

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مخازن بتنی زمینی در حالت سه بعدی تحت تحریکات لرزه‌ای گسل دور و نزدیک و اندرکنش خاک - سازه - سیال

جواد صادقی^۱، حسین رزاقی^۲

^۱کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه مؤسسه آموزش عالی پویندگان دانش

^۲مدرس مؤسسه آموزش عالی پویندگان دانش

چکیده

در مقاله حاضر مخزن بتنی زمینی در شرایط اندرکنش خاک-سازه-سیال با استفاده از نرم افزار Abaqus شبیه‌سازی شد. در این مدل‌سازی رفتار غیر خطی بتن با استفاده از مدل رفتاری پیشرفته Concrete damage plastic معرفی و جهت جلوگیری از انعکاس امواج لرزه‌ای مرز دور فونداسیون با استفاده از المان نامحدود استفاده گردید و اعتبار سنجی مدل عددی آنالیزهای حساسیت برای نوع و بعد المان و فواصل مرزی صورت گرفته است و در ادامه نتایج با مدل عددی مقاله کیانوش و همکاران (۲۰۱۰) مقایسه گردید. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در تحلیل‌های دینامیکی در این تحقیق سعی بر آن بوده تا با استفاده از روش قابلیت اطمینان، منحنی شکست برای مخازن بتنی ذخیره سیال تعیین گردد. برای این منظور از بیشینه شتاب زلزله PGA به عنوان پارامتر تعریف کننده شدت زلزله و از دو شاخص خرابی کرنش ترک خوردگی بتن (به عنوان شاخص خرابی کم) و کرنش ترک خوردگی بتن (شاخص خرابی شدید) استفاده می‌شود. جهت ارزیابی لرزه‌ای از ۲۰۰ شتاب نگاشت‌های واقعی و مقیاس شده حوزه دور و نزدیک گسل بکار گرفته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده منحنی شکست برای دو شاخص خرابی تعریف شده و میدان زلزله ترسیم و گزارش گردید. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که احتمال خرابی سطحی و خرابی شدید بتن برای دامنه بیشینه شتاب‌هایی حوزه نزدیک نسبت به دامنه شتاب نگاشت‌های حوزه دور بحرانی‌تر است. حد قابلیت اطمینان برای خرابی سطحی بدنه مخزن برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور به ترتیب ۰/۴G و ۰/۶G بدست آمده است. که افزایش بیش از ۶۰ درصدی پاسخ سازه را برای زلزله‌های حوزه دور نشان می‌دهد. برای خرابی شدید برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور به ترتیب ۱G و ۱/۳G گزارش شده است که افزایش ظرفیت ۳۰ درصدی پاسخ لرزه-ای مخزن را برای شتاب نگاشت‌های دور نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مخزن ذخیره آب، اندرکنش خاک-سازه-سیال، منحنی شکست مخازن بتنی، شبیه‌سازی عددی، ارزیابی لرزه‌ای مخازن بتنی

مقدمه

مخازن ذخایر مایع از جمله سازه‌های با اهمیت بالا می‌باشد که برای مقاصدی چون ذخیره‌سازی آب شرب شهری، اطفا حریق و جهت خدمات آبرسانی و یا مخازن ذخیره نفتی، پتروشیمی مواد سمی بکار گرفته می‌شود. این مخازن به صورت مدفون، نیمه مدفون، سطحی و هوایی و تحت فشار طبقه‌بندی شده که معمولاً به صورت بتنی و فلزی اجرا می‌گردند در شکل ۱ نمونه‌ای از این مخازن آمده است [۲].

بواسطه اندرکنش حاکم میان سیال و مخزن در هنگام بارگذاری لرزه‌ای، ارزیابی پاسخ دینامیکی این سازه‌ها با پیچیدگی‌هایی روبرو است. بر اساس تحقیقات گذشته هنگامیکه مخازن ذخیره سیال در مقابله با شتاب‌های افقی قرار می‌گیرند قسمت سطحی سیال دچار اسلاشینگ شده و بخش تحتانی سیال داخل مخزن به صورت صلب عمل می‌کند. از اینرو محققین جهت نیروهای وارد بر دیواره و کف مخزن را بر اساس مایع سخت تحتانی و مایع موج سطحی را پیشنهاد دادند. بخش تحتانی سیال و بخش سطحی سیال به ترتیب به دیواره و مخزن فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای و فشار هیدرودینامیکی انتقالی وارد می‌کنند. آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مختلفی بر اساس روابط پیشنهادی محققین تدوین شده است. علی‌رغم تحقیقات گسترده در این زمینه متأسفانه در زلزله‌های سال‌های اخیر آسیب جدی به این مخازن وارد شده است که نشان از ضعف در روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها بوده و لزوم تحقیقات و بررسی بیشتر در شناخت هر چه بیشتر پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها را نشان می‌دهد. در اکثر روابط پیشنهاد شده از سوی محققین و آیین‌نامه‌ها از مدل فنر جرمی^۱ استفاده شده است.



1. Sprin mass model



شکل ۱- تصویر مخازن زمینی و هوایی ذخیره مایعات

همانطور که ذکر شد مخازن ذخیره سیال بتنی سازه‌های صنعتی محسوب می‌شوند که در ابعاد و اشکال مختلف جهت ذخیره و نگهداری سوخت مایع، تاسیسات نفتی و گازی و ذخیره سازی آب بکار گرفته می‌شوند. با توجه به خسارات وارد بر این سازه‌ها در زلزله‌های اخیر در این پژوهش با استفاده از روش اجزا محدود به کمک نرم افزار Abaqus به بررسی عملکرد لرزه-ای مخازن بتنی ذخیره سیال تحت تحریکات لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک با بالاترین دقت شبیه‌سازی یعنی در فضای سه بعدی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه-سیال و رفتار غیر خطی مصالح می‌پردازیم. برای این منظور جهت شبیه‌سازی سیال از المان آکوستیک استفاده می‌شود و رفتار غیر خطی بتن مخزن با مدل رفتاری Concrete damage plastic تعریف می‌گردد.

علی‌رغم وجود آیین‌نامه‌های مختلف طراحی مخازن بتنی آب متاسفانه شاهد آسیب‌های جدی به این سازه تحت زلزله‌های سال‌های اخیر بوده‌ایم. با توجه به قرارگیری ایران در کمربند لرزه خیز آلپ-همیمالیا و وقوع زلزله‌های مخرب در سال‌های اخیر در کشورمان در تحقیق حاضر بر آن شدیم تا با استفاده از ابزار قدرتمندی چون روش اجزا محدود و بکارگیری بالاترین عوامل موثر در شبیه‌سازی عددی چون: رفتار غیر خطی مصالح، اندرکنش خاک-سازه-سیال و همچنین تحریکات حوزه دور و نزدیک زلزله به بررسی دقیق و جامع رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها نائل گردیم و از نتایج پژوهش حاضر بتوان به عنوان تحقیق کاربردی در این زمینه استفاده نمود.

اهداف پژوهش

هدف اصلی تحقیق عبارت است از بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن بتنی در حالت سه بعدی و مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه طراحی مخازن می‌باشد. برای این منظور از پیشرفته‌ترین روش‌های عددی جهت شبیه‌سازی استفاده می‌گردد و تاثیر محتویات فرکانسی زلزله و حوزه میدان زلزله بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مورد آزمون و مقایسه قرار می‌گیرد. تا با مقایسه نتایج حاصله علاوه بر ارزیابی دقت روابط پیشنهاد شده تاثیر حوزه میدان زلزله بر این سازه‌ها بررسی گردد. همچنین اهداف فرعی پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن بتنی در حالت سه بعدی تحت اندرکنش خاک-سازه-سیال.
- بررسی رفتار مخازن بتنی تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل.
- بررسی رفتار مخازن بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک از گسل.
- تعیین عملکرد مخازن با استفاده از روابط پیشنهادی.
- مقایسه نتایج عددی و روابط آیین‌نامه.

فرضیات تحقیق

فرضیات مورد استفاده در تحقیق حاضر عبارتند از:

- روش اجزا محدود قادر است مسئله اندرکنش خاک- مخزن- سیال را شبیه‌سازی نماید.
- عملکرد سازه‌ها تحت شتاب نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک متفاوت است.
- سیال داخل مخازن تحت بارگذاری لرزه‌ای، نیروهای ضربه‌ای و موجی به دیواره و کف مخزن وارد می‌نماید.
- عواملی چون رفتار غیر خطی مصالح، اندرکنش سطوح و محتویات فرکانسی و حوزه میدان زلزله بر پاسخ و عملکرد لرزه‌ای مخازن موثر است.
- المان آکوستیک قادر است فشار هیدرو دینامیکی سیال داخل مخزن شبیه‌سازی نماید.
- رفتار بتن پلاستیک آسیب دیده قادر است رفتار چرخه‌ای و ترک ناشی از کشش و فشار بتن را مدل‌سازی نماید.

بررسی تحقیقات گذشته

ژاکوبسن (۱۹۴۹) با توسعه مطالعات وسترگاد فشار هیدرو دینامیکی مخزن استوانه‌ای را تحت شتاب افقی بدست آورد. در این تحقیق جداره و کف مخزن به صورت صلب در نظر گرفته شد و تنهای شتاب‌های افقی مورد مطالعه قرار گرفت. در گراف‌ها و روابط پیشنهادی ایشان اثر اسلاشینگ سطح سیال صرفنظر شده است و سیال به صورت غیر ویسکوز و غیر قابل تراکم لحاظ شده است [۲۸].

بر اساس مطالعات هاووزنر (۱۹۵۴) مشخص گردید فشار هیدرو دینامیکی سیال مخازن ناشی از دو بخش نوسانی (convective) و بخش ضربانی (impulsive) سیال می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از این مقاله مشخص گردید بخش نوسانی دارای نوسانات پرپود بلند بوده در حالیکه بخش مایع سخت بر برش پایه مخزن موثر است و به صورت جسمی صلب عملکرده و مطابق با تحریکات وارده نوسان می‌کند [۲۵].

هانزور (۱۹۵۷) بدون استفاده از معادلات دیفرانسیل پیچیده بر اساس روشی مبتنی بر سری‌های نامتناهی روابطی جهت پاسخ لرزه‌ای مخازن پیشنهاد نمود و توانست مقدار نیروهای حاصل از جرم مایع سخت و نوسانی محاسبه نماید. ایشان در (۱۹۸۲) با استفاده از روش اجزا محدود و با فرض رفتار الاستیک دیواره مخزن عملکرد لرزه‌ای را بررسی نمودند. در این روش سیال را غیر ویسکوز و تراکم ناپذیر و دیواره مخزن را انعطاف‌پذیر فرض نموده و از پدیده اسلاشینگ صرفنظر گردید. بدین ترتیب فرکانسهای طبیعی و مود شکل‌های ارتعاش سیستم درگیر پوسته-سیال را محاسبه کردند [۲۶-۲۷].

