

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

مخازن آب به عنوان سازه‌های حیاتی نقش مهمی در تأمین آب آشامیدنی و ایمنی پس از زلزله دارند. لذا بررسی و درک رفتار این سازه‌ها در برابر بار زلزله به منظور طراحی دقیق این سازه‌ها در نزد مهندسیین پر اهمیت است. استفاده از مدل‌سازی‌های عددی برای حل این گونه مسائل کاربرد فراوان دارد. علیرغم دقت بالای روش‌هایی نظیر روش اجزای محدود، این روش‌ها هزینه‌ی محاسباتی بالایی را به کاربران تحمیل می‌کنند. در واقع یکی از چالش‌های اساسی در حل مسائل مربوط به رفتار ارتعاشی مخازن در برابر زلزله، هزینه‌ی بالای محاسبات آن است. در این مقاله از روشی تحت عنوان روش حل اساسی با فرمول‌بندی فشار برای تحلیل این دسته از مسائل استفاده شده است. روش استفاده شده در این مقاله به مراتب هزینه‌ی محاسباتی کمتری از روش اجزای محدود دارد. از دیگر خصوصیات این روش، امکان بزرگ کردن گام زمانی حل آن در محاسبات است. بدین منظور از تبدیل موجک گسسته که در سال‌های اخیر به عنوان روشی مناسب برای کاهش نمونه‌برداری امواج گسسته پیشنهاد شده، استفاده می‌شود. این بدان معناست که در این روش می‌توان در مخازنی با ابعاد واقعی بعضاً گام زمانی حل را با دقتی قابل قبول تا ۰/۱۶ ثانیه نیز در نظر گرفت. بدین منظور ابتدا روش ارائه شده برای نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی می‌شود و سپس سازه‌ی یک مخزن با ابعاد واقعی تحت بار ۱۰ رکورد زلزله تحلیل می‌گردد. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند هزینه‌ی محاسبات را با دقت مناسب در بعضی از رکوردهای زلزله تا بیش از ۹۰ درصد کاهش دهد.

واژگان کلیدی: تحلیل دینامیکی، روش حل اساسی، تئوری موجک، کاهش نمونه‌برداری، مخازن آب.

استفاده از روش حل اساسی و تبدیل موجک گسسته به منظور کاهش هزینه‌ی محاسبات در تحلیل مخازن آب مستطیلی تحت اثر بارگذاری زلزله

نوراله مجیدی

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

سید مهدی زندی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، s.m.zandi@eng.ui.ac.ir

حسین تاجمیر ریاحی

دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۱- مقدمه

مخازن ذخیره‌ی آب و سیالات به عنوان سازه‌هایی حیاتی شناخته می‌شوند که نقش مهمی در تأمین آب آشامیدنی و یا ایمنی بعد از زلزله دارند. بررسی پاسخ سیال درون این مخازن در برابر ارتعاشات از مسائل مهم در مهندسی است. همچنین شناخت رفتار این مخازن در برابر ارتعاشاتی مانند زلزله بسیار حائز اهمیت است. به عبارت دیگر شناخت رفتار این مخازن در هنگام وقوع زلزله می‌تواند ایمنی این مخازن را بالا ببرد. به منظور مدل‌سازی عددی این مخازن، مسائل پیچیده‌ای چون اندرکنش سازه و سیال با روش‌هایی مانند اجزای محدود، تفاضل محدود، اجزای مرزی

و بدون شبکه حل یا توسعه داده شده‌اند [۱-۳]. در گذشته مخازن ذخیره‌سازی سیالات در اثر وقوع زلزله آسیب‌های جدی دیده‌اند. به عنوان مثال در سال ۱۹۳۳ و در زلزله‌ی لانگ‌بیچ به دلیل پدیده لمبرزدگی، مخازن آب آسیب‌های جبران‌ناپذیری دیدند. همچنین زلزله‌های سال ۱۹۵۲ کالیفرنیا و سال ۱۹۶۰ شیلی نیز باعث آسیب‌های جدی به مخازن نفت شد. همچنین در اثر زلزله‌ی ۱۹۶۴ آلاسکا نیز بسیاری از مخازن نفت آتش گرفتند [۴]. در اثر زلزله‌ی سیلاخور در سال ۲۰۰۶ در غرب ایران، چندین مخزن استوانه‌ای حرکت قوی زمین را تجربه

محدود، حرکت سیال را در برابر ارتعاشات هارمونیک و زلزله‌ها بررسی کردند. هاسکینز و یاکوبسن [۱۷] به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی برای مخازن مستطیلی صلب تحت تحریک زلزله افقی، روابطی را ارائه داده‌اند. یانگ [۱۸] توزیع فشار هیدرودینامیکی سیال در مخزنی با دیواره‌های انعطاف‌پذیر را بررسی کرد. او توانست با استفاده از روش رابلی-ریتر، جابه‌جایی نسبی دیواره مخزن را در اثر فشارهای هیدرودینامیکی محاسبه کند. کیانوش و چن [۱۹] برای محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیکی از روش جرم افزوده و حل تکراری در فضای دو بعدی بهره بردند. محققان زیادی برای بررسی پدیده‌ی لمبرزگی در مخازن حاوی سیال تحت ارتعاش زلزله مطالعه انجام داده‌اند. ولتسوس [۲۰] بر روی پاسخ لرزه‌ای مخازن سیال تحت ارتعاشات افقی بر روی فونداسیون‌های صلب و الاستیک مطالعه انجام دادند. وو و همکاران [۲۱] پدیده‌ی لمبرزگی را با استفاده از روش تحلیلی و در نظر گرفتن ویسکوزیته بررسی کردند. استکانچی و عالم باقری [۲۲] برای بررسی این پدیده از روش زمان دوام استفاده کردند. کنستانتین و همکاران [۲۳] به بررسی میرایی ایجاد شده در اثر لمبرزگی عمودی در سازه‌های تک‌درجه آزادی پرداختند. جمشیدی و همکاران [۲۴] یک مدل جدید ریاضی برای مدل‌سازی پدیده‌ی لمبرزگی در مخزن‌های سه‌بعدی ارائه نمودند. در این مقاله، معادلات از روش المان مرزی با معادلات پتانسیل کوپل شد. هوانگ و همکاران [۲۵] در یک مطالعه به تحلیل و مدل‌سازی غیرخطی پدیده‌ی لمبرزگی در حوزه‌ی زمان پرداختند.

یکی از نکات قابل توجه در مسائل ارتعاشی سازه و سیال، مدل‌سازی تلاطم سطحی آب ناشی از ارتعاشات افقی شدید و دورانی مخزن است. این ارتعاشات باعث حرکت کاملاً غیرخطی آب مانند شکستن امواج، پرش هیدرولیکی، آشفستگی شدید و اندرکنش سازه و سیال غیرخطی می‌شود. روش هیدرودینامیک ذرات هموار که روشی بدون شبکه و لاگراژی است، می‌تواند مسائلی با جابه‌جایی بزرگ و دارای سطح آزاد را حل کند؛ بنابراین روش هیدرودینامیک ذرات در مکانیک سیالات

کردند و آسیب‌هایی جدی در طول زلزله دیدند. عشقی و رزاقی [۵] به بررسی پاسخ دو مخزن آسیب دیده تحت این زلزله پرداختند. یزدانیان و همکاران [۶] به بررسی میدانی آسیب مخازن تحت زلزله‌های سدان و لیک گراسمر در سال ۲۰۱۳ با بزرگای ۶/۵ ریشتر و زلزله‌ی کایکورا در سال ۲۰۱۶ با بزرگای ۷/۸ که در کشور نیوزلند رخ داده بود، پرداختند. در این مطالعه بیش از ۵۰۰ مخزن بررسی گردید و گزارش شد که زلزله‌ها بیش از ۶۰ درصد مخازن را دچار آسیب‌های جدی کرده بودند. زمین‌لرزه‌ی توهوکو در سال ۲۰۱۱ در کشور ژاپن باعث آسیب‌های جدید در مخازن موجود در سواحل اقیانوس آرام شد. زاما و همکاران [۷] در مورد آسیب مخازن تحت این زلزله مطالعه انجام دادند. زلزله‌ی ناپا در سال ۲۰۱۴ نیز منجر به آسیب مخازن در خلیج سانفرانسیسکو گردید [۸-۹]. مطالعات پس از زلزله در این منطقه نشان داد که مخازن استوانه‌ای ذخیره‌سازی دچار خرابی‌های شدید و کمانش موضعی در دیواره‌های مخزن شده بودند. کورکماز و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱ به ارزیابی ریسک مخازن صنعتی ترکیه تحت زلزله‌های مختلف پرداختند.

در تحلیل مخازن حاوی سیال دو پارامتر اساسی موجب ایجاد تنش می‌شود. این دو پارامتر شامل فشار هیدرودینامیکی و دامنه‌ی لمبرزگی است [۳، ۱۱-۱۲]. خرابی‌ها و خسارت‌های سنگین مخازن ناشی از زلزله، دانشمندان را ترغیب کرد که فشار هیدرودینامیکی مایع را در محاسبات خود در نظر بگیرند. روش‌های عددی برای به دست آوردن پاسخ مخازن حاوی سیال از گذشته تا به امروز در حال توسعه است. هاسنر [۱۳] یک مدل تحلیلی پرکاربرد برای مدل‌سازی فشار هیدرودینامیکی در اثر حرکت افقی زمین بر روی اجزای سازه ارائه کرد. هارون و تایل [۱۴] یک مدل اجزای محدود برای تحلیل و به دست آوردن پاسخ دینامیکی مخازن ارائه کردند. پارک و همکاران [۱۵] برای مطالعه‌ی پاسخ مخازن مستطیلی از روش المان‌های مرزی استفاده کردند. کیم و همکاران [۱۶] نیز بر روی روش‌های تحلیلی به دست آوردن پاسخ مخازن مستطیلی تحت تحریک‌های عمودی مطالعه کردند. چن و همکاران [۲] بر اساس یک رویکرد تفاضل

به‌خوبی نقاط تکین را دنبال کند. هدف این پژوهش، بررسی دینامیکی مخازن آب تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای به روش حل اساسی با استفاده از معادله پتانسیل فشار است. استفاده از معادلات فشار برای محاسبه مستقیم فشار نقاط به ساده‌سازی روند حل، کمک قابل توجهی می‌کند [۳۳]. زندگی و سرجویان [۳۴] در یک مطالعه از روش حل اساسی به همراه معادلات فشار برای تحلیل لاگرانژی مخازن استفاده کردند. در پژوهشی که توسط آنها انجام شد، ضمن تبیین دقیق روش و ارائه‌ی الگوریتمی برای انجام محاسبات عددی، نشان داده شد که نتایج به‌دست آمده از این روش به میزان زیادی با نتایج آزمایشگاهی تطبیق دارد. در این مقاله هدف کاهش هزینه‌ی محاسبات در روش حل اساسی است.

روش‌های عددی بررسی پاسخ سیال درون مخازن عموماً به‌صورت دینامیکی حل می‌شوند. این مسئله موجب تحمیل هزینه‌ی بالای محاسبات در طول روند حل می‌شود. روش‌های فراوانی در زمینه‌ی کاهش محاسبات در تحلیل‌های دینامیکی ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارتند از: ۱- روش‌هایی که در آن برای کاهش محاسبات یک روش عددی جدید برای حل معادلات ارتعاش ارائه می‌شود، ۲- روش‌هایی که در آن برای کاهش محاسبات از ساده‌سازی مدل استفاده می‌شود و ۳- روش‌هایی که برای کاهش محاسبات، گام زمانی اصلاح می‌گردد. در این مقاله در واقع از دسته‌ی اول و سوم استفاده شده است. در واقع آنچه در این مقاله دنبال می‌شود، استفاده از روش حل اساسی بر روی حرکت سیالات با استفاده از فرمول‌بندی فشار است که در آن می‌توان شرایط مرزی را به‌صورت ساده‌تری بیان کرد و با پوشش دادن نقاط منفرد در گوشه‌های مخزن با استفاده از توابع پایه لگاریتمی، هندسه سیال را در طول زمان حل به دست آورد. همچنین این روش، مخازن تحت تحریک‌های شدید مثل زلزله را به‌خوبی تحلیل می‌کند و از تکین شدن نقاط گوشه مخزن به علت ماهیت توابع پایه جلوگیری می‌کند. پس در گام یک این پژوهش با استفاده از روش حل اساسی که روشی عددی است،

به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال موناهان [۲۶] در سال ۱۹۹۴ با استفاده از این روش توانست در جریان‌های تراکم‌ناپذیری نظیر شکست سد، سطح آزاد آب را مدل‌سازی و حل کند. شاوو و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۲ طرح اصلاح شده روش هیدرودینامیک ذرات هموار را پیشنهاد دادند که با تصحیح چگالی و الگوریتم درون‌یابی کرنل، با دقت بالاتری، میدان فشار آب را به دست می‌آورد.

