

بررسی تحلیلی فشار هیدرو دینامیک وارد بر سدهای بتنی قوسی تحت نیروی زلزله

شاهین شمسی نژاد بابکی^۱، محمد جواد خانجانی^۲، محمد جواد فدایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- عضو هیئت علمی بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- عضو هیئت علمی بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان

Email:shahinshamsi@yahoo.com

Email:khanjani@yahoo.com

Email:mjfadaee@yahoo.com

چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷

خلاصه

در این مطالعه اندرکنش مخزن - سد با استفاده از روش تحلیلی برای یک سد بتنی قوسی مورد بررسی قرار گرفته است. فشار هیدرو دینامیک یکی از عوامل موثر در طراحی بدنه سد برای مناطق زلزله خیز می باشد. از جمله عواملی که بر فشار هیدرو دینامیک تاثیر می گذارد میتوان به تراکم پذیری سیال، شکل پذیری سد و پی، شکل وجه بالا دست، کف مخزن، فرکانس و جهت بارگذاری اشاره نمود. در این میان چنانچه از تراکم پذیری سیال، شرایط مرزی دوردست و شکل پذیری سد صرف نظر شود، ماهیت مسئله تغییر یافته و خطای زیادی خصوصاً در سدهای بلند ایجاد می شود. در این تحقیق برای محاسبه فشار هیدرو دینامیک، معادله موج با روشهای تحلیلی و با اعمال شرایط مرزی مشخص برای یک سد قوسی متقارن حل می شود. برای شرط مرزی دوردست از شرط انتشار سامرفیلد استفاده شده است. کف مخزن صلب و از اثر امواج سطحی نیز صرف نظر و ماهیت سیال، تراکم پذیری و غیر لزج در نظر گرفته شده است. برای مقایسه نتایج روش تحلیلی با اعمال شرایط مرزی موجود در ترازهای مختلف، از نتایج حاصل از روشهای عددی و تحلیلی سایر محققین استفاده شده است.

کلمات کلیدی: اندرکنش مخزن - سد، روش تحلیلی، فشار هیدرو دینامیک، شرط مرزی انتشار سامرفیلد، سیال تراکم پذیر.

مقدمه

نیروی زلزله، خطراتی را متوجه سدهای موجود می نماید. استفاده از روشهای تحلیلی در طراحی سدهای مقاوم در مقابل زلزله دارای اهمیت بسزایی است. تحلیل سدهای بتنی تحت بارهای دینامیکی نظیر زلزله به دلیل وجود مخزن آب نسبت به سازه های متعارف دیگر از اهمیت و پیچیدگی خاصی برخوردار می باشد. هنگام وقوع زلزله سد تحت تاثیر تحریکات به نوسان واداشته می شود. این در حالی است که حجم عظیم آب پشت سد به دلیل نیروی برشی ناچیز بین کف مخزن و محیط، مستقیماً تحت تاثیر حرکت زمین قرار نمی گیرد (احمدی، ۱۳۷۲). در اثر این ارتعاشات در محیط مخزن، امواج فشار هیدرو دینامیک ایجاد می شود که به سمت بالا دست مخزن منتشر می گردند و انرژی را با خود از محیط دور می کنند. بنا به این عملکرد فشار های هیدرو دینامیکی که در سیال مجاور سد ایجاد می شوند خود تابعی از حرکت سد می باشند. به این ترتیب دستگاه معادلات دینامیکی حاکم به حرکت سد و فشار هیدرو دینامیک از محیط سیال مستقل نبوده و به صورت کوپلی عمل می کنند. بنا براین محاسبه این فشار بروی سد های قوسی شکل از پیچیدگی خاصی برخوردار است (احمدی، ۱۳۷۲).

حل معادلات فشار با روشهای عددی احتیاج به هسته قوی کامپیوتری و زمان زیاد دارد. همچنین روشهای عددی دارای درصدی خطا نیز می باشد اما استفاده از روشهای تحلیلی و دقیق درصد خطای محاسبات را کاهش می دهد و تعمیر جوابهای بدست آمده برای دیگر مسائل راحت تر می باشد (Sun and Hadipriono, 1990). اولین بار وستر گارد (Westergar, 1933) برای سد وزنی معادلات فشار هیدرو دینامیک را محاسبه کرد و بعد از آن نیز چوپرا (Chopra, 1967) این کار را ادامه داد. در این تحقیق سعی شده است از روش تحلیلی برای یک سد قوسی استفاده شود و در انتها با بدست آوردن یک معادله فشار دقیق بتوان تاثیر اندر کنش آب را بر روی سازه بدست آورد.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای سیال تراکم پذیر و غیر ویسکوز، فشار هیدرو دینامیک ناشی از زلزله بروی سد صلب، معادله هلمولتز (Helmholtz Eq.) را به شکل زیر ارضا می کند (Sun and Hadipriono, 1990).

$$\nabla^2 p(\varepsilon) + k^2 p(\varepsilon) = 0 \quad (1)$$

در این معادله ∇ برابر عملگر گرادینان، ε برابر مختصات نقاط در دستگاه مختصات استوانه ای، $P(\varepsilon)$ برابر تابع تحت فرکانس فشار و $K = \frac{\omega}{c}$ که

ω فرکانس تحریک و c سرعت صوت در آب می باشد. همچنین دامنه سیال، Γ برابر است با:

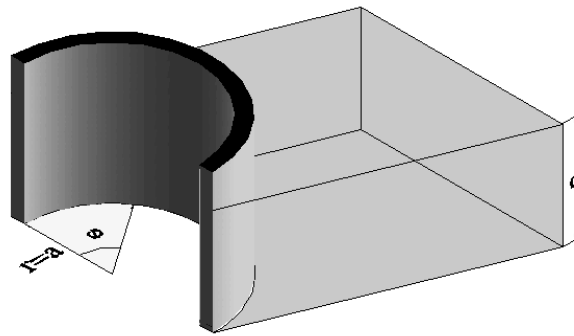
$$0 \leq z \leq d, -\theta \leq \phi \leq \theta, a \leq r \leq \infty, \varepsilon \in \Gamma(r, \phi, z)$$

و حرکت آب نیز در مقدار های کوچک محدود شده است.

شکل سد در مختصات استوانه ای تعریف شده است، بطوری که سد قسمتی از یک دایره یا بیضی با شعاع ثابت و زاویه 2θ وضخامت t می باشد. حال با

توجه به اینکه محاسبات در محدوده تئوری پوسته ها می باشد ضخامت سد از رابطه $\frac{r}{t} \geq 10$ تبعیت می کند و این دایره یا بیضی در راستای محور z

امتداد داده می شود. همچنین H برابر ارتفاع سد و d برابر ارتفاع مخزن می باشد (Zienkiewicz, 2000).



شکل ۱- نمای سد قوسی و معرفی پارامترهای مربوطه

شرایط مرزی با در نظر نگرفتن تاثیر موجهای سطحی و صرف نظراز ویسکوزیته سیال به شرح زیر می باشد.

(b_1): اولین شرط مرزی در سطح آزاد وقتی که تاثیر موج سطحی را در نظر نگیریم برابراست با (Sun and Hadipriono, 1990)

$$p(r, \phi, d) = 0 \quad (2)$$

(b_2): دومین شرط مرزی در انتهای دور می باشد که از شرط مرزی سامرفیلد استفاده شده است (Sun and Ngami, 1991).

$$p(\infty, \phi, z) = 0 \quad (3)$$

(b_3): سومین شرط مرزی بر روی کف سیال می باشد. اگر کف سیال صلب و از اثرات جذب انرژی توسط رسوبات کف دریاچه صرف نظر شود برابر است با (Sun, 1993)

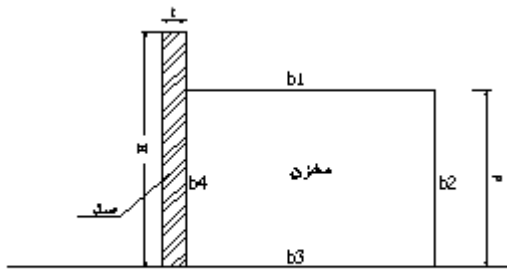
$$\frac{\partial p(r, \phi, 0)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

(b_4): چهارمین شرط، شرط مرزی در محل تماس سد و آب می باشد که برابر است با (Aviles and Li, 2001)

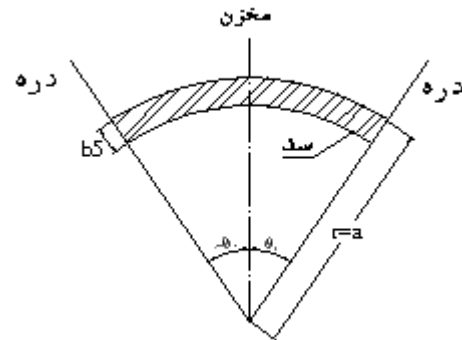
$$\frac{\partial p(a, \phi, z)}{\partial r} = -\rho a_n \quad (5)$$

که n برابر بردار نرمال خارجی مخزن، a_n برابرشتاب حرکت زمین وارد بر سطح سد و ρ برابرچگالی سیال می باشد. (b5): پنجمین شرط، مربوط به دیواره سد و دره می باشد. در این شرط مرزی فرض می شود ساحل دریاچه تا وقتی که سد ثابت باشد حرکت نمی کند و برابر است با (Sun and Hadipriono, 1990)

$$\frac{\partial p}{\partial \phi}(\phi = \pm\theta) = 0 \quad (6)$$



شکل ۳- مقطع سد



شکل ۲- پلان سد

فرمول بندی مدل و حل معادلات

در اولین مرحله فرض می شود که حل نهایی معادله (۱) حاصلضرب سه تابع وابسته به مختصات r, ϕ, z به صورت زیر می باشد.

$$p(r, \phi, z) = R(r).F(\phi).Z(z) \quad (7)$$

حال با قرار دادن معادله (۷) در معادله (۱) نتیجه می شود:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r.R'(r).F(\phi).Z(z)) + \frac{1}{r^2} \cdot (R(r).F''(\phi).Z(z)) + (R(r).F(\phi).Z''(z)) + k^2(R(r).F(\phi).Z(z)) = 0 \quad (8)$$

با استفاده از روش متغیرهای جدا برای معادله دیفرانسیل درجه دوم جواب معادله (۸) برابر است با:

$$F_m''(\phi) + N_m^2 F_m(\phi) = 0 \quad (9)$$

$$Z_n''(z) + M_n^2 Z_n(z) = 0 \quad (10)$$

$$r^2 R_{mn}''(r) + r R_{mn}'(r) + (\lambda_n^2 r^2 - N_m^2) R_{mn}(r) = 0 \quad (11)$$

پس جواب کلی معادله بصورت زیر می باشد.

$$p(r, \phi, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \{ (c_1 \sin N_m \phi + c_2 \cos N_m \phi) \cdot (d_1 \sin M_n (d-z) + d_2 \cos M_n (d-z)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n r)) \} \quad (12)$$

همانطوری که نشان داده شده است جواب کلی دارای تعدادی ضریب مجهول می باشد که با اعمال شرایط مرزی حاکمه، یکایک آنها بدست آورده

می شود. در اولین مرحله شرط مرزی اول که مربوط به سطح آزاد می باشد اعمال می گردد.

$$Z_n(d) = d_2 = 0 \Rightarrow d_2 = 0, Z_n(z) = d_1 \sin M_n(d-z) \quad (13)$$

حال برای محاسبه ضریب M_n و مقادیر ویژه $Z_n(z)$ ، شرط مرزی سوم که مربوط به کف مخزن است، اعمال می شود.

$$Z'(0) = 0, r \geq a, -\theta \leq \phi \leq \theta, M_n = \frac{(2n-1)\pi}{2d}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

