

مطالعه عددی کمانش مخزن فولادی تحت اثر مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله

محمد سعید سبحان^{۱*}، احسان دهقانی^۲

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم

*محلات، صندوق پستی ۳۷۸۱۱۵۱۹۵۸، ssobhan@gmail.com

چکیده

مخازن فولادی استوانه‌ای روزمینی یکی از سازه‌های پرکاربرد در صنایع، پالایشگاه و نیروگاه است. به دلیل این که پوسته مخازن فولادی نازک است، این مخازن تحت اثر زلزله، ممکن است دچار آسیب و یا کمانش پوسته شوند. در این تحقیق، کمانش دینامیکی مخزن فولادی استوانه‌ای روزمینی مهارشده تحت اثر مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله با استفاده از روش تحلیل غیرخطی دینامیکی افزایشی، ارزیابی شده است. هدف این پژوهش بررسی اهمیت تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر کمانش دینامیکی مخازن فولادی است. یک مخزن فولادی استوانه‌ای با قطر ۳۰ متر و نسبت ارتفاع به قطر برابر ۰/۴ بر اساس استاندارد API 650 طراحی شد و با روش اجزای محدود مدل‌سازی شده است. مخزن فولادی تحت اثر یک سری رکوردهای افقی و قائم زلزله با شدت‌های مختلف افزایشده قرار گرفته است. با استفاده از معیار کمانش دینامیکی، متوسط شتاب بحرانی زلزله و متوسط نیروی برش پایه بحرانی کمانش پوسته مخزن تخمین زده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی نشان داد که مؤلفه قائم زلزله باعث کاهش قابل ملاحظه ظرفیت کمانش پوسته مخزن شده است. کمانش پوسته مخزن تحت اثر فقط تک‌مؤلفه افقی و دو مؤلفه افقی و قائم زلزله، در قسمت پایین پوسته و در ارتفاع ۲/۸ متر بالای کف مخزن، ایجاد شده است. نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی مخزن در حالت تحریک دو-جهتی (HV)، ۲۳/۵ درصد کوچک‌تر از برش پایه دینامیکی بحرانی در حالت تحریک تک-جهتی (H) است.

واژگان کلیدی

مخزن فولادی، مؤلفه قائم زلزله، کمانش دینامیکی، تحلیل دینامیکی افزایشی

Numerical Study of Buckling of Steel Storage Tank under Horizontal and Vertical Ground Motions

M.S. Sobhan, E. Dehghani

Abstract

Aboveground cylindrical steel storage tanks are one of the widely used structures in industries, refineries and power plants. Because the shell of steel tanks is thin, these tanks may suffer damage or buckling of the shell under the effect of an earthquake. In this study, the dynamic buckling of the steel tank under the effect of the horizontal and vertical components of the earthquake has been evaluated using the incremental dynamic analysis method. The aim of this research is to investigate the importance of the effect of the vertical component of the earthquake on the dynamic buckling of steel tanks. A cylindrical steel tank with a diameter of 30 meters and a height-to-diameter ratio of 0.40 was designed based on the API 650 standard and was modeled and analyzed by the finite element method. The liquid storage tank is subjected to a series of horizontal and vertical earthquake records of varying increasing intensities. Using the dynamic buckling criterion, the average critical PGA and the mean critical base shear force of tank shell buckling have been estimated. The results of the dynamic analysis showed that the vertical component of the earthquake caused a significant decrease in the buckling capacity of the tank shell. Buckling of the tank shell was occurred in the lower part of the shell and at a height of 2.8 meters above the tank floor for only one horizontal component and two horizontal and vertical components of the earthquake. The critical dynamic base shear force of the tank under bi-directional excitation (HV) is 23.5% smaller than the those for tank subjected to only horizontal excitation (H).

Keywords

Steel Storage Tank, Vertical Ground Motion, Dynamic Buckling, Incremental Dynamic Analysis

۱- مقدمه

مخازن فولادی استوانه‌ای نگهداری مایع به دلیل سهولت ساخت و استحکام مناسب، در پالایشگاه و صنایع پتروشیمی به کار می‌روند. آسیب لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال در اثر زلزله منجر به انجام تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین بر روی عملکرد لرزه‌ای مخازن شد. مشاهده آسیب‌هایی که در اثر وقوع زلزله در مخازن ایجاد شده است، نشان داد که مخازن فولادی نسبت به مخازن بتنی، بیش‌تر مستعد آسیب و خرابی هستند. مخازن فولادی استوانه‌ای جدارنازک، پوسته نازکی دارند، بنابراین مستعد کمناش تحت اثر بارهای جانبی نظیر باد و زلزله هستند.

یکی از آسیب‌های رایج مخازن فولادی در زلزله‌های گذشته، کمناش پوسته است. کمناش پوسته مخازن فولادی معمولاً به صورت کمناش پافیلی^۱ رخ می‌دهد [۱]. کمناش پافیلی، نوعی کمناش الاستو-پلاستیک است که معمولاً در مخازن فولادی عریض (با نسبت ارتفاع به قطر کم) به صورت برآمدگی به سمت خارج پوسته مخزن و در نزدیکی کف مخزن ایجاد می‌شود. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط محققین نشان داد که ترکیب تنش‌های فشاری محوری (قائم) که از حد تنش بحرانی تجاوز کرده‌اند به علاوه تنش کششی حلقوی نزدیک به حد تسلیم، باعث ایجاد کمناش پافیلی پوسته مخزن می‌گردد [۲]. در شکل (۱)، کمناش پافیلی پوسته مخزن فولادی در اثر وقوع زلزله نشان داده شده است.

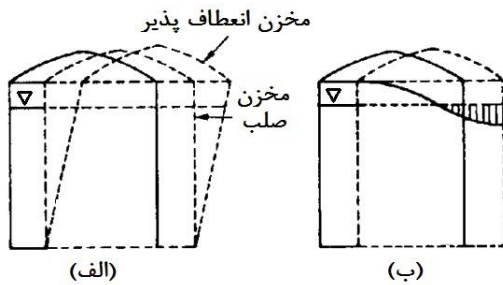


شکل ۱- کمناش پافیلی پوسته مخزن فولادی [۳]

۲- مرور ادبیات فنی

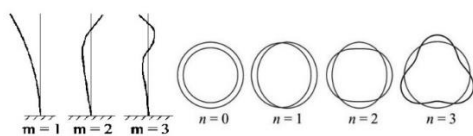
در آغاز، پژوهشگران بر روی رفتار دینامیکی مخازن تحقیق کردند. **هاوزنر^۲**، یک مدل مکانیکی معادل به صورت دو جرم و فنر برای سیستم مخزن-مایع پیشنهاد داد و با در نظر گرفتن مدهای ضربانی^۳ و نوسانی^۴، پاسخ دینامیکی مخزن را بررسی نمود [۴]. مد ضربانی

توسط حرکت هماهنگ بخشی از سیال با جداره مخزن ایجاد می‌شود و مد نوسانی از حرکت بخش دیگر سیال در سطح آزاد آن به وجود می‌آید. تحقیقات بیش‌تر نشان داد که انعطاف‌پذیری پوسته مخزن باعث می‌شود که شتاب بخش ضربانی مایع، بزرگ‌تر از شتاب حداکثر زمین شود و باید اثر انعطاف‌پذیری پوسته بر روی رفتار دینامیکی مخزن در نظر گرفته شود [۵]. در شکل (۲) شکل مدهای ارتعاشی مخزن تحت اثر زلزله نشان داده شده است.



شکل ۲- شکل مدهای ارتعاشی مخزن در اثر تحریک افقی، (الف) مد ضربانی و (ب) مد اول نوسانی [۶]

شکل‌های مدی و پریودهای طبیعی ارتعاشی مخازن فولادی استوانه‌ای در شرایط گوناگون، نظیر مخزن خالی (بدون مایع)، مخزن حاوی مایع، مخزن بدون سقف و مخزن به همراه سقف، با روش‌های تحلیلی، اجزای محدود و آزمایشگاهی، توسط محققین مختلف بررسی شده است. مخزن استوانه‌ای به صورت‌های مختلفی ارتعاش می‌کند. محققین مختلف نظیر **هارون^۵** [۷]، **آمابیلی^۶** [۸] و **ویرلا^۷** [۹] شکل مدهای ارتعاش جانبی پوسته مخازن استوانه‌ای بدون سقف را به دو گونه دسته‌بندی کردند. اگر θ مختصات زاویه‌ای در امتداد پیرامونی باشد، نوع اول مدهای ارتعاش جانبی به صورت $\cos(\theta)$ و تغییر شکل پوسته به شکل یک موج کسینوسی است. نوع دوم مدهای ارتعاش جانبی به صورت $\cos(n\theta)$ و تغییر شکل پوسته به صورت n موج پیرامونی است. شکل مدهای مخزن استوانه‌ای با پارامتر m ، تعداد نیم‌موج‌های محوری و پارامتر n و تعداد موج‌های پیرامونی مشخص می‌شود. الگوی تغییر شکل مدهای ارتعاش محوری و محیطی پوسته مخزن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- شکل مدهای ارتعاش محوری و محیطی پوسته مخزن [۷ و ۸]

^۵ Haroun

^۶ Amabili

^۷ Virella

^۱ Elephant foot buckling

^۲ Housner

^۳ Impulsive

^۴ Convective

پیشین، رفتار لرزه‌ای مخازن تحت اثر فقط تک‌مؤلفه افقی زلزله بررسی شده است و اثر مؤلفه قائم زلزله بررسی نشده است. هدف از این پژوهش، بررسی کماتش دینامیکی مخزن فولادی استوانه‌ای روزمینی مهارشده ذخیره سیال با ابعاد واقعی، تحت اثر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی^۷ است. با بررسی نتایج تحلیل، تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر کماتش مخازن فولادی روزمینی ارزیابی شده است.

۳- مدل‌سازی اجزای محدود مخزن ذخیره سیال

مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی اجزای محدود سیستم مخزن-مایع با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۸ [۱۶] انجام شده است. از المان پوسته چهار-گره‌ای S4R برای مدل‌سازی پوسته و ورق کف مخزن استفاده شده است. مایع با استفاده از المان آکوستیک هشت-گره‌ای AC3D8R مدل‌سازی شده است. هر گره المان آکوستیک دارای یک درجه آزادی از نوع فشار می‌باشد. اندرکنش بین سیال و مخزن با اعمال قید تماسی نرمال بین سطوح سیال با جداره مخزن که امکان جدایی بین سطوح وجود ندارد، شبیه‌سازی شده است. همچنین برای در نظر گرفتن تلاطم سیال، با توجه به تحقیق انجام‌شده توسط **مسلمی و کیانوش** [۱۷]، از رابطه (۱) برای اعمال شرط مرزی موج سطحی با دامنه کوچک در سطح مایع استفاده شده است.

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در مدل اجزای محدود، اثرات غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال است. ۹۰ درصد ارتفاع مخزن از آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شده است. میرایی رایلی متناسب با جرم مخزن و فرض نسبت میرایی ۲ درصد برای مد اساسی ارتعاش سیستم مخزن-مایع، بر اساس تحقیقات انجام‌شده توسط **ویرلا و همکاران** [۹ و ۱۰]، در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، مخزن به صورت مهارشده فرض شده و از اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است. بنابراین گره‌های کف مخزن در سه درجه آزادی انتقالی مقید شده است. برای کاهش هزینه و زمان محاسبات، نصف سیستم مخزن-مایع مدل‌سازی شده است و شرایط مرزی مربوط به تقارن، در صفحه تقارن سیستم مخزن-سیال در نظر گرفته شده

ویرلا و همکاران [۹]، مشخصات دینامیکی و شکل مدهای ارتعاشی مخازن فولادی روزمینی مهارشده را با روش اجزای محدود بررسی کردند. این محققین با در نظر گرفتن فقط مد ضربانی، مایع درون مخزن را با روش جرم افزوده^۱ و یا با المان آکوستیک^۲ و جداره مخزن را با المان پوسته^۳ مدل‌سازی کردند. **ویرلا و همکاران** [۱۰]، کماتش دینامیکی مخازن فولادی استوانه‌ای روزمینی مهارشده را تحت اثر فقط مؤلفه افقی زلزله بررسی کردند و شتاب افقی بحرانی که باعث وقوع کماتش الاستیک در بالای پوسته استوانه‌ای می‌گردد را محاسبه نمودند. **دجرمین**^۴ و **همکاران** [۱۱]، کماتش دینامیکی مخازن فولادی مهارشده را با استفاده از روش اجزای محدود و ضوابط آیین‌نامه‌ای بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه برای مخازن کوتاه مناسب است ولی اصلاح ضوابط لرزه‌ای برای مخازن بلند ضروری است. **سبحان و حسینی** [۱۲]، پاسخ لرزه‌ای و کماتش دینامیکی مخزن فولادی استوانه‌ای زمینی ذخیره سیال را تحت اثر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های افقی زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی مطالعه کردند. در تحقیق انجام‌شده توسط **عالم‌زاده و شکیب** [۱۳]، پاسخ لرزه‌ای مخزن فولادی استوانه‌ای بلند در دو حالت مهارشده و مهارنشده تحت تحریک افقی زلزله محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که نیروی برش پایه و لنگر واژگونی مخزن مهارشده نسبت به مخزن مهارنشده به اندازه ۹ تا ۲۶ درصد کاهش یافته است اما پاسخ تغییر مکان بام و جرم ضربانی سیال افزایش یافته است.

اهمیت مؤلفه قائم زلزله بر روی پاسخ مخازن بتنی مستطیلی تحت اثر شتاب قائم زمین توسط **کیانوش و چن**^۵ [۱۴] بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان داد که اثر شتاب قائم زلزله باید در محاسبه پاسخ مخزن و همچنین در طراحی آن لحاظ شود. ظرفیت مخازن فولادی مخروطی تحت اثر تحریک قائم بستر توسط **موسی و ال داماتی**^۶ [۱۵] ارزیابی شده است. آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود، تحلیل غیرخطی بارافزون مخزن تحت اثر فشار هیدروستاتیک ناشی از تحریک قائم بستر انجام دادند. بررسی رفتار لرزه‌ای و کماتش مخازن فولادی با استفاده از تحلیل غیرخطی دینامیکی، پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و انجام تحقیقات بیش‌تر در این زمینه ضروری است. در اغلب تحقیقات

^۶ El Damatti

^۷ Incremental dynamic analysis

^۸ Abaqus

^۱ Added mass

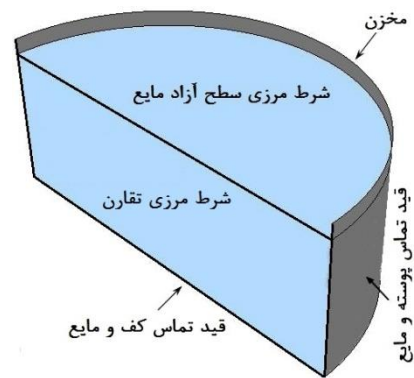
^۲ Acoustic element

^۳ Shell element

^۴ Djermane

^۵ Chen

است. شکل کلی مدل‌سازی اجزای محدود مخزن فولادی و شرایط مرزی در نظر گرفته شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل‌سازی اجزای محدود مخزن فولادی

۳-۱- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود مخزن ذخیره سیال

ابعاد هندسی مخزن A که توسط ویرلا و همکاران [۹ و ۱۰] در نظر گرفته شده به ابعاد مخزن طراحی شده در این تحقیق نزدیک است و برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود استفاده شده است. برای این امر، پریود طبیعی مد ضربانی ارتعاش سیستم مخزن-مایع حاصل از تحلیل مدال با نتایج حاصل از رابطه تحلیلی پریود طبیعی مد ضربانی ارائه شده در استاندارد API 650 [۱۸] مقایسه شده است. پریود طبیعی مد ضربانی مخزن استوانه‌ای زمینی براساس استاندارد API 650 به صورت رابطه (۲) است.

$$T_i = C_i H \sqrt{\frac{\rho D}{2000 E t_u}} \quad (2)$$

که در آن (T_i) پریود مد ضربانی (ثانیه)، (H) ارتفاع مایع (متر)، ضخامت یکنواخت معادل پوسته مخزن (متر) که برای مخزن A، $10/2$ میلی‌متر است، (D) قطر مخزن (متر)، چگالی مایع (کیلوگرم بر مترمکعب)، (E) مدول الاستیسیته مصالح مخزن (گیگاپاسکال) و ضریب بی‌بعد (C_i) که به نسبت H/D بستگی دارد و برای مخزن A، برابر با $6/9$ است.

ولتسوس [۵]، پریود طبیعی مد اول نوسانی مخازن استوانه‌ای را به صورت رابطه (۳) تخمین زد:

$$T_c = \frac{2\pi}{\sqrt{g \frac{1.841}{R} \tanh\left(1.841 \frac{H}{R}\right)}} \quad (3)$$

که در آن (T_c) پریود طبیعی مد اول نوسانی (هرتز)، (R) شعاع مخزن (متر) و (H) ارتفاع مایع (متر) است. با انجام تحلیل مدال به روش اجزای محدود، پریود مد ضربانی و مد اول نوسانی مخزن A در جدول (۱) ارائه شده و با نتیجه متناظر حاصل از رابطه تحلیلی مقایسه شده است. اختلاف

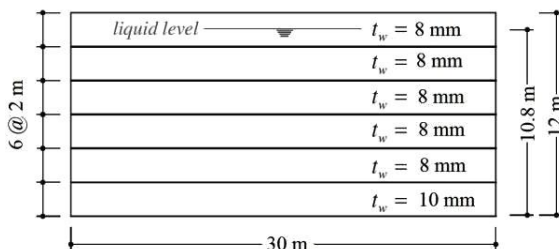
بین مقادیر پریودهای مد ضربانی و مد اول نوسانی حاصل از تحلیل اجزای محدود با نتایج تحلیلی به ترتیب کم‌تر از ۴ و ۱ درصد است که بیانگر صحت و دقت مناسب نتایج مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود در این پژوهش است.

جدول ۱- پریود طبیعی مد ارتعاش مخزن A (ثانیه)

مد ارتعاشی	تحلیل اجزای محدود (آباکوس)	رابطه تحلیلی
ضربانی	0.213	0.205
اول نوسانی	6.09	6.14

۴- مخزن فولادی مورد بررسی

در این پژوهش، مخزن فولادی استوانه‌ای با قطر ۳۰ متر، ارتفاع پوسته ۱۲ متر و نسبت ارتفاع به قطر $0/4$ در نظر گرفته شده است. ۹۰ درصد حجم داخل مخزن با سیال آب پر شده است. ضخامت پوسته مخزن با فرض شتاب افقی حداکثر زمین برابر با 0.35g و بر اساس الزامات طراحی لرزه‌ای استاندارد API 650 طراحی شده است. چون در این پژوهش رفتار کمانشی جداره استوانه‌ای شکل بررسی شده است همانند برخی مراجع نظیر مرجع [۱۹]، در جهت ساده‌سازی، سقف مخزن مدل نشده است. برای در نظر گرفتن سختی محوری سقف مخزن، گره‌های لبه بالای استوانه به صورت قید جسم صلب به یکدیگر مقید شده‌اند. مشخصات مخزن فولادی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- مشخصات مخزن فولادی

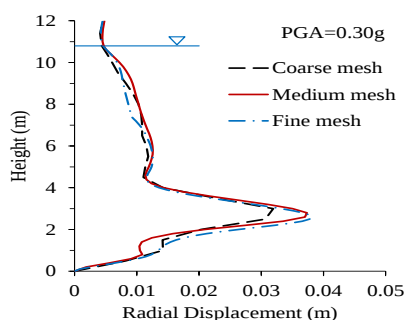
۵- تحلیل غیرخطی دینامیکی مخزن

برای تحلیل غیرخطی دینامیکی مخزن، سازه تحت اثر یک سری رکوردهای افقی و قائم زلزله با شدت‌های مختلف افزاینده قرار گرفته است. تحلیل دینامیکی افزایشی یا IDA مخزن تحت اثر هفت رکورد زلزله به صورت تک‌مؤلفه افقی (H) و دو مؤلفه افقی و قائم (HV) انجام شده است. در این پژوهش، مشابه تحقیقات صورت گرفته در مراجع [۱۰] و [۱۱]، برای تخمین شتاب حداکثر بحرانی زلزله که منجر به کمانش جداره مخزن می‌شود، برای معیار

صورت است که نوع خاک ایستگاه بر روی شتاب‌نگاشت ثبت‌شده تأثیر کمی داشته باشد و رکورد زلزله، دور از گسل محسوب شود. به همین جهت رکوردهای زلزله انتخاب‌شده روی خاک متراکم یا سنگ و در فاصلهٔ روکانونی بیش از ۲۰ کیلومتر ثبت شده‌اند. مشخصات رکوردهای زلزلهٔ مورد استفاده، در جدول (۲) ارائه شده است. در گام اول، تحلیل سازه، تحت اثر بارهای وزن خود مخزن و فشار هیدرواستاتیکی سیال انجام شده است. در گام دوم، تحلیل دینامیکی مخزن-سیال تحت اثر تحریک لرزه‌ای تک‌مؤلفه‌ای و یا دو‌مؤلفه‌ای با PGAهای مختلف انجام شده است. در مدل اجزای محدود اثرات غیرخطی‌های مصالح و هندسی در نظر گرفته شده و از اثر تغییر درجه حرارت‌های متعارف محیط روی سازهٔ مخزن صرف‌نظر شده است.

جدول ۲- مشخصات رکوردهای زلزله

PGA (g)	نوع خاک براساس NEHRP	Vs30 (m/s)	فاصلهٔ رومرکز (km)	بزرگا	ایستگاه	سال	نام زلزله	رکورد
0.198	C	600	24.18	6.61	Lake Hughes #4	1971	San Fernando	EQ1
0.357	C	505	20.24	6.50	Tolmezzo	1976	Friuli	EQ2
0.220	C	561	46.16	6.90	Brienza	1980	Irpinia	EQ3
0.115	C	729	38.73	6.19	Gilroy-Gavilan Coll.	1984	Morgan Hill	EQ4
0.182	C	605	22.36	6.76	Site 3	1985	Nahanni	EQ5
0.253	C	550	31.55	6.69	Big Tujunga, Ang.	1994	Northridge	EQ6
0.261	B	792	47.03	7.51	Gebze	1999	Kocaeli	EQ7



شکل ۶- توزیع تغییرمکان شعاعی حداکثر جدارهٔ مخزن در ارتفاع برای حالت‌های مش‌بندی درشت، متوسط و ریز

با توجه به شکل (۶)، تغییرمکان شعاعی حداکثر پوستهٔ مخزن، برای حالت‌های مش‌بندی درشت، متوسط و ریز به‌ترتیب ۰/۰۳۱۹، ۰/۰۳۷۴ و ۰/۰۳۸۱ متر محاسبه شده است. بنابراین تغییرمکان شعاعی حداکثر جدارهٔ مخزن برای حالت شبکه‌بندی متوسط، ۱۷/۲ درصد بیش‌تر از حالت شبکه‌بندی درشت به‌دست آمده است درحالی‌که تغییرمکان شعاعی حداکثر جدارهٔ مخزن برای حالت شبکه‌بندی ریز ۱/۹ درصد بیش‌تر از حالت شبکه‌بندی

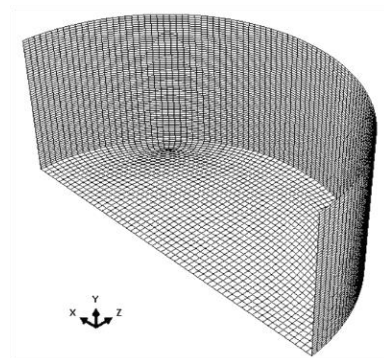
شدت زلزله از شتاب حداکثر زمین استفاده شده است. در این مقاله تحلیل حساسیت در مورد این که آیا PGA مناسب‌ترین معیار برای شدت زلزله می‌باشد، انجام نشده است و می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آینده باشد. رکورد افقی زلزله به‌ازای PGAهای مختلف از 0.05g تا 0.5g مقیاس شده است. در مجموع ۹۸ تحلیل غیرخطی دینامیکی انجام گرفته است. شتاب‌نگاشت‌ها از مجموعه شتاب‌نگاشت‌های مؤسسهٔ PEER انتخاب شده‌اند.

برای مقیاس‌نمودن رکوردهای زلزله به‌ازای هر شتاب زلزله مثلاً 0.05g، مؤلفهٔ افقی و قائم زلزله هر دو در یک ضریب مقیاس یکسان ضرب شدند تا PGA مؤلفهٔ افقی رکورد زلزله برابر شتاب مورد نظر مثلاً 0.05g شود. معیار رکوردهای انتخاب‌شده به این

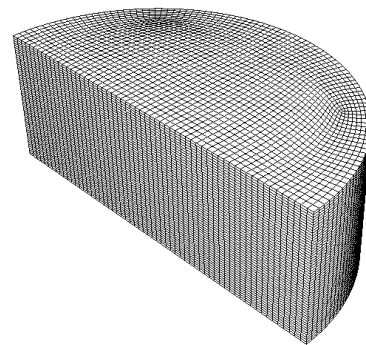
۵-۱- تحلیل حساسیت اندازهٔ مش‌بندی مدل اجزای محدود

برای دستیابی به نتایج دقیق در تحلیل کمانشی دینامیکی، تحلیل حساسیت بر روی اندازهٔ مش‌بندی مدل اجزای محدود مخزن انجام شده است. سه نوع مش‌بندی درشت، متوسط و ریز در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌های مخزن و سیال در امتدادهای طولی و پیرامونی در مش‌بندی درشت، متوسط و ریز به‌ترتیب ۰/۵×۰/۵، ۰/۲×۰/۲ و ۰/۱×۰/۱ متر است. برای تعیین محل وقوع کمانش جدارهٔ مخزن، ابعاد المان‌های پوسته در امتداد طولی کوچک‌تر از امتداد پیرامونی در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های غیرخطی مختلفی برای مدل‌های اجزای محدود با مش‌بندی مختلف انجام شد و تغییرات پاسخ تغییرمکان شعاعی حداکثر پوستهٔ مخزن مورد بررسی قرار گرفت. به‌عنوان نمونه، توزیع تغییرمکان شعاعی حداکثر جدارهٔ مخزن در ارتفاع، ناشی از مؤلفهٔ افقی زلزلهٔ Friuli با PGA=0.30g برای حالت‌های مش‌بندی درشت، متوسط و ریز، در شکل (۶) نشان داده شده است.

متوسط می‌باشد. بنابراین برای انجام تحلیل‌های اجزای محدود با هزینه و دقت مناسب، حالت مش‌بندی متوسط، 0.5×0.2 متر، انتخاب شده است. برای کاهش هزینه و زمان محاسبات اجزای محدود، نصف سیستم مخزن-مایع مدل‌سازی شده است. مدل سه‌بعدی اجزای محدود سیستم مخزن-مایع طراحی شده در این پژوهش در شکل (۷) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- مدل اجزای محدود مخزن ذخیره سیال (الف) سازه مخزن (ب) مایع

۵-۲- معیار کماتش دینامیکی

از آنجا که بار زلزله، بار دینامیکی محسوب می‌شود، کماتش پوسته مخزن تحت اثر شتاب زمین، از نوع کماتش دینامیکی می‌باشد. در ادبیات فنی، معمولاً برای تخمین بار کماتشی دینامیکی سازه‌ها، از معیار بودیانسکی-روث^۱ [۲۰] و یا معیار صفحه فاز^۲ استفاده شده است. در تحقیقات ویرلا و همکاران [۱۰] از معیار بودیانسکی-روث برای بررسی کماتش مخازن فولادی استفاده شده است. در معیار بودیانسکی-روث، سازه تحت اثر شدت‌های مختلف از بار دینامیکی تحلیل می‌شود. پاسخ تغییرمکان سازه

بر حسب زمان، برای شدت‌های مختلف بار رسم می‌شود. مقدار بار مشخصی که به‌ازای افزایش کوچک بار دینامیکی، جهش محسوسی در پاسخ تغییرمکان سازه ایجاد کند، بار بحرانی کماتش دینامیکی سیستم به حساب می‌آید. با رسم نمودار شدت بار دینامیکی بر حسب پاسخ تغییرمکان حداکثر سازه، مشخص می‌شود که برای بارهای بزرگ‌تر از بار بحرانی کماتش دینامیکی، شیب نمودار بار-تغییرمکان یا سختی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در این پژوهش برای تخمین بار کماتشی دینامیکی مخازن فولادی، از معیار بودیانسکی-روث استفاده شده است. پاسخ تغییرمکان حداکثر جداره مخزن، برای شدت‌های مختلف شتاب زلزله محاسبه شده است. مقدار بار مشخصی که به‌ازای افزایش کوچک بار دینامیکی، جهش محسوسی در پاسخ تغییرمکان جداره مخزن ایجاد کند، بار بحرانی کماتش دینامیکی مخزن به حساب می‌آید.

۶- نتایج تحلیل غیرخطی

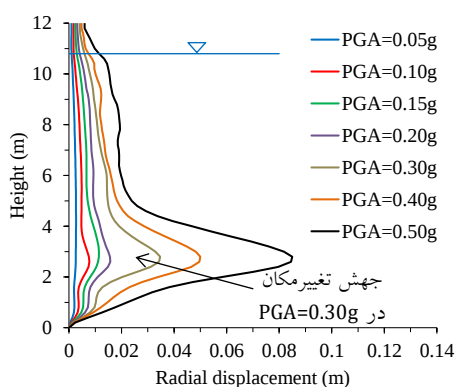
۶-۱- تغییرمکان شعاعی حداکثر پوسته مخزن

فشار هیدرواستاتیک ناشی از تحریک لرزه‌ای به‌علاوه فشار هیدرواستاتیک سیال درون مخزن، باعث تغییرمکان پوسته مخزن می‌شود. مقادیر متوسط تغییرشکل حداکثر پوسته مخزن به‌ازای PGAهای مختلف در جدول (۳) و نمودار ستونی در شکل (۸) ارائه شده است. همچنین متوسط تغییرشکل حداکثر پوسته مخزن در ارتفاع، ناشی از تحریک تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)، برای مقادیر مختلف شتاب حداکثر زمین، در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن تحت اثر هر دو حالت تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) در ارتفاع $2/8$ متر بالای کف مخزن رخ داده است. بنابراین اعمال شتاب قائم زلزله، باعث تغییر ناحیه کماتش جداره مخزن نشده است.

¹ Budiansky-Roth

² Phase Plane

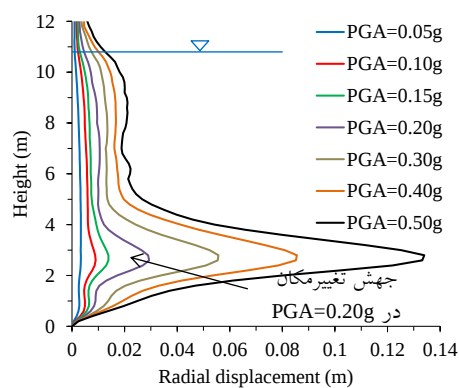
تحریک تک‌مؤلفه افقی زلزله، رخ داده است. درحالی‌که در شکل (۹-ب)، افزایش ناگهانی یا جهش در تغییرمکان پوسته مخزن ناشی از تحریک توأمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله، به‌ازای PGA حدود 0.20g ایجاد شده است. بنابراین مؤلفه قائم زلزله باعث کاهش قابل‌ملاحظه ظرفیت کماتش مخزن شده است. به‌عنوان نمونه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، به‌ترتیب دامنه تغییرشکل پوسته مخزن و تنش‌های ایجادشده در پوسته مخزن تحت اثر تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم (HV) برای زلزله Northridge با $PGA=0.50g$ ، در انتهای تحلیل دینامیکی، نشان داده شده است.



جدول ۳- متوسط تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن تحت اثر تحریک مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله (متر)

اختلاف (%)	مؤلفه افقی و قائم	مؤلفه افقی	PGA (g)
25.9	0.0034	0.0027	0.05
13.9	0.0090	0.0079	0.10
22.4	0.0142	0.0116	0.15
84.5	0.0297	0.0161	0.20
60.1	0.0562	0.0351	0.30
72.0	0.0865	0.0503	0.40
57.6	0.1346	0.0854	0.50

شکل ۸- متوسط تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن تحت اثر تحریک مؤلفه افقی (H) و دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)



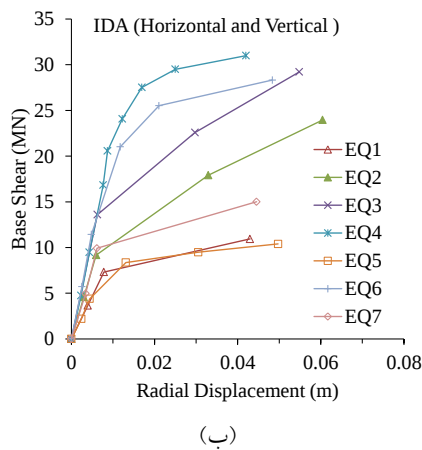
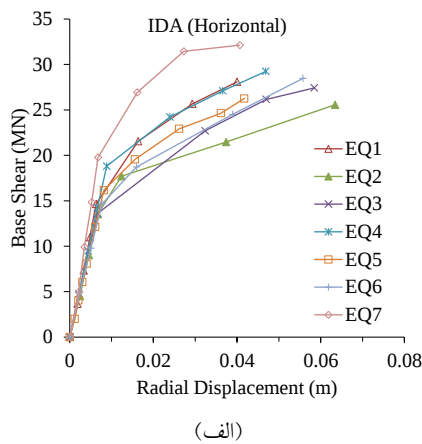
شکل ۹- توزیع متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن در ارتفاع تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی و (ب) دو مؤلفه افقی و قائم زلزله

مقایسه نتایج تغییرمکان حداکثر جداره مخزن با و بدون اثر شتاب قائم در شکل (۸)، نشان می‌دهد که متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن برای ترازهای مختلف PGA، در حالت ترکیب مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله، به میزان قابل‌توجهی بیش‌تر از حالت تک‌مؤلفه افقی است. متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن ناشی از تحریک دو مؤلفه‌ای، حداقل ۱۳/۹ درصد برای $PGA=0.10g$ و حداکثر ۸۴/۵ درصد به‌ازای $PGA=0.20g$ ، نسبت به حالت تحریک تک‌مؤلفه افقی، افزایش یافته است. در اثر اعمال شتاب قائم زمین، متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن برای PGA بزرگ‌تر یا مساوی 0.20g، حداقل ۵۷/۶ درصد افزایش یافته است. این درحالی است که متوسط تغییرمکان حداکثر جداره مخزن برای PGA کوچک‌تر از 0.20g، حداکثر ۲۵/۹ درصد افزایش را نشان می‌دهد. بنابراین افزایش متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن در اثر اعمال شتاب قائم زمین، برای PGA بزرگ‌تر یا مساوی 0.20g، در مقایسه با PGA کوچک‌تر از 0.20g، خیلی بیش‌تر است.

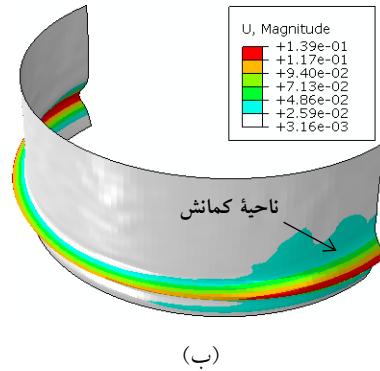
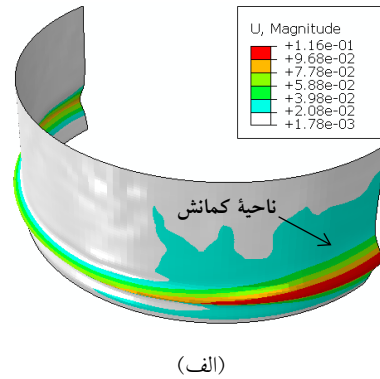
با توجه به شکل (۹-الف)، به‌ازای PGA حدود 0.30g، افزایش ناگهانی یا جهش در تغییرمکان پوسته مخزن ناشی از

۶-۲- منحنی ظرفیت کمانش دینامیکی مخزن

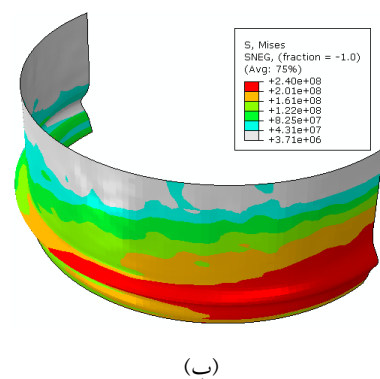
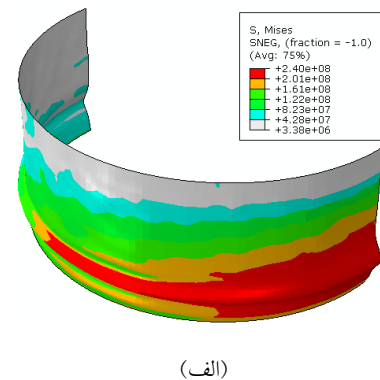
با انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، برای رکوردهای مختلف زلزله، منحنی برش پایه حداکثر بر حسب تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن، در اثر تحریک تک‌مؤلفه افقی (H) و تحریک توأمان دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) و همچنین متوسط منحنی‌های IDA در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر شتاب قائم زمین ممکن است باعث افزایش یا کاهش ظرفیت کمانشی مخزن شود که این بستگی به محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله دارد. در شکل (۱۴)، مقایسه منحنی‌های متوسط IDA در حالت‌های تک‌مؤلفه افقی (H) و دو مؤلفه افقی و قائم زلزله، بیانگر این است که اثر شتاب قائم زلزله باعث کاهش قابل ملاحظه ظرفیت کمانش دینامیکی پوسته مخزن شده است.



شکل ۱۲- دسته منحنی‌های IDA مخزن تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی زلزله (H) (ب) دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)

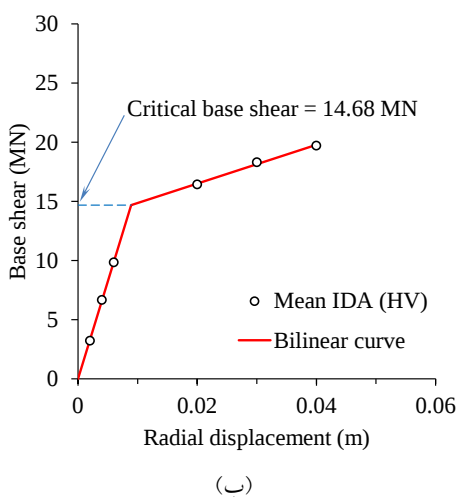
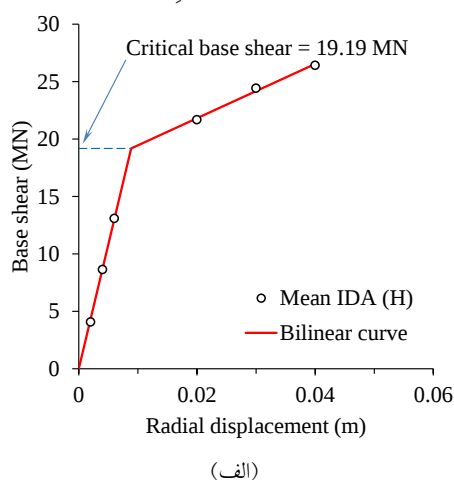


شکل ۱۰- تغییرشکل مخزن بر حسب متر تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی و (ب) مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله Northridge با $PGA=0.50g$

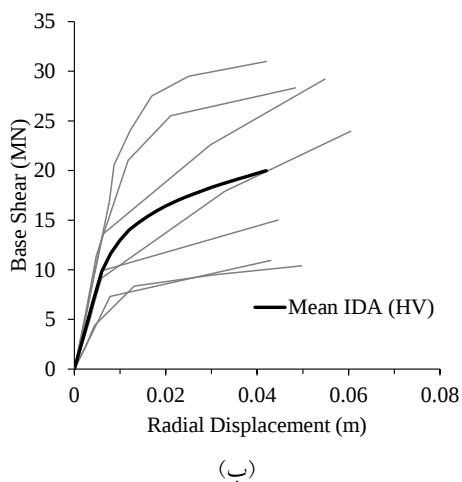
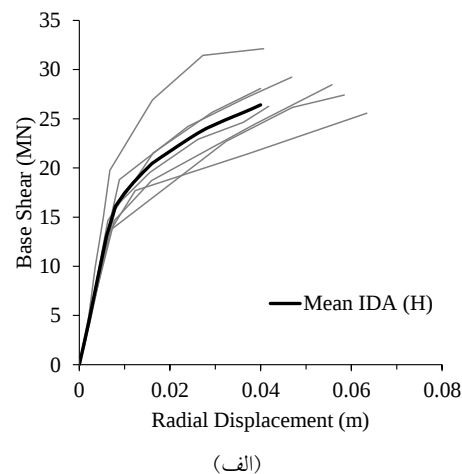


شکل ۱۱- تنش‌های جداره مخزن بر حسب پاسکال تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی و (ب) مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله Northridge با $PGA=0.50g$

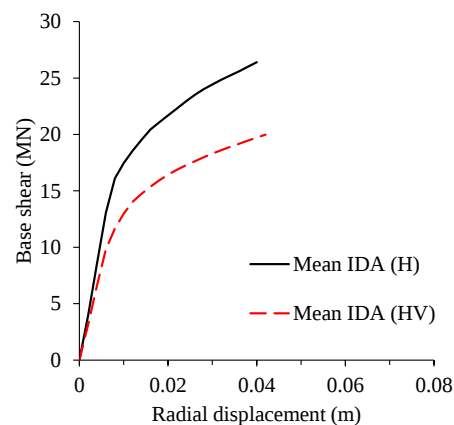
حداکثر پوسته مخزن، برای تخمین شتاب بحرانی کماتش مخازن فولادی استفاده شده است. در این پژوهش، برای تخمین نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی کماتش مخزن، نمودارهای دوخطی معادل برای منحنی‌های متوسط IDA در شکل (۱۵) رسم شده است. با استفاده از این نمودارهای دوخطی، نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی که فرای آن، سختی سازه به شدت کاهش می‌یابد، تعیین می‌شود. با توجه به شکل (۱۵)، نیروهای برش پایه دینامیکی بحرانی تحت اثر تحریک تک‌مؤلفه افقی و تحریک توأمان مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله به ترتیب برابر با ۱۹/۱۹ و ۱۴/۶۸ مگانیوتن است. نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی در حالت تحریک دو-جهتی (HV)، ۲۳/۵ درصد کوچک‌تر از برش پایه دینامیکی بحرانی در حالت تحریک تک-جهتی (H) است.



شکل ۱۵- منحنی‌های دوخطی ظرفیت کماتش دینامیکی مخزن تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی زلزله (H) (ب) دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)



شکل ۱۳- منحنی‌های ظرفیت کماتش دینامیکی مخزن تحت اثر (الف) تک‌مؤلفه افقی زلزله (H) (ب) دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)



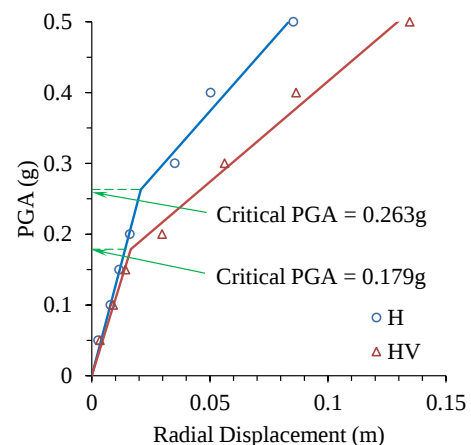
شکل ۱۴- متوسط منحنی‌های IDA در حالت‌های تک‌مؤلفه افقی (H) و دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)

در تحقیقات گذشته نظیر مراجع [۱۰ و ۱۱، ۱۹-۲۱] از روش منحنی دوخطی شتاب افقی حداکثر زلزله بر حسب تغییر مکان

۳-۶- شتاب بحرانی کماتش دینامیکی مخزن

در این بخش، متوسط PGA بحرانی رکوردهای زلزله که باعث ایجاد جهش ناگهانی در تغییر مکان حداکثر و یا کماتش دینامیکی پوسته مخزن فولادی می‌شود، محاسبه شده است. در شکل (۱۶)، متوسط جابه‌جایی حداکثر پوسته مخزن در گره بحرانی، به فاصله ۲/۸ متر بالای کف مخزن، بر حسب مقادیر متناظر شتاب حداکثر زمین، در اثر تحریک تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) رسم شده است.

در تحقیقات گذشته نظیر مراجع [۱۰ و ۱۱، ۱۹-۲۱] از روش منحنی دوخطی برای تخمین بار بحرانی کماتش مخازن فولادی استفاده شده است. با توجه به شکل (۱۳)، افزایش ناگهانی و یا جهش در تغییر مکان شعاعی جداره مخزن تحت اثر تحریک مخزن ناشی از تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) به ترتیب برای PGA بالاتر از ۰.۲۰g و ۰.۱۵g رخ داده است. با انجام تحلیل رگرسیون بر روی داده‌ها، مناسب‌ترین منحنی دوخطی در شکل (۱۴) رسم شده است. شیب اولیه منحنی دوخطی برابر با سختی الاستیک سازه است. چنانچه شتاب حداکثر مؤلفه افقی زلزله از مقدار شتاب بحرانی (PGA_{cr})، بیش‌تر شود، شیب منحنی دوخطی کاهش محسوسی خواهد یافت. با توجه به منحنی دوخطی، شتاب بحرانی کماتش الاستو-پلاستیک پوسته مخزن تحت اثر تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) به ترتیب برابر با ۰.۲۶۳g و ۰.۱۷۹g است. بنابراین مقدار PGA بحرانی کماتش الاستو-پلاستیک مخزن، در حالت تحریک دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) در مقایسه با حالت تحریک تک‌مؤلفه افقی (H)، ۳۱/۹ درصد کوچک‌تر است.



شکل ۱۶- شتاب بحرانی کماتش مخزن تحت اثر تک‌مؤلفه افقی (H) و دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV)

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کماتش دینامیکی مخازن فولادی استوانه‌ای زمینی تحت اثر شتاب‌های افقی و قائم زلزله با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی اجزای محدود سیستم مخزن-مایع در این پژوهش با نتایج تحلیلی موجود در ادبیات فنی تطابق نزدیکی دارد. تحلیل‌های دینامیکی افزایشی مخزن برای هفت شتاب‌نگاشت افقی و قائم زلزله با PGA از ۰.۰۵g تا ۰.۵g انجام پذیرفته است. نتایج حاصل به‌صورت زیر جمع‌بندی شده است:

- کوماتش دینامیکی پوسته مخزن تحت اثر تحریک تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) در ارتفاع ۲/۸ متر بالای کف مخزن رخ داده است. بنابراین اعمال شتاب قائم زلزله، باعث تغییر ناحیه کماتش جداره مخزن مورد مطالعه نشده است.
- نتایج تحلیل دینامیکی نشان داد که مؤلفه قائم زلزله باعث کاهش قابل‌ملاحظه ظرفیت کماتش پوسته مخزن مورد مطالعه شده است.
- نیروی برش پایه بحرانی کماتش دینامیکی مخزن تحت اثر تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) به ترتیب برابر با ۱۹/۱۹ و ۱۴/۶۸ مگانیوتن (نسبت برش پایه به وزن سیال به ترتیب برابر با ۰/۲۵۶ و ۰/۱۹۶) است. بنابراین نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی مخزن در حالت تحریک دو-جهتی (HV)، ۲۳/۵ درصد کوچک‌تر از برش پایه دینامیکی بحرانی در حالت تحریک تک-جهتی (H) است.
- شتاب بحرانی کماتش الاستو-پلاستیک (کوماتش پافیلی) پوسته مخزن مورد مطالعه تحت اثر تک‌مؤلفه افقی (H) و یا دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) به ترتیب برابر با ۰.۲۶۳g و ۰.۱۷۹g است. بنابراین مقدار PGA بحرانی کماتش الاستو-پلاستیک مخزن، در حالت تحریک دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (HV) در مقایسه با حالت تحریک تک‌مؤلفه افقی (H)، ۳۱/۹ درصد کوچک‌تر است.

۸- تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۱۴۰۳/۲۳۲۷ با استفاده از اعتبارات پژوهشی مرکز آموزش عالی محلات انجام شده است. بدین‌وسیله از حمایت مالی مرکز آموزش عالی محلات در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- liquid-filled steel conical tanks under vertical excitation", *Thin-Walled Structures*, 103, pp.199-210.
- [16] ABAQUS 6.10, Abaqus analysis user's manual, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2010.
- [17] Moslemi, M., and Kianoush, M.R. (2012), "Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks", *Engineering Structures*, 42, pp.214-230.
- [18] API Standard 650, (2013), *Welded Tanks for Oil Storage*, 12th ed., Washington, DC.
- [19] Buratti, N., and Tavano, M. (2014), "Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(1), pp.1-21.
- [20] Budiansky, B., and Roth, R.S. (1962), "Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells", *NASA Collected Papers on Stability of Shell Structures*, TN-1510, pp.597-606.
- [21] Maheri, M.R., and Abdollahi, A. (2013), "The effects of long term uniform corrosion on the buckling of ground based steel tanks under seismic loading", *Thin-Walled Structures*, 62, pp.1-9.
- [1] Hamdan, F.H. (2000), "Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks", *Journal of Constructional Steel Research*, 53(3), pp.307-333.
- [2] Niwa, A., and Clough, R.W. (1982), "Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(1), pp.107-122.
- [3] Rotter, J.M. (2006), "Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells," *Stahlbau*, 75(9), pp.742-747.
- [4] Housner, G.W. (1963), "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), pp.381-387.
- [5] Veletsos, A.S., and Auyang, J. (1977), "Earthquake response of liquid storage tanks", *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics*, ASCE Conference., p.24.
- [6] Barros, R., and Corbi, O. (2008), "An Overview on Some Ongoing Computational and Experimental Campaigns on Vibration Control by Liquid Tanks", *International Journal of Mechanics and Solids*, 3, pp.1-22.
- [7] Haroun, M. A. (1983), "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(2), pp.179-206.
- [8] Amabili, M. (2008), "Nonlinear vibrations and stability of shells and plates", Cambridge University Press.
- [9] Virella, J.C., Godoy, L.A., and Suárez, L.E. (2006), "Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions", *Engineering Structures*, 28(10), pp.1450-1461.
- [10] Virella, J.C., Godoy, L.A., and Suárez, L.E. (2006), "Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), pp.521-531.
- [11] Djermane, M., Zaoui, D., Labbaci, B., and Hammadi, F. (2014), "Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: Numerical evaluation of code provisions", *Engineering Structures*, 70, pp.181-196.
- [12] Sobhan, M.S., and Hosseini, P. (2022), "A Study of the Buckling Behavior of Aboveground Cylindrical Steel Tank under Seismic Loading", *Civil Infrastructure Researches*, 8(1), pp.21-34.
- [۱۳] عالم‌زاده، ح.، شکیب، ح. (۱۳۹۵)، "مطالعه عددی پاسخ مخازن زمینی فولادی با حرکت گهواره‌ای آزاد تحت اثر تحریک افقی زلزله"، *نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد*، دوره ۱۰، شماره ۲۰، ص. ۷۹-۷۱.
- [14] Kianoush, M.R., and Chen, J.Z. (2006), "Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks", *Engineering Structures*, 28(5), pp.704-715.
- [15] Musa, A., and El Damatty, A.A. (2016), "Capacity of