



Development of Seismic Fragility Curves of Cylindrical Concrete Tanks Using Nonlinear Analysis

shayan.khosravi¹, M. M. Yousefi², M. A. Goudarzi^{1,*}

¹ Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

² Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT: Fluid storage tanks are one of the most important components of vital lifelines, especially oil, petrochemical, and water transmission systems. The seismic behavior of liquid tanks in previous earthquakes shows that major damages in water reinforcement concrete tanks are shell cracking and consequential liquid leakage. In the present paper, the dynamic behavior of ground-supported concrete tanks is investigated to develop related fragility curves. The nonlinear numerical simulation is performed for three cases of concrete cylindrical tanks with variable height to diameter ratios. In these simulations cracking of concrete is considered as the damage criteria, and the fragility curves of the tanks for the critical crack width recommended by the Iranian code of 123 are developed. These curves are compared with those recommended by previous researchers and extracted from linear analyses. The results indicate that the three-dimensional iterative cracks and their effect on the total dynamic response of concrete storage tanks can considerably affect the shape of fragility curves which is generally used for mentioned network risk assessment.

Review History:

Received: 10/13/2020

Revised: 1/30/2021

Accepted: 2/15/2021

Available Online: 2/16/2021

Keywords:

Concrete tanks

Nonlinear dynamic analysis

Seismic fragility curve

Numerical modeling

Solid element

1. INTRODUCTION

According to the previous researches, most of the vulnerability studies of tanks are focused on steel tanks. For steel tanks, fragility curves for different failure modes such as shell buckling, roof damage due to the sloshing, etc. One of the most important references in seismic risk assessment of structures is the SYNER-G and HAZUS software in which the lack of concrete tank fragility curves is quite noticeable [1,2]. For evaluating the seismic vulnerability of the water network lifeline, the development of fragility curves of concrete tanks is essential which is the main purpose of this study.

2. METHODOLOGY

The geometric characteristics of the designed tanks are presented in "Table 1".

Using the ACI 350.3, the time of each tank is calculated and is presented in "Table 2" [3,4].

Eqs. (1) and (2) have been used to calculate and distribute the dynamic liquid pressure on the tank shell. In Eq. (1), the dynamic forces caused by liquid in terms of base shear is calculated for a various earthquake based on the simplified mechanical models for each tank. Then, the liquid pressure distribution can be obtained based on the analytical pattern of liquid pressure distribution in radial and circumferential directions (Eq. (2)).

*Corresponding author's email: m.a.goudarzi@iiees.ac.ir

Table 1. The aspect ratio of considered concrete tanks.

Tank type		Fluid height (m)	Height (m)	Diameter (m)
Tall	1	9	10	10
Medium	0.5	9	10	20
Short	0.25	4.5	5	20

$$V_{baseshear}(t) = \int_0^{H_w} \int_0^{2\pi} 2.Pd(t).Rd\theta.dh.cos\theta \quad (1)$$

$$Pd(t) = \frac{3}{2\pi.R.H_w} V_{baseshear}(t).cos\theta \left(1 - \frac{h^2}{H_w^2}\right) \quad (2)$$

After calculating the liquid pressure, it is exerted on the tank shell. The numerical simulation has been performed in Ansys finite element-based software. According to the tank symmetry parallel to the direction of the earthquake, half of the tanks are considered in the finite element model. The fixed condition is considered for the bottom of the tank shell. SOLID65 element which is known as the concrete element is used to simulate the reinforced concrete considering nonlinear behavior. The rebars are not modeled separately, but as a portion of the concrete element area. Both geometrical and material nonlinearities are considered in numerical analyses. The concrete elements can crack during the load increment

Table 2. The primary parameters used to evaluate the seismic response of a tank.

		Short Tank	Medium Tank	Tall Tank
Impulsive	M_i+M_w (N.mm)	752	2154	857
	K_i (N/mm)	19821633	27083907	2159453
	T_i (S)	0.0387	0.0560	0.1252
	ζ^i (%)	5	5	5
Convective	M_c (N/mm)	1121	1384	144
	K_c (N/mm)	1375	2322	519
	T_c (S)	5.67	4.85	3.31
	ζ^c (%)	0.5	0.5	0.5

Table 3. Median values and standard deviation for considered tanks.

Tank	Damage state	θ	β
Short	CCW = 0.1mm	1.1	0.16
	CCW = 0.3mm	1.3	0.21
Medium	CCW = 0.1mm	0.8	0.26
	CCW = 0.3mm	1	0.31
Tall	CCW = 0.1mm	0.3	0.41
	CCW = 0.3mm	0.6	0.54

on the tank shell. Therefore, the stiffness of the tank shell can be changed by pushover analysis. Finally, the value of tensional strain on rebars is extracted from analyses and the crack width is obtained by Eq. (3), suggested by the Iranian code of 123.

$$W = \frac{(4.5 a_{cr} \epsilon_m)}{(1+2.5((a_{cr}-c)/(h-x))} \tag{3}$$

ϵ_m , Rebar strain at the desired level to calculate the crack width taking into account the effect of concrete hardening in the tensile zone,

a_{cr} Parameter related to the cover and the distance between the rebars,

h Overall section height,

x Neutral axis height,

c Net concrete covering

W The crack width is in millimeters.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, fragility curves that are extracted for

three considered tanks are discussed. A statistical Log-Normal distribution is considered for the Crack Width (CW) as demanded engineering parameter at each Peak Ground Acceleration (PGA). To evaluate the probability of exceeding a certain threshold (here the critical crack width of 0.1 or 0.3 mm), the mean and standard deviation of each crack width caused by various records with different levels of acceleration intensity is calculated. Then, using the cumulative lognormal distribution function, the probability of passing each crack width from the critical crack width is obtained. The relationships used to generate fragility curves with the lognormal cumulative distribution are based on Eqs. (4) to (6) [5].

$$P(C|IM=x) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{\theta} \right)}{\beta} \right) \tag{4}$$

$$\ln \theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln IM_i \tag{5}$$

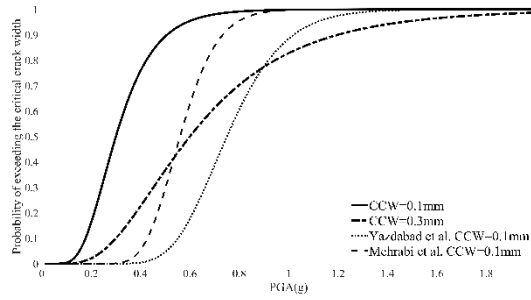


Fig. 1. Comparison of tall tank fragility curves obtained from nonlinear analyses with previously recommended curves based on linear analyses [5,6].

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(IM_i / \theta))^2} \quad (6)$$

The mean values (θ) and standard deviation (β) of various tanks for two critical crack widths are given in “Table 3”. Also, the fragility curves developed here are compared with the curves recommended in previous articles for long tanks is given in “Fig. 1”.

4. CONCLUSIONS

In this study, the fragility curves of water concrete tanks have been extracted by considering the geometric and material nonlinearities in a 3D finite element model. In this simulation, the rebars are considered and the possibility of iterative concrete cracking during the nonlinear analysis is also provided. The results of the parametric study in terms of fragility curves are extracted and compared with the previously recommended fragility curves based on the linear analyzes without considering the effect of cracking and rebars modeling. The results indicate that the effect of cracking in the analysis of tanks can significantly change the fragility curves of tanks compared to the linear analysis. For the failure limit proportional to the crack width of 0.3 mm, the standard deviation value is greater than the failure limit proportional to the crack width of 0.1 mm. The results also show that the distribution of cracking area and the percent of its opening is quite different in the nonlinear analyses. For

the tank aspect ratios considered here, it is observed that the probability of tank vulnerability is increased by the increment of aspect ratio from short to medium tanks by 25%, and from medium to long tanks by 50%.

REFERENCES

- [1] SYNER-G. “D8.10 - Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities.” (2013).
- [2] MR, HAZUS-MH. “Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model.” Department of Homeland Security, FEMA, Washington, DC (2003). Porter, Keith. “Beginner’s guide to fragility, vulnerability, and risk.” *Encyclopedia of earthquake engineering* (2015): 235-260.
- [3] ACI Committee 350.3-06, “Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary”, Farmington Hills (MI, USA), American Concrete Institute, 2006.
- [4] Technical Assistant, Office of Research and Technical Criteria, Planning and Budget Organization, “Criteria and Criteria for Designing and Calculating Groundwater Reservoirs”, Review 123, 2015.
- [5] Yazdabad, Mohammad, Farhad Behnamfar, and Abdolreza K. Samani. “Seismic behavioral fragility curves of concrete cylindrical water tanks for sloshing, cracking, and wall bending.” *Earthquakes and Structures* 14.2 (2018): 95-102.
- [6] Hajimehrabi, Hossein, et al. “Fragility curves for baffled concrete cylindrical liquid-storage tanks.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 119 (2019): 187-195.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Sh. Khosravi, M. M. Yousefi, M. A. Goudarzi, *Development of Seismic Fragility Curves of Cylindrical Concrete Tanks Using Nonlinear Analysis*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 19-22.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19121.7079](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19121.7079)





