

بررسی اندرکنش سدهای بتنی و فونداسیون با در نظر گرفتن اثر جرم

هانیه نیکروش سندی* (کارشناس ارشد)

مرتضی سهرابی گیلانی (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دربی ۲ - ۳۷، شماره ۱/۱، ص. ۶۱-۶۹

در سراسر جهان، سدها از جمله سازه‌های مهندسی مهم و کاربردی محسوب می‌شوند و به همین دلیل روند تحلیل، طراحی و مدل‌سازی چنین سازه‌هایی توجه و دقت بالایی را می‌طلبد. در این راستا، به‌منظور مدل‌سازی سدها همواره سعی بر ارائه روش‌هایی بوده است که تا حد امکان به شرایط حقیقی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون نزدیک باشند. چنین روش‌هایی با وجود دقتی قابل قبول، روندی پیچیده و زمان‌بر دارند و به همین دلیل روش‌های ساده‌تری چون فونداسیون‌های بدون جرم همچنان توسط پژوهشگران بسیاری استفاده می‌شود. در نوشتار حاضر، با ارائه و بررسی دو روش شرط مرزی برای انتهای دور فونداسیون (شرایط مرزی لایزمر) و به‌کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت، به مدل‌سازی فونداسیون به‌صورت جرم‌دار در سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون پرداخته شده است. چنین روش‌هایی از یک سو، پاسخ‌های سیستم را با تقریب خوبی نزدیک به خروجی روش‌های با دقت بیشتر نتیجه می‌دهند و از سوی دیگر، به دلیل داشتن زمان تحلیل به مراتب کمتر، به لحاظ هزینه‌ی محاسباتی نیز مقرون به صرفه خواهند بود.

واژگان کلیدی: سیستم سد - مخزن - فونداسیون، فونداسیون جرم‌دار، شرط مرزی انتهای دور (شرط مرزی لایزمر)، المان نیمه بی‌نهایت.

۱. مقدمه

سدها از جمله سازه‌های عظیم مهندسی هستند که به دلیل کارکردهای گسترده در زمینه‌ی ذخیره‌سازی آب، تأمین آب موردنیاز شهری و کشاورزی، تولید انرژی برق آبی و ... تأثیر به‌سزایی در حیات اقتصادی و اجتماعی جامعه خواهند داشت. خسارت‌های جانی و مالی ناشی از آسیب و شکست سدها در دهه‌های گذشته، بر اهمیت روند تحلیل، طراحی و مدل‌سازی سازه‌های مذکور تأکید دارد و ضرورت این امر را به مهندسان یادآوری می‌کند.

در این راستا، ضرورت بررسی عملکرد لرزه‌ی سدهای موجود، همواره جزء دغدغه‌های مهم در مهندسی سد بوده است. این امر موجب شده است تا طی سال‌های گذشته، روش‌های مختلفی برای اصلاح و بازسازی سدهای موجود و طراحی سدهای جدید ارائه شود، تا آن‌ها بر مبنای تئوری‌های صحیحی احداث شوند و نتایج حاصل از آن‌ها بیشترین شباهت را با شرایط حقیقی سیستم موردنظر داشته باشد. اما باید توجه کرد هر چند که پیش‌بینی رفتار سدهای بتنی در حین وقوع زلزله از مسائل مهم در دینامیک سازه‌ها محسوب می‌شود، اما در عین حال پیچیدگی‌های خاص خود را نیز دارد. از دلایل ایجاد چنین پیچیدگی‌هایی در روند تحلیل می‌توان به شکل پیچیده‌ی مخزن و سد که تابع شرایط توپوگرافی ساختگاه است، خصوصیات

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۳/۱، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۹

DOI:10.24200/J30.2020.55218.2713

haniyeh.nikravesh@gmail.com
m.sohrabi@guilan.ac.ir

متنوع حرکت زمین در ساختگاه‌های مختلف، فشار هیدرودینامیک مخزن ناشی از اعمال نیروی زلزله، شکل‌پذیری فونداسیون که درزها و شکاف‌های متعدد دارد، اندرکنش سد - مخزن - فونداسیون، لغزش و بازشدگی درزهای سازه‌ی به‌هنگام وقوع زلزله، ترک‌خوردگی بتن و جدایی آب موجود در مخزن از سطح بالادست به دلیل پدیده‌ی کاویتاسیون اشاره کرد.^[۱]

به منظور مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون، مهم‌ترین عواملی که در روند مدل‌سازی مؤثر خواهند بود، عبارت‌اند از: ماهیت ذاتی هر یک از سه محیط مذکور، اندرکنش موجود در سطح تماس آن‌ها با یکدیگر و نحوه‌ی اعمال نیروی زلزله به سیستم اخیر. امروزه با پیشرفت روش‌های تحلیلی، امکان ساخت مدلی که بیشترین تطابق را با شرایط واقعی داشته باشد، فراهم شده است. لذا مطالب ارائه شده در زمینه‌ی مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون در چند دهه‌ی اخیر را می‌توان به چند بخش تقسیم کرد، که شامل: اندرکنش سد و مخزن، اندرکنش سد و فونداسیون، مکانیزم زلزله‌ی ورودی و اندرکنش موجود در سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون است.

محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیکی وارد شده به سد، در تحلیل اندرکنش سد - مخزن تحت اثر زلزله، مسئله‌ی مهم است که توجه به آن در روند مدل‌سازی ضروری به‌نظر می‌رسد. از جمله نخستین روش‌های پیشنهادی برای حل مسئله‌ی اشاره شده، می‌توان به روش جرم افزوده‌ی وسترگارد اشاره کرد که در آن اعمال اثر فشار

هیدرودینامیک به صورت یک جرم افزوده به بدنه ی سد در نظر گرفته می شود. با وجود اینکه چنین پیشنهادی در سال ۱۹۳۳ توانست مسئله ی فشار هیدرودینامیکی را در چنین سازه هایی حل کند، در سال های بعد، کارایی آن در همه ی حالت ها تأیید نشد. چوپرا با بررسی شدت، توزیع و خصوصیات بسامدی فشار هیدرودینامیکی در سدها به هنگام وقوع زلزله نشان داد که تراکم پذیری آب که بیشتر از اثر آن صرف نظر می شود نیز لازم است به عنوان یک فرض در مدل سازی ها لحاظ شود. نتایج وی حاکی از آن بود که فرض تراکم ناپذیری آب، باعث ایجاد خطاهای قابل توجهی در روند تحلیل خواهد شد که وجود چنین خطایی در روند تحلیل قابل چشم پوشی نخواهد بود. همچنین نتایج پژوهش اخیر بیانگر این امر بود که در نظر گرفتن فشار هیدرودینامیکی به شیوه ی ارائه شده توسط وسترگارد که با تعریف یک جرم افزوده برای سد که به هنگام حرکت بدنه با آن حرکت کند، نیز برای انواع تحریک های لرزه یی مناسب نیست و فقط در برخی موارد قابل استفاده خواهد بود. پس از بررسی پاسخ سدهای بتنی با در نظر گرفتن آثار مربوط به اندرکنش هیدرودینامیکی مخزن و تراکم پذیری آب به هنگام حرکت زمین در زمان وقوع زلزله، نتایج بیانگر آن بود که جابه جایی وجه بالادست سد به دلیل فشار هیدرودینامیکی مخزن، تغییر شکل های سازه یی را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد و به همین علت، لحاظ کردن اندرکنش موجود بین سد و آب در فرمول بندی مسائل ضروری است. در تحلیل سیستم های سد - مخزن، هنگامی که رویه ی بالادست سد مورب است، اغلب آب موجود در مخزن تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود. روش های حل تحلیلی، مانند استفاده از المان های نیمه بی نهایت در سیستم سد - مخزن نیز فقط برای حالت هایی که هندسه ی مخزن منظم است، قابل استفاده خواهند بود و در صورت نامنظم بودن هندسه ی مخزن لازم است تا در روش های اجزاء محدود، اثر اندرکنش سد - مخزن گنجانده شود. دلیل به کارگیری روش های اجزاء محدود در چنین حالتی این است که آن ها ابزاری قدرتمند برای تحلیل دینامیکی و استاتیکی سازه ها محسوب می شوند، لذا آثار مربوط به اندرکنش سازه و سیال در بخش تحلیل اجزاء محدود گنجانده شده اند.^[۵-۲]

همان گونه که بیان شد، سیستم مورد نظر متشکل از سه بخش است و لذا مدل سازی آن با در نظر گرفتن سه محیط سد، مخزن و فونداسیون صورت می پذیرد. بدیهی است که وجود سه محیط اخیر با جنس مصالح و رفتاری متفاوت از یکدیگر، روند بررسی سیستم ذکر شده را تا حدودی دشوار می کند. لذا به منظور جلوگیری از پیچیدگی هر چه بیشتر مدل، استفاده از فرض های ساده کننده یی مانند فونداسیون های بدون جرم پیشنهاد شده است.^[۶]

در مدل های ساده شده ی اخیر، با در نظر گرفتن فونداسیون به صورت یک محیط بدون جرم، از آثار مربوط به جرم فونداسیون که با وجود پیچیده کردن مدل، توانایی استهلاک انرژی امواج ورودی به این دامنه را دارد، صرف نظر شده است. اندرکنش سد - فونداسیون نیز از مسائل مهمی است که در روند تحلیل، طراحی و مدل سازی سدها نیاز به توجه ویژه یی دارد. با توجه به این امر که به هنگام وقوع زلزله، نخستین محیطی که امواج لرزه یی در آن انتشار می یابند، محیط فونداسیون است، انتظار می رود که محیط فونداسیون در پاسخ های سد تأثیرگذار باشد.

محیط فونداسیون در چنین سازه هایی (مانند سدها) ذاتاً بی نهایت است و برای مدل سازی آن در نرم افزارهای اجزاء محدود موجود لازم است تا محیط فونداسیون در دامنه ی معقولی کوتاه شود. اگر در محل مرزهای کوتاه شده در فونداسیون های جرم دار، شرایط مرزی جاذب مناسبی تعریف نشود، عبور امواج لرزه یی از این نواحی منجر به انعکاس موج های لرزه یی به داخل فونداسیون و عدم خروج آن ها از محیط فونداسیون می شود. در این حالت تعریف شرایط مرزی صحیحی که بتوان از آن در محل مرزهای کوتاه شده استفاده کرد، ضروری به نظر می رسد. در این راستا، لایمر

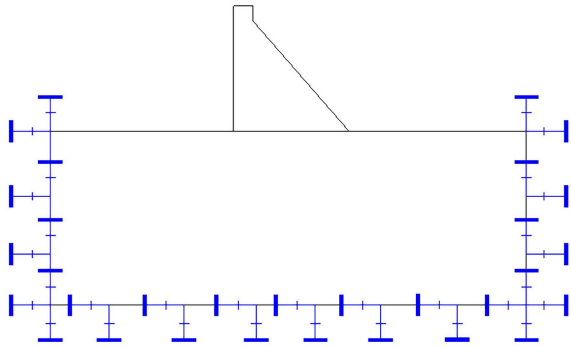
و همکاران (۱۹۶۹)، استفاده از میراگرهای نرمال و برشی را در محل مرزهای کوتاه شده در فونداسیون هایی که محیطی نیمه بی نهایت دارند، پیشنهاد کردند. میراگرهای ذکر شده با ایجاد مرزهایی ویسکوز، توانایی جذب امواج فشاری و برشی را دارند و مشکلات مربوط به انعکاس امواج را حل کرده اند.^[۷]

با این حال به هنگام ورود جرم فونداسیون به روند مدل سازی، در برخی مواقع، عدم دقت کافی در کوتاه کردن مرزهای محیط فونداسیون، منجر به بروز خطا در سیستم مورد نظر می شود. در چنین شرایطی با استفاده از المان های نیمه بی نهایت می توان به حل مسئله پرداخت. در این روش با کنار هم قرار دادن المان های محدود و المان های نیمه بی نهایت در کنار یکدیگر، می توان تا حد زیادی به شرایط حقیقی فونداسیون در واقعیت دست یافت. چنین روش هایی نخستین بار توسط پیر و میک (۱۹۸۱) ارائه شد،^[۸] و بعدها توسط زینکوویچ (۱۹۸۳)،^[۹] و کومار (۱۹۸۵)،^[۱۰] توسعه ی بیشتری یافت و به فضای سه بعدی نیز تعمیم داده شد.

در سال های پایانی قرن بیستم، لیزرو بوقفاله^۱ (۱۹۸۹)، با بررسی چهار مکانیزم مختلف از زلزله های ورودی به سیستم های سد - فونداسیون، با استفاده از تحلیل دامنه ی زمانی نشان دادند که به منظور دستیابی به نتایجی با دقت بیشتر لازم است تا زلزله ی ورودی به سیستمی اعمال شود، که دارای فونداسیون جرم دار است.^[۱۱] با این حال شمار بسیاری از مدل سازی های صورت گرفته در سال های پایانی قرن بیستم و حتی سال های اخیر، همچنان بر مبنای فونداسیون های بدون جرم انجام شده اند. در رابطه با عوامل مؤثر در مدل سازی سه محیط: سد، مخزن و فونداسیون، پژوهش های بسیاری انجام شده است که نتایج حاصل از آن ها، عوامل مختلفی را برای مدل سازی هر یک از سه محیط مذکور ارائه کرده اند، که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره شده است.

برای مثال آنچه که در روند مدل سازی بدنه ی سد حائز اهمیت است، عبارت از رفتار خطی و غیرخطی بتن و به کارگیری مکانیزم میرایی مناسب است. در محیط مخزن نیز لازم است به تراکم پذیری آب، جذب امواج لرزه یی توسط مواد رسوبی در کف مخزن، و ماهیت نامحدود محیط مخزن توجه شود. در محیط نیمه بی نهایت فونداسیون نیز توجه به تعریف جرم برای آن، نوع مصالح اختصاص یافته به فونداسیون، میرایی تشعشعی، اثر انتشار امواج لرزه یی، مکانیزم لرزه یی ورودی و شرایط مرزی جاذب در انتهای دور این دامنه ضروری خواهد بود. بررسی های انجام شده روی آثار ناشی از سنگ بستر در پاسخ سدهای بتنی، در سیستم های سد - مخزن - فونداسیون، حاکی از آن است که در میان کلیه ی عوامل ذکر شده ی اخیر، مدل سازی صحیح فونداسیون و انتخاب مکانیزمی مناسب برای لرزه یی ورودی، نسبت به سایر عوامل اهمیت زیادی دارد و لذا تأثیر آن ها در پاسخ های سیستم نیز قابل توجه خواهد بود.^[۱۲-۱۴]

به منظور بررسی بیشتر آثار ناشی از جرم فونداسیون در پاسخ سدها و همچنین اطمینان از نتایج پژوهش های قبل، چوپرا با انجام پژوهشی چند ساله بر روی تعدادی از سدهای موجود نشان داد که مدل سازی سازه های مذکور با فونداسیون های بدون جرم قادر به تحمل آثار ناشی از بارهای دینامیکی نخواهند بود؛ در حالی که بسیاری از سدهای اخیر در عمل و در شرایط حقیقی، در برابر چنین بارهایی عملکرد مطلوبی را از خود نشان داده بودند. نتایج مطالعات وی حاکی از آن بود که حضور جرم فونداسیون در شرایط واقعی سیستم، توانایی کاهش پاسخ ها و در نتیجه کم شدن آسیب های ناشی از بارهای وارده به سازه را خواهد داشت. به عبارت دیگر، در طراحی سازه های جدید و یا ارزیابی سدهای موجود، سیستم های دارای فونداسیون بدون جرم به پاسخ هایی محافظه کارانه منجر خواهند شد.^[۱۵، ۱۷] انجام چنین پژوهشی ضمن اشاره به آثار قابل توجه جرم فونداسیون و تأیید نتایج حاصل از مطالعات پیشین،



شکل ۱. شرایط مرزی انتهایی دور برای مرزهای کوتاه شدهی فونداسیون.^[۷]

با توجه به روابطی که در روش اخیر ارائه شده است، می‌توان مقادیر مربوط به تنش‌های نرمال و برشی در محل مرزهای کوتاه شده را مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه کرد:

$$\sigma = a\rho V_p v^0 \quad (۱)$$

$$\tau = b\rho V_s u^0 \quad (۲)$$

که در آن‌ها، a و b ضرایبی بدون بعد هستند که برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شوند. چگالی مصالح فونداسیون و V_s, V_p, v^0 و u^0 نیز به ترتیب: سرعت امواج فشاری، سرعت امواج برشی، سرعت نرمال و سرعت مماسی هستند.

به هنگام استفاده از روش شرط مرزی انتهایی دور فونداسیون لازم است تا برای میراگرهای ذکر شده ضرایبی را تعیین کرد که مقدار مربوط به هر یک از آن‌ها، برای میراگرهای نرمال و برشی از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:^[۷]

$$C_p = \rho V_p \int N dl \quad (۳)$$

$$C_s = \rho V_s \int N dl \quad (۴)$$

۳. به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت در

فونداسیون‌های جرم‌دار

در تحلیل با استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت، نخستین روش‌های حل و فرمول‌بندی مسئله، توسط بیر و میک (۱۹۸۱)^[۸] ارائه شده است. روش‌های اشاره شده بعدها توسط زیکوویچ و کومار، تکمیل و فرمول‌های موردنیاز برای حل حالت‌های سه‌بعدی نیز ارائه شدند. در حالت دو بعدی، فرمول‌بندی مسئلهی موردنظر وابسته به جابه‌جایی (u) و فاصله‌ی مکانی اندازه‌گیری شده از قطب (r) است، که رابطه‌ی معکوس با یکدیگر دارند. فرمول‌بندی ذکر شده می‌تواند توان‌های مختلفی از r را شامل شود ($\dots, 1/r, 1/r^2, \dots$) که بنا به اختیار انتخاب می‌شود. سپس با تعریف s ، به عنوان مختصات نگاشت شده‌ی که به کمک آن $r(s)$ می‌تواند r متمایل به بی‌نهایت را به s برابر با ۱ تبدیل کند، به حل مسئله پرداخته می‌شود ($-1 < s < 1$).

در شکل ۲، مختصات چند نقطه در یک المان نیمه بی‌نهایت یک بعدی مشاهده می‌شود که مطابق آن، نقطه‌ی r_0 به عنوان قطب در نظر گرفته شده و فاصله‌ی هر یک از نقاط r_1, r_2, r_3 و r_3 نسبت به قطب مشخص شده است ($r_1 = a, r_2 = 2a, r_3 = \infty$).

پژوهشگران را به سوی استفاده از فونداسیون‌های جرم‌دار به جای فونداسیون‌های بدون جرم سوق داد.

در این راستا، قائمیان و همکاران (۲۰۱۸) مطالعاتی را در زمینه‌ی در نظر گرفتن جرم فونداسیون به انجام رساندند.^[۱۹] ایشان با استفاده از روش‌های شرط مرزی میدان آزاد (FFBC)^۲ و دامنه‌ی کاهش یافته (DRM)^۳ که روش‌هایی دو مرحله‌ی و با دقت بالا هستند، به مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون جرم‌دار پرداختند و با مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی‌های خود با خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ که به منظور تحلیل سدهای وزنی توسعه یافته است، نشان دادند که پاسخ‌های حاصل از روش‌های مذکور تطابق بسیار خوبی با نتایج برنامه‌ی EAGD-۸۴ داشت.^[۱۹-۲۳]

روش دیگری که برای مدل‌سازی فونداسیون‌های جرم‌دار و دستیابی به نتایج با دقت بیشتر در این گونه مسائل پیشنهاد شده است، استفاده از همان روش کاهش یافته (DRM) به همراه تعریف فونداسیون‌های لایه‌ی است. ستوده و همکاران (۲۰۱۹)، با توجه به اینکه چالش اصلی در سیستم سه‌بخشی مذکور، مسئله‌ی جرم فونداسیون است، بیان داشتند که ماهیت لایه‌ی فونداسیون در سدهای وزنی، فرض همگنی نیمه فضای را غیرواقعی می‌سازد. ایشان با بررسی المان محدود سیستم فونداسیون از روش دامنه‌ی کاهش یافته استفاده و نتایج حاصل را با خروجی‌های روش میدان آزاد مقایسه کردند. در مطالعه‌ی اخیر، مراحل تحلیل لرزه‌ی در ابتدا با توجه به نسبت مدول کشسانی بین لایه‌های مختلف بررسی شد و در گام بعد، به آثار هندسه، موقعیت قرارگیری، و جهت‌گیری لایه‌ها در پاسخ‌های سد وزنی توجه شده است. نتایج نشان دادند که علاوه بر جرم فونداسیون، ضخامت لایه‌ها، مشخصات مصالح و آثار مربوط به موقعیت قرارگیری آن‌ها در پاسخ لرزه‌ی سدها بیشتر از عواملی مانند جهت‌گیری لایه‌ها و یا طول افقی آن‌ها تأثیرگذار است.^[۲۴]

در نوشتار حاضر نیز با ارائه‌ی دو روش شرط مرزی انتهایی دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر) و به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت به مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون جرم‌دار پرداخته شده است. روش‌های مذکور در مقایسه با دو روش FFBC و DRM، روند تحلیل را بسیار ساده‌تر کردند و قادر بودند پاسخ‌های نزدیکی به خروجی‌های دو روش اخیر در اختیار طراحان قرار دهند.

۲. شرط مرزی انتهایی دور فونداسیون

همان‌گونه که پیشتر به آن اشاره شد، در مواقع مواجهه با فونداسیون‌های بی‌نهایت، در صورت استفاده از روش‌های اجزاء محدود برای حل مسئله، نیاز به کوتاه کردن دامنه‌ی محیط اشاره شده است. مهم‌ترین موضوعی که در چنین شرایطی لازم است به آن دقت شود، مسئله‌ی انعکاس امواج ورودی و عدم خروج آن‌ها به هنگام انتشار است. به منظور حل مسئله‌ی اشاره شده و مدل‌سازی یک ناحیه‌ی نامحدود، لایزمر و همکاران استفاده از یک دامنه‌ی محدود را که در مرزهای خود شرایط ویسکوز معینی دارند، پیشنهاد کرده‌اند. شرط مرزی انتهایی دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر)، توانایی ایجاد مرزهای ویسکوز را در محل کوتاه شدن دامنه‌ی فونداسیون دارد و به دلیل سهولت در اجرا، روشی کارآمد در حل مسائل پیچیده محسوب می‌شود. در روش اخیر، میراگرهایی، مرزهای کوتاه شده‌ی ذکر شده را احاطه و با ایجاد شرایط مرزی ویسکوز، امکان جذب امواج فشاری و برشی را فراهم می‌کنند. شکل ۱، نمونه‌ی از به کارگیری میراگرهای مذکور را در سیستم سد - فونداسیون نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات ابعادی مدل‌ها.

نام مدل	ابعاد فونداسیون (m ^۲)	طول مخزن (m)
D و A	۲۴۴ × ۹۷۶	۶۱۰
E و B	۴۸۸ × ۱۹۵۲	۱۲۲۰
F و C	۹۷۶ × ۳۹۰۴	۲۴۴۰

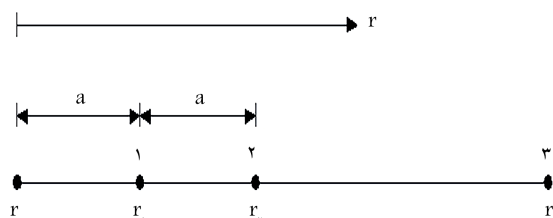
بدنه‌ی سد وارد می‌شود، به سیستم اعمال خواهد شد. ابعاد مدل‌های موردنظر در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است در سیستم مذکور به منظور انتشار امواج به صورت صفحه‌یی و دستیابی به نتایجی قابل اطمینان، لازم است تا کمینه‌ی عمق فونداسیون به اندازه‌ی دو برابر ارتفاع سد (۲۴۴ متر) انتخاب شود. در این راستا، مدل‌های A، B و C شامل سیستم سد - مخزن - فونداسیون با شرایط مرزی انتهای دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر) است و مدل‌های D، E، و F نیز سیستم سد - مخزن - فونداسیون با به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت هستند، که در تمامی آن‌ها فونداسیون به صورت محیطی جرم‌دار مدل شده است.

مدل‌های اخیر به منظور انجام تحلیل حساسیت روی ابعاد فونداسیون و مخزن در نظر گرفته شده و تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله El Centro بررسی شده‌اند. پس از اتمام مرحله‌ی قبل، مدل‌های A و D به طور جداگانه تحت اثر نیروی لرزه‌یی حاصل از ۲۰ شتاب‌نگاشت مختلف قرار داده شدند و نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها با خروجی مدل‌های مشابهی که فونداسیون بدون جرم داشتند و همچنین خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ مقایسه شده است. برنامه‌ی EAGD-۸۴ که به منظور مدل‌سازی عددی سدهای بتنی وزنی توسعه یافته است، قادر است تا آثار ناشی از اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون، تراکم‌پذیری آب و همچنین آثار ناشی از جذب درکف مخزن را در پاسخ‌های خود در نظر بگیرد. در برنامه‌ی EAGD-۸۴، محیط فونداسیون به صورت یک دامنه‌ی همگن، ایزوتروپ، ویسکوکشسان و نیمه بی‌نهایت مدل می‌شود، که رویکردی قابل قبول در سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون محسوب می‌شود.^[۲۴،۲۳] مشخصات زلزله‌های اعمالی استفاده شده در تحلیل‌ها مطابق جدول ۳ است.

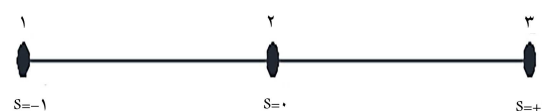
۵. انجام تحلیل حساسیت روی ابعاد فونداسیون و مخزن

با انجام تحلیل حساسیت روی ابعاد فونداسیون جرم‌دار و مخزن، بررسی نتایج حاصل از مدل‌های A تا F، حاکی از آن است که دو روش شرط مرزی انتهای دور فونداسیون و به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت، تابع ابعاد فونداسیون و مخزن نیستند و در خروجی‌های به دست آمده تفاوت‌های چشمگیری مشاهده نمی‌شود. این همگرایی پاسخ‌ها در جابه‌جایی نسبی تاج سد که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده‌ی این امر است که روش‌های مذکور برای مخزن و فونداسیون‌هایی با ابعاد دلخواه کارایی لازم را خواهند داشت. چنین مقایسه‌هایی برای تاریخچه‌ی تنش‌های کششی و فشاری در المان‌های مهمی مانند المان پاشنه‌ی سد نیز به دست آمده است، که نتیجه‌ی آن در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شود.

مقایسه‌های صورت گرفته برای تاریخچه‌ی تنش‌های کششی و فشاری برای المان پاشنه‌ی سد نیز مانند تاریخچه‌ی جابه‌جایی‌ها بیانگر این امر است که روش‌های مذکور به ابعاد فونداسیون و مخزن وابستگی ندارند و در صورت انتخاب عمقی کمینه به اندازه‌ی ۲ برابر ارتفاع سد، هر دو رویکرد نتایج قابل قبولی را ارائه خواهند داد.



شکل ۲. مختصات نقاط در المان نیمه بی‌نهایت یک بعدی.^[۹]



شکل ۳. انتقال نقاط به فضای نگاشت شده.^[۹]

جدول ۱. مشخصات مصالح سد و فونداسیون.^[۲۵]

مصالح	$\rho(kg/m^3)$	$E(GPa)$	ν
بتن سد	۲۴۰۰	۲۷٫۵۶	۰٫۲
فونداسیون	۲۴۰۰	۲۷٫۵۶	۰٫۳۳۳

حال با انتقال سه گره مذکور مطابق شکل ۳ به مختصات نگاشت شده، مشاهده می‌شود که مختصات سه نقطه از بازه‌ی (a, ∞) به بازه‌ی $(-1, 1)$ تغییر می‌کند. سپس با نوشتن معادله‌ی نگاشت و ترکیب آن با توان‌های دلخواهی از $(1/r^2, 1/r)$ می‌توان مقدار جابه‌جایی (u) را تعیین کرد (روابط ۵ و ۶):^[۱۰-۸]

$$r = -\frac{2s}{1-s}r_1 + \frac{1+s}{1-s}r_2, \quad s = 1 - \frac{2a}{r} \quad (5)$$

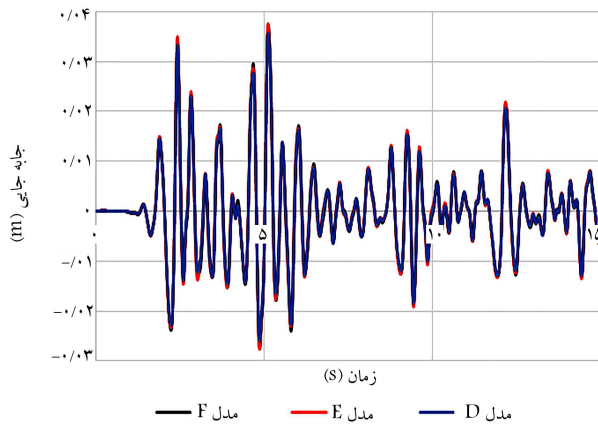
$$u = \frac{1}{4}s(s-1)u_1 + (1-s^2)u_2 \quad (6)$$

باید توجه کرد که به هنگام تعریف المان‌های نیمه بی‌نهایت در محیط نرم‌افزار تجاری آباکوس، لازم است تا فایل ورودی متنی اصلاح شود تا امکان استفاده از المان‌های اشاره شده فراهم شود.

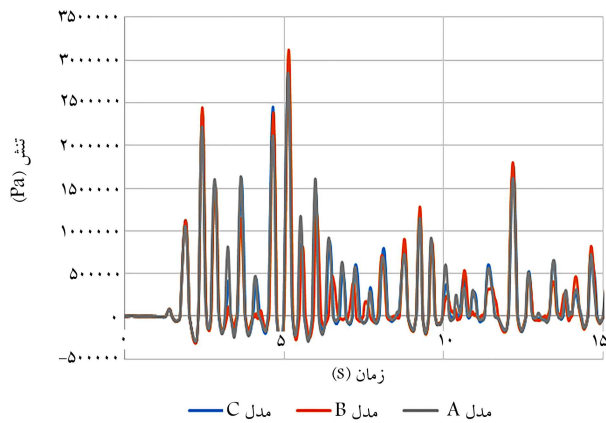
۴. مدل‌سازی

در نوشتار حاضر، با استفاده از شرایط مرزی انتهای دور فونداسیون و به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت به مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون جرم‌دار پرداخته شده است. در این راستا و به منظور بررسی کارایی روش‌های ذکر شده در چنین سیستم‌هایی، سد وزنی Pine Flat برای مدل‌سازی و تحلیل انتخاب شده است. ارتفاع بلندترین مونولیت سد Pine Flat از کف برابر با ۱۲۲ متر است که در مدل‌سازی‌ها نیز از ارتفاع همین مونولیت برای سازی سد استفاده شده است. رفتار مصالح استفاده شده در مدل‌سازی سیستم مذکور نیز خطی در نظر گرفته شده است، که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

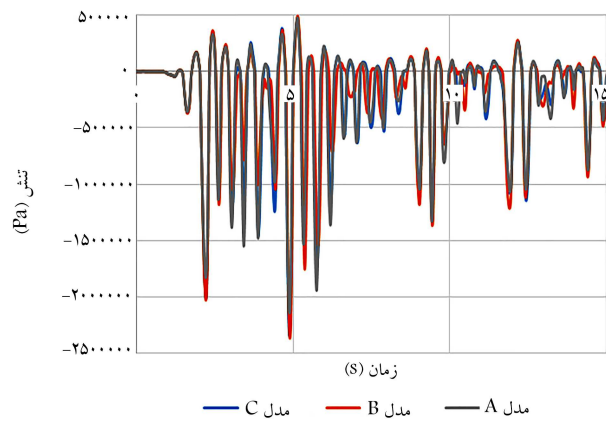
در آغاز با تعریف سیستم‌هایی با ابعادی متفاوت از فونداسیون جرم‌دار و طول مخزن و انجام تحلیل حساسیت روی آن‌ها، نحوه‌ی عملکرد روش‌های مذکور در این شرایط سنجیده شده است. لازم به ذکر است سیستم موردنظر تحت بار لرزه‌یی فقط به بدنه‌ی سد اعمال شده است، تحلیل می‌شود؛ به عبارت دیگر، این بار لرزه‌یی از طریق تاریخچه‌ی زمانی یک شتاب‌نگاشت، به صورت نیرویی که به کلیه‌ی گره‌های



شکل ۵. جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی Centro El در مدل‌های D, E و F با به‌کارگیری المان نیمه بی‌نهایت.



شکل ۶. تاریخچه‌ی تنش‌های کششی المان پاشنه‌ی سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی Centro El در مدل‌های A, B و C با شرط مرزی انتهای دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر).

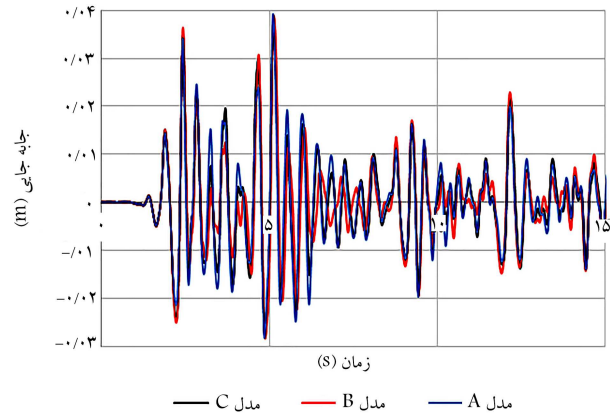


شکل ۷. تاریخچه‌ی تنش‌های فشاری المان پاشنه‌ی سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی Centro El در مدل‌های A, B و C با شرط مرزی انتهای دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر).

بر آن بوده است که آثار حضور جرم فونداسیون در پاسخ سیستم بررسی شود. در این راستا، نتایج حاصل از سه رویکرد پیشین با خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ مقایسه می‌شود که نتایج آن‌ها برای جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد به اختصار برای زلزله‌ی Kern County در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های اعمالی.

PGA (g)	نام زلزله
۰٫۱۸۶	Cape Mendocino (۱۹۹۲)
۰٫۱۰۶	Tabas_Iran (۱۹۷۸)
۰٫۱۵۶	San Fernando (۱۹۷۱)
۰٫۱۳۴	Bam-Iran (۲۰۰۳)
۰٫۱۰۵	Kocaeli-Turkey (۱۹۹۹)
۰٫۲۴۸	Iwate-Japan (۲۰۰۸)
۰٫۱۲۳	San Simeon-CA (۲۰۰۳)
۰٫۱۵۶	Northridge-۱ (۱۹۹۴)
۰٫۱۷۰	Victoria (۱۹۷۹)
۰٫۵۲۳	Mangil-Iran (۱۹۹۰)
۰٫۱۷۱	Darfield-New Zealand (۲۰۱۰)
۰٫۲۳۱	Chuetsu-oki-Japan (۲۰۰۷)
۰٫۲۷۴	Landers (۱۹۹۲)
۰٫۵۱۲	Tottori-Japan (۲۰۰۰)
۰٫۲۳۵	Cornith-Greece (۱۹۸۱)
۰٫۱۸۳	Kern County (۱۹۵۲)
۰٫۱۶۷	Imperial Valley-۰۶ (۱۹۷۹)
۰٫۲۴۴	Morgan Hill (۱۹۸۴)
۰٫۲۸۶	El Centro (۱۹۴۰)
۰٫۳۵۵	Kobe-Japan (۱۹۹۵)

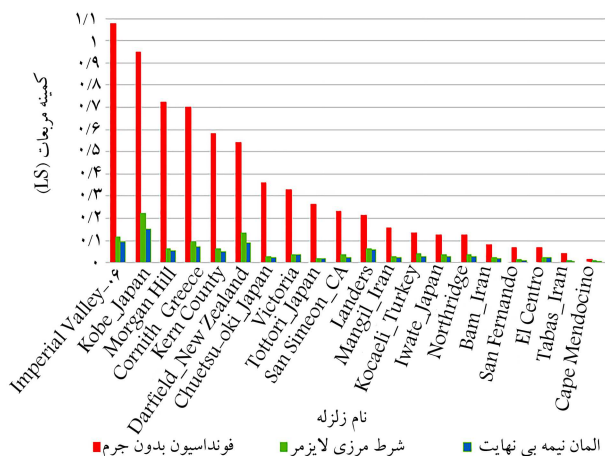


شکل ۴. جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی Centro El در مدل‌های A, B و C با شرط مرزی انتهای دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر).

۶. بررسی سیستم سد - مخزن - فونداسیون تحت اثر

شتاب‌نگاشت‌های مختلف

در انجام تحلیل دینامیکی روی سیستم سد - مخزن - فونداسیون تحت اثر بار زلزله برای شرط مرزی انتهای دور فونداسیون و به‌کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت در حالت‌های فونداسیون جرم‌دار و همچنین سیستم دارای فونداسیون بدون جرم، سعی



شکل ۱۱. مقایسه کمیته مربعات مربوط به جابه‌جایی افقی تاج سد در سیستم سد - مخزن - فونداسیون برای ۲۰ زلزله‌ی مختلف در فونداسیون بدون جرم، شرط مرزی لایزمر و المان نیمه بی‌نهایت.

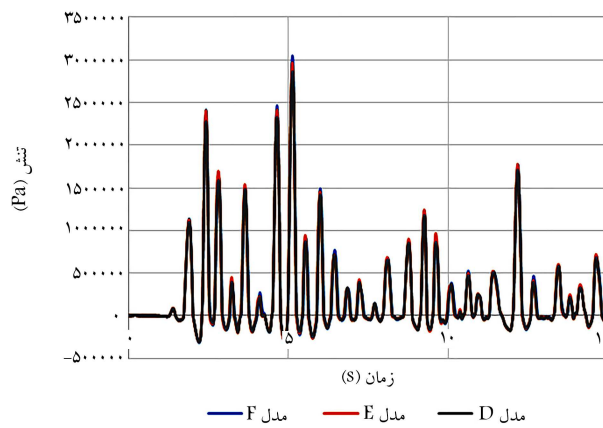
دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر)، فونداسیون جرم‌دار با المان‌های نیمه بی‌نهایت و همچنین فونداسیون بدون جرم نسبت به خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴، میزان خطا در هر رویکرد نسبت به پاسخ‌های برنامه‌ی موردنظر بررسی شده است. کمتر بودن مقدار خطا نشان می‌دهد که پاسخ به‌دست آمده از روش‌های پیشنهادی، نسبت به مقادیر حاصل از خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ فاصله‌ی کمتری دارند که نشانگر کارایی و دقت روش‌های ارائه شده است. نمودار مربوط به خطای کمیته مربعات در شکل ۱۱ برای روش‌ها و زلزله‌های مختلف نشان داده شده است.

پوش تنش‌های بیشینه کششی و فشاری که نتایج آن برای زلزله‌ی San Fernando در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است، به خوبی نشان می‌دهد که دو روش پیشنهادی، توزیع تنش‌های کششی و فشاری به وجود آمده در بدنه‌ی سد را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کنند. شایان ذکر است که اختلاف‌های موجود فقط محدود به مقادیر بیشینه و به صورت موضعی است.

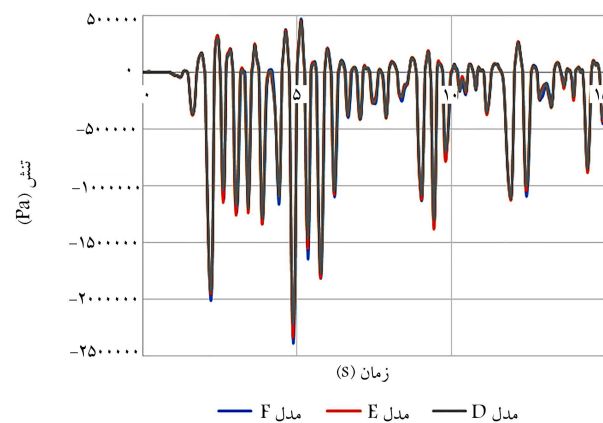
با توجه به مقادیر ارائه شده در رابطه با پوش بیشینه تنش‌های کششی و فشاری نیز مشاهده می‌شود که مدل‌های دارای فونداسیون بدون جرم، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، پاسخ‌های بسیار بیشتری را برآورد می‌کنند و از خروجی‌های مربوط به برنامه‌ی EAGD-۸۴ فاصله‌ی زیادی خواهند داشت. وجود چنین فاصله‌هایی که در مقدار جابه‌جایی‌ها و همچنین تنش‌ها مشاهده می‌شود، در موارد عملی چندان مطلوب نیست و می‌تواند جنبه‌های اقتصادی پروژه را تحت تأثیر قرار دهد و به طرح‌هایی محافظه‌کارانه منجر شود.

۷. نتیجه‌گیری

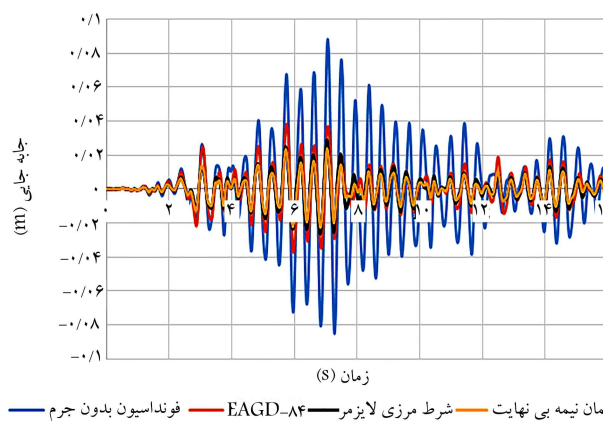
در نوشتار حاضر، با تشریح دو روش شرط مرزی انتهای دور فونداسیون (شرط مرزی لایزمر) و به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت، به بررسی اثر جرم فونداسیون در سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون پرداخته شده است. در این مسیر سعی بر تشریح و استفاده از روش‌هایی بوده است که در عین سهولت در اجرا، بتوانند پاسخ‌های قابل‌قبولی را در اختیار طراحان قرار دهند. در نوشتار حاضر، جهت انجام بررسی و مقایسه‌ی نتایج، پاسخ‌های حاصل از تحلیل سیستم با استفاده از شرط



شکل ۸. تاریخچه تنش‌های کششی المان پاشنه‌ی سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی El Centro در مدل‌های D, E, و F با به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت.

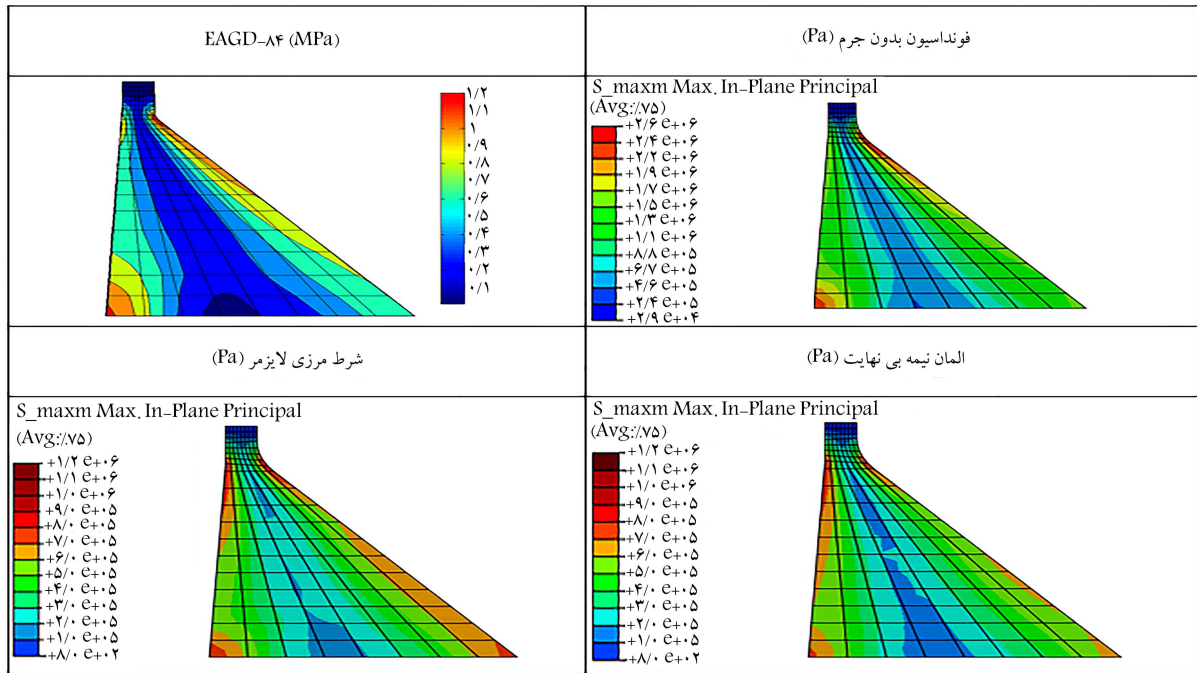


شکل ۹. تاریخچه تنش‌های فشاری المان پاشنه‌ی سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی El Centro در مدل‌های D, E, و F با به کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت.

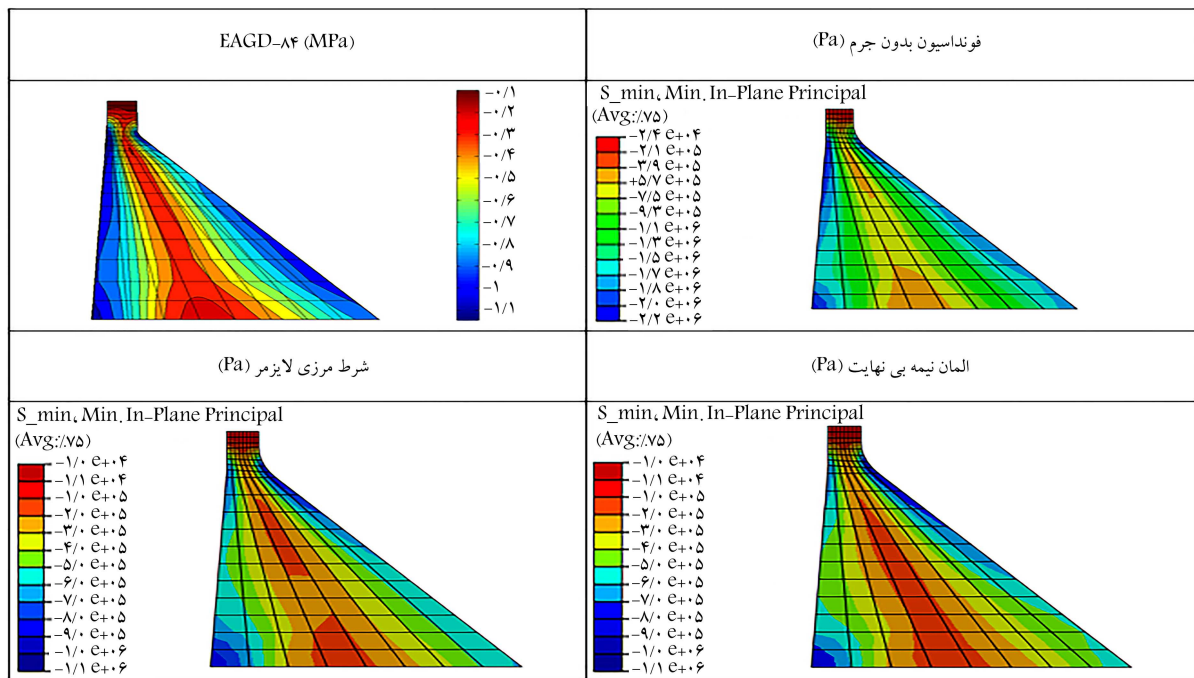


شکل ۱۰. جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی Kern County برای فونداسیون بدون جرم، EAGD-۸۴، شرط مرزی لایزمر و المان نیمه بی‌نهایت.

مطابق شکل ۱۰، مشخص است که پاسخ مربوط به دو رویکرد پیشنهادی تا حد زیادی به خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ نزدیک است. این در حالی است که جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد در حالتی که فونداسیون بدون جرم است تا حد زیادی از نتایج برنامه‌ی مذکور فاصله دارد. در گام بعد با تعیین مقدار خطای کمیته مربعات^۴ در طول تاریخچه‌ی زمانی برای فونداسیون جرم‌دار با شرط مرزی انتهای



شکل ۱۲. پوش بیشینه تنش‌های کششی در بدنه‌ی سد برای زلزله‌ی San Fernando.



شکل ۱۳. پوش بیشینه تنش‌های فشاری در بدنه‌ی سد برای زلزله‌ی San Fernando.

تنش‌ها برای المان پاشنه مشهود است و نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی در ابعاد مختلف، کارایی لازم را دارند و پاسخ‌های حاصل از آن‌ها، تغییرات محسوسی را نشان نخواهند داد.

نتایج حاصل از بررسی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون تحت اثر نیروی لرزه‌یی ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت‌های مختلف نشان می‌دهد که دو روش مذکور در طول تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی افقی تاج سد، هماهنگی و تطابق بسیار خوبی با خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ خواهند داشت. این

مرزی انتهای دور فونداسیون و به‌کارگیری المان‌های نیمه بی‌نهایت با خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ مقایسه شده‌اند.

نتایج تحلیل دینامیکی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون در شرایط مختلف و با استفاده از روش‌های پیشنهادی، بیانگر آن است که دو روش مذکور تابع ابعاد فونداسیون و مخزن نیستند و در حالت‌های مختلفی از تحلیل، پاسخ‌ها هم‌گرایی و تطابق مناسب و قابل‌قبولی را از خود نشان می‌دهند. این هم‌گرایی در پاسخ‌های مربوط به تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی افقی تاج سد و تاریخچه‌ی زمانی

جاذب انتهای دور فونداسیون و به کارگیری میراگرها، نتایج به دست آمده با آنچه که با استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت حاصل می‌شود، تفاوت چندانی ندارد و می‌توان از هر دو روش در مدل‌سازی فونداسیون‌های جرم‌دار استفاده کرد. هر دو روش پیشنهادی به دلیل کاهش در زمان و هزینه‌ی تحلیل، در گام‌های آغازین پروژه می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های پیچیده محسوب شوند. استفاده از روش‌های مذکور ضمن ایجاد سهولت در روند تحلیل و اجرا، می‌تواند طراح را با تقریب خوبی به پاسخ‌هایی بسیار نزدیک به خروجی روش‌های با دقت بیشتر برساند، که مهم‌ترین مزیت آن‌ها کاهش هزینه‌های محاسباتی پروژه، به‌ویژه در گام‌های ابتدایی تحلیل و طراحی خواهد بود.

در حالی است که در مدل‌های دارای فونداسیون بدون جرم، پاسخ‌ها نسبت به خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴، حدوداً ۲ برابر بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، فونداسیون‌های بدون جرم همواره پاسخ‌های ساده را بسیار بیشتر برآورد می‌کنند. میزان خطای حاصل از تخمین دو روش مذکور نسبت به خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ همواره بسیار کمتر از مقدار متناظر آن در فونداسیون‌های بدون جرم است.

چنین نتایجی ضمن تأیید کارایی دو روش ارائه شده، در مدل‌سازی سیستم‌های سد - مخزن - فونداسیون جرم‌دار، حاکی از محافظه‌کارانه بودن مدل‌سازی فونداسیون به صورت بدون جرم نیز است. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که در شرایط مرزی

پانوشته‌ها

1. Leger and Boughoufalah
2. free field boundary condition (FFBC)
3. domain reduction method (DRM)
4. least squares

منابع (References)

1. Chopra, A.K. "Earthquake response analysis of concrete dams", In *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*, Springer, Boston, MA, pp. 416-465 (1988).
2. Wang, X., Jin, F., Prempramote, S. and et al. "Time-domain analysis of gravity dam-reservoir interaction using high-order doubly asymptotic open boundary", *Computers & Structures*, **89**(7-8), pp. 668-680 (2011).
3. Westergaard, H.M. "Water pressures on dams during earthquakes", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **95**, pp. 418-433 (1933).
4. Chopra, A.K. "Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **93**(6), pp. 205-224 (1967).
5. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. "Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **2**(2), pp. 143-160 (1973).
6. Gravity Dam Design, Manual 1110-2-2200, Washington (DC), U.S. Army Corps of Engineering (1995).
7. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **95**(4), pp. 859-878 (1969).
8. Beer, G. and Meek, J.L. "Infinite domain elements", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **17**(1), pp. 43-52 (1981).
9. Zienkiewicz, O.C., Emson, C. and Bettess, P. "A novel boundary infinite element", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **19**(3), pp. 393-404 (1983).
10. Kumar, P. "Static infinite element formulation", *Journal of Structural Engineering*, **111**(11), pp. 2355-2372 (1985).
11. Leger, P. and Boughoufalah, M. "Earthquake input mechanisms for time-domain analysis of dam-foundation systems", *Engineering Structures*, **11**(1), pp. 37-46 (1989).
12. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Staggered solution schemes for dam-reservoir interaction", *Journal of Fluids and Structures*, **12**(7), pp. 933-948 (1998).
13. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction", *Engineering Structures*, **21**(4), pp. 306-315 (1999).
14. Chopra, A.K. and Chakrabarti, P. "Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **9**(4), pp. 363-383 (1981).
15. Fenves, G. and Chopra, A.K. "Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **12**(5), pp. 663-680 (1984).
16. Bayraktar, A., Hancer, E. and Akkose, M. "Influence of base-rock characteristics on the stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems", *Engineering Structures*, **27**(10), pp. 1498-1508 (2005).
17. Chopra, A.K. "Earthquake analysis of arch dams: Factors to be considered", *Journal of Structural Engineering*, **138**(2), pp. 205-214 (2012).
18. Chopra, A.K. "Earthquake analysis of concrete dams: Factor to be considered", In *Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research* (July, 2014).
19. Ghaemian, M., Noorzad, A. and Mohammadnezhad, H. "Assessment of foundation mass and earthquake input mechanism effect on dam-reservoir-foundation system response", *International Journal of Civil Engineering*, pp. 1-8 (2018).

20. Zienkiewicz, O.C., Bicanic, N. and Shen, F.Q. "Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions", In *Advances in Computational Nonlinear Mechanics*, pp. 109-138, Springer, Vienna (1989).
21. Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, Y. and et al. "Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(2), pp. 817-824 (2003).
22. Yoshimura, C., Bielak, J., Hisada, Y. and et al. "Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part II: Verification and applications", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(2), pp. 825-841 (2003).
23. Fenves, G. and Chopra, A.K. "EAGD-84: A computer program for earthquake analysis of concrete gravity dams", University of California, Earthquake Engineering Research Center (1984).
24. Sotoudeh, P., Ghaemian, M. and Mohammadnezhad, H. "Seismic analysis of reservoir-gravity dam-massed layered foundation system due to vertically propagating earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**, pp. 174-184 (2019).
25. Abbasnezhad, H. "The effect of dam-foundation interaction on the seismic behavior of concrete gravity dams using semi-infinite elements", Sharif University of Technology (In Persian) (2016).
26. User Manual Pre and Post-Processing Modules to Facilitate Analysis with EAFD-84, Arnkjell Lokke Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology/ University of California, Berkeley (June 2013).