

بررسی عددی اثرات هندسه شفت قائم بر پاسخ‌های لرزه‌ای سرریز نیلوفری (مطالعه موردی سد البرز)

مهدی حمیدی^{۱*}

علی مهدیان خلیلی^۲

چکیده

سرریزهای نیلوفری از انواع سرریزهایی می‌باشند که بررسی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها با توجه به شرایط خاص هیدرولیکی و سازه‌ای، بدون در نظرگیری اندرکنش سیستم سازه-آب-پی با دقت کافی همراه نخواهد بود. در این پژوهش مدل‌سازی سه‌بعدی سیستم سرریز نیلوفری به همراه مخزن، پی و تونل سرریز به روش اجزاءمحدود به منظور ارزیابی اثرات اندرکنش اجزای سیستم بر پاسخ‌های دینامیکی سرریز با استفاده از نرم‌افزار ANSYS.16 انجام پذیرفته است. برای تعیین اثر هندسه شفت قائم بر پاسخ‌ها، شتاب‌های زلزله طیس در سه راستا بر روی هفت مدل با چهار مقدار مختلف برای ارتفاع و چهار مقدار متفاوت برای قطر شفت قائم اعمال و تغییر مکان‌های تاج سرریز و نیز تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل استخراج شدند. بررسی نتایج مدل عددی به صورت کمی نشان می‌دهد افزایش ارتفاع شفت موجب کاهش فرکانس‌های سیستم گردیده ولیکن قطر شفت پارامتر چندان اثرگذاری بر فرکانس سیستم نیست. در بررسی‌های انجام‌شده مشخص شد، با افزایش ارتفاع شفت قائم مقادیر حداکثر مثبت و منفی تغییر مکان‌های قائم تاج سرریز و تنش‌های اصلی زانویی سرریز افزایش می‌یابد. این روند افزایشی برای تغییر مکان‌های قائم زمانی که سرریز طره‌ای و تنش‌ها زمانی که سرریز در پی گیردار است، مشهودتر می‌باشد. همچنین افزایش قطر شفت موجب افزایش مقادیر حداکثر تنش‌های اصلی زانویی سرریز می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

سرریز نیلوفری، تحلیل دینامیکی، شفت قائم، اندرکنش مخزن و پی

*۱. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل. hamidi@nit.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مقدمه

به پارامترهای هیدرولیکی و سیلاب طرح وابسته می‌باشد اما در مبحث به‌گزینی ابعاد سرریز و تعیین ارتفاع سد خاکی لازم است توجه ویژه‌ای به امکان تغییر ابعاد سرریز نیلوفری و در نتیجه تغییر ارتفاع سد گردد. از این رو شناخت رفتار دینامیکی سیستم سرریز نیلوفری با در نظرگیری تغییر ابعاد آن می‌تواند مفید باشد. در ادامه مروری بر مطالعات و نتایج پژوهشگران در این زمینه و تحلیل لرزه‌ای سرریزهای نیلوفری انجام می‌شود.

لیو و چوپرا^۱ طی سال‌های ۱۹۷۴-۱۹۷۵، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی مسئله اندرکنش مخزن - برج‌های مستغرق در آب انجام دادند. در سال ۱۹۸۹ گویال و چوپرا^۲ با توسعه روش تحلیل لرزه‌ای برج‌های متقارن و با در نظرگیری اثرات اندرکنش برج - مخزن و پی، تحلیل لرزه‌ای خطی برج‌های آبگیر با هندسه دلخواه با دو محور متقارن در پلان را انجام داده‌اند. ایشان با روش تحلیلی چهار معادله فرکانسی مجزا برای چهار زیرسازه پی، برج-پی، آب مخزن و آب درون برج معرفی کردند. هوشیارخوشدل^۳ در سال ۱۳۷۴ با در نظر گرفتن فشار هیدرودینامیکی و چشم‌پوشی از اثر امواج سطحی و تراکم-پذیری آب، پاسخ برج‌های متقارن نیمه مستغرق در تمامی مودهای ارتعاش را یافته و به همراه دقت پاسخ‌های حاصل از روش جرم افزوده هیدرودینامیکی ارزیابی نمود. زاده موسی^۴ در سال ۱۳۷۶ اثرات آب درونی و پیرامونی بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های متقارن محوری نیمه مستغرق و مستغرق همانند برج‌های آبگیر و سرریزهای نیلوفری را با فرض تراکم‌پذیری سیال، تحت اثر مؤلفه افقی شتاب زلزله مورد ارزیابی قرار داد. نتیجه مطالعات وی نشان می‌دهد که در تحلیل سازه‌های مستغرق و نیمه مستغرق در آب، به دلیل آنکه اندرکنش سیال و سازه به-واسطه افزایش پروده‌های طبیعی مجموعه بر پاسخ سازه نیز اثر می‌گذارد، نیروهای هیدرودینامیکی سیال بر سازه می‌بایست در محاسبات لحاظ شود. مجیا و همکاران^۵ در سال ۱۹۹۶ رویکرد منطقی برای تحلیل برج‌های سرریز نیلوفری و تشریح اثرات اندرکنش سازه- خاک بر پاسخ دینامیکی سازه حاضر ارائه نمودند. نتایج ایشان نشان داد تحت بارگذاری لرزه‌ای، لنگرهای خمشی و برش‌ها نسبت به فرض محاسبه‌شده برج در حالت تنها افزایش می‌یابد.

سدها به‌عنوان مهم‌ترین منبع ذخیره آب موردنیاز جوامع بشری، شامل سازه‌های جنبی هیدرولیکی می‌باشند که بر ایمنی و عملکرد سد اثرگذارند. انواع مختلف سرریزها، به‌عنوان یکی از اجزای هیدرولیکی مهم سدها، وظیفه تخلیه آب‌های اضافی مخازن در مواقع لزوم بخصوص در هنگام وقوع سیلاب را برعهده دارند. سرریزهای نیلوفری یکی از انواع رایج سرریزها است که در بسیاری از موارد به‌عنوان گزینه برتر سیستم تخلیه سیلاب شناخته می‌شوند. ساختمان سرریز نیلوفری دارای اجزای مختلفی است که شامل یک سرریز قیفی شکل با هندسه دایره‌ای در پلان، شفت قائم و در برخی اوقات شفت مایل، یک خم و تونلی که به جریان خروجی منتهی می‌شود، است.

عملکرد هیدرولیکی و سازه‌ای نامناسب سرریز می‌تواند تهدیدی برای پایداری سدها به‌ویژه سدهای خاکی بوده و مخاطراتی برای جمعیت ساکن پایین‌دست آن منطقه ایجاد کند. لذا توجه به ایمنی سد با در نظرگیری پارامترهای مختلف طراحی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مهم‌ترین مسائل موردبحث در زمینه ایمنی سدها، رفتار و عملکرد سازه در مواجهه با تحریکات زمین است که لزوم توجه به ارزیابی‌های لرزه‌ای را دوچندان می‌کند.