توسعه منحنی های شکنندگی لرزه ای مخازن بتنی استوانه ای با استفاده از تحلیل غیرخطی

شایان خسروی، محمد مهدی یوسفی، محمدعلی گودرزی*

پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین المللی مهندسی زلزله و زلزله شناسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

کلمات کلیدی:

مخازن بتنی استوانه ای

تحلیل دینامیکی فزاینده غیرخطی

منحنی شکنندگی (آسیب

پذیری) لرزه ای

مدل سازی عددی

خلاصه: مطالعه گزارشات خرابی لرزه ای مخازن در زلزله های گذشته نشان می دهد که یکی از آسیب های عمده در مخازن بتنی که معمولا برای ذخیره آب استفاده می شوند، ترک خوردگی و نشست مایع درون آن می باشد. از این رو، در مقاله حاضر، تحلیل و ارزیابی مخازن بتنی روزمینی، به منظور توسعه منحنی آسیب پذیری برای این مخازن تحت بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، تحلیل های عددی غیرخطی با لحاظ کردن ترک خوردگی بتن، برای سه تیپ مخزن استوانه ای بتنی با نسبت ارتفاع به قطر متغیر انجام شده است. سپس، منحنی های شکنندگی مخازن برای عرض ترک بحرانی بر اساس توصیه نشریه ۱۲۳ استخراج گردیده است. این منحنی ها با نتایج تحقیقات قبلی که در حالت خطی و بدون لحاظ کردن ترک بدنه مخزن انجام شده است، مقایسه شده و در خصوص اثرات اعمال عرض ترک در آنالیزها بحث شده است. نتایج حاکی از لزوم اعمال شرایط ترک خوردگی مخزن در انجام آنالیزهای دینامیکی فزاینده و استخراج منحنی های شکنندگی دارد. در مخازن بلند در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن در تحلیل ها حیاتی بوده و منحنی های شکنندگی بدست آمده با تحلیل خطی از اعتبار کمی برخوردار است. به طور کلی با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخازن مورد بررسی پژوهش از مخزن کوتاه به متوسط ۲۵٪ و از مخزن متوسط به بلند ۵۰٪ احتمال آسیب پذیری مخازن بر اساس منحنی شکنندگی افزایش می یابد.

۱- مقدمه

مخازن ذخیره سیالات در مجموعه های صنعتی مانند مجموعه های نفتی، پتروشیمی، سیستم های تصفیه و انتقال آب مورد استفاده قرار می گیرند. از همین رو اطمینان از ایمنی و پایداری مخازن در شرایط استاتیکی و دینامیکی، به ویژه در مناطق با لرزه خیزی بالا بسیار حائز اهمیت است. از مخازن فولادی برای نگهداری سیالاتی همچون نفت و مشتقات آن و مخازن بتنی بیشتر برای ذخیره آب، پسماندهای فاضلاب و در موارد محدودی برای ذخیره مشتقات نفتی استفاده می شود. نظر به اهمیت مباحث لرزه ای در مخازن ذخیره مایع و نقش کلیدی این سازه ها در خدمات رسانی پس از زلزله، تهیه منحنی های

شکنندگی برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای مخازن استوانه ای بتنی می تواند در بررسی سطح خطر زلزله و احیای شبکه های مرتبط با شریان های حیاتی بسیار مؤثر باشد.

بر اساس پژوهش های انجام شده تاکنون، بیشتر بررسی های آسیب پذیری مخازن معطوف به مخازن فلزی بوده و منحنی های شکنندگی (آسیب پذیری) برای حالات خرابی مختلف این نوع مخازن از قبیل انواع کمانش جداره مانند کمانش الماسی و پافیلی، آسیب به جداره سقف فولادی در اثر تلاطم و ... تهیه شده است. از مهم ترین مراجع در زمینه می توان به کتابخانه نرم افزارهای SYNER-G و HAZUS اشاره کرد که فقدان منحنی های مخازن بتنی در آن کاملا محسوس است [۲۱]. به همین دلیل، توسعه منحنی های

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.a.goodarzi@iiees.ac.ir



شکندگی این نوع مخازن ضروری به نظر می رسد.

۱-۱- تاریخچه ادبیات

همان طور که اشاره شد، اهم تحقیقات صورت گرفته در رابطه با مخازن فولادی می باشد. در این زمینه، بهارگاوا و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۵ در مقاله ای تحت عنوان پاسخ لرزه ای و آنالیز شکندگی در مخازن ذخیره سیال، آسیب پذیری لرزه ای مخزن کروی حاوی سیال را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه تحلیل تنش بر روی مخزن ذخیره با استفاده از بار استاتیکی و بارهای لرزه ای صورت گرفت و بر اساس نتایج به دست آمده، محتمل ترین حالات خرابی در اثر زمین لرزه مورد ارزیابی قرار گرفت. آن ها علاوه بر محاسبه نرخ نشت سیال از مخزن و زمان متوسط تخلیه مخزن، پارامترهای مختلف ترک مانند عرض ترک و فاصله ترک ها در مکان موردنظر را ارزیابی کردند. تعیین عرض ترک و میانگین فاصله ی ترک ها در این تحقیق، با استفاده از روابط ارائه شده در آئین نامه های 2000 BIS و 1990 ACI انجام شده است. در انتها منحنی های شکندگی لرزه ای را به صورت توابع احتمالاتی شرطی بر اساس حداکثر شتاب زلزله (PGA)، ترسیم کردند. در این مطالعه تنش ها بر مبنای تئوری الاستیک خطی محاسبه شده اند.

رزاقی و عشقی [۴] در مقاله ای با استفاده از روش تحلیلی به ارائه منحنی های شکندگی لرزه ای در مخازن فولادی نفت پرداختند. آن ها همچنین منحنی های به دست آمده را با منحنی های شکندگی قضاوتی و تجربی موجود مورد مقایسه قرار دادند. در این مطالعه، تحلیل تاریخچه زمانی بر روی ۵ مخزن با نسبت ارتفاع به قطر مختلف و ۵ حجم ذخیره مختلف از سیال، انجام شده است. مخازن بر روی فونداسیون صلب قرار گرفته اند. منحنی های ترسیم شده در این مطالعه بر اساس حداکثر شتاب زمین ارائه شده اند که بیانگر وابستگی بالای شکندگی مخازن به ویژگی های هندسی مخازن و حجم سیال ذخیره شده دارد. در انتها منحنی های شکندگی تحلیلی به دست آمده در این تحقیق با منحنی های شکندگی تجربی در آیین نامه HAZUS و مطالعه O'Rourke نیز مورد مقایسه قرار گرفت.

برهنم و بهنام فر [۵] در تحقیقی تحت عنوان مدل تقاضای احتمالاتی و تخمین شکندگی برای مودهای بحرانی شکندگی در

مخازن فولادی مهارنشده، به ارائه منحنی های شکندگی احتمالاتی در مخازن فولادی در پالایشگاه صنعت نفت پرداختند. در این مطالعه، از رویکرد به روزرسانی شده Bayesian برای ارزیابی پارامترهای ناشناخته ی مدل تقاضا استفاده شده است. همچنین مخازن به صورت ۹۰ درصد پر در نظر گرفته شده اند، زیرا زلزله های گذشته نشان داده اند که سطح بالاتر آب در مخزن آسیب های بیشتری را ایجاد می کند. رویکرد Bayesian به خوبی عدم قطعیت ها را در مدل در نظر می گیرد. آن ها منحنی های شکندگی به دست آمده در یک مخزن خاص را برای دو مود خرابی کمانش را با ۲۱ مخزن موجود در بانک اطلاعاتی American Library Association (ALA) مورد مقایسه قرار دادند.

رزاقی و محبی [۶] در مطالعه ی دیگری کار خود را بر روی مخازن فلزی ادامه دادند و به پیش بینی عملکرد لرزه ای مخازن فولادی استوانه ای، با استفاده از مدل شبکه های عصبی مصنوعی پرداختند. آنها به منظور توسعه این مدل، ۲۴۰ اطلاعات لرزه ای از ادبیات فنی مربوطه را جمع آوری کرده و ۵۰ مورد از این اطلاعات را به صورت تصادفی به عنوان یک مجموعه آزمایشی و ۱۹۰ مورد دیگر را برای ایجاد مدل استفاده کردند. اطلاعات استفاده شده در مدل شبکه عصبی مصنوعی، به شش پارامتر ورودی مرتب شده اند. این پارامترها شامل حداکثر شتاب زمین، قطر مخزن، ارتفاع مخزن، ارتفاع تلاطم سیال در حین زلزله و درصد پرشدگی مخزن است. پنج حالت از خرابی مطابق تقسیم بندی HAZUS در نظر گرفته شده است. حالت های خرابی به دست آمده در هر شتاب طیف با استفاده از روش ارائه شده در تحقیق مذکور، با خرابی های واقعی مخازن که در HAZUS گزارش شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

کولومبو و المازان [۷] نیز اخیراً به ارائه منحنی های شکندگی برای مخازن پایه دار موجود در صنعت آبمیوه سازی، با استفاده از جداسازی لرزه ای مخازن پرداختند. در طی زلزله های مختلف، گزارش های زیادی از خرابی این مخازن که حدود ۳۰۰۰ لیتر ظرفیت دارند و از جنس فولاد ضدزنگ هستند، ارائه شده است. آن ها منحنی های شکندگی این مخازن را به صورت عددی مدل سازی کرده و در دو حالت با و بدون سیستم جداساز ارائه کردند. نتایج آنالیزهای لرزه ای شکندگی نشان دادند که سیستم جداساز لرزه ای در کاهش احتمال رسیدن به حالت حدی سازه و خرابی مخزن بسیار

مؤثر بوده و تا ۹۰ درصد باعث کاهش آن می شود.