با در نظر گرفتن پدیده‌ی موج آب به‌عنوان یک جریان بالقوه در حرکت سیال با سطح آزاد، می‌توان با استفاده از معادله لاپلاس، سرعت و طرح زمان‌بندی لاگرانژی یک مدل دو بعدی سیال درون مخزن را تحلیل نمود. وو و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۶ از روش بدون شبکه‌ی توابع چندجمله‌ای محلی برای حل پتانسیل جریان‌های دارای سطح آزاد استفاده کردند. این روش قادر است بردار سرعت نقاط و توزیع فشار بر روی دامنه و مرزها را به‌صورت دقیق مورد محاسبه قرار دهد. خان احمدی و همکاران [۲۹] برای بررسی دیدگاه اوپلری و لاگرانژی در پاسخ سدهای وزنی از معادله حرکت دینامیکی استفاده کردند. آنها فرمول‌بندی لاگرانژی و اوپلری را با استفاده از مرجع [۳۰] استخراج کردند. مندل و میتی [۳۱] در سال ۲۰۱۶ با آنالیز غیرخطی اجزای محدود به تحلیل رفتار آب در مخزن مستطیلی پرداختند. در مقاله‌ی آن‌ها، فشار و جابه‌جایی به‌عنوان متغیر مستقل گره‌ای در معادلات کلی حاکم در نظر گرفته شده است. اما آنچه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، روشی تحت عنوان روش حل اساسی است [۳۲]. روش حل اساسی روشی بدون شبکه برای حل معادلات دیفرانسیل است. این روش به‌منظور برطرف کردن مشکلات المان مرزی توسعه داده شده است که در آن نقاط گره‌ای بر روی مرزها و متناظر با آن نقاط مرجع در بیرون از دامنه در نظر گرفته می‌شود و بر این اساس یک ترکیب جبری از یک سری توابع لگاریتمی پایه شعاعی در نظر گرفته می‌شود و ضرایب پایه از حل معادله‌ی کلی حاکم بر مسئله به دست آورده می‌شود. همچنین این روش نقاط تکین بر روی مرزها را به‌خوبی پوشش می‌دهد و می‌تواند

علاوه بر تحلیل سازه‌های چند درجه آزادی با استفاده از تبدیل موجک گسسته از روشی که تبدیل فوریه و موجک را با هم تلفیق می‌کرد، استفاده کردند. در این مطالعه نیز تبدیل موجک گسسته از عملکرد بهتری برخوردار بود. سلاجقه و حیدری [۴۱] در مطالعه‌ای دیگر به مقایسه‌ی دو روش تبدیل موجک هار و تبدیل سریع فوریه پرداختند. حیدری [۴۲] در یک مطالعه با استفاده از تبدیل موجک گسسته، یک فرآیند بهینه‌یابی مطابق الگوریتم ژنتیک ارائه کرد. در این مطالعه نیز حجم محاسبات تحلیل دینامیکی موجود در روند بهینه‌سازی کاهش یافت. تفاوت این مطالعه در مقایسه با تحقیقات پیشین این بود که در انتهای فرآیند بهینه‌سازی این مقاله، تبدیل موجک معکوس به روند بهینه‌سازی برای افزایش دقت در محاسبات اضافه شده بود. در این مطالعه نیز تنها یک زلزله و دو سازه که در تحقیقات پیشین تکرار شده بود، مورد مطالعه قرار گرفت. حیدری و رئیس [۴۳] با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۲ و تبدیل موجک، سطح مقطع سازه‌های استفاده شده در مقاله‌ی [۳۶] را بهینه‌سازی کردند. در این مقاله نیز از تابع موجک مادر مورلت برای انجام محاسبات مربوط به ساخت موج تقریبی استفاده شد. کامگار و همکاران [۴۴] مطالعه‌ای بر روی طیف پاسخ خطی سازه‌های تک‌درجه آزادی انجام دادند. بر طبق این مطالعه زلزله‌های حوزه دور و نزدیک تا سه مرحله با استفاده از تبدیل موجک فیلتر شدند. در نهایت آخرین پژوهش انجام شده در زمینه‌ی کاربرد تبدیل موجک در سازه‌های خطی توسط حیدری و مجیدی انجام شده است [۴۵]. آنها در این مطالعه منحنی‌های شتاب و سرعت سه مؤلفه‌ی زلزله سرپل ذهاب را با استفاده از تبدیل موجک هار بررسی نمودند. شعبانخواه و همکاران [۴۶] طیف پاسخ سازه‌های هیدرولیکی به‌دست آمده از تبدیل موجک را بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که آخرین فیلتر مورد اعتماد برای این سازه‌ها موج تقریبی مرحله‌ی سوم است. شهریاری و مجیدی [۴۷] در یک مطالعه مدت‌زمان حرکت قوی زمین و کاهش نمونه‌برداری مبتنی بر موجک را تلفیق کردند و این کار منجر به کاهش حداکثری هزینه‌ی محاسبات در

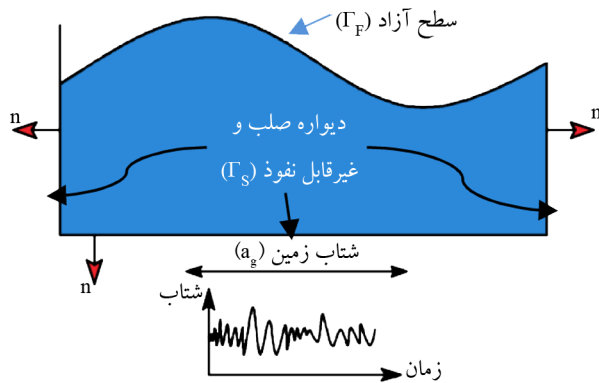
می‌توان هزینه‌ی محاسبات را در مقایسه با روش‌هایی نظیر روش اجزای محدود به‌صورت چشم‌گیری کاهش داد. همچنین در گام دیگر از این پژوهش با استفاده از تبدیل موجک، گام زمانی حل با کاهش نمونه‌برداری رکورد زلزله بزرگ‌تر می‌شود. در واقع با استفاده از تبدیل موجک می‌توان در هر مرحله از فیلتر کردن موج زلزله، تعداد نقاط رکورد‌های زلزله را به نصف مرحله‌ی قبل کاهش داد. این بدان معناست که با نصف شدن تعداد نقاط رکورد‌های زلزله، گام زمانی حل دو برابر می‌شود. استفاده از تبدیل موجک برای اصلاح گام زمانی در زلزله‌ها در ابتدا بر روی سازه‌هایی با رفتار خطی در مصالح بررسی گردید؛ بنابراین ابتدا پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی سازه‌های خطی انجام شده بررسی می‌شود. می‌توان گفت اولین پژوهش در این راستا توسط سلاجقه و حیدری [۳۵] در سال ۲۰۰۲ انجام شده است. در این مقاله با استفاده از ترکیب دو مفهوم تبدیل موجک گسسته‌ی مورلت و تبدیل فوریه‌ی سریع، یک سازه‌ی برشی دو بعدی ۷ طبقه و یک سازه‌ی سه‌بعدی ۴ طبقه تحلیل شده است. در مطالعه‌ای دیگر سلاجقه و حیدری [۳۶] با استفاده از تبدیل موجک هار یا دابشیز ۱ و شبکه‌های عصبی مصنوعی، محاسبات مربوط به فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده را کاهش دادند. در این پژوهش سطح مقاطع اعضای یک خرپای دو بعدی بهینه شد و هزینه‌ی محاسبات مربوط به بهینه‌سازی تا بیش از ۸۰ درصد با خطایی کمتر از ۸ درصد کاهش یافت. در پژوهشی دیگر که توسط همین نویسندگان انجام شد امکان استفاده از روش بانک فیلتر موجک برای کاهش محاسبات بررسی گردید. در این پژوهش نیز خطای محاسبات حدود ۷ درصد بود. هزینه‌ی محاسبات در این روش نیز تا ۹۰ درصد کاهش پیدا کرد [۳۷]. سلاجقه و حیدری [۳۸] در پژوهشی دیگر سازه‌هایی که در مقاله‌ی [۳۵] استفاده شده بود را این بار تحت موج تقریبی به‌دست آمده از روش بانک فیلتری موجک به‌صورت خطی تحلیل کردند. سلاجقه و همکاران [۳۹] در پژوهشی دیگر از روش موجک برای کاهش حجم محاسبات در بهینه‌سازی وزن سازه‌ها استفاده کردند. حیدری و سلاجقه [۴۰]

مقایسه گردید. بر اساس نتایج ارائه شده در این پژوهش، میانگین خطای هر زلزله برای بیشینه شتاب‌های مختلف موج تقریبی مرحله‌ی سوم چیزی بین ۲ تا ۱۳ درصد است. کامگار و همکاران [۵۱] در یک مطالعه‌ی دیگر به کاهش هزینه‌ی محاسبات در تحلیل دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداختند. در مطالعه‌ای که توسط آنها انجام شد، چهار سازه‌ی ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ طبقه با در نظر گرفتن رفتار خاک و سازه به صورت غیرخطی در مصالح تحلیل شدند. در این مقاله سازه‌ها تحت ۲۰ زلزله‌ی مختلف تحلیل دینامیکی شدند. زلزله‌های انتخاب شده تا پنج مرحله با استفاده از تبدیل موجک دبیشز ۴ فیلتر شدند. خطا در محاسبات مربوط به بیشینه جابه‌جایی برای فیلتر مرحله‌ی سوم در برخی از زلزله‌ها تا ۹۰ درصد هم می‌رسید ولی در اغلب موارد خطا بین ۲ تا ۳۶ درصد بود. جاودانیان و همکاران [۵۲] در یک مطالعه به بررسی عملکرد تبدیل موجک در کاهش هزینه‌ی محاسبات تحلیل غیرخطی پروفیل‌های خاک پرداختند. در این مطالعه نیز نشان داده شد که موج مرحله سوم به دست آمده از موجک با تقریبی مناسب هزینه‌ی محاسبات در این سازه‌ها را تا بیش از ۸۰ درصد کاهش می‌دهد. کامگار و همکاران [۵۳] به بررسی دقت روش تبدیل موجک در کاهش هزینه محاسبات سازه‌های غیرخطی تحت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک پرداختند. در این مقاله، چند سیستم تک‌درجه آزادی با ضرایب شکل‌پذیری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مقاله نشان داد که با افزایش پیرو سازه‌ها و غیرخطی شدن سازه، خطای محاسبات بیشتر از ۱۰ درصد نمی‌شود. این در حالی است که هزینه‌ی محاسبات بیش از ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

در این مقاله برای اولین بار از تبدیل موجک برای کاهش هزینه‌ی محاسبات در تحلیل دینامیکی مخازن تحت بار زلزله استفاده می‌شود. در این راستا ابتدا به تبیین روابط روش حل اساسی که روشی برای تحلیل مخازن تحت ارتعاش است، پرداخته می‌شود. پس از آن یک مسئله در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از

تحلیل‌های دینامیکی خطی گردید. نتایج این مقاله نشان داد که با ترکیب این دو مفهوم می‌توان هزینه‌ی محاسبات در سازه‌های خطی را تا بیش از ۹۰ درصد کاهش داد.

تا اینجا در اغلب مطالعاتی که بررسی شدند، رفتار مصالح در سازه‌ها به صورت خطی فرض شده بود. با توجه به اینکه تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی خود دارای چالش حجم محاسبات بالا است، لذا بررسی عملکرد این روش بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی می‌تواند بسیار سودمند باشد. در این راستا حیدری و همکاران [۴۸] از تبدیل موجک گسسته برای کاهش حجم محاسبات در طیف پاسخ غیرخطی سازه‌های یک درجه آزادی استفاده کردند. در این مقاله مجموعاً ۲۰ زلزله و ۶ ضریب شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه‌ی انجام گرفته از تبدیل موجک دبیشز ۴ استفاده شد. در این مقاله برای فیلتر مرحله‌ی سوم، خطای بیشینه طیف برخی از زلزله‌ها تا نزدیک به ۷۰ درصد می‌رسید. همچنین خطای میانگین طیف پاسخ به دست آمده از فیلتر مرحله‌ی سوم برای برخی از زلزله‌ها تا حدود ۲۵ درصد می‌رسید. در مطالعه‌ای دیگر کامگار و همکاران [۴۹] با استفاده از تبدیل موجک هار، یک سازه‌ی ۷ طبقه‌ی ساده را به صورت غیرخطی با مقطع فایبر توسط نرم‌افزار OpenSEES تحلیل کردند. در این مقاله از زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک برای انجام تحلیل استفاده شد. در پژوهشی که انجام شد پاسخ سازه تحت هشت زلزله و با موج‌های تقریبی به دست آمده از روش موجک بررسی گردید. نتایج به دست آمده از این مقاله نشان داد که موج تقریبی مرحله‌ی سوم با خطایی کمتر از ۵ درصد در اغلب زلزله‌ها موجی قابل اعتماد برای کاهش هزینه‌ی محاسبات در سازه‌هاست. در مطالعه‌ای دیگر دادخواه و همکاران [۵۰] یک سازه‌ی دو بعدی ۶ طبقه را با استفاده از مفاصل پلاستیک متمرکز به کمک تبدیل موجک تحلیل دینامیکی فزاینده کردند. در این پژوهش از موج‌های تقریبی ۱۵ زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک به کمک تبدیل موجک هار برای انجام محاسبات استفاده شد. در این مطالعه، منحنی دریفت و برش پایه در مقابل بیشینه شتاب فزاینده



شکل (۱): شرایط مرزی سیال در داخل مخزن مستطیلی صلب.

