

تحلیل دینامیکی سد بتنی قوسی در محدوده فرکانس با استفاده از شرط مرزی انقطاعی عدد موج

وحید لطفی^۱، جواد امان آبادی^{۲*}

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تحلیل دینامیکی سیستم سه بعدی سد- مخزن یکی از موضوعات مهم در زمینه اندرکنش آب و سازه می باشد. روش دقیق برای حل این مساله استفاده از المان های نیمه بینهایت سه بعدی سیال در انتهای دور مخزن می باشد که هزینه محاسباتی و مشکلات برنامه نویسی فراوانی را به همراه دارد. المان های نیمه بینهایت در محدوده فرکانس فرمول بندی شده و از این رو می توان برای تحلیل در محدوده فرکانس از آن ها بهره جست. در این مطالعه روشی برای تحلیل دینامیکی سیستم سد-مخزن که تنها به برنامه نویسی محیط اجزای محدود مساله نیاز دارد، ارائه شده است که به نام روش عدد موج به آن اشاره می شود. در این روش شرط عدد موج در مرز انقطاعی یا قسمت بالادست ناحیه مخزن که در فاصله کوتاهی از بالادست بدنه سد قرار دارد، اعمال می شود. در ابتدا به توضیح روش پرداخته و سپس پاسخ سد قوسی *Morrow Point* با در نظر گرفتن اندرکنش سد-مخزن با این روش بدست می آید و نتایج با پاسخ دقیق مقایسه می شود. بر پایه این مطالعه نتیجه می شود که این روش می تواند به عنوان یک روش جایگزین برای تحلیل دینامیکی سیستم سد- مخزن در مقابل روش های مشکل گذشته، مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سد قوسی، عدد موج، مرز جاذب، مرز انقطاعی

Dynamic Analysis of Concrete Arch by Wavenumber Approach in the Frequency Domain

Vahid Lotfi¹, Javad Amanabadi^{2*}

1- Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology

2- MSc, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology

Abstract

The dynamic analysis of concrete arch dam by employing wavenumber approach has been investigating. In previous studies, the analysis was limited for concrete gravity dam. It is well-known that the difficult approach for solving this problem relies heavily on employing a three-dimensional semi-infinite fluid element. The hyper-

* مؤلف مسئول: جواد امان آبادی j.amanabadi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۲۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۲/۱۴

element is formulated in frequency domain and its application in this field has led to many especial purpose programs which were demanding from programming point of view. In this paper, the method is initially described. Subsequently, the response of Morrow Point dam-reservoir system is obtained by wavenumber approach, and the results are compared against the exact response. Based on this investigation, it is concluded that this approach can be anticipated as a great substitute for the rigorous type of analysis.

Keywords: Concrete arch dam, Wavenumber, Truncation boundary

۱- معرفی

تحلیل دینامیکی مساله سد - مخزن می تواند با دقت بالایی توسط روش اجزای محدود - المان نیمه بی نهایت (FE-HE) انجام گیرد. در این روش بدنه و قسمت محدودی از آب مخزن توسط المان های محدود جزء بندی شده و سپس قسمت باقی مانده ی مخزن (که دارای طول زلّی بوده) به وسیله ی المان های نیمه بینهایت سیال مدل سازی می شوند [۱]. با اتصال این دو فضا به یکدیگر و تحلیل آن، پاسخ های دقیق مساله سد - مخزن در محدوده فرکانس بدست می آید. از طرف دیگر برخی پژوهشگران علاقه دارند این مساله را بصورت اجزای محدود - اجزای محدود (FE-FE) حل نمایند. در این روش از یک شرط مرزی مناسب برای ناحیه ی قطع شده ی مخزن استفاده می شود. بنابراین المان نیمه بی نهایت از مدل حذف می شود. موارد ساده ای برای این شرط مرزی موجود دارند [۲ و ۳] که نیاز به مدل سازی طول زیادی از مخزن دارند. مطالعات نشان می دهد در صورتی که این شرایط در طولی کمتر از ۳ برابر ارتفاع مخزن از بالادست بدنه ی سد قرار داده شوند، خطاهای قابل ملاحظه ای ایجاد خواهد شد. همچنین مدل سازی طول زیادی از مخزن برای نیل به پاسخی با دقت بالا، هزینه محاسباتی را بطور چشمگیری افزایش می دهد. مزیت اصلی این شرایط این است که می توان آن ها را در محدوده ی زمان رابطه سازی نمود. به همین دلیل در آنالیزهای غیرخطی بطور چشمگیری از این شرایط مرزی استفاده می شود. در سه دهه ی گذشته پژوهشگران بسیاری برای بدست آوردن یک شرط مرزی جاذب با دقت بالا برای حل مساله اندرکنش آب - سازه و یا اندرکنش خاک-سازه تلاش کرده اند. لایه های تطبیق یافته ی کامل^۱ [۴] و شرایط مرزی غیر بازتابی مرتبه بالا [۵] دو نمونه از شرایط مرزی هستند که محققان بطور وسیعی از آن ها در کارهایشان استفاده کرده اند. باید تأکید کرد یکی از دلایل پرطرفدار بودن این شرایط مرزی این است که می توان از آن ها هم در محدوده فرکانس و هم در محدوده زمان استفاده کرد. در واقعیت این شرایط مرزی در محدوده فرکانس جذابیت زیادی ندارند زیرا علاوه بر مشکل بودن رابطه سازی آن ها در محدوده فرکانس، در این محدوده المان نیمه بی نهایت بخوبی می تواند نیازهای ما را برای نیل به پاسخ های دقیق برآورده کند.

در این مطالعه از روش اجزای محدود - اجزای محدود^۲ و استفاده از شرط مرزی عدد موج برای مرز انقطاعی مخزن برای تحلیل سد قوسی Morrow Point در محدوده فرکانس استفاده شده است. شرط مرزی معرفی شده در این نوشته به راحتی مانند شرایط مرزی سامرفلد و شاران در مرز انقطاعی قرار گرفته اما پاسخی به مراتب دقیق تر از آن ها به ما ارائه می کند. در ابتدا تئوری تحلیل توضیح داده شده و سپس پاسخ سد قوسی Morrow Point برای حالات مختلف شرط مرزی انقطاعی برای تحریک افقی پایه نشان داده می شود. در مورد هر شرط مرزی (از جمله شرط جدید معرفی شده)، پاسخ های حاصل با پاسخ دقیق (المان نیمه بی نهایت) مقایسه می شود. همچنین پاسخ ها برای نسبت های مختلف از طول مخزن به ارتفاع سد بدست آمده و مقایسه شده است. در نهایت نتیجه گیری می شود که شرط مرزی معرفی شده در نسبت های کمتری برای طول مخزن به ارتفاع سد به پاسخی با دقت بالا همگرا شده و می توان از آن بصورت وسیعی در کارهای مشابه استفاده کرد.

^۱-Perfectly matched layer

^۲-FE-FE

۲- روش تحلیل

همانطور که ذکر شد، تکنیک تحلیل استفاده شده در این مطالعه بر اساس روش اجزای محدود- اجزای محدود م ی باشد. روش اجزای محدود برای محدوده بدنه سد و مخزن بطور جداگانه استفاده می شود و معادلات حاصل برای هر محدوده بطور مستقل بدست می آید. سپس با ترکیب دو معادله بدست آمده، معادله ی درگیر^۱ نهایی سیستم بدست می آید.

۱-۲- بدنه سد

با تمرکز بر روی قسمت بدنه ی سد، رفتار دینامیکی سد را می توان با استفاده از معادله دینامیک سازهها بطور زیر توضیح داد [۶]:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr = -Mja_g^s + B_3^T P \quad (1-2)$$

که در معادله بالا M ، C و K به ترتیب نشان دهنده ی ماتریس های جرم، میرایی و سختی بدنه ی سد می باشند. به علاوه r بردار تغییر مکان های نسبی گره ای و J یک ماتریس لمبه ستون می باشد که هر قسمت از آن شامل یک ماتریس واحد 3×3 می باشد. a_g^s نیز نشان دهنده ی شتاب حرکت زمین می باشد. همچنین B_3 ماتریسی می باشد که فشارهای گره ای مخزن را به نیروهای گره ای وارد بر بدنه سد مربوط می کند. اگر تحریک زمین را بصورت یک تحریک هارمونیک با فرکانس ω در نظر بگیریم، و مطالعه حاضر را به تحریک در جهت جریان محدود کنیم، می دانیم پاسخ ماندگار^۲ سیستم نیز دارای فرکانس ω بوده و از این رو می توان نوشت:

$$(-\omega^2 M + (1 + 2\beta i)K)r = -Mja_g^s + B_3^T P \quad (2-2)$$

در این رابطه ماتریس میرایی بدنه سد بصورت میرایی هیستریزیک در نظر گرفته شده که رابطه آن بصورت زیر تعریف می شود:

$$C = (2\beta/\omega)K \quad (3-2)$$

همچنین بالانویس S برای شتاب نشان دهنده ی شتاب در جهت جریان می باشد که بصورت زیر نوشته می شود:

$$a_g^s = \begin{bmatrix} 0 \\ a_g^y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

۲-۲- محدوده مخزن

با در نظر گرفتن سیال با تراکم پذیری خطی، حرکت های کوچک غیر چرخشی و صرف نظر کردن از ویسکوزیته، معادله موج حاکم بر مخزن سد بصورت زیر بدست می آید [۷ و ۸]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (5-2)$$

در معادله بالا p نشان دهنده ی فشار هیدرو دینامیکی و C نشان دهنده ی سرعت موج در آب می باشد. شرایط مرزی سطح آب و اطراف مخزن (وجوه در تماس با سنگ پی) نیز بصورت زیر بیان می شوند:

۱- Couple
۲- Steady state

$$p = 0 \quad \text{سطح آب} \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_g^n - q \dot{p} \quad \text{وجود در تماس با سنگ پی}$$