یزدآباد و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸، در مقاله ای تحت عنوان ارائه منحنی های آسیب پذیری برای مخازن بتنی استوانه ای آب، به ارائه منحنی های شکنندگی پرداخته اند. در این تحقیق سه نوع مخزن با نسبت ارتفاع به قطرهای مختلف، در دسته بندی های بلند، متوسط و کوتاه مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی های شکنندگی برای ظرفیت خمشی مقطع دیوار، سرریز سیال و عرض ترک بحرانی قائم ارائه شده است. عرض ترک بر مبنای نتایج تحلیل های خطی مورد محاسبه قرار گرفته است.

حاجی مهرابی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹، در کار خود با موضوعیت ارائه منحنی های شکنندگی لرزه ای برای مخازن بتنی استوانه ای بافل دار ذخیره مایعات، به بررسی مخازن بافل دار پرداختند. در این پژوهش هم مخازن در سه نوع کوتاه، متوسط و بلند مورد تحلیل قرار گرفته اند و منحنی های شکنندگی برای لنگر واژگونی کل در پای دیواره مخزن، ظرفیت خمشی مقطع دیواره و عرض ترک بحرانی قائم برای مخازن مجهز به تیغه های افقی برای کاهش تلاطم سیال ارائه شده است.

با بررسی تحقیقات قبلی، می توان دید که در رابطه با مخازن فولادی تحقیقات نسبتاً مفصلی در خصوص تهیه منحنی های شکنندگی صورت گرفته است. اما در خصوص مخازن بتنی تحقیقات انجام شده کمتر بوده و همه آنها در حوزه ی آنالیزهای خطی به تحلیل تنش ها پرداخته اند. این در حالی است که مخازن بتنی در عمل ترک خورده و رفتار غیر خطی از خود نشان می دهند. لذا تحقیق حاضر کوشیده است که حوزه تحلیل های واقعی بتن و اثر رفتار غیر خطی آن بر منحنی های شکنندگی مخازن را تا حد ممکن تبیین نماید.

۲-۱- ملاحظات پژوهش

آن گونه که اشاره شد، آنجایی که رفتار بتن پس از ترک خوردگی غیرخطی می باشد، با تحلیل خطی نمی توان مقدار دقیق عرض ترک را محاسبه کرد. از این رو پس از بررسی ادبیات فنی مربوط به این موضوع، سه تیپ مخزن با ابعاد و نسبت ارتفاع به قطر مختلف در اندازه های کوتاه ($H/D = 0.25$)، متوسط ($H/D = 0.5$) و بلند ($H/D = 1$) مطابق ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه

مخازن آب زمینی (بازنگری نشریه ۱۲۳ که از این به بعد به اختصار نشریه ۱۲۳ خطاب می شود [۱۱]) طراحی شده است. با توجه به اصل تقارن در تحلیل سازه ها که در مخازن از حیث هندسی، بارگذاری و خصوصیات مصالح برقرار است، می توان نصف مخازن را برای تحلیل های عددی، در شبیه سازی رایانه ای در نظر گرفت. از این رو نصف مخازن استوانه ای در نرم افزار اجزا محدود ANSYS مدل سازی شده است. مدل سازی نصف مخازن به جای کل آن، این مزیت را داشته که زمان های تحلیل های کامپیوتری بدون کم شدن دقت، کاهش یابد. موضوع کاهش زمان های تحلیل با توجه به ازدیاد تحلیل های مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی فزاینده (Incremental Dynamic Analysis) و تهیه منحنی های شکنندگی لرزه ای بسیار کاربردی می باشد. در این پژوهش سیال درون مخزن به دلیل مشکلات عدم همگرایی تحلیل و طولانی شدن زمان تحلیل ها در شبیه سازی در نظر گرفته نشده است و بار هیدرواستاتیک و بار هیدرودینامیک ناشی از سیال بر روی دیواره مخزن توزیع شده است. بر اساس پیشنهاد هازنر (Hausner) که مبنای کار آیین نامه 3-ACI350 و بازنگری نشریه ۱۲۳ می باشد، سیال درون مخزن را می توان با حداقل دو جرم و فنر معادل جایگزین کرد [۱۰ و ۱۱]. با استفاده از ۷ رکورد زلزله که بر اساس فاصله و مکانیزم گسل های اطراف مخازن موجود در تهران انتخاب شده و مقیاس کردن آن ها با گام های $0.1g$ ، تحلیل IDA بر روی مخازن انتخابی انجام شده است. در نهایت با نتایج حدود ۲۱۰ عدد تحلیل غیرخطی زمان بر، منحنی های شکنندگی مخازن حاصل شده است.

۲- طراحی مخازن پژوهش

اکثر مخازن بتنی استوانه ای ساخته شده در اروپا و امریکا، در نسبت ارتفاع به قطر 0.2 تا 0.8 ساخته می شوند [۸]. اوضاع در کشور ما نیز چنین است. لذا، برای انجام مطالعات پارامتریک عددی، سه مدل مخزن استوانه ای بتنی با نسبت ارتفاع سیال به قطر مختلف در سه تیپ کوتاه، متوسط و بلند در این تحقیق در نظر گرفته شده است. نسبت ارتفاع سیال به قطر در مخزن کوتاه برابر 0.25 ، مخزن متوسط 0.5 و در مخزن بلند برابر با ۱ است. عبارتهای کوتاه، متوسط و بلند استفاده شده در این مطالعه، صرفاً معنای نسبی دارند و هیچ ضابطه ای برای این گونه طبقه بندی مخازن بتنی در مراجع معتبر

جدول ۱. خصوصیات هندسی مخازن مورد استفاده

Table 1. Geometric properties of the used tanks

مخزن	قطر (m)	ارتفاع (m)	ارتفاع سیال (m)	نسبت H/D	ضخامت (m)
بلند	۱۰	۱۰	۹	۱	۰/۴
متوسط	۲۰	۱۰	۹	۰/۵	۰/۴
کوتاه	۲۰	۵	۴/۵	۰/۲۵	۰/۳

جدول ۲. خصوصیات مصالح

Table 2. Properties of materials

نوع مصالح	مقاومت مشخصه فشاری (MPa)	چگالی (kg/m ³)
بتن	۳۰	۲۴۰۰
آب	-	۱۰۰۰

جدول ۳. مقادیر پارامترهای موردنیاز برای محاسبه برش پایه مخازن

Table 3. The values of the parameters required to calculate the tanks base shear

	نوع مخزن	مخزن کوتاه	مخزن متوسط	مخزن بلند
بخش ضربانی (Impulsive)	Mi+Mw(N.s ² /mm)	۷۵۲/۸۸	۲۱۵۴/۰۳	۸۵۷/۴۹
	ki(N/mm)	۱۹۸۲۱۶۳۳/۹	۲۷۰۸۳۹۰۷/۳	۲۱۵۹۴۵۳/۳
	Ti(S)	۰/۰۳۸۷	۰/۰۵۶۰	۰/۱۲۵۲
	ζ_i (%)	۵	۵	۵
بخش موج (Convective)	Mc (N.s ² /mm)	۱۱۲۱/۳۱	۱۳۸۴/۰۱	۱۴۴/۱۶
	kc(N/mm)	۱۳۷۵/۱۱	۲۳۲۲/۵۲	۵۱۹/۰۷
	Tc(S)	۵/۶۷	۴/۸۵	۳/۳۱
	ζ_c (%)	۰/۵	۰/۵	۰/۵

که در محاسبه ضرایب لرزه ای لازم در روابط بازنگری نشریه ۱۲۳ فرض شده که بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ مخازن در منطقه با خطر لرزه ای نسبی خیلی زیاد و بر روی خاک تپ دو واقع شده اند. پس از محاسبه ی نیروهای دینامیکی ایجاد شده در مخازن، توزیع آن ها در ارتفاع و پلان با استفاده از روابط بازنگری نشریه ۱۲۳ محاسبه شده است. بعد از محاسبه ی نیروهای دینامیکی و هیدرواستاتیک سیال در هر تراز ارتفاعی، تحلیل مخازن با استفاده از نرم افزار SAP 2000 انجام شده و برای مدل سازی مخزن از المان Shell استفاده

ذکر نشده است. در تحلیل و طراحی این مخازن فرض شده است که آن ها تا ۹۰ درصد از سیال پر شده اند. در جدول ۱ مشخصات هندسی مخازن مورد بررسی در این مطالعه ارائه شده است.

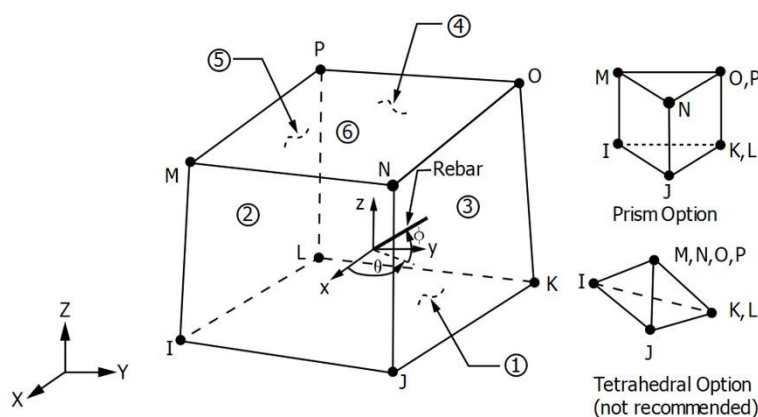
در این تحقیق سیال موجود در مخازن آب در نظر گرفته شده است. ویژگی مصالح استفاده شده (آب و بتن) در جدول ۲ ارائه شده است.

با استفاده از روابط بازنگری نشریه ۱۲۳، زمان تناوب هریک از آن ها محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است

جدول ۴. مقادیر آرماتورهای حلقوی و قائم محاسبه شده

Table 4. The values of radius and vertical reinforcements are calculated

مخازن	مساحت آرماتور حلقوی برای واحد عرض (cm^2) دیوار	مساحت آرماتور قائم برای عرض دیوار (cm^2) واحد
بلند	۱۹/۸۲	۱۹/۲۰
متوسط	۲۰/۳۳	۱۹/۲۰
کوتاه	۱۳/۲۰	۱۳/۲۰



شکل ۱. هندسه المان SOLID65

Fig. 1. SOLID65 element geometry

زیاد تحلیل ها که به صورت تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) صورت گرفته، تصمیم بر مدل کردن نصف مخزن بر اساس اصل تقارن گرفته شد (شکل ۲). در این شکل باید دقت کرد که محور تقارنی که مخزن را به دو نیمه تقسیم کرده است، موای با جهت اعمال زلزله در نظر گرفته شده است تا هم بارگذاری و هم هندسه نسبت به این محور در تقارن باشند. از این رو با استفاده المان SOLID65 که قابلیت مدل سازی بتن را به صورت خطی و غیرخطی فراهم می کند، مخازن به صورت نیم استوانه مدل شده اند. پایه مخازن به صورت گیردار با کف مخزن بسته شده است. به عبارت دیگر، درجات آزادی انتقالی و دورانی نقاط را توضیح دهید.

المان امکان مدل سازی بتن با و یا بدون آرماتور تقویتی را فراهم می کند. این المان قابلیت ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار را داشته و توانایی تحلیل غیرخطی مصالحی چون بتن را به شکل مطلوبی فراهم کرده است. این المان علاوه بر توانایی درک ترک و

شده است. در طراحی اولیه آرماتورهای حلقوی و قائم مخزن، نیروهای داخلی پوسته مخزن در قالب لنگر و نیروی محوری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

هر جزیی از سازه ی مخازن باید طوری طرح شود که بتواند به طور مطمئن در مقابل تمام ترکیب بارهایی که امکان تأثیر آنها در عمر بهره برداری مخازن وجود دارد، ایستادگی نماید. ترکیب بارگذاری های معمول در روش طراحی به روش حالات حدی، همراه با ضرایب بار مربوطه بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران و بازنگری نشریه ۱۲۳ ملاک کار قرار گرفته است. در نهایت مشخصات آرماتورهای مورد نیاز برای هر مخزن با استفاده از روابط ACI318 محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

۳- مدل سازی مخزن در نرم افزار ANSYS

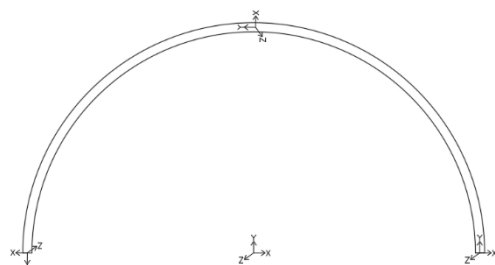
با توجه به زمان بر بودن تحلیل های غیرخطی و همین طور تعداد

مختلف می باشد، در نظر گرفته شده اند. مقادیر درصد آرماتور در راستاهای مختلف مخزن در جدول ۵ آورده شده است. در بخش هایی از جداره مخزن که آرماتور وجود ندارد، $\rho_{min} = 0/003$ و در سایر لایه های جداره درصد آرماتور موجود در هر جهت مطابق جدول ۵ لحاظ شده است.

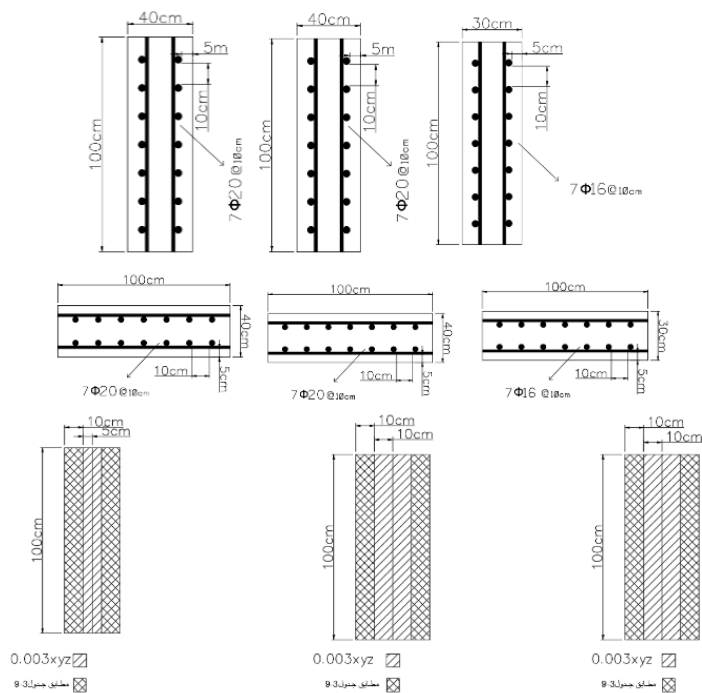
پارامترهای مربوط به مدل رفتاری ویلیام-وارنکی که در این پژوهش استفاده شده در جدول ۶ آورده شده است [۱۳ و ۱۴]. ضریب انتقال برش عددی بین صفر و یک است که مقدار آن بسته به سازه متغیر است.

خرد شدن بتن در سه جهت متعامد، قادر به محاسبه تغییرشکل پلاستیک و خزش نیز می باشد. آرماتورها توانایی تحمل تنش های کششی و فشاری را داشته و توانایی تحمل نیروی برشی را ندارند. در شکل ۱ هندسه این المان آورده شده و همین طور به زاویه هایی که آرماتور با جهات مختلف می سازد، اشاره شده است.

همین طور جهت های قراردادی برای لحاظ آرماتور مدل بر اساس شکل ۲ در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش دقت مدل سازی، مقاطع طراحی شده با تغییرات اعمال شده در شکل ۳ که شامل تقسیم شدن جداره مخزن به چهار قسمت با درصد آرماتورهای



شکل ۲. جهت های قراردادی در نرم افزار انسیس
Fig. 2. Coordinate directions in Ansys software



شکل ۳. جزئیات آرماتور گذاری سه تیپ مخزن مورد بررسی و شبکه بندی مدل شده از ستون چپ به راست به ترتیب برای مخزن کوتاه، متوسط و بلند در سطر اول برش قائم مقطع، در سطر دوم برش افقی مقطع و سطر سوم مقطع مدل شده در نرم افزار

Fig. 3. Reinforcement rebar details of the three types of studied tanks shown from left to the right for short, medium, and long tanks

جدول ۵. درصدهای آرماتور ورودی به مدل در جهت‌های مختلف

Table 5. Percentages of input reinforcement to the model in different directions

مخزن کوتاه (ρ لایه بیرونی - ρ لایه وسط)	مخزن متوسط (ρ لایه - بیرونی - ρ لایه وسط)	مخزن بلند (ρ لایه - بیرونی - ρ لایه وسط)	جهت آرماتور
(0.003 - 0.003)	(0.003 - 0.003)	(0.003 - 0.003)	خاموت در X راستای
$\frac{7 \cdot 2.01}{1000} =$ 0.014)	$\frac{7 \cdot 3.14}{1000} =$ 0.022)	$\frac{7 \cdot 3.14}{1000} =$ 0.022)	آرماتور حلقوی در راستای Y
$\frac{7 \cdot 2.01}{1000} =$ 0.014)	$\frac{7 \cdot 3.14}{1000} =$ 0.022)	$\frac{7 \cdot 3.14}{1000} =$ 0.022)	آرماتور حلقوی در راستای Z

جدول ۶. پارامترهای غیرخطی بتن برای اعمال در مدل رفتاری در نظر گرفته شده

Table 6. Nonlinear parameters of reinforced concrete

پارامتر	مقدار اتخاذ شده
$V = 0.15 - 0.25$	$V = 0.2$
f_c	$f_c = 30 \text{MPa}$
$E_c = 4700 \sqrt{f_c}$	$E_c = 25.74 \text{GPa}$
$\beta_t = 0.35 - 0.4$ usual for concrete	$\beta_t = 0.35$
$\beta_c = (2 - 4) \beta_t$	$\beta_c = 0.9$
$f_{cb} = 1.2 f_c$	$f_{cb} = 36 \text{MPa}$
$\sigma_h = 0.67 f_c$	$\sigma_h = 20 \text{MPa}$
$f_1 = 1.45 f_c$	$f_1 = 43.5 \text{MPa}$
$f_2 = 1.725 f_c$	$f_2 = 51.75 \text{MPa}$
$f_r = (0.08 - 0.15) f_c$ or $0.62 \sqrt{f_c}$	$f_r = 4 \text{MPa}$
Tensile Crack Factor = 0-1	Tensile Crack Factor = 0.6

f_{cb} حداکثر تنش فشاری دوماحوره،

σ_h تنش محصورشدگی هیدرواستاتیک،

f_1 مقاومت فشاری نهایی بتن در حالت دو محوره،

f_2 مقاومت فشاری بتن در حالت تک محوره،

f_r مقاومت کششی حداکثر نهایی یا مدول گسیختگی بتن

f_c مقاومت فشاری حداکثر بتن

برای کالیبره کردن این پارامترها و انتخاب مقدار دقیق آن‌ها برای

عدد صفر نشان گر ترک صاف و عدد یک نشان گر ترک زبر است.

در ترک صاف برخلاف ترک زبر برش بین دولبه ترک انتقال داده

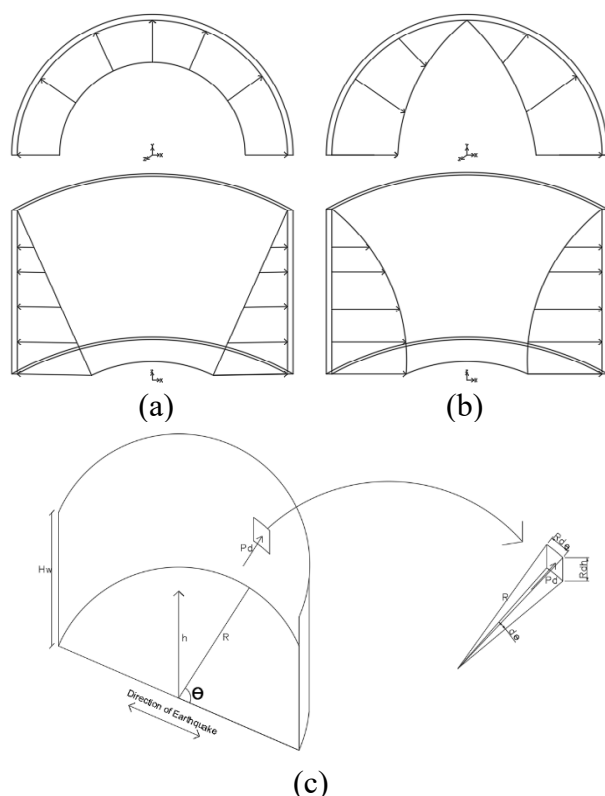
نمی شود.

V ضریب پواسون بتن،

E_c مدول الاستیسیته بتن،

β_t ضریب انتقال برش در ترک‌های باز

β_c ضریب انتقال برش در ترک‌های باز،



شکل ۴. توزیع نیروی دینامیکی سیال بر مخزن. (a) توزیع بار هیدرو استاتیک در پلان و ارتفاع، (b) توزیع بار هیدرودینامیک در پلان و ارتفاع، (c) المان گیری انتگرال محاسبه برش پایه از نیروی هیدرودینامیک

Fig. 4. Distribution of fluid dynamic force on the tank (a) Distribution of hydrostatic load in plan and height (b) Distribution of hydrodynamic load in plan and height (c) Integral sampling Calculation of base shear

زلزله حاصل شده است، نیروی هیدرودینامیک سیال در هر لحظه بدست می آید. در شکل ۵ یک نمونه مدل مخزن تحلیل شده در ANSYS و توزیع تنش روی آن آورده شده است.

۴- صحت سنجی

در ابتدا برای اطمینان از صحت برش پایه ورودی به مدل نرم‌افزاری، برش پایه محاسبه شده با روابط تئوری و آیین نامه ای و برش پایه واقعی برداشت شده از یک مخزن آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. مخزن آزمایشگاهی ساخته شده، یک مخزن به قطر یک متر که تا ارتفاع ۹۰ سانتی‌متری از آب بوده است (شکل ۶). تحت دو زلزله kobe و kocaeli برش پایه برای این مخازن اندازه گیری شده است. مقایسه برش پایه ایجاد شده در مخزن آزمایشگاه و برش پایه محاسباتی در زلزله kobe در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه برش پایه برای زلزله kocaeli نیز در شکل ۸ آورده شده است. علت اختلاف بین مقادیر دو برش پایه در اختلاف

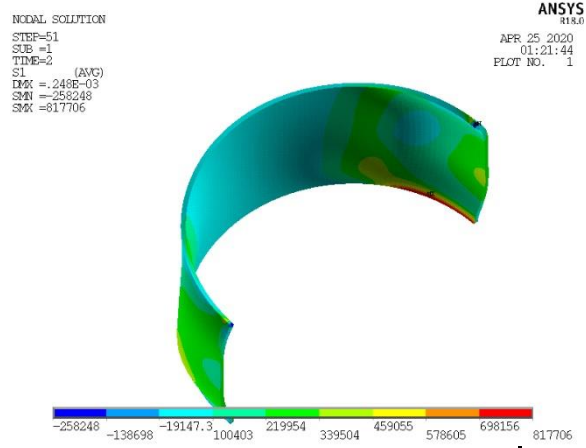
مدل، از نتایج یک تیر مدل شده در نرم‌افزار با همین مدل که عیناً در آزمایشگاه ساخته و آزمایش شده، استفاده شده است.

در ادامه برای محاسبه و توزیع بار دینامیکی ناشی از سیال بر روی جداره مخزن بر اساس شکل ۴ از روابط (۱) و (۲) استفاده شده است. در رابطه (۱) بر اساس برش پایه محاسبه شده در هر لحظه زلزله برای مجموع جرم لرزه ای ضربه ای و موج، نیروی دینامیکی سیال حساب شده است. با لحاظ اثر توزیع نیروی دینامیکی در پلان و اثر توزیع در ارتفاع رابطه نهایی محاسبه و توزیع نیروی هیدرودینامیکی سیال درون مخزن مطابق رابطه (۲) حاصل شده است.

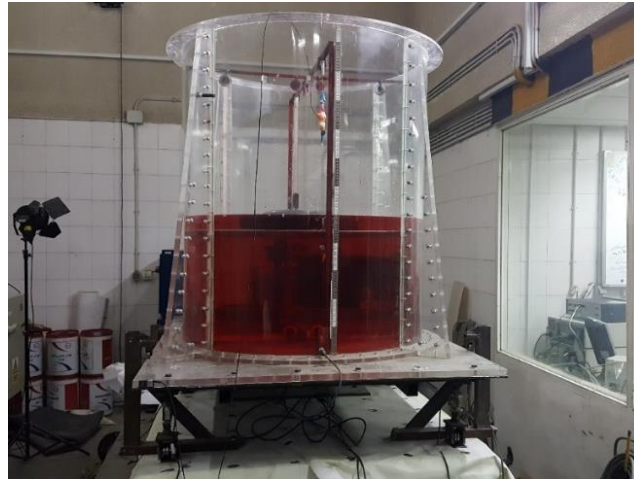
$$V_{bashear}(t) = \int_0^{H_w} \int_0^{2\pi} 2.Pd(t).R.d\theta.dh.cos\theta \quad (1)$$

$$Pd(t) = \frac{3}{2\pi.R.H_w}.V_{bashear}(t).cos\theta.\left(1 - \frac{h^2}{H_w^2}\right) \quad (2)$$

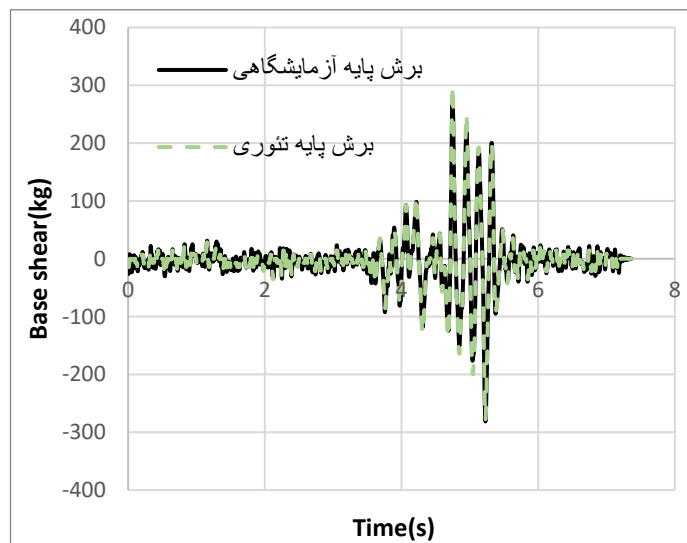
از آنجا که برش پایه به صورت تاریخچه زمانی بر حسب رکوردهای



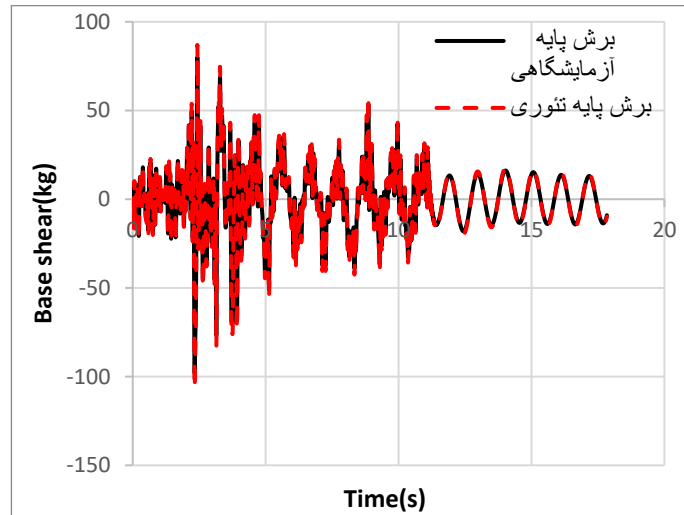
شکل ۵. یک مدل مخزن تحلیل شده و توزیع تنش روی آن
Fig. 5. A tank model analyzed and its stress distribution



شکل ۶. مخزن مورد استفاده در آزمایشگاه
Fig. 6. Used tank in the laboratory



شکل ۷. مقایسه برش پایه آزمایشگاهی و تئوری برای زلزله kobe
Fig. 7. Comparison of laboratory shear base and theory for Kobe earthquake



شکل ۸. مقایسه برش پایه آزمایشگاهی و تئوری برای زلزله kocaeli
 Fig. 8. Comparison of laboratory shear base and theory for Kocaeli earthquake

جدول ۷. مشخصات زلزله های انتخابی

Table 7. Selected earthquakes

نوع گسل	سرعت موج (m/s)	فاصله از گسل (R_{jb}) (km)	بیشینه شتاب زمین (PGA) (g)	بزرگا	زلزله
Reverse	۴۸۸/۷۷	۱۹/۹	۰/۰۸	۶/۹۳	Loma Prieta
strike slip	۳۴۸/۶۹	۱۲/۶۹	۰/۲۱	۶/۵۳	Imperial Valley
strike slip	۳۲۵/۶	۱۱/۳۹	۰/۴۷	۶/۶۹	Northridge
strike slip	۲۵۶	۲۴/۸۵	۰/۲۳	۶/۹	kobe
strike slip	۷۲۴/۵	۱۲/۵۵	۰/۵۱	۷/۳۷	manjil
Reverse	۵۷۳/۲۴	۲۴/۰۷	۰/۱۱	۷/۳۵	Tabas
strike slip	۳۴۷/۶۲	۳۱/۷۴	۰/۱۴	۷/۵۱	kocaeli

بین محتوای شتاب و PGA رکورد دو زلزله می باشد.

آن ها در آینده وجود دارد. مطابق جدول ۸ است.

از آنجایی که مخازن مورد بررسی این پژوهش در شهر تهران واقع شده و دارای خطر نسبی خیلی زیاد است، بزرگی زلزله ها از حدود ۶/۵ تا ۷/۵ و بیشینه شتاب از ۰/۰۸ تا ۰/۵۱ انتخاب شد. در شکل ۱۳ مکان مخازن در مراکز دایره هایی به شعاع ۱۵ کیلومتر نشان داده شده، همین طور گسل های اطراف مخازن و قوی ترین زلزله ی محتمل محاسبه شده بر اساس رابطه Wells نیز نشان داده شده است [۱۶].

موقعیت مخازن در اطراف گسل های تهران و بیشینه زلزله محتمل وقوع بر اساس رابطه Wells برای شعاع ۱۵ کیلومتری در شکل ۹

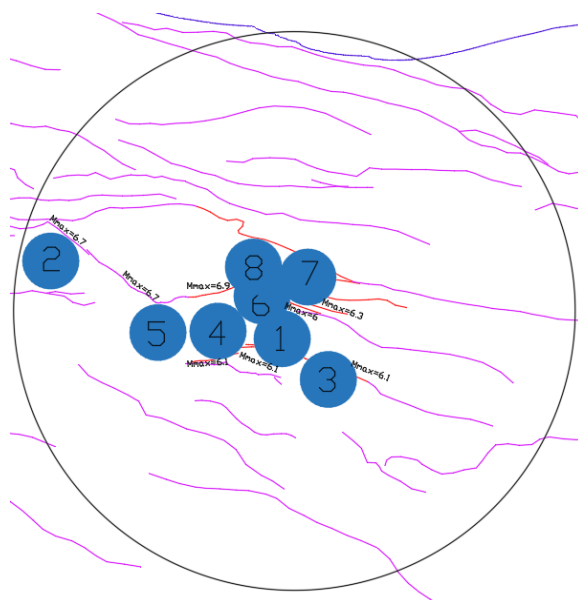
۵- انتخاب رکورد و تحلیل IDA

جهت انتخاب رکوردهای مناسب برای آنالیزهای مورد نیاز در این تحقیق، زلزله های ایران و جهان که به نوعی به سازه ها و به ویژه مخازن ذخیره آسیب وارد نموده اند، مدنظر قرار گرفته است. در عین حال برای تنوع رکوردهای انتخابی از نظر فاصله مکان مخازن تا گسل، محتوای فرکانسی، شتاب ماکزیمم و مدت زمان مؤثر، تعداد ۷ زلزله واقعی مطابق جدول ۷ انتخاب شده است [۱۵]. لیست مراکزی که در شهر تهران دارای مخازن بتنی اند یا احتمال احداث مخزن بتنی در

جدول ۸. اسامی مخازن موردنظر در انتخاب رکورد های زلزله

Table 8. The name of considered tanks

شماره مخزن	نام مخزن یا مجموعه
۱	مخزن آب مشیریه
۲	تصفیه خانه شهر جدید هشتگرد
۳	تصفیه خانه شهرک صنعتی
۴	تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران
۵	تصفیه خانه فاضلاب غرب تهران
۶	تصفیه خانه شهر قدس
۷	تصفیه خانه سوهانک
۸	تصفیه خانه فاضلاب قیطره



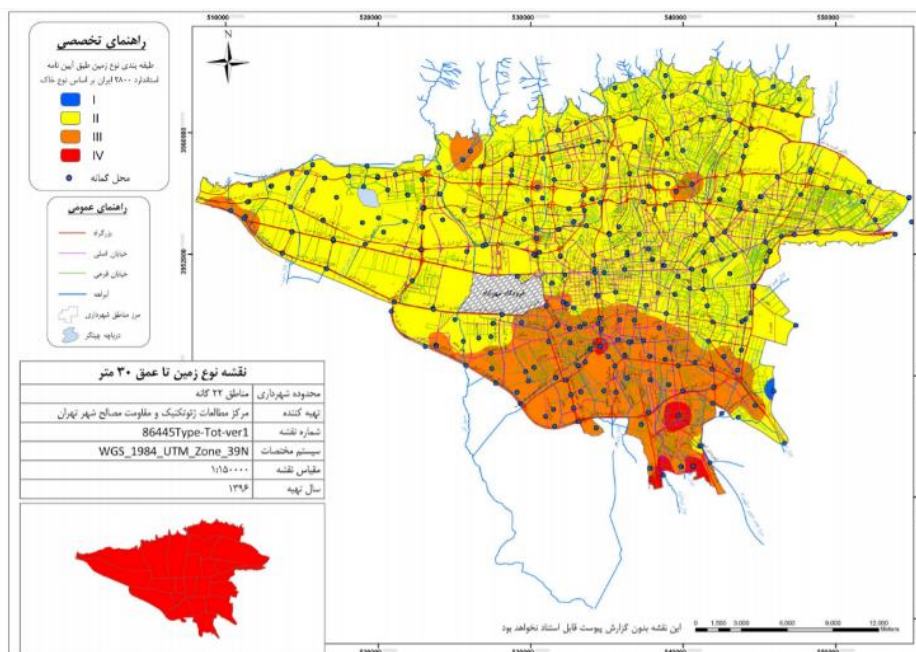
شکل ۹. موقعیت مخازن و بیشینه زلزله محتمل وقوع شعاع ۱۵ کیلومتری بر اساس رابطه wells

Fig. 9. Tank locations and maximum earthquake probability of 15 km radius based on wells relationship

روش اولین بار توسط Vamvatsikos و همکاران معرفی و گسترش داده شده است [۱۸]. در ابتدا شتاب نگاشت تک تک زلزله ها به مقدار 1 g مقیاس شده است. سپس با توجه به این که منحنی شکنندگی این پژوهش برای بیشینه شتاب زلزله (PGA) محاسبه شده اند، رکوردها در بازه 0.1g تا 2g با گام های 0.1g مقیاس شده و برای انجام تحلیل دینامیکی به مخازن اعمال شده است. در این پژوهش از مؤلفه ی قائم زلزله صرف نظر شده و مؤلفه ی افقی با PGA بیشتر مبنای کار قرار گرفته است [۱۹]. بنابر توصیه بازنگری نشریه ۱۲۳ برای عرض ترک مجاز برای مخازن دو عرض ترک بحرانی

آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می گردد، برخی از مخازن مورد بررسی بر روی خاک تیپ ۳ (بر اساس رتبه بندی آیین نامه ۲۸۰۰ معادل با سرعت موج برشی 175 تا 375 متر بر ثانیه در 30 متر لایه خاک) و تعدادی هم بر روی خاک تیپ ۲ (بر اساس رتبه بندی آیین نامه ۲۸۰۰ معادل با سرعت موج برشی 375 تا 750 متر بر ثانیه در 30 متر لایه خاک) واقع شده اند، که از این رو این امر در انتخاب رکورد زلزله لحاظ شده است.

تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) به عنوان یک تحلیل غیرخطی در ارزیابی دقیق لرزه ای سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. این



شکل ۱۰. نقشه ریز پهنه بندی خاک تهران [۱۷]
 Fig. 10. Micro-zoning map of Tehran soil [17]

$$W = \frac{(4.5 a_{cr} \varepsilon_m)}{(1 + 2.5((a_{cr} - c)/(h - x)))} \quad (3)$$

در این رابطه پارامتر:

ε_m ، نشانگر کرنش در تراز موردنظر برای محاسبه عرض ترک با
 در نظر گرفتن اثر سخت کنندگی بتن ناحیه کششی،
 a_{cr} پارامتر مرتبط با کاور و فاصله میلگردها از هم،
 h ارتفاع کلی مقطع،
 x ارتفاع تار خنثی،
 c مقدار پوشش خالص بتن
 w عرض ترک بر حسب میلی متر است.

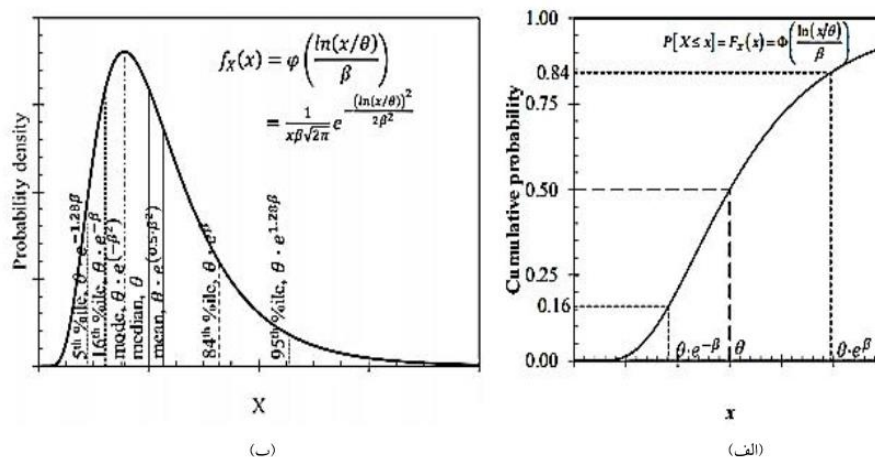
۶- ارائه منحنی های شکنندگی

در این بخش به ارائه منحنی های شکنندگی که برای سه گروه
 مخزن (کوتاه، متوسط و بلند) استخراج شده، پرداخته خواهد شد.
 مبنای نامگذاری مخازن نسبت ارتفاع به قطر (H/D) بوده است،
 که $H/D = 0.25$ مربوط به مخزن کوتاه، $H/D = 0.5$ مربوط
 به مخزن متوسط و $H/D = 1$ مربوط به مخزن بلند می باشد. تابع
 شکنندگی برای این پژوهش را می توان به صورت رابطه (۴) تعریف کرد.

با عرض های ۰/۱ و ۰/۳ میلی متر به عنوان دو حالت حدی خرابی
 (Damage State) در نظر گرفته شده است که از این به بعد به
 حالت حدی خرابی عرض ترک ۰/۱ میلی متر، $CCW = 0.1mm$
 (Critical Crack Width) و برای عرض ترک ۰/۳ میلی متر،
 $CCW = 0.3mm$ به اختصار اطلاق خواهد شد.

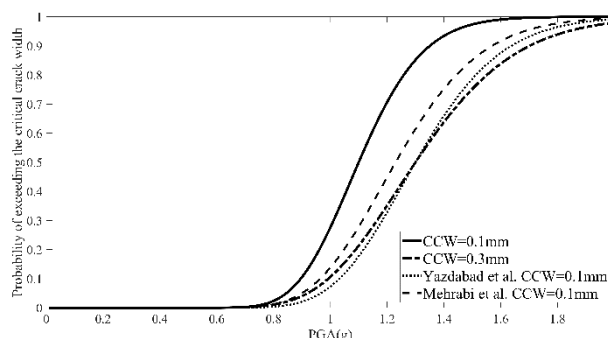
در بازنگری نشریه ۱۲۳ بسته به شرایط محیطی مخزن، حداکثر
 عرض ترک، تحت بارگذاری بهره برداری مشخص شده است. مقادیر
 حداکثر عرض ترک مجاز برای مخازن در شرایط محیطی مختلف ۰/۱
 تا ۰/۳ میلی متر مجاز دانسته شده است [۱۱].

بر اساس آیین نامه های موجود، فلسفه جاری این است که با
 توجه به گذرا بودن نیروهای زلزله و تغییر شکل های حرارتی، در
 طراحی سازه های مخازن و برای تمامی حالت های بارگذاری که شامل
 این نیروها می باشند، می توان کل سازه را در شرایط محیطی متوسط
 از لحاظ کنترل عرض ترک در نظر گرفت [۱۱]. از این رو در این
 تحقیق، برای عرض ترک ۰/۱ و ۰/۳ میلی متر منحنی شکنندگی
 تهیه شده است. در روش پیشنهادی بازنگری نشریه ۱۲۳ که ملاک
 محاسبه عرض ترک این پژوهش بوده، برای محاسبه عرض ترک از
 رابطه (۳) استفاده شده است.



شکل ۱۱. توزیع logNormal (الف) تابع توزیع تجمعی logNormal (ب) تابع چگالی احتمال logNormal [۱۹]

Fig. 11. LogNormal distribution a) Cumulative logNormal cumulative distribution function b) logNormal probability density function [19]



شکل ۱۲. مقایسه منحنی شکنندگی مخزن کوتاه با منحنی پژوهش های گذشته [۸،۹]

Fig. 12. Comparison of short tank fragility curve with previous research curve [8,9]

$$P(C|IM=x) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{x}{\theta}\right)}{\beta}\right) \quad (5)$$

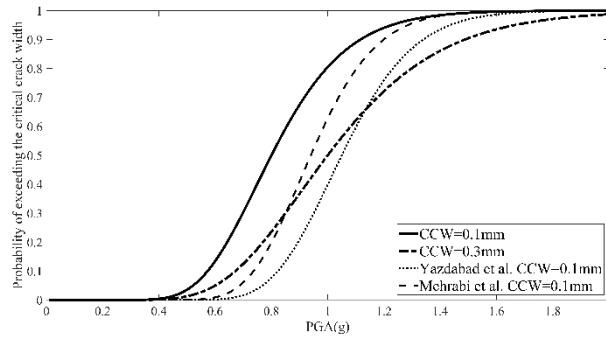
$$\ln\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln IM_i \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(IM_i / \theta))^2} \quad (7)$$

پس از بررسی منحنی شکنندگی این پژوهش با پژوهش های قبلی برای مخازن کوتاه، کاهش میانه منحنی های شکنندگی کاملاً مشهود بوده است (مطابق شکل ۱۲). برای مثال، میانه PGA منحنی در پژوهش یزدآباد و همکاران [۸] ۱/۳g، در تحقیق حاجی مهرابی و همکاران [۹] ۱/۲g و در این پژوهش ۱/۱g برای عرض ترک بحرانی

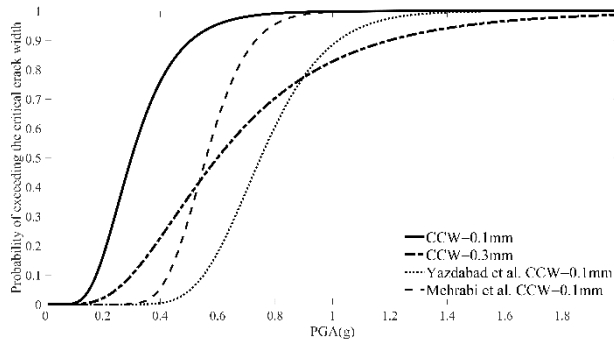
$$Fragility = P[CW > CCW | PGA] \quad (4)$$

یک توزیع logNormal آماری برای پارامتر تقاضای مهندسی عرض ترک (CW) در هر بیشینه شتاب حرکت زمین (PGA) در نظر گرفته می شود. برای ارزیابی احتمال فراگذشت از یک حد مرزی خاص (که در اینجا عرض ترک بحرانی ۰/۱ یا ۰/۳ میلی متر (CWW) می باشد)، میانگین و انحراف معیار هر یک از عرض ترک ها (CW) برای اثر مجموع شتاب نگاشت های زلزله محاسبه می شود. سپس با استفاده از تابع توزیع logNormal تجمعی، احتمال فراگذشت هر یک از عرض ترک ها از عرض ترک بحرانی محاسبه می شود. روابط مورد استفاده برای تهیه منحنی های شکنندگی با توزیع تجمعی logNormal بر اساس روابط (۵) تا (۷) بوده که در آن θ میانه و β انحراف معیار استاندارد می باشد [۱۹].



شکل ۱۳. مقایسه منحنی شکنندگی مخزن متوسط با منحنی پژوهش های گذشته [۸,۹]

Fig. 13. Comparison of medium tank fragility curve with previous research curve [8,9]



شکل ۱۴. مقایسه منحنی شکنندگی مخزن بلند با منحنی پژوهش های گذشته [۸,۹]

Fig. 14. Comparison of tall tank fragility curve with previous research curve [8,9]

جدول ۹. مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد به دست آمده مخازن

Table 9. The mean and standard deviation of tanks

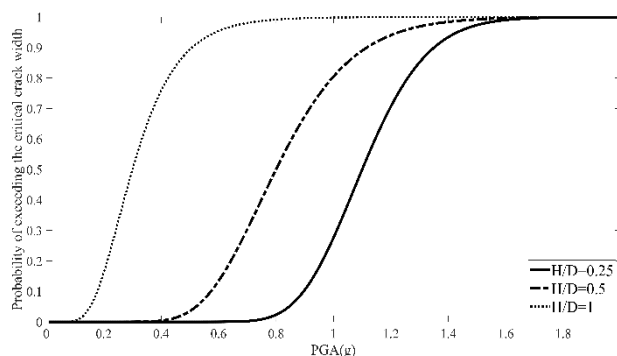
مخزن	حالت خرابی	θ	β
کوتاه	$CCW = 0.1mm$	1.1	0.16
	$CCW = 0.3mm$	1.3	0.21
متوسط	$CCW = 0.1mm$	0.8	0.26
	$CCW = 0.3mm$	1	0.31
بلند	$CCW = 0.1mm$	0.3	0.41
	$CCW = 0.3mm$	0.6	0.54

در شکل ۱۵ با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود با کاهش نسبت ارتفاع به قطر (H/D) مقدار میانگین منحنی ها افزایش یافته و انحراف معیار استاندارد یا عدم قطعیت آن ها (β) کاهش یافته است.

مقایسه منحنی های شکنندگی برای عرض ترک بحرانی ۰/۱ میلی متر در شکل ۱۶ منحنی های شکنندگی سه تیپ مخزن کوتاه،

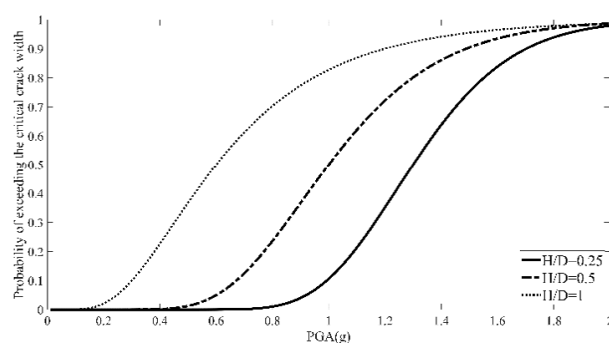
۰/۱ میلی متر و ۱/۳g برای عرض ترک بحرانی ۰/۳ میلی متر بدست آمده است. منحنی مخازن متوسط و بلند و مقایسه آن ها با مقالات قبلی در اشکال ۱۳ و ۱۴ و مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد مخزن در جدول ۹ آورده شده است.

منحنی های شکنندگی حاصل از این پژوهش با سه تیپ مخزن کوتاه، متوسط و بلند برای عرض ترک ۰/۱ میلی متر (



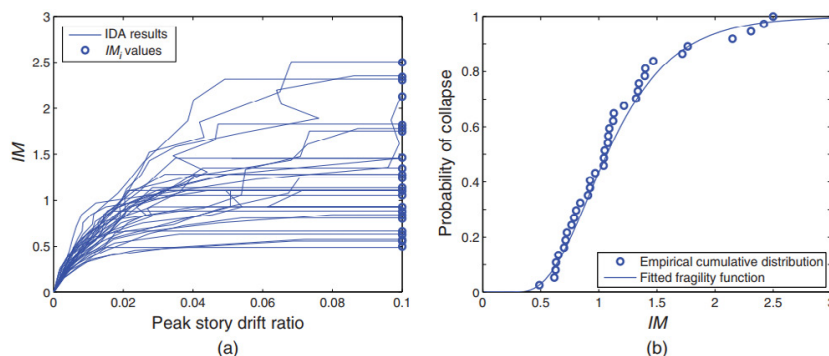
شکل ۱۵. مقایسه منحنی های شکنندگی سه تیپ مخزن کوتاه، متوسط و بلند برای عرض ترک ۰/۱ میلی متر ($CCW = 0.1mm$)

Fig. 15. Comparison of fragility curves of three types of short, medium and long tans for critical crack width of 0.1 mm ($CCW = 0.1mm$)



شکل ۱۶. مقایسه منحنی های شکنندگی سه تیپ مخزن کوتاه، متوسط و بلند برای عرض ترک بحرانی ۰/۳ میلی متر ($CCW = 0.3mm$)

Fig. 16. Comparison of fragility curves of three types of short, medium and long tans for critical crack width of 0.3 mm ($CCW = 0.3mm$)



شکل ۱۷. (a) مثال یک تحلیل IDA برای فروریزش یک ساختمان برای IM های مختلف تحت رکوردهای متفاوت، (b) منحنی شکنندگی [۲۰]

Fig. 17. (a) Example of IDA analysis for building collapse for diverse IM affected by different records (b) Fragility curve[20]

محدوده غیرخطی وارد شود پاسخ آن به زلزله های مختلف متفاوت تر خواهد بود. از این رو، علت افزایش انحراف معیار استاندارد (β) در عرض ترک بحرانی بیشتر ($CCW = 0.3mm$) را می توان تفاوت بیشتر نتایج در ناحیه غیرخطی سازه ها، در اثر زلزله های مختلف دانست. این موضوع در شکل ۱۷ که نتایج یک تحلیل IDA نمونه برای ساختمان است، به خوبی مشهود می باشد. همان طور که مشاهده

متوسط و بلند برای عرض ترک ۰/۳ میلی متر ($CCW = 0.3mm$) با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که از شکل مشاهده می شود با کاهش نسبت ارتفاع به قطر میانه PGA زلزله ها افزایش یافته و انحراف معیار و عدم قطعیت رخداد کاهش یافته است. برای حالت خرابی عرض ترک بحرانی ۰/۳ میلی متر انحراف معیار و عدم قطعیت بیشتر بوده و در نتیجه نمودارها پهن تر شده اند. هرچه رفتار سازه به

1481-1501.

- [4] Razzaghi, M. S., and S. Eshghi. "Development of analytical fragility curves for cylindrical steel oil tanks." *Proceedings of the 14 Th World Conference on Earthquake Engineering*. (2008).
- [5] Berahman, Farshad, and Farhad Behnamfar. "Probabilistic seismic demand model and fragility estimates for critical failure modes of un-anchored steel storage tanks in petroleum complexes." *Probabilistic Engineering Mechanics* 24.4 (2009): 527-536.
- [6] Razzaghi, Mehran S., and Alireza Mohebbi. "Predicting the seismic performance of cylindrical steel tanks using artificial neural networks (ann)." *Acta Polytechnica Hungarica* 8.2 (2011).
- [7] Colombo, J. I., and J. L. Almazán. "Seismic fragility curves for legged wine storage tanks with a novel isolation device." *Procedia engineering* 199 (2017): 564-569.
- [8] Yazdabad, Mohammad, Farhad Behnamfar, and Abdolreza K. Samani. "Seismic behavioral fragility curves of concrete cylindrical water tanks for sloshing, cracking, and wall bending." *Earthquakes and Structures* 14.2 (2018): 95-102.
- [9] Hajimehrabi, Hossein, et al. "Fragility curves for baffled concrete cylindrical liquid-storage tanks." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 119 (2019): 187-195.
- [10] ACI Committee 350.3-06, "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary", Farmington Hills (MI, USA), American Concrete Institute, 2006.
- [11] Technical Assistant, Office of Research and Technical Criteria, Planning and Budget Organization, "Criteria and Criteria for Designing and Calculating Groundwater Reservoirs", Review 123, 2015. (In Persian)
- [12] Munshi, J.A., "Design of Liquid-Containing Concrete Structures for Earthquake Forces." *Portland Cement, USA*, 2002.
- [13] Ru-deng, L. U. O. "Values of shear transfer coefficients of concrete element Solid65 in Ansys [J]." *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)* 2 (2008): 018.
- [14] Vasudevan, G., S. Kothandaraman, and S. Azhagarsamy.

می شود، هر چه سازه بیشتر به محدوده غیرخطی وارد شود پاسخ آن تحت زلزله های مختلف، تفاوت بیشتری خواهد داشت. از این رو در حالت حدی عرض ترک بحرانی بیشتر، که سازه در محدوده ی غیