

بررسی اندرکنش دینامیکی سدهای بتنی قوسی و سنگ پی در حوزه فرکانس

حمیدرضا کاظمی نیاکرانی*^۱ و وحید لطفی^۲

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۱/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۷/۲۷، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۸/۰۳)

چکیده

سدها سازه‌های عظیم و پرهزینه‌ای هستند در نتیجه تأمین ایمنی آنها اهمیت زیادی دارد. تاکنون روش‌های زیادی، از جمله روش‌های اجزای مرزی و یا ترکیب اجزای مرزی با اجزای محدود، برای تحلیل سدهای بتنی ارائه شده‌است. استفاده از روش‌های مذکور پیچیدگی خاص خود را دارند. بنابراین در این مقاله به منظور ساده‌سازی مسأله، برنامه‌ی کامپیوتری سامان‌دهی شده‌است و اندرکنش سد-سنگ پی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این برنامه، بدنه سد و سنگ پی به صورت سه بعدی مدل شده و با اجزای محدود تقسیم‌بندی شده‌اند. در ادامه، پاسخ سد قوسی **Morrow Point** برای نسبت‌های مختلف مدول الاستیسیته سنگ پی به سد برای حالت مخزن خالی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. همچنین پاسخ سد مذکور برای حالت‌های مختلف سنگ پی ارائه شده‌است. علاوه بر این، برنامه مذکور قادر به استفاده از روش استخراج حلال میرایی می‌باشد. بنابراین، تأثیر روش استخراج حلال میرایی بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش دینامیکی سد قوسی و سنگ پی، روش اجزای محدود، روش زیرسازه، روش استخراج حلال میرایی.

مقدمه

از نظر مطالعات قبلی مرتبط با موضوع مورد بحث، شایان ذکر است که، پیشگامان تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی، **Hall** و **Chopra** بودند که در ابتدا سد وزنی بر روی سنگ پی صلب را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای مدل کردن سد، از فن اجزای محدود استفاده کردند [3]. این دو پژوهشگر، در سال بعد، راهکار خود را برای تحلیل سدهای قوسی گسترش دادند و در آنجا نیز، از شکل‌های مود سد با مخزن خالی روی پی صلب استفاده کردند [4]. صلب پنداشتن سنگ پی، تقریب‌های زیادی را در فرآیند حل مسأله وارد می‌نمود. در ادامه روند بهبود روش زیرسازه، **Fok** و **Chopra** در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ به انتشار چندین مقاله پرداختند و در پایان، بهترین و کاملترین برنامه کامپیوتری در زمان خویش را ارائه کردند. آنها هر سه اندرکنش (سد-سنگ پی، سد-آب مخزن، سنگ پی-آب مخزن) را لحاظ کرده و در نخستین اقدام به مدل‌سازی سنگ پی سد قوسی، با استفاده از المان محدود پرداختند [5]. آنها برای اجتناب از بحث‌های مربوط به انتشار امواج در سنگ پی، آنرا بدون جرم و میرایی پنداشتند و از این رو، تنها سختی پی را وارد فرآیند حل مسأله نمودند. این دو پژوهشگر در همان سال و با بکارگیری

در نظر گرفتن اندرکنش سد و سنگ پی یکی از پیچیدگی‌های تحلیل دینامیکی سدهای بتنی قوسی می‌باشد. اندرکنش دینامیکی سد و سنگ پی، مطالعه‌ای است در مورد سد بر روی سنگ پی انعطاف‌پذیر که در معرض حرکات دینامیکی قرار می‌گیرد. معمولاً تأثیر اندرکنش سنگ پی و سازه هنگامی حائز اهمیت است که سازه از نوع سازه‌های حجیم و سنگین باشد و یا اینکه نتوان از صلبیت سازه در مقابل صلبیت سنگ پی صرفه‌نظر کرد [1]. سدهای قوسی از نوع سازه‌های حجیم می‌باشند و نمی‌توان اثر اندرکنش سد-سنگ پی را نادیده گرفت. مسأله مورد بررسی در این مقاله، که همانا اثر اندرکنش سد-سنگ پی بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی است، با بهره‌جویی از تحلیل دینامیکی سیستم سد-سنگ پی در حوزه فرکانس، حل می‌گردد. برای این منظور، برنامه کامپیوتری نوشته شده‌است [2]. با استفاده از این برنامه پاسخ دینامیکی سد قوسی **Morrow Point** مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مطالعه، روش اجزای محدود عهده‌دار تحلیل سد بتنی قوسی و سنگ پی محدوده اطراف آن می‌باشد.

مراجع [8-10] آورده شده‌اند، مقایسه کرد.

معادلات حاکم بر سد بر روی سنگ پی انعطاف‌پذیر

در این قسمت معادلات تعادل دینامیکی اندرکنش، سیستم سد-سنگ پی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل مورد نظر به سه گروه از نقاط گرهی تقسیم‌بندی می‌شود، این سه گروه عبارتند از:

-گره‌های مشترک بین سد و سنگ پی که با "b" نشان داده می‌شوند.

-گره‌های مربوط به سد که با "u" نشان داده می‌شوند.

-گره‌های مربوط به سنگ پی که با "f" نشان داده می‌شوند.

با استفاده از روش سختی مستقیم در تحلیل سازه‌ها، معادلات تعادل حاکم بر سیستم سد-سنگ پی بر حسب ترم‌هایی از جابه‌جایی \mathbf{r} نسبت به جابه‌جایی میدان آزاد \mathbf{u} به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (1)$$

در رابطه فوق \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی مربوط به سیستم سد-سنگ پی می‌باشند. در صورتیکه جابه‌جایی میدان آزاد در کلیه گره‌های پایه سد \mathbf{u}_b ثابت باشد، \mathbf{u}_u حرکت جسم صلب سد است. بنابراین:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{ub} \\ \mathbf{K}_{bu} & \mathbf{K}_{bb}^u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_u \\ \mathbf{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

همچنین معادله حرکت دینامیکی میدان آزاد ایجاب می‌کند که:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb}^f & \mathbf{M}_{bf} \\ \mathbf{M}_{fb} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{bb}^f & \mathbf{C}_{bf} \\ \mathbf{C}_{fb} & \mathbf{C}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_b \\ \dot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{bb}^f & \mathbf{K}_{bf} \\ \mathbf{K}_{fb} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_f \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

بنابراین با ساده کردن سمت راست رابطه (۱)، می‌توان این رابطه را به صورت زیر بیان کرد:

روش خود، تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی را بررسی کرده و نتایج بسیار جالبی ارائه دادند [6].

در سال ۱۹۹۰، یکی از کامل‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تحلیل لرزه‌ای سدهای وزنی، با در نظر گرفتن کامل هر سه اندرکنش (سد-سنگ پی، سد-آب مخزن، سنگ پی-آب مخزن) موجود ارائه شد [7]. این روش که در سال‌های بعد، برای سدهای قوسی نیز گسترش یافت [8]، هر سه بخش مجموعه را به یاری راهکار اجزای مرزی سه بعدی مدل‌سازی می‌کرد. اما این روش، بدلیل استفاده از روش المان‌های مرزی در تمامی بخش‌های مجموعه، روش بسیار زمانبر و غیرمؤثر به شمار می‌رود. در سال ۱۹۹۵، Tan و Chopra [9]، به گسترش راهکار پیشینیان پرداختند. آنها سنگ پی را با استفاده از روش اجزاء مرزی سه بعدی تقریبی مدل کردند؛ به گونه‌ای که مرز مشترک سد و سنگ پی با المان مرزی دو بعدی مدل شده و با کمک سری‌های فوریه در جهت سوم، ماتریس امپدانس سنگ پی برای فرکانسهای مختلف محاسبه گردید. آنها با این کار، فرضیات ساده کننده بدون جرم و میرایی پنداشتن سنگ پی که تا آن زمان در روش زیرسازه بکار می‌رفت را از میان برداشتند و ماتریس امپدانس را در حالت سه بعدی برپا ساختند. اما این تکنیک، بدلیل استفاده از روش المان‌های مرزی، روش زمانبری می‌باشد و از طرفی محدوده سنگ پی در این مطالعه بصورت یکنواخت فرض شده بود. در سال ۲۰۰۷ لطفی از تکنیک FE-BE بهره گرفت. در این تکنیک سد با استفاده از اجزاء محدود و سنگ پی با اجزاء مرزی سه بعدی دقیق مدل شد. بدین صورت فرض یکنواخت بودن هندسه محدوده سنگ پی برداشته شد [10].

یکی از مهمترین مشکلات بسیاری از کارهای نسبتاً دقیق گذشته، بکار بردن روابط پیچیده اجزاء مرزی و یا ترکیب اجزاء مرزی و اجزاء محدود می‌باشد. بدین منظور در این مقاله سعی بر این است که از روش اجزای محدود که روش ساده‌تری نسبت به اجزاء مرزی می‌باشد، برای بررسی اندرکنش دینامیکی مجموعه سدهای بتنی قوسی و سنگ پی استفاده گردد. لازم به ذکر است که برای تحلیل سیستم از روش زیرسازه (Substructure Method) استفاده شده و تحلیل سیستم در حوزه فرکانسی بررسی شده‌است. در ضمن، می‌توان نتایج را با نتایج روش‌های اجزاء مرزی برای کل سیستم یا ترکیبی اجزاء مرزی و اجزاء محدود که در

$$\ddot{\mathbf{u}}(\omega) = \mathbf{J} \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) \quad (۸)$$

که در آن \mathbf{J} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_u \\ \mathbf{J}_b \\ \mathbf{J}_f \end{bmatrix}_{3N \times 3} \quad (۹)$$

ماتریسهای \mathbf{J}_u ، \mathbf{J}_b و \mathbf{J}_f به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3N_k}^T ; k = u, b, f \quad (۱۰)$$

N_u ، N_b و N_f به ترتیب تعداد گره‌های مربوط به بدنه سد به استثناء مرز مشترک، مرز مشترک بین سد-سنگ پی و سنگ پی می‌باشد. در بعضی از حالات تحلیل که جرم سنگ پی لحاظ شده‌است، برای مستهلک کردن امواج برخوردی به مرزها، دمپرهایی در نظر گرفته شده‌است. این دمپرها قادر به تضعیف امواج طولی و عرضی می‌باشند. مقدار کمی هر کدام از دمپره‌های طولی و عرضی در واحد سطح به ترتیب طبق روابط (۱۳) و (۱۴) بدست می‌آیند. در روابط زیر λ مدول بالک، ν ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، ρ چگالی، C_p و C_s مقدار کمی دمپرها در واحد سطح می‌باشد.

$$\lambda = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (۱۱)$$

$$G = \frac{E}{2 \times (1+\nu)} \quad (۱۲)$$

$$C_p = \sqrt{\lambda \times \rho} \quad (۱۳)$$

$$C_s = \sqrt{G \times \rho} \quad (۱۴)$$

با در نظر گرفتن دمپر در بعضی از وجه‌های سنگ پی، ماتریس سختی دینامیکی به صورت زیر در می‌آید:

$$\mathbf{K}_d = -\omega^2 \mathbf{M} + (1 + 2\beta i) \mathbf{K} + i\omega \mathbf{C}_{dashpot} \quad (۱۵)$$

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K} \mathbf{r} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{ub} & 0 \\ \mathbf{M}_{bu} & \mathbf{M}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_u \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{uu} & \mathbf{C}_{ub} & 0 \\ \mathbf{C}_{bu} & \mathbf{C}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_u \\ \dot{\mathbf{u}}_b \\ \dot{\mathbf{u}}_f \end{bmatrix} \quad (۴)$$

با توجه به رابطه (۴) مشاهده می‌شود که سمت راست این معادله فاقد جرم و میرایی ویسکوز محدوده سنگ پی می‌باشد. برای انتقال از حوزه زمان به حوزه فرکانس، کفایت توابع زمانی را به توابع فرکانسی تبدیل کرد. برای تحریک هارمونیک $\ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) e^{i\omega t}$ با فرکانس ω ، جابه‌جایی نیز رفتار هارمونیک خواهد داشت، یعنی می‌توان بردار جابه‌جایی را به صورت $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(\omega) e^{i\omega t}$ بیان کرد. با تغییر حوزه زمان به فرکانس، رابطه (۴) به صورت (۵) بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \end{bmatrix} \mathbf{r}(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{ub} & 0 \\ \mathbf{M}_{bu} & \mathbf{M}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(\omega) - \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{uu} & \mathbf{C}_{ub} & 0 \\ \mathbf{C}_{bu} & \mathbf{C}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(\omega) \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن میرایی هیسترتیک، رابطه (۵) به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \mathbf{M} + (1 + 2\beta i) \mathbf{K} \end{bmatrix} \mathbf{r}(\omega) = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{ub} & 0 \\ \mathbf{M}_{bu} & \mathbf{M}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(\omega) \quad (۶)$$

رابطه (۶) را می‌توان به صورت دیگری نیز بیان کرد:

$$\mathbf{K}_d \mathbf{r}(\omega) = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{ub} & 0 \\ \mathbf{M}_{bu} & \mathbf{M}_{bb}^u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(\omega) \quad (۷)$$

که در آن ماتریس سختی دینامیکی نامیده می‌شود. در رابطه فوق، $\ddot{\mathbf{u}}(\omega)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{S}}_{\beta f}^{\infty}(\omega_j) = \frac{1+2i\beta_f}{1+2i\zeta} \left[\tilde{\mathbf{S}}_{\zeta}^f(\omega_j) + \sqrt{1+2i\zeta} \times \left(\frac{1}{\sqrt{1+2i\beta_f}} - \frac{1}{\sqrt{1+2i\zeta}} \right) \omega_j \tilde{\mathbf{S}}_{\zeta}^f(\omega) \Big|_{\omega=\omega_j} \right] \quad (20)$$

در رابطه فوق، $\mathbf{C}_{\text{Dashpot}}$ ماتریس میرایی دمپ‌هایی که در مرزهای سنگ پی قرار داده شده‌اند، می‌باشد. با رویکرد زیرسازه، می‌توان معادله دینامیکی حاکم بر سیستم سد-سنگ پی را به شکل زیر نوشت:

در آن ترم \mathbf{S}_{uu} مطابق رابطه (۱۷) بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{uu} & \mathbf{S}_{ub} \\ \mathbf{S}_{bu} & \mathbf{S}_{bb} + \tilde{\mathbf{S}}_{\beta f}^f(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_u \\ \mathbf{r}_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{ub} \\ \mathbf{M}_{bu} & \mathbf{M}_{bb}^u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_u \\ \mathbf{J}_b \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(\omega) \quad (16)$$

$$\mathbf{S}_{uu}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M}_{uu} + (1+2\beta_d i) \mathbf{K}_{uu} \quad (17)$$

ترم‌های \mathbf{S}_{ub} و \mathbf{S}_{bb}^u به صورت مشابه با \mathbf{S}_{uu} تعریف می‌شوند. ماتریس $\tilde{\mathbf{S}}_{\beta f}^f(\omega)$ از کاهش درجات آزادی ماتریس $\mathbf{S}_{\beta f}^f(\omega)$ به درجات واقع بر فصل مشترک سد و سنگ پی بدست می‌آید.

$$\mathbf{S}_{\beta f}^f(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{bb}^f & \mathbf{S}_{bf} \\ \mathbf{S}_{fb} & \mathbf{S}_{ff} \end{bmatrix} \quad (18)$$

که در رابطه فوق مقدار $\mathbf{S}_{bb}^f(\omega)$ برابر:

$$\mathbf{S}_{bb}^f(\omega) = \left[-\omega^2 \mathbf{M}_{bb}^f + (1+2\beta_f i) \mathbf{K}_{bb}^f \right] \quad (19)$$

همچنین ترم‌های \mathbf{S}_{bf} و \mathbf{S}_{ff} به صورت مشابه با رابطه (۱۹) محاسبه می‌شوند. شایان ذکر است، در صورت استفاده از دمپر در مرزها، ترم \mathbf{S}_{ff} مشابه با رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

روند استفاده از روش استخراج حلال میرایی به این صورت می‌باشد که، ابتدا سنگ پی با میرایی بیش از میرایی واقعی اش ($0.2 \leq \zeta \leq 0.6$) با استفاده از روش زیرسازه آنالیز می‌شود. در گام بعد، با توجه به رابطه‌ای که در زیر ارائه شده است میرایی سنگ پی به مقدار واقعی خودش باز می‌گردد [11].

مدلهای اجزای محدود و مشخصات مصالح

یک برنامه کامپیوتری [2] براساس تئوری بیان شده در بخش قبل نوشته شده‌است. در این برنامه سد و محدوده سنگ پی با اجزای محدود تقسیم‌بندی شده‌اند. مصالح هر دو قسمت ویسکوالاستیک خطی با رفتار ایزوتروپیک در نظر گرفته شده‌است.

مدلها

در این مطالعه سد قوسی (*Morrow Point*) مورد بررسی قرار گرفته‌است. این سد در ایالت کلرادو امریکا و بر روی رودخانه گوانیسون (*Gunnison*) واقع شده‌است. با توجه به مطالعات متعددی که بر روی این سد انجام گرفته و شکل هندسی منظم آن، این سد برای تحلیل در نظر گرفته شده‌است.

برای سد *Morrow Point* که دارای شکل هندسی تقریباً متقارن است؛ یک مدل ایده‌آل متقارن در نظر گرفته شده‌است. بدنه سد از ۴۰ المان ۲۰ گرهی ایزوپارامتریک در یک لایه تشکیل شده‌است. بیشترین ارتفاع تاج سد تا پی ۱۴۷/۷۳ متر می‌باشد. شعاع قوس داخلی آن در تراز تاج ۱۱۴/۳۰ متر و در تراز صفر ۷۱/۵۷ متر می‌باشد. مشخصات هندسی کامل این سد در مرجع [4] ارائه شده‌است. برای این سد، سه نمونه مدل اجزای محدود سنگ پی تهیه شده‌است که در ادامه مشخصات آنها ارائه شده‌است. در

شده است.

جدول ۲: مشخصات گره‌های مد نظر برای خروجی نتایج

| شماره گره | X | Y | Z |
|-----------|--------|-------|---------|
| P106 | 26.181 | 3.039 | 141.730 |
| P146 | 0.0 | 0.0 | 141.730 |

مشخصات مصالح

بتن بدنه سد و سنگ پی، ایزوپارامتریک، همگن با رفتار ویسکو الاستیک خطی مدل شده‌اند. مشخصات این مصالح به صورت زیر می‌باشند.

| | |
|-------------------------|---------------------|
| 27.58 GPa | مدول الاستیسیته بتن |
| 24.83 kN/m ³ | وزن حجمی بتن |
| 0.2 | ضریب پواسون بتن |
| 26.43 kN/m ³ | وزن حجمی سنگ پی |
| 0.2 | ضریب پواسون سنگ پی |

به منظور بررسی اثر مدول الاستیسیته سنگ پی بر پاسخ سیستم، این پارامتر متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه پاسخ سیستم سد-سنگ پی، به نسبت مدول الاستیسیته سنگ پی به سد بستگی دارد، بنابراین تحلیل برای نسبت‌های $E_f/E_s = \infty, 2, 1, 0.5, 0.25$ انجام شده است.

نتایج

در جدول (۳) فرکانس‌های اصلی برای مودهای متقارن و پادمقارن سد بر روی پی صلب ارائه شده است. شایان ذکر است، نمودارهای ارائه شده در این قسمت که مربوط به حرکات به سمت بالادست (Upstream) و عمودی (Vertical) زمین است نسبت به ω_1^s (مربوط به مود متقارن سد با پی صلب) نرمال شده و نمودارهای مربوط به حرکت عرضی بالادست (Cross-stream) زمین نسبت به ω_1^a (مربوط به مود پادمقارن سد با پی صلب) نرمال شده است.

جدول ۳: فرکانس‌های اصلی سد روی پی صلب

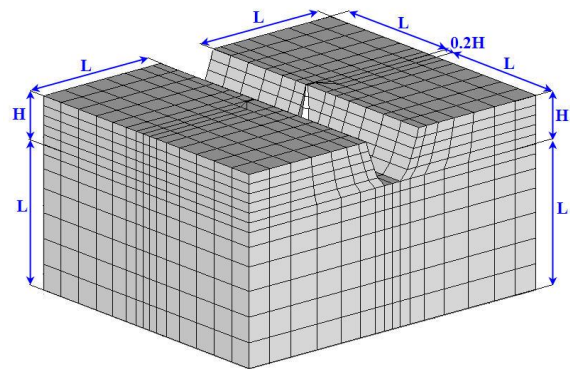
| E_{dam} (GPa) | ω_1^s (rad/sec) | ω_1^a (rad/sec) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| 27.579 | 26.1287 | 23.3809 |

جدول (۱)، نسبت ابعاد سنگ پی به ارتفاع سد، تعداد گره‌های سنگ پی و تعداد المان‌های سد و سنگ پی ارائه شده‌اند. ناگفته نماند، برای مدل‌سازی سنگ پی از المان ۲۰ گرهی ایزوپارامتریک استفاده شده است.

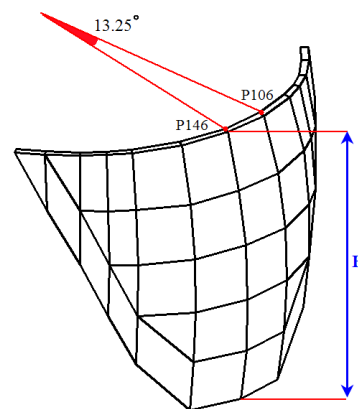
جدول ۱: مشخصات مدل اجزای محدود سنگ پی

| نام مدل | L/H | تعداد گره‌های سنگ پی | تعداد المانهای سد | تعداد المانهای سنگ پی |
|---------|-----|----------------------|-------------------|-----------------------|
| MM1 | 1 | 2172 | 40 | 378 |
| MM2 | 2 | 6138 | 40 | 1210 |
| MM3 | 3 | 13048 | 40 | 2730 |

به عنوان نمونه، شکل (۱) نشان‌دهنده مدل اجزای محدود سنگ پی مدل MM3 بوده که نسبت L/H آن ۳ می‌باشد. شکل (۲) نیز نشان‌دهنده بدنه سد *Morrow Point* می‌باشد. پارامترهای H و L در هر کدام از شکل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل اجزای محدود سنگ پی (L/H=3)



شکل ۲: مدل اجزای محدود سد Morrow Point

شایان ذکر است، نتایج برای دو گره P106 و P146 بدست آمده است؛ مشخصات دو گره مذکور در جدول (۲) آورده

- استخراج حلال میرایی (Damping Solvent Extraction) در این حالت نیز کلیه پارامترهای سنگ پی در نظر گرفته می‌شود. اما میرایی در نظر گرفته شده برای سنگ پی بیش از مقدار واقعی‌اش می‌باشد. در انتها، با توجه به روابط ارائه شده در بخش ۲، میرایی سنگ پی به مقدار واقعی خودش باز می‌گردد.

تأثیر محدوده مدل شده سنگ پی

در این بخش تأثیر محدوده مدل شده سنگ پی در پاسخ سیستم سد-سنگ پی مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور از سه مدل MM1 تا MM3 (مطابق جدول (۱)) استفاده شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده‌است. در ضمن مدول الاستیسیته سد و سنگ پی برابر بوده ($E_f/E_s=1.0$) و تحلیل برای حالت‌های صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل انجام شده‌است. نتایج مربوطه در نمودارهای ۱ الی ۳ ارائه شده‌است.

مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف بین نمودارهای دو مدل MM2 و MM3، مربوط به شتاب تاج سد در اثر تحریک در جهت بالادست زمین در فرکانس اول برای حالت اندرکنش کامل بوده که این اختلاف کمتر از ۵ درصد می‌باشد. اما در بقیه فرکانس‌های این حالت و دو حالت دیگر (صرفاً سختی و بدون جرم) اختلاف، کمتر از ۲ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در هر سه حالت مدل‌سازی سنگ پی، جوابها برای نسبت $L/H=2$ همگرا می‌شوند. لازم به ذکر است، نتیجه‌گیری فوق که برای $E_f/E_s=1.0$ ارائه شده برای سایر نسبت‌ها نیز صادق می‌باشد.

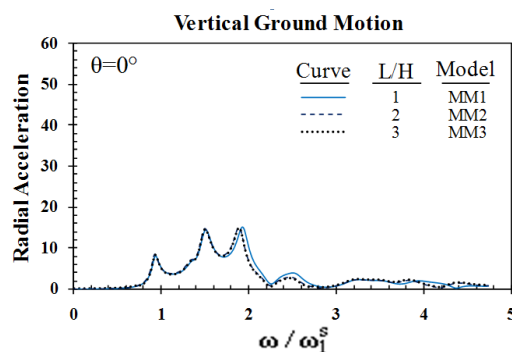
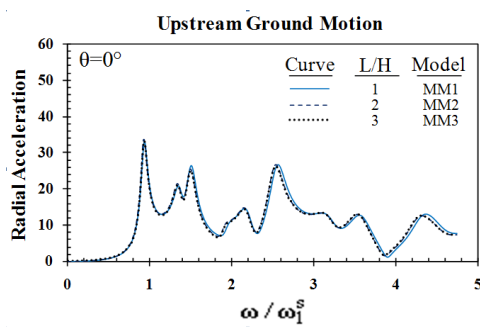
در زیر نتایج حاصل از تحلیل مدل سد همراه با سنگ پی‌های مختلف ارائه شده‌است. تحلیل‌های انجام شده شامل تحلیل دینامیکی در حوزه فرکانس می‌باشد. این تحلیل‌ها به وسیله برنامه کامپیوتری به زبان فرترن که به همین جهت نوشته شده‌است، انجام شده‌است. برنامه مذکور توانایی انجام انواع تحلیل‌های بیان شده، بر اساس فرمولاسیون ارائه شده در بخش ۲ را دارد.

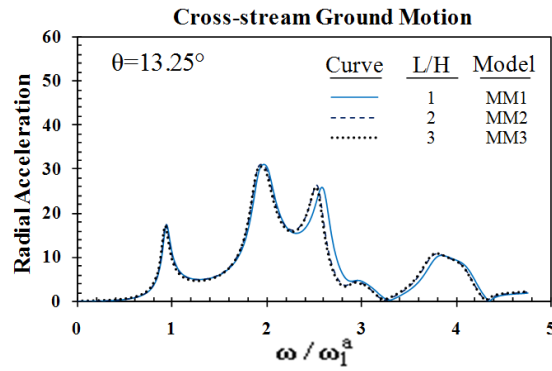
در این مطالعه تحلیل در حوزه فرکانس برای چهار حالت انجام شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. چهار حالت مذکور عبارتند از:

- سد با سنگ پی که صرفاً سختی آن در نظر گرفته شود (Foundation Flexibility Only)، در این حالت مدول الاستیسیته سنگ پی در نظر گرفته شده اما جرم و میرایی آن صفر در نظر گرفته شده‌است.

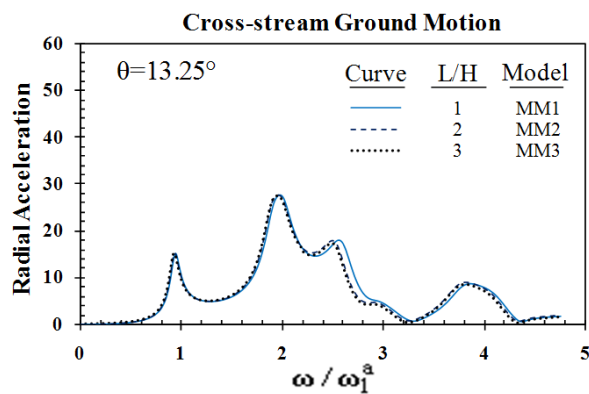
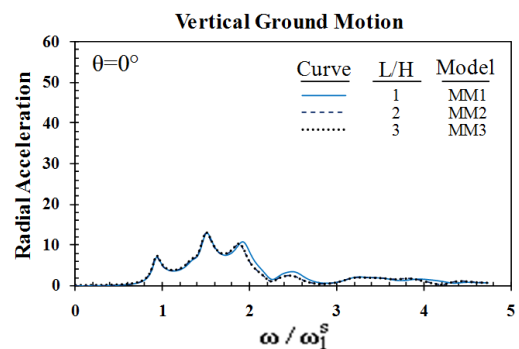
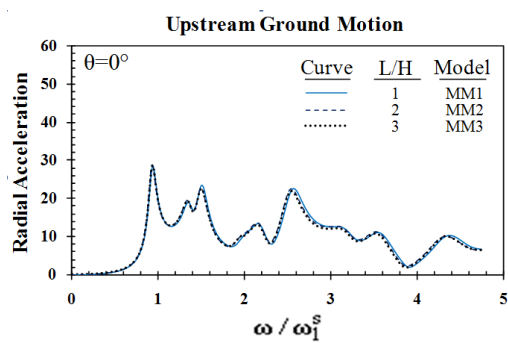
- سد همراه با سنگ پی بدون جرم (Massless Foundation) در این حالت جرم سنگ پی صفر در نظر گرفته شده اما مدول الاستیسیته و میرایی مخالف صفر می‌باشد. در این حالت به دلیل اینکه جرم سنگ پی صفر در نظر گرفته شده‌است (مشابه حالت اول)، بنابراین موجی در آن به وجود نمی‌آید که انعکاس آن در اثر برخورد با مرزها مشکل ساز شود و نتایج را مخدوش کند.