در معادله بالا ρ نشان دهنده چگالی آب و n نشان دهنده جهت عمود و بسمت بیرون نسبت به المان های سیال در اطراف مخزن می باشد. ضریب میرایی q که در معادله بالا استفاده شده است نیز بصورت زیر تعریف می شود [۹]:

$$q = \frac{(1 - \alpha)}{c(1 + \alpha)} \quad (7-2)$$

در معادله بالا α نسبت موج رفتی به سمت کف یا دیواره های دره (وجود در تماس با سنگ پی) به موج برگشتی می باشد که با توجه به صلب فرض کردن سنگ پی در این نوشته برابر ۱ در نظر گرفته می شود. با استفاده از روش باقیمانده وزن دار^۱ می توان شکل اجزای محدودی معادله حاکم بر مخزن را بصورت زیر نوشت:

$$G^e \dot{P}^e + H^e P^e = R^e \quad (8-2)$$

ماتریس های معرفی شده در معادله بالا به شکل زیر تعریف می شوند:

$$G^e = \frac{1}{\rho C^2} \int_{\Omega} N N^T d\Omega \quad (9-2 \text{ الف})$$

(9-2 ب)

$$H^e = \frac{1}{\rho} \int_{\Omega} (N_x N_x^T + N_y N_y^T + N_z N_z^T) d\Omega \quad (9-2 \text{ ج})$$

$$R^e = \frac{1}{\rho} \int_{\Gamma} N (\partial_n p) d\Gamma$$

در معادله بالا N بردار توابع شکل و N_x, N_y, N_z مشتق این توابع شکل نسبت به x, y, z می باشند. مشتق مستقیم $\partial_n p$ با توجه به سه مرز موجود شکل های مختلفی دارد.

- مرز بالادست مخزن Γ_I : در این مرز شرایط مختلفی در نظر گرفته می شود که در ادامه به آن اشاره می کنیم.
- مرز اطراف مخزن Γ_{II} (وجود در تماس با سنگ پی): با توجه به معادله (6-2) می توانیم آن را بصورت زیر بنویسیم:

$$\partial_n p = -\rho a_g^n - q \dot{p} \quad (10-2)$$

- مرز مشترک بدنه-مخزن Γ_{III} : با توجه به اینکه هیچ آبی از بدنه سد عبور نکرده و سرعت نسبی سیال در جهت عمود بر این مرز نسبت به بدنه ی سد، برابر صفر است، می توان این شرط را بصورت زیر در نظر گرفت:

$$\partial_n p = -\rho \ddot{u}_n \quad (11-2)$$

در معادله بالا \ddot{u}_n نشان دهنده شتاب ذرات سیال در جهت عمود بر مرز بین بدنه سد و مخزن می باشد. در حالت عمومی یک المان می تواند هر سه شرط بالا را دارا باشد. بنابراین می توان معادله زیر را نوشت:

$$R^e = R_1^e + R_2^e + R_3^e \quad (12-2)$$

۱- Weighted residual

واضح است در صورتی که هر کدام از مرزها برای یک المان وجود نداشته باشد، مقدار مربوط به آن مرز از رابطه بالا حذف می شود. با استفاده از معادلات (۱۰-۲) و (۱۱-۲) و قرار دادن آن‌ها در (۹-۲) می‌توان روابط زیر را بدست آورد:

$$R_2^e = -B_2^e J^e a_g^e - q L_2^e \dot{P}^e \quad (13-2)$$

$$R_3^e = -B_3^e (\ddot{r}^e + J^e a_g^e)$$

که برای معادله بالا داریم:

$$B_i^e = \int_{\Gamma_i} (N n^T N_g^T) d\Gamma_i, \quad i \in \{2,3\} \quad (14-2)$$

$$L_2^e = \frac{1}{\rho} \int_{\Gamma_2} (N N^T) d\Gamma_2$$

در رابطه بالا n نشان دهنده بردار واحد عمود و به سمت خارج المان می‌باشد. همچنین N_g نشان دهنده ماتریسی شامل توابع شکل می‌باشد که برای درونیابی شتاب در جهات افقی و قائم استفاده می‌شود. با جایگذاری روابط (۱۳-۲) در معادله (۱۲-۲) می‌توان نوشت:

$$R^e = R_1^e - q L_2^e \dot{P}^e - B_3^e \ddot{r}^e - B^e J^e a_g^e \quad (15-2)$$

در رابطه بالا B^e بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$B^e = B_2^e + B_3^e \quad (16-2)$$

لازم به ذکر است که شتاب نسبی در مرز اطراف مخزن (وجوه در تماس با سنگ پی) برابر صفر است. با جایگذاری معادله (۱۶-۲) در معادله (۸-۲) می‌توان نوشت:

$$G^e \ddot{P}^e + q L_2^e \dot{P}^e + H^e P^e = R_1^e(t) - B_3^e \ddot{r}^e - B^e J^e a_g^e \quad (17-2)$$

معادله بالا را می‌توان در محدوده فرکانس بصورت زیر نوشت:

$$-\omega^2 G^e P^e + i\omega q L_2^e \dot{P}^e + H^e P^e = R_1^e(\omega) + \omega^2 B_3^e r^e - B^e J^e a_g^e \quad (18-2)$$

با روی هم نهد معادلات مربوط به هر المان و وارد کردن شرط مرزی سطح آزاد مخزن (۶-۲)، معادله کلی اجزای محدود محیط مخزن بصورت زیر در می‌آید:

$$-\omega^2 GP + i\omega q L_2 P + HP = R_1 + \omega^2 B_3 r - B J a_g^e \quad (19-2)$$

در معادله بالا R_1 از روی هم گذاری انتگرال‌های مربوط به شرط مرزی انقطاعی (Γ_1) مخزن بدست می‌آید.

۳-۲- سیستم سد-مخزن

در قسمت‌های قبلی معادلات ضروری برای نواحی بدنه و مخزن بصورت جداگانه بدست آمد. با ترکیب معادله (۱۹-۲) و (۲-۲) شکل اولیه‌ی معادله مزدوج سد - مخزن در محدوده فرکانس بصورت زیر بدست می‌آید [۱۰]:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + (1 + 2\beta i)K & -B_3^T \\ -\omega^2 B_3 & (-\omega^2 G + i\omega q L_2 + H) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M J a_g^e \\ R_1 - B J a_g^e \end{bmatrix} \quad (20-2)$$

بردار R_1 در معادله بالا همچنان مجهول بوده و در قسمت بعدی به طریقه محاسبه این بردار با استفاده از روش پیشنهادی می‌پردازیم.

۲-۴- شرط مرزی انقطاعی

تأثیرات مرز انقطاعی در این بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بین منظور مرز انقطاعی (Γ_1) را بصورت قائم (با توجه به مختصات دکارتی در نظر گرفته شده در این مطالعه موازی با محور y) در نظر می‌گیریم. از تئوری انتشار امواج می‌دانیم یکی از صور نوشتن معادله یک موج صفحه‌ای هارمونیک با مقدار واحد که با جهت منفی محور y زاویه θ می‌سازد بصورت زیر است:

$$p = e^{i(k'y + \lambda z + \omega t)} \quad (21-2)$$

و یا:

$$p = e^{\left(\frac{i\omega}{C}\right)(\cos(\theta)y + \sin(\theta)z + Ct)} \quad (22-2)$$

از مقایسه دو معادله بالا می‌توان نوشت:

$$k' = \frac{\omega}{C} \cos(\theta) \quad (23-2)$$

$$\lambda = \frac{\omega}{C} \sin(\theta)$$

$$k'^2 + \lambda^2 = \frac{\omega^2}{C^2}$$

با توجه به معادلات بالا که برای p بدست آمده و فرض هم راستا بودن مرز انقطاعی با صفحه $Z-X$ ، می‌توان عبارت $\partial_n p$ مربوط به معادله (۹-۲ الف) را بصورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = ik'p \quad (24-2)$$

با جایگذاری معادله بالا در معادله (۹-۲ الف) شرط مرزی انقطاعی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$R_1^e = -(ik')L_1^e P^e \quad (25-2)$$

در رابطه بالا L_1^e برابر است با:

$$L_1^e = \frac{1}{\rho} \int_{\Gamma_1} (N N^T) d\Gamma_1 \quad (26-2)$$

با رویهم گذاری ماتریس R_1^e مربوط به هر المان موجود در همسایگی مرز انقطاعی، رابطه کلی زیر بدست می‌آید:

$$R_1 = -(ik')L_1 P \quad (27-2)$$

حال با جایگذاری رابطه (۲۷-۲) در رابطه (۲۰-۲) و ایجاد تغییراتی برای متقارن کردن ماتریس نهایی، شکل نهایی معادله اجزای محدود سیستم مزدوج بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + (1 + 2\beta i)K & -B_3^T \\ B_3 & \omega^{-2}(-\omega^2 G + ik'L_1 + i\omega qL_2 + H) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Mj a_{\xi}^e \\ \omega^{-2}(-Bj a_{\xi}^e) \end{bmatrix} \quad (28-2)$$

۲-۵- پیش زمینه‌ی تئوری مربوط به پارامتر k'

برای حالت سه بعدی که مخزن دارای مقطع محدودی می باشد (شکل ۲-۱)، برای تحریک در جهت جریان می توان از رابطه زیر برای بیان فشار در ناحیه‌ی بینهایت مخزن استفاده کرد [۱۱]:

$$p(x, y, t) = \left(\sum_{j=1}^n \gamma_j X_j e^{ik'_j y} \right) e^{i\omega t} \quad (29-2)$$