پس جواب معادله (۱۰) برابر است با مقدار:

$$Z_n(z) = d_1 \sin \frac{(2n-1)\pi}{2d}(d-z) \quad (15)$$

جواب عمومی معادله (۹) برابر است با:

$$F_m(\phi) = c_1 \sin N_m \phi + c_2 \cos N_m \phi \quad (16)$$

برای سدهای قوسی متقارن که در دره ای متقارن قرار گرفته اند و تحت تحریکات بالا دست - پائین دست سدمی باشند از اولین بخش معادله (۱۶) می توان صرفنظر کرد (Sun and Hadipriono, 1990). بطور مشابه اگر سد قوسی تحت تحریکات کناره دره باشد از قسمت دوم معادله می توان صرفنظر کرد. حال برای بدست آوردن ضریب مجهول N_m شرط مرزی پنجم در معادله (۱۶) باید ارضا شود که برای تحریکات بالا دست - پائین دست سد برابر است با:

$$N_m = \frac{(m-1)\pi}{\theta}, m = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

$$F_m(\phi) = c_2 \cos \frac{(m-1)\pi}{\theta} \phi, m = 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

جواب عمومی معادله (۱۱) برابر است با:

$$R_{mn}(\lambda r) = H_{N_m}^2(\lambda_n r) = J_N(\lambda_n r) - iY_N(\lambda_n r) \quad (19)$$

در این بخش از قسمت دوم معادله هنگل مرتبه N_m برای جواب عمومی معادله (۱۱) به دلیل اینکه فشارهای هیدرو دینامیکی یک سری موجهای گروهی ورودی هستند استفاده شده است. پس جواب عمومی معادله فشار هیدرو دینامیک روی سدهای قوسی برای تحریکات بالا دست - پائین دست سد بصورت زیر می باشد.

$$p(r, \phi, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \{A_{mn} (\sin \frac{(2n-1)\pi}{2d}(d-z)) \cdot (\cos \frac{(m-1)\pi}{\theta} \phi) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n r))\} \quad (20)$$

تا این مرحله مجهول معادله، A_{mn} می باشد که برای محاسبه آن باید معادله (۲۰) شرط مرزی چهارم یعنی معادله (۵) را ارضا نمایند که بصورت زیر عمل می شود.

$$\frac{\partial R(a)}{\partial r} \cdot F(\phi) \cdot Z(z) = -\rho a_n \quad 0 \leq z \leq d, -\theta \leq \phi \leq \theta \quad (21)$$

$$\lambda_n = \sqrt{k^2 - M_n^2} \quad (22)$$

پس شرط مرزی چهارم به شکل زیر برای تحریکات بالا دست - پائین دست سد باید ارضا شود.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{mn} (\sin \frac{(2n-1)\pi}{2d}(d-z)) \cdot (\cos \frac{(m-1)\pi}{\theta} \phi) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n a))' = -\rho a_n \quad (23)$$

زمانی که شتاب افقی به سازه های متقارن وارد می شود می توان از خاصیت تقارن آنها نسبت به محور تقارن استفاده کرد و برای تابع مشخص کننده فشار در راستای آرگومان سازه از شمارنده یک استفاده کرد، یعنی $N_m = 1$ فرض می شود (Aviles and Li, 2001). پس معادله (۱۸) برابر است با:

$$F_m(\phi) = c_2 \cos(\phi), N_m = 1 \quad (24)$$

به عبارت دیگر برای سازه های متقارن تحت شتاب افقی زمین به دلیل اینکه هم در خود تابع نسبت به بردار نرمال عمود بر آن و هم در شتاب ناشی از زمین تابع آرگومانی $\cos \phi$ وجود دارد، می توان برای حل از یک مدل دو بعدی در صفحه (Z و T) برای شمارنده آرگومانی $N_m = 1$ استفاده کرد. (Aviles and Li, 2001)

$$a_n^-(r, \phi, z) = \bar{a}_n^-(r, z) \cdot \cos \phi \quad (25)$$

$$\bar{a}_n^-(r, z) = a_n^-(t) \cdot l(r, z) \quad (26)$$

که در این معادله $l(r, z)$ برابر کسینوسهای هادی سد در راستای محور Γ و Z و $\bar{a}_n^-(t)$ شتاب حرکت زمین می باشد. حال برای محاسبه ضریب مجهول A_n از خاصیت تعامد توابع سینوسی و کسینوسی استفاده می شود.

$$A_n = \frac{4 \cdot (\cos(M_n d) - 1) \cdot \rho a_n^-}{\lambda_n \cdot (2d \cdot M_n - \sin(2M_n d)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n a))'} \quad (27)$$

پس معادله فشار هیدرودینامیک تحت نیروی زلزله وارد به سد قوسی برای تحریکات بالا دست- پائین دست برابر است با:

$$p(r, \phi, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4 \cdot (\cos(M_n d) - 1) \cdot \rho a_n^-}{\lambda_n \cdot (2d \cdot M_n - \sin(2M_n d)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n a))'} \right\} \cdot \left(\cos \frac{(m-1)\pi}{\theta} \phi \right) \cdot (\sin M_n(d-z)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n r)) \quad (28)$$

اگر معادله فشار هیدرودینامیک در محدوده فرکانس قرار داشته باشد آنگاه فرمول کلی فشار برابر است با:

$$\bar{p}(r, \phi, z, \omega) = p(r, \phi, z) e^{i\omega t} \quad (29)$$

$$p(r, \phi, z, \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4 \cdot (\cos(M_n d) - 1) \cdot \rho a_n^-}{\lambda_n \cdot (2d \cdot M_n - \sin(2M_n d)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n a))'} \right\} \cdot \left(\cos \frac{(m-1)\pi}{\theta} \phi \right) \cdot (\sin M_n(d-z)) \cdot (H_{N_m}^2(\lambda_n r) e^{i\omega t}) \quad (30)$$

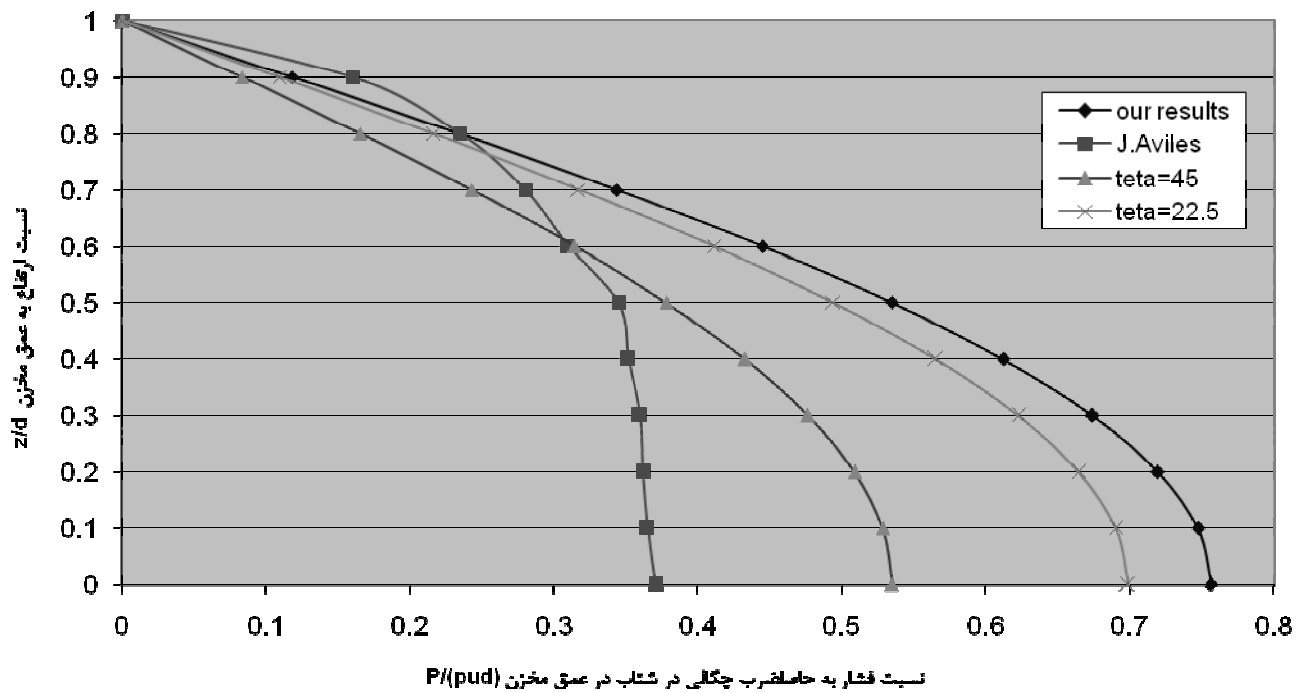
مثال عددی

برای مقایسه جواب معادله بدست آورده شده با نتایج دیگر محققین از یک سری مثالهای عددی در مرجع شماره ۵ استفاده می شود. در این مرحله از سدی که قسمتی از یک استوانه می باشد بهره برده شده است. در این سد، $\frac{H}{R} = 2$ در نظر گرفته شده و از تراکم پذیری آب در مرحله اول صرفنظر می

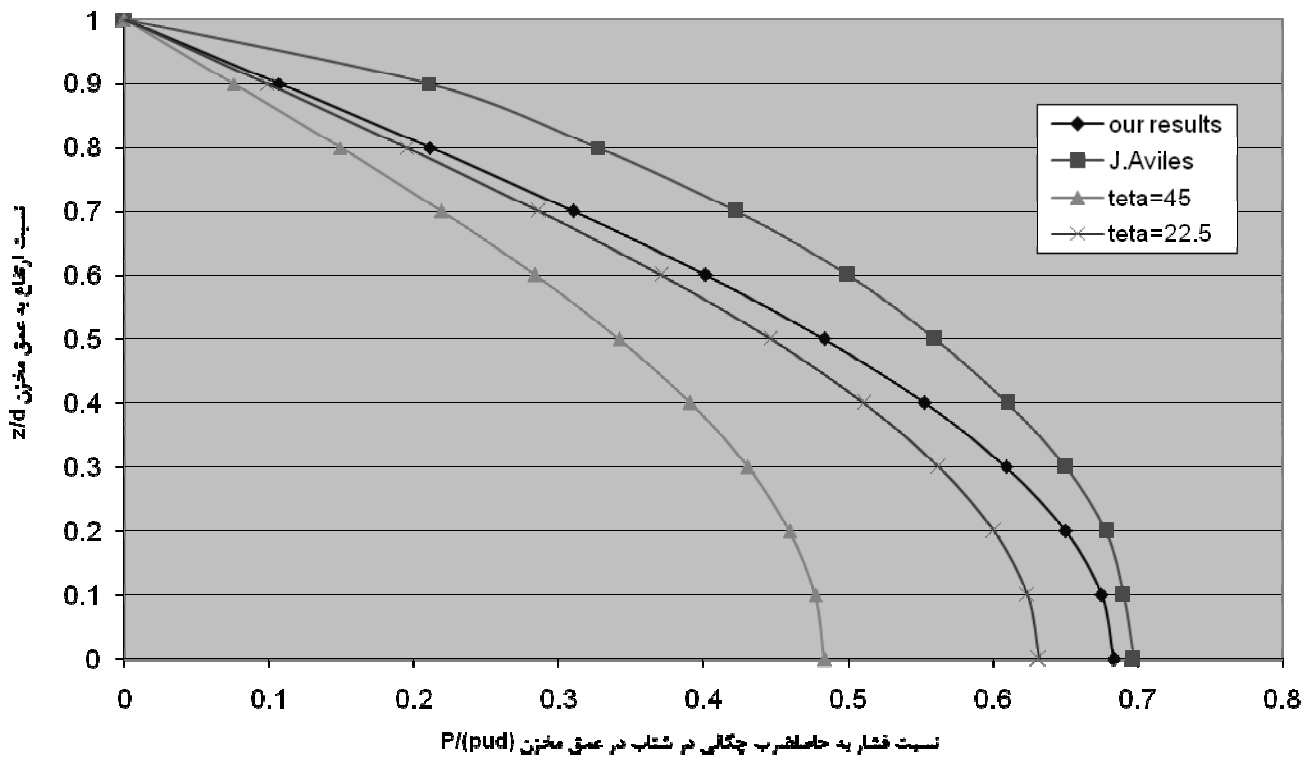
شود و در مرحله دوم تراکم پذیری بوسیله فرکانس نرمال شده درون مسئله اعمال می شود. مقدار فرکانس نرمال شده برابر با $\frac{\omega H}{C} = \frac{3\pi}{5}$ می باشد.

حال برای اینکه جوابهای مسئله جامعیت بیشتری داشته باشند، فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه سد، برای نسبتهای مختلف $\frac{z}{d}$ ، با پارامتر $\frac{P}{\rho a_n d}$

بصورت نمودارهایی نمایش داده می شود. در مرحله ای دیگر فشار هیدرودینامیک درقطاعی به زاویه $22/5$ درجه و 45 درجه از محور سد در نمودارها داده شده است. با توجه به منحنی های نمودار شکل (۴) برای حالتی که تراکم پذیری آب در نظر گرفته نشده است مقداری خطا در ترازهای پایین سد دیده می شود ولی در حالت دوم همانطوریکه در شکل شماره (۵) دیده می شود با اعمال تراکم پذیری سیال مقادیر بدست آمده از فرمول (۲۸) مطابقت بیشتری با جواب دیگر محققین دارد. پس می توان بیان کرد که وقتی تراکم پذیری آب در نظر گرفته شود با استفاده از این فرمول نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیتی بدست می آید. همچنین نتایج این تحقیق برای سدهای با شعاع بزرگتر نیز مورد بررسی قرار گرفته که وجود درصد خطای بیشتری را در محاسبات نشان می دهد.



شکل (ف) بررسی فشار هیدرودینامیک در ترازهای مختلف بدون اثر تراکم پذیری



شکل (د) بررسی فشار هیدرودینامیک در ترازهای مختلف با اعمال تراکم پذیری سیال

نتیجه گیری

فشار هیدرو دینامیک یکی از عوامل موثر در طراحی بدنه سد برای مناطق زلزله خیز می باشد. از جمله عواملی که بر فشار هیدرو دینامیک تاثیر می گذارد میتوان به تراکم پذیری سیال، شکل پذیری سد و پی، شکل وجه بالا دست، کف مخزن، فرکانس و جهت بارگذاری اشاره نمود. با توجه به نتایج موجود می توان پی برد که بدون صرف هزینه های محاسباتی زیاد برای روشهای عددی امکان محاسبه اندرکنش سد و سیال و اثرات ناشی از نیروی زلزله از طرف سیال بروی سد وجود دارد. البته استفاده از این روش درصدی خطا دارد که آن را می توان با اعمال ضرایب اطمینانی بر طرف کرد. با توجه به فرمولها، تابع فشار در راستای Z تابعی سینوسی و در راستای آرگومان تابعی کسینوسی و در امتداد شعاع از نوع توابع بسل می باشد. همچنین می توان به دو نکته دیگر اشاره کرد، یکی تاثیر تراکم پذیری سیال که فشار هیدرو دینامیک را به فرکانس بارگذاری وابسته می کند و باعث ایجاد نتایج واقعی تر و درصد خطای کمتر در محاسبات می شود و دیگری مقدار فشار هیدرو دینامیک در راستای آرگومان که هر چه از محور سد به سمت کناره های سد و دره رود، کمتر می شود.

مراجع

1. احمدی، م.ت.، قره باغی، (۱۳۷۲) تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر-لاگرانژ، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
2. Zienkiewicz, O. C., Bettess, P. (2000) Dynamic fluid-structure interaction: Numerical modeling of the coupled problem. John Wiley, New York. p. 185-193.
3. Westergard, H. M. (1933) Water pressure on dams during earthquake. ASCE
4. Chopra, A. K. (1967) Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes. J. Eng. Mech. Div., ASCE, 205-223.
5. Javier, Aviles. and Xiangyue, Li. (2001) Hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures considering seabed flexibility. Comput. Struct, 2595-2606.
6. Keming, Sun. and Fabian, C, Hadipriono. (1990) Hydrodynamic pressure analysis of arch dam with T-COMplete functions. J. Eng. Mech, Vol.116, ASCE, pp. 25014.
7. Keming, Sun. and Toyoaki, Ngami. (1991) Earthquake induced hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures. Earthquake. Eng. Struct. Dyn, vol.20, 429-440.
8. Keming, Sun. (1993) Effects of ice layer on hydrodynamic pressure of structures. J. Eng. Cold. Regions, Vol.7, ASCE, pp.4191.