که در آن n بردار یکه عمود بر مرز در تماس با دیواره صلب مخزن (در جهت بیرونی مخزن)، p_H بیانگر حل همگن معادلات فشار و a_g شتاب وارد بر دیواره مخزن است که برای مخازن صلب برابر شتاب وارد بر زمین a_g است.

باید به این نکته توجه کرد که سیال مدل سازی شده در این مقاله، یک سیال غیر لزج نیوتونی است. لذا در حل دینامیکی سیال میرایی لحاظ نمی شود. با این حال به دلیل اینکه سیال درون مخزن به صورت لاگرانژی مدل سازی می گردد، تأثیر مستقیم بر روی پاسخ مخزن می گذارد. در روش هایی مانند جرم افزوده [۱۹] برای مدل سازی ماهیت رفتار سیال از پارامترهایی مانند میرایی استفاده می گردد تا رفتار سیال به درستی مدل سازی شود؛ اما در این مقاله خود سیال به صورت لاگرانژی مدل سازی می شود.

۳- حل معادله لاپلاس به روش حل اساسی

ابتدا یک نقطه مرجع $x_r = (x_r, y_r)$ بیرون از دامنه به صورت متناظر با نقطه‌ی روی مرز $x = (x, y)$ ، مطابق شکل (۲) در نظر گرفته می شود. برای نقاط گوشه، دو نقطه روی هم و به ازای آن، دو نقطه مرجع در نظر گرفته شده است. تعداد s نقطه بر روی سطح آزاد سیال و تعداد کل نقاط مرزی و به تبع آن تعداد کل نقاط مرجع برابر m در نظر گرفته شده است. پاسخ عددی معادله لاپلاس فشار به صورت زیر در نظر گرفته می شود. در ادامه روابط ارائه شده از مرجع [۳۴] استخراج شده است:

این روش با نتایج آزمایشگاهی، یک مسئله‌ی در مقیاس واقعی مورد تحلیل قرار می گیرد. برای این منظور سازه‌ی مورد نظر تحت زلزله‌ی اصلی و موج‌های تقریبی به دست آمده از روش موجک تحلیل می شود. نتایج به دست آمده از هر زلزله با موج‌های تقریبی آن مقایسه می شود. در انتها نیز با بررسی خطای محاسبات و میزان کاهش هزینه‌ی محاسبات پیشنهاد می شود که از کدام موج تقریبی به دست آمده از روش موجک استفاده گردد.

۲- معادلات حاکم بر مایع درون مخزن

برای یک سیال نیوتنی، تراکم ناپذیر و غیر لزج می توان معادلات ناویر-استوکس که شامل معادلات پیوستگی (بقای جرم) و تعادل دینامیکی (بقای اندازه حرکت) می شود را نوشت. با استفاده از شرایط حاکم بر مسئله، معادلات کلی به صورت زیر حاصل می شود [۳۳].

$$\nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \rho g \quad (2)$$

که در آنها p فشار، u بردار سرعت سیال، g بردار شتاب گرانشی زمین و ρ چگالی سیال است. همچنین برای فشار می توان رابطه (۳) زیر را نوشت.

$$p = p_H - \rho g y \quad (3)$$

که در آن y ، مؤلفه قائم مختصات است. با قرار دادن رابطه (۳) در روابط (۱) و (۲) می توان معادلات زیر را به دست آورد.

$$\nabla^2 p_H = 0 \quad (4)$$

$$p = p_H - \rho g y \quad (5)$$

اگر مرزهای حل Γ به دو صورت نویمان بر روی مرزهای نفوذناپذیر لغزشی در تماس با سیال Γ_S و مرز دریشه بر روی سطح آزاد سیال Γ_F مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شود، روابط کلی حاکم بر روی مرزها به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$p_H = \rho g y \quad \text{on } \Gamma_F \quad (6)$$

$$\rho \mathbf{n}^T \mathbf{a}_s = -\mathbf{n}^T \nabla p_H \Rightarrow \frac{\partial p_H}{\partial n} = -\rho \mathbf{n}^T \mathbf{a}_s \quad \text{on } \Gamma_S \quad (7)$$

$$(\partial P_b)_k = -\rho \left[\mathbf{n}^T \mathbf{a}_s \right]_{\substack{x=x_k \\ y=y_k}}, \quad (14)$$

$$\forall (x_k, y_k) \in \Gamma_S, k=1, \dots, n.$$

حال بردار مشارکت هر پایه بر روی مقادیر مرزی به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mathbf{G}_i^b = \left\{ (G_i)_1, (G_i)_2, \dots, (G_i)_s \mid (\partial G_i)_1, (\partial G_i)_2, \dots, (\partial G_i)_n \right\}^T \quad (15)$$

که در آن

$$(G_i)_k = \left[G_i(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r^i) \right]_{\substack{x=x_k \\ y=y_k}}, \quad (16)$$

$$\forall (x_k, y_k) \in \Gamma_F, k=1, \dots, s.$$

و

$$(\partial G_i)_k = \left[\frac{\partial G_i(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r^i)}{\partial n} \right]_{\substack{x=x_k \\ y=y_k}}, \quad (17)$$

$$\forall (x_k, y_k) \in \Gamma_S, k=1, \dots, n.$$

ماتریس \mathbf{G} به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\mathbf{G} = \left[\mathbf{G}_1^b \quad \mathbf{G}_2^b \quad \dots \quad \mathbf{G}_m^b \right] \quad (18)$$

بنابراین بردار ضرایب مجهول \mathbf{C} به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}^T \quad (19)$$

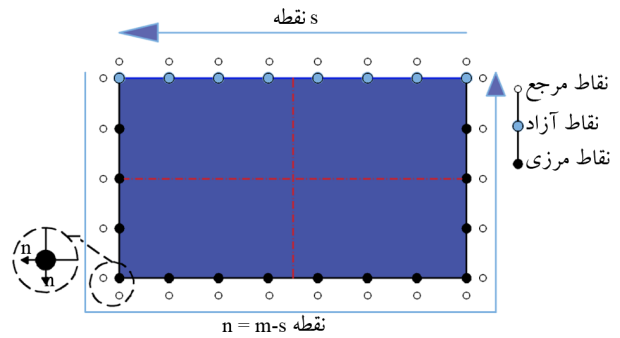
فرم باز بردار شرایط مرزی در نقاط مرزی $\bar{\mathbf{P}}_b$ به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\bar{\mathbf{P}}_b = \left\{ \begin{array}{l} \rho g y_1 \\ \vdots \\ \rho g y_s \\ -\rho \left[\mathbf{n}^T \mathbf{a}_s \right]_{x=x_{s+1}, y=y_{s+1}} \\ \vdots \\ -\rho \left[\mathbf{n}^T \mathbf{a}_s \right]_{x=x_m, y=y_m} \end{array} \right\} \quad (20)$$

با به دست آوردن بردار ضرایب مجهول \mathbf{C} ، می‌توان فشار را با توجه به روابط (۸) و (۳) در یک لحظه و در یک هندسه مشخص محاسبه کرد.

۴- به‌هنگام‌سازی هندسه و پیشروی در زمان

الگوریتم لاگرانژی روشی است که با توجه به داده‌های ابتدای



شکل (۲): گسسته‌سازی نقاط مرزی، نقاط مرجع و نقاط سطح آزاد.

$$P_H(\mathbf{x}) \approx \hat{p}_H(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m C_i G_i(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r^i) \quad (8)$$

که در آن G_i تابع گرین تعریف شده در نقطه مرجع \mathbf{x}_r^i و C_i ضرایب مجهول پاسخ است که بر اساس ارضای شرایط مرزی محاسبه می‌گردد. تابع گرین متناظر با معادله لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$G_i(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r^i) = -\frac{1}{2\pi} \text{Log}(r_i^2) \quad (9)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_r^i)^2 + (y - y_r^i)^2} \quad (10)$$

به منظور برآورده شدن شرایط مرزی سیال و به دست آوردن ماتریس ضرایب مجهول \mathbf{C} ، لازم است $\hat{p}_H(\mathbf{x})$ به صورت یک فرم کلی به صورت زیر در نظر گرفته شود.

$$\bar{\mathbf{P}}_b = \mathbf{G}\mathbf{C} \Rightarrow \mathbf{C} = \mathbf{G}^{-1}\bar{\mathbf{P}}_b \quad (11)$$

که در آن $\bar{\mathbf{P}}_b$ بردار شرایط مرزی و \mathbf{G} بردار مشارکت هر تابع پایه گرین بر روی مقادیر مرزی است (دقت شود که در نقاط گوشه، دو گره نزدیک به هم در نظر گرفته شده است تا بردارهای نرمال عمود بر هم n تعریف شود (مطابق شکل ۲). حال بردار شرایط مرزی $\bar{\mathbf{P}}_b$ با توجه به روابط (۶) و (۷)، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{\mathbf{P}}_b = \{(P_b)_1, \dots, (P_b)_s \mid (\partial P_b)_1, \dots, (\partial P_b)_n\}^T \quad (12)$$

که در آن

$$(P_b)_k = [\rho g y]_{x=x_k}, \quad \forall (x_k, y_k) \in \Gamma_F, k=1, \dots, s. \quad (13)$$

و

گام زمانی با درون‌یابی سرعت \tilde{v}^{n+1} با توجه هندسه واسطه به دست می‌آید.

$$v^{n+1} = \tilde{v}^{n+1}(\tilde{x}^{n+1}) \quad (25)$$

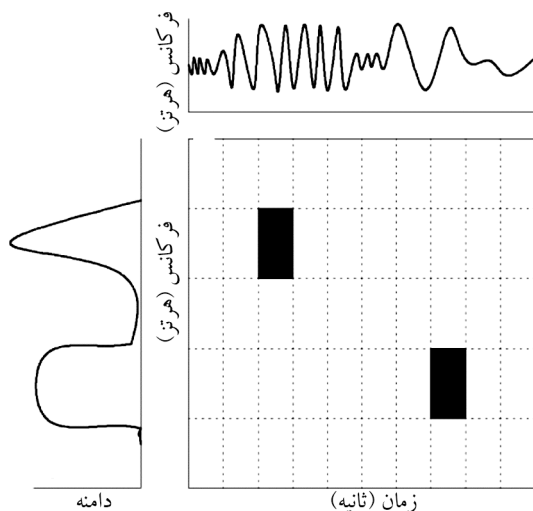
با توجه به رابطه بالا، هندسه نهایی توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$x^{n+1} = x^n + (v^n(1-\gamma) + v^{n+1}(\gamma))\Delta t \quad (26)$$

بنابراین هندسه نهایی با توجه به سرعت در ابتدا و انتهای گام زمانی به دست می‌آید. پارامتر γ در رابطه فوق به صورت $0 \leq \gamma \leq 1$ قابل استفاده خواهد بود. انتخاب مقدار مناسب پارامتر γ ، بر حسب تجربه، بین مقادیر $0.65 \sim 1$ است [۵۴]. انتخاب $\gamma = 1$ یک الگوریتم زمانی کاملاً ضمنی را نشان می‌دهد.

۵- تبدیل موجک

ایده‌ی اصلی تبدیل موجک برای غلبه بر ضعف‌ها و محدودیت‌های تبدیل فوریه است. استفاده از تبدیل موجک به‌عنوان ابزاری برای تحلیل فرکانسی امواج نامانا در حدود ۲۰ سال پیش مطرح شد [۵۵]. تبدیل موجک با استفاده از دو مشخصه‌ی مقیاس و انتقال می‌تواند اطلاعات زمانی و فرکانسی موج را هم‌زمان استخراج کند. مطابق شکل (۳) مشاهده می‌شود که با استفاده از تبدیل موجک می‌توان زمان وقوع فرکانس‌های مختلف را استخراج نمود.



شکل (۳): رابطه‌ی بین زمان، فرکانس و دامنه‌ی موجک.