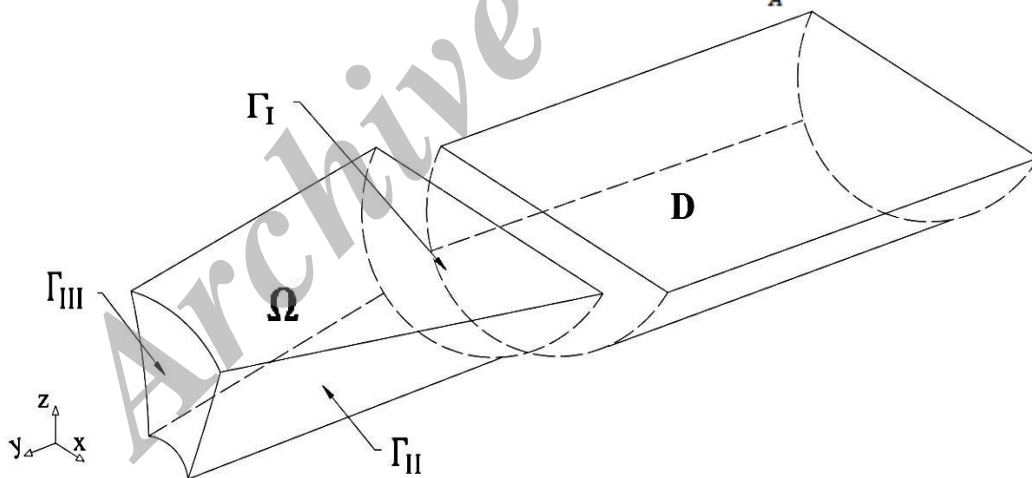
قابل ذکر است که حل فوق ترکیبی از موده‌های مختلف بوده و بردار γ_j بستگی به شرایط موجود در وجه پایین دست این ناحیه دارد. با توجه به روش المان نیمه بینهایت، می توان برای محاسبه مقادیر λ_j از حل مسئله‌ی مقدار ویژه زیر استفاده کرد:

$$(-\lambda_j^2 A + C) X_j = 0 \quad (30-2)$$

ماتریس‌های A و C با توجه به روش المان نیمه بینهایت بصورت زیر تعریف می شوند:

$$A^e = \frac{1}{\rho} \int_A N N^T dA \quad (31-2)$$

$$C^e = \frac{1}{\rho} \int_A (N_x N_x^T + N_z N_z^T) dA \quad (32-2)$$



شکل ۲-۱: محیط سه بعدی مساله سد-مخزن و مرزهای مورد بررسی

لازم به ذکر است معادله مقدار ویژه بالا برای یک مخزن با مقطع متقارن، دارای مقادیر متقارن و پادمتقارن می باشند. با بررسی بردار ویژه مربوط به هر مقدار ویژه در نقاطی خاص، می توان متقارن و یا پادمتقارن بودن مقدار ویژه را تشخیص داد. پارامتر k'_j در رابطه (۲۹-۲) به عنوان j امین عدد موج شناخته می شود و با توجه به رابطه (۲۹-۲) به صورت زیر بدست می آید:

$$k'_j = \pm i \sqrt{\lambda_j^2 - \frac{\omega^2}{C^2}} \quad (33-2)$$

در رابطه بالا با توجه به جهت مختصات دکارتی در مدل مورد بررسی (انتهای دور مخزن در جهت منفی محور y ها می باشد)، علامت مثبت نشان دهنده موج های برگشتی از سمت انتهای دور مخزن به سمت بدنه سد، و علامت منفی نشان دهنده موج های رفتی از طرف بدنه سد به سمت انتهای دور می باشند. از این رو فقط علامت منفی برای رابطه (۲-۳۳) را قابل قبول می دانیم. \bar{A} امین فرکانس طبیعی مخزن نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$\lambda_j^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0 \rightarrow \omega_j^2 = c \lambda_j \quad (2-34)$$

با توجه به رابطه (۲-۲۹) پاسخ دقیق حاصل از جمع اعداد موج مختلف با وزن های مختلف می باشد. اما در اینجا ما نمی توانیم ضرایب موجود به هر عدد موج خاص را بدست آوریم. به همین دلیل و با توجه به اینکه می دانیم معمولاً ۵ مود اول بیشترین تأثیر را در پاسخ نهایی دارند، می توان با در نظر گرفتن شکل مساله برای بازه های مختلف ω از اعداد موج مختلفی استفاده نمود. برای مثال در سدهای قوسی برای حالت تحریک در جهت جریان، اولین مود متقارن مخزن بیشترین تأثیر را دارد. پس می توان رابطه زیر را تعریف کرد:

$$k' = k_1^{\prime s}: \text{ for } [0 \leq \omega \leq 5\omega_1^s] \leftarrow \text{ برای تحریک در جهت جریان} \quad (2-35)$$

در رابطه (۲-۳۵) مقدار $k_1^{\prime s}$ نشان دهنده اولین عدد موج حاصل از اولین متقارن λ می باشند.

۳- مدل سازی و پارامترهای اصلی

تئوری ارائه شده برای تحلیل سد قوسی Morrow Point مورد استفاده قرار می گیرد. جزئیات مربوط به مدل سازی و پارامترهای مورد استفاده بصورت خلاصه در قسمت های بعدی ارائه می گردد.

۳-۱- مدل ها

مدل کامل بدنه به همراه مخزن برای نسبت های مختلف (L/H) در شکل نشان داده شده است. برای محدوده مخزن دو استراتژی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تحلیل FE-FE که هدف اصلی ما در این نوشته است، قسمت نزدیک مخزن المان بندی شده و شرایط مرزی مختلف در مرز انقطاعی قرار گرفته است. طول این قسمت مخزن با L و عمق مخزن با H نشان داده شده است. دو مقدار مختلف برای نسبت (L/H) برای بررسی تأثیر این ضریب بر دقت پاسخ ها در شرایط مرزی مختلف، در نظر گرفته شده است. برای پاسخ های دقیق نیز از مدل FE-HE استفاده شده است. در این مدل قسمت نزدیک مخزن به کمک المان های ۲۰ گره ای آجری و قسمت دود مخزن نیز به کمک المان های نیمه بینهایت سیال مدل سازی شده اند. در این حالت دقت پاسخ ها به مقدار نسبت (L/H) بستگی ندارد.

۳-۲- پارامترهای اصلی

مصالح بدنه سد بصورت هم گن و ایزوتروپیک با ویسکوالاستیک خطی بصورت جدول در نظر گرفته شده است. آب مخزن نیز بصورت غیریویسکوز، تراکم پذیر و چگالی $\frac{KN}{m^3}$ ۹.۸۱ در نظر گرفته شده است. سرعت موج فشاری در آب نیز بصورت $\frac{m}{s}$ ۱۴۴۰ c در نظر گرفته شده است.

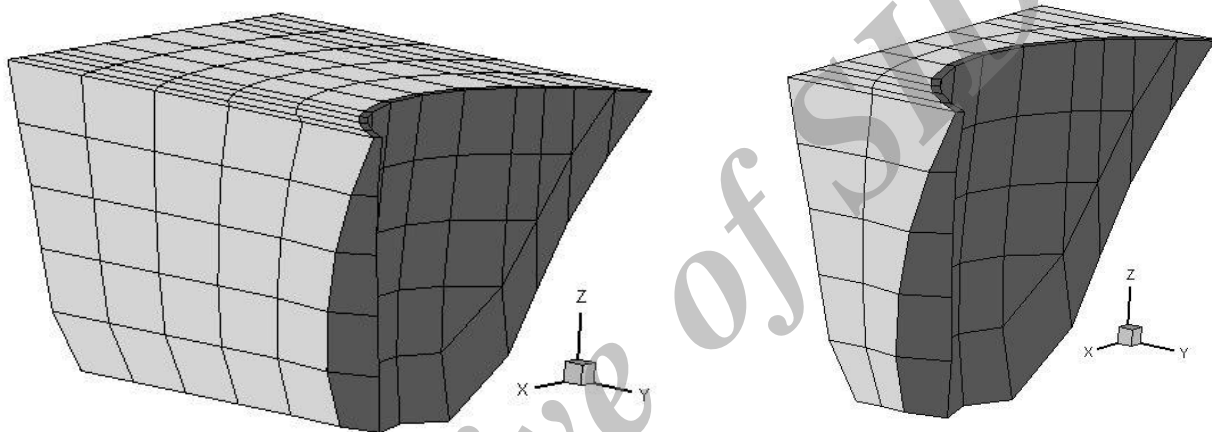
جدول ۳-۱: مشخصات مصالح بدنه سد

ضریب استهلاک	وزن مخصوص	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
--------------	-----------	-------------	-----------------

27.5 GPa	۰.۲	24.8 kN/m ³	۰.۰۵
----------	-----	------------------------	------

جدول ۳-۲: معرفی نام گذاری های مورد استفاده در تحلیل

اسم سمبلیک	طول نرمالیزه شدهی مخزن (L/H)	شرط مرزی
MW۰.۲	۰.۲	عدد موج
MW۱	۱	عدد موج

شکل ۳-۱: مدل المان بندی شده بدنه به همراه مخزن برای نسبت $L/H = 1$ و $L/H = 0.2$

۴- نتایج

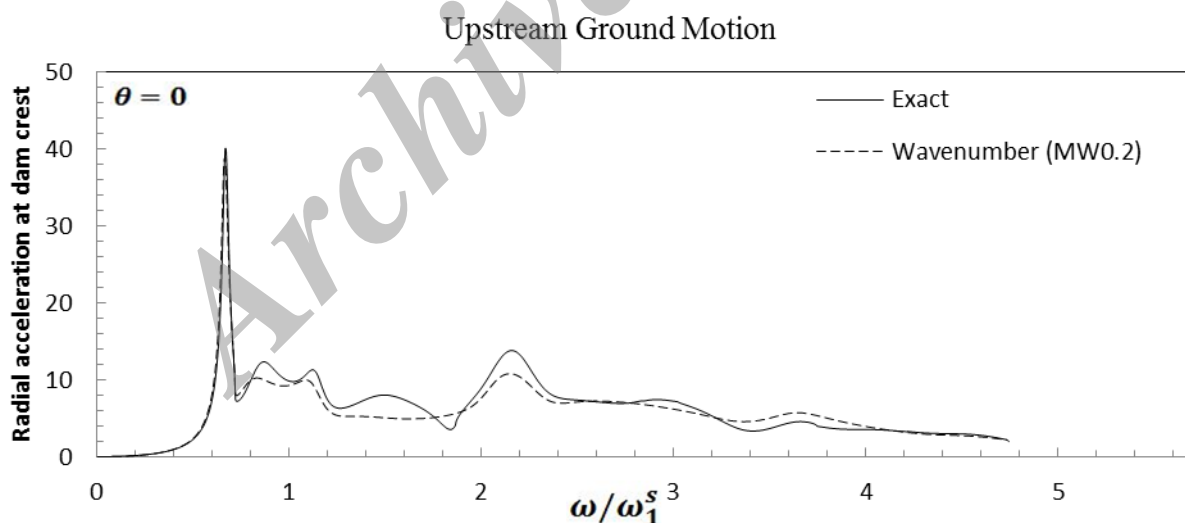
برای تحلیل سیستم سد-مخزن با استفاده از تئوری معرفی شده یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته است و هیچ قسمتی از روند تحلیل توسط برنامه های تجاری اجزای محدود انجام نشده است. سپس دو نمونه سیستم سد-مخزن مورد تحلیل قرار گرفته اند. تفاوت این دو نمونه در طولی از مخزن می باشد که در مدل سازی در نظر گرفته شده است. با المان بندی یکسان، هرچه طول کمتری از مخزن در مدل سازی در نظر گرفته شود، مدل نهایی تعداد درجات آزادی کمتری داشته و در نتیجه هزینه محاسباتی کمتر خواهد شد. به منظور یافتن پاسخ دقیق، با استفاده از تکنیک (FE-HE) و استفاده از المان های نیمه بینهایت در مدل سازی قسمت نیمه بینهایت مخزن، تحلیل توسط کد نوشته شده انجام شده است. در شکل ۳-۱ همانطور که ملاحظه می شود، پاسخ حاصل از شرط مرزی معرفی شده در مقابل پاسخ دقیق رسم شده است. در این تحلیل طول بسیار کمی از مخزن در مدل سازی در نظر گرفته شده است ($L/H = 0.2$). در شکل ۵-۲ پاسخ حاصل از شرط مرزی عدد موج با نسبت $L/H = 1$ در مقابل پاسخ دقیق رسم شده است. همانطور که ملاحظه می شود در این حالت پاسخ به ازای تمامی فرکانس ها دقت قابل قبولی دارد. این درحالیست که با استفاده از شرایط مرزی مشابه، مانند شرط مرزی سامرفلد و شاران، برای نیل به پاسخ های دقیق باید نسبت (L/H) مقادیری بزرگتر از ۳ در نظر گرفته شود. از طرف دیگر حتی با در نظر گرفتن مقادیر بیشتر از ۳ برای نسبت (L/H)، با استفاده از شرط مرزی شاران یا سامرفلد، اغتشاشات زیادی در پاسخ ها برای فرکانس های بزرگتر از فرکانس اول مخزن بوجود می آید که این مشکل نیز در شرط مرزی پیشنهادی برطرف شده است. نکته آخر اینکه در این مقاله تنها شتاب

وارد شده بر نقطه‌ای در روی تاج سد مورد مطالعه قرار گرفته است. حال اگر بخواهیم دقت پاسخ برای نقاط دیگر موجود در بدنه سد را بررسی کنیم می‌توانیم آنرا بدین صورت توضیح دهیم. اگر آنالیز مودال بدنه سد را در نظر می‌گیریم، متوجه می‌شویم پاسخ حاصل برای هر نقطه در هر زمان، بصورت ضربی از مودهای طبیعی سد با بدنه خالی هستند. همچنین در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود که محور قائم با فرکانس‌های طبیعی برای بدنه سد با مخزن خالی بدون شده است و برای تمام نسبت‌های صحیح این عدد بدون بعد، پاسخ‌های حاصل از روش عدد موج دقت بالایی دارد. این بدان معناست که روش عدد موج می‌تواند تمام مودهای بدنه با مخزن خالی را بخوبی مدلسازی نماید و وقتی پاسخ برای تمام این مودها دقت بالایی داشته باشد، پاسخ حاصل از مجموع این مودها برای قسم‌تی خاص از بدنه سد نیز دقت بالایی خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

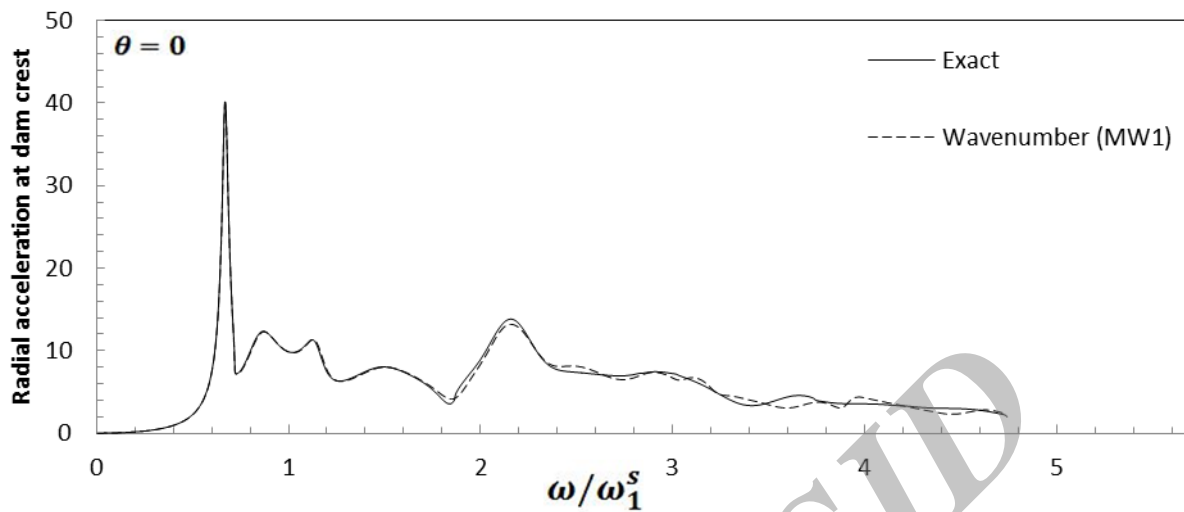
در رابطه با شرط جاذب عدد موج نکات زیر حائز اهمیت است:

- در این شرط مرزی پاسخ‌های بدست آمده در فرکانس اصلی سیستم، حتی برای مقادیر کم نسبت (L/H) دارای خطا بسیار کمی نسبت به پاسخ دقیق است.
- این شرط مرزی از دید برنامه نویسی، می‌تواند به راحتی به جای استفاده از المان نیمه بی نهایت (که کد نویسی مشکل تری را طلب می‌کند) مورد پذیرش قرار بگیرد. البته فرمولاسیون فعلاً برای تحریک در جهت جریان و فرض مرزهای صلب اطراف مخزن (وجوه در تماس با سنگ پی)، ارائه شده است.



شکل ۵-۱: پاسخ تاج سد برای مدل‌های مختلف برای تحریک در جهت جریان، $\alpha = 1, L/H = 0.2$ (محورهای افقی و قائم بدون بعد هستند)

Upstream Ground Motion



شکل ۵-۲: پاسخ تاج سد برای مدل‌های مختلف برای تحریک در جهت جریان، $\alpha = 1$ ، $\frac{L}{H} = 1$ (محورهای افقی و قائم بدون بعد هستند)

۶- مراجع

- [۱] J.F Hall and A.K Chopra, "Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects," *Earthq. Eng. Struct.*, pp. ۳۰۵-۳۳۲, ۱۹۸۲.
- [۲] S K Sharan, "Time-Domain analysis of infinite fluid vibration," vol. ۲۴, pp. ۹۴۵-۹۵۸, ۱۹۸۷.
- [۳] A Sommerfeld, *Partial differential equations in physics*. NY: Academic press, ۱۹۴۹.
- [۴] vahid Lotfi and Adib Khazaei, "Application of perfectly matched layers in the transient analysis dam-reservoir system," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. ۶۰, ۲۰۱۴.
- [۵] A Samii and V Lotfi, "High-order adjustable boundary condition for absorbing evanescent modes of waveguides and its application in coupled fluid-structure analysis," *Wave Motion*, pp. ۲۳۸-۲۵۷, ۲۰۱۲.
- [۶] O.C Zienkiewicz, R.L Taylor, and J.Z Zhu, *The Finite Element Method*: Butterworth-Heinemann, ۲۰۱۳.
- [۷] A K Chopra, "Hydrodynamic Pressures On Dams During Earthquake," vol. ۹۳, ۱۹۶۷.
- [۸] A.K Chopra, P Chakrabarti, and S Gupta, "Earthquake response of concrete gravity dams including hydrodynamic and foundation interaction, Report No.EERC-۸۰/۰۱," Berkeley, ۱۹۸۰.
- [۹] G Fenves and A.K Chopra, "Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation interaction on frequency response functions for concrete gravity dams," *Earthq. Eng. Struct.*, pp. ۱۳-۳۱, ۱۹۸۵.
- [۱۰] V Lotfi, "Frequency domain analysis of gravity dams including hydrodynamic effects," *Dam Engineering*, pp. ۳۳-۵۳, ۲۰۰۱.
- [۱۱] Vahid Lotfi and Ahmad Aftabi Sani, "Linear dynamic analysis of arch dams utilizing modified efficient fluid hyper-element," *Engineering and Structures*, vol. ۲۹, no. ۱۰, ۲۰۰۷.