

تحلیل لرزه‌ی سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل - به روش هیبرید عدد موج گسسته و اجزاء محدود

حمید محمدنژاد* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

محسن قائمیان (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

حمید زعفرانی (استاد)

بزه‌شگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۳۹-۵۰، (پژوهشی)

ارزیابی ایمنی سدها به عنوان بخش مهمی از زیرساخت هر کشور، نیازمند تحلیل صحیح و دقیق سیستم کوبه‌ی سد - فونداسیون - مخزن تحت تحریک لرزه‌ی مناسب است. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی تر زلزله، باید آثار منبع لرزه‌ی، مسیر انتشار و شرایط ساختگاهی در نظر گرفته شود. هدف نوشتار حاضر، ارائه‌ی روش هیبریدی از ترکیب روش عدد موج گسسته و اجزاء محدود بر مبنای روش کاهش دامنه برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل است. نتایج راستی‌آزمایی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که روش مذکور با دقت خوبی آثار گسل و مسیر انتشار موج لرزه‌ی را تحت سناریوهای واقعی زلزله در نظر می‌گیرد و به لحاظ هزینه‌ی محاسباتی نیز مقرون به صرفه خواهد بود. سد وزنی کوبینا با روش پیشنهادی و روش مرسوم فونداسیون بدون جرم تحلیل شده است. مقایسه‌ی پاسخ‌های به دست آمده از هر دو روش نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه‌ی تنش کششی و جابه‌جایی نسبی تاج سد با فرضیات روش مرسوم بیشتر از حالت مدل پیشنهادی نزدیک به واقعیت است.

واژگان کلیدی: سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل، روش کاهش دامنه، تحلیل لرزه‌ی، انتشار موج لرزه‌ی، حل عددی.

۱. مقدمه

سدهای بتنی، یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای بشر در زمینه‌ی مهندسی عمران هستند که علاوه بر عظمت و زیبایی، به واسطه‌ی هندسه‌ی پیچیده و در عین حال شرایط محیطی خاص هر پروژه، از نظر تحلیل و طراحی هنوز جزء پیچیده‌ترین سازه‌ها محسوب می‌شوند. در طی سال‌ها، پژوهشگران مختلف پیشنهادها و متفاوتی جهت ساده‌سازی و در عین حال بالا بردن دقت محاسبات در زمینه‌ی تحلیل و طراحی آن‌ها ارائه کرده‌اند. یکی از مباحث مورد بحث در زمینه‌ی سدهای بتنی، بحث آنالیز لرزه‌ی آن‌هاست. ایمنی لرزه‌ی سدهای بتنی، به علت نتایج بسیار ضرر بار ناشی از ویرانی و خرابی آن‌ها تحت زلزله‌های شدید بسیار مورد توجه است. خرابی‌های اخیر می‌تواند به شکل مستقیم و غیرمستقیم، زندگی مردم پایین دست سدهای بتنی و حتی زندگی مردم کل کشور را تحت تأثیر قرار دهد. در بحث تحلیل لرزه‌ی سدهای بتنی، بحث آنالیز آن‌ها به تنهایی مطرح نیست؛ بلکه به دلیل حضور سه محیط با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، اصلاحیه ۱۴۰۰/۰۹/۱۰، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

DOI:10.24200/J30.2022.58809.3004

افزاده می‌کند. برای تحلیل خطی و غیرخطی چنین سیستم پیچیده‌ی لازم است از روش‌های عددی استفاده شود. روش اجزاء محدود^۱ و روش اجزاء مرزی^۲ دو روش مرسوم برای حل سیستم سد - فونداسیون - مخزن هستند که توسط پژوهشگران استفاده شده‌اند. عالم باقری و قائمیان (۲۰۱۳)، با روش اجزاء محدود، رفتار لرزه‌ی سد بتنی وزنی پابن فلت را به روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آورا) و تحلیل

h_mohammadnezhad@sbu.ac.ir
ghaemian@sharif.edu
h.zafarani@iiees.ac.ir

دینامیکی فزاینده بررسی کرده و بعد از تعیین عملکرد و حالت‌های حدی سد، سه شاخص خرابی براساس تقاضای لرزه‌یی و ظرفیت سد پیشنهاد داده‌اند.^[۸] نیکروش سندی و سهرابی گیلانی (۲۰۲۱)، در بررسی دو شرط مرزی برای انتهای دور فونداسیون در تحلیل اجزاء محدود سیستم سد - مخزن - فونداسیون نشان دادند که شرایط مرزی مذکور را با ملاحظات می‌توان برای در نظر گرفتن جرم فونداسیون به کار برد.^[۹] ماسو و دومنگوتز^۳ (۱۹۹۳)، با استفاده از روش اجزاء مرزی سه‌بعدی، رفتار لرزه‌یی سد قوسی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد - فونداسیون و نیز رفتار خطی سد قوسی مارپوینت را تحت انتشار قائم امواج هارمونیک در شرایط مخزن خالی بررسی کردند و نتایج ایشان با برخی از نتایج به دست آمده از روش اجزاء محدود در تضاد بود.^[۱۰] تن و چوپرا^۴ (۱۹۹۵)، با استفاده از روش اجزاء مرزی، رفتار خطی سد قوسی در فضای بسامدی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد - فونداسیون بررسی کردند و دریافتند که اندرکنش سد - فونداسیون، تأثیر قابل توجهی در پاسخ سد دارد و با کاهش نسبت مدول کشسانی فونداسیون، که معادل افزایش انعطاف‌پذیری آن است، بسامد تشدید اصلی سد کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن اندرکنش سد - فونداسیون، مقادیر دامنه‌ی پاسخ در بسامدهای تشدید کاهش می‌یابد.^[۱۱] لطفی (۲۰۰۷)، با استفاده از ترکیب روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مرزی، رفتار لرزه‌یی سد قوسی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد - فونداسیون با شکل دلخواه دره بررسی کرد و در روش پیشنهادی‌اش، سد را به روش اجزاء محدود و فونداسیون بی‌نهایت به روش اجزاء مرزی مدل‌سازی کرد. نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که شکل دره، تأثیر قابل توجهی در پاسخ سد دارد، به گونه‌یی که بیشینه‌ی پاسخ برای شکل دره‌ی گیریک‌نواخت، کمتر از حالت شکل دره‌ی یکنواخت است و همچنین بسامد طبیعی سیستم نیز کاهش می‌یابد.^[۱۲] به دلیل قابلیت بالای روش اجزاء محدود در مدل‌سازی محیط‌های با هندسه‌ی پیچیده و مدل‌های رفتاری متنوع و تحلیل‌های غیرخطی، روش اجزاء محدود به وفور در تحلیل‌ها استفاده شده است. با اینکه پیشرفت‌های ارزشمندی در سال‌های اخیر در مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌یی سیستم سد - فونداسیون - مخزن به روش اجزاء محدود صورت گرفته است، ولی هنوز مواردی از جمله مدل‌سازی فونداسیون جرم‌دار بی‌نهایت، انتشار موج لرزه‌یی و میرایی تشعشعی فونداسیون با چالش‌هایی همراه است.^[۱۳] برای مدل‌سازی محیط بی‌نهایت فونداسیون به روش اجزاء محدود لازم است که محیط ذکر شده، در مرزهایی به فواصل معقول بریده و شرایط مرزی مجازی مناسب برای جذب یا عبور امواج برگشتی از سطح آزاد یا سازه اعمال شود. شرایط مرزی مجازی متنوعی در طی سال‌های اخیر توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است که به طور مثال می‌توان به شرایط مرزی جاذب، شرط مرزی ویسکوز، لایه‌ی کاملاً جاذب، المان بی‌نهایت و المان سطح آزاد اشاره کرد.^[۱۴-۱۸]

مکانیسم اعمال صحیح زلزله در مدل اجزاء محدود از چالش‌های دیگر تحلیل سیستم پیچیده‌ی سد - فونداسیون - مخزن است. به دلیل سادگی و چالش‌های در نظر گرفتن جرم فونداسیون بی‌نهایت، فرض فونداسیون بدون جرم در بیشتر مطالعات پژوهشگران مشاهده می‌شود. اما لازم است توجه شود که نتیجه‌ی مطالعات پژوهشگران در سال‌های اخیر، از جمله چوپرا^۵ (۲۰۱۲ و ۲۰۱۴) و محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که فرض فونداسیون بدون جرم، نتایج را غیرواقعی و محافظه‌کارانه تخمین می‌زند.^[۱۹-۲۱]

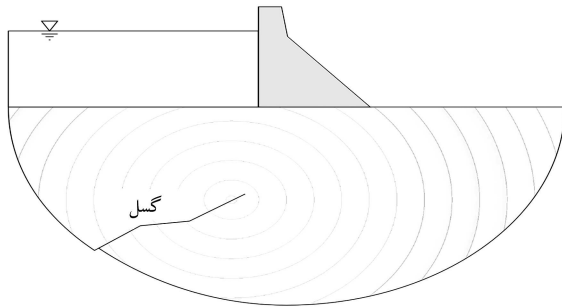
برای تحلیل لرزه‌یی فراسازه‌ها به دلیل اهمیت چندوجهی آن‌ها، از جمله اجتماعی و اقتصادی، لازم است برخلاف سازه‌های معمولی و کم‌اهمیت‌تر، مطالعات ویژه‌ی ساختگاهی انجام و گسل‌های موجود در ساختگاه و سناریوهای محتمل زلزله در

منطقه در نظر گرفته شوند. تخمین مناسب تحریک زلزله‌ی ورودی برای تحلیل سازه‌ها، نیازمند فهم دقیق و در نظر گرفتن آثار مکانیسم گسل، مسیر انتشار و شرایط ساختگاهی است. هر کدام از عوامل اخیر، تحریک زلزله‌ی ورودی را متأثر می‌سازد و در نهایت پاسخ سازه را با توجه به سناریوی انتخابی تغییر می‌دهد. در زمینه‌ی شبیه‌سازی زلزله، مطالعات ارزشمندی در سال‌های اخیر انجام شده است که با تمام تفاوت‌ها و فرض‌ها، در محیط نیم‌بی‌نهایت، بدون حضور سازه، زلزله را شبیه‌سازی کرده‌اند.^[۲۲-۲۳]

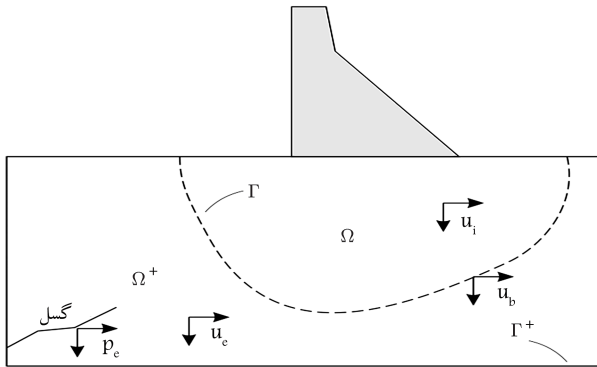
مسئله‌ی سد - فونداسیون - مخزن - گسل، یک مسئله‌ی چندمقیاسی است. به عبارتی باید مسئله‌ی شبیه‌سازی گسل، مسیر انتشار و زلزله‌ی ورودی در مقیاس لرزه‌شناسی به شیوه‌ی مناسب با مسئله‌ی تحلیل دینامیکی سد - فونداسیون - مخزن در مقیاس مهندسی ترکیب شود، تا نتایج دقیق و منطقی از تحلیل به دست آید. برای این منظور، دو رویکرد مستقیم و هیبرید برای حل چنین مسئله‌های بزرگ‌مقیاسی وجود دارد. در رویکرد مستقیم، کل سیستم سازه - گسل با هم در یک مدل شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند. در رویکرد مستقیم، ناحیه‌های دور و نزدیک، شامل: گسل، مسیر انتشار، شرایط ساختگاهی، و سازه در یک مدل لحاظ می‌شوند. استفاده از روش اجزاء محدود در رویکرد مستقیم، به دلیل ابعاد بسیار بزرگ ناحیه‌ی دور و لزوم دستیابی به دقت مناسب برای پاسخ سازه، منجر به تعداد بسیار زیاد المان می‌شود و عملاً تحلیل، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر خواهد بود. در رویکرد هیبرید، مسئله شامل دو مرحله است: در یک مرحله، ناحیه‌ی دور شامل آثار گسل و مسیر انتشار با حذف سازه و شرایط ساختگاهی با روش مناسب در محیط نیم‌بی‌نهایت مدل‌سازی و تحلیل می‌شود؛ و در مرحله‌ی دیگر، ناحیه‌ی نزدیک، شامل: سازه و شرایط ساختگاهی با دقت بالا مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. رویکرد هیبرید با هزینه‌ی محاسباتی پایین، دقت قابل قبولی دارد و علاوه بر آن، انعطاف بالایی در ترکیب روش‌های مختلف تحلیلی و عددی برای استفاده در ناحیه‌های دور و نزدیک دارد.^[۲۴-۲۵]

۲. روش کاهش دامنه

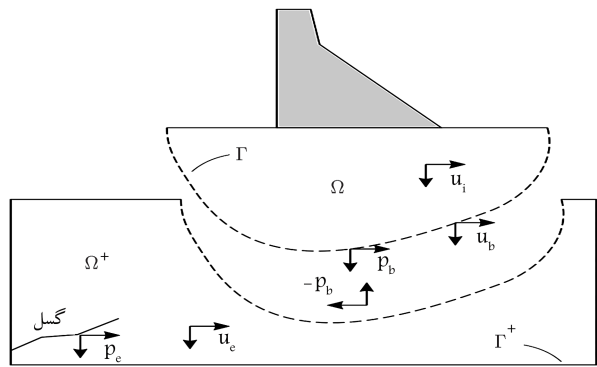
روش کاهش دامنه^۶، یک روش دو مرحله‌یی است که با تغییر متغیرهای حاکم بر معادلات باعث کاهش دامنه‌ی محاسباتی می‌شود. در روش کاهش دامنه، تحریک زلزله مستقیماً وارد دامنه‌ی محاسباتی می‌شود. اساس روش کاهش دامنه به کار هررا و بیلک^۷ (۱۹۷۷) برمی‌گردد که مسئله‌ی اندرکنش خاک - سازه در برابر زلزله را به مسئله‌ی تفرق امواج در محیط پیوسته‌ی معادل تبدیل کرده‌اند.^[۲۶] بیلک^۸ و همکاران، براساس کارهای قبلی خود (هررا و بیلک (۱۹۷۷)، بیلک و کریستیانو^۹ (۱۹۸۴)، کرمونینی^{۱۰} و همکاران (۱۹۸۸) و لوکاکیس^{۱۱} و بیلک (۱۹۹۴)، یک رویه‌ی دو مرحله‌یی به نام روش کاهش دامنه را پیشنهاد کرده‌اند.^[۲۶-۳۰] در گام اول، پاسخ‌های سطح آزاد و نیروهای مؤثر در یک نوار یک‌بعدی محاسبه و ذخیره می‌شود. در گام دوم، نیروهای مؤثر محاسبه شده در مرز مورد نظر برای تحلیل سازه اعمال می‌شود. در این روش با تغییر متغیرهای حاکم بر معادلات، دامنه‌ی محاسباتی کاهش و تحریک زلزله مستقیماً وارد دامنه‌ی محاسباتی می‌شود. یوشیمورا^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۳)، نتایج روش کاهش دامنه را با روش تابع گرین تحلیلی راستی‌آزمایی کردند. همچنین کاربرد روش کاهش دامنه را در مسائل سه‌بعدی با دامنه‌های بزرگ شامل گسل و شرایط ناهمگنی زیاد محیط نشان دادند.^[۳۱] بعد از آن، روش کاهش دامنه مورد توجه پژوهشگران دیگری قرار گرفت. قائمیان و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از



شکل ۱. طرح کلی محیط نیم‌بی‌نهایت، شامل گسل و سد. [۳۵]



شکل ۲. محیط محدود شده با مرز مجازی. [۳۵]



شکل ۳. میدان نزدیک و میدان دور. [۳۵]

مرز Γ^+ محدود می‌شود. بردار جابه‌جایی‌های گره‌بی در دامنه‌ی درونی Ω ، دامنه‌ی بیرونی Ω^+ و مرز بین آن‌ها Γ ، به ترتیب با u_i (داخلی)، u_e (خارجی) و u_b (مرزی) مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود. کل دامنه به دو زیردامنه، یکی شامل گسل (میدان دور) و دیگری شامل سازه و ساختگاه (میدان نزدیک) تقسیم می‌شود. جابه‌جایی‌های u_b روی مرز Γ پیوسته هستند و P_b نیروهای گره‌بی منتقل شده از Ω^+ به Ω است.

با گسسته‌سازی معادله‌ی ناویه به عنوان معادله‌ی حرکت حاکم بر کل دامنه به روش اجزاء محدود برای دامنه‌های Ω و Ω^+ ، معادلات ۱ و ۲ را خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix}, \text{ in } \Omega \quad (1)$$

روش کاهش دامنه و شرط مرزی سطح آزاد، سیستم سد - فونداسیون - مخزن را با مدل‌سازی فونداسیون جرم‌دار به روش اجزاء محدود تحلیل کردند. همچنین ایشان نتایج حاصل از دو روش در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس را با خروجی‌های برنامه‌ی EAGD-۸۴ که قابلیت در نظر گرفتن فونداسیون جرم‌دار در تحلیل‌های خطی را دارد، مقایسه کردند. تطابق بسیار خوب نتایج نشان داد که از روش‌های اخیر در تحلیل‌های خطی و غیرخطی سیستم سد - مخزن - فونداسیون جرم‌دار می‌توان استفاده کرد. [۳۲] ستوده و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش کاهش دامنه به بررسی سیستم سد بتنی وزنی - مخزن - فونداسیون لایه‌بی جرم‌دار با فرض انتشار قائم امواج لرزه‌یی پرداختند و نتایج حاصل از روش کاهش دامنه با خروجی‌های روش میدان آزاد را مقایسه و راستی‌آزمایی کردند. همچنین تأثیر نسبت مدول کشسانی بین لایه‌ها، هندسه، موقعیت قرارگیری و جهت‌گیری لایه‌های فونداسیون در پاسخ سد را بررسی کردند و دریافتند که علاوه بر جرم فونداسیون، مشخصات مصالح، ضخامت لایه‌ها و موقعیت قرارگیری آن‌ها نیز در پاسخ سد مؤثر است. [۳۳] محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۹)، نیز به عنوان اولین تلاش در زمینه‌ی مهندسی سد، به بررسی قابلیت روش کاهش دامنه در تحلیل سیستم سد - فونداسیون - گسل پرداختند. به این منظور، روش کاهش دامنه را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس اعمال و بعد از راستی‌آزمایی، نتایج روش مستقیم و ترکیبی کاهش دامنه برای تحلیل سیستم سد کوینا - فونداسیون - گسل را مقایسه کردند. برای مدل‌سازی آثار گسل، از موجک ریکر در یک فضای دوبعدی ساده استفاده شده است. دو روش از نظر تعداد المان‌های موردنیاز در مدل اجزاء محدود، زمان تحلیل و سخت‌افزار رایانه‌یی نیز مقایسه شدند و نتایج نشان داد که می‌توان از روش کاهش دامنه به عنوان روشی مناسب و کارا برای تحلیل مسائل واقعی سد - مخزن - فونداسیون - گسل با در نظر گرفتن هندسه‌های پیچیده‌ی ساختگاه با مدل‌های رفتاری مختلف، مدل‌سازی گسل با ابعاد واقعی و مکانیسم‌های گسیختگی تحت سناریوهای واقعی زلزله استفاده کرد. [۳۴] در ادامه‌ی مطالعات قبلی، دانشیار و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی تأثیر انتشار موج زلزله در فونداسیون جرم‌دار با استفاده از روش کاهش دامنه در رفتار غیرخطی سد بتنی وزنی پرداختند و بعد از راستی‌آزمایی اعمال روش کاهش دامنه در نرم‌افزار آباکوس، آثار انتشار موج لرزه‌یی و میرایی تشعشعی را در تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن لحاظ کردند. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن نیز مدل رفتاری جدیدی گسترش یافت و با سابروتین نویسی، به نرم‌افزار آباکوس اعمال و در تحلیل‌ها استفاده شد. نتایج تحلیل حالت‌های مختلف نشان داد که میرایی تشعشعی، انتشار موج لرزه‌یی و مدل رفتاری مناسب برای رفتار غیرخطی بتن، تأثیر قابل توجهی در پاسخ سد بتنی داشته‌اند. نتایج نیز با مدل‌های ساده شده، اختلاف‌های قابل توجهی داشتند. [۳۵]

۱.۲. فرمول‌بندی روش کاهش دامنه

در بخش حاضر، فرمول‌بندی روش کاهش دامنه براساس نوشتار بیلک و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. [۳۰] به صورت کلی، در شکل ۱، مسئله‌ی موردبحث شامل یک محیط نیم‌بی‌نهایت با لایه‌بندی و شرایط زمین‌شناختی معین و گسل به عنوان منبع تحریک زلزله مشاهده می‌شود.

با توجه به هزینه‌ی محاسبات و زمان در روش‌های عددی، دامنه‌ی محاسباتی کاهش می‌یابد. لذا لازم است آثار تحریک با کمترین تغییر نسبت به مسئله‌ی اصلی به نزدیک سازه‌ی موردنظر انتقال داده شود. در شکل ۲، مرز مجازی Γ که کل ناحیه را به دو قسمت Ω ، شامل سازه و ساختگاه و Ω^+ ، محیط بی‌نهایت شامل گسل، تفکیک می‌کند، مشاهده می‌شود. برای حل مسئله‌ی اصلی، محیط نیم‌بی‌نهایت با

با جایگذاری رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۳، مقادیر جابه‌جایی گره‌ی برای کل دامنه به دست می‌آید. این فرمول‌بندی به تنهایی مزیتی نسبت به روش معمول ندارد، زیرا رابطه‌ی ۵ شامل $M_{ee}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^*$ و $M_{ee}^{\Omega^+} u_e^*$ است که نیاز به ذخیره‌سازی u_e^* در کل دامنه Ω^+ دارد. برای ساده‌سازی تحلیل، جابه‌جایی کل u_e با استفاده از تغییر متغیر به صورت رابطه‌ی ۶ نوشته می‌شود:

$$u_e = u_e^* + w_e \quad (6)$$

که در آن، w_e جابه‌جایی نسبی نسبت به u_e^* است. با جای‌گذاری رابطه‌ی ۶ در رابطه‌ی ۳ و انتقال عبارات، شامل متغیرهای میدان آزاد به سمت راست، رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & \circ \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{w}_e \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & \circ \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ w_e \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \circ \\ -M_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^* - K_{be}^{\Omega^+} u_e^* \\ P_e - M_{ee}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^* - K_{ee}^{\Omega^+} u_e^* \end{Bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

در نهایت با جایگذاری رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۷، رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & \circ \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{w}_e \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & \circ \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ w_e \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \circ \\ -M_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^* - K_{be}^{\Omega^+} u_e^* \\ M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^* + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^* \end{Bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

ماتریس جرم و سختی در سمت چپ رابطه‌ی ۸، همان ماتریس‌های رابطه‌ی ۳ هستند، ولی نیروی لرزه‌ی P_e روی گسل با نیروی مؤثر گره‌ی P_e^{eff} به صورت رابطه‌ی ۹ جایگزین شده است.

$$P_e^{eff} = \begin{Bmatrix} P_i^{eff} \\ P_b^{eff} \\ P_e^{eff} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \circ \\ -M_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^* - K_{be}^{\Omega^+} u_e^* \\ M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^* + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^* \end{Bmatrix} \quad (9)$$

که در آن، نیروها ویژگی کلیدی دارند که فقط شامل زیرماتریس‌های M_{be} و M_{be} است و آن‌ها در تمام نقاط دامنه‌ی Ω^+ جز در یک لایه‌ی محدود در نزدیکی Γ صفر هستند. در نتیجه، مزیت استفاده از رابطه‌ی ۶ به این صورت است که به راحتی نیروی مؤثر در یک لایه‌ی محدود در مسئله‌ی کمکی به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \\ & \begin{Bmatrix} u_b \\ u_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_b \\ P_e \end{Bmatrix}, in \Omega^+ \quad (2) \end{aligned}$$

که در آن‌ها، ماتریس M و K بیانگر ماتریس جرم و سختی و اندیس‌های i, e و b بیانگر گره‌های داخلی، خارجی و مرزی و بالانویشت Ω و Ω^+ به ناحیه‌ی که هر ماتریس در آن نوشته می‌شود، اشاره دارد. با جمع کردن دو معادله‌ی اخیر، معادله‌ی معمول حرکت برای کل دامنه به دست می‌آید (رابطه‌ی ۳):

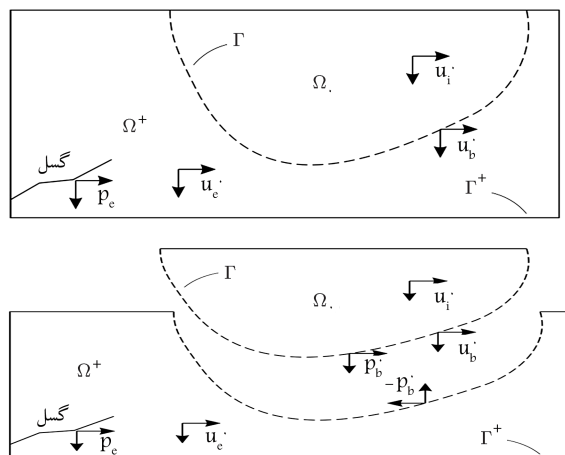
$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & \circ \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & \circ \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ \circ & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ u_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \circ \\ \circ \\ P_e \end{Bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

حال برای انتقال تحریک زلزله از گسل به مرز Γ ، یک مسئله‌ی کمکی که در آن دامنه‌ی بیرونی (شامل گسل) بدون تغییر باشد، در نظر گرفته می‌شود. دامنه‌ی درونی Ω مسئله‌ی کنونی، ساده‌تر و بدون سازه است. در این حالت مطابق شکل ۴، جابه‌جایی‌های گره‌ی و نیروهای مرزی با u_i^* ، u_b^* و u_e^* نشان داده شده‌اند. معادله‌ی حرکت برای Ω^+ در مسئله‌ی کمکی به صورت رابطه‌ی ۴ است:

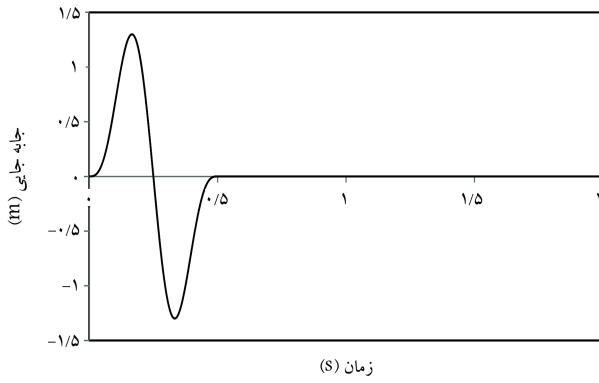
$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b^* \\ \ddot{u}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \\ & \begin{Bmatrix} u_b^* \\ u_e^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_b^* \\ P_e^* \end{Bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

با توجه به عدم تغییر دامنه‌ی Ω^+ ، ماتریس‌های جرم، سختی و نیروهای گره‌ی بدون تغییر هستند. از معادله‌ی دوم در رابطه‌ی ۴ می‌توان نیروهای گره‌ی P_e را برحسب متغیرهای سطح آزاد نوشت (رابطه‌ی ۵):

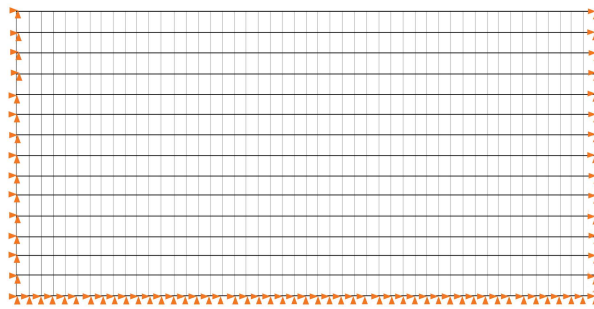
$$P_e = M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^* + M_{ee}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^* + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^* + K_{ee}^{\Omega^+} u_e^* \quad (5)$$



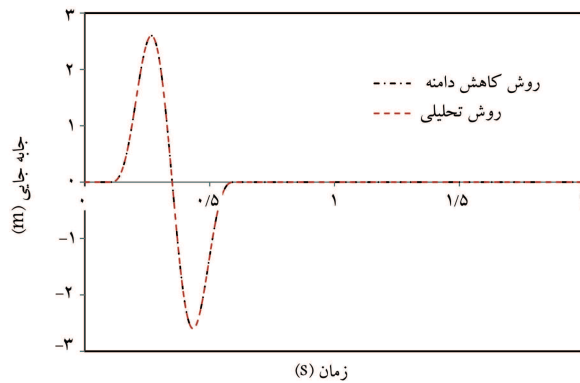
شکل ۴. مسئله‌ی کمکی. [۳۵]



شکل ۷. موجک ورودی برای شبیه‌سازی انتشار موج برشی.



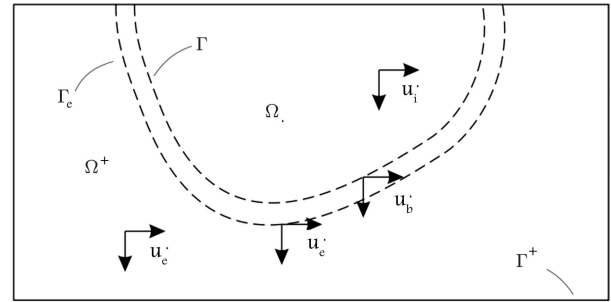
شکل ۸. مدل اجزاء محدود محیط نیم‌بی نهایت در مرحله‌ی دوم روش کاهش دامنه.



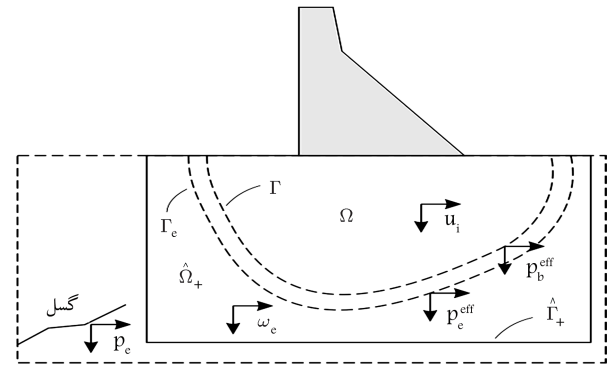
شکل ۹. پاسخ سطح آزاد محیط نیم‌بی نهایت تحت انتشار قائم موج برشی به روش کاهش دامنه و تحلیلی.

نیم‌بی نهایت در مرحله‌ی دوم روش کاهش دامنه مشاهده می‌شود. ابعاد المان‌ها ۵×۵ متر است. برای راستی‌آزمایی روش کاهش دامنه با توجه به تئوری روش اخیر، کافی است مدل مرحله‌ی دوم با مدل مرحله‌ی اول یکسان در نظر گرفته شود. در این حالت پاسخ محیط در ناحیه‌ی درونی از هر دو مرحله‌ی یکسان و پاسخ در ناحیه‌ی بیرونی، صفر است. با توجه به یکسان بودن مرحله‌ی دوم با مرحله‌ی اول در مسئله‌ی حاضر، عملاً هیچ موج برگشتی در مدل در ناحیه‌ی بیرون وجود نداشته است. لذا از شرایط مرزی ثابت در مرزهای انتهایی دور مدل استفاده شده است.

در شکل ۹، پاسخ به دست آمده از حل تحلیلی و عددی در سطح آزاد محیط نیم‌بی نهایت مشاهده می‌شود که مطابق آن، نتایج عددی با استفاده از روش کاهش دامنه تطابق خیلی خوبی با نتایج تحلیلی داشته‌اند. همچنین شکل پاسخ در سطح



شکل ۵. مرحله اول روش کاهش دامنه. [۳۵]



شکل ۶. مرحله دوم روش کاهش دامنه. [۳۵]

۲.۲. الگوریتم روش کاهش دامنه

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، روش کاهش دامنه، یک روش دو مرحله‌ی است، که در گام اول (شکل ۵)، مسئله شامل دامنه‌های Ω^+ و Ω^- حل شده و مقادیر u_b و u_c در تمام گره‌های لایه‌ی محدود به مرزهای Γ و Γ_c محاسبه و برای محاسبه‌ی نیروی مؤثر ذخیره شده‌اند. در گام دوم، مسئله در ناحیه‌ی کاهش داده $\Omega \cup \hat{\Omega}^+$ شامل سازه و ساختگاه، با اعمال نیروی مؤثر محاسبه شده در گام اول تحلیل می‌شود و با حل معادله‌ی ۸، مجهولات مسئله به دست می‌آید (شکل ۶). به این ترتیب در یک فرایند ۲ مرحله‌ی، مسئله‌ی تحلیل لرزه‌ی هرگونه سیستمی، حل شدنی است.

۳. راستی‌آزمایی اعمال روش کاهش دامنه در نرم‌افزار

آباکوس

در بخش حاضر، برای اطمینان از عملکرد صحیح برنامه‌های توسعه داده شده برای استفاده از روش کاهش دامنه در نرم‌افزار آباکوس، مسئله‌ی انتشار یک‌بعدی موج در محیط نیم‌بی نهایت کشسان با استفاده از روش کاهش دامنه، مدل‌سازی و نتایج با روابط تحلیلی موجود مقایسه شده است. برای این منظور، انتشار یک‌بعدی موج برشی در محیط نیم‌بی نهایت کشسان با مدول کشسانی $1/94$ گیگاپاسکال، چگالی 1800 کیلوگرم بر مترمکعب، و ضریب پواسون $1/1$ در نرم‌افزار آباکوس بررسی شده است. برای مدل‌سازی دو‌بعدی اجزاء محدود محیط نیم‌بی نهایت کشسان، دامنه‌ی به ابعاد 70×24 متر با رفتار خطی در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی انتشار موج برشی در محیط، از موجکی با تاریخچه‌ی زمانی مطابق شکل ۷ استفاده شده است. در شکل ۸، نیز مدل اجزاء محدود محیط

آزاد شبیه شکل تابع موجک ورودی با بزرگ‌نمایی دو برابر و تأخیر زمانی است. مقایسه‌ی انجام شده، حاکی از صحت روش کاهش دامنه و اعمال آن در نرم‌افزار اجزاء محدود است.

۴. روش پیشنهادی برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دو روش کلی برای در نظر گرفتن آثار منبع لرزه‌ی (گسل)، مسیر انتشار، و شرایط ساختگاهی وجود دارد: (۱) روش مستقیم که تمامی اجزاء سیستم از گسل تا سازه، هم‌زمان با هم در یک مدل شبیه‌سازی می‌شوند. (۲) روش هیبرید است، که دو مرحله‌ی است. در مرحله‌ی اول، با حذف سازه و آثار ساختگاهی، حرکت‌های زمین محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی دوم، سازه و دامنه‌ی کوچکی از محیط اطراف با دقت مدل‌سازی و تحت نیروهای معادل به‌دست آمده از مرحله‌ی اول تحلیل می‌شوند.

روش پیشنهادی در نوشتار حاضر، برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن با شبیه‌سازی زلزله که در آن آثار منبع لرزه‌ی (گسل)، مسیر انتشار و شرایط ساختگاهی مشاهده می‌شود، بر مبنای استفاده از ایده‌ی روش کاهش دامنه است. این روش به صورت هیبرید از ترکیب روش عدد موج گسسته و اجزاء محدود و شامل دو مرحله است. برای شبیه‌سازی زلزله به روش عدد موج گسسته^{۱۳} از نرم‌افزار اکسیترا^{۱۴} استفاده شده است. نرم‌افزار اکسیترا توسط الیور کتانت^{۱۵} به زبان فورترن نوشته شده است و به صورت گسترده توسط لرزه‌شناسان برای مدل‌سازی میدان موج لرزه‌ی استفاده می‌شود. در نرم‌افزار اکسیترا، تابع گرین با استفاده از روش نیمه تحلیلی انعکاس^{۱۶} محاسبه و سپس با استفاده از قضیه‌ی معرف^{۱۷} برای هر منبع لرزه‌ی با مکانیسم‌های دلخواه، لرزه‌نگاشت محاسبه می‌شود.

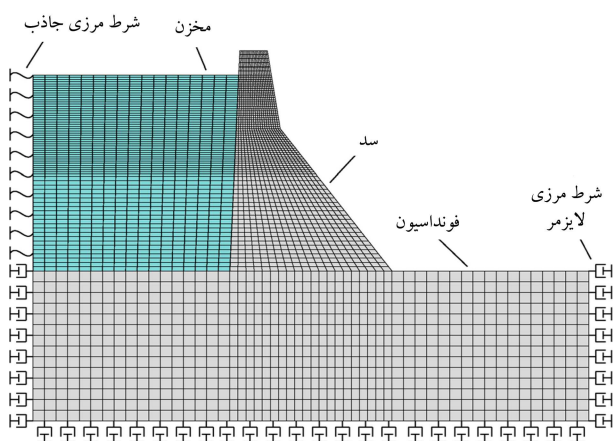
روند اعمال زلزله و تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل در روش پیشنهادی در دو مرحله به این صورت بوده است: در مرحله‌ی اول، با استفاده از روش عدد موج گسسته و نرم‌افزار اکسیترا و در نظر گرفتن مشخصات هندسی گسل، تابع لغزش روی گسل و مشخصات محیط انتشار، پاسخ محیط نیم‌بی‌نهایت در شرایط سطح آزاد (بدون حضور سد و مخزن) در گره‌های لایه‌ی روش کاهش دامنه تحت سناریوی تعریف شده برای زلزله محاسبه شده است. در ادامه، با استفاده از کد متلب توسعه داده شده، ماتریس‌های سختی، جرم، و میرایی مدل سد - فونداسیون - مخزن به‌دست آمده و نیروهای متمرکز معادل زلزله‌ی شبیه‌سازی شده در نقاط گره‌ی لایه‌ی روش کاهش دامنه طبق روابط سد - فونداسیون - مخزن به روش اجزاء محدود تحت اعمال نیروهای مؤثر (معادل تحریک گسل طبق سناریوی مدنظر) به صورت نیروهای متمرکز دینامیکی با در نظر گرفتن تمام اندرکنش‌ها و الزامات مرتبط در نرم‌افزار آباکوس تحلیل شده است. در این حالت بخش کوچکی از فونداسیون مجاور سد مدل و سپس گسل و ناحیه‌ی دور از مدل‌سازی حذف شده‌اند.

۵. حل عددی

در نوشتار حاضر، با استفاده از روش پیشنهادی هیبریدی و روش مرسوم فونداسیون بدون جرم به تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل تحت سناریوی مشخص زلزله پرداخته شده است. در این راستا و به منظور بررسی کارایی روش ذکر شده، سد

بتنی وزنی کوینا در هند به عنوان مطالعه‌ی موردی برای تحلیل انتخاب شده است. زلزله‌ی که در دسامبر ۱۹۶۷، چهار سال پس از اتمام ساخت سد اتفاق افتاده است، باعث آسیب به سد شده و مهندسان را مجبور به ارزیابی مجدد سد کرده است.^[۳۷] مدل اجزاء محدود سیستم سد - مخزن - فونداسیون در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. سد و فونداسیون با استفاده از المان‌های ۴ گره‌ی CPS۴R و مخزن با استفاده از المان‌های AC۲D۴ آکوستیک مدل شده‌اند.

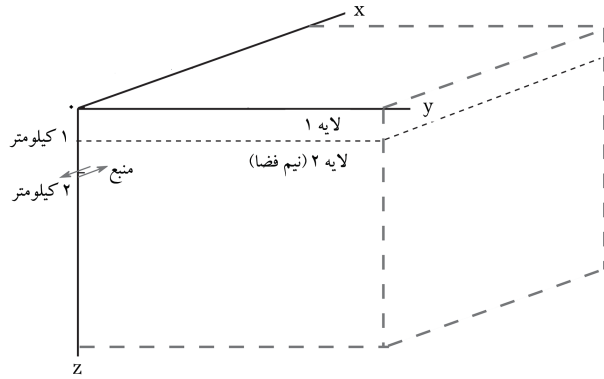
برای مصالح سد، بتن با مدول کشسانی ۳۰ گیگاپاسکال، چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و ضریب پواسون ۰/۲؛ برای فونداسیون، سنگ با مدول کشسانی ۲۷/۷ گیگاپاسکال، چگالی ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و ضریب پواسون ۰/۳۳؛ و برای مخزن، آب با مدول بالک ۲/۰۷ گیگاپاسکال و چگالی ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی انتهای دور مخزن به صورت غیر بازگشتی صفحه‌ی مدل شده است، تا از بازتاب موج‌های رسیده به مرز ذکر شده جلوگیری کند. اندرکنش بین قسمت‌های مختلف سیستم کوبله نیز در مدل‌سازی لحاظ شده است. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین قسمت‌های مختلف سیستم سد - فونداسیون - مخزن از روش کوبله‌سازی براساس سطح با استفاده از قید گره^{۱۸} در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است که در آن، دو سطح اصلی و پیرو (مرز مشترک بین دو محیط) به هم گره زده می‌شوند و تغییر شکل‌های سطح پیرو، مانند سطح اصلی خواهند بود. با استفاده از قید گره، انتقال انرژی و مومنتوم بین دو محیط از طریق مرز مشترک بین آن‌ها صورت می‌گیرد و اندرکنش بین دو محیط (سیال - سد) - فونداسیون و فونداسیون - سیال) در نظر گرفته می‌شود. تفاوت تحلیل در دو روش پیشنهادی و روش مرسوم فونداسیون بدون جرم در مدل‌سازی فونداسیون، نحوه‌ی اعمال رکورد زلزله و شرایط مرزی ناحیه‌ی دور است. در روش پیشنهادی، مدل‌سازی فونداسیون جرم‌دار بی‌نهایت با در نظر گرفتن میرایی تشعشعی و آثار انتشار موج لرزه‌ی صورت گرفته و زلزله به صورت نیروهای متمرکز مؤثر (معادل تحریک گسل طبق سناریوی مدنظر) در لایه‌ی روش کاهش دامنه اعمال شده است. به‌منظور جذب امواج برگشتی در فونداسیون جرم‌دار از شرط مرزی لایزر در مرزهای بریده‌شده استفاده شده است. در روش مرسوم فونداسیون بدون جرم، از جرم فونداسیون صرف‌نظر می‌شود. زلزله‌ی سطح آزاد در گره‌های مرزهای بریده‌شده فونداسیون نیز به صورت تاریخچه‌ی زمانی شتاب اعمال می‌شود. در روش مذکور به دلیل صرف‌نظر کردن از آثار اینرسی و انتشار موج در فونداسیون، مرزهای بریده‌شده در راستای قائم مقید می‌شوند.



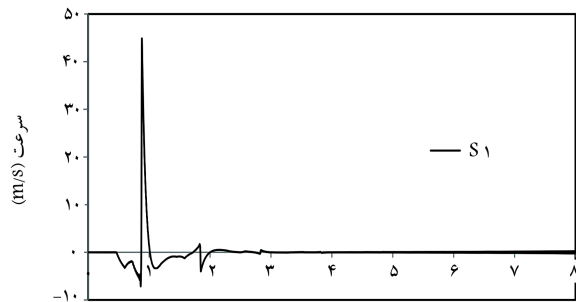
شکل ۱۰. مش‌بندی و شرایط مرزی مدل اجزاء محدود سیستم سد - فونداسیون - مخزن.^[۳۵]

جدول ۲. ایستگاه‌های رؤیت لرزه.

شماره ایستگاه	X (m)	Y (m)	Z (m)
۱	۰	۱۰۰۰	۰
۲	۰	۵۰۰۰	۰
۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰

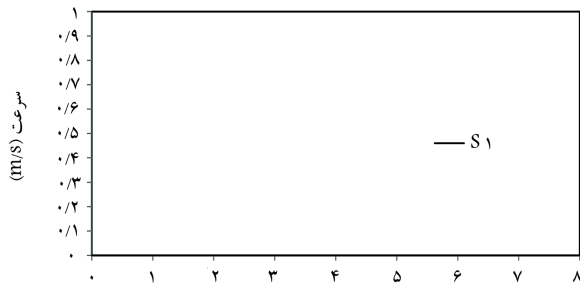


شکل ۱۲. شکل شماتیک مدل LOH.1 [۳۸]



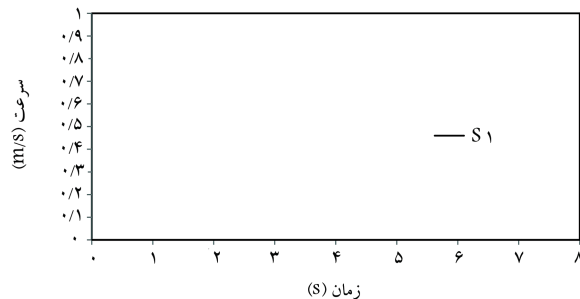
زمان (S)

الف) مولفه ی X



زمان (S)

ب) مولفه ی Y



زمان (S)

پ) مولفه ی Z

شکل ۱۳. نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه شماره ۱ یک.

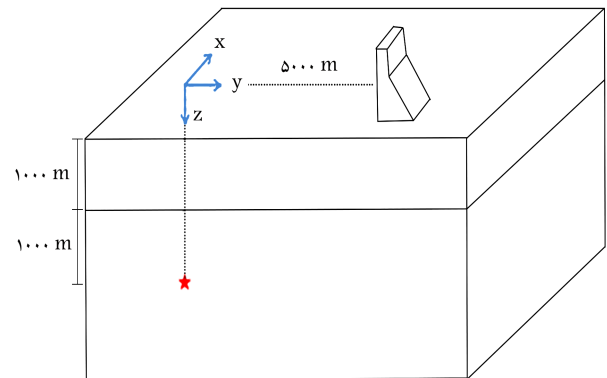
۶. تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل تحت

سناریوی مشخص زلزله

در شکل ۱۱، سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل استفاده شده در تحلیل تحت سناریوی مشخص زلزله مشاهده می‌شود. برای این منظور، براساس یک سناریوی مشخص، شبیه‌سازی یک زلزله صورت گرفته و در ادامه، سیستم سد - فونداسیون - مخزن تحت زلزله ذکر شده تحلیل شده است.

۱.۶. شبیه‌سازی زلزله

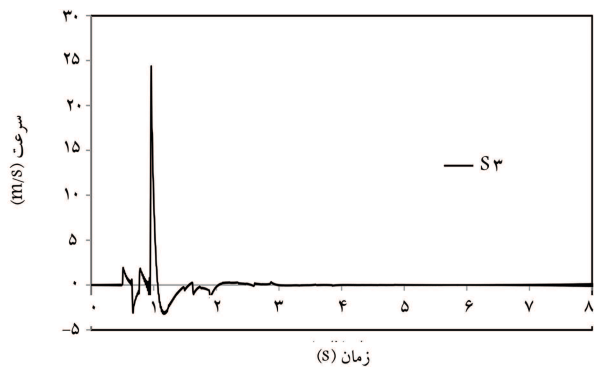
مدل استفاده شده در بخش حاضر، مدل ۱ از گزارش مرکز پیر^{۱۹} با عنوان «سنجش کدهای سه‌بعدی الاستودینامیک» است. [۳۸] مدل LOH.1 از دو لایه تشکیل شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. چشمه لرزه‌زا در عمق ۲۰۰۰ متری قرار گرفته است. در شکل ۱۲، هندسه مدل LOH.1 مشاهده می‌شود. چشمه لرزه‌زا به صورت نقطه‌یی با $M_0 = 10^{18} Nm$ و $\lambda = 0$, $\delta = 90$, $\phi_s = 0$ و تابع زمانی منبع لرزه‌یی به صورت $T = 0.1 M_0 (1 - (1 + \frac{t}{T}) \exp(-\frac{t}{T}))$ در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، پالس سرعت در ابتدای تاریخچه‌ی زمانی سرعت مشاهده می‌شود که با توجه به قرارگیری ایستگاه‌های رؤیت زلزله در حوزه‌ی نزدیک گسل، مورد انتظار است. معمولاً زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل، خصوصیات از قبیل: دوره‌ی تناوب بلند، مدت زمان مؤثر کوتاه و دامنه‌ی پالس بزرگ در تاریخچه‌ی زمانی خود دارند. ویژگی‌های خاص زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل، مستقیماً به مکانیسم شکست، جهت گسیختگی نسبت به ساختگاه و جهت لغزش روی گسل بستگی دارند. پالس‌های بزرگ با دوره‌ی تناوب بلند در نزدیک گسل،



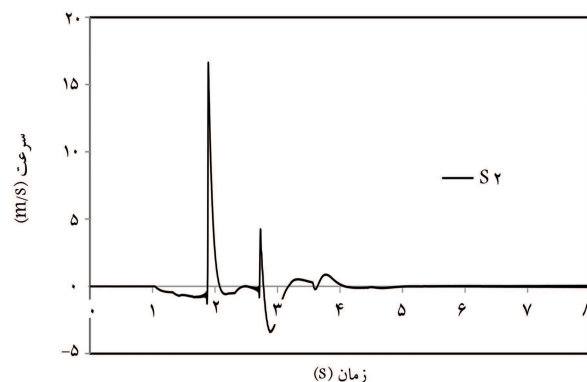
شکل ۱۱. شکل شماتیک سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل.

جدول ۱. مشخصات محیط مدل LOH.1.

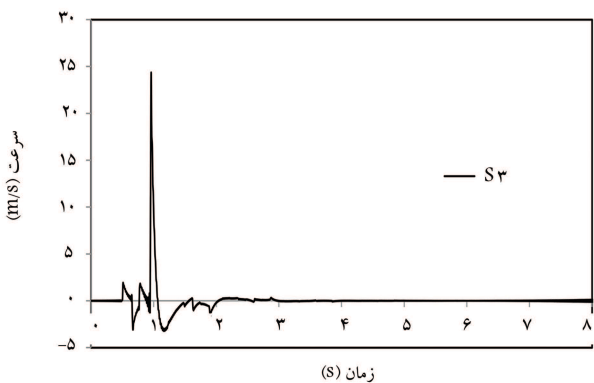
شماره لایه	۱	۲
ضخامت لایه (متر)	۱۰۰۰	بی‌نهایت
سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	۴۰۰۰	۶۰۰۰
سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	۲۰۰۰	۳۴۶۴
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۶۰۰	۲۷۰۰
Q _P	بی‌نهایت	بی‌نهایت
Q _S	بی‌نهایت	بی‌نهایت



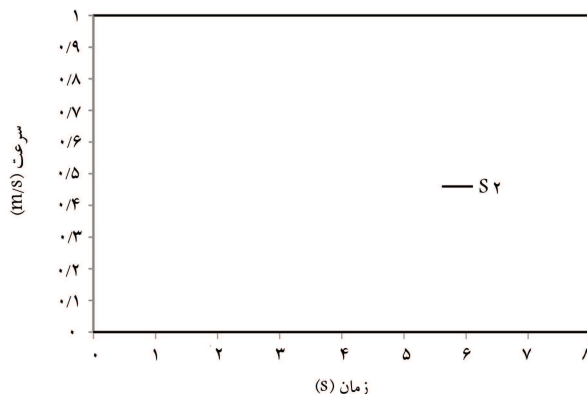
الف) مولفه ی X



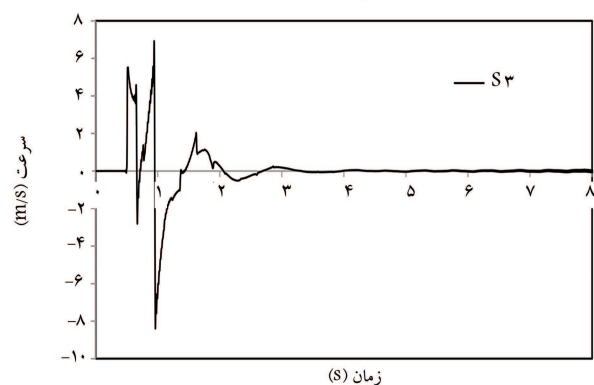
الف) مولفه ی X



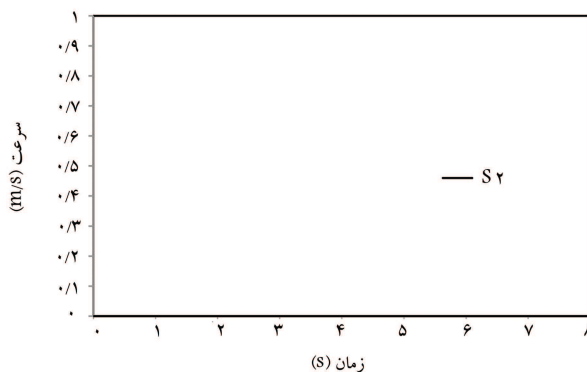
ب) مولفه ی Y



ب) مولفه ی Y



پ) مولفه ی Z



پ) مولفه ی Z

شکل ۱۵. نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه شماره ی سه.

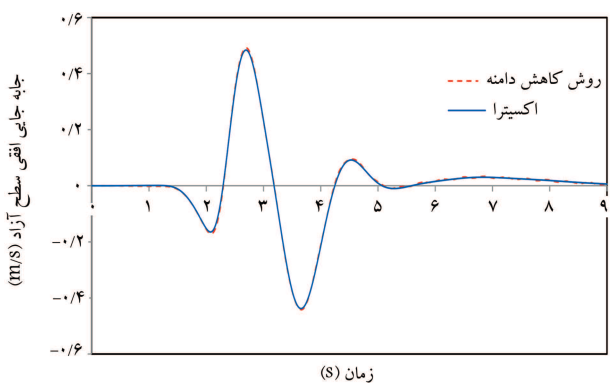
شکل ۱۴. نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه شماره ی دو.

عمدتاً ناشی از اثر جهت‌داری گسلش و اثر جابه‌جایی ماندگار زمین است. [۳۹، ۴۰]

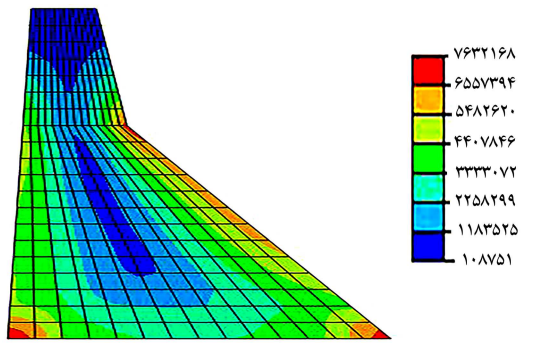
۲.۶. راستی‌آزمایی روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی زلزله

در بخش کنونی، روش پیشنهادی ارائه شده برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل راستی‌آزمایی شده است. برای این منظور، نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه شماره ی دو با نرم‌افزار اکسیترا با نتایج روش اجزاء محدود (به کمک روش کاهش دامنه در شرایط سطح آزاد) مقایسه شده است. این نتایج در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است نتایج برای بسامدهای بالای ۱ هرتز فیلتر شده است.

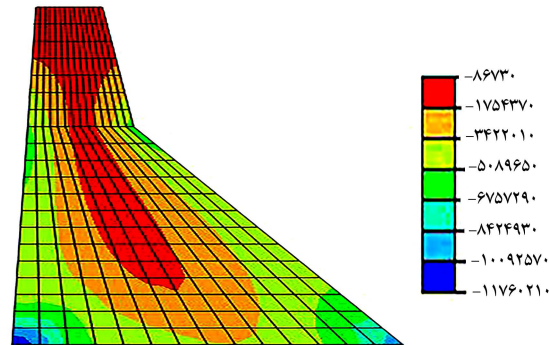
مطابق شکل ۱۶، نتایج دو روش تطابق خوبی با هم دارند و روش پیشنهادی هیبرید مبتنی بر روش کاهش دامنه، پاسخ محیط سطح آزاد را با دقت نزدیک به



شکل ۱۶. مقایسه‌ی نتایج ایستگاه شماره ی دو با استفاده از نرم‌افزار اکسیترا و روش اجزاء محدود.

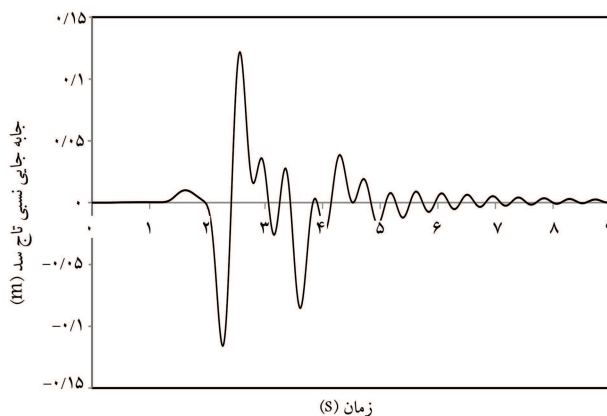


الف) بیشینه



ب) کمینه

شکل ۱۸. پوش کانتور تنش اصلی در حالت سد - فونداسیون با روش پیشنهادی.



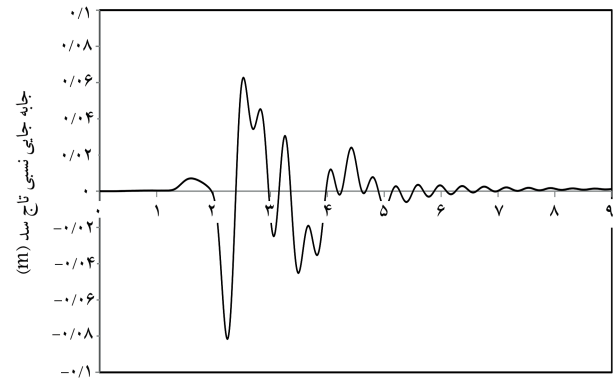
زمان (s)

شکل ۱۹. جابه‌جایی نسبی تاج سد در حالت سد - فونداسیون - مخزن با روش پیشنهادی.

بدون جرم به همراه نتایج تحلیل به روش پیشنهادی در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش مرسوم فونداسیون بدون جرم، پاسخ سیستم را بیشتر از روش پیشنهادی تخمین می‌زند. این برآورد محافظه‌کارانه به دلیل نادیده گرفتن مکانیسم‌های میرایی، شامل میرایی تشعشعی و انتشار موج در محیط فونداسیون است که در روش پیشنهادی موارد مذکور در مدل‌سازی لحاظ شده است.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، روش هیبرید عدد موج گسسته و اجزاء محدود بر مبنای روش کاهش دامنه برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل براساس یک سناریوی مشخص زلزله ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی



زمان (s)

شکل ۱۷. جابه‌جایی نسبی تاج سد در حالت سد - فونداسیون با روش پیشنهادی.

دقت روش عدد موج گسسته (نرم‌افزار اکسیترا) محاسبه کرده است. لذا می‌توان از روش هیبرید پیشنهادی برای حل مسئله پیچیده سد - فونداسیون - مخزن - گسل استفاده کرد. در روش اخیر، آثار گسل و مسیر انتشار موج لرزه‌یی با دقت بالا در مرحله اول با روش‌های مناسب شبیه‌سازی زلزله در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم، نیز از قابلیت بالای روش اجزاء محدود برای تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن استفاده شده است.

۳.۶. نتایج تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل

تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل به روش مستقیم، نیازمند مدل‌سازی کل محیط به صورت یک‌جا به روش اجزاء محدود است که با توجه به ابعاد محیط زمین و محل قرارگیری گسل (عمق ۲ کیلومتری) و اختلاف ابعاد مش برای ناحیه‌ی نزدیک (سد، مخزن و فونداسیون) و ناحیه‌ی دور (گسل و مسیر انتشار)، به دلیل اختلاف سرعت انتشار موج و دقت لازم برای دو ناحیه‌ی اخیر، نیازمند صرف هزینه‌ی محاسباتی بالایی است. روش پیشنهادی که در بخش‌های قبلی راستی‌آزمایی شده است، امکان حل مسئله‌ی بزرگ‌مقیاس ذکر شده را با هزینه‌ی محاسباتی معقول فراهم ساخته است. در بخش حاضر، نتایج تحلیل سیستم اشاره شده تحت سناریوی زلزله‌ی بخش قبل ارائه شده است. همچنین مسئله‌ی حاضر، با فرض ساده شده‌ی مرسوم، فونداسیون بدون جرم نیز تحلیل شده است. در نهایت، نتایج آن با روش پیشنهادی که نزدیک به واقعیت است، مقایسه شده است. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی تاج سد برای حالت سد - فونداسیون با روش پیشنهادی در شکل ۱۷ و کانتور پوش تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در بدنه‌ی سد با روش پیشنهادی نیز در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی تاج سد با در نظر گرفتن آثار اندرکنش سیال - سازه در حالت سد - مخزن - فونداسیون با روش پیشنهادی در شکل ۱۹ و کانتور پوش تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در بدنه‌ی سد با روش پیشنهادی نیز در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود.

نتایج شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ نشان می‌دهد که اندرکنش سیال - سازه، تأثیر قابل توجهی در پاسخ سد دارد. اندرکنش سیال - سازه باعث افزایش بیشینه‌ی تنش کششی بدنه و جابه‌جایی نسبی تاج سد از مقدار ۷/۶ مگاپاسکال و ۸ سانتی‌متر به ترتیب در حالت مخزن خالی به مقدار ۱۳ مگاپاسکال و ۱۳ سانتی‌متر در حالت مخزن پر شده است که به علت اعمال نیروی هیدرونیامیک اضافی به بدنه‌ی سد در هنگام زلزله است. نتایج تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن با فرض فونداسیون

جدول ۳. نتایج تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن با دو روش پیشنهادی و فونداسیون بدون جرم.

بیشینه‌ی		مدل و روش تحلیل
تنش کششی (مگاپاسکال)	جابه‌جایی نسبی تاج سد (سانتی‌متر)	
۷/۶	۸	سد - فونداسیون (روش پیشنهادی)
۱۳	۱۳	سد - فونداسیون - مخزن (روش پیشنهادی)
۱۶/۶	۱۴	سد - فونداسیون - مخزن (روش فونداسیون بدون جرم)

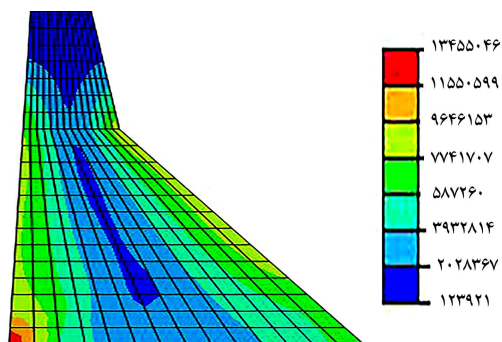
که نشان می‌دهد از روش کاهش دامنه می‌توان برای مدل‌سازی فونداسیون نیم‌بی‌نهایت جرم‌دار استفاده کرد و چالش‌های مدل‌سازی ذکر شده در روش اجزاء محدود، از جمله محدودیت اعمال هم‌زمان رکورد زلزله با شرایط مرزی جاذب را حل کرد.

۲. تطابق قابل قبول نتایج حاصل از روش پیشنهادی مبتنی بر روش کاهش دامنه با نتایج روش عدد موج گسسته (نرم‌فزار اکسیترا) برای سناریوی دلخواه زلزله، کارایی و قابلیت روش پیشنهادی را برای مدل‌سازی آثار گسل و مسیر انتشار در مسئله‌ی بزرگ‌مقیاس پیچیده‌ی سد - فونداسیون - مخزن - گسل را تأیید می‌کند.

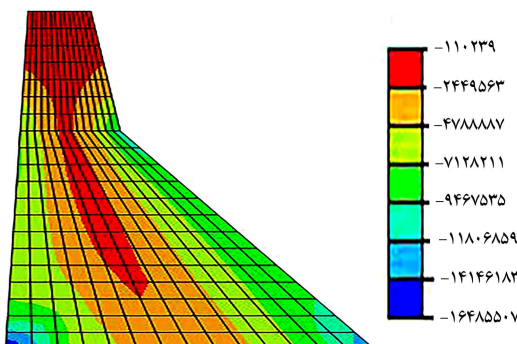
۳. مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با روش مرسوم فونداسیون بدون جرم، ضمن تأیید کارایی روش پیشنهادی برای مدل‌سازی صحیح فونداسیون جرم‌دار، حاکی از تخمین بالا و محافظه‌کارانه‌ی روش فونداسیون بدون جرم نیز است. زیرا در روش پیشنهادی با صرف‌نظر کردن از جرم فونداسیون، آثار انتشار موج و میرایی تشعشعی به عنوان منابع میرایی و اتلاف‌کننده‌ی انرژی زلزله نادیده گرفته می‌شود. به‌گونه‌ی که در نظر گرفتن جرم فونداسیون در مطالعه‌ی حاضر، بیشینه‌ی تنش کششی بدنه و جابه‌جایی نسبی تاج سد را به ترتیب به میزان ۲۲ و ۷ درصد نسبت به حالت فونداسیون بدون جرم کاهش داده است.

۴. مقایسه‌ی نتایج مربوط به حالت مخزن پر و خالی، حاکی از اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش سازه - سیال و تأثیر قابل توجه آن در پاسخ سد دارد؛ به این دلیل که سیال پشت سد در هنگام زلزله، نیروی هیدرودینامیکی اضافی بر بدنه‌ی سد اعمال می‌کند و باعث افزایش پاسخ سد می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، افزایش پاسخ سد در تنش کششی بیشینه‌ی بدنه و جابه‌جایی نسبی تاج سد به ترتیب برابر ۷۰ و ۶۲ درصد بوده است.

۵. روش پیشنهادی در نوشتار حاضر و نتایج حاصل، جزء اولین تلاش‌ها برای مدل‌سازی شرایط واقعی مسئله‌ی بزرگ‌مقیاس تحلیل سد - فونداسیون - مخزن - گسل است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند با هزینه‌ی محاسباتی معقول و با ترکیب روش‌های محاسباتی و عددی مناسب، آثار گسل و مسیر انتشار موج را در تحلیل سدها در نظر بگیرد و لازم است در مطالعات آینده به مطالعه‌ی سناریوهای پیچیده، شرایط واقعی توپوگرافی و رفتارهای غیرخطی پرداخته شود.



الف) بیشینه؛



ب) کمینه.

شکل ۲۰. پوش کانتور تنش اصلی در حالت سد - فونداسیون - مخزن با روش پیشنهادی (پاسکال).

سناریوی دلخواه، زلزله‌ی با استفاده از روش عدد موج گسسته در سه ایستگاه منتخب شبیه‌سازی و برای یکی از ایستگاه‌ها، نتایج با روش عددی اجزاء محدود راستی‌آزمایی شده است. در ادامه، مسئله‌ی بزرگ‌مقیاس تحلیل سیستم سد - فونداسیون - مخزن - گسل تحت سناریوی دلخواه، زلزله‌ی با روش پیشنهادی و روش مرسوم فونداسیون بدون جرم تحلیل و پاسخ سد در حالت‌های مختلف ارائه شده است. براساس تحلیل‌های انجام شده، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. نتایج تحلیل راستی‌آزمایی اعمال روش کاهش دامنه در نرم‌فزار آباکوس، تطابق خوبی با نتایج روابط تحلیلی انتشار موج در محیط نیم‌بی‌نهایت داشته است،

پانویس‌ها

1. finite element method
2. boundary element method
3. Maeso & Dominguez

4. Tan & Chopra
5. Chopra
6. domain reduction method
7. Herrera & Bielak
8. Bielak

9. Christiano
10. Cremonini
11. Loukakis
12. Yoshimura et al
13. Discrete Wave-Number method
14. Axitra
15. Olivier Coutant
16. reflectivity method
17. representation theorem
18. tie
19. Peer

منابع (References)

1. Westergaard, H.M. "Water pressure on dams during earthquakes", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, **98**(2), pp. 418-433 (1931).
2. 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).
3. Fenves, G. and Chopra, A.K. "Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams", *Journal of Structural Engineering*, **113**(8), pp. 1688-1708 (1987).
4. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Staggered solution schemes for dam-reservoir interaction", *Journal of Fluids and Structures*, **12**(7), pp. 933-948 (1998).
5. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction", *Engineering Structures*, **21**(4), pp. 306-315 (1999).
6. Aghajanzadeh, M. and Ghaemian, M. "Nonlinear dynamic analysis of a concrete gravity dam considering an elastoplastic constitutive model for the foundation", *Scientia Iranica*, **20**(6), pp. 1676-1684 (2013).
7. Mirzabozorg, H. and Ghaemian, M. "Non linear behavior of mass concrete in three dimensional problems using a smeared crack approach", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34**(3), pp. 247-269 (2005).
8. Alembagheri, M. and Ghaemian, M. "Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(1), pp. 123-144 (2013).
9. Nikravesh Sendi, H. and Sohrabi Gilani, M. "The investigation of dam foundation interaction considering the effect of foundation mass", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(1.1), pp. 61-69 (in Persian) (2021).
10. Orlando, M. and Dominguez. "Earthquake analysis of arch dams. I: Dam-foundation interaction", *Journal of Engineering Mechanics*, **119**(3), pp. 496-512 (1993).
11. Tan, H. and Chopra, A.K. "Dam-foundation rock interaction effects in frequency-response functions of arch dams", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **24**(11), pp. 1475-1489 (1995).
12. Lotfi, V. "Direct frequency domain analysis of concrete arch dams based on FE-BE procedure", *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, **26**(4), pp. 363-376 (2007).
13. Lokke, A. and Chopra, A.K. "Direct finite element method for nonlinear analysis of semi-unbounded dam-water-foundation rock systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **46**(8), pp. 1267-1285 (2017).
14. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **95**(4), pp. 859-878 (1969).
15. Givoli, D. "High-order local non-reflecting boundary conditions: A review", *Wave Motion*, **39**(4) pp. 319-326 (2004).
16. Basu, U. and Chopra, A.K. "Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **59**(8), pp. 1039-1074 (2004).
17. Bettess, P. "Infinite elements", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **11**(1), pp. 53-64 (1977).
18. Zienkiewicz, O.C., Bicanic, N. and Shen, F.Q. "Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions", *Advances in Computational Nonlinear Mechanics*, pp. 109-138, Springer Vienna (1989).
19. Chopra, A.K. "Earthquake analysis of arch dams: Factors to be considered", *Journal of Structural Engineering*, **138**(2), pp. 205-214 (2012).
20. 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).
21. Mohammadnezhad, H., Ghaemian, M. and Noorzad, A. "Seismic analysis of dam-foundation-reservoir system including the effects of foundation mass and radiation damping", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **18**(1), pp. 203-218 (2019).
22. Zafarani, H.; Noorzad, A.; Ansari, A. and et al. "Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(4), pp. 722-741 (2009).
23. Zafarani, H. and Soghrat, M. "Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(5), pp. 2031-2045 (2012).
24. Ichimura, T. and Hori, M. "Strong ground motion prediction using macro-micro analysis method", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(4), pp. 395-417 (2006).
25. Taborda, R. and Bielak, J. "Large-scale earthquake simulation: computational seismology and complex engineering systems", *Computing in Science & Engineering*, **13**(4), pp. 14-27 (2011).
26. Herrera, I. and Bielak, J. "Soil-structure interaction as a diffraction problem", *In Proceedings of the 6th World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India, **2**, pp. 1467-1472 (1977).
27. Bielak, J. and Christiano, P. "On the effective seismic input for non-linear soil-structure interaction systems", *Earthquake Engineering & Sstructural Dynamics*, **12**(1), pp. 107-119 (1984).

28. Cremonini, M.G., Christiano, P. and Bielak, J. "Implementation of effective seismic input for soil-structure interaction systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16**(4), pp. 615-625 (1988).
29. Loukakis, K. and Bielak, J. "Seismic response of two-dimensional sediment-filled valleys to oblique incident SV-waves calculated by the finite element method", *In Proceeding of the 5th US National Conference on Earthquake Engineering*, pp. 10-14 (1994).
30. 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).
31. Yoshimura, C., Bielak, J., Hisada, Y. "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).
32. Yoshimura, C., Bielak, J., Hisada, Y. and et al. "Assessment of foundation mass and earthquake input mechanism effect on dam-reservoir-foundation system response", *International Journal of Civil Engineering*, **17**(4), pp. 473-480 (2019).
33. 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).
34. Mohammadnezhad, H., Zafarani, H. and Ghaemian, M. "Domain reduction method for seismic analysis of dam-foundation-fault system", *Scientia Iranica*, **26**(1), pp. 145-156 (2019).
35. Daneshyar, A., Mohammadnezhad, H. and Ghaemian, M. "Effect of seismic wave propagation in massed medium on rate-dependent anisotropic damage growth in concrete gravity dams", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **15**, pp. 346-363 (2021).
36. Coutant, O. "Program of numerical simulation AXITRA", Res. Rep LGIT, Grenoble (in French) (1989).
37. Chopra, A.K. and Chakrabarti, P. "The Koyna earthquake and the damage to Koyna dam", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**(2), pp. 381-397 (1973).
38. Day, S.M. "Tests of 3D elastodynamics codes, LIFELINES program task 1A01", Final Report to Pacific Earthquake Engineering Research Center Sept. 10, 2001). Coordinated by SM Day, San Diego State University (2001).
39. Huang, J. "Earthquake damage analysis of concrete gravity dams: Modeling and behavior under near-fault seismic excitations", *Journal of Earthquake Engineering*, **19**(7), pp. 1037-1085 (2015).
40. Jabbari, S.Y., Taghipour, R. and Bozorgnasab, M. "The Effect of the Near-Fault velocity pulse type ground motions on the response of concrete arch dams (Case Study)", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **5**(2), pp. 61-72 (in Persian) (2018).