نرم افزار آباکوس

نرم افزار آباکوس یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به روش اجزا محدود می‌باشد و از تحلیل‌های ساده تا پیشرفته را به نحو شایانی انجام می‌دهد و با توجه به محیطی کار پسند نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه در سال‌های اخیر کاربران زیادی را به خود جذب کرده است. نرم افزار آباکوس قابلیت تحلیل سازه‌های فلزی، بتن ارمه، سیالات، انتقال حرارت، اندرکنش اب و سازه، اندرکنش خاک سازه، خزش اعم استاتیکی خطی و غیر خطی و نیز دینامیکی خطی و غیر خطی را دارد. این نرم افزار شامل سه محصول اصلی Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit, Abaqus/CFD بوده و علاوه بر سه محصول ذکر شده از محصولات متنوع مکملی که برای موارد خاص استفاده می‌شود تشکیل شده است. Abaqus/Standard اصلی‌ترین محصول این نرم افزار است که قابلیت تحلیل‌های خطی و غیر خطی استاتیکی، حرارتی و ... را دارد. Abaqus/Explicit قابلیت انجام تحلیل‌های خطی و غیر خطی دینامیکی و شبه استاتیکی مانند: ظرفیت باربری، تحلیل‌های لرزه‌ای، ارتعاشات، انفجار و ... را دارد. Abaqus/CFD محصولی برای تحلیل دینامیکی سیالات می‌باشد و می‌تواند طیف وسیعی از مسائل سیالات تراکم ناپذیر شامل جریان‌های لایه‌ای و آشفته، جریان‌های همرفتی حرارتی را انجام دهد. در

شاخه‌های مختلف مهندسی روش‌های متنوعی برای حل مسائل وجود دارند یکی از وجوه اشتراک کلیه تحلیل‌های مهندسی فرایند منطقی حل مسئله و تفسیر نتایج حاصله است که تحلیل به کمک نرم افزار آباکوس نیز از این قاعده مستثنی نیست. فرایند تحلیل کامل از سه مرحله کلی پیش پردازش^۲، شبیه‌سازی^۳، پس پردازش^۴ تشکیل شده است. در شکل ۲ نحوه ارتباط مراحل مختلف تحلیل و فایل‌های اتصال این مراحل را نشان می‌دهد [۴].



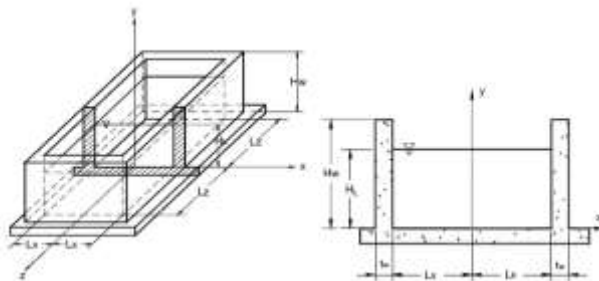
شکل ۲- مراحل تحلیل و فایل‌های اتصال در نرم افزار آباکوس [۴]

در مرحله پیش پردازش مدل فیزیکی مسئله ساخته و یک فایل ورودی برای آن تهیه می‌شود. این مدل معمولاً به صورت گرافیکی در Abaqus/Standard یا دیگر برنامه‌ها که برای پیش پردازش وجود دارند ساخته می‌شود. همچنین می‌توان از طریق کدنویسی یا برنامه نویسی فایل ورودی Abaqus/CAE را بطور مستقیم برای پردازش وارد مرحله شبیه‌سازی کرد. مرحله شبیه‌سازی در واقع جهت پروسه پردازش مدل ایجاد شده است و مسائل عددی تعریف شده در مرحله قبلی را تحلیل و به مرحله پس پردازش منتقل می‌کند. بر اساس پیچیدگی مدل و توان پردازشگر رایانه مورد استفاده جهت پردازش مدل، مدت زمان پردازش می‌تواند از چند صدم ثانیه تا چندین روز به طول انجامد. البته زمان تحلیل بسیار متأثر از قدرت پردازشگر رایانه مورد استفاده می‌باشد. در مرحله پیش پردازش می‌توان نتایج را پس از تکمیل شبیه‌سازی در مرحله پردازش و محاسبه تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و دیگر متغیرهای پایه پردازش شوند. در این نرم افزار امکانات مختلفی نظیر کانتورهای رنگی، انیمیشن‌ها و پلات‌های تغییر شکل مدل برای نمایش نتایج موجود است و قابلیت ترسیم نمودارهای تاریخچه زمانی و موقعیتی فراهم است [۴].

مدل‌سازی عددی

در این تحقیق مخزن سه بعدی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه-سیال در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی می‌شود. نرم افزار آباکوس دارای ماژول‌های مختلفی است که هر یک وظیفه خاصی از مدل‌سازی را بر عهده دارند. اولین گام برای انجام یک مدل و تحلیل ایجاد هندسه مدل می‌باشد ماژول Part عهده‌دار ترسیم هندسه مسئله است. ابزارهای موجود در این ماژول ساخت انواع مدل‌های پیچیده خطی، منحنی، دوبعدی و سه بعدی را فراهم می‌سازد. لازم به ذکر است کاربر نرم افزار آباکوس برای معرفی متریکال و ابعاد هندسه باید از سیستم واحدی استفاده نماید. برای مدل‌سازی باید هندسه مخزن، سیال، بستر

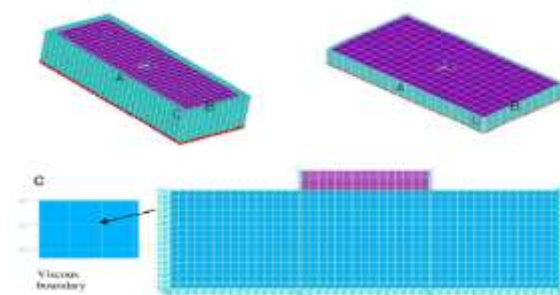
محدود و نامحدود مدل سازی شود. به منظور کنترل نتایج ابعاد مخزن مطابق مخزن مطالعات کیانوش و قائم مقامی (۲۰۱۱) ترسیم می شود. در شکل ۳ و جدول ۱ مشخصات هندسی مسئله و مصالح گردآوری شده است و در شکل ۴ نحوه مدل سازی کیانوش و قائم مقامی (۲۰۱۱) آمده است [۳۲].



شکل ۳- شرایط هندسی مخزن مورد مطالعه [۳۲]

جدول ۱- مشخصات مصالح و شرایط هندسی مخزن [۳۲]

مشخصات مصالح				
ضریب پواسون بتن	مدول یانگ بتن	دانسیته آب	دانسیته بتن	
ν	$E(\text{GPa})$	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	$\rho_c(\text{kg/m}^3)$	
۰/۱۷	۲۶/۴۴	۱۰۰۰	۲۳۰۰	
شرایط هندسی مخزن				
$L_x(\text{متر})$	$L_z(\text{متر})$	$H_w(\text{متر})$	$H_L(\text{متر})$	$t_w(\text{متر})$
۱۵	۳۰	۶	۵/۵	۰/۶



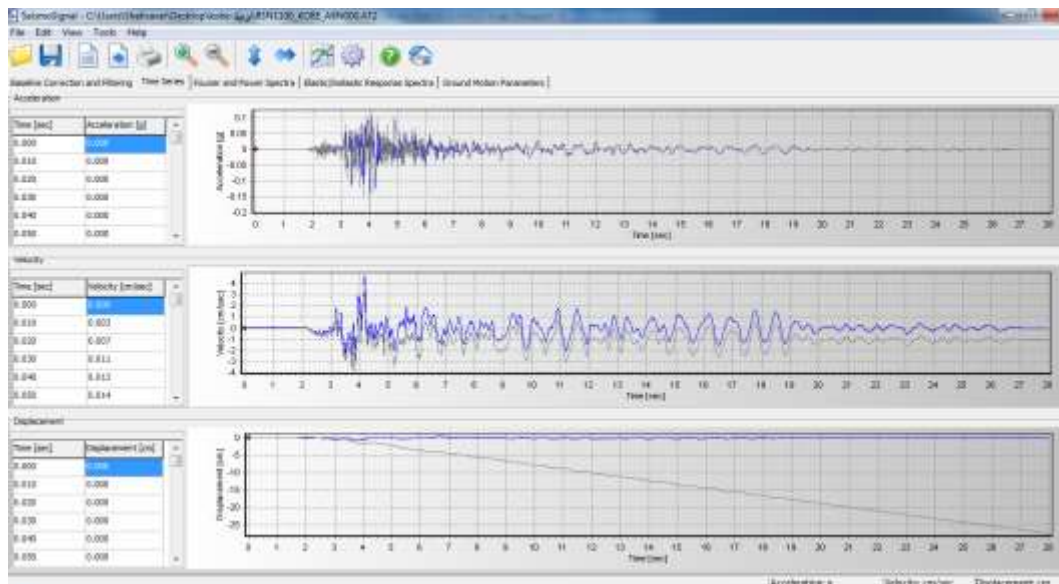
شکل ۴- مدل سازی کیانوش و قائم مقامی (۲۰۱۱) [۳۲]

در شبیه سازی مسائل با اندرکنش بستر باید در مرز دور بستر از مرزهای جاذب انرژی استفاده نمود. در مدل سازی به روش اجزا محدود در مرز دور بستر از انواع مرزهای جاذب انرژی جهت میرایی انرژی زلزله و جلوگیری از بازگشت امواج لرزه ای استفاده می شود [۳۷].

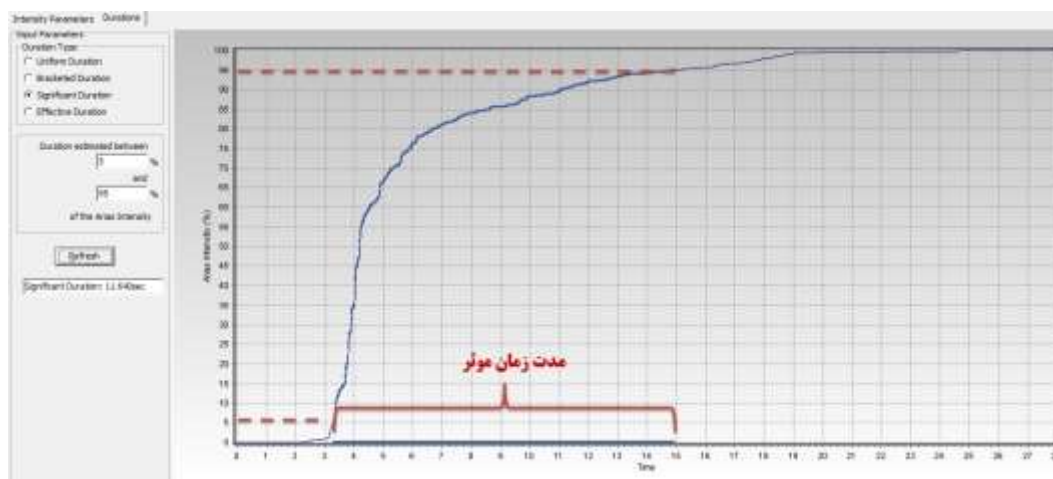
بارگذاری و اصلاح شتاب نگاشت‌ها

شتاب نگاشت‌های خام از سایت دانشگاه پیر گزینش می‌شوند. این سایت از معتبر مراجع رکوردهای زلزله می‌باشد. با توجه به اینکه خط صفر در تاریخچه جابجایی رکورد خام صفر می‌باشد بکارگیری از فرمت خام شتاب نگاشت‌ها در نرم افزار آباکوس منجر به بروز خطا و واگرایی تحلیل می‌گردد. همچنین در صورتیکه شتاب نگاشت‌ها مقیاس و همپایه نشوند نمی‌توان قضاوت مناسبی با مقایسه نتایج عددی انجام دهیم. به کمک نرم افزار SeismoSignal این اصلاحات انجام میشود. تحلیل‌های لرزه-ای جهت کاهش زمان تحلیل نرم افزار، از زمان موثر استفاده می‌شود. زمان موثر بازه‌ایست که در آن جنبش‌های اصلی بوقوع می‌پیوندد و می‌توان بجای اعمال کل زمان زلزله در شبیه‌سازی عددی تنها زمان موثر زلزله به عنوان ورودی شتاب‌ها به مدل اعمال گردد. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار SeismoSignal زمان موثر بر اساس آریاس ۵ الی ۹۵ درصد تعیین می‌شود. به راحتی می‌توان با تعیین محدوده آریاس، زمان موثر شتاب زلزله را تعیین نمود. در شکل ۶ نمونه‌ای از تعیین زمان موثر زلزله آمده است [۱۴].

