} + i\omega \{i2\xi_{j}\omega_{j}\omega - \omega \text{Im}[B_{1}(\omega)]\} + \omega_{j}^{2}M_{j} \end{split}$$

$$(\texttt{Y7})$$

$$\begin{aligned} & \text{Cr} \end{split}$$

$$B_0^x(\omega) = -\int_0^H \overline{p}_0^x(0, y, \omega) \ \phi_j^x(0, y) dy$$
 (YV)

$$B_{1}(\omega) = -\int_{0}^{H} \vec{p}_{j}(0, y, \omega) \,\phi_{j}^{x}(0, y) dy \tag{YA}$$

رابطهٔ (۲٦) پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس تحت شتاب افقی زمین و بالحاظ اثر جذب کف می باشد. برای بررسی صحت محاسبات بافرض صلب بودن کف مخزن، پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال، بر پاسخ چوپرا منطبق می گردد و درنتیجه پاسخ دینامیکی سد نیز در مود ارتعاشی اول سد بر پاسخ چوپرا [13] انطباق کامل دارد که نشان دهندهٔ 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، بااستفاده از روش جداسازی متغیرها و با اعمال شرایط مرزی مسئله پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال مخزن در محدودهٔ فرکانس بهدست میآید.

$$\overline{p}_{0}^{y}(0, y, \omega) = \frac{-\rho \sin|s|(H - y)}{i\omega q \sin|s|H + |s|\cos|s|H)}$$
(Y9)







یل ۲ تغییرمکان وجه بالادست سد بهازای سه پریود تحریک مختلف

همان طوری که از شکل (۲) پیداست مقادیر مختلف لزجت در پریود تحریک کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن بر پاسخ تغییرمکان سازه تقریباً بی تأثیرند، اما در پریود تحریک مساوی با پریود طبیعی مخزن، همان طور که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، لزجت بسته به مقدار آن تأثیر قابل توجهی روی پاسخها دارد.

همچنین از آنجا که برای محاسبهٔ پریود تشدید بااحتساب اثر اندرکنش روش تحلیلی وجود ندارد، نمودار پاسخ تغییرمکان تاج سدی به ارتفاع ۵۰ متر بهازای پریودهای تحریک مختلف برای سیال با دمای ۱۵ درجهٔ سانتی گراد و لزجتی معادل ۱۰ برابر لزجت آب با درنظر گرفتن اثر اندرکنش در شکل (۳) ارائه مخزن می باشد مدنظر قرار گرفته است. لزجت آب مخزن که با water نشان داده می شود برای حرارت ۱۰ درجهٔ سانتی گراد، مدول بالک آب، K برابر MPa درجهٔ سانتی گراد، مدول بالک آب، K برابر مصالح سد نیز به ترتیب برابر MPa بر ۲۰۰۰۰ و ۲/۰ انتخاب گردیده است. برای حالت بدون اثر جذب کف، حداکثر پاسخ تغییرمکان وجه بالادست سد با درنظر گرفتن نعطاف پذیری سد در مود اول ارتعاش آن به ازای مقادیر مختلف لزجت سیال مخزن شامل water انعطاف یا لزجت ۱۰ تا ۱۰ برابر لزجت آب رازجیت آب ۱۰ درجه سانتیگراد) و vis تا vis به ترتیب سیالی با لزجت ۱۰ تا برابر برای سه تحریک متفاوت ۵ که عبارتند از تحریک با پریود مساوی، کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن در شکل (۲) مقایسه شده اند که در آن T معرف پرید تحریک می باشد.

پریود تشدید برای سد صلب و مخزن غیرلزج، $T_{\rm res}$, وقتی اتفاق میافتد که پاسخ فشار هیدرو دینامیک بینهایت گردد که در چنین حالتی برابر با دینامیک بینهایت گردد که با جایگذاری مقادیر عددی $T_{\rm res} = \frac{4H}{nC}$ خواهد شد که با جایگذاری مقادیر عددی برای سد با ارتفاع ۵۰ متر و مخزن پر، پریود تشدید مخزن غیرلزج برابر با $T_{\rm res} = 0.13888$ می گردد[16, 18]. از طرف دیگر پریود طبیعی مخزن لزج برابر والا ,18]. از طرف دیگر پریود طبیعی مخزن لزج





نشريهٔ مهندسی عمران فردوسی www.SID.ir

گردیده است.

ملاحظه می شود که تشدید در پاسخهای سیستم سد-مخزن با سد انعطاف پذیر در پریودی بسیار نزدیک به پریود تشدید اصلی مخزن با سد صلب را نتیجه میدهد. بنابراین می توان با تقریب نسبتاً خوبی پریود تشدید سیستم سد-مخزن با سد انعطاف پذیر را با پریود تشدید مخزن در حالتی که سد صلب است برابر قرار داد.



شکل ۳ تغییرمکان تاج سد بهازای پریودهای تحریک مختل

اثر جذب کف

تحریک افقی. در شکل (٤) اثر جذب کف بر حداکثر پاسخها در حالت تحریک افقی، برای سیال با لزجت آب و در پریود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن نشان داده شده است. در این شکلها به viswater معرف سیال با لزجتی برابر لزجت آب می باشد.









شکل ٤- تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال بهازای مقادیر مختلف Ts و m=viswate

شکل (٤) نشان می دهد در تحریک افقی سیستم سد-مخزن، بهازای مقادیر مختلف β و لزجت سیال برابر لزجت آب، جذب کف در پریود تحریک کمتر و یا بیشتر از پریود تشدید مخزن تأثیری روی پاسخها ندارد و فقط بهازای تحریکی برابر با پریود تشدید مخزن مقادیر پاسخها تحت تأثیر قرار می گیرند. این تأثیر به گونهای است که باافزایش β تغییر مکانها بزرگتر می شوند.

در شکلهای (۵) و (٦) مقادیر حداکثر پاسخهای سد تحت شتاب هارمونیک افقی برای مود اول بهازای مقادیر مختلف لزجت سیال، در پریودهای مختلف

۱۲۱

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي







شکل ٦ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال بهازای مقادیر مختلفTs و β=300

از شکلهای (٥) و (٦) 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 بههم دارند درحالیکه در پریود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پریود تشدید مخزن، تحریک و برای دو مقدار متفاوت از β مقایسـه شـده است.





شکل ۵ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال بهازای مقادیر مختلف β=3 وβ=3

نشريهٔ مهندسي عمران فردوسي www.SID.ir

سال سیام، شمارهٔ یک، ۱۳۹٦

تغییرات لزجت سیال و اثـر جـذب کـف تـأثیری روی پاسخها نمیگذارند لذا میتـوان نتیجـه گرفـت کـه اثـر جذب کـف باعـث از بـین رفـتن تـأثیر لزجـت سـیال میگردد.

تحریک قائم. در شکلهای (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 ۶ مقایسه شده است.



(پ) شکل ۷ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال بهازای مقادیر مختلف _sT و β=3







شکل ۸ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال بهازای مقادیر مختلف Ts وβ=300

در شکل (۹) تغییرمکان وجه بالادست سد در مودهای مختلف سازه با یکدیگر مقایسه گردیدهاند که نشان میدهند که با ترکیب مودهای مختلف سازه نتایج به نتایج مود اول نزدیک میباشد یعنی مود اول ارتعاشی مود حاکم میباشد.

> سال سیام، شمارهٔ یک، ۱۳۹۶ www.SID.ir

172

15.00

0.30 x 10-

2.15 x 10



4.00 Displacemet(mm) (ت)

0

0.00

2.00



6.00

8.00

۲. در سیستم سد-مخزن، لزجت تنها در پریودهای تحريك نزديك بـه پريـود طبيعـي سيسـتم تـأثير قابل توجهي بر پاسخها خواهد داشت. ۳. با تجزیهٔ پاسخ فشار هیدرودینامیک به دو بخش حرکت صلب و انعطافپذیر، هـر یـک از پاسـخهـا تحت تأثير لزجت قرار می گیرند، در حالی که در

- ٤. تحریک سیستم سد-مخزن در پریود طبیعی منجر به تأثير قابل توجه اثر لزجت بر پاسخ فشار هیدرودینامیک و پاسخ تغییرمکان سد میشود.
- ٥. براى تحريك افقى سيستم سد-مخزن، جذب انرژى توسط رسوبات کف مخرن سبب کاهش تأثیر گذاری اثر لزجت بر پاسخها درمقایسه با حالت بدون
- ٦. در تحریک قائم، درصورت وجود جذب انرژی توسط رسوب كف مخرن لزجت سيال مخزن بەشدت بر پاسخ تغييرمكان سد تأثيرگذر مےباشد، بهطوریکه با کاهش مقدار جذب انرژی کف، افرایش لزجت منجر به افزایش شدید تغییرمکان مى شود.

1st + 2nd + 3rd mode

10.00

12.00

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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Chwang, A. T., "Hydrodynamic Pressures on Sloping Dam during Earthquakes, Part2: Exact theory", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 87, PP. 343-348, (1987).
- Tsai, C.S., Lee, G.C., Ketter, R.L., "A Semi-Analytical Method for Time-Domain Analyses of Damreservoir Interactions", *International journal for numerical method in engineering*, Vol.29, PP. 913-933, (1990).
- 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 ۳٤۰–۳۲۹، (۱۳۸٤).

- 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).
- 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"، پایـان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۸).
- ۱۹. یاسمی، م.، " حل بسته اندرکنش سد و مخزن تحت بارهای دینامیکی بـا احتسـاب ویسـکوزیته مخـزن"، پایـان نامـه کارشناسـی ارشـد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، (۱۳۹۱) .
- ۲۰. احمدی، م.ت.، نوایینیا، ب.، "تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی"، مجلـه بـین المللـی علـوم مهندسـی دانشـگاه علـم وصنعت ایران، جلد ٦، شماره ۱-ب، (١٣٧٤).
- 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).