گام، هندسه و سرعت گام زمانی بعدی را با درون‌یابی سرعت در انتهای گام زمانی محاسبه می‌کند [۵۴]. هندسه در ابتدای گام زمانی x^n است که در لحظه t^n با نقاط مناسب بر روی مرز پوشش داده شده و متناظر با آن x_r به‌عنوان نقاط مرجع و بدون جابه‌جایی در طول حل در نظر گرفته شده است. در صورت وجود، سرعت سیال در ابتدای گام زمانی v^n فرض می‌شود. مطابق با روابط (۶) و (۷) شرایط مرزی مسئله در ابتدای گام زمانی به‌صورت زیر است [۳۴].

$$\begin{cases} p_H^n = \rho g y^n & \text{on } \Gamma_F \\ \frac{\partial p_H^n}{\partial n} = -\rho n^T a_s^n & \text{on } \Gamma_S \end{cases} \quad (21)$$

که در این روابط، p_H^n بیانگر پاسخ معادلات در لحظه t^n است. شتاب تحریک بر روی دیواره صلب مخزن است که به‌صورت افقی و یکنواخت به آن اعمال می‌شود. سپس با حل معادله لاپلاس به روش حل اساسی با توجه به رابطه (۸) می‌توان فشار نقاط را به دست آورد. ابتدا برای به‌هنگام‌سازی سرعت، باید شتاب نقاط را طبق رابطه زیر محاسبه کرد [۳۴].

$$a^n(x^n) = -\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p}_H(x^n) = -\frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^m C_i \begin{Bmatrix} \frac{\partial G_i(x^n, x_r^i)}{\partial x} \\ \frac{\partial G_i(x^n, x_r^i)}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

این الگوریتم، یک الگوریتم گام‌به‌گام است که می‌تواند به نحو مناسب، حرکت نقاط را در دامنه حل و مرزها شبیه‌سازی کند. در این الگوریتم نقاط مرجع ثابت بوده و در کل روند حل بدون تغییر خواهد ماند. پس از به دست آوردن مقادیر عددی شتاب در تمام درجات آزادی، دامنه‌ها و مرزها، سرعت نقاط با رابطه زیر به‌هنگام‌سازی می‌شود [۳۴].

$$\tilde{v}^{n+1} = v^n + a^n \Delta t \quad (23)$$

که در آن \tilde{v}^{n+1} در واقع $v(x^n, t^{n+1})$ است. حال برای تقریب زدن هندسه در انتهای گام زمانی، با محاسبه جابه‌جایی نقاط گره‌ای دامنه و مرزها، روابط زیر حاصل می‌شود.

$$\tilde{x}^{n+1} = x^n + \tilde{v}^{n+1} \Delta t \quad (24)$$

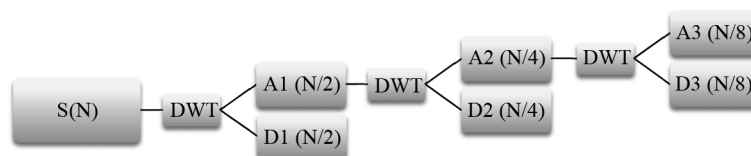
در رابطه (۲۴) \tilde{x}^{n+1} هندسه واسطه است و سرعت نهایی هر

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

در عمل تبدیل موجک گسسته به صورت یک بانک فیلتری پیاده‌سازی می‌شود. بدین معنی که به صورت دنباله‌ای از فیلترهای پایین‌گذر و بالا‌گذر عمل می‌کند. مطابق شکل (۴)، برای سیگنال S که در این مقاله موج شتاب‌نگاشت زلزله است، تعداد نقاط برابر N فرض شده است. موج S با استفاده از تبدیل موجک به دو موج بالا‌گذر (D) و پایین‌گذر (A) تبدیل می‌شود. موج بالا‌گذر نشان‌دهنده‌ی موج جزئیات و موج پایین‌گذر نشان‌دهنده‌ی موج تقریبات است. با توجه به اینکه موج جزئیات شامل فرکانس‌های بالای زلزله است می‌توان آن را با در نظر گرفتن تقریبی مناسب حذف نمود. با حذف موج جزئیات در هر مرحله، تعداد نقاط موج ورودی به نصف مرحله‌ی قبل کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان در هر مرحله موج تقریبات را به دو بخش پایین‌گذر و بالا‌گذر تقسیم کرد و در مرحله بعد، تنها از بخش پایین‌گذر استفاده نمود. در مراجع [۳۷-۳۸، ۵۰، ۵۳] از این روش به عنوان روشی مناسب برای کاهش نقاط زلزله استفاده شده است. در این مقاله موج شتاب‌نگاشت تا پنج مرحله با استفاده از تبدیل موجک گسسته تجزیه می‌شود. در شکل (۴) الگوریتم روش موجک برای سه مرحله فیلتر نشان داده شده است. با توجه به اینکه موج تقریبات به زلزله‌ی اصلی شبیه‌تر است، از این موج به عنوان جایگزین زلزله‌ی اصلی استفاده می‌شود. لذا تعداد گام‌های زمانی برای موج‌های $A1$ تا $A3$ به ترتیب نصف، یک‌چهارم و یک‌هشتم موج اصلی زلزله است.

بر اساس روش ارائه شده توسط Mallat موج‌های A و D با استفاده از روابط ارائه شده در زیر محاسبه می‌شوند [۵۵].



شکل (۴): الگوریتم روش موجک.

تبدیل موجک به دو دسته‌ی کلی گسسته و پیوسته تقسیم می‌شود. تبدیل موجک توسط سه پارامتر زمان، مقیاس و انتقال می‌تواند گسسته یا پیوسته باشد. از طرفی برای امواج گسسته در زمان نیز می‌توان از تبدیل موجک پیوسته استفاده کرد. در حالتی که از تبدیل موجک پیوسته برای امواج گسسته استفاده شود، در واقع دو پارامتر مقیاس و انتقال پیوسته هستند از تبدیل موجک پیوسته بیشتر برای مطالعات زمان-فرکانس استفاده می‌شود و از تبدیل موجک گسسته به عنوان یک بانک فیلتری استفاده می‌شود. تبدیل موجک پیوسته مطابق رابطه‌ی (۲۷) تعریف می‌شود [۵۵].

$$X_{WT}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (27)$$

که در آن، تابع موجک پیوسته بر اساس دو پارامتر انتقال (τ) و مقیاس (s) به دست می‌آید. در این رابطه $x(t)$ نشان‌دهنده‌ی موج ورودی بر حسب زمان است، تابع مادر با ψ نشان داده شده است و همچنین * نشان‌دهنده‌ی مختلط بودن تابع است. همان‌طور که گفته شد در این تابع، پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت پیوسته تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه در این مقاله هدف، کاهش گام‌های زمانی زلزله و تبدیل آن به دو موج با فرکانس‌های بالا و پایین است، پس برای این منظور از تبدیل موجک گسسته استفاده شده است. در واقع با استفاده از تبدیل موجک گسسته می‌توان امواج را به صورت دنباله‌ای از فیلترهای پایین‌گذر و بالا‌گذر تقسیم نمود. در این مقاله از تبدیل موجک گسسته با در نظر گرفتن تابع موجک Haar به عنوان تابع مادر استفاده شده است. بر اساس مطالعات انجام شده در مراجع [۳۷-۳۸، ۵۰] یکی از بهترین توابع مادر برای فیلتر موج زلزله تابع مادر Haar است. در رابطه (۲۸)، تابع مادر $(\psi(t))$ و تابع مقیاس $(\varphi(t))$ استفاده شده در این مقاله ارائه شده است.

۶- رکوردهای زلزله انتخاب شده

در این مقاله برای ارزیابی روش موجک در مسائل لمبرزدگی از ۱۰ رکورد زلزله استفاده شده است. زلزله‌های این مقاله از میان ۱۰۰ زلزله‌ی Fema440 انتخاب شده است. زلزله‌های Fema440 شامل پنج دسته‌ی ۲۰ تایی هستند که هر دسته مختص به یک نوع ساختگاه است. در این مقاله از هر دسته دو زلزله انتخاب شده است. به این صورت که دو زلزله از خاک B، دو زلزله از خاک C، دو زلزله از خاک D، دو زلزله از خاک خیلی نرم و دو زلزله از سایت‌های نزدیک گسل انتخاب شده است. این انتخاب به گونه‌ای انجام شده است که محتواهای فرکانسی مختلف در رکوردهای زلزله‌های مختلف وجود داشته باشد. در واقع در این مقاله برای گرفتن یک نتیجه‌گیری کلی در مورد روش پیشنهادی، از زلزله‌هایی با خصوصیات مختلف بهره برده شده است. در جدول (۱) مشخصات رکوردهای زلزله ارائه شده است.

برای اینکه همه رکوردهای زلزله با یک شدت به سازه وارد شوند و همچنین تحلیل به گونه‌ای باشد که واگرایی حل (واگرایی ناشی از خارج شدن آب از مخزن) در اثر شدت زیاد زلزله ایجاد نشود، تمام زلزله‌ها به شتاب $0.12g$ مقیاس شده‌اند [۵۷]. در شکل (۵) زیر منحنی شتاب برای ۱۰ رکورد زلزله اصلی و موج‌های تقریبی به دست آمده از روش موجک نشان داده شده است.

$$A_j = \sum_n S(n) g_j^*(n - 2^j k) \quad (29)$$

$$j = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, \dots$$

$$D_j = \sum_n S(n) h_j^*(n - 2^j k) \quad (30)$$

$$j = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, \dots$$

$$g_1(n) = g(n) \quad (31)$$

$$h_1(n) = h(n) \quad (32)$$

$$g_{j+1}(n) = \sum_k g_j(k) g(n - 2k) \quad (33)$$

$$h_{j+1}(n) = \sum_k h_j(k) g(n - 2k) \quad (34)$$

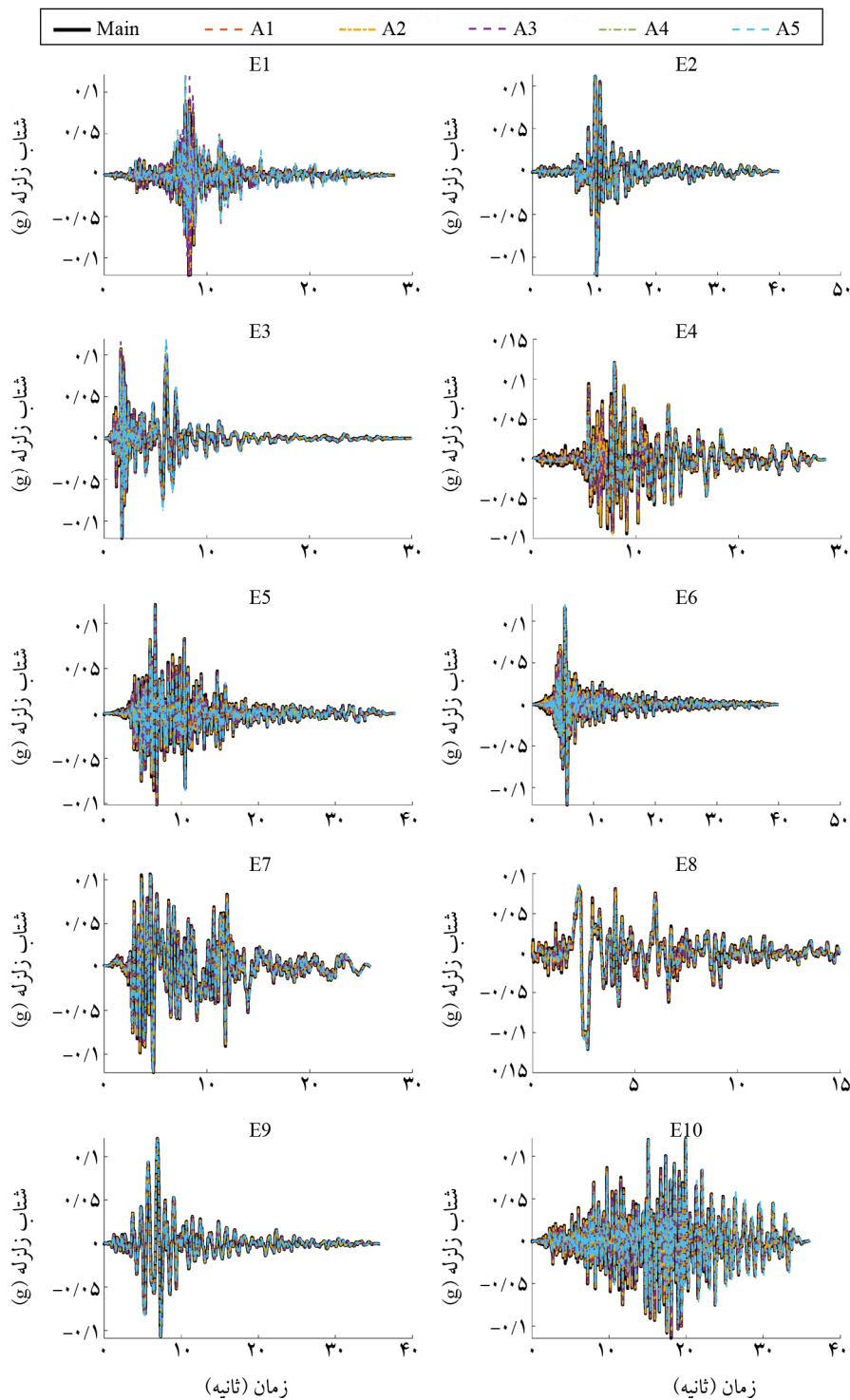
در روابط بالا h_j و g_j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی فیلترهای پایین‌گذر و بالا‌گذر هستند [۵۶]. فیلترهای h_j و g_j با استفاده از روابط (۳۱) تا (۳۴) محاسبه می‌شوند. k و n شماره‌های انتگرال‌گیری هستند. همچنین با استفاده از رابطه (۳۵) می‌توان موج S را در هر مرحله محاسبه کرد.

$$S = A_j + \sum_{i=1}^j D_i \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (35)$$

که در آن، پارامتر j نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ی فیلتر است؛ بنابراین با استفاده از روابط گفته شده در این قسمت، موج تقریبی مورد نیاز با استفاده از تبدیل موجک به دست می‌آید.

جدول (۱): مشخصات زلزله‌ها.

نام رکورد	نام زلزله	ساختگاه	بزرگا (ریشتر)	محل ثبت	PGA (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه)	فرکانس غالب
E1	ایمپریال ولی	B	۶/۸	Superstition Mountain	۱۸۹/۲	۲/۷۵
E2	لوماپرتا	B	۷/۱	Berkeley, Lawrence Berkeley Lab	۱۱۴/۸	۱/۰۰
E3	مورگان هیل	C	۶/۱	Gilroy, San Ysidro Microwave Site	۲۸۰/۴	۰/۹۰
E4	سان‌فرناندو	C	۶/۵	Pasadena, CIT Athenaeum	۱۰۷/۹	۱/۱۷
E5	ایمپریال ولی	D	۶/۸	Calexico, Fire Station	۲۶۹/۶	۲/۱۰
E6	وایتیر ناروز	D	۶/۱	Downey, County Maintenance Bldg	۱۹۳/۲	۱/۳۶
E7	دوزجه، ترکیه	Near Fault	۷/۸	DZC2	۴۰۴/۲	۰/۵۸
E8	نورث‌ریج	Near Fault	۶/۸	Rinaldi Receiving Station	۸۷۳	۰/۳۹
E9	لوماپرتا	Very Soft Soil	۷/۱	Redwood City (APEEL Array Stn. 2)	۲۷۰	۰/۲۲
E10	مورگان‌هیل	Very Soft Soil	۶/۱	Foster City (APEEL 1; Redwood Shores)	۴۰	۱/۵۶



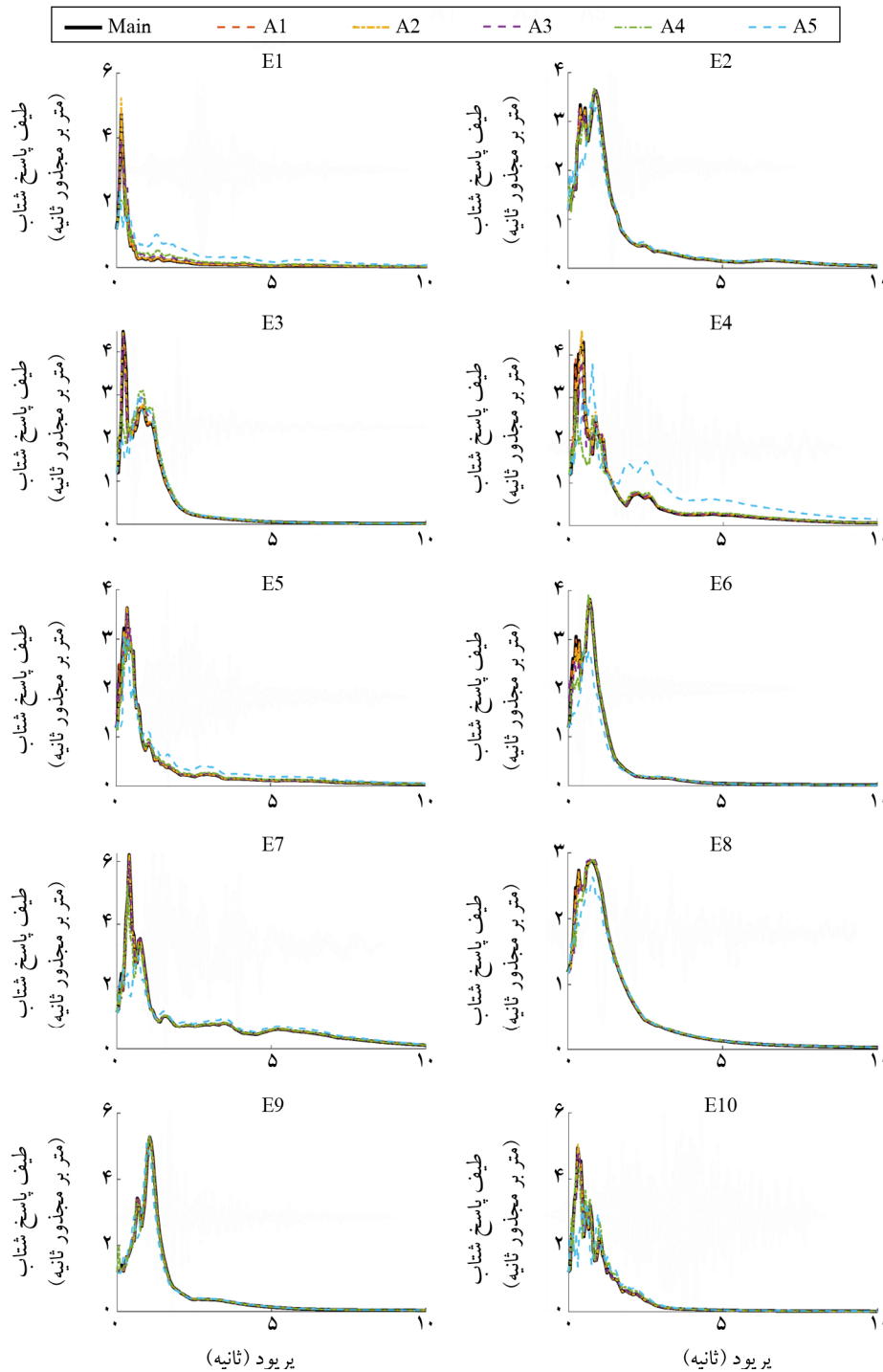
شکل (۵): منحنی شتاب برای موج اصلی و موج‌های تقریبی رکوردهای مختلف.

موجک تقریباً در همه‌ی سازه‌ها از عملکرد مناسبی برخوردار است. همچنین می‌توان دریافت که با افزایش پریود سازه در تمام زلزله‌ها خطای محاسبات کاهش می‌یابد. لذا استفاده از روش‌های کاهش نمونه‌برداری مبتنی بر موجک در مسائلی که سازه دارای

در ادامه برای بررسی اولیه‌ی روش موجک بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌ها، به‌عنوان نمونه طیف پاسخ سازه‌های تک‌درجه آزادی برای سازه‌هایی با پریود ۰ تا ۱۰ ثانیه نشان داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۶) مشخص است که روش

۷- تحلیل دینامیکی مخازن تحت تحریک زلزله
۷-۱- مخزن با مقیاس کوچک تحت تحریک زلزله چی چی
و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی
 در ادامه برای صحت‌سنجی روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی به بررسی یک مخزن کوچک پرداخته می‌شود.

پریودی بیش از ۲ ثانیه باشد، می‌تواند خطای کمتری را وارد محاسبات کند. بر اساس تحلیل سازه‌های تک‌درجه آزادی نیز می‌توان نتیجه گرفت که موج A5 خطایی تا بیش از ۵۰ درصد را در برخی از سازه‌ها وارد می‌کند. این مسئله بیانگر دقت پایین این موج تقریبی است.



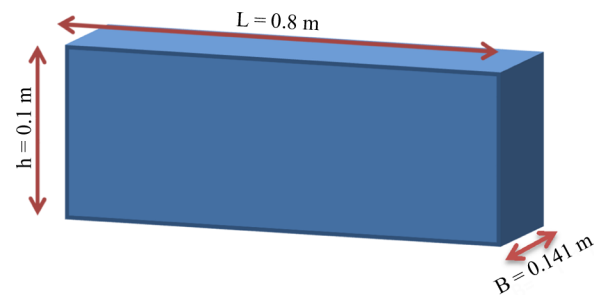
شکل (۶): طیف پاسخ شتاب سازه‌های تک‌درجه آزادی برای رکوردهای مختلف.

مطابق با مرجع [۵۸] استفاده شده است. در شکل (۸) پاسخ ارتفاع سیال در گوشه‌ی مخزن برای حالت آزمایشگاهی (Experiment)، موج اصلی (Main) و موج‌های تقریبی A1 و A2 نشان داده شده است. نتایج برای موج‌های A3 تا A5 به دلیل واگرایی و خطای زیاد در محاسبات ارائه نشده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، روش حل اساسی برای موج اصلی زلزله و موج‌های تقریبی A1 و A2 از عملکرد بسیار مناسبی برخوردار است. خطای روش عددی استفاده شده در اغلب موارد کمتر از ۱۰ درصد است.

همچنین برای ارزیابی عملکرد موج‌های تقریبی در مقایسه با موج اصلی زلزله در ادامه، منحنی برش پایه‌ی موج اصلی زلزله (Main) و موج‌های تقریبی A1 و A2 ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود استفاده از موج‌های تقریبی از دقت بسیار مناسبی برخوردار است. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که دقت‌های موج‌های تقریبی A1 و A2 بسیار بالاست، بدان معنا که خطای این موج‌ها نسبت به موج اصلی زلزله کمتر از ۵ درصد است.

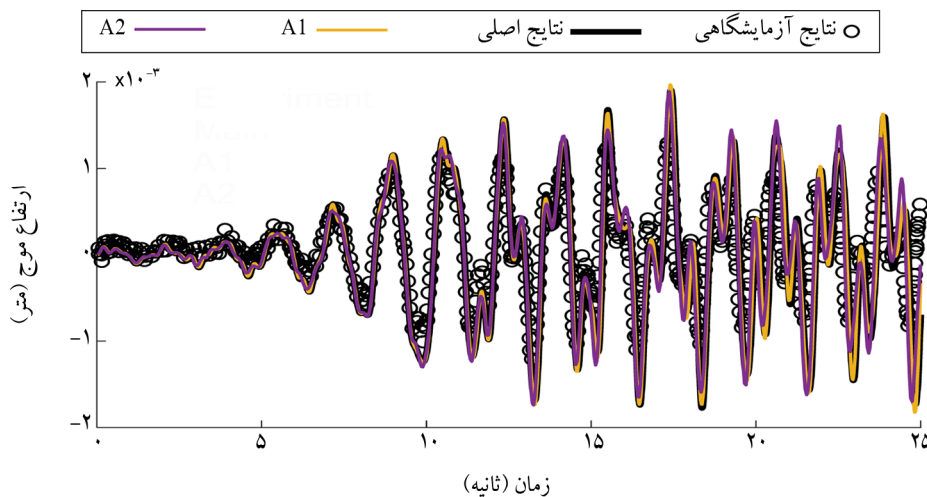
با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که نتایج روش حل اساسی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطبیق دارد. از طرفی نشان داده شد که در روش حل اساسی، استفاده از موج‌های تقریبی به دست آمده از موجک به خوبی با نتایج به دست آمده از موج اصلی

لذا مخزنی با طول $L = 0.8$ متر، ارتفاع $h = 0.1$ متر، عرض $B = 0.141$ متر تحت اثر رکورد زلزله چی چی و موج‌های تقریبی به دست آمده از روش موجک بررسی شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۵۸] مقایسه شده است. چگالی آب و شتاب گرانشی زمین برابر $\rho = 1000$ (کیلو متر بر متر مکعب) و $g = 9.81$ (متر بر مجذور ثانیه) در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) نمایی از مخزن مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل (۷): ابعاد مخزن آب در مقیاس آزمایشگاهی.

زمانی که مخزن تحت تحریک رکورد زلزله قرار می‌گیرد نقاط گوشه مخزن، تحت تلاطم‌های سطحی شدیدی قرار می‌گیرد که روش حل اساسی در مقایسه با روش‌های شبکه‌دار، به خاطر به هم ریختگی شبکه در گوشه‌ها و همچنین در مقایسه با سایر روش‌های بدون شبکه، به دلیل دنبال نکردن نقاط گوشه مخزن رقابت می‌کند. جهت آنالیز دینامیکی از شتاب‌نگاشت زلزله چی چی در سال ۱۹۹۹ با حداکثر شتاب $PGA = 0.01 \times 0.258 g$



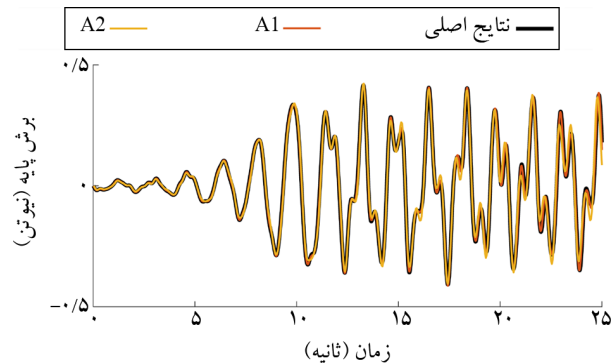
شکل (۸): مقایسه‌ی ارتفاع سیال در دیواره سمت راست مخزن با نتایج آزمایشگاهی [۵۸] تحت بارگذاری یک درصد رکورد زلزله چی چی.