- سد همراه با سنگ پی با جرم و مستهلک کننده (Foundation with Mass and Dashpot)، در این حالت کلیه پارامترهای سنگ پی در نظر گرفته می‌شود (اندرکنش کامل). به دلیل اینکه جرم سنگ پی در نظر گرفته شده‌است امواج در آن ایجاد می‌شود و به منظور مستهلک کردن امواج برخوردی به مرزها، دمپرهایی قرار داده شده‌است.

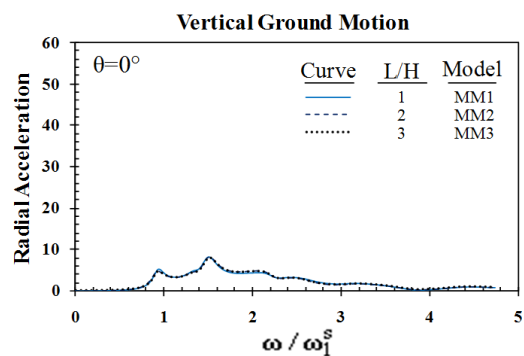
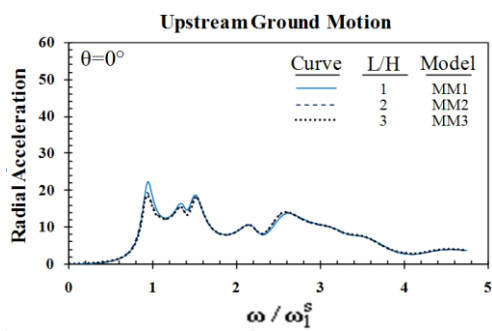


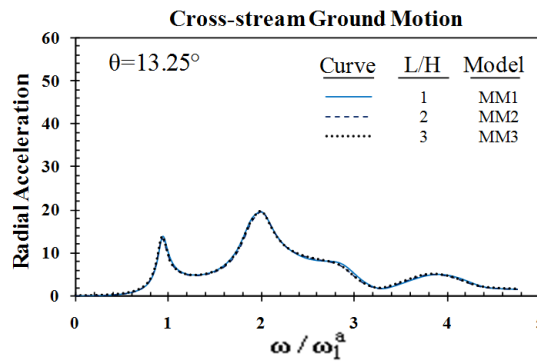


نمودار ۱: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین برای حالت صرفاً سختی (Foundation Flexibility Only, $E_f/E_s=1$.)



نمودار ۲: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین برای حالت بدون جرم (Massless Foundation, $E_f/E_s=1$.)





نمودار ۳: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین برای حالت اندرکنش کامل (Foundation with Mass and Dashpot, کامل $E_f/E_s=1$.)

مقایسه حالت‌های مختلف تحلیل

در این بخش نتایج مربوط به سیستم سد- سنگ پی برای سه حالت مدل‌سازی صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در ضمن نتایج سد بر روی پی صلب هم در هر حالت بعنوان پاسخ مرجع اولیه برای مقایسه ارائه گردیده‌است. نتایج مربوطه در نمودارهای ۴ الی ۶ آورده شده‌است. نمودارها برای چهار نسبت مدول الاستیسیته سنگ پی به سد ارائه شده‌اند.

نمودارها نشان می‌دهند که با کاهش نسبت E_f/E_s اختلاف بین پاسخ سد مدل مذکور بیشتر می‌شود. همچنین از نمودارها می‌توان دریافت که کاهش فرکانس مود اول سیستم به نسبت E_f/E_s بستگی دارد و در نظر گرفتن جرم سنگ پی تأثیر چندانی در فرکانس اول سیستم نمی‌گذارد. زیرا مقدار کاهش برای سه حالت صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل یکسان می‌باشد.

با توجه به نمودارها، می‌توان دریافت که اختلاف نتایج دو روش بدون جرم و اندرکنش کامل کمتر می‌باشد. اما باز هم به دلیل اینکه در روش بدون جرم تنها میرایی مصالح در نظر گرفته شده و قادر به مدل کردن میرایی تشعشعی نیست، هنوز خطای قابل توجهی وجود دارد. نتایج مربوط به روش اندرکنش کامل به دلیل اینکه هم میرایی مصالح و هم میرایی تشعشعی لحاظ شده‌است، از دقت خوبی برخوردار است.

اثر نسبت مدول الاستیسیته سد به سنگ پی

در این بخش، اثر نسبت مدول الاستیسیته سد و سنگ پی در پاسخ سیستم سد- سنگ پی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که در بخشهای پیشین بیان شد، تحلیل سیستم تنها به سختی سد یا سنگ پی بستگی ندارد بلکه به

نسبت سختی هر دو آنها بستگی دارد، بنابراین تحلیل‌ها براساس نسبت‌های سختی مختلف انجام شده‌است. در ادامه نتایج شتاب شعاعی مربوط به گره‌های تاج سد که در جدول (۲) بیان شده‌اند، تحت تحریک بالادست، قائم و عرضی زمین مربوط به حالت اندرکنش کامل ارائه شده‌است. نتایج مربوطه در نمودار ۷ ارائه شده‌است.

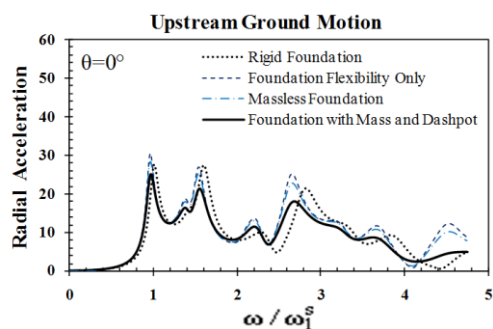
در این شکل مشاهده می‌شود، که با کاهش نسبت مدول الاستیسیته سنگ پی به سد، فرکانس اول و پاسخ شتاب تاج سد در فرکانس اول سیستم کاهش می‌یابد. نمودار ۸ برگرفته از مرجع [9] جهت مقایسه نتایج ارائه شده‌است. نمودار ۸- a قابل مقایسه با نمودار ۷- a از نتایج مطالعه حاضر می‌باشد و نشان می‌دهد که حالت اندرکنش کامل از دقت خوبی برای مدل کردن اندرکنش دینامیکی سد- سنگ پی برخوردار است. شایان ذکر است که نتایج مرجع [9] با استفاده از مدل ترکیبی اجزای محدود- اجزای مرزی بدست آمده‌است.

نمودار ۸- b نیز مقایسه دو روش تحلیل صرفاً سختی و اندرکنش کامل را برای نسبت $E_f/E_s=0.25$ نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار مذکور، با نمودار ارائه شده در این مطالعه (نمودار ۴- d)، مشاهده می‌شود که نتایج از دقت خوبی برخوردار است و اختلاف جزئی می‌باشد. این اختلاف اندک به دلیل تفاوت در روش تقسیم‌بندی و روش مورد استفاده (اجزای مرزی یا اجزای محدود) می‌باشد. جدول (۴) مقایسه کمی پاسخ برای ۱، ۲، ω/ω_s ، مربوط به حالت‌های صرفاً سختی، اندرکنش کامل و همچنین حالت پی صلب را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نتایج، مربوط به شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت بالادست برای $E_f/E_s=0.25$ می‌باشند.

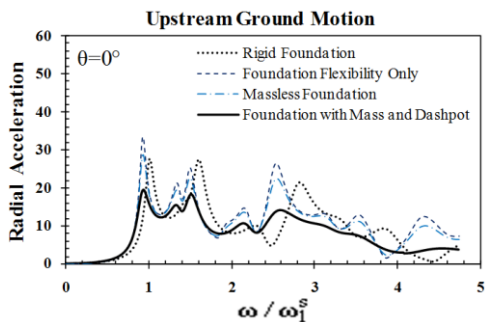
جدول ۴: مقایسه شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت بالادست ($E_f/E_s=0.25$)

| ω / ω_1^S | | درصد سنگ پی صلب | | درصد صرفاً سختی | | درصد اندرکنش کامل | |
|-----------------------|---------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------|-------|
| | | درصد اختلاف | درصد اختلاف | درصد اختلاف | درصد اختلاف | | |
| ۱ | مطالعه حاضر | 27.540 | | 11.580 | | 9.810 | |
| | مطالعه Tan & Chopra | 27.100 | 1.598 | 11.500 | 0.691 | 10.000 | 1.937 |
| ۲ | مطالعه حاضر | 7.997 | | 9.436 | | 5.980 | |
| | مطالعه Tan & Chopra | 7.500 | 6.215 | 11.100 | 17.635 | 5.900 | 1.338 |

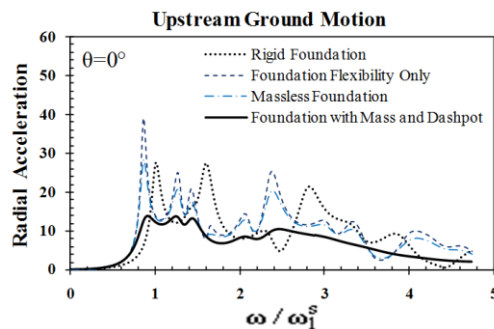
(a) $E_f/E_s=2$



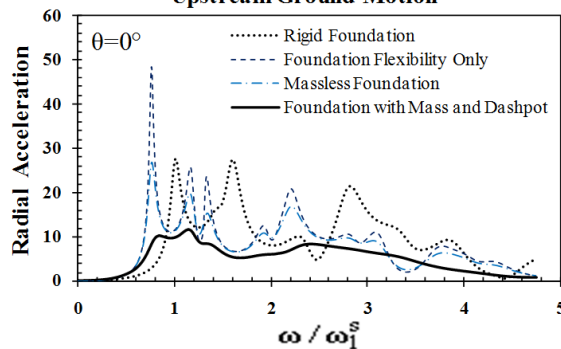
(b) $E_f/E_s=1$



(c) $E_f/E_s=1/2$

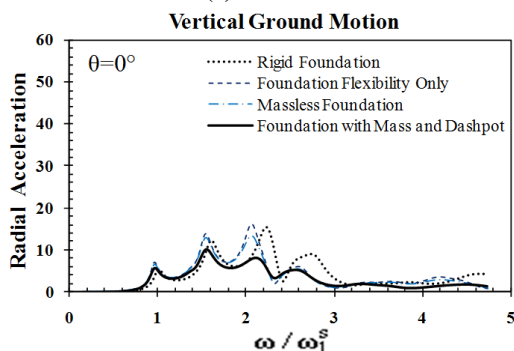


(d) $E_f/E_s=1/4$

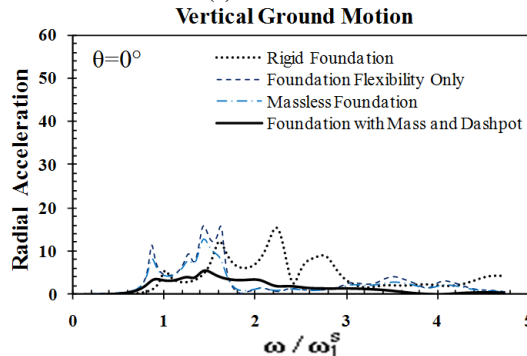


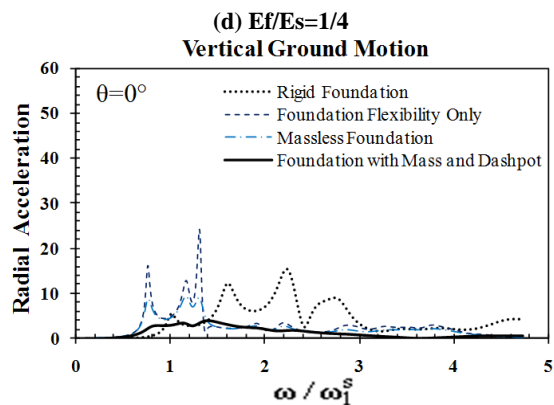
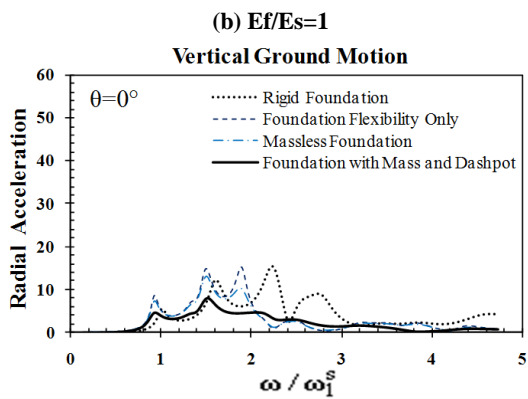
نمودار ۴: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت بالادست برای مدل MM2

(a) $E_f/E_s=2$

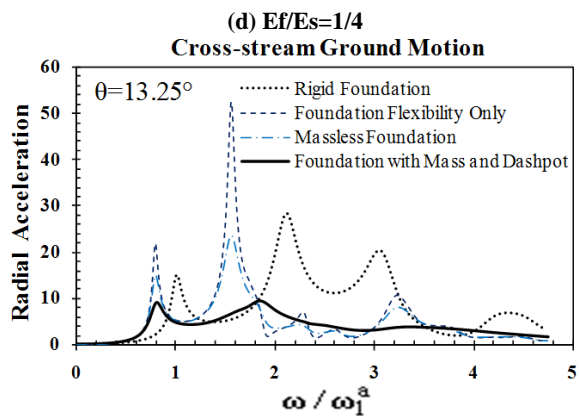
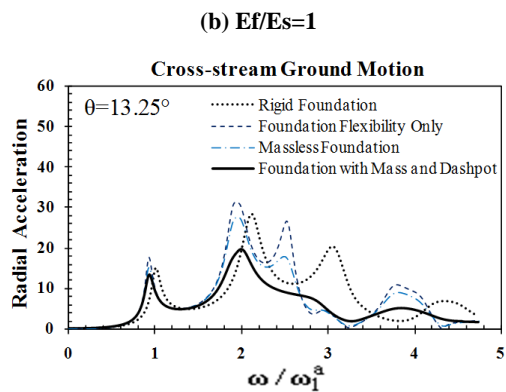
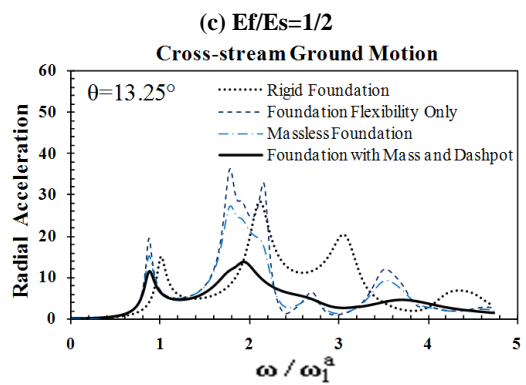
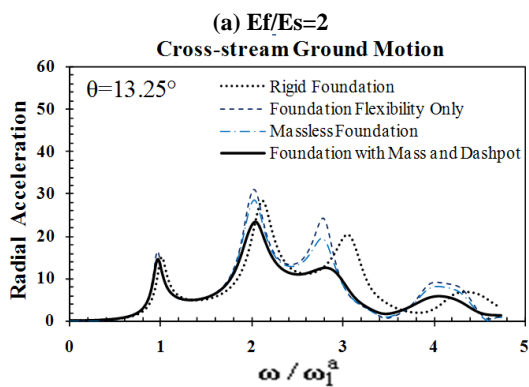


(c) $E_f/E_s=1/2$

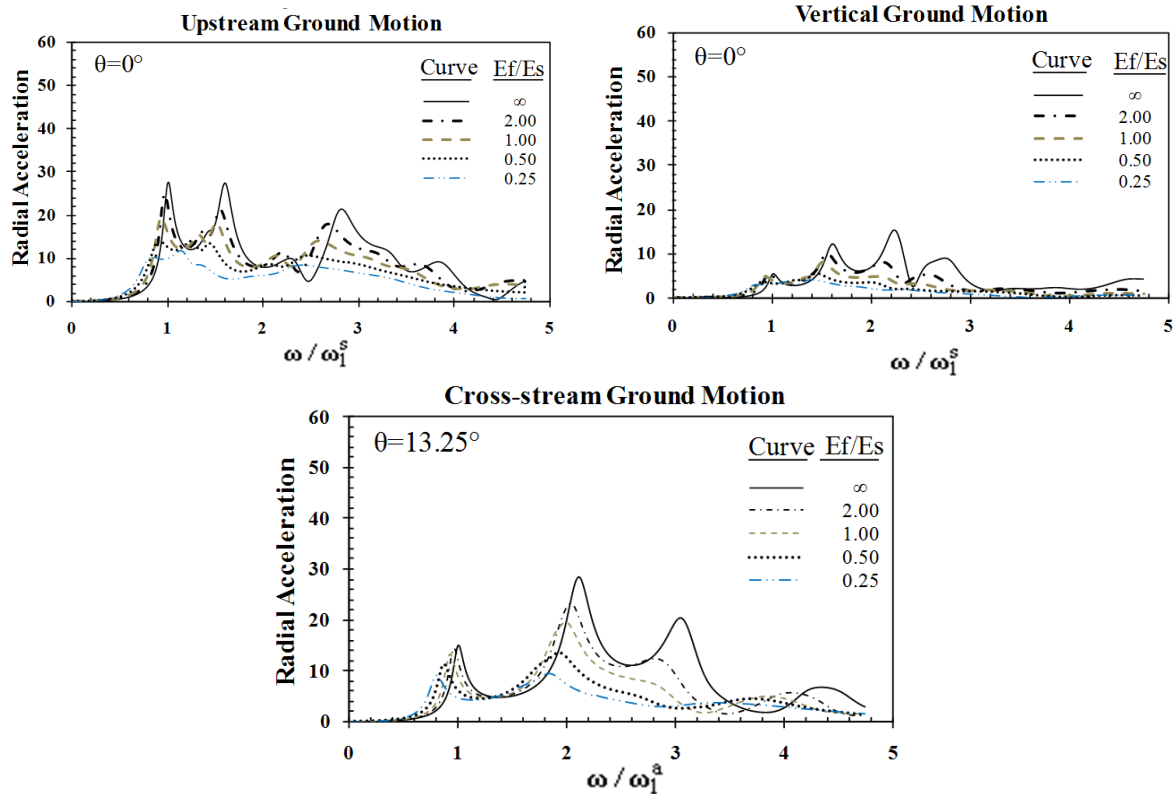




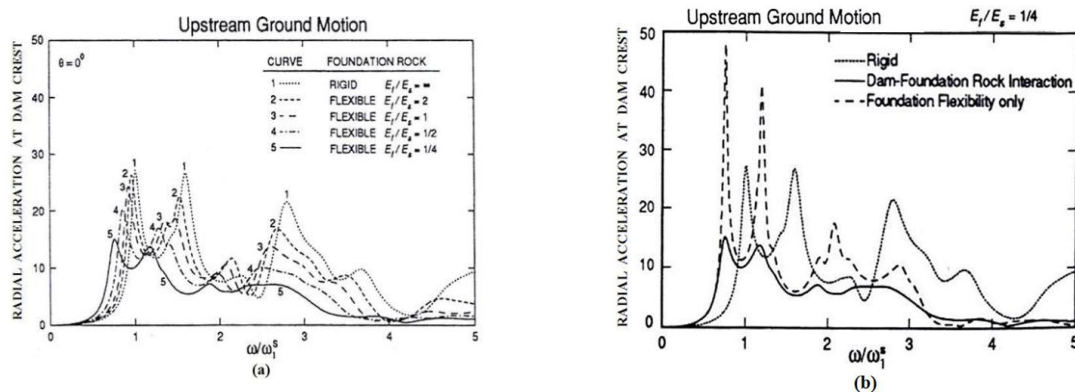
نمودار ۵: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت قائم برای مدل MM2



نمودار ۶: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت عرضی برای مدل MM2



نمودار ۷: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهات مختلف برای حالت اندرکنش کامل و مربوط به مدل MM2



نمودار ۸: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت بالادست،

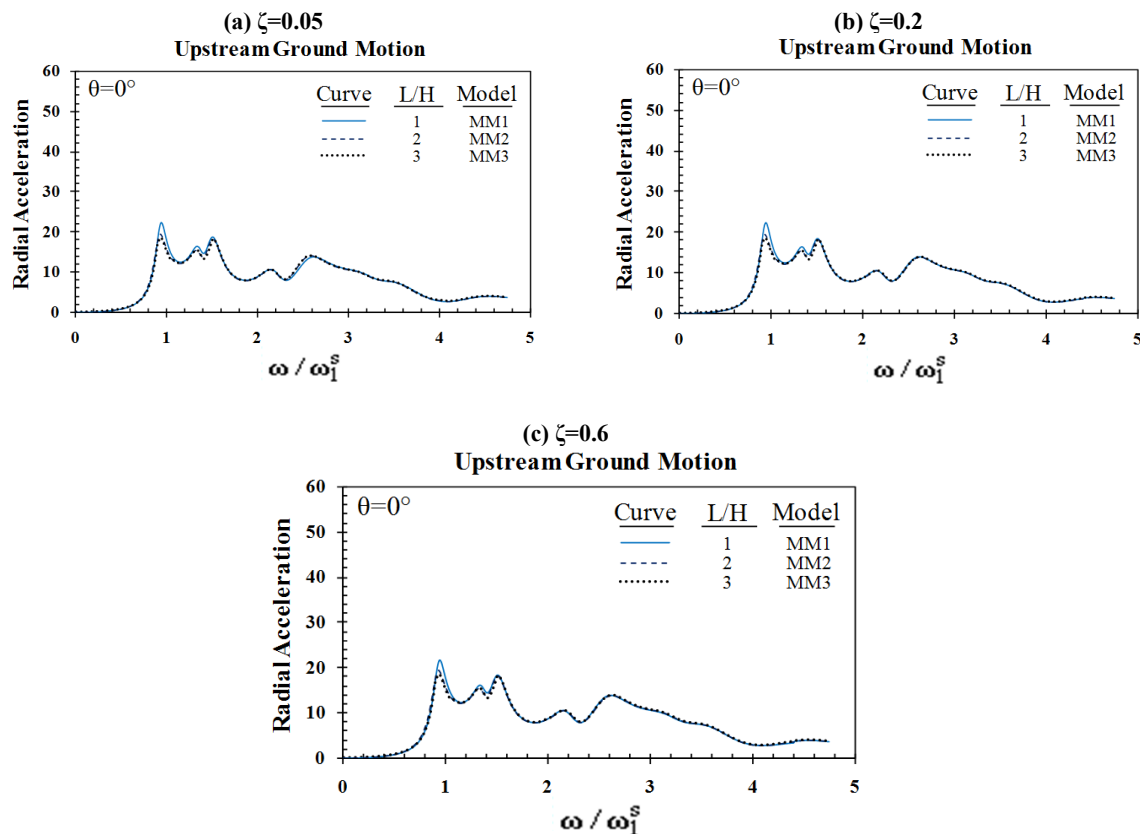
(a): تأثیر مدول الاستیسیته در پاسخ سد با در نظر گرفتن اندرکنش کامل سنگ پی

(b): مقایسه دو روش صرفاً سختی و اندرکنش کامل نسبت به حالت پی صلب برای $E_f/E_s=0.25$ (برگرفته از مرجع [9] جهت مقایسه نتایج)

میرایی 0.05, 0.2, 0.6 می‌باشد. مشاهده می‌شود روش استخراج حلال میرایی برای بهبود نتایج در نزدیکی فرکانس اول سیستم سد-سنگ پی آنچنان کارساز نمی‌باشد و تنها باعث همگرایی سریع‌تر پاسخ در فرکانس‌های بالاتر می‌شود.

تأثیر روش استخراج حلال میرایی

برای بررسی اثر روش استخراج حلال میرایی، از سه مدل MM1 الی MM3 استفاده شده‌است. نمودار ۹ مربوط به شتاب تاج سد تحت تحریک بالادست زمین برای سه نسبت



نمودار ۹: شتاب شعاعی تاج سد در اثر تحریک زمین در جهت بالادست

با استفاده از روش استخراج حلال میرایی و بکارگیری ضرایب میرایی مصنوعی مختلف ($E_f/E_s=1.$)

نتیجه گیری

پی به سد، فرکانس اول کاهش می‌یابد و پاسخ شتاب تاج سد در فرکانس اول سیستم افزایش می‌یابد. اما در دو حالت دیگر، با کاهش نسبت مدول الاستیسیته سنگ پی به سد، فرکانس اول و پاسخ شتاب تاج سد در فرکانس اول سیستم کاهش می‌یابد. شایان ذکر است، در حالت بدون جرم میرایی مصالح در نظر گرفته شده‌است اما به دلیل صرفه نظر کردن از میرایی تشعشعی اختلاف‌هایی بین حالت مذکور و حالت اندرکنش کامل (نزدیک‌ترین حالت به جواب‌های دقیق) وجود دارد. در حالت اندرکنش کامل میرایی مصالح و همچنین میرایی تشعشعی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که پاسخ این مدل بسیار نزدیک به مدل‌های پیچیده FE-BE مطالعات [9] Tan&Chopra می‌باشد. در ارتباط با روش استخراج حلال میرایی، مشاهده شد که این روش چندان برای کاهش محدوده سنگ پی در تقسیم‌بندی سیستم سد-سنگ پی کارساز نمی‌باشد و تنها باعث همگرایی سریع‌تر پاسخ در فرکانس‌های بالاتر می‌شود.

در این مقاله روابط حاکم بر تحلیل دینامیکی سد و سنگ پی در حوزه فرکانس شرح داده‌شد. بر اساس همین روابط یک برنامه کامپیوتری آماده شد و پاسخ دینامیکی سد بتنی قوسی و سنگ پی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پاسخ‌های روش FE-FE همراه با تمهیدات خاص و بکار بردن مرزهای جاذب موج با پاسخ‌های روش FE-BE تقریباً یکسان می‌باشد. مشاهده شد که مدل MM2 ($L/H=2.$) برای هر سه حالت صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل مناسب می‌باشد و نیاز به افزایش محدوده مدل شده سنگ پی ندارد.

نتایج مربوط به سیستم سد-سنگ پی برای سه حالت صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل نشان‌دهنده این است که با کاهش E_f/E_s اختلاف بین سه روش مذکور بیشتر می‌شود. ادامه نتایج حاکی از اثر نسبت مدول الاستیسیته سنگ پی به سد در حالت‌های صرفاً سختی، بدون جرم و اندرکنش کامل می‌باشند. مشاهده شد که در حالت صرفاً سختی با کاهش نسبت مدول الاستیسیته سنگ

مراجع

1. Wolf, J. P. (1985); *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, New Jersey.
2. Kazemi nia korrani H. R. (2010); "PACD: A program for Analysis of Concrete Dams", *Amirkabir University of Technology*, Tehran, Iran.
3. Hall J. F. and Chopra A. K. (1982), "Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams including Hydrodynamic Effects", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp 355-332.
4. Hall J. F. and Chopra A. K. (1983), "Dynamic Analysis of Arch Dams including Hydrodynamic Effects", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, pp 149-167.
5. Fok K. and Chopra A. K. (1986), "Earthquake Analysis of Arch Dams including Dam-Water-Interaction reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility", *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, Vol. 14, pp 155-184.
6. Fok K. and Chopra A. K. (1986), "Frequency Response Function for Arch Dam: Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects", *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, Vol. 14, pp 769-795.
7. Medina F., Dominguez J. and Tassoulas J. L. (1990), "Response of Dams to Earthquake including Effects of Sediments", *Journal of structural Engineering*, ASCE Vol. 116, pp 3108-3121.
8. Maeso O. and Dominguez J. (1993), "Earthquake Analysis of Arch Dams. I: Dam-Foundation Interaction", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE Vol. 119, pp 513-530.
9. Tan H. and Chopra A. K. (1995), "Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Frequency-Response Function of Arch Dam", *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, Vol. 24, pp 1475-1489.
10. Lotfi V. (2007), "Direct Frequency Domain Analysis of Concrete Arch Dams Based on FE-BE Procedure", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 26, pp 363-376.
11. Wolf, J. P. and Song Ch. (1996), "Finite-Element Modelling of Unbounded Media", JOHN WILEY & SONS.