

اثرات کاویتاسیون آکوستیکی و موج ضربه‌ای ناشی از آن در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی

فرهود کلاته^۱ و رضا عطارنژاد^{۲*}

^۱ دانشجوی دوره دکتری سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۰۶/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۰۸/۲۵، تاریخ تصویب ۱۳۸۹/۰۸/۳۰)

چکیده:

در مقاله حاضر روشی برای تحلیل عددی کاویتاسیون آکوستیکی^۱ در مخزن سدها و موج ضربه‌ای^۲ ناشی از آن با استفاده از روش اجزاء محدود^۳ جهت بررسی اثرات آن بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی ارائه شده است. وقوع زمین لرزه شدید موجب جدا شدگی محیط سد و مخزن و افت فشار مطلق^۴ در محیط سیال تا حد فشار بخار اشباع در ناحیه‌ای در مجاورت فصل مشترک سد و سازه می‌گردد که متعاقباً باعث ایجاد محیط مایع حباب دار در بخشی‌هایی از مخزن می‌گردد. انفجار این حبابها در هنگام تغییر جهت زمین لرزه و اعمال بار ضربه‌ای موجب تغییراتی در پاسخ دینامیکی سازه خواهد شد. روش پیشنهادی برای تحلیل چند مثال مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از سایر مطالعات مقایسه گردیده اند. نتایج حاصل حاکی بر تاثیر اندک کاویتاسیون بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش سد، مخزن، کاویتاسیون آکوستیکی، موج ضربه‌ای، روش اجزاء محدود، تحلیل دینامیکی، تحلیل غیرخطی

مقدمه

هرچندکه انگیزه اصلی تحقیق حاضر محاسبه پاسخ دینامیکی سدهای بتنی و بررسی اثرات وقوع کاویتاسیون مخزن بر پاسخ دینامیکی چنین سازه‌هایی می‌باشد لیکن امکان استفاده از روش پیشنهادی جهت مطالعه رفتار دینامیکی سایر سیستم‌های کوبله سازه سیال، با فرض غیرلرزه بودن سیال و حرکت ارتعاشی با دامنه کوچک و رفتار ارتعاشی سازه وجود دارد. محققین روشهای مدل‌سازی متعددی را برای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم‌های سیال سازه ارائه نموده اند. یکی از متداولترین روشهای جهت مدل‌سازی‌های عددی مسائل مهندسی بدلیل انعطاف پذیری و سهولت نسبی فرمولبندی آن روش المان محدود می‌باشد. در اکثر روشهای ارائه شده این روش برای گسسته سازی معادلات حرکت سازه با فرض تغییر مکانهای گرهی بعنوان کمیت مجهول استفاده شده است، ولی فرمولبندی‌های متفاوتی توسط محققین مختلف برای محیط سیال بکار گرفته شده است. متداولترین فرمولاسیون اجزاء محدود محیط سیال فرض فشار دینامیکی بعنوان متغیر مستقل می‌باشد [۴ و ۵]، فرمولبندی محیط سیال بر حسب توابع پتانسیل تغییر مکان و یا سرعت [۶ و ۷] یا استفاده از تغییر مکانهای گرهی محیط سیال بعنوان متغیر مجهول [۸]، [۹ و ۱۰] و در نهایت بکارگیری فرمولبندی ترکیبی [۱۱ و ۱۲] و فرض سرعت و فشار بعنوان متغیرهای مجهول گرهی در محیط سیال روشهای مورد استفاده در گسسته سازی اجزاء محدود معادلات حاکم بر حرکت سیال می‌باشند. از آنجایی که مایعات توانایی توسعه و تحمل فشار کمتر از فشار بخار اشباع را نداشته و چنانچه

محاسبه پاسخ دینامیکی مسائل مهندسی مرتبط با اندرکنش سیال سازه^۵ در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین بوده است. یکی از مهمترین موضوعات مطرح در این زمینه برآورد پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی به‌همراه مخزن حجیم انباشته شده از آب مجاور آن می‌باشد. بدلیل پی آمدهای فاجعه بار ناشی از شکست سد مهندسین نیازمند روشهای تحلیل قابل اعتمادی جهت پیش بینی دقیق شرایط خرابی سدها می‌باشند. بمنظور پیش بینی واقعی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی، آنالیز دینامیکی چنین سازه‌هایی باید شامل اثرات عوامل غیرخطی موثر بر رفتار سدهای بتنی در هنگام وقوع زمین لرزه باشد. بر اساس مطالعات تجربی و تحلیلی انجام شده برخی عوامل غیرخطی در بررسی رفتار دینامیکی سیستم‌های سد-مخزن عبارتند از:

۱- ترک خوردگی در سد بتنی

۲- باز و بسته شدن و لغزش درزها مابین بلوکهای بتنی

۳- تشکیل و انهدام ناحیه گازی شکل در آب داخل

مخزن در اثر ایجاد کاویتاسیون [۲، ۱، ۳]

در مقاله حاضر روش عددی جهت تحلیل اندرکنش دینامیکی غیرخطی سیستم‌های سازه سیال بدلیل رفتار غیرخطی سیال ناشی از تشکیل کاویتاسیون حجمی در اثر انتشار موج فشاری و انهدام ناحیه کاویته شده و اثرات موج ضربه‌ای ناشی از آن بر سازه ارائه شده است.

دو بعدی سدهای بتنی وزنی بکار گرفته شده است. نتیجه‌ای که از این تحقیق بدست آمده است نشانگر اثرات ناچیز کاویتاسیون بر تنشهای ماکزیمم بدنه سد می‌باشد. بدلیل مطالعات محدود انجام شده در این زمینه، کاویتاسیون و اثرات ناشی از آن بر رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی و علی‌الخصوص سدهای بتنی قوسی که اثرات ناشی از اندرکنش مابین سد و مخزن در آن شدیدتر می‌باشد [۱۷]، بطور کامل شناخته نشده است. در روش عددی پیشنهادهی از فرمولابندی اوپلری - لاگرانژی^۷ برای مدل‌سازی قلمروهای سیال و سازه استفاده شده است. بهمین جهت متغیر مجهول محیط سیال فشارهیدرودینامیکی و متغیر مستقل سازه تغییر مکانهای گرهی لحاظ گردیده است. معادله حرکت سیال بنحوی اصلاح گردیده است که اثرات ناشی از وقوع کاویتاسیون در آنالیز کوپله^۸ سد - مخزن لحاظ گردد. به همین منظور با اعمال معادله رفتاری دوخطی سیال، معادله حرکت سیال به یک معادله غیر خطی تبدیل شده و از روش حل مجزا^۹ برای حل معادله حرکت غیر محیط سیال و معادله حرکت خطی سازه در هرگام زمانی استفاده شده است.

معادلات حاکم بر محیط سیال

چنانچه سرعت ذرات سیال در مقایسه با ابعاد مدل اندک باشد می‌توان سیال را بصورت محیط آکوستیکی فرض نموده و از عبارت غیر خطی انتقال^{۱۰} در معادله ناویر استوکس^{۱۱} صرفنظر نمود. لذا با توجه به فرض فوق، معادلات حرکت خطی شده^{۱۲} سیال بصورت زیر خواهند بود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_{f0} \nabla \cdot v = q \quad (1)$$

$$\rho_{f0} \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p = \rho_{f0} \cdot f \quad (2)$$

معادله حالت^{۱۳}:

$$p = \varphi(\rho, \dot{\rho}) = \alpha(\rho) \cdot \rho + \beta(\dot{\rho}) \cdot \dot{\rho} \quad (3)$$

در روابط (۱) الی (۳) دانسیته سیال، ρ_{f0} دانسیته اولیه سیال $\dot{\rho}$ مشتق زمانی دانسیته سیال، v سرعت سیال، q منبع (چاه و یا چشمه) وابسته به زمان در محیط سیال، f نیروی حجمی وارد بر المان سیال، p فشار هیدرودینامیک، α و β ضرایب معادله حالت می‌باشند. با صرفنظر از بارهای بدنی اعمالی بر المان سیال و حذف سرعت از دو رابطه (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (4)$$

با توجه به معادله (۳) و اینکه β در تحقیق حاضر برابر صفر فرض شده است خواهیم داشت:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{\alpha(p)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

فشارمطلق مایع به حد فشار بخار اشباع و یا کمتر از آن کاهش یابد نواحی گازی شکلی در آن پدیدار می‌گردد. Zienkiewicz و همکارانش [۱۳] الگوی‌های مختلف ایجاد کاویتاسیون را توصیف نموده و تفاوت کاویتاسیون ناشی از سرعت جریان سیال و کاویتاسیون در اثر انتشار موج فشاری در سیال را بیان نموده اند. در حالت اول کاویتاسیون بدلیل سرعت بالای جریان که موجب کاهش موضعی فشار مطلق سیال با توجه به هندسه مجرای سیال می‌گردد، رخ خواهد داد. در این حالت کاویتاسیون ماهیت نوسانی داشته و انهدام حبابهای بخار در نواحی از جریان با سرعت بالا موجب خرابی مجرای جریان سیال خواهد گردید. در حالت دوم کاویتاسیون بدلیل انتشار موج فشاری در داخل سیال و انبساط سریع سیال رخ می‌دهد. از ویژگی‌های حالت اخیر نواحی کاویته شده مجزا از هم در محیط مایع می‌باشد. روش مدل‌سازی عددی سیال کاویته شده مشابه تکنیک‌های عددی مدل‌سازی ترک در صخره سنگی می‌باشد [۱۴]. محققین با تکنیک‌های عددی مختلفی اثرات کاویتاسیون بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی را مورد بررسی قرار داده اند. هر چند که مطالعات انجام شده در این خصوص بسیار محدود و اندک می‌باشند. وقوع کاویتاسیون در مخزن سدها هنگام وقوع زمین لرزه طی مطالعه تجربی صورت گرفته توسط Niwa و Clough [۳] به اثبات رسیده است. مدل رفتاری متداولی که در اغلب مطالعات عددی جهت بیان رفتار آب هنگام کاویتاسیون استفاده شده است، مدل رفتاری دوخطی ارائه شده توسط Bleich و Sandler [۱۵] می‌باشد. با استفاده از این مدل رفتاری، Zienkiewicz و همکاران [۱۳]، Chu-Han و Clough [۱]، Fenves و همکاران [۱۱]، Hall و El-Aidi [۸]، Hamdan [۹]، Oskouei و همکاران [۱۰] و در نهایت Ross و همکارانش [۱۶] به مدل‌سازی عددی این پدیده و بررسی موضوع پرداخته اند. در ادامه بررسی اجمالی در خصوص نتایج بدست آمده از برخی از مطالعات فوق ارائه می‌گردد. Chang و Clough [۱] دو روش برای مدل سازی عددی اندرکنش سازه سیال بهمراه کاویتاسیون بکار برده اند:

۱- تقریب جرم افزوده^۶

۲- فرمولاسیون اجزاء محدود با متغیر مستقل فشار در قلمرو سیال با صرفنظر از تراکم پذیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق بصورت جداشدگی مابین سد و مخزن و ضربه مخزن بر وجه بالادست سد بیان گردیده است و نشان داده شده است که ضربه ناشی از انهدام ناحیه کاویته شده در مجاورت سطح بالادست سد موجب افزایشی در تنشهای کششی در بخش فوقانی سد تا حدود ۲۰-۴۰ درصد می‌گردد. در این بررسی از تراکم پذیری آب صرفنظر شده است. جهت مدل سازی دقیقتر کاویتاسیون، تراکم پذیری سیال نیز بایستی در فرمولبندی منظور گردد چنین فرمولبندی توسط Zienkiewicz و همکاران [۱۳]، در مطالعه رفتار لرزه‌ای

وزن مخصوص رسوبات و v_s سرعت انتشار صوت در رسوب می‌باشد.

- شرط مرزی سطح آزاد مخزن:

در معادله (۱۱)، g شتاب ثقل و n امتداد نرمال بر مرز می‌باشد.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (11)$$

- شرط مرزی انتهایی:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\frac{1}{v_w} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

این شرط مرزی با این فرض که مخزن به میزان کافی طولی بوده و امواج فشاری ایجاد شده در مخزن سد در انتهای آن بصورت موج سطحی که در انتشار بسمت بالادست مخزن مستهلک می‌شوند حاصل می‌گردد. این شرط مرزی، شرط مرزی سامرفلد^{۱۴} نامیده می‌شود. در معادله (۱۲) n راستای نرمال بر سطح مرزی می‌باشد.

- شرط مرزی سطح تماس سد مخزن:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_{f0} \cdot (\ddot{u}_g + \ddot{u}_a)_n \quad (13)$$

$$= -\rho_{f0} \cdot (\ddot{u}_{total})_n$$

$(\ddot{u}_{total})_n$ شتاب کلی سازه در امتداد نرمال بر فصل مشترک سازه و سیال، امتداد n ، می‌باشد.

مدل رفتاری کاویتاسیون

مایعات قادر به تحمل فشارهای منفی بسیار ناچیز در حد فشار بخار اشباع می‌باشند و در اکثر حالات فرض می‌شود که مایع توانایی تحمل هیچ فشار منفی را ندارد. حال چنانچه فشار مطلق مایع که با لحاظ فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی و فشار اتمسفر حاصل می‌گردد، صفر و یا مقداری منفی گردد، حبابهایی در مایع پدیداری می‌شود در این صورت سیال کاویته خواهد بود. در چنین وضعیتی رابطه مابین فشار و دانسیته مایع تغییر یافته و مدول بالک مماسی^{۱۵} مایع، K ، به صفر تمایل خواهد یافت. زمانی که فشار مطلق مایع به مقداری مثبت برسد، مایع مجدداً به وضعیت اولیه غیر کاویته بازگشته و مقدار اولیه مدول بالک مایع مجدداً جهت تعریف رابطه مابین فشار و جرم حجمی قابل استفاده خواهد بود [۲۰]. دانسیته مایع در طی چنین پدیده‌ای بطور محسوسی بودن تغییر باقی می‌ماند. در روش ترکیبی مورد استفاده در تحقیق حاضر چنانچه فشار مطلق مایع در مرکز هر المان محیط مایع کمتر از فشار بخار آن باشد $K=0$ و در غیر اینصورت $K = \rho_w \cdot C_w^2$ خواهد بود. اعمال چنین مدل رفتاری نیازمند اعمال تغییرات قابل توجهی در فرمولبندی معادله حرکت محیط سیال در یک پروسه آنالیز سیستم کوپله سد مخزن می‌باشد [۱۶]. علاوه بر اصلاح سختی

بنابراین معادله انتشار موج فشاری غیرخطی بصورت

زیر خواهد بود:

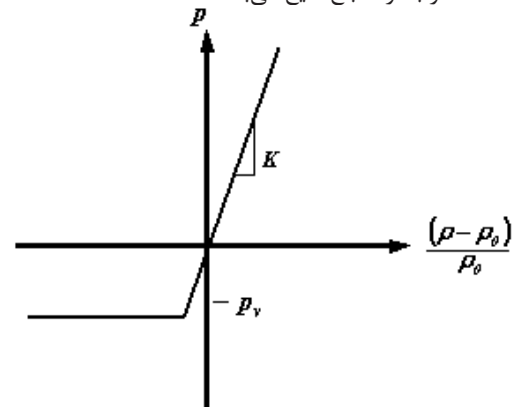
$$\alpha(p) \cdot \nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (6)$$

عبارت $\alpha(p)$ در معادله رفتاری (۳) بصورت زیر

تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \alpha(p) = C_w^2 & p \geq -p_s \\ \alpha(p) = -p_s / \rho & p \leq -p_s \end{cases} \quad (7)$$

C_w سرعت صوت در آب خاص (بدون کاویتاسیون) و p_s فشار بخار اشباع مایع می‌باشند.



شکل ۱: معادله رفتار دو خطی سیال

شرایط مرزی محیط مخزن

به دلیل بررسی وقوع کاویتاسیون سرعت انتشار صوت در المان سیال به کاویته بودن و یا نبودن المان سیال بستگی خواهد داشت. این مسئله باید بنحوی در معادلات حاکم و شرایط مرزی و پروسه حل اعمال گردد. بنابراین در سرعت انتشار صوت در آب را با رابطه زیر نمایش می‌دهیم:

$$v_w(p) = \sqrt{\alpha(p)} \quad (8)$$

باید توجه داشت چنانچه هریک از المان‌های سیال واقع بر مرزهای مخزن کاویته باشد سرعت صوت از رابطه فوق محاسبه می‌شود.

- شرط مرزی دیواره و کف مخزن:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho_{f0} \cdot a_n - \frac{1}{\kappa \cdot v_w} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (9)$$

در این رابطه κ پارامتر میرایی جهت اعمال اثرات لایه‌های رسوبی کف مخزن در جذب انرژی سیستم می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{1-q}{1+q} = \frac{1 - \frac{\rho v_w}{\rho_s v_s}}{1 + \frac{\rho v_w}{\rho_s v_s}} = \frac{1}{K} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} [G] \cdot \ddot{P} + [D] \cdot \dot{P} + [H] \cdot P &= -\Phi \cdot [Q]^T \{ \ddot{u}_a + \ddot{u}_g \}_n \quad (17) \\ \Phi &= \rho_{f0} \cdot \alpha(p) \end{aligned} \right.$$

در معادله (۱۷) $[G]$ ماتریس شبه جرم محیط سیال می باشد که شامل جرم ناشی از امواج سطحی مخزن نیز است. $[D]$ ماتریس شبه میرایی محیط مخزن می باشد که ناشی از میرایی تناسبی و میرایی ناشی از مرزهای محیط مخزن است و $[H]$ ماتریس شبه سختی محیط سیال است. $[Q]$ ماتریس کوپله محیط سازه و سیال می باشد که شتابهای گرهی اعمالی از سازه بر مخزن و همچنین بار فشاری ناشی از فشار هیدرودینامیکی مخزن بر سد را در امتداد فصل مشترک دو محیط منتقل می سازد، این ماتریس توسط رابطه زیر مشخص می شود:

$$[Q] = \int_{\Gamma_s} \alpha(p) [N_s] n [N_f]^T d\Gamma \quad (18)$$

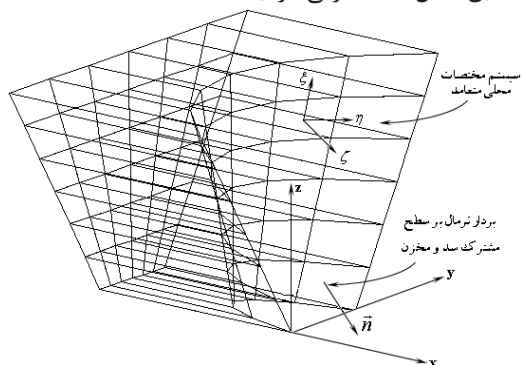
در رابطه (۱۸) N_s و N_f به ترتیب توابع شکلی محیط سیال و سازه می باشند و n امتداد نرمال بر فصل مشترک دو محیط و Γ_s سطح تماس سد و مخزن را مشخص می سازند.

گسسته سازی معادله حرکت محیط سازه

با استفاده از روش اجزاء محدود استاندارد بر پایه تغییر مکانهای گرهی قلمرو سازه، می توان با روشی مشابه روش توضیح داده شده در بخش قبل معادله حرکت محیط سازه را بصورت ماتریسی زیر بیان نمود:

$$[M] \cdot \ddot{U} + [C] \cdot \dot{U} + [K] \cdot U = -[M] \{ \ddot{u}_g \} + [Q] \{ P \} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) $[K]$ ، $[C]$ و $[M]$ به ترتیب ماتریسهای سختی، میرایی و ماتریس جرم محیط سازه بوده و $\{ \ddot{u}_g \}$ شتاب پایه اعمالی بر سازه و $\{ P \}$ بردار فشار هیدرودینامیکی موثر بر وجه بالادست سد می باشند. در مطالعه حاضر از میرایی تناسبی رایلی برای لحاظ میرایی ناشی از مصالح محیط سازه استفاده گردیده است. در مدل سازی بدنه انحنا دار سد قوسی، دستگاه مختصات محلی مطابق شکل (۲) معرفی گردیده است.



شکل ۲: دستگاه مختصات محلی متعامد در فصل مشترک سد قوسی و مخزن و بردار نرمال

المان مایع کاویته شده با روش توضیح داده شده، در هر گام زمانی کنترلی بر روی فشار مطلق گرهی برای هر یک از گره های محیط مایع صورت می پذیرد چنانچه فشار مطلق در گره کمتر از فشار بخار اشباع آن باشد، فشار مطلق در آن گره برابر فشار بخار اشباع مایع فرض می گردد. در فرمولاسیون ارائه شده برای مدل سازی کاویتاسیون امکان اعمال میرایی عددی مصنوعی^۶، متناسب با سختی محیط مایع، جهت جلوگیری و حذف نوسانات جعلی^{۱۷} عددی محتمل به معادلات حرکت محلی سیال در نظر گرفته شده است. چراکه در صورت عدم افزودن میرایی، نوسانات عددی می تواند موجب ناپایداری حل و تکه تکه شدن^{۱۸} نواحی کاویته شده گردند [۸].

گسسته سازی معادلات حرکت محیط سیال

با بکارگیری تابع وزن w و اعمال قضیه گرین بر معادله (۷) خواهیم داشت:

$$\int_{\Omega} w \cdot \ddot{p} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla w \cdot \alpha(p) \nabla p d\Omega = (14)$$

$$\int_{\Gamma} w \cdot \alpha(p) \frac{\partial p}{\partial n} d\Gamma$$

در رابطه (۱۴) مشتق زمانی مرتبه دوم فشار هیدرودینامیکی نسبت به زمان، Ω و Γ به ترتیب قلمرو مخزن و مرزهای آن می باشند. در روش اجزاء محدود کمیت مجهول در داخل هرالمان توسط مقادیر گرهی آن دورنیایی می شوند. بنابراین می توان نوشت:

$$p^e = \sum_{i=1}^{nod} N_f^i \cdot P_i \quad (15)$$

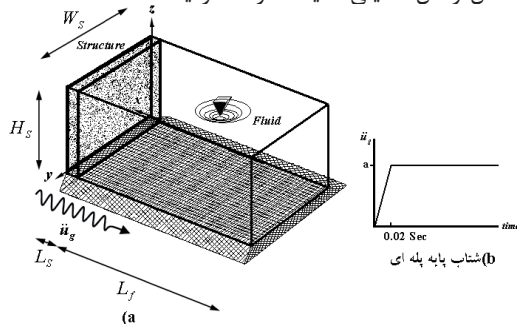
N_f^i تابع دورنیایی محیط مایع، P_i فشار دینامیکی گره i ام و nod تعداد گره ها در المان سیال می باشند. با توجه به اینکه در روش گالرکین تابع وزن با تابع دورنیایی یکسان می باشد، بنابراین می توان نوشت:

$$\left[\int_{\Omega} N_f^i N_f^j d\Omega \right] \ddot{P} + \left[\eta \int_{\Omega} \nabla N_f^i \nabla N_f^j \alpha(P_i) d\Omega \right] \dot{P} + (16)$$

$$\left[G_{ij} \right] \left[D_{ij} \right] \left[H_{ij} \right] P = \int_{\Gamma} N_f^i \alpha(P_i) \cdot \frac{\partial P}{\partial n} d\Gamma$$

در رابطه (۱۶) ضریب میرایی تناسبی افزوده شده به محیط سیال و n امتداد نرمال بر سطوح مرزی قلمرو سیال می باشند. سمت راست معادله (۱۶) شرایط مرزی محیط مخزن را در معادله تعادل دینامیکی محیط مخزن لحاظ می کند. در نهایت معادله حرکت سیال بصورت ماتریسی زیر نمایش داده می شود:

سنجی روش حل تکراری مورد استفاده برای محاسبه اثرات کوبله بر پاسخ سیستم سازه سیال با صرف نظر از وقوع کاویتاسیون در محیط مخزن است. حل تحلیلی این مسئله توسط Tsai و همکاران [۱۸] ارائه شده است. در تحقیق حاضر نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه خواهد گردید.



شکل ۳: دیواره بتنی و مخزن و پارامترهای لازم

در مدل اجزاء محدود ابعاد سازه دیوار با توجه به شکل (a۳) برابر $H_s = 180 \text{ m}$ ، $W_s = 20 \text{ m}$ و $L_s = 15 \text{ m}$ انتخاب گردیده است. طول مخزن برابر $L_f = 900 \text{ m}$ لحاظ شده است. پاسخ سیستم برای تحریک پایه پله‌ای نشان داده شده در شکل (b۳) محاسبه گردیده است. در تحلیل مدول الاستیسیته مصالح بدنه دیواره برابر 3.5×10^{10} کیلوگرم بر مترمربع و ضریب پواسون برابر 0.2 وزن مخصوص 2400 کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت موج در آب 1440 متر در ثانیه و وزن مخصوص آب برابر 1000 کیلوگرم بر متر مکعب منظور شده است. در شکل (a۴) مقایسه‌ای ما بین نتایج حاصل با حل تحلیلی و برای تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک ارائه شده است. ضریب فشار هیدرودینامیک $\left(C_0 = \frac{P_{Dynamic}}{\rho \cdot g \cdot H} \right)$ با فرض صلب بودن دیواره در نهایت به عدد 0.748 میل می‌کند که نشان دهنده دقت مناسب روش ارائه شده می‌باشد در مقایسه با حل دقیق C_0 برابر 0.7425، می‌باشد. در شکل (b۴) تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک در مجاورت کف مخزن برای ابعاد طولی مختلف مخزن ارائه شده است. در شکل (a۵) و (b۵) نتایج حاصل برای پاسخ سیستم دیوار انعطاف پذیر مخزن با حل تحلیلی مقایسه گردیده است که گویای دقت مناسب روش پیشنهادی می‌باشد. در شکل (a۶) و (b۶) مقایسه‌ای مابین تاریخچه زمانی پاسخ سیستم دیوار-مخزن برای دو حالت دیوار صلب و دیوار انعطاف پذیر ارائه شده است. همانطوریکه در اشکال (۶) مشاهده می‌شود، لحاظ اندرکنش مابین سازه و سیال مجاور موجب کاهش تغییرمکان حداکثر دیوار گردیده گردد و صلب فرض نمودن دیوار موجب خطای قابل توجهی در پیش بینی رفتار دینامیکی سازه در مجاورت محیط سیال می‌گردد.

روش حل مجزای معادلات تعادل دینامیکی محیط‌های سازه و سیال

در تحقیق حاضر روش حل تکراری جهت حل مجزای معادلات تعادل دینامیکی محیط‌های سازه و سیال بمنظور اعمال اثرات کوبله سیستم سد مخزن توسعه داده شده است. در این روش در هر گام زمانی t ، فشار هیدرودینامیکی با حل معادله (۱۷) و با اعمال شرایط مرزی مناسب برای محیط مخزن تعیین می‌گردد. فشار دینامیکی محاسبه شده، موجب اعمال نیروی فشاری بر سازه مجاور خواهد گردید لذا معادله تعادل دینامیکی محیط سازه، معادله (۱۹)، با لحاظ نیروی فشاری دینامیکی حل می‌گردد. با اعمال این نیرو، تغییرمکان محیط سازه نیز تغییر خواهد نمود و در نتیجه سطح مشترک سازه-سیال نیز دچار تغییر شکل خواهد گردید. در اثر این تغییر شکل اضافی توزیع فشار دینامیکی نیز در مخزن تغییر خواهد نمود. پروسه حل تکراری معادلات محیط‌های سازه و سیال تا ارضاء شرایط همگرایی مشخصی که با عبارت زیر بیان می‌شود، ادامه خواهد یافت.

$$(20) \quad \frac{\| \Delta P^k \|}{\| P^{k+1} \|} \leq \epsilon_f, \quad \frac{\| \Delta u^k \|}{\| u^{k+1} \|} \leq \epsilon_s$$

در رابطه (۲۰)، ϵ_f و ϵ_s به ترتیب رواداری‌های مجاز محیط‌های سازه و سیال می‌باشند، که در این مطالعه برابر 10^{-3} فرض شده اند. در عبارت (۲۰) k شماره‌دهنده گام‌های تکرار در هر گام زمانی و $\| u \|$ و $\| P \|$ به ترتیب نرم اقلیدسی^{۱۹} بردار تغییرمکان و بردار فشار دینامیکی را مشخص می‌سازند. در مطالعه حاضر برای انتگرال گیری زمانی معادلات محیط‌های سازه و سیال از روش استاندارد نیومارک و با لحاظ ضرایب انتگرال گیری Newmark برابر $(\beta_{int} = 0.25, \alpha_{int} = 0.5)$ استفاده شده است.

مثالها

برنامه رایانه‌ای با استفاده از زبان برنامه نویسی FORTRAN جهت حل معادله تعادل دینامیکی خطی سد و معادله تعادل دینامیکی غیرخطی قلمرو مخزن در هر گام زمانی، تهیه گردیده است، بطوریکه برنامه تهیه شده شامل دو حل گر مجزا می‌باشد: حل گر معادله تعادل دینامیکی محیط سازه و حل گر معادله تعادل دینامیکی محیط سیال. نتایج ارائه شده در مثالهای زیر توسط برنامه تهیه شده بدست آمده است.

مثال اول: صحت سنجی روش پیشنهادی جهت حل معادلات تعادل دینامیکی درگیر محیط سازه و سیال

اولین مثال موردی سیستم ساده دیوار-مخزن با مقطع مستطیلی مطابق شکل (۳) می‌باشد. هدف از این مثال صحت

مثال دوم: صحت سنجی مدل کاویتاسیون پیشنهادی

در این مثال پاسخ پیستونی که تحت ارتعاش هارمونیک (سینوسی) و در مجاورت ستون سیال واقع گردیده است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پیستون مورد نظر که در شکل (۷) نمایش داده شده است، شامل مجرای مکعبی شکلی می‌باشد که یک سر آن توسط کلاهک انعطاف پذیر مسدود گردیده و فرض گردیده که انتهای دیگر آن تا بی نهایت امتداد می‌یابد. این مثال توسط Fenves و همکاران [۱۱] بطور عددی مورد بررسی قرار گرفته است و در اینجا جهت بررسی صحت مدل کاویتاسیون پیشنهادی مجدداً ارائه گردیده است. لذا جهت امکان مقایسه نتایج سعی گردیده است که داده‌های ورودی و شرایط تحلیل تا حد امکان مطابق یکدیگر باشند. لذا سازه کلاهک بنحوی مدل گردیده که دارای جرمی برابر ۸۵۶ تن و فرکانس ارتعاش طبیعی آن برابر ۳۰ رادیان بر ثانیه باشد. دارازی ستون سیال برابر ۲۷۰ متر بوده و در انتهای آن مرز جذبی قرار داده شده است. سرعت انتشار صوت در آب برابر ۱۴۴۰ متر در ثانیه و جرم مخصوص آن برابر ۱ تن بر مترمکعب لحاظ گردیده اند. فشار بخار اشباع آب برابر صفر منظور گردیده است ($p_v = 0$). گام زمانی مورد استفاده در تحلیل برابر ۰/۰۰۵ ثانیه انتخاب شده است. پاسخ سازه انتهای (کلاهک) در شکل (۸) بصورت تاریخچه زمانی فشار دینامیکی در مجاورت سازه و تغییر مکان نسبی مرکز کلاهک نمایش داده شده است. نتایج حاکی از انطباق مناسب جواب‌های حاصل از روش پیشنهادی و روش ارائه شده در مرجع [۱۱] می‌باشد. سیال در مجاورت فصل مشترک دو محیط زمانی که حرکت سازه بسمت پایین دست موجب ایجاد فشار منفی می‌گردد، کاویته می‌شود. بمجرد اینکه جهت حرکت سازه عکس می‌شود، نواحی کاویته شده متلاشی گردیده و موجب ایجاد امواج فشاری با پیک بزرگتر نسبت به حالتی که رفتار خطی برای سیال منظور گردد، می‌گردد. بطور واضحی کاویتاسیون موجب کاهش تغییر مکان بسمت بالادست و افزایش جزئی در تغییر مکان بسمت پایین دست موجب می‌گردد. تفاوت‌های موجود در نتایج ناشی از تفاوت در فرضیات اولیه در تعریف مسئله و نحوه مدل‌سازی آن می‌باشد. جهت حذف نوسانات عددی ناشی از مدل‌سازی کاویتاسیون در روش ارائه شده در مرجع [۱۱] از مقدار اندکی میرایی مصنوعی متناسب با سختی محیط سیال استفاده گردیده است، ولی در روش پیشنهادی نوساناتی در پاسخ سیستم هنگام وقوع کاویتاسیون مشاهده نگردید.

مثال سوم: بررسی اثرات ناشی از کاویتاسیون مخزن بر رفتار دینامیکی سد بتنی وزنی

در این مثال پاسخ دینامیکی سد وزنی با ابعاد

نمایش داده شده در شکل (۹) در اثر شتاب افقی زمین مولفه شمالی- جنوبی زلزله ال سنترو با شتاب ماکزیممی برابر ۰.۳۲g، بررسی شده است. در این تحلیل مدول الاستیسیته بتن برابر 3.43×10^6 تن بر متر مربع و با وزن مخصوص ۲.۴ تن بر متر مکعب و ضریب پواسون بتن برابر ۰.۲ منظور شده است. وزن مخصوص آب برابر ۱.۰ تن بر مترمکعب و سرعت صوت در آب ۱۴۴۰ متر بر ثانیه می‌باشد. در مدل اجزاء محدود بکار گرفته شده در تحلیل سیستم سد وزنی مخزن که در شکل (۹b) نمایش داده شده است از ۱۴۴ المان شش وجهی ۲۰ گرهی با ۹۰۳ گره جهت مدل‌سازی سد وزنی و از ۶۴۸ المان شش وجهی ۸ گرهی با ۹۸۸ گره استفاده شده است. به منظور لحاظ میرایی مصالح تشکیل دهنده سد ضرایب میرایی تناسبی رایلی بگونه‌ای تعیین شده اند که میرایی معادل اولین مد ارتعاشی سد برابر ده درصد میرایی بحرانی آن گردد. در طی محاسبات فشار مطلق در مرکز هر المان سیال در هر گام زمانی محاسبه می‌گردد. از فشار اتمسفر در محاسبه فشار مطلق صرف‌نظر شده است. نتایج تحلیل دینامیکی انجام شده برای مولفه افقی شتاب زمین در طی زمین لرزه ال سنترو در شکل (۱۰a) ارائه شده است. برای امکان بررسی بهتر اثرات وقوع کاویتاسیون، تحلیل مجدداً با مقیاس نمودن شتاب ماکزیمم زمین برابر $a_{max} = 1.0g$ صورت پذیرفته است. نتایج حاصل برای این حالت در شکل (۱۰b) نمایش داده شده است. اولین المانهایی از سیال که در محیط مخزن کاویته می‌شوند، در مجاورت سطح تماس سد و مخزن و در بخش فوقانی مخزن قرار دارند. این موضوع با توجه به اندک بودن فشار هیدرواستاتیک و جداشدگی سازه و سیال در این ناحیه منطقی بنظر می‌رسد. بررسی تنش در مرکز المان (A) در مجاورت تاج سد نشان دهنده عدم تغییر در سطح تنش در این المان برای سطح شتاب پایه $a_{max} = 0.32g$ در اثر ایجاد کاویتاسیون در مخزن می‌باشد، ($\sigma_x = -9.24 \text{ kg/cm}^2$) می‌باشد. تنش ماکزیمم مذکور در مقطع زمانی $t = 2.0 \text{ sec}$ ایجاد می‌شود. ولی با افزایش سطح شتاب پایه تا حد $a_{max} = 1.0g$ افزایشی در حدود ۲۲ درصد در تنش مرکز المان در اثر کاویتاسیون مشاهده می‌شود این افزایش در تنش پس از ایجاد اولین ناحیه کاویته شده در مخزن و در مقطع زمانی $t = 2.53 \text{ sec}$ رخ می‌دهد، بنظر می‌رسد معکوس شدن جهت ارتعاش سازه سد و متلاشی شدن ناحیه کاویته شده و ایجاد موج ضربه‌ای موجب این افزایش باشد البته توجه به این نکته ضروری است که افزایش در تنش بطور کاملاً مقطعی بوده و توزیع تنشها در کل افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهند.

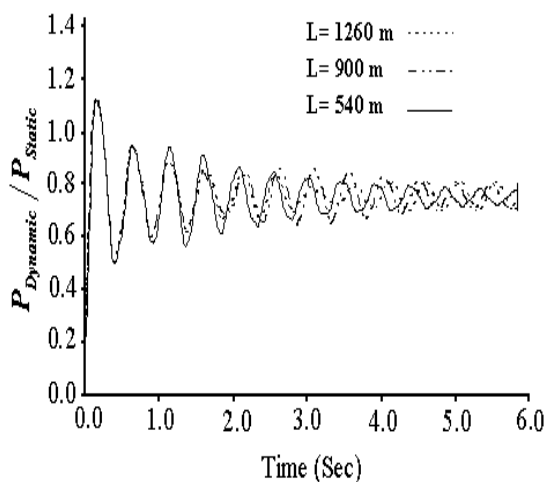
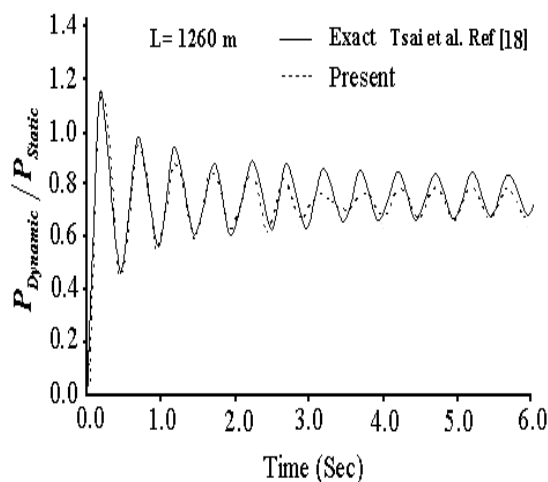
جمع بندی و نتایج

در تحقیق حاضر روشی با استفاده از اجزاء محدود جهت مدل‌سازی کاویتاسیون آکوستیکی در مسائل مرتبط با اندرکنش سازه سیال ارائه گردیده است. هرچند که تاکید و تمرکز تحقیق حاضر بر سدهای بتنی و تاثیر کاویتاسیون بر پاسخ لرزه‌ای چنین سازه‌هایی می‌باشد، ولی روش پیشنهادی قابل توسعه و استفاده در سایر مسائل مرتبط با اندرکنش سازه و سیال آکوستیکی می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه حاضر دلالت بر کاهش پاسخ سیستم سد بتنی مخزن در اثر لحاظ وقوع کاویتاسیون در مخزن و عدم تاثیر قابل ملاحظه کاویتاسیون بر رفتار لرزه‌ای سیستم سد بتنی مخزن دارد. باید توجه داشت که نتیجه فوق در مورد پاسخ دینامیکی سدهای بتنی بدست آمده است و تاثیر کاویتاسیون بر رفتار دینامیکی سایر مسائل مرتبط با اندرکنش سازه و سیال نیاز به بررسی بیشتری دارد. هرچند که نتایج بدست آمده گویای دقت مناسب استفاده از مدل رفتاری دوخطی سیال جهت بررسی اثرات کاویتاسیون در پدیده‌های اندرکنش سازه سیال می‌باشد ولی در این مدل رفتاری برخی قوانین اولیه بقاء نقض گردیده که موجب بروز مشکلات عددی همچون ایجاد نوسانات عددی می‌گردد.

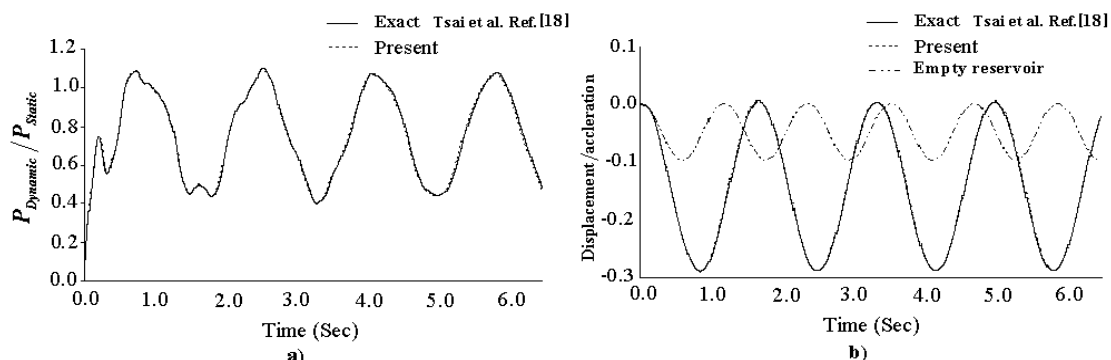
لذا در ادامه تحقیق حاضر بکارگیری مدل رفتاری واقعی تری برای سیال در هنگام کاویتاسیون بر مبنای ایجاد محیط‌های چند فاز، مد نظر قرار گرفته است. استفاده از فرمولبندی محیط سیال برحسب متغیر گرهی فشار دینامیکی موجب سهولت در مدل‌سازی و کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت با محاسبه مستقیم فشار دینامیکی می‌گردد، این روش از انعطاف پذیری بیشتری در مقایسه با سایر روشهای مدل‌سازی محیط سیال برخوردار است.

مثال چهارم: بررسی اثرات ناشی از کاویتاسیون مخزن بر رفتار دینامیکی سد بتنی قوسی

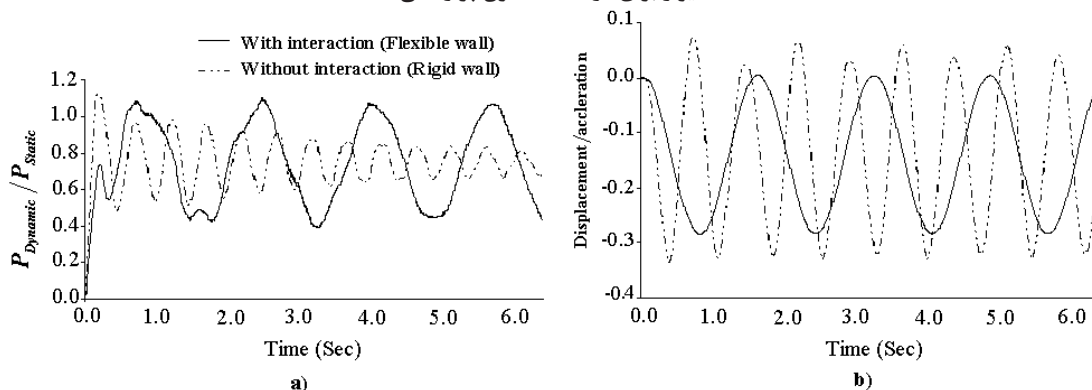
هدف اصلی مثال حاضر بررسی رفتار لرزه‌ای سد بتنی قوسی هنگام وقوع زمین لرزه در شرایط وقوع کاویتاسیون در مخزن می‌باشد. بهمین منظور سد بتنی قوسی Morrow Point واقع بر رودخانه Gunnison در ایالت کلرادو در آمریکا مدل گردیده است. ابعاد و مدل اجزاء محدود سیستم سد قوسی و مخزن در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. پاسخ دینامیکی سد قوسی برای تحریک پایه مولفه افقی شتاب زمین در طی زمین لرزه ال سنترو بررسی شده است. سد قوسی مورد نظر دارای ارتفاعی برابر با $H_{\text{height}} = 140 \text{ m}$ می‌باشد. جهت بررسی بهتر اثرات کاویتاسیون مولفه‌های افقی شتاب زمین در زلزله ال سنترو تشدید شده است و تحلیل برای دو سطح تشدید شده با ماکزیمم شتاب‌های $a_{\text{max}} = 0.64 \text{ g}$ و $a_{\text{max}} = 1.0 \text{ g}$ صورت پذیرفته است. مشخصات مصالح در این مثال همانند مثال سوم می‌باشند. در مدل اجزاء محدود بدنه سد ۲۰۰ المان شش وجهی ۲۰ گرهی با ۱۲۶۵ گره بکار برده شده و در امتداد ضخامت بدنه سد از دو لایه المان استفاده شده است. مدل اجزاء محدود مخزن با استفاده از ۱۲۰۰ المان شش وجهی ۸ گرهی با ۱۵۷۳ گره ساخته شده است. بمنظور اعمال شرایط رسوبات کف مخزن و دیواره‌های سنگی کناری مخزن $\beta_{\text{bottom}} = 3$ و $\beta_{\text{right bank}} = \beta_{\text{left bank}} = 5$ منظور شده اند. نتایج بدست آمده در اشکال (۱۲) و جدول (۱) خلاصه شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده عدم تاثیر قابل ملاحظه کاویتاسیون مخزن بر رفتار لرزه‌ای سد قوسی می‌باشد با دقت در نتایج مشاهده می‌شود که وقوع کاویتاسیون موجب کاهش جزیی در ماکزیمم تغییر مکان تاج سد قوسی می‌گردد.



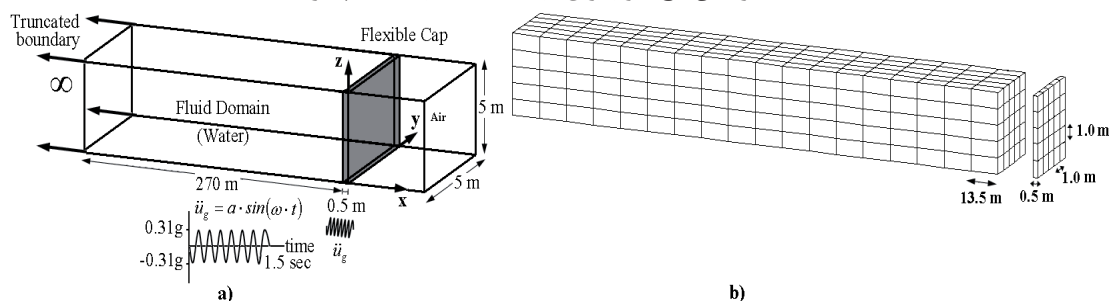
شکل ۴: تاریخچه زمانی پاسخ فشار هیدرو دینامیکی در پایه دیوار صلب (a) مقایسه با حل تحلیلی (b) تاثیر بعد طولی مخزن بر پاسخ فشار هیدرو دینامیکی



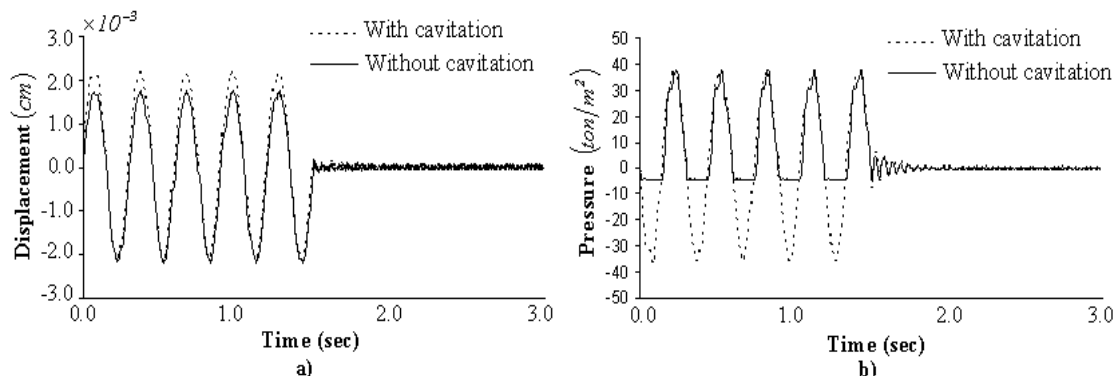
شکل ۵: تاریخچه زمانی (a) فشار هیدرودینامیکی بر دیوار انعطاف پذیر در کف مخزن در مجاورت پایه دیوار، (b) تغییر مکان تاج دیوار برای دو حالت مخزن پر و خالی



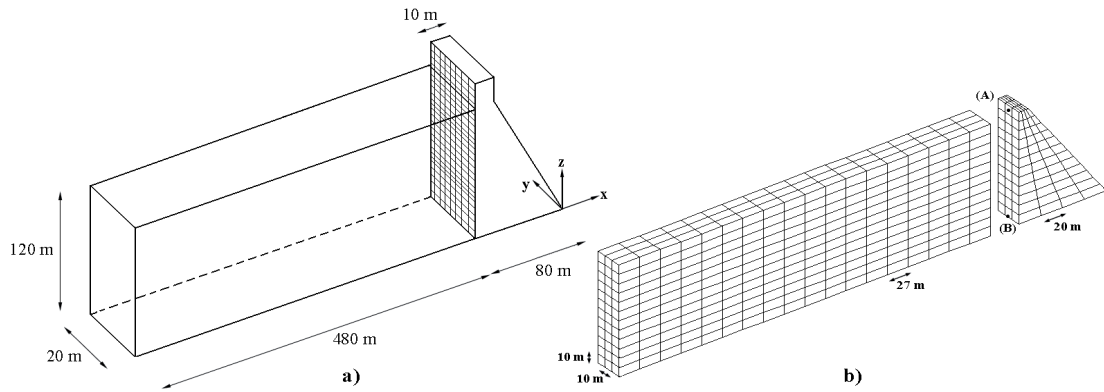
شکل ۶: تاریخچه زمانی (a) فشار هیدرودینامیکی بر دیوار در کف مخزن در مجاورت پایه دیوار در دو حالت صلب و انعطاف پذیر، (b) تغییر مکان تاج دیوار برای دو حالت صلب و انعطاف پذیر



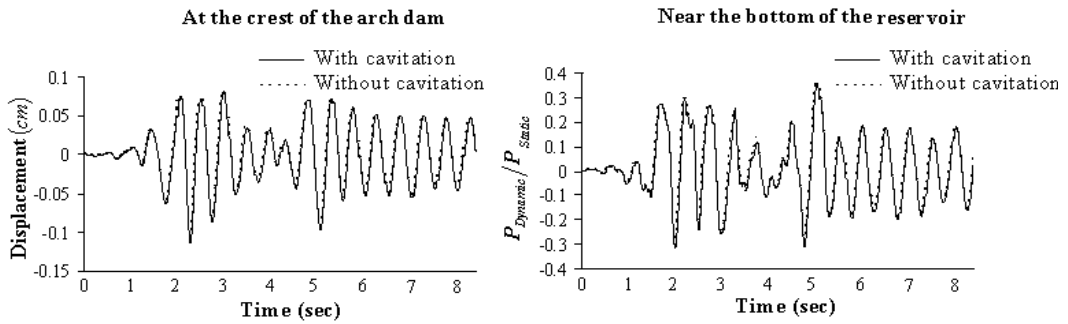
شکل ۷: (a) سیستم پیستون شامل ستون سیال بی نهایت و کلاهک انتهایی، (b) شبکه اجزاء محدود سازه کلاهک و ستون سیال



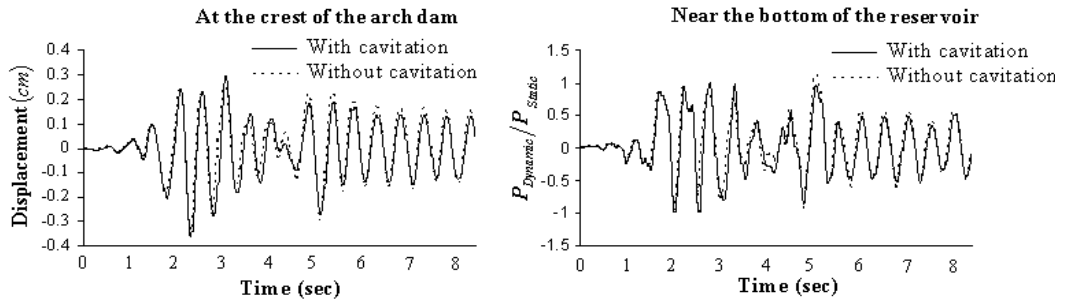
شکل ۸: (a) تاریخچه زمانی تغییر مکان وسط کلاهک، (b) تغییرات زمانی فشار دینامیکی در مجاورت مرکز کلاهک



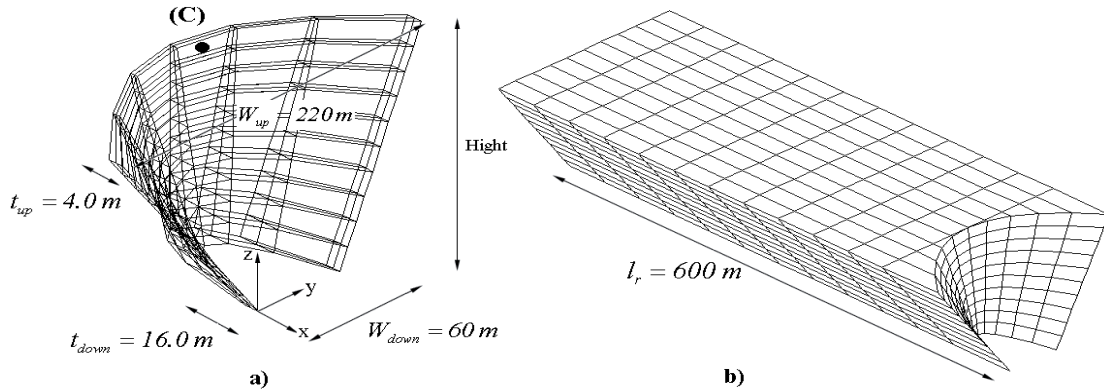
شکل ۹: ابعاد هندسی سیستم سد وزنی مخزن، (b) شبکه اجزاء محدود محیط سد وزنی و مخزن در مثال سوم
a) $a_{max} = 0.32g$



b) $a_{max} = 1.0g$



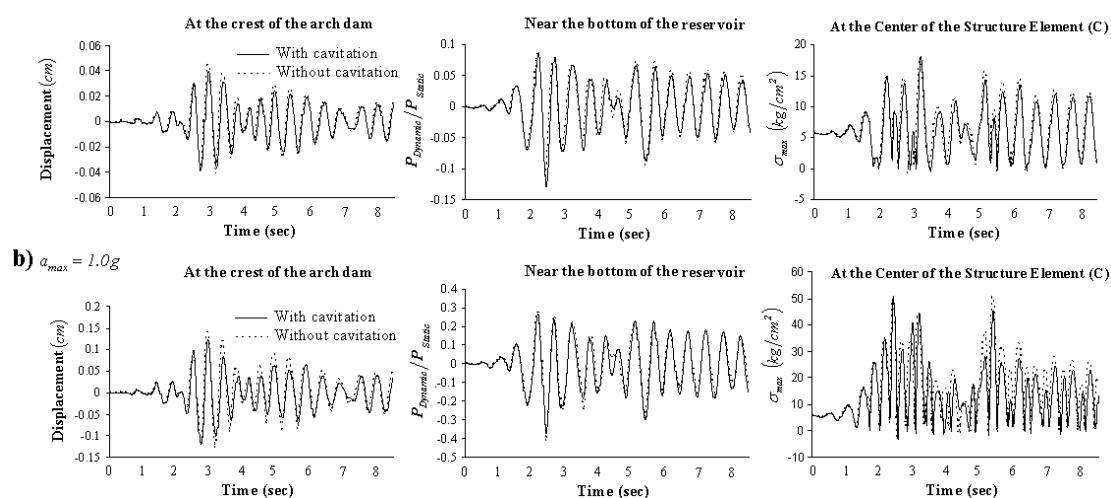
شکل ۱۰: مقایسه تاریخچه پاسخ سیستم بتنی مخزن برای دو سطح تراز لرزه‌ای مختلف مولفه افقی زمین لرزه ال سنترو
 $a_{max} = 1.0g$ (b) $a_{max} = 0.32g$



شکل ۱۱: ابعاد هندسی و مدل اجزاء محدود سد بتنی قوسی، (b) شبکه اجزاء محدود محیط مخزن

جدول ۱: مقایسه پاسخ دینامیکی برای سد قوسی با ارتفاع ۱۴۰ متر برای ترازهای مختلف شتاب حداکثر زمین لرزه ال سنترو

	Hight = 140 m					
	$a_{max} = 0.32g$		$a_{max} = 0.64g$		$a_{max} = 1.0g$	
	With Cavitaition	Without Cavitaition	With Cavitaition	Without Cavitaition	With Cavitaition	Without Cavitaition
Max. Crest Dis. (cm)	3.95	4.5	7.9	9.0	12.3	14.2
$(C_0)_{max}$	0.12	0.13	0.24	0.26	0.37	0.42
σ_{max} (kg/cm^2)	17.8	18.2	29.9	30.6	50.8	50.5



شکل ۱۲: مقایسه تاریخچه پاسخ سیستم سد بتنی قوسی مخزن برای دو سطح تراز لرزه‌ای مختلف مولفه افقی زمین لرزه ال سنترو

$a_{max} = 1.0g$ (b) ، $a_{max} = 0.32g$ (a)

مراجع

- 1- Clough, R. W., Chang, C. H. (1984). "Seismic cavitation effects on gravity dam reservoirs." Numerical methods in coupled systems, R. W. Lewis, P. Bettess, and E. Hinton, Eds., Wiley, Chichester, U.K., PP. 571-598.
- 2- Hall, J. F. (1986). "Study of the earthquake response of pine Flat Dam." Earthq. Engrg. Struct. Dyn., Vol. 14, No. 2, PP. 281-295.
- 3- Niwa, A., Clough, R. W. (1980). "Shaking table research on concrete dam models." Report No. UCB/EERC-80/05, Earthquake Engineering Research Center, University of Californian, Berkeley, Calif.
- 4- Zienkiewics, O. C. Bettess, P. (1987). "Fluid-structure dynamic interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment." Int. J. Numer. Methods Engrg., Vol. 13, No. 1, PP.1-16.
- 5- Saini, S. S., Bettess, P. and Zienkiewicz, O. Z. (1978). "Coupled hydrodynamic response of concrete dams using finite and infinite elements." Engrg. Struct. Dyn., Vol. 6, No. 4, PP.363-374.
- 6- Newton, R. E. (1980). "Finite element analysis of shock-induced cavitation." ASCE, Spring Convention, Preprint 80-110.
- 7- Everstine, G. C. (1981). "A symmetric potential formulation for fluid-structure interaction." J. Sound

- Vib. Vol. 79, No. 1, PP. 157–160.
- 8- B. El-Aidi, B., Hall, J. H. (1989). “Non-linear earthquake response of concrete gravity dam.” *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.* Vol.186, PP. 837-65.
- 9- Hamdan., F. H. (1999). “Near-field fluid-structure interaction using Lagrangian fluid finite elements.” *Computers and Structures*, Vol. (71), PP.123-141.
- 10- Oskouei, A. V., Demagogue, A. A. (2001). “Nonlinear dynamic response of concrete gravity dams: cavitation effect.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, PP. 99–112.
- 11- Fenves, G., Vargas-Loli, L. M. (1988). “Nonlinear Dynamic Analysis of Fluid-Structure Systems.” *J. Engrg. Mech.*, Vol. 114, PP. 219-240.
- 12- Taylor, R. L., Zienkiewicz, O. C. (1984). “Mixed finite element solution of fluid flow problems.” *Finite elements in fluids*, R. H. Gallagher, R. H. Norrie, J. T. oden, and O. C. Zienkiewicz, eds., Vol. 4, Wiley, Chichester, U. K., PP. 1-20.
- 13- Zienkiewicz, O. C., Paul, D. K., and Hinton., E. (1983). “Cavitation in fluid-structure response (with particular reference to dams under earthquake loading).” *Engrg. Struct. Dyn.*, Vol. 11, PP. 463-481.
- 14- Zienkiewicz, O. C., Valliappan, S., King. I.P. (1968). “Stress analysis of rock as a no tension material.” *Geotechnique*, Vol. 18, PP. 56-66.
- 15- Bleich, H. H., Sandler, I. S. (1970). “Interaction between structures and bilinear fluids.” *International Journal of Solids and structures*, Vol. 6, PP.617-639.
- 16- Ross, M. R., Sprague, M. A., Felippa, C. A., Par, K. C. (2009). “Treatment of acoustic fluid-structure interaction by localized Lagrange multipliers and comparison to Alternative interface-coupling methods.” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 198, PP.986-1005.
- 17- Fok, K. L., Chopra, A. K. (1986). “Hydrodynamic and foundation flexibility effects in earthquake response of arch dam.” *ASCE, J. Struct. Engrg.*, Vol.112, No. 1, PP.1810-1828.
- 18- C. S., Tsai., Lee. G. C., Ketter, R. L. (1990). “A semi-analytical method for time domain analysis for dam-reservoir interactions.” *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, Vol.29, PP. 913-933.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1- Acoustic cavitation | 11- Navier-Stokes |
| 2- Shock wave | 12- Linearized equation |
| 3- Finite Element | 13- Equation of state |
| 4- Absolute pressure | 14- Sommerfeld boundary condition |
| 5- Fluid-structure interaction | 15- Tangential bulk Modules |
| 6- Added mass | 16- Artificial damping |
| 7- Eulerian-Lagrangian method | 17- Spurious oscillation |
| 8- coupled analysis | 18- Fragmentation |
| 9- Partition solution method | 19- Euclidian norm |
| 10- Convection | |