شده در بخش ۶ استفاده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، تمام زلزله‌ها به شتاب $0.12g$ مقیاس شده است. دقت حل و همگرایی روش به تعداد گره بر روی مرزها، فاصله نقاط مرجع از نقاط مرزی و گام زمانی حل بستگی دارد. به‌منظور اینکه درصد خطای حجمی سیال کمتر از ۴ درصد شود، تعداد کل نقاط مرزی برابر ۲۲۸ نقطه، فاصله نقاط مرجع از نقاط مرزی 0.3 ارتفاع سیال و گام زمانی مورد استفاده در تحلیل برابر با گام زمانی زلزله در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که مدت‌زمان اجرای برنامه کامپیوتری نوشته شده برای هر گام زمانی معادل ۱ ثانیه است. پایین بودن زمان اجرای روش در مقایسه با سایر روش‌ها، یکی از پارامترهای کارایی روش حل اساسی و الگوریتم زمانی مورد استفاده برای حل مسائل با ابعاد واقعی است. هنگامی که مخزن با ابعاد واقعی تحت تحریک زلزله قرار می‌گیرد، فشارهای هیدرودینامیکی وارد شده به دیواره‌های مخزن نسبت به فشارهای هیدرواستاتیکی به مراتب بیشتر خواهد شد و این موضوع نشان می‌دهد که کاربرد نیروی برش پایه هیدرودینامیکی در محاسبات سازه‌ای در مقایسه با نیروی برش پایه هیدرواستاتیکی از اهمیت زیادی برخوردار است؛ بنابراین از اصلی‌ترین پارامترهایی که دقت آن در تحلیل این سازه‌ها مهم است، برش پایه است.

قبل از بررسی جزئی پاسخ سازه در برابر هر کدام از رکوردهای زلزله، معیاری برای محاسبه‌ی درصد خطای هر موج تقریبی تعریف می‌شود. به این ترتیب در زیر دو معیار خطای Er_D و Er_F تعریف شده است که به ترتیب خطای ارتفاع حداکثر سیال و خطای برش پایه‌ی حداکثر هستند. در روابط زیر، پارامترهای $Disp_{Main}$ ، $Disp_{Ax}$ ، $Force_{Main}$ و $Force_{Ax}$ به ترتیب ارتفاع حداکثر سیال برای موج اصلی زلزله، ارتفاع حداکثر سیال برای موج تقریبی مورد نظر، برش پایه‌ی موج اصلی زلزله و برش پایه‌ی موج تقریبی مورد نظر هستند.

$$Er_D (\%) = \left(\frac{Disp_{Main} - Disp_{Ax}}{Disp_{Main}} \right) \times 100 \quad (36)$$

$$Er_F (\%) = \left(\frac{Force_{Main} - Force_{Ax}}{Force_{Main}} \right) \times 100 \quad (37)$$



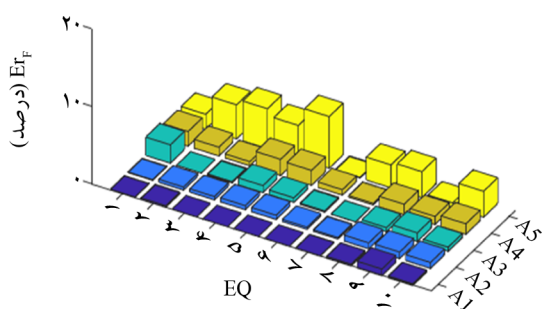
شکل (۹): مقایسه نیروی برش تحت بارگذاری یک درصد زلزله چی چی برای موج اصلی زلزله و موج‌های تقریبی A1 و A2.

زلزله تطبیق دارد؛ اما آنچه در این مقاله مورد نظر است، کاهش هزینه‌ی محاسبات با استفاده از موج‌های تقریبی به‌دست‌آمده از تبدیل موجک است. در این قسمت زلزله‌ی چی چی در ۲۵ ثانیه برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار گرفت. رکورد اصلی زلزله در این مقاله ۲۵۰۰ نقطه‌ی گسسته با گام زمانی 0.1 داشت. در اینجا گام زمانی حل برای روش حل اساسی با گام زمانی زلزله برابر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین این مخزن برای موج اصلی در 2500 گام زمانی حل شده است. حل معادلات برای هر گام زمانی در برنامه نوشته شده برای این مقاله حدود ۱ ثانیه طول می‌کشد؛ بنابراین زمان حل برای رکورد اصلی زلزله حدود 2500 ثانیه است. تعداد نقاط گسسته برای موج‌های A1 و A2 به ترتیب 1250 و 625 و همچنین گام زمانی برای موج‌های A1 و A2 به ترتیب 0.2 و 0.4 ثانیه است؛ بنابراین زمان حل این مسئله برای موج‌های A1 و A2 به ترتیب 1250 ثانیه و 625 ثانیه است. به عبارت دیگر استفاده از موج‌های تقریبی A1 و A2 حجم محاسبات را به ترتیب به نصف و یک چهارم می‌کند.

۷-۲- مخزن با مقیاس واقعی تحت تحریک زلزله‌های مختلف

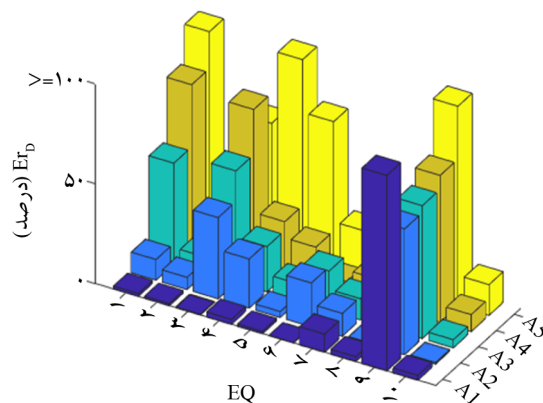
در این بخش مخزنی با پلان مربع شکل با ابعاد واقعی به طول و عرض 30.48 متر و عمق 13 متر تحت اثر رکوردهای زلزله مختلف بررسی شده است. به این منظور از رکورد زلزله‌های ارائه

بیش از ۱۰۰ درصد هم می‌رسد. با این حال با در نظر گرفتن خطای ارتفاع حداکثر سیال می‌توان گفت که موج تقریبی A1 در ۹۰ درصد رکوردهای زلزله، موج تقریبی A2 در ۶۰ درصد رکوردهای زلزله، موج تقریبی A3 در ۵۰ درصد از رکوردهای زلزله، موج تقریبی A4 در ۵۰ درصد از رکوردهای زلزله و موج تقریبی A5 نیز در ۱۰ درصد از رکوردهای زلزله نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) منحنی برش پایه و ارتفاع سیال در گوشه‌ی مخزن نشان داده شده است.



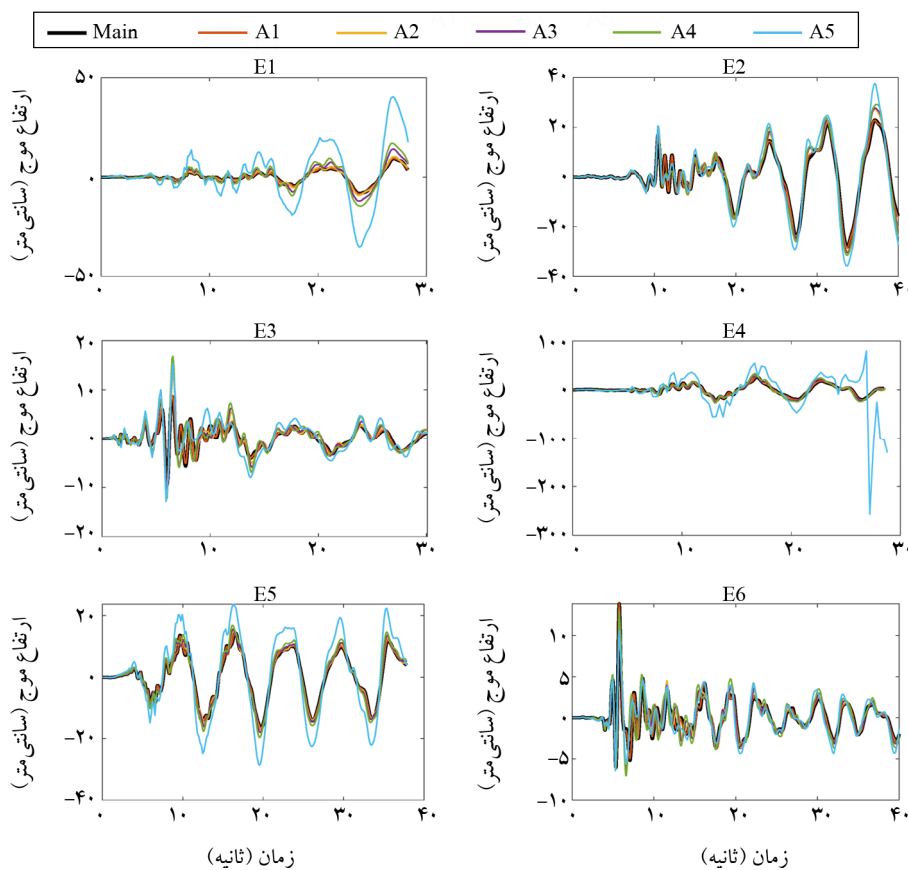
(ب) خطای برش پایه‌ی حداکثر

در شکل (۱۰) خطای محاسبات برای ارتفاع حداکثر سیال و برش پایه‌ی رکوردهای زلزله مختلف ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در شکل (۱۰) مشخص است، خطای برش پایه به‌عنوان یک معیار اصلی در طراحی مخازن برای همه‌ی موج‌های تقریبی کمتر از ۵ درصد است. در حالی که خطای ارتفاع حداکثر سیال برای برخی از زلزله‌ها و موج‌های تقریبی به

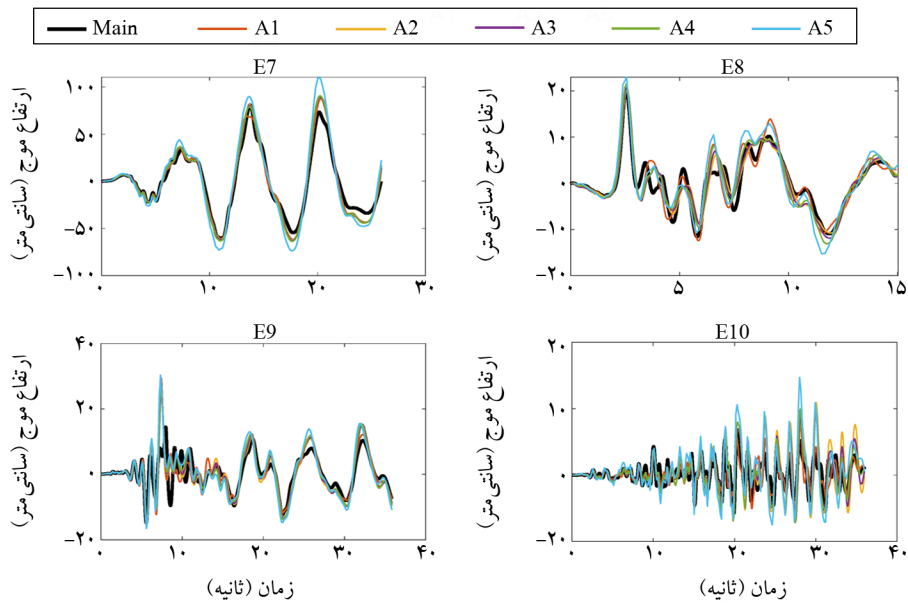


(الف) خطای جابه‌جایی حداکثر سطح آزاد

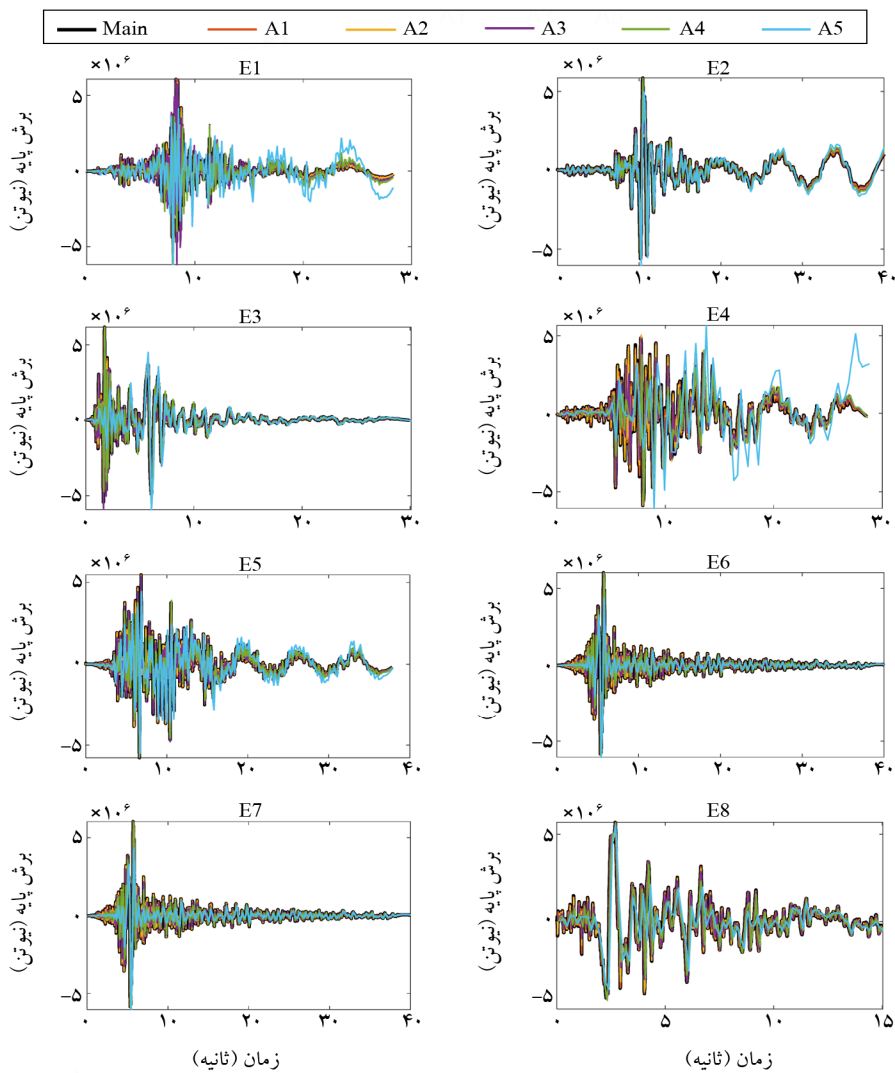
شکل (۱۰): خطای محاسبات.



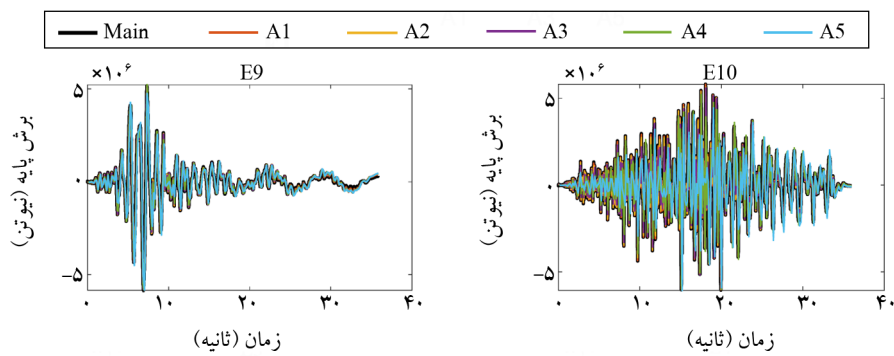
شکل (۱۱): ارتفاع سیال برای موج اصلی زلزله و موج‌های تقریبی.



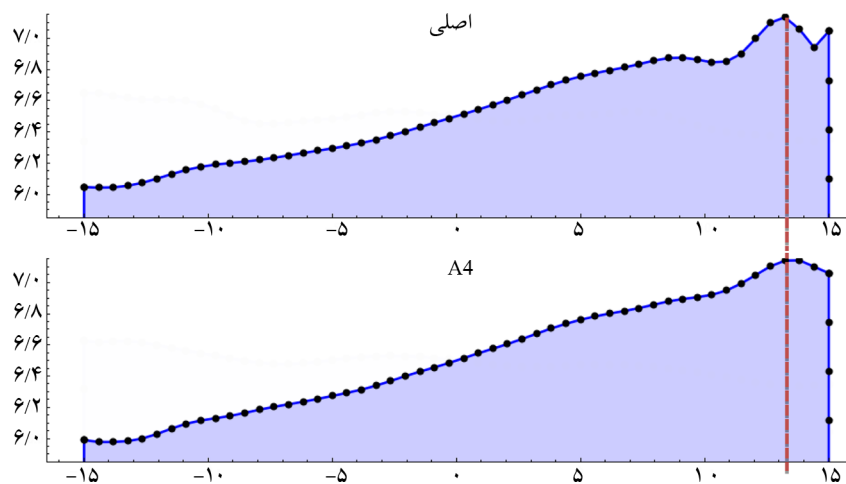
ادامه شکل (۱۱).



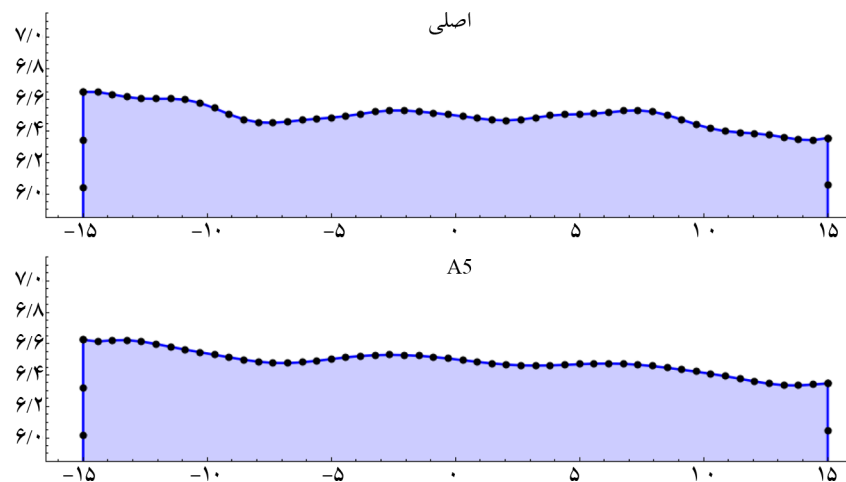
شکل (۱۲): برش پایه برای موج اصلی زلزله و موج‌های تقریبی.



شکل ۱۲ (۱۲). ادامه شکل



شکل ۱۳: وضعیت سطح آزاد مخزن زلزله‌ی اصلی و موج تقریبی A4 زلزله‌ی E7 در زمان ۱۰/۳۵ ثانیه.



شکل ۱۴: وضعیت سطح آزاد مخزن زلزله‌ی اصلی و موج تقریبی A5 زلزله‌ی E2 در زمان ۳۵/۹۵ ثانیه.

که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، نقطه‌ی حداکثر این سطح آزاد و شکل کلی موج سطح آزاد آب به خوبی در این دو موج منطبق هستند. همچنین به عنوان مثالی دیگر، در شکل (۱۴) وضعیت سطح

یکی از پارامترهایی که می‌تواند دقت محاسبات را در این مسئله نشان دهد، شکل موج سطح آزاد مخزن آب است. در این راستا برای نمونه در شکل زیر وضعیت سطح آزاد موج اصلی و موج تقریبی A4 برای زلزله‌ی E7 نشان داده شده است. همان‌طور

موج A1 به عنوان تقریبی قابل اطمینان از رکورد اصلی زلزله می تواند در روند محاسبات مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از موج A1 هزینه محاسبات را از حدود ۱۶ ساعت به حدود ۸ ساعت می رساند.

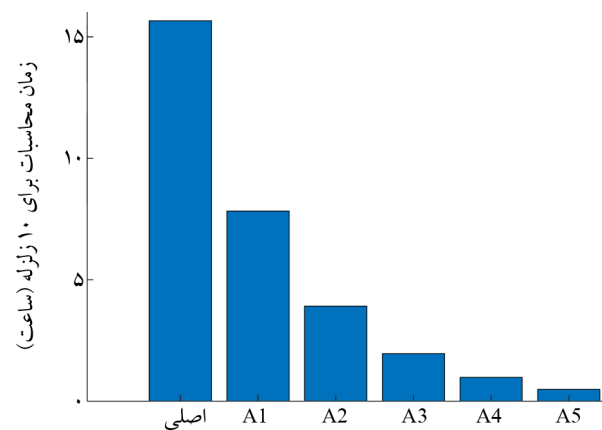
۸- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار از تلفیق روش حل اساسی و تبدیل موجک برای کاهش هزینه محاسبات در مسائل دینامیکی اندرکنش سازه و سیال استفاده گردید. برای این منظور ابتدا به تبیین روش حل اساسی و تئوری موجک پرداخته شد. سپس ۱۰ رکورد زلزله که مربوط به سایت های مختلف بودند، انتخاب شدند. رکوردهای انتخاب شده تا پنج مرحله با استفاده از تئوری موجک فیلتر شدند. برای صحت سنجی روش ارائه شده، یک مخزن مقیاس شده آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار گرفت. استفاده از تبدیل موجک برای تحلیل این مخزن خطایی کمتر از ۵ درصد وارد محاسبات کرد. پس از صحت سنجی نتایج، یک سازه با مقیاس واقعی مورد تحلیل قرار گرفت. در این راستا، سازه ی مورد نظر برای رکوردهای زلزله اصلی و موج های تقریبی تحلیل شد و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل های انجام شده می توان به نکات زیر اشاره کرد:

- خطای برش پایه مخزن (به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی) در همه ی موج های تقریبی قابل چشم پوشی است. این خطا برای همه ی رکوردهای زلزله و همه ی موج های تقریبی کمتر از ۷ درصد بود.
- در استفاده از موج های تقریبی با دو مرحله فیلتر موجک به بالا برای به دست آوردن حداکثر ارتفاع سیال باید دقت نمود زیرا خطای ایجاد شده برای این پارامتر با افزایش تعداد فیلترهای موجک به صورت چشمگیری افزایش می یابد. البته این روند افزایشی در رکوردهای زلزله بسیار متفاوت است. البته موج تقریبی با یک مرحله فیلتر، تقریباً در تمام رکوردهای زلزله خطایی قابل چشم پوشی را وارد محاسبات می کند. همچنین موج های تقریبی در پیش بینی روند تغییرات

آزاد موج اصلی و موج تقریبی A5 برای زلزله ی E2 نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، نقطه ی حداکثر این سطح آزاد و شکل کلی موج سطح آزاد آب به خوبی در این دو موج منطبق هستند.

بر اساس نتایج ارائه شده در این قسمت نشان داده شد که روش موجک به خوبی برش پایه را در طول زمان ارتعاش تخمین می زند. این بدان معناست که خطای محاسبات برای همه ی موج های تقریبی برای برش پایه بسیار کم است. از طرفی خطای محاسبات ارتفاع سیال در اغلب موارد برای موج A1 قابل چشم پوشی است. در صورتی که پارامتر مورد نظر از نتیجه ی تحلیل، حداکثر ارتفاع سیال باشد، موج های A2 تا A5 نتایج محافظه کارانه ارائه می دهند. در ادامه نتایج زمان محاسبات موج های مختلف برای ۱۰ زلزله نشان داده شده است (شکل ۱۵).



شکل (۱۵): هزینه محاسبات ۱۰ رکورد زلزله برای موج های مختلف.

همان طور که در شکل (۱۵) مشخص است، هزینه محاسبات برای موج های اصلی برای کل رکوردهای زلزله حدود ۱۶ ساعت است. از طرفی اگر هدف از تحلیل به دست آوردن برش پایه باشد، می توان از موج A5 با خطایی نزدیک به صفر استفاده کرد. هزینه محاسبات تحلیل این سازه برای ۱۰ رکورد زلزله در صورتی که از موج A5 استفاده شود، حدود ۰/۵ ساعت است؛ بنابراین استفاده از موج A5 به صورت بسیار چشم گیری هزینه محاسبات را کاهش می دهد. در صورتی که هدف از تحلیل به دست آوردن ارتفاع سیال باشد نیز استفاده از

damage of oil storage tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9. 0), Japan. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, 1-10.

8. Fischer, E.C., Liu, J., and Varma, A.H. (2016) Investigation of cylindrical steel tank damage at wineries during earthquakes: Lessons learned and mitigation opportunities. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **21**(3), 04016004.
9. Fischer, E. (2014) *Learning from Earthquakes: 2014 Napa Valley Earthquake Reconnaissance Report*.
10. Korkmaz, K.A., Sari, A., and Carhoglu, A.I. (2011) Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**(4), 314-320.
11. Xue, M.-A., Chen, Y., Zheng, J., et al. (2019) Fluid dynamics analysis of sloshing pressure distribution in storage vessels of different shapes. *Ocean Engineering*, **192** (106582).
12. Felix-Gonzalez, I., Sanchez-Mondragon, J., and Cruces-Giron, A. (2022) Sloshing study on prismatic LNG tank for the vertical location of the rotational center. *Computational Particle Mechanics*, 1-20.
13. Housner, G.W. (1963) The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53**(2), 381-387.
14. Haroun, M.A. and Tayel, M.A. (1985) Response of tanks to vertical seismic excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**(5), 583-595.
15. Park, J.-H., Koh, H., and Kim, J. (1992) *Fluid-Structure Interaction Analysis by a Coupled Boundary Element-Finite Element Method in Time Domain*. Springer, Place, 227-243.
16. Kim, J.K., Koh, H.M., and Kwahk, I.J. (1996) Dynamic response of rectangular flexible fluid containers. *Journal of Engineering Mechanics*, **122**(9), 807-817.
17. Hoskins, L.M. and Jacobsen, L.S. (1934) Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*,

ارتفاع سیال موفق هستند.

- استفاده از موج تقریبی با پنج مرحله فیلتر موجکی، هزینه‌ی محاسبات را تا حدود ۹۷ درصد کاهش می‌دهد.
- بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که برش پایه پارامتر مورد نیاز تحلیل باشد، روش موجک با کاهش ۳۲ برابری محاسبات می‌تواند با خطایی کمتر از ۵ درصد به‌خوبی عمل نماید. از طرفی بر اساس نتایج به‌دست آمده از این مقاله به نظر می‌رسد که روش موجک در به دست آوردن ارتفاع سیال به‌خصوص در سطوح بالای تجزیه (A2 تا A5) دارای محدودیت‌هایی می‌باشد.

مراجع

1. Babu, S.S. and Bhattacharyya, S. (1996) Finite element analysis of fluid-structure interaction effect on liquid retaining structures due to sloshing. *Computers and Structures*, **59**(6), 1165-1171.
2. Chen, W., Haroun, M.A. and Liu, F. (1996) Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(7), 653-669.
3. Wu, G., Ma, Q. and Taylor, R.E. (1998) Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method. *Applied Ocean Research*, **20**(6), 337-355.
4. Rawat, A., Mittal, V., Chakraborty, T., et al. (2019) Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic-structural and Euler-Lagrange methods. *Thin-Walled Structures*, **134** (333-346).
5. Eshghi, S. and Razzaghi, M.S. (2007) Performance of cylindrical liquid storage tanks in Silakhor, Iran earthquake of March 31, 2006. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **40**(4), 173-182.
6. Yazdani, M., Ingham, J.M., Kahane, C., et al. (2020) Damage to flat-based wine storage tanks in the 2013 and 2016 New Zealand earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*, **168** (105983).
7. Zama, S., Nishi, H., Hatayama, K., et al. (2012) On

- Navayi-nia, B. (2011) Evaluation of Eulerian and Lagrangian Methods in the Analysis of Concrete Gravity Dam Including Dam Water Foundation Interaction under Earthquake. *Modares Civil Engineering Journal*, **11**(4), 107-116.
30. Ali, J.D., Navaei, N.B. and Vaseghi, A.J. (2008) Hydrodynamic pressure in reservoir of concrete gravity dams under earthquake using lagrangian and eulerian methods. *Journal of Faculty of Engineering (University of Tehran)*.
31. Mandal, K.K. and Maity, D. (2016) Nonlinear finite element analysis of water in rectangular tank. *Ocean Engineering*, **121** (592-601).
32. Young, D., Lin, Y., Fan, C., et al. (2009) The method of fundamental solutions for solving incompressible Navier–Stokes problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **33**(8-9), 1031-1044.
33. Zandi, S., Boroomand, B. and Soghrati, S. (2012) Exponential basis functions in solution of incompressible fluid problems with moving free surfaces. *Journal of Computational Physics*, **231**(2), 505-527.
34. Zandi, S.M. and Sarjoughian, J. (2022) Dynamic analysis of rectangular liquid-storage tanks impact of harmonic or seismic loading by method of fundamental solutions with use of pressure formulation. *Amirkabir Journal of Civil & Environmental Engineering (Accepted)*.
35. Salajegheh, E. and Heidari, A. (2002) Dynamic analysis of structures against earthquake by combined wavelet transform and fast Fourier transform. *Asian Journal of Civil Engineering*.
36. Salajegheh, E. and Heidari, A. (2004) Optimum design of structures against earthquake by adaptive genetic algorithm using wavelet networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **28**(4), 277-285.
37. Salajegheh, E. and Heidari, A. (2005) Optimum design of structures against earthquake by wavelet neural network and filter banks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34**(1), 67-82.
38. Salajegheh, E. and Heidari, A. (2005) Time history dynamic analysis of structures using filter banks and wavelet transforms. *Computers & Structures*, **83**(1), 53-68.
- 24(1), 1-32.
18. Yang, J.Y. (1976) *Dynamic Behavior of Fluid Tank Systems*. Rice University.
19. Kianoush, M. and Chen, J. (2006) Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structures*, **28**(5), 704-715.
20. Veletsos, A. (1974) Seismic effects in flexible liquid storage tanks. Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering. *Bulletin of the Seismological Society of America McLean, VA, USA*, 630-639.
21. Wu, G., Eatock Taylor, R., and Greaves, D. (2001) The effect of viscosity on the transient free-surface waves in a two-dimensional tank. *Journal of Engineering Mathematics*, **40**(1), 77-90.
22. Estekanchi, H. and Alembagheri, M. (2012) Seismic analysis of steel liquid storage tanks by endurance time method. *Thin-Walled Structures*, **50**(1), 14-23.
23. Constantin, L., De Courcy, J., Titurus, B., et al. (2021) Analysis of damping from vertical sloshing in a SDOF system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **152** (107452).
24. Jamshidi, S., Firouz-Abadi, R., and Amirzadegan, S. (2022) New mathematical model to analysis fluid sloshing in 3D tanks with slotted middle baffle. *Ocean Engineering*, **262** (112061).
25. Huang, S., Duan, W., Han, X., et al. (2018) Nonlinear analysis of sloshing and floating body coupled motion in the time-domain. *Ocean Engineering*, **164** (350-366).
26. Monaghan, J.J. (1994) Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics* **110**(2), 399-406.
27. Shao, J., Li, H., Liu, G., et al. (2012) An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics. *Computers & Structures*, **100** (18-26).
28. Wu, N.-J., Hsiao, S.-C. and Wu, H.-L. (2016) Mesh-free simulation of liquid sloshing subjected to harmonic excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **64** (90-100).
29. Khan Mohammadi, L., Vaseghi Amiri, J. and

- acceleration for efficient calculation of seismic response in elastoplastic structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
50. Dadkhah, M., Kamgar, R., and Heidarzadeh, H. (2020) Reducing the cost of calculations for incremental dynamic analysis of building structures using the discrete wavelet transform. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-26.
 51. Kamgar, R., Tavakoli, R., Rahgozar, P., et al. (2021) Application of discrete wavelet transform in seismic nonlinear analysis of soil-structure interaction problems. *Earthquake Spectra*, 8755293020988027.
 52. Javdanian, H., Heidari, A., and Raeisi, J. (2021) Seismic ground response under wavelet-based decomposed earthquake records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **149** (106865).
 53. Kamgar, R., Dadkhah, M., and Naderpour, H. (2022) Earthquake-induced nonlinear dynamic response assessment of structures in terms of discrete wavelet transform. *Structures*, Elsevier, 821-847.
 54. Zandi, S. (2009) *Fluid-Structure Interaction Analysis Using Exponential Basis Functions without Lagrangian Grid Method*. Isfahan University of Technology.
 55. Mallat, S. (1999) *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Elsevier. Place.
 56. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., et al. (1996) *Wavelet Toolbox User's Guide*. The Math Works Inc.
 57. Ghods, A. and Esfahani, M. (2011) Seismic Response and Free Vibration of Rectangular Liquid Storage Tanks. *Modares Civil Engineering Journal*, **11**(2), 43-53 (in Persian).
 58. Chen, Y.H., Hwang, W.S. and Ko, C.H. (2007) Sloshing behaviours of rectangular and cylindrical liquid tanks subjected to harmonic and seismic excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **36**(12), 1701-1717.
 39. Salajegheh, E., Heidari, A., and Saryazdi, S. (2005) Optimum design of structures against earthquake by discrete wavelet transform. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **62**(15), 2178-2192.
 40. Heidari, A. and Salajegheh, E. (2006) Time history analysis of structures for earthquake loading by wavelet networks. *Asian Journal of Civil Engineering*, **7**(2).
 41. Salajegheh, E. and Heidari, A. (2007) Approximate dynamic analysis of structures for earthquake loading using FWT. *International Journal of Engineering*, **20**(1), 37-47.
 42. Heidari, A. (2010) Optimum design of structures for earthquake induced loading by genetic algorithm using wavelet transform. *Advances in Applied Mathematics & Mechanics*, **2** (107-117).
 43. Heidari, A. and Raeisi, J. (2018) Optimum design of structures against earthquake by simulated annealing using wavelet transform. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, **2**(4), 23-33.
 44. Kamgar, R., Dadkhah, M., and Naderpour, H. (2021) Seismic response evaluation of structures using discrete wavelet transform through linear analysis. *Structures*, Elsevier, 863-882.
 45. Heidari, A. and Majidi, N. (2021) Earthquake acceleration analysis using wavelet method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **20**(1), 113-126.
 46. Shabankhah, S., Heidari, A., and Kamgar, R. (2021) Optimum level of discrete wavelet decomposition for dynamic analysis of hydraulic structures. *Iran University of Science & Technology* **11**(4), 631-646.
 47. Shahriari, B. and Majidi, N. (2022) Combining Discrete Wavelet Transform and Strong Ground Motion Duration to Reduce Computational Costs in Dynamic Analysis of Structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
 48. Heidari, A., Pahlavan sadegh, S., and Raeisi, J. (2019) Investigating the Effect of Soil Type on Non-linear Response Spectrum Using Wavelet Theory. *International Journal of Civil Engineering*, **17**(12), 1909-1918.
 49. Kamgar, R., Majidi, N., and Heidari, A. (2020) Wavelet-based decomposition of ground

واژه‌نامه

- 1- لمبرزدگی
Sloshing
- 2- تبرید شبیه‌سازی شده
Simulated Annealing

Using the Fundamental Solution Method and Discrete Wavelet Transform to Reduce the Computational Costs in the Analysis of Rectangular Water Tanks under the Effect of Earthquake Loading

Noorollah Majidi¹, Sayed Mahdi Zandi^{2*} and H. Tajmir Riahi³

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran,
*Corresponding Author, email: s.m.zandi@eng.ui.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Water tanks as vital structures play an important role in drinking water supply and safety after an earthquake. Therefore, studying and understanding the behavior of these structures against earthquake load in order to accurately design these structures is important to engineers. The use of numerical modeling to solve such problems has many applications. Despite the high accuracy of methods such as the finite element method, these methods impose a high computational cost on users. In fact, one of the main challenges in solving problems related to the vibration behavior of water tanks against earthquakes is the high cost of its calculations. In this paper, a method called the method of fundamental solutions with pressure formulation is used to analyze this category of problems. The method used in this paper has a much lower computational cost than the finite element method. Another feature of this method is the possibility of using a large time step in calculations. For this purpose, discrete wavelet transform, which has been proposed in recent years as a suitable method for the down-sampling of discrete waves, is used. This means that in this method, in tanks with real dimensions, sometimes the solution time step can be considered with acceptable accuracy up to 0.16 seconds. For this purpose, first, the proposed method for laboratory results is validated and then the structure of a tank with real dimensions under the load of 10 earthquake records is analyzed. In this regard, each earthquake wave is filtered up to five stages. At each stage of the filter, two waves of approximation and detail are obtained. The number of points of each wave of approximation and detail is half the wave of the previous stage. Due to the fact that previous studies have shown that the frequency content of the main wave is closer to the approximate wave, so at each stage of the filter, the wave of details is omitted. In this way, the number of records in each stage of the filter is half of the previous stage. This means that in the first to fifth stages, the number of discrete points is halved, a quarter, an eighth, a sixteenth, and a thirty-second, respectively. Based on the results obtained from the analysis of the tank with real dimensions, it is determined that the error of base shear of the tank (as an important parameter in the design) can be ignored in all approximate waves. This error was less than 7% for all earthquake records and all approximate waves. Also, based on the results of this article, it can be said that in order to obtain the maximum height of the fluid, care must be taken in using approximate waves with more than two levels of the wavelet filter. Because the error created for this parameter increases dramatically with the increase in the number of wavelet filters. However, this increasing trend in earthquake records is very different. Of course, the approximate wave with one filter stage introduces a negligible error in almost all earthquake records. Also, approximate waves are successful in predicting the change in fluid height. Therefore, it can be concluded that if parameter of the base shear is required for analysis, the wavelet method can work well with an error of less than 5% by reducing the calculations by 32 times. On the other hand, based on the results obtained from this article, it seems that the wavelet method has limitations in obtaining the fluid height, especially at high levels of decomposition (A2 to A5). Finally, to summarize, it can be said that if the base shear is the desired parameter from the analysis, the results presented in this paper show that the use of this method can reduce the cost of calculations with appropriate accuracy in some earthquake records by more than 90%.

Keywords: Dynamic Analysis, Fundamental Solution Method, Wavelet Theory, Down Sampling, Water Tank.