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a(t)^2 dt \quad (۲۲-۴)$$



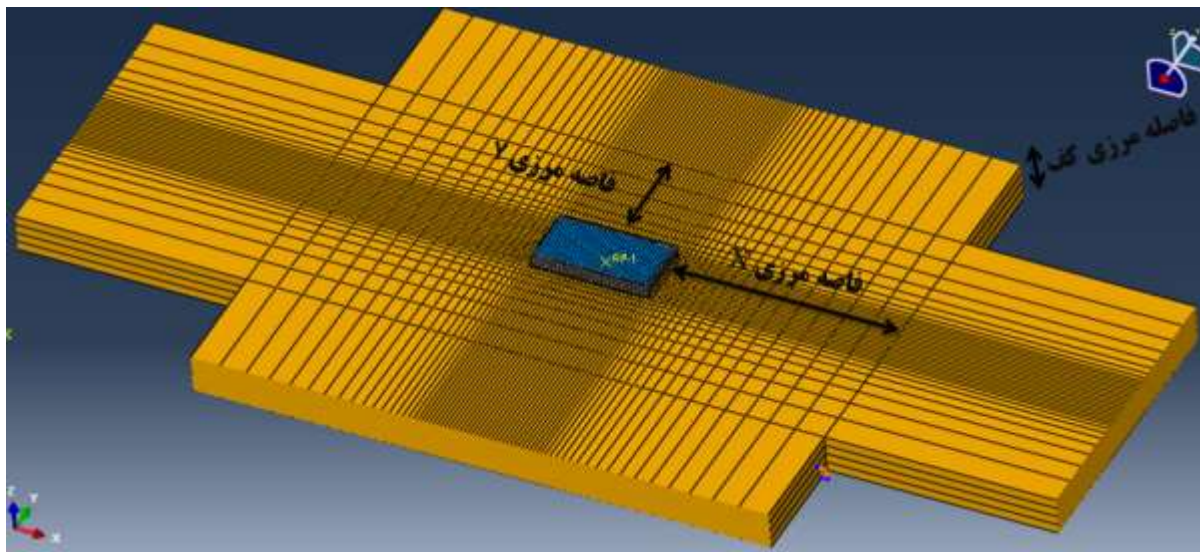
شکل ۵- اصلاح خطوط مبنا شتاب نگاشت در نرم افزار Seimosignal



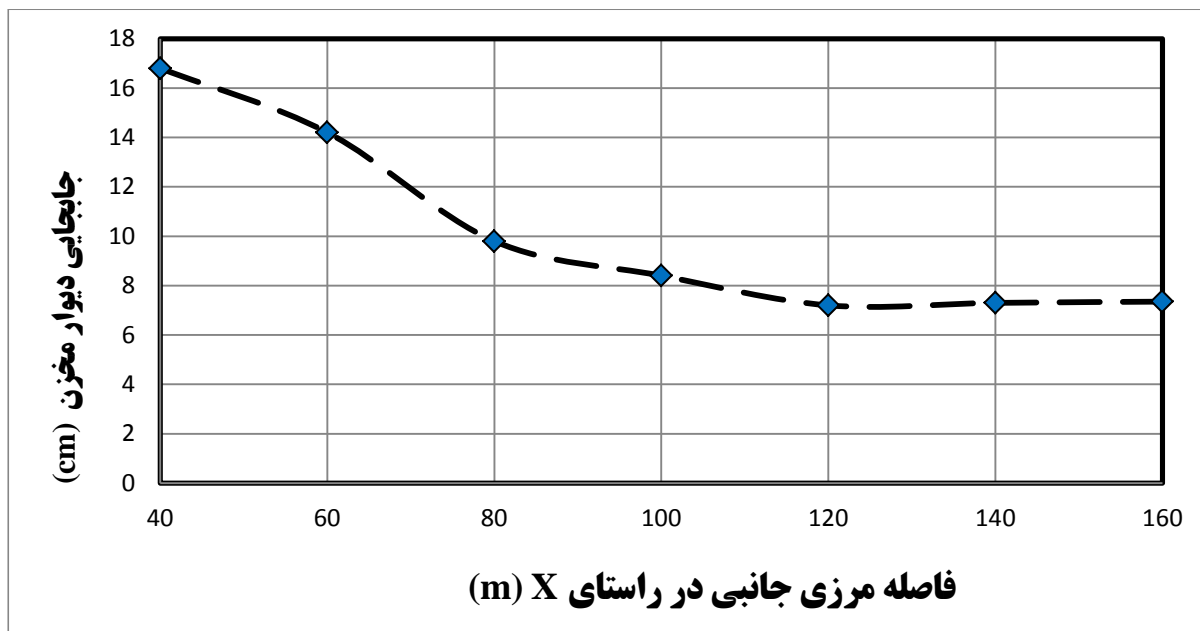
شکل ۶- تعیین زمان موثر توسط نرم افزار Seismosignal

اعتبار سنجی مدل عددی

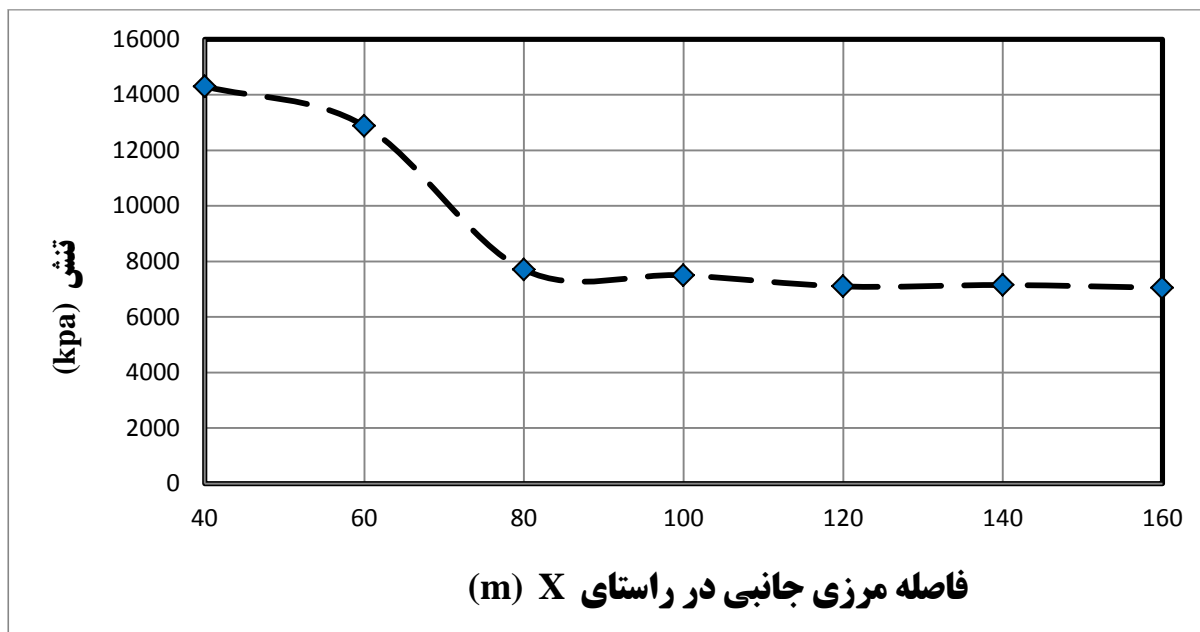
در شبیه‌سازی عددی جهت اطمینان از صحت نتایج مدل باید آنالیزهای مختلفی صورت پذیرد. در مسائلی که با اندرکنش خاک-سازه همراه هستند فواصل مرزی بر نتایج عددی تاثیرگذار هستند بنابراین باید در این مسائل تحلیل همگرایی فاصله مرزی انجام شود. توضیح آنکه در صورتیکه فاصله مرزی جانبی و کف بستر از مقداری مشخص کمتر باشند نمی‌توان به صحت نتایج عددی حاصله اعتماد کرد و از سوی دیگر در صورتیکه فواصل مرزی از یک مقدار معین بیشتر باشند نتایج عددی صحیح هستند ولی زمان تحلیل نرم افزار طولانی خواهد شد. لذا باید فاصله مرزی مناسب به صورتی تعیین گردد که از یک طرف نتایج قابل قبول باشند و از سوی دیگر زمان تحلیل مسئله بهینه شود. فواصل مرزی که در این تحقیق مورد آنالیز قرار گرفتند در شکل ۷ آمده است. لازم به ذکر است طول المان‌های نامحدود در دو جهت X و Y بنابر توصیه ادبیات فنی نصف کل طول بستر محدود لحاظ گردید و طول این مرزها مورد آنالیز حساسیت قرار نگرفته است. در گراف‌ها تحلیل حساسیت برای هر یک از مرزهای ذکر شده مشاهده می‌شود و خلاصه نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۲ آمده است. فاصله مرزی مناسب در جهت X و Y به ترتیب ۱۲۰ و ۶۰ متر تعیین شده است و فاصله مرزی از کف بستر ۵۰ متر بدست آمده است. بنابر گزارش حاضر فاصله مرزی جانبی مناسب تقریباً دو برابر طول محدود بدست آمده است.