طراحی لرزه‌ای بخش‌های زیرزمینی سرریز نیلوفری با محاسبه جابجایی برشی میدان آزاد تحت اثر عبور موج لرزه‌ای، محاسبه جابجایی واقعی سازه با احتساب ضریب انعطاف‌پذیری سازه و تغییرشکل میدان آزاد و اعمال تغییرمکان واقعی سازه زیرزمینی انجام می‌گردد ولی ارزیابی لرزه‌ای دقیق‌تر سرریز نیلوفری نیازمند تحلیل مناسبی از پاسخ دینامیکی سرریز و اندرکنش آن با پی و مخزن پیرامونی است. از این رو مدل‌سازی این سازه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که بیانگر رفتار واقعی سیستم پیوندی سازه- آب- خاک گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد تا به امروز مطالعات مدون و متمرکز اندکی بر روی تحلیل پاسخ دینامیکی سرریزهای نیلوفری انجام شده است ولی مدل-سازی تحلیلی اندرکنش برج‌های مستغرق در آب (رفتاری مشابه با این نوع سرریزها دارد) از دیرباز توسط پژوهشگران مطرح بوده و طی سالیان تکمیل گردیده است. از طرفی، اگرچه ابعاد سیستم تخلیه سیلاب در سرریزهای نیلوفری

۴. Houshyar Khoshdel

۵. Zadeh Mousa

۶. Mejia et al

۱. Liaw & Chopra

۲. Surface Waves

۳. Goyal & Chopra

مقایسه با دیگر روش‌های تحلیلی با اقبال بیشتری مواجه بوده‌اند.

مواد و روش‌ها

فرمول‌بندی سیستم

در تحلیل عددی مدل اجزاءمحدود سیستم برای در نظر گرفتن اندرکنش میان جسم جامد و سیال دو روش کلی لاگرانژی- اویلری^۴ و لاگرانژی- لاگرانژی^۵ وجود دارد. در روش لاگرانژی- اویلری تاریخچه یک نقطه دلخواه و ثابت در فضا مورد مطالعه قرار می‌گیرد و مجهول در محیط سیال، فشار یا پتانسیل سرعت نقاط گرهی می‌باشد. در حالی که در روش لاگرانژی- لاگرانژی سرگذشت یک‌ذره در طول زمان بررسی می‌شود و مجهول در محیط سازه و سیال، تغییر مکان گرهی المان است. برای محیط جامد در هر دو روش اویلری- لاگرانژی و لاگرانژی- لاگرانژی از یک فرمولاسیون واحد می‌توان بهره گرفت اما تفاوت این دو روش در فرمول‌بندی محیط سیال است. مهم‌ترین مزیت روش لاگرانژی- لاگرانژی نسبت به روش لاگرانژی- اویلری استفاده از یک فرمول‌بندی واحد در محیط جامد و سیال است که معادلات تعادل و سازگاری در گره‌های مرز مشترک جسم جامد و سیال برقرار می‌باشد. لذا در این پژوهش از روش لاگرانژی- لاگرانژی برای تحلیل سیستم سه‌بعدی سرریز- آب- پی استفاده می‌گردد.

از آنجاکه آب جزو سیالاتی است که در آن‌ها رابطه فشار و کرنش حجمی را تا دامنه به نسبت زیادی از فشار می‌توان خطی فرض نمود لذا رابطه فشار- کرنش حجمی را می‌توان به صورت رابطه (۱) تعریف کرد.

$$P = -K_B \varepsilon_V \quad (1)$$

که P میانگین فشارها (تنش‌های فشاری در سه بعد)، K_B مدول بالک و ε_V نیز کرنش حجمی می‌باشد و برابر است با:

$$\varepsilon_V = \text{div}(U) = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2)$$

که U تابع تغییر مکان، u_x ، u_y و u_z به ترتیب تغییر مکان در راستای x ، y و z و همچنین ε_x ، ε_y و ε_z به ترتیب کرنش در راستای x ، y و z می‌باشند.

فقیه‌محدث و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۱ پس از حدود ۴۸ سال از بهره‌برداری سد سپیدرود با مطالعه سرریز نیلوفری آن، آسیب‌های متعددی بر روی پوشش فولادی سمت بیرونی خم عمودی یکی از شفت‌های سرریز مشاهده نمودند. مطالعات آن‌ها نشان داد کیفیت توده سنگ هوازده و ضعیف اطراف شفت سرریز همچون ترک‌های جزئی در پوشش بتنی، موجب افزایش فشار آب‌شده و بر روی پوشش فولادی آسیب ایجاد می‌کند. این پژوهشگران با انجام ارزیابی‌های ژئوتکنیکی علل آسیب و روش بهسازی برای کاهش نفوذ آب مخزن از مفاصل ترک‌خورده از پوشش فولادی را مورد بررسی قرار دادند. صنایع‌ها و همکاران^۲ طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۱ با استفاده از روش اجزای مرزی در فضای فرکانسی به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش محیط‌های نیمه بی‌نهایت سازه- پی، سیال- پی و سازه- سیال به صورت سه‌بعدی پرداختند. ایشان برای بررسی صحت روش مورد استفاده ابتدا فرکانس طبیعی سرریز نیلوفری سد بارزو^۳ در شهر شیروان را به دست آورده سپس پاسخ تکیه‌گاه صلب را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت نیز پاسخ سازه را با در نظر گرفتن اندرکنش محیط‌های سازه و پی به صورت همگن، خطی و الاستیک و محیط مخزن نیز با فرض تراکم‌پذیر و غیرویسکوز بودن سیال، بررسی نمودند. با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش، وجود سیال در تماس با بدنه سازه باعث افزایش جرم مؤثر و کاهش فرکانس‌های ارتعاشی سیستم گردید. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، در مطلب حاضر ابتدا فرمول‌بندی حاکم بر سیستم سه‌بعدی سازه- آب- پی ارائه شده و سپس به منظور بررسی صحت فرمول‌بندی به کاررفته نمونه‌هایی تشریح گردیدند. در ادامه این پژوهش، تحلیل دینامیکی سه‌بعدی سرریز نیلوفری سد البرز تحت عنوان مطالعه موردی بررسی شده و پاسخ‌های سازه‌ای سرریز همچون تغییر مکان‌ها و تنش‌ها با توجه به اندرکنش اجزای سیستم استخراج گردیدند. در دهه‌های اخیر به دلیل پیشرفت رایانه‌ها و امکان طرح سازه‌هایی با هندسه‌های پیچیده‌تر متناسب با روش‌های ساخت، روش‌های عددی در

۴. Lagrangian- Eulerian
۵. Lagrangian- Lagrangian

۱. Faghihimohaddess et al
۲. Sanaeiha et al
۳. Barzo dam

معادلات حاکم

در حالت کلی در روش لاگرانژی- لاگرانژی معادله تعادل دینامیکی حرکت برای این سیستم تحت شتاب زمین برحسب تغییر مکان نقاط گرهی در شبکه اجزای محدود، مطابق رابطه (۳) می‌باشد.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(s) \quad (3)$$

که M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی، سختی و \dot{u} و u به ترتیب بردار شتاب، سرعت و تغییر مکان دینامیکی نقاط گرهی شبکه اجزای محدود و $P(s)$ بردار نیروهای خارجی گرهی است. ماتریس سختی کل سیستم مطابق رابطه (۴) از سرهم کردن ماتریس سختی بخش‌های مختلف سیستم حاصل می‌شود.

$$K = K_S + K_R + K_F + K_{INT} \quad (4)$$

که K_S ، K_R و K_F به ترتیب ماتریس سختی اجزا سرریز، مخزن و پی بوده و K_{INT} نیز که ماتریس سختی اجزای تماسی می‌باشد به منظور اعمال شرایط مرزی بین محیط جامد و سیال شامل آزادی لغزش و عدم جدایی مخزن از سرریز یا پی و نیز آب داخلی سرریز از سرریز یا پی در مرزهای مشترک آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. ماتریس سختی اجزای جسم جامد از رابطه (۵) به دست می‌آید. در این رابطه D ماتریس الاستیسیته، B ماتریس توابع شکل، B^T ترانهاده ماتریس B و V_S حجم محدوده انتگرال‌گیری هر بخش از اجزای سرریز یا پی است.

$$K_S = K_F = \int_{V_S} B^T DB dv \quad (5)$$

S_f ماتریس سختی ناشی از امواج سطحی از رابطه (۶) حاصل می‌شود که در آن چگالی آب، g شتاب ثقل، S دامنه سطح سیال، V_R دامنه حجم مخزن، N تابع شکل گره‌های سیال و N^T ترانهاده تابع شکل می‌باشد. در نرم-افزار مورد استفاده در این پژوهش با مدل‌سازی سطح مخزن ویژگی امواج سطحی ایجاد گردیده است و نیاز به اعمال شرط مرزی مربوط به آن نیست.

$$S_f = \rho_w \cdot g \int_S N^T \cdot N \cdot ds \quad (6)$$

ماتریس سختی کل اجزای مخزن از مجموع ماتریس سختی مخزن K_W و ماتریس سختی ناشی از امواج سطحی S_f مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$K_R = K_W + S_f = \int_{V_R} B^T C_f B dv + \quad (7)$$

$$\rho_w \cdot g \int_S N^T \cdot N \cdot ds$$

ماتریس میرایی کل سیستم از مجموع C_I میرایی ویسکوز داخلی اجزای سرریز، مخزن و پی، C_R میرایی ناشی از انتشار امواج در مرز بالادست مخزن و مرزهای آزاد پی مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$C = C_I + C_R \quad (8)$$

در معادلات تعادل دینامیکی، ماتریس میرایی ویسکوز داخلی اغلب به صورت ترکیبی از ماتریس جرم و ماتریس سختی الاستیک سیستم به فرم رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$C_I = \alpha M + \beta K \quad (9)$$

ضرایب α و β به ترتیب ضریب ماتریس جرم و ضریب ماتریس سختی هستند که مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند.

$$\alpha = 2\omega_1 \xi_1 - \omega_1^2 \quad (10)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_1 \xi_1 - \omega_2 \xi_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (11)$$

در روابط فوق اندیس‌های ۱ و ۲ مربوط به مودهای سازه‌های اول و دوم و ξ میرایی سازه است که برای سرریز ۰.۰۵ در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی

به منظور اعمال شرایط مرزی وجه بالادست مخزن برای تأمین شرط عبور امواج فشاری آب بدون هیچ انعکاسی، از میراگرهای معادلی استفاده می‌شود که ماتریس میرایی آن مطابق رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$C_R = \rho_w \cdot C_w \int N^T \cdot N \cdot ds \quad (12)$$

N توابع شکل اجزای مخزن در مرز، ρ_w جرم حجمی آب و C_w سرعت امواج الاستیک در محیط مخزن است و از رابطه (۱۳) حاصل می‌گردد؛ K_w نیز مدول بالک آب است. ضریب پشت انتگرال رابطه (۱۲) نیز عموماً با C_I نشان داده می‌شود.

$$C_w = \sqrt{\frac{K_w}{\rho_w}} \quad (13)$$

شایان ذکر است که روابط فوق در نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش لحاظ شده است. فرضیاتی که در این پژوهش در نظر گرفته شدند، به شرح زیر می‌باشد:

۱- آب مخزن غیرلزج در نظر گرفته شده است.
۲- مرز بالادست مخزن، محدود فرض شده و از شرط انتشار امواج در آن استفاده شده است.

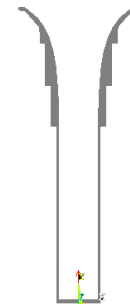
۳- مصالح سرریز، آب مخزن، پی و تونل همگن و ایزوتروپ فرض شده و از رفتار غیرخطی هندسی سیستم صرف‌نظر گردیده است.

صحت‌سنجی مدل‌سازی

به‌منظور بررسی صحت و کارایی فرمول‌بندی لاگرانژی- لاگرانژی که در نرم‌افزار به‌منظور حل به روش اجزاءمحدود به‌کارگرفته شده است، نمونه‌هایی ساده به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی گردیده و صحت نتایج مورد ارزیابی قرارگرفته است. شایان‌ذکر است با افزایش تعداد مش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در صحت‌سنجی، دستیابی به‌دقت بالاتر نیز امکان‌پذیر می‌باشد.

تحلیل استاتیکی دوبعدی سرریز تنها (سرریز نیلوفری سد البرز)

به‌منظور بررسی صحت محاسبات نرم‌افزار در تحلیل اجزاء- محدود، سرریز نیلوفری سد البرز با ارتفاع ۵۸ متر به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی گردیده که مدل هندسی آن در شکل (۱) نشان داده‌شده است. برای مدل‌سازی بتن از المان دوبعدی ۸ گرهی Plain183 به ابعاد ۱ متر استفاده‌شده است. بتن به‌کارگرفته در سازه دارای مدول الاستیسیته 3×10^{10} نیوتن بر مترمربع، ضریب پواسون ۰,۲ و چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.



شکل (۱): مدل هندسی دوبعدی سرریز سد البرز

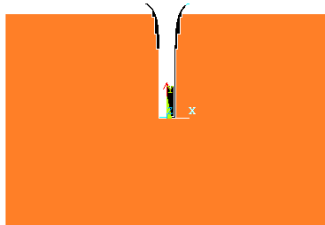
قیدهای تکیه‌گاهی با توجه به قرارگیری سرریز در پی بر روی دیواره‌های افقی و قائم اعمال و سیستم تحت اثر وزن خود قرار می‌گیرد. نتایج تغییرمکان قائم تاج سرریز به‌دست‌آمده از نرم‌افزار و رابطه تحلیلی مقاومت مصالح مطابق رابطه (۱۴) مقایسه شدند. تغییرمکان حاصل از تحلیل اجزاء محدود ۱,۲ میلی‌متر به‌دست‌آمده است. با قرار دادن مقادیر وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و ارتفاع در رابطه (۱۴) تغییرمکان ۱,۴ میلی‌متر به دست می‌آید.

$$u_1 = \frac{\gamma_c h^2}{2E} = \frac{2500 \times 58^2}{2 \times 3 \times 10^9} = 14017 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.4017 \text{ mm} \quad (14)$$

تحلیل دینامیکی دوبعدی سرریز با پی صلب و انعطاف‌پذیر (سرریز نیلوفری سد البرز)

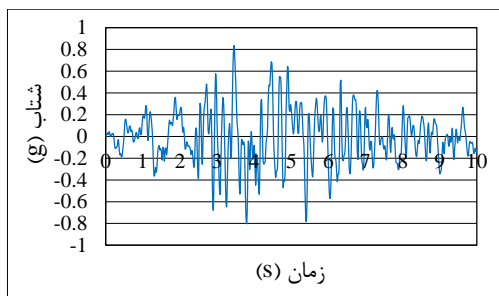
برای تعیین اثرات جنس پی بر پاسخ‌های دینامیکی سرریز، به مدل دوبعدی سرریز نیلوفری سد البرز، پی به طول ۱۷۲

متر و ارتفاع ۱۱۲ متر با مدول الاستیسیته $8,7 \times 10^{10}$ نیوتن بر مترمربع، ضریب پواسون ۰,۲۳ و چگالی ۲۳۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب اضافه‌شده است. شکل (۲) مدل هندسی سیستم را نشان داده و برای مدل‌سازی پی از المان دوبعدی ۸ گرهی Plain183 به ابعاد ۱۰ متر استفاده‌شده است.

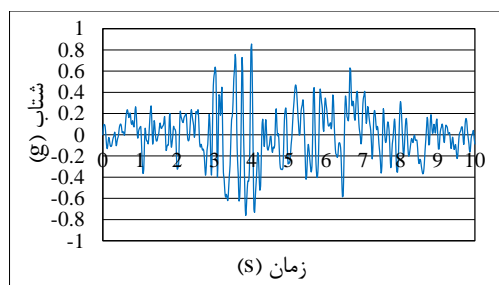


شکل (۲): مدل هندسی دوبعدی سرریز نیلوفری و پی

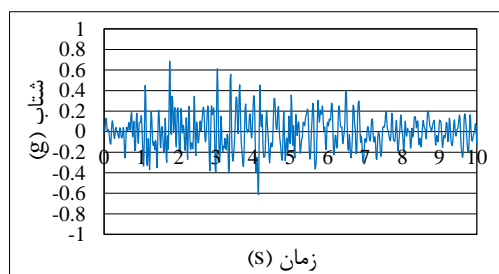
برای انجام تحلیل دینامیکی سیستم، شتاب‌های زلزله طبس در سه راستای افقی، جانبی و قائم مدنظر قرار گرفت. شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب شتاب‌نگاشت‌های زلزله طبس را در سه راستای افقی، جانبی و قائم نشان می‌دهند.



شکل (۳): شتاب‌نگاشت زلزله طبس در راستای افقی (x)



شکل (۴): شتاب‌نگاشت زلزله طبس در راستای جانبی (y)



شکل (۵): شتاب‌نگاشت زلزله طبس در راستای قائم (z)

سرریز از هر طرف لحاظ شده است. پی با ارتفاع ۱۱۴ متر، طول ۲۴۰ متر و عرض ۱۲۸ متر به مدل اضافه شده است. مشخصات مکانیکی مصالح بکار رفته در این مدل همچون مدول الاستیسیته E برحسب نیوتن بر مترمربع، ضریب پواسون ν و جرم حجمی ρ برحسب کیلوگرم بر مترمکعب مطابق جدول (۱) می باشد.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی مصالح به کاررفته در مدل اجزا محدود

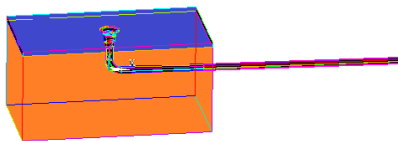
سیستم			
ρ (Kg/m ³)	ν	E (N/m ²)	مصالح به کاررفته
۲۵۰۰	۰,۲	3×10^{10}	بتن سرریز و تونل
۱۰۰۰	۰	2×10^9	آب
۲۳۴۰	۰,۲۳	$8,7 \times 10^{10}$	پی

مشخصات ابعاد و نوع المان های به کاررفته در بخش های مختلف مدل اجزا محدود سیستم سرریز، مخزن، پی و تونل در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول (۲): ابعاد و نوع المان های به کاررفته در بخش های مختلف مدل اجزاء محدود سیستم

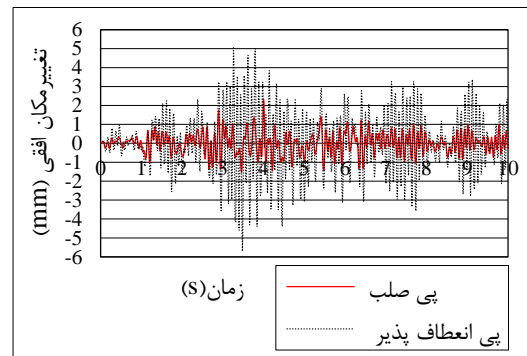
مصالح به کاررفته	نوع المان	ابعاد المان (متر)
قیف سرریز	Solid65	۱
شفت قائم سرریز	Solid65	۴
زانویی سرریز	Solid65	۴
تونل سرریز	Solid65	۴
مخزن	Fluid80	۴
پی	Solid45	۲۰

در مدل اجزاء محدود این سیستم به منظور ایجاد اندرکنش میان سازه و سیال و نیز سیال و پی، مرزهای مشترک در راستای تماس پیوسته شده است. بدین صورت که در این راستا قید حرکتی وجود داشته ولی گره ها در دو راستای دیگر آزادی حرکتی دارند. در مرز بالادست مخزن از میراگرهایی با ویژگی روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده گردیده است و در وجوه آزاد پی، وجوه جانبی و وجه پایین دست مخزن که منتهی به سد می شود، از قیود تکیه گاهی در راستای عمود بر وجه استفاده شده است. شکل (۸) محل قرارگیری سرریز، مخزن، پی و تونل به کاررفته در مدل اجزا محدود سیستم را نشان می دهد.

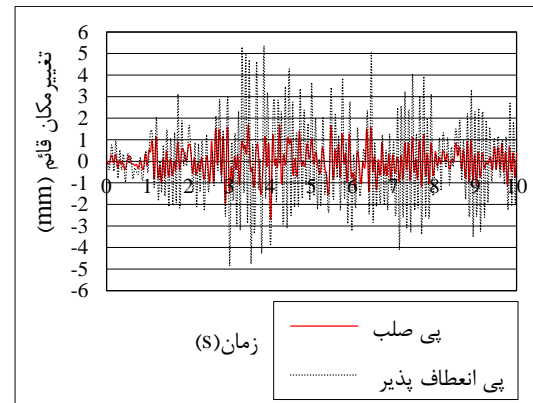


شکل (۸): محل قرارگیری سرریز، مخزن، پی و تونل به کاررفته در مدل اجزا محدود سیستم

سیستم سرریز با پی انعطاف پذیر و سیستم سرریز با پی صلب که با اعمال قیود تکیه گاهی ایجاد گردیده است، بدون در نظر گرفتن وزن مجموعه تحت تحریک مؤلفه افقی و قائم شتاب نگاشت زلزله Tabas قرار گرفته و تغییر مکان های افقی و قائم تاج سرریز حاصل از تحلیل دینامیکی در شکل (۶) و شکل (۷) ارائه شده اند. مطابق این منحنی ها با مدل سازی پی با مشخصات مکانیکی واقعی تغییر مکان های به مراتب بزرگتری نسبت به حالت پی صلب ایجاد می گردد. لذا در مدل سازی نهایی سه بعدی نیز پی با همین مشخصات لحاظ می گردد.



شکل (۶): تغییر مکان افقی تاج سرریز نیلوفری تحت تحریک مؤلفه افقی و قائم زلزله Tabas برای دو مدل پی صلب و پی انعطاف پذیر



شکل (۷): تغییر مکان قائم تاج سرریز نیلوفری تحت تحریک مؤلفه افقی و قائم زلزله Tabas برای دو مدل پی صلب و پی انعطاف پذیر

نتایج و بحث

مدل سازی سیستم

به منظور تعیین اثر متقابل اجزای سیستم سرریز- پی- مخزن- تونل بر پاسخ های دینامیکی سرریز، سرریز نیلوفری با ارتفاع ۵۸ متر مخزن پیرامونی هم تراز با سرریز و به ارتفاع ۵,۵ متر مدل سازی شده است. فاصله طولی سرریز تا مرز آزاد بالادست و مرز پایین دست مخزن دو برابر ارتفاع سرریز و فاصله جانبی سرریز تا مرز آزاد مخزن برابر ارتفاع

نتایج تحلیل مودال

برای تعیین بسامدهای زاویه‌ای سیستم ω ، آنالیز مودال بر روی هفت مدل مختلف اجزاء محدود سیستم انجام گرفت. در جدول (۴) اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در دو حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی برای دو مود اول و در جدول (۵) اثر قطر شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم ارائه گردید.

جدول (۴): اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در دو

حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی

مدل	قطر شفت قائم (m)	شرایط سرریز	شماره مود	بسامد زاویه‌ای (Rad/s)
۱	۱۲	گیرداری	مود اول	۷۵,۷۸
			مود دوم	۹۴,۴۴
		طره‌ای	مود اول	۷۴,۹۳
			مود دوم	۹۱,۳۴
۳	۲۰	گیرداری	مود اول	۷۳,۶۴
			مود دوم	۸۸,۱۵
		طره‌ای	مود اول	۷۴,۹۲
			مود دوم	۹۱,۳۱
۴	۲۴	گیرداری	مود اول	۷۲,۵۱
			مود دوم	۸۵,۲۶
		طره‌ای	مود اول	۷۴,۸۸
			مود دوم	۹۱,۲۶

جدول (۵): اثر قطر شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم

مدل	قطر شفت قائم (m)	شماره مود	بسامد زاویه‌ای (Rad/s)
۵	۷,۹	مود اول	۷۴,۸۳
		مود دوم	۹۱,۲۳
۲	۸,۹	مود اول	۷۴,۸۳
		مود دوم	۹۱,۲۳
۶	۹,۹	مود اول	۷۴,۸۳
		مود دوم	۹۱,۲۳
۷	۱۰,۹	مود اول	۷۴,۸۳
		مود دوم	۹۱,۲۹

مطابق جدول (۴) بسامدهای زاویه‌ای سیستم وقتی سرریز طره‌ای است بیشتر از حالت گیرداری آن در پی می‌شود. همچنین از جدول (۵) مشاهده می‌شود تغییر قطر شفت قائم اثر چندانی بر نتایج تحلیل مودال ندارد.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، در شکل (۹) اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در حالت گیرداری سرریز در پی برای دو مود اول نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۱۰) اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در حالت طره‌ای بودن سرریز در پی

برای تعیین اثر هندسه شفت قائم بر پاسخ‌ها، تحلیل دینامیکی سیستم بر روی هفت مدل با چهار ارتفاع مختلف و چهار مقدار متفاوت برای قطر شفت قائم انجام شده و نتایج آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات مدل‌های مختلف اجزاء محدود سیستم‌های تحلیل شده در این پژوهش به همراه شماره مدل‌های یاد شده در جدول (۳) ارائه گردیده است. در مدل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ طول و عرض پی و مخزن و همچنین ارتفاع مخزن ثابت بوده و تنها ارتفاع پی با توجه به مقدار افزایش یا کاهش ارتفاع شفت تغییر یافته است. محل قرارگیری سرریز نیز متناسب با این افزایش تراز ارتفاعی شفت قائم از مرز انتهایی مخزن فاصله گرفته که در نتیجه طول تونل نیز تغییر می‌یابد. جهت بررسی اثر طره‌ای بودن سرریز و استغراق آن در مخزن، مدل‌های ۱، ۳ و ۴ با شرط ثابت بودن ابعاد هندسی پی و طول تونل و همچنین امکان افزایش ارتفاع شفت مورد بررسی گرفت. در این شرایط تراز ارتفاعی پی ثابت بوده و به مقدار افزایش ارتفاع شفت به تراز مخزن افزوده می‌شود. در مدل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ تنها قطر شفت قائم تغییر یافته و باقی پارامترهای هندسی ثابت مانده است.

جدول (۳): مشخصات مدل‌های مختلف اجزاء محدود سیستم‌های

تحلیل شده

شماره مدل	اجزای سیستم	ارتفاع شفت قائم (m)	قطر شفت قائم (m)
۱	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۱۲	۸,۹
۲	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۱۶	۸,۹
۳	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۲۰	۸,۹
۴	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۲۴	۸,۹
۵	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۱۶	۷,۹
۶	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۱۶	۹,۹
۷	سرریز نیلوفری + تونل خروجی سرریز + مخزن + پی	۱۶	۱۰,۹

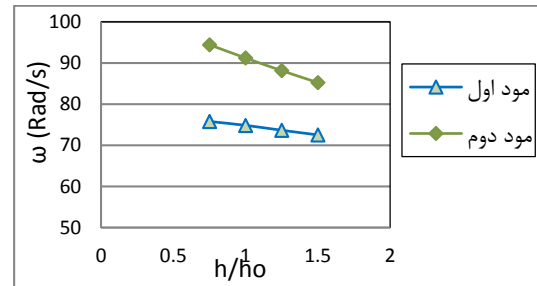
جدول (۶): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان‌های تاج سرریز در دو حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی

ارتفاع شفت قائم (m)			شرایط سرریز	پاسخ‌های دینامیکی حداکثر	
۲۴	۲۰	۱۲			
۲,۱۰	۲,۱۷	۲,۳۸	گیرداری	مثبت	تغییر مکان افقی (mm)
۴,۱۳	۲,۸۶	۲,۱۶	طره‌ای		
۲,۵۰	۲,۳۱	۲,۰۸	گیرداری	منفی	
۴,۰۵	۲,۴۹	۱,۷۳	طره‌ای		
۰,۶۲	۰,۶۳	۰,۶۳	گیرداری	مثبت	تغییر مکان جانبی (mm)
۲,۱۰	۱,۱۸	۰,۵۰	طره‌ای		
۰,۴۳	۰,۴۵	۰,۴۵	گیرداری	منفی	
۱,۶۱	۰,۸۲	۰,۳۷	طره‌ای		
۳,۹۲	۳,۶۸	۲,۳۸	گیرداری	مثبت	تغییر مکان قائم (mm)
۳,۹۵	۳,۴۴	۲,۴۰	طره‌ای		
۳,۶۴	۳,۱۴	۲,۴۱	گیرداری	منفی	
۳,۶۱	۳,۰۶	۲,۴۷	طره‌ای		

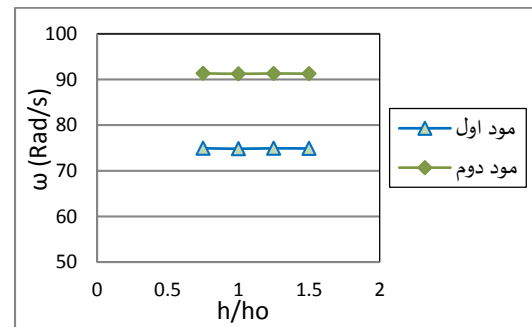
جدول (۷): اثر ارتفاع شفت قائم بر تنش‌های اصلی زانویی سرریز در دو حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی

ارتفاع شفت قائم (m)			شرایط سرریز	پاسخ‌های دینامیکی حداکثر	
۲۴	۲۰	۱۲			
۲,۰۶	۲,۰۲	۱,۲۸	گیرداری	مثبت	تنش اصلی اول (MPa)
۱,۴۸	۱,۵۵	۱,۵۰	طره‌ای		
۰,۲۲	۰,۱۹	۰,۱۴	گیرداری	منفی	
۰,۱۹	۰,۱۵	۰,۱۶	طره‌ای		
۰,۵۰	۰,۵۱	۰,۴۲	گیرداری	مثبت	تنش اصلی دوم (MPa)
۰,۴۷	۰,۴۷	۰,۴۷	طره‌ای		
۰,۴۲	۰,۳۵	۰,۳۴	گیرداری	منفی	
۰,۳۱	۰,۳۲	۰,۳۱	طره‌ای		
۰,۲۳	۰,۲۱	۰,۱۳	گیرداری	مثبت	تنش اصلی سوم (MPa)
۰,۲۰	۰,۱۷	۰,۱۷	طره‌ای		
۲,۰۱	۱,۸۱	۱,۲۹	گیرداری	منفی	
۱,۴۶	۱,۵۲	۱,۴۸	طره‌ای		

برای دو مود اول ارائه گردیده است. با توجه به این نمودارها، افزایش ارتفاع شفت وقتی سرریز در پی گیردار است موجب کاهش فرکانس‌های سیستم شده ولیکن ارتفاع شفت پارامتر چندان اثرگذاری بر فرکانس سیستم وقتی سرریز طره‌ای است، نیست.



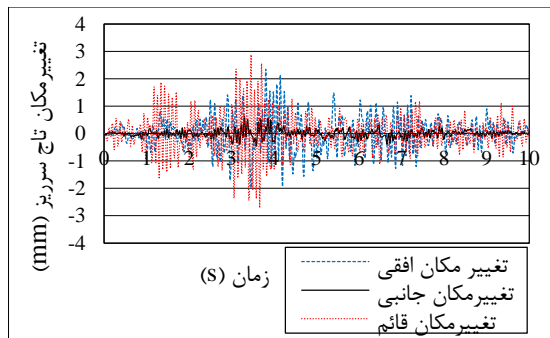
شکل (۹): اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در حالت گیرداری سرریز در پی



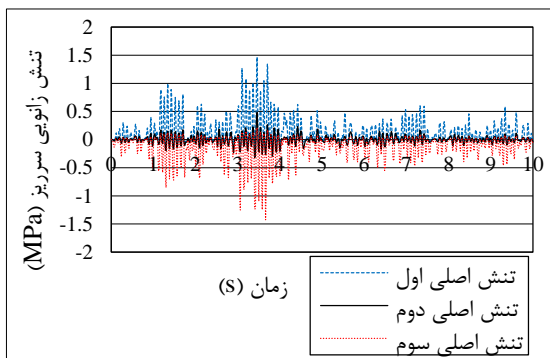
شکل (۱۰): اثر ارتفاع شفت قائم بر نتایج تحلیل مودال سیستم در حالت طره‌ای بودن سرریز در پی

نتایج تحلیل دینامیکی

برای انجام تحلیل دینامیکی، سیستم تحت اثر زلزله شتاب‌های زلزله طیس در سه راستای افقی، جانبی و قائم قرار گرفت. پاسخ‌های دینامیکی سرریز استخراج شده و نتایج آن در جداول (۶)، (۷) و (۸) ارائه شده است. جدول (۶) مقادیر حداکثر مثبت و منفی تغییر مکان تاج سرریز و جدول (۷) مقادیر حداکثر مثبت و منفی تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز حاصل از تحلیل دینامیکی مدل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ را دو حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی نشان می‌دهند. جدول (۸) نیز همان پاسخ‌ها را برای مدل‌های ۵، ۶ و ۷ ارائه می‌دهد. مقادیر تغییر مکان‌ها برحسب میلی‌متر و مقادیر تنش‌ها برحسب مگاپاسکال می‌باشد. برای مقایسه بهتر نتایج تحلیل لرزه‌ای تنها بارگذاری لرزه‌ای اعمال گردیده و از وزن سیستم صرف نظر شده است.

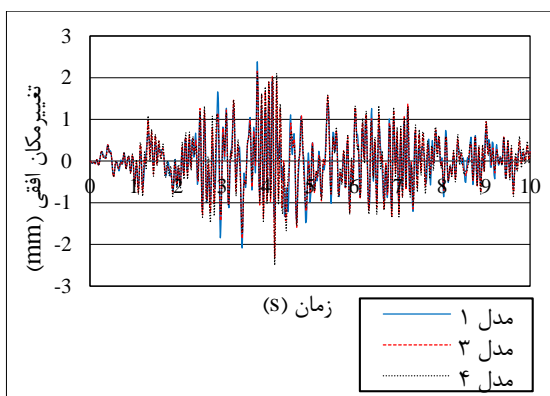


شکل (۱۱): تغییر مکان‌های افقی، جانبی و قائم تاج سرریز سد البرز تحت تحریک زلزله طبس



شکل (۱۲): تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز سد البرز تحت تحریک زلزله طبس

برای بررسی دقیق‌تر اثر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان‌ها، شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب منحنی‌های تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی تاج سرریز در مدل‌های ۱، ۳ و ۴ در دو حالت گیرداری سرریز در پی و طره‌ای بودن آن تحت تحریک زلزله طبس بدون اعمال وزن سیستم را برای زمان ۱۰ ثانیه نشان می‌دهند.



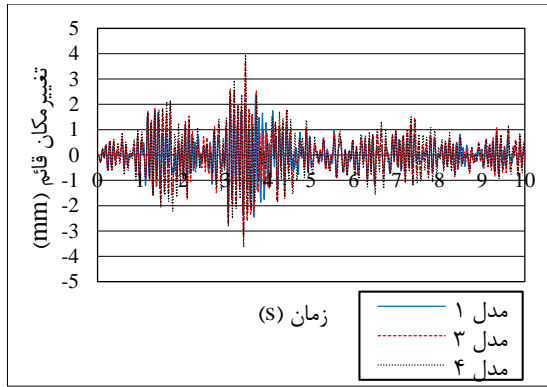
شکل (۱۳): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان افقی تاج سرریز سد البرز در حالت گیرداری آن در پی تحت تحریک زلزله طبس

جدول (۸): اثر قطر شفت قائم بر نتایج تحلیل دینامیکی

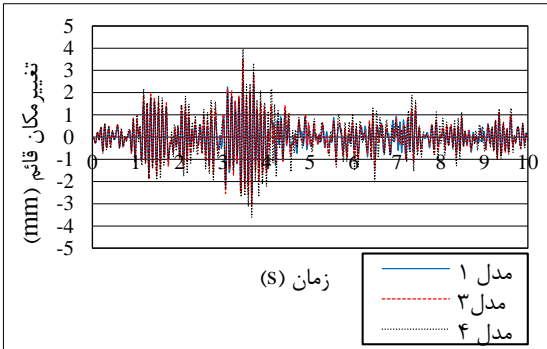
قطر شفت قائم (m)				پاسخ‌های دینامیکی حداکثر	
۱۰,۹	۹,۹	۸,۹	۷,۹		
۲,۳۴	۲,۳۳	۲,۳۴	۲,۳۳	مثبت	تغییر مکان افقی (mm)
۱,۹۶	۱,۹۷	۱,۹۸	۱,۹۹	منفی	
۰,۶۳	۰,۶۳	۰,۶۴	۰,۶۳	مثبت	تغییر مکان جانبی (mm)
۰,۴۶	۰,۴۶	۰,۴۶	۰,۴۵	منفی	
۲,۸۱	۲,۸۲	۲,۸۴	۲,۸۶	مثبت	تغییر مکان قائم (mm)
۲,۷۰	۲,۷۰	۲,۷۱	۲,۷۲	منفی	
۳,۷۸	۱,۴۶	۱,۴۵	۱,۴۸	مثبت	تنش اصلی اول (MPa)
۰,۵۳	۰,۱۹	۰,۱۹	۰,۱۶	منفی	
۱,۴۵	۰,۴۸	۰,۴۸	۰,۴۸	مثبت	تنش اصلی دوم (MPa)
۰,۹۷	۰,۳۲	۰,۳۱	۰,۳۱	منفی	
۰,۵۸	۰,۲۱	۰,۲۱	۰,۱۸	مثبت	تنش اصلی سوم (MPa)
۳,۷۱	۱,۴۳	۱,۴۲	۱,۴۵	منفی	

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جداول (۶) و (۷) در حالت طره‌ای بودن سرریز نسبت به گیرداری آن در پی مقادیر حداکثر مثبت و منفی تغییر مکان‌ها به جز تغییر مکان قائم بیشتر و مقادیر حداکثر مثبت و منفی تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز کمتر است. روند افزایشی پاسخ‌ها با افزایش ارتفاع شفت برای تغییر مکان‌های قائم در حالت طره‌ای بودن سرریز و برای تنش‌ها در حالت گیرداری سرریز در پی مشهودتر است. نتایج ارائه‌شده در جدول (۸) نیز نشان می‌دهد با افزایش قطر شفت قائم مقادیر حداکثر مثبت و منفی تغییر مکان‌های قائم تاج سرریز به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش قطر شفت موجب افزایش مقادیر حداکثر تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز می‌گردد. همچنین نتایج ارائه‌شده بیان می‌دارد، تغییرات ارتفاع شفت قائم اثر چندانی بر مقادیر حداکثر مثبت و منفی تغییر مکان جانبی تاج سرریز ندارد.

مدل شماره ۲ هندسه واقعی سرریز مورد مطالعه است، از این رو پاسخ‌های دینامیکی تاریخچه زمانی این مدل ارزیابی می‌شوند. مطابق شکل (۱۱) تغییر مکان‌های جانبی سرریز سد البرز به مراتب کمتر از تغییر مکان‌های افقی و قائم آن است. شکل (۱۲) نیز تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز حاصل از تحلیل دینامیکی را نشان می‌دهد.



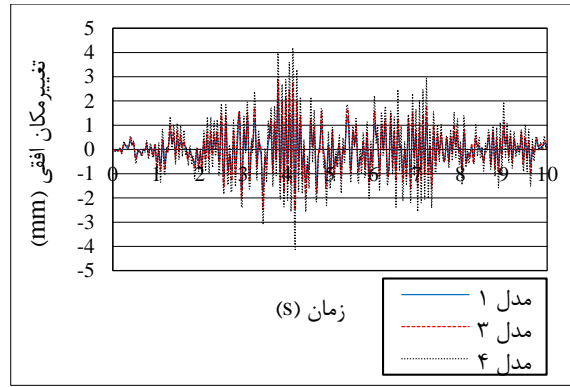
شکل (۱۷): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان قائم تاج سرریز سد البرز در حالت گیرداری آن در پی تحت تحریک زلزله طبس



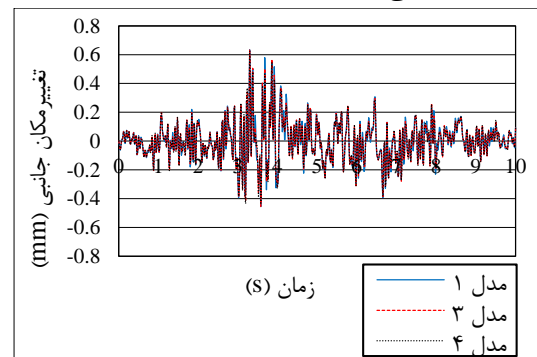
شکل (۱۸): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان قائم تاج سرریز سد البرز در حالت طره‌ای بودن آن تحت تحریک زلزله طبس مطابق اشکال (۱۵) و (۱۶) با افزایش ارتفاع شفت قائم مقادیر تغییر مکان‌های جانبی تاج سرریز در حالت بودن سرریز افزایش می‌یابد. این روند برای سرریز در حالت گیرداری در پی نظم مشخصی ندارد. اشکال (۱۷) و (۱۸) با افزایش ارتفاع شفت قائم مقادیر تغییر مکان‌های قائم تاج سرریز در هر دو حالت طره‌ای بودن سرریز و گیرداری آن در پی افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات ارتفاع شفت قائم نه تنها از نظر کمی بر پاسخها اثرگذار است، بلکه از نظر کیفی نیز پاسخها را دچار تغییر می‌کند.

نتیجه‌گیری

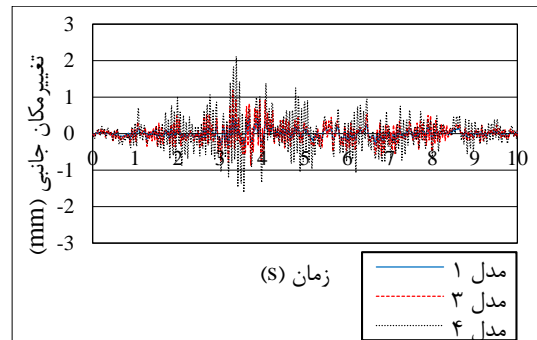
با توجه به قرارگیری سرریزهای نیلوفری در تکیه‌گاه‌ها و مجاورت آن‌ها با سدها و قرارگیری آن‌ها روی پی داخل مخزن و تأثیرات آن بر پی و مخزن، در پژوهش حاضر تحلیل دینامیکی سه‌بعدی سیستم سرریز-پی-مخزن-تونل انجام گردید. تحلیل دینامیکی سه‌بعدی سیستم سرریز-پی-مخزن-تونل می‌تواند برای تحلیل طراحی‌های لرزه‌ای انجام‌شده و برآورد رفتار لرزه‌ای سازه‌های سرریز نیلوفری مفید باشد. از طرفی، اگرچه قطر و دیگر ابعاد سیستم تخلیه سیلاب در سرریزهای نیلوفری به پارامترهای هیدرولیکی و سیلاب طرح و همچنین شرایط توپوگرافی



شکل (۱۴): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان افقی تاج سرریز سد البرز در حالت طره‌ای بودن آن تحت تحریک زلزله طبس مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴) با افزایش ارتفاع شفت قائم، مقادیر تغییر مکان‌های افقی تاج سرریز در حالت طره‌ای بودن سرریز افزایش می‌یابد. این روند برای سرریز در حالت گیرداری در پی نظم مشخصی ندارد. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) منحنی‌های تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های جانبی و شکل‌های (۱۷) و (۱۸) منحنی‌های تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های قائم تاج سرریز در مدل‌های ۱، ۳ و ۴ در دو حالت گیرداری سرریز در پی و طره‌ای بودن آن تحت تحریک زلزله طبس بدون اعمال وزن سیستم را برای زمان ۱۰ ثانیه نشان می‌دهند.



شکل (۱۵): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان جانبی تاج سرریز سد البرز در حالت گیرداری آن در پی تحت تحریک زلزله طبس



شکل (۱۶): اثر ارتفاع شفت قائم بر تغییر مکان جانبی تاج سرریز سد البرز در حالت طره‌ای بودن آن تحت تحریک زلزله طبس

ابعاد و شرایط متفاوت می‌تواند منجر به افزایش آگاهی پژوهشگران و مهندسان از رفتار لرزه‌ای و پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های سرریزهای نیلوفری به شرایط متفاوت گردد. از طرف دیگر، فارغ از معماری و ابعاد اولیه سرریز نیلوفری که با توجه به الزامات هیدرولیکی و توپوگرافی هر طرح تعیین می‌گردد نتایج این تحقیق می‌تواند منجر به قضاوت مهندسی مناسب‌تری نسبت رفتار لرزه‌ای آن‌ها به ازای افزایش و یا کاهش ابعاد سرریز و اجزای آن گردد.

سیاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی با عنوان "مدل‌سازی عددی سیستم‌های تخلیه سیلاب (سرریز سدها)" با حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و با اعتبار پژوهشی شماره BNUT/392034/97 انجام پذیرفته است. همچنین نگارندگان مقاله بابت در اختیار قرار دادن مستندات لازم، از مساعدت شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان مازندران (کارفرمای سد مخزنی البرز) و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس (نظارت سد مخزنی البرز) کمال تشکر و قدردانی را می‌کنند.

مراجع

- ۱- امیدوار، ب. رحیمیان، م؛ و صناعی‌ها، ع. (۱۳۹۱). "تحلیل اندرکنش دینامیکی سرریز و پی سد بارزو شیروان با استفاده از المان روش مرزی." نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز، ۴۲(۲)، ۱-۱۴.
- ۲- خان‌محمدی، ل. واثقی امیری، ج؛ و نوائی‌نیا، ب. (۱۳۹۰). "ارزیابی روش‌های اولیه‌ی و لاگرانژی در پاسخ سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد - پی - مخزن تحت اثر زلزله." مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس، ۱۱(۴)، ۱۰۷-۱۳۱.
- ۳- زاده موسی، م. (۱۳۷۶). "آنالیز دینامیکی سازه‌های متقارن محوری نیمه‌مستغرق و مستغرق تحت تحریکات زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال تراکم‌پذیر." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تهران.
- ۴- صناعی‌ها، ع. امیدوار، ب؛ و رحیمیان، م. (۱۳۹۰). "تحلیل دینامیکی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز، مخزن و پی." مجله روش‌های عددی در مهندسی، ۳۰(۲)، ۹۱-۱۱۰.
- ۵- علی‌جمشیدی، د. نوائی‌نیا، ب؛ و واثقی امیری، ج. (۱۳۸۶). "تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی با مدل‌سازی مخزن به روش‌های لاگرانژی و اولیه‌ی." مجله دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۴۱(۸)، ۷۰۹-۷۲۴.
- ۶- کلانی، ل. (۱۳۹۲). "تحلیل دینامیکی غیرخطی سدهای

وابسته می‌باشد؛ اما در مبحث به‌گزینی ابعاد سرریز و تعیین ارتفاع سد خاکی لازم است توجه ویژه‌ای به امکان تغییر ابعاد سرریز نیلوفری و در نتیجه تغییر ارتفاع سد گردد. لذا بررسی لرزه‌ای سیستم سرریز نیلوفری به ازای ابعاد و مشخصات سازه‌ای متفاوت (مطابق تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش) می‌تواند باعث افزایش آگاهی از رفتار لرزه‌ای این‌گونه سرریزها گردد. در این راستا اثرات هندسه شفت قائم سرریز از جمله ارتفاع و قطر آن بر پاسخ‌های دینامیکی مجموعه تعیین گردید. برای این منظور هفت مدل مختلف اجزاءمحدود در نرم‌افزار ANSYS.16 مدل‌سازی و مقادیر تغییر مکان‌های تاج سرریز و تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز حاصل از تحلیل دینامیکی استخراج گردید. به‌طور خلاصه می‌توان نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق را به شرح ذیل خلاصه نمود:

- بررسی فرکانسی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد، افزایش ارتفاع شفت وقتی سرریز در پی گیردار است موجب کاهش فرکانس‌های سیستم شده ولیکن قطر شفت پارامتر چندان اثرگذاری بر فرکانس سیستم نیست.
 - نتایج تحلیل دینامیکی نشان‌داد تغییر مکان‌های افقی و جانبی تاج سرریز در حالت طره‌ای بودن سرریز افزایش می‌یابد. این روند برای سرریز در حالت گیرداری در پی، وابستگی قابل‌توجهی به تغییرات ارتفاع ندارد.
 - یافته‌های حاصل از بررسی اثر پارامتر قطر شفت قائم نشان می‌دهند افزایش قطر شفت موجب افزایش مقادیر حداکثر تنش‌های اصلی محل اتصال زانویی به تونل سرریز می‌گردد.
 - منحنی‌های تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های تاج سرریز تحت تحریک زلزله طبرس نشان می‌دهند تغییرات ارتفاع شفت قائم نه‌تنها از نظر کمی بر پاسخ‌ها اثرگذار است، بلکه از نظر کیفی نیز پاسخ‌ها را دچار تغییر می‌کند که ناشی از تغییرات فرکانسی به‌دلیل تغییر سختی سیستم است.
- شایان‌ذکر است اگرچه برخی از نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق مانند افزایش تغییر مکان‌ها در حالت طره‌ای بودن سازه و یا افزایش زمان تناوب با افزایش ارتفاع سازه، فارغ از نوع سازه برقرار می‌باشد اما نتایج کمی به‌دست‌آمده از این پژوهش در قالب میزان می‌شود و نرخ این تغییرات به ازای

- بتنی وزنی تحت حرکات ناهمگون انتقالی و دورانی زلزله." پایان نامه دکتری تخصصی مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- ۷- کلانی، ل. نوائی نیا، ب. واثقی امیری، ج؛ و توکلی، ح. ر. (۱۳۹۳) "اثر مؤلفه‌های دورانی زلزله در پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد و مخزن." *مجله مهندسی عمران دانشگاه شریف*، ۳۰(۲)، ۸۱-۹۳.
- ۸- هوشیارخوشدل، س. (۱۳۷۴). "مطالعه اثر دینامیکی زلزله بر پاسخ برج‌های متقارن نیمه‌مستغرق با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه." پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تهران.
- 9- Faghihimohaddess, A. Naghibian, R. and Bashash, A. (2011). "Rock Treatment Around Morning Glory Spillway of Sefidrud Dam." *Dams and Reservoirs under Changing Challenges*, Taylor & Francis Group, London.
- 10- Goyal, A. and Chopra, A. K. (1989). "Earthquake Analysis of Intake - Outlet Towers Including Tower - Water - Foundation - Soil Interaction." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 18(3), 325-344.
- 11- Liaw, C. Y. and Chopra, A. K. (1974). "Dynamics of Towers Surrounded by Water." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 3(1), 33-49.
- 12- Liaw, C. Y. and Chopra, A. K. (1975). "Earthquake Analysis of Axisymmetric Towers Partially Submerged in Water." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 3(3), 233-248.
- 13- Mejia, L. H. Ridlen, P. W. and Harrington, L. (1996). "Soil -Structure Interaction Effects on Dynamic Response of Morning Glory Spillway." *11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco, Mexico.