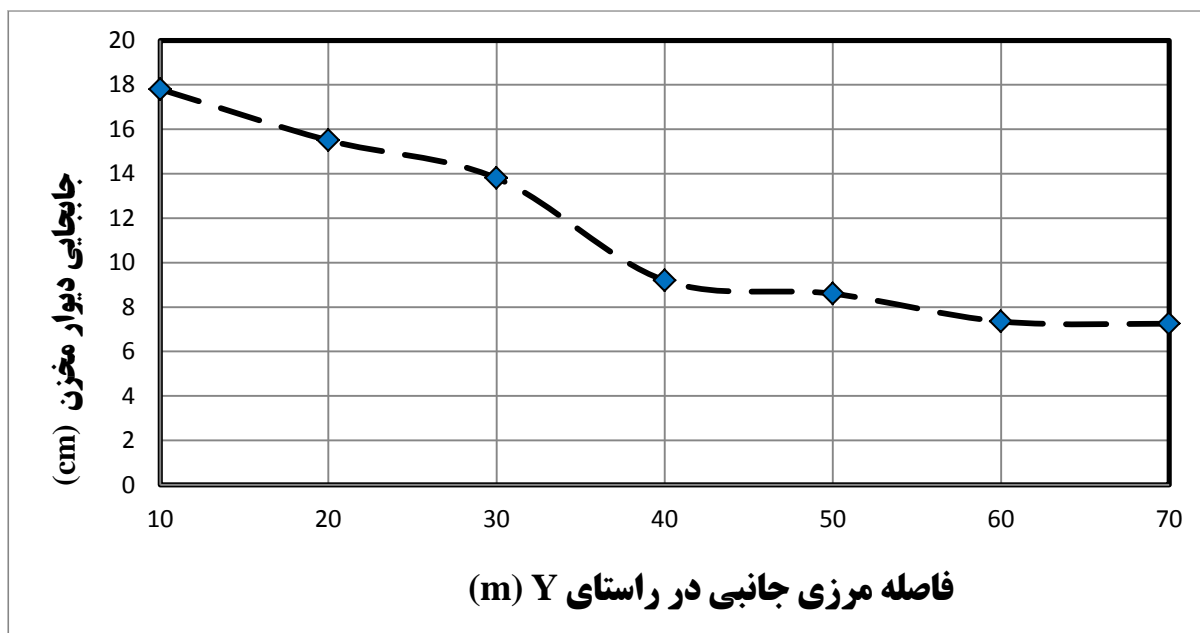
شکل ۷- فواصل مرزی مورد بررسی در آنالیز حساسیت



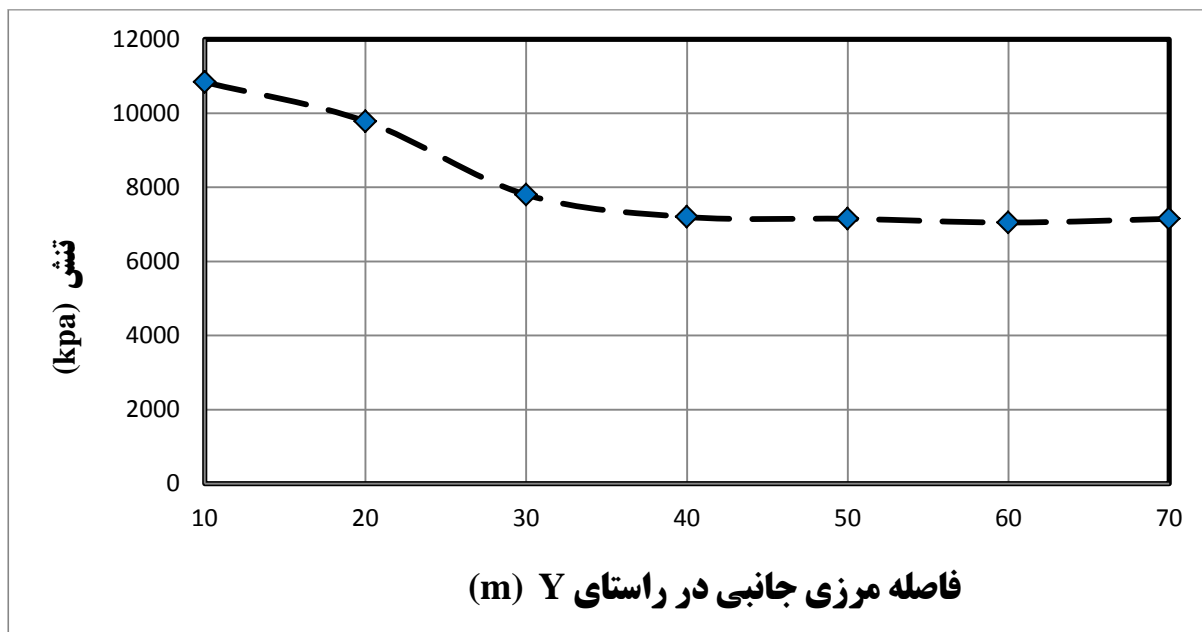
شکل ۸- آنالیز حساسیت فاصله جانبی بستر در جهت X بر اساس جابجایی دیوار مخزن



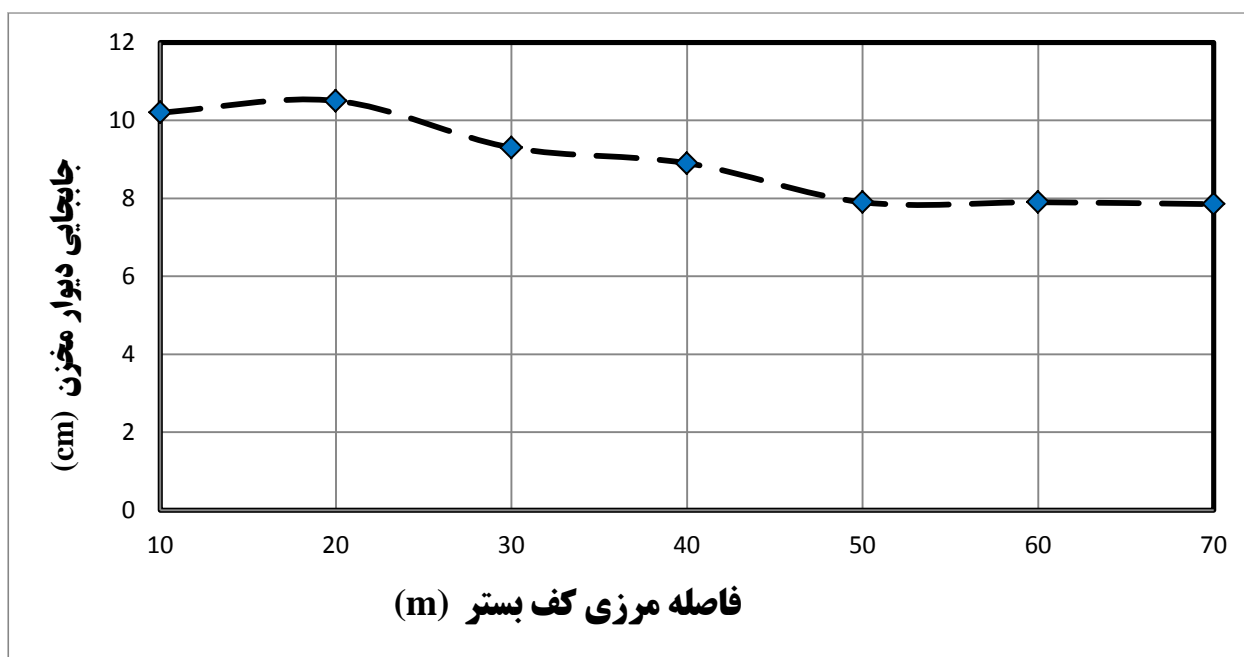
شکل ۹- آنالیز حساسیت فاصله جانبی بستر در جهت X بر اساس تنش وارد بر دیوار مخزن



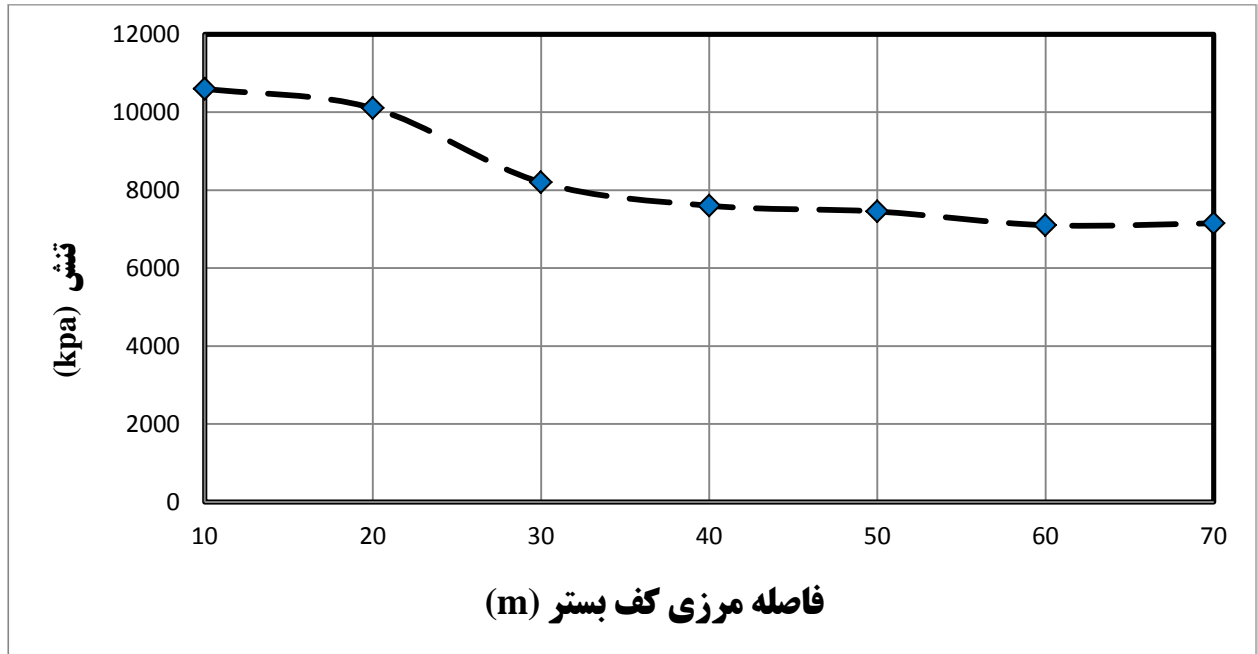
شکل ۱۰- آنالیز حساسیت فاصله جانبی بستر در جهت Y بر اساس جابجایی دیوار مخزن



شکل ۱۱- آنالیز حساسیت فاصله جانبی بستر در جهت Y بر اساس تنش وارد بر دیوار مخزن



شکل ۱۲- آنالیز حساسیت فاصله کف بستر بر اساس جابجایی دیوار مخزن

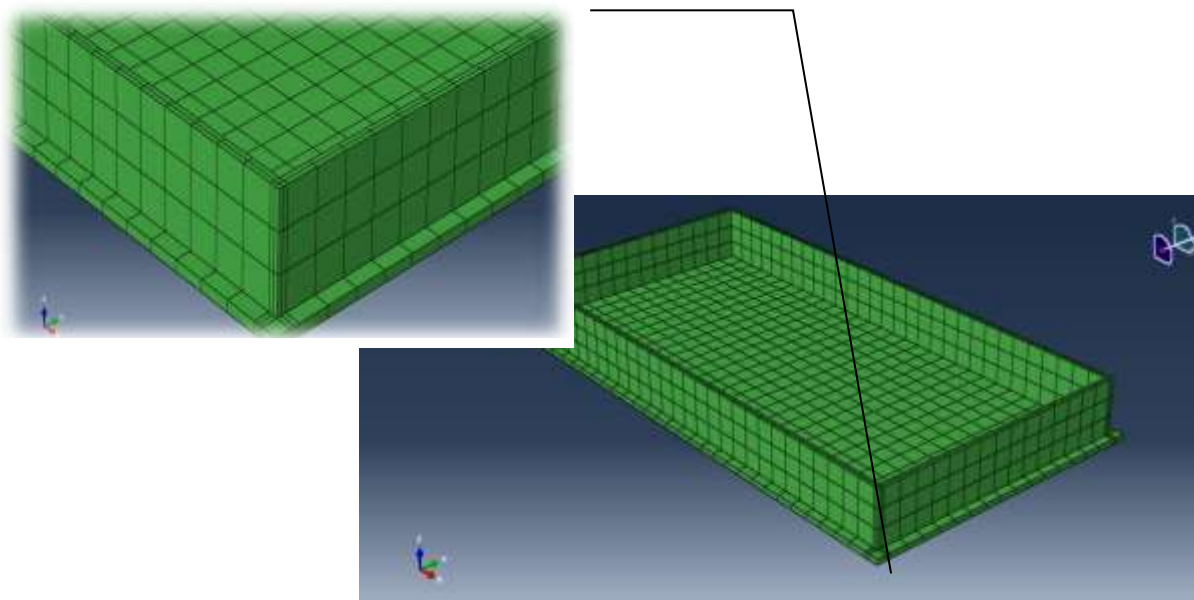


شکل ۱۳- آنالیز حساسیت فاصله کف بستر بر اساس تنش وارد بر دیوار مخزن

جدول ۲- مقادیر تعیین شده فواصل مرزی بر اساس تحلیل حساسیت

فاصله مرزی	فاصله مرزی معیار تنش (متر)	فاصله مرزی معیار جابجایی (متر)	فاصله مرزی بهینه (متر)
X جانبی بستر	۸۰	۱۲۰	۱۲۰
Y جانبی بستر	۴۰	۶۰	۶۰
کف بستر	۵۰	۴۰	۵۰

علاوه بر آنالیز فاصله مرزی، نوع و ابعاد المان مورد استفاده در تحلیل اجزا تاثیر بسزایی بر نتایج خواهد داشت بر این اساس نوع و طول بهینه المان مورد استفاده با استفاده تحلیل حساسیت نوع المان و تحلیل حساسیت بعد المان انجام می‌شود. مدل عددی حاضر شامل مخزن، آب و بستر می‌باشد. ابعاد بستر نامحدود مطابق با مراجع فنی نصف بستر محدود در نظر گرفته می‌شود بنابراین در جهت X و Y به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۶۰ متر اختیار شده است. تحلیل برای ابعاد مش مخزن و آب صورت گرفته است که ابعاد ۲ متر برای آنها مناسب می‌باشد. نکته قابل توجه در مش‌بندی دیوار مخزن این است که با توجه به اینکه دیوار بعد از اعمال بارگذاری تحت خمش قرار می‌گیرد بهتر است مطابق شکل ۴-۲۷ در راستای عرض دیوار از دو المان استفاده شود. در مدل حاضر با توجه به ابعاد بستر تعداد المان و گره‌های بستر تعیین کننده زمان تحلیل خواهد بود. انتخاب مش‌بندی مناسب بستر در محدود تماس مخزن با بستر در افزایش دقت مدل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا در اطراف محدوده اندرکنش از المان ریزتر و در مرزهای دور که فاصله قابل توجهی از بارگذاری مخزن بر بستر دارند، از مش‌بندی درشت‌تر استفاده می‌شود. لذا ابعاد کوچک‌ترین طول المان در محدوده بستر یکسان در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۲۹ و جدول ۳ نتایج تحلیل حساسیت کوچک‌ترین بعد المان با استفاده از دو المان C3D8 و C3D8R با طول‌های ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ و ۰/۵ گردآوری شده است.

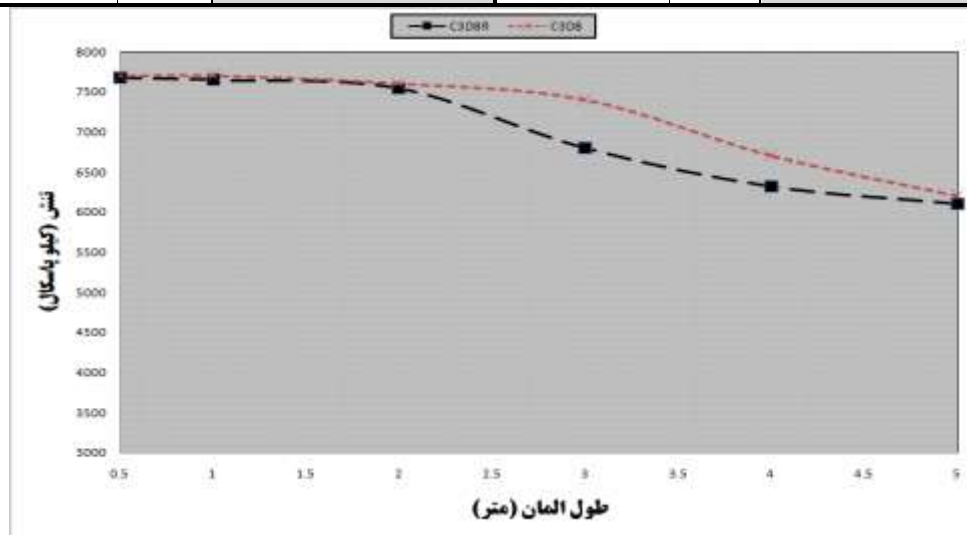


شکل ۱۴- مش بندی دیوار مخزن

جدول ۳- المان های مورد استفاده در تحلیل حساسیت کوچک ترین المان بستر

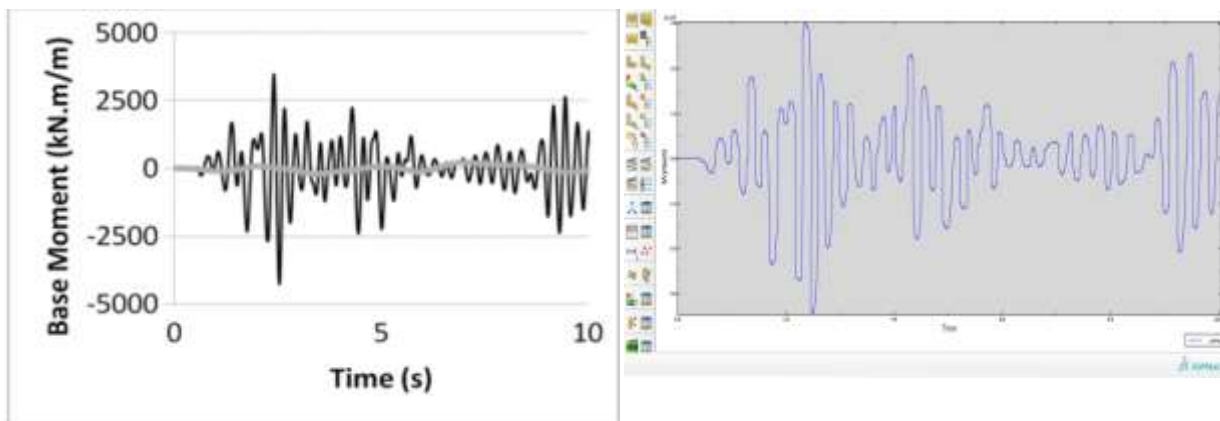
C3D8R	المان سه بعدی ۸ گره ای با فرمولاسیون انتگرال گیری کاهش یافته		C3D8	المان سه بعدی ۸ گره ای با فرمولاسیون انتگرال گیری کامل	
زمان تحلیل ۴۱۴۰	۵	اندازه تقریبی (m)	زمان تحلیل ۵۱۷۰	۵	اندازه تقریبی (m)
زمان تحلیل ۳۵۵۰	۴	اندازه تقریبی (m)	زمان تحلیل ۴۷۶۰	۴	اندازه تقریبی (m)
زمان تحلیل ۲۶۳۰	۳	اندازه تقریبی (m)	زمان تحلیل ۳۳۳۰	۳	اندازه تقریبی (m)
زمان تحلیل ۲۰۶۰	۲	اندازه تقریبی (m)	زمان تحلیل ۲۶۸۰	۲	اندازه تقریبی (m)
زمان تحلیل	۱	اندازه تقریبی (m)	زمان تحلیل	۱	اندازه تقریبی (m)

۱۵۰۰			۱۹۸۰		
زمان تحلیل	۰/۵	(m)اندازه تقریبی	زمان تحلیل	۰/۵	(m)اندازه تقریبی
۱۲۶۰			۱۶۰۰		



شکل ۱۵- تحلیل حساسیت طول کوچک‌ترین المان بستر و نوع المان بستر

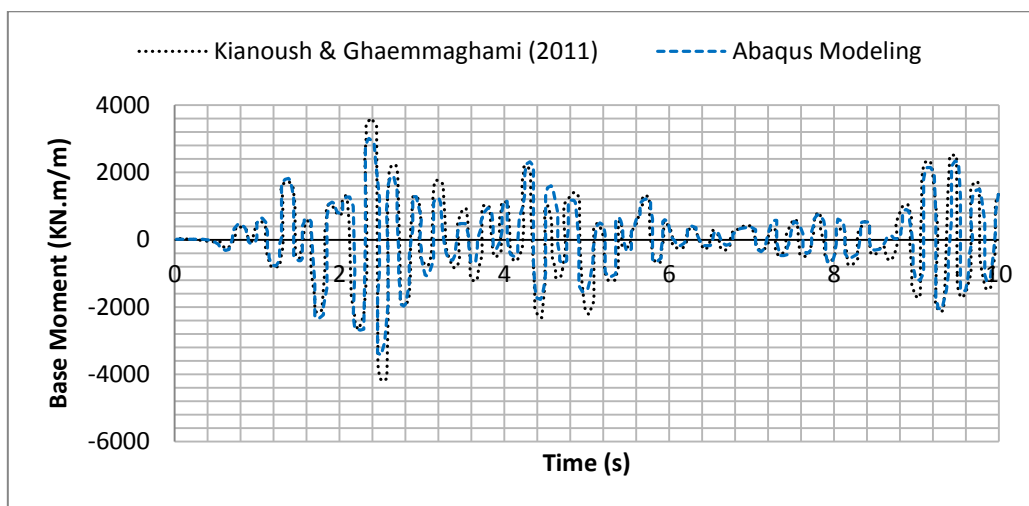
مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود برای مش‌بندی با المان‌های C3D8R همگرایی نتایج برای المان‌های با طول کمتر از ۲ متر بدست آمده است و برای مش‌بندی با المان‌های C3D8 همگرایی برای المان‌های کمتر از ۳ متر گزارش شده است. بنابراین برای المان‌های C3D8R و C3D8 بهینه‌ترین المان طول المان برای بستر در محدوده اندرکنش مخزن و بستر به ترتیب برابر ۲ و ۳ متر تعیین شده است. با توجه به جدول ۳ زمان تحلیل برای المان C3D8R با طول ۲ متر برابر ۲۰۶۰ ثانیه و برای المان C3D8 با طول ۳ متر زمان تحلیل ۳۳۳۰ ثانیه بدست آمده است لذا بهینه‌ترین المان جهت شبیه‌سازی بستر المان C3D8R با طول ۲ متر می‌باشد. لازم به ذکر است در فواصل دورتر از محدوده اندرکنش از المان‌های بزرگتر استفاده شده است. بعد از آنالیز حساسیت فاصله مرزی و آنالیز حساسیت المان نتایج با مدل عددی مقالات و مراجع معتبر مقایسه می‌شود. برای این منظور مدل عددی کیانوش و قائم مقامی (۲۰۱۱) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج مدل‌سازی به روش تحقیق و حاضر و نتایج مدل کیانوش و همکاران (۲۰۱۱) در شکل ارائه شده است مشاهده می‌شود خروجی نتایج مطابقت مناسبی داشته بطوری که فراز و فرودهای گراف‌ها مشابه بوده و ماکزیمم اختلاف نتایج کمتر از ۷ درصد بدست آمده است لذا می‌توان از مدل حاضری با اطمینان جهت شبیه‌سازی استفاده نمود. در ادامه نمونه‌ای کانتور رنگی از تنش‌های فن میسز وارد بر مخزن، کرنش‌های پلاستیک بدنه مخزن، نمایش برداری شتاب دو مولفه زلزله و فشار هیدرودینامیکی سیال در شکل‌های زیر برای نمونه‌های زمانی مختلف آمده است.



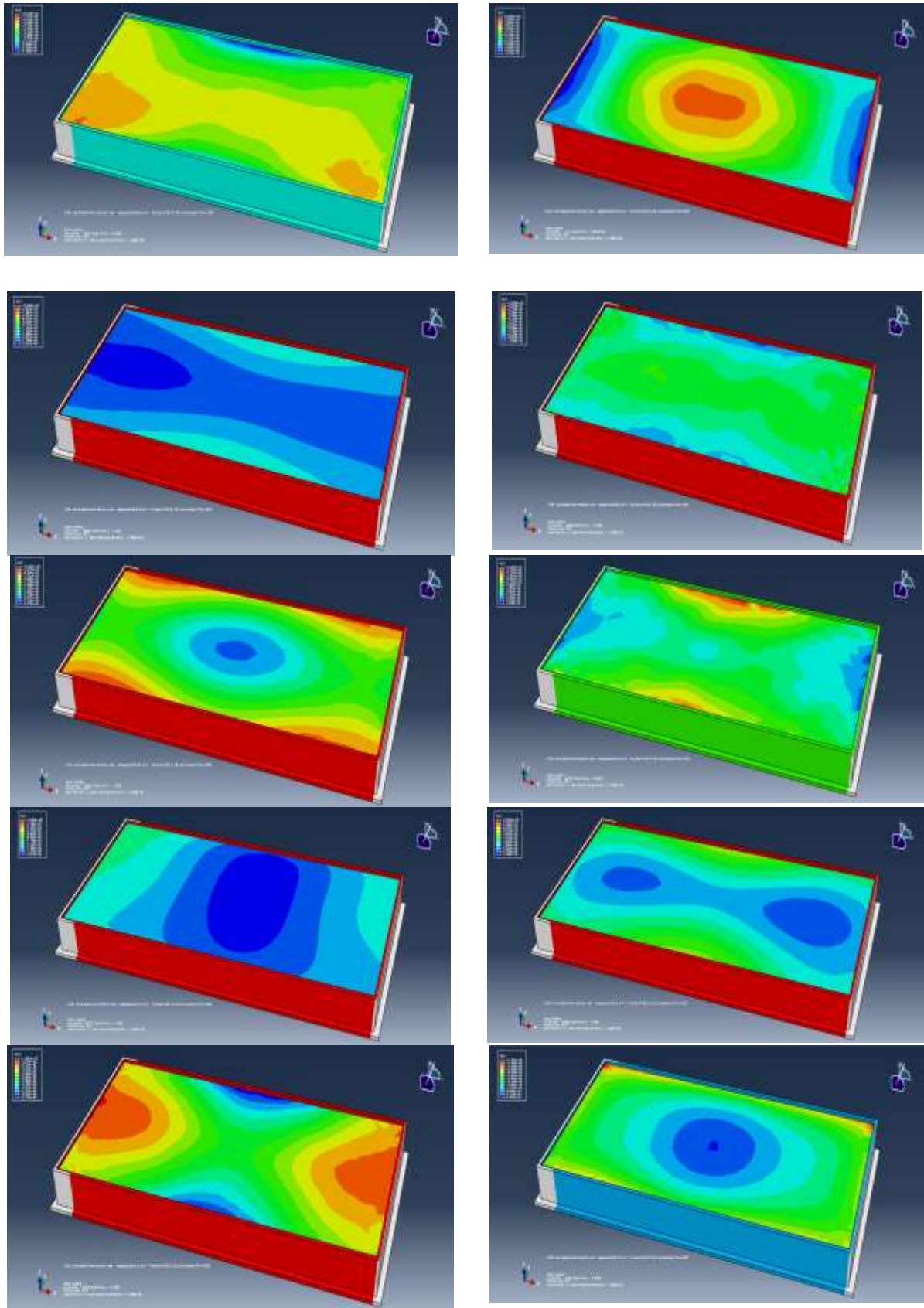
ب) مدل کیانوش و همکاران (۲۰۱۱)

Abaqus (الف) مدل

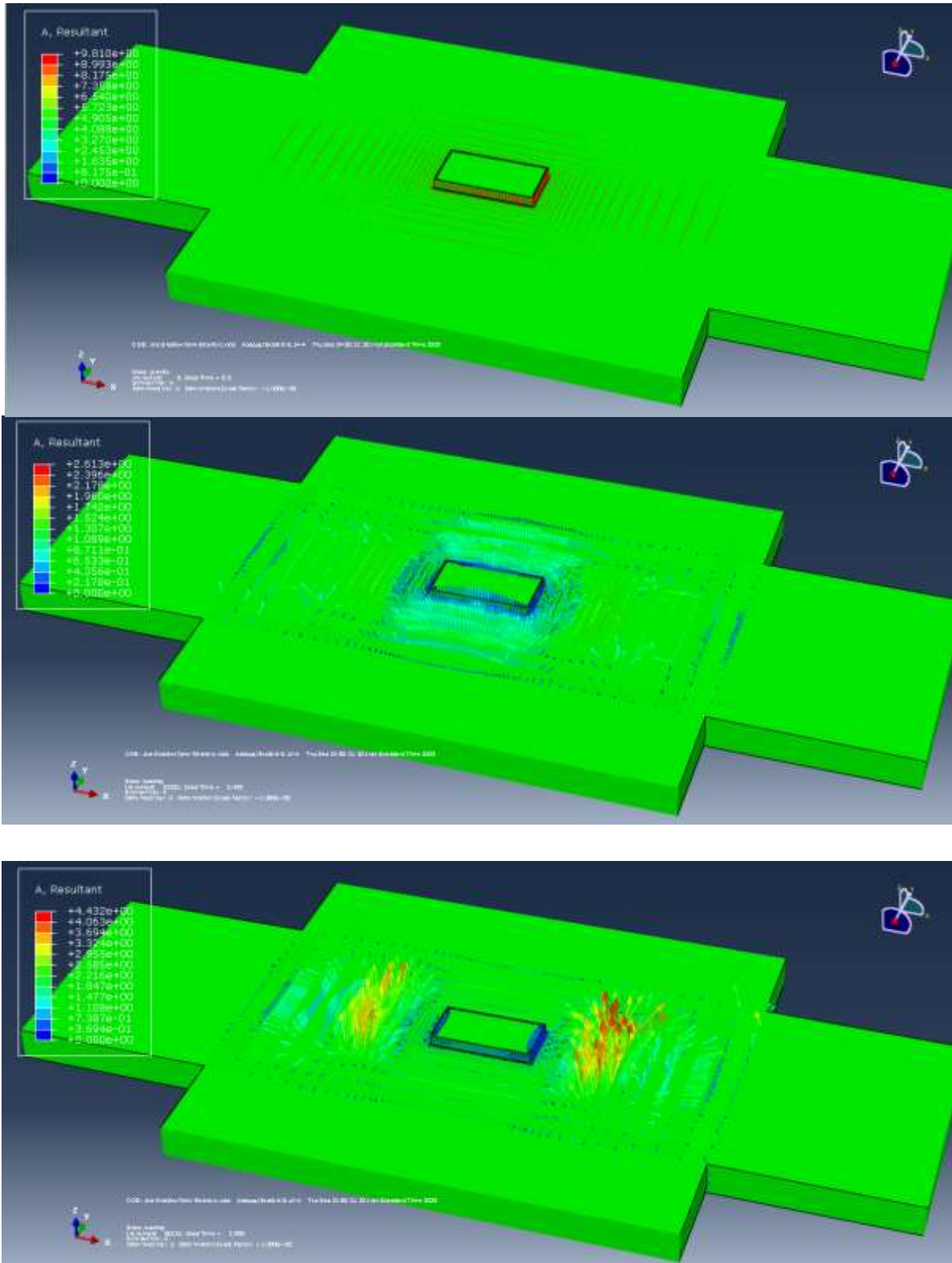
شکل ۱۶- نمودار تاریخچه زمانی لنگر پایه مدل آباکوس و مدل کیانوش و همکاران



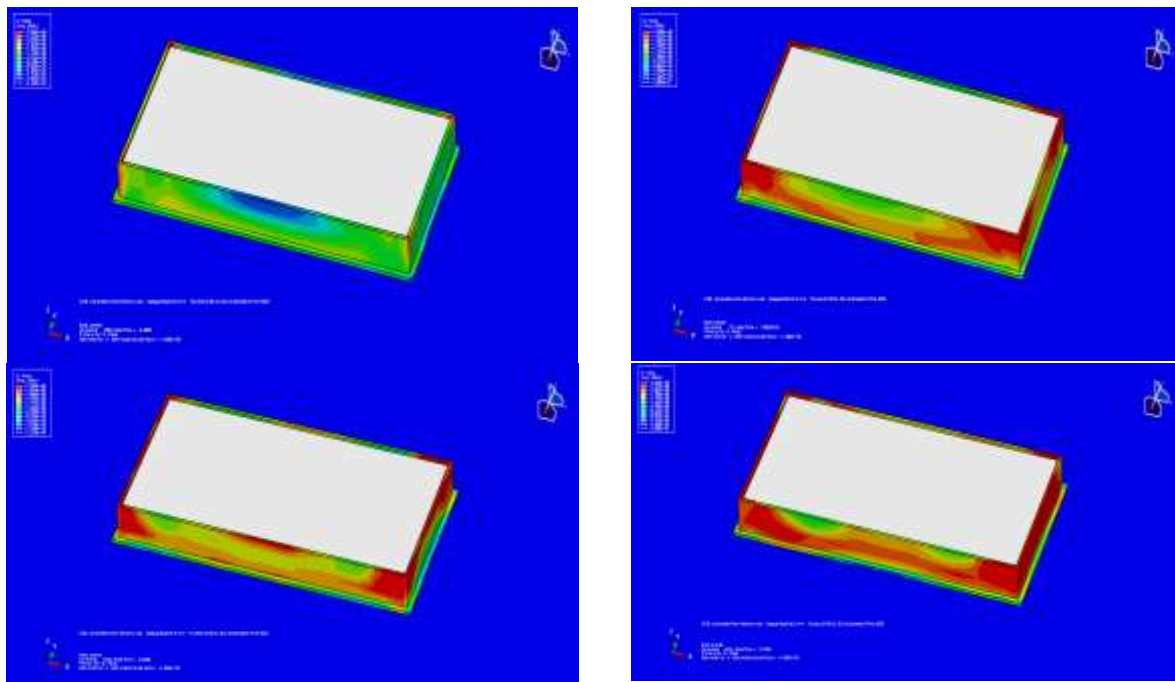
شکل ۱۷- مقایسه نمودار تاریخچه زمانی لنگر پایه مدل آباکوس و مدل کیانوش و همکاران



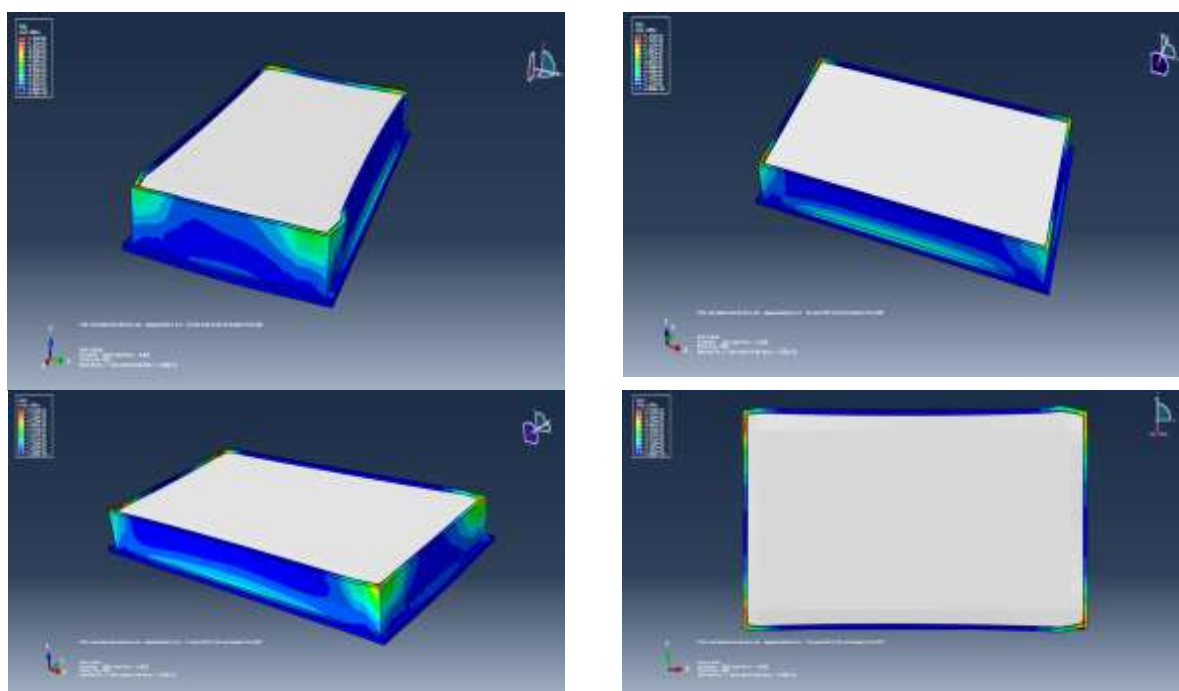
شکل ۱۸- نمونه‌ای از فشار هیدرودینامیکی مدل‌سازی



شکل ۱۹- نمایش برداری شتاب زلزله دو جهته



شکل ۲۰- نمونه‌ای از تنش‌های فن میسز ایجاد شده در بدنه مخزن



شکل ۲۱- نمونه‌ای از کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در بدنه مخزن

بررسی نتایج و خروجی‌ها

در بخش قبل نحوه مدل‌سازی مخزن- آب- بستر، تحلیل حساسیت و اعتبار سنجی مدل عددی حاضر تشریح گردید. به منظور ارزیابی از عملکرد لرزه‌ای اندرکنش مخزن- سیال- بستر از منحنی‌های شکست استفاده می‌شود. با توجه به عدم قطعیت‌ها در رفتار لرزه‌ای و رفتار متفاوت سازه‌های در برابر شتابنگاشت‌های مختلف نمی‌توان تنها با تحلیل‌های دینامیکی اطمینان از عملکرد مطلوب سازه در برابر زلزله‌های آتی باشیم، امروزه با روش‌های احتمالاتی، ریسک خطرپذیری سازه‌ها بر

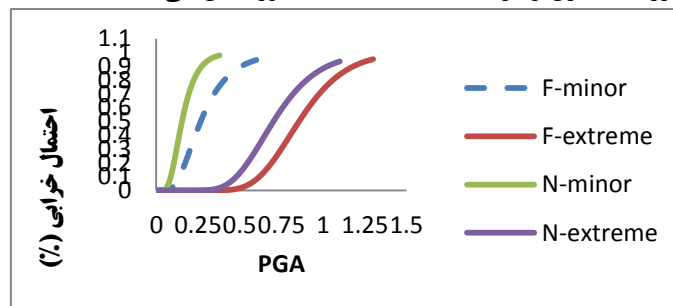
اساس عملکرد لرزه‌ایشان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. استفاده از منحنی‌های شکست روشی مناسب برای تحلیل لرزه‌ای دقیق‌تر سازه‌ها محسوب می‌شود در این منحنی‌ها احتمال وقوع خرابی برای شدت زلزله‌های مختلف تعیین می‌شوند. برای دستیابی به منحنی‌های شکست باید شاخص خرابی و پارامتر تعریف کننده شدت زلزله معرفی شود. در پژوهش حاضر از بیشینه شتاب زلزله PGA به عنوان پارامتر تعریف کننده شدت زلزله و از دو شاخص خرابی کرنش ترک خوردگی بتن (به عنوان شاخص خرابی کم) و کرنش ترک خوردگی بتن (شاخص خرابی شدید) استفاده می‌شود. کرنش ترک خوردگی بتن می‌تواند شاخص مناسبی برای خرابی‌های سطحی پوشش مخزن بتنی باشد و کرنش معادل با $0/1$ تنش ترک خوردگی نیز معیار مناسبی جهت معرفی آستانه مکانیزم در سازه مخزن می‌باشد. این شاخص با نتایج عددی بدست آمده همخوانی دارد لازم به ذکر است نرم افزار اجزا محدود تحلیل را تا ایجاد مکانیزم و کرنش‌های پلاستیک نهایی پیش برده و بعد از احراز شرایط تسلیم مصالح تحلیل نرم افزار متوقف می‌شود. جهت معرفی بارگذاری لرزه‌ای از 10 شتاب نگاشت‌های حوزه دور و 10 شتاب نگاشت حوزه نزدیک استفاده شده است. هر یک از رکوردها با گام‌های $0/125g$ مقیاس شده و نهایتاً 200 شتاب واقعی و مقیاس شده ایجاد گردید. مدل‌های عددی برای نمونه‌های معرفی شده شبیه سازی و نتایج جهت تعیین منحنی شکست برای شاخص خرابی کم و شدید برای دو حوزه دور و نزدیک گسل استخراج گردید که در ادامه به بررسی این نتایج و تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌پردازیم. لازم به ذکر است جهت معرفی خرابی شدید از **extreme** و برای نام گذاری خرابی کم از **minor** استفاده شده است و همچنین به ترتیب جهت معرفی حوزه نزدیک و دور از گسل به ترتیب از حروف لاتین **N** و **F** بکار گرفته شده است.

نتیجه گیری

مهمترین نتایج اصلی و فرعی پژوهش به صورت زیر ارائه می‌گردد:

- بر اساس آنالیز حساسیت فاصله مرزی فواصل جانبی بستر در دو جهت **X** و **Y** و همچنین فاصله مرزی از کف بستر به ترتیب 120 ، 60 و 50 متر بدست آمده است. بنابراین بهینه‌ترین فواصل مرزی جانبی حدود دو برابر طول محدود مخزن گزارش شده است.
- المان بهینه برای قسمت محدود بستر و مخزن **C3D8R** (المان سه بعدی 8 گره‌ای با فرمولاسیون انتگرال گیری کاهش یافته) و برای قسمت نامحدود خاک المان‌های **CIN3D8** (المان‌های محیط پیوسته خطی با 8 درجه آزادی می‌باشند و روش انتگرال‌سیون کامل) و برای محیط آبی المان **AC3D8R** بدست آمده است.
- در نرم افزار آباکوس دسترسی به المان‌های بی نهایت از طریق کتابخانه نرم افزار مقدور نیست و باید از طریق **Input** نویسی این المان‌ها ساخته و فراخوانی شوند. برای این منظور نحوه شماره‌گذاری المان‌ها اصلاح می‌گردد که این امر به دو طریق استفاده از طریق تکنیک **Sweep** و یا **Input** نویسی امکان پذیر است.
- دامنه بیشینه شتاب‌ها برای شاخص خرابی کم تحت شتاب نگاشت‌های واقعی و مقیاس شده حوزه نزدیک (**N-** minor) از $0/4g$ الی $0/4g$ بدست آمده است. برای این شرایط در $PGA=0.09g$ احتمال خرابی مخزن 10 درصد و برای در $PGA=0.12g$ احتمال خرابی 30 درصد گزارش شده است. برای بیشینه شتاب حدود $1/6g$ احتمال خرابی تا 50 درصد می‌رسد که نشان از سرعت رشد خرابی در این بازه می‌باشیم.
- مطابق نتایج بدست آمده برای $PGA=2.8g$ احتمال خرابی مخزن 90 درصد گزارش می‌شود و برای $PGA=0.4g$ به طور قطع دچار تخریب از نوع کم می‌شود.
- دامنه بیشینه شتاب‌ها برای شاخص خرابی کم تحت شتاب نگاشت‌های واقعی و مقیاس شده حوزه نزدیک (**N-** extreme) از $0/35g$ الی $1/1g$ بدست آمده است. در $PGA=0.475g$ احتمال خرابی مخزن 10 درصد و برای در $PGA=0.6g$ احتمال خرابی 30 درصد گزارش شده است. با افزایش 10 درصدی بیشینه شتاب‌ها برای در $PGA=0.7g$ احتمال خرابی از نوع شدید تا 50 درصد می‌رسد.
- بر اساس منحنی شکست برای بیشینه شتاب‌های برابر ثقل احتمال خرابی مخزن 90 درصد گزارش می‌شود و برای $PGA=1.1g$ به طور قطع مخزن مورد مطالعه در این پژوهش دچار تخریب از نوع شدید می‌شود.

- دامنه بیشینه شتاب‌های برای شاخص خرابی کم و کوردهای حوزه دور (F-minor) از $0.06g$ الی $0.16g$ بدست آمده است و خرابی سطحی بتن بسته به محتوی فرکانسی زلزله در این بازه اتفاق می‌افتد.
- بر اساس نتایج بدست آمده در $PGA=0.14g$ احتمال خرابی ۱۰ درصد و $PGA=0.2g$ احتمال خرابی از نوع کم ۲۰ درصد گزارش شده است. با افزایش بیشینه شتاب‌ها تا $0.4g$ احتمال خرابی به ۴۰ درصد می‌رسد. مشاهده می‌شود با افزایش بیشینه شتاب سرعت احتمال خرابی کم می‌شود.
- در $PGA=0.2g$ احتمال خرابی سطحی به ۹۰ درصد می‌رسد و برای $PGA=0.6g$ قطعا مخزن مورد مطالعه در تحقیق دچار خرابی سطحی خواهد شد.
- برای شاخص خرابی شدید تحت شتاب نگاشت‌های واقعی و مقیاس شده حوزه دور (F-extreme) دامنه بیشینه شتاب‌ها از $0.3g$ الی $1/3g$ تعیین شده است. احتمال خرابی ۱۰ درصدی در $PGA=0.6g$ و احتمال ۳۰ درصدی در $PGA=0.75g$ بدست آمده است و همچنین در شتاب ثقل احتمال خرابی به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد.
- برای شرایط خرابی شدید و شتاب نگاشت‌های دور از گسل در بیشینه شتاب‌های بزرگتر از $1/3g$ خرابی قطعی خواهد بود.
- شکل ۲۲ مقایسه نتایج حاصل از منحنی‌های شکست را برای شاخص خرابی کم و شدید و شتاب نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که احتمال خرابی سطحی و خرابی شدید بتن برای دامنه بیشینه شتاب‌هایی حوزه نزدیک نسبت به دامنه شتاب نگاشت‌های حوزه دور بحرانی‌تر است. در واقع برای شرایط شدت زلزله یکسان احتمال خرابی رکوردهای حوزه نزدیک بیشتر می‌باشد.
- اختلاف در احتمال خرابی برای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک برای شاخص شدید تقریبا ثابت بوده ولی برای شاخص خرابی کم با افزایش احتمال خرابی سطحی اختلاف نتایج بیشتر می‌شود.
- نتایج حاکی از آن دارد که زلزله‌های حوزه نزدیک منجر به افزایش پاسخ لرزه‌ای می‌گردد لذا برای طراحی مخازنی که در محدوده نزدیک گسل قرار دارند بررسی رفتار سازه در برابر رکوردهای حوزه نزدیک باید کنترل شوند.
- حد قابلیت اطمینان برای خرابی سطحی بدنه مخزن برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور به ترتیب $0.4g$ و $0.6g$ بدست آمده است. که افزایش بیش از ۶۰ درصدی پاسخ سازه را برای زلزله‌های حوزه دور نشان می‌دهد.
- برای خرابی شدید برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور به ترتیب $1g$ و $1/3g$ گزارش شده است که افزایش ظرفیت ۳۰ درصدی پاسخ لرزه‌ای مخزن را برای شتاب نگاشت‌های دور نشان می‌دهد.



شکل ۲۲- مقایسه منحنی‌های شکست مخزن بررسی شده

پیشنهادات جهت مطالعات آتی

همانطور که ملاحظه گردید استفاده از تحلیل عددی- آماری ابزار قدرتمند و کارآمدی جهت تحلیل سازه‌ها خصوصا سازه‌های مخزن که پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های فراوان دارند، بشمار می‌آید. زیرا با استفاده از روش اجزا محدود می‌توان از فرضیات پیشرفته جهت شبیه‌سازی استفاده نمود و با استفاده از منحنی‌های شکست به بسیاری از عدم قطعیت‌ها پاسخ داد. مطابق نتایج بدست آمده مخزن مورد مطالعه قطعا در بیشینه شتاب‌های بیش از $0.6g$ دچار خرابی سطحی می‌شود و برای بیشینه

شتاب‌های بیش از 1.1g این مخزن دچار خرابی شدید خواهد شد. بنابراین با توجه به روش پیشنهادی پژوهش حاضر می‌توان احتمال خرابی قطعی مخزن را با دقت بالایی تعیین نمود و از آن برای بهبود عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها استفاده نمود لذا با عنایت به روش پیشنهادی تحقیق حاضر پیشنهادات زیر جهت مطالعات آتی ارائه می‌گردد:

- مقایسه نتایج تحلیل لرزه‌ای مخازن سه بعدی و دو بعدی تحت اندرکنش خاک-سازه-سیال.
- مقایسه منحنی‌های شکست مخازن بتنی بلند و کوتاه.
- مقایسه منحنی‌های شکست مخازن تحت تحریکات دور و نزدیک.
- ارزیابی لرزه‌ای مخازن با استفاده از منحنی شکست و مقایسه روابط پیشنهادی آیین نامه.

فهرست منابع

۱. باقری، ب.، عباسی، م.، کتابچی، م.، کتاب مرجع کاربردی اباکوس،، کیان رایانه سبز، ۱۳۹۱.
۲. بهشتی مال. م. (۱۳۹۳)، طراحی لرزه‌ای مخازن مایعات، انتشارات فدک ایساتیس، چاپ اول.
۳. خوبانی. م.، هاشمی. ش.، علی پور. ع. (۱۳۹۷)، تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۱۸۹ تا ۲.
۴. درویشی، م.م.، جمشیدی، ی.ط.، کتاب مثلث نارنجی راهنمای تحلیل مکانیکی بکمک نرم افزار اباکوس، نشر آفنگ، ۱۳۹۱.
۵. رضا تاری نژاد، جواد مرادلو، جواد حاجی حسینی، بررسی الگوی آسیب در سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله های میدان دور و نزدیک، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۶. سروش نیا، بهشتیان، (۱۳۹۰)، مرجع کاربردی اباکوس، انتشارات نگارنده دانش، جلد دوم، ۴۴۵.
۷. قاسمی. ع.، درخشنده. ه. (۱۳۹۴)، توسعه منحنی‌های شکنندگی برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای مخازن هوایی بتن مسلح، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران،
۸. عرب. ح.، حاجی. ن. (۱۳۹۱)، تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال مجهز به تیغه میراگر حلقوی با استفاده از روش المان مرزی، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۲، صفحه ۱۱-۲۲.
۹. عطاری. ن.، رحیم زاده و.، کام ور. ن. (۱۳۸۳)، بررسی رفتار پوش فشار دینامیکی وارد بر مخازن مدفون با در نظر گرفتن پدیده لغزش و اصطکاک بین خاک و جداره سازه، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
۱۰. کلائی. ل.، نوائی نیا. ب. (۱۳۹۱)، تعیین ضریب رفتار مخزن ها بتنی استوانه ای با استفاده از تحلیل فزاینده غیر خطی، نشریه مهندسی عمران، سال بیست و سوم، شماره دو صفحه ۵۳-۷۰.
۱۱. مجذوبی؛ غلام حسین؛ ۱۳۹۲، روش اجزا محدود؛ نشر دانشگاهی بو علی سینا، ۵۷۹-۵۵۸.
۱۲. میوه چی و عسکر پرست، (۱۳۹۰)، ارزیابی لرزه‌ای مخازن نیمه مدفون بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش اب-سازه-خاک، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، صفحه ۸-۱۶.
۱۳. نشریه شماره ۱۲۳- ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، سازمان برنامه و بودجه جمهوری اسلامی ایران.
۱۴. هادی. ع.، کامگارو ر.، رستمی. س. (۱۳۹۱)، آموزش کاربردی نرم افزار SeismoSignal، انتشارات سفیر اردهال.
۱۵. یکرنگ، محمد؛ شهبازی، رضا، ۱۳۹۳، راهنمای کاربردی اباکوس، ناشر علم و عمران، چاپ اول ۵۳۲.

17. Abaqus/Explicit: Advanced Topics, Material in Abaqus, Lecture 3.
18. Aruna Rawat, Vaibhav Mittal, Tanusree Chakraborty, Vasant Matsagar, Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic-structural and Euler-Lagrange method, *Thin-Walled Structures* 134 (2019) 333–346.
19. Birhane Aregawi & Abdulaziz Kassahun, Dynamic Response of Ground Supported Rectangular Water Tanks to Earthquake Excitatio, Abdulaziz, K and Birhane, A (MEJS), Volume 9(1):66-75, 2017.
20. Chen Jk, Kianoush MR, Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures. *Canad J Civ Eng*, 32:739, 2005.
21. Chiar.mo Prof. Marco Savoia, Prof. Nicola Buratti, SEISMIC RESPONSE OF TANK-FLUID SYSTEMS, Seismic response of Tank-Fluid systems, INTERNATIONAL MASTER COURSE IN CIVIL ENGINEERING, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Anno Accademico 2010/11.
22. Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks ., Indian Institute of Technology Kanpur ., October 2007.
23. Ghaemmaghami AR, Kianoush MR, Effect of wall flexibility on dynamic response of concrete rectangular tanks under horizontal and vertical ground motions. *ASCE J Struct Eng*, 136(4): 441-451, 2010.
24. Halil SEZEN and Andrew S. WHITTAKER, PERFORMANCE OF INDUSTRIAL FACILITIES DURING THE 1999, Kocaeli Turkey earthquake, 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, 2004, Paper No. 282
25. Housner, G. W, Earthquake pressures on fluid containers, California Institute of Technology Pasadena California 1954.
26. Housner, G. W, Dynamic pressure on accelerated fluid containers, *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 47, No 1, pp 15-35, 1957.
27. Haroun M. A, and Housner, G.W, Dynamic characteristics of liquid storage tanks, *Journal of Engineering Mechanics Division*, Vol 108, No EM5, pp 783-800, 1982.
28. Jacobsen, L. S, Impulsive Hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of a fluid surrounding a cylindrical pair, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 39, pp 189-204, 1949.
29. Kianoush MR, Ghaemmaghami AR, the Effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete liquid tanks using the finite element method incorporating soil-structure interaction. *Eng structure*. 2011.
30. Kianoush MR, Chen Jk, Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Eng Struct*, 28(5): 704-7015, 2006
31. M.S. Razzaghi and S. Eshghi, development of analytical fragility curves for cylindrical steel oil tanks, the 14th world conference on earthquake engineering October 12-17, (2008), Beijing, China.
32. M.R. Kianoush, A.R. Ghaemmaghami, The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil–structure interaction, *Engineering Structures* 33 (2011) 2186–2200.

33. Nam Phan , Fabrizio Paolacci, Oreste S. Bursi, Nicola Tondini, Seismic fragility analysis of elevated steel storage tanks supported by reinforced concrete columns, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 47 (2017) 57e65.
34. Sandip Kumar Sahaa, Vasant Matsagarb, and Subrata Chakrabortyc, uncertainty quantification and seismic fragility of base-isolated liquid storage tanks using response surface models, *Engineering Mechanics*, (2015).
35. SAM Helwany, *Applied Soil, Mechanics with ABAQUS Applications*, Copyright, 2007 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. All rights reserved.
36. WWW. <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>.
37. W.S. HALL & G. OLIVETO, *Boundary Element Methods for Soil-Structure Interaction*, ©2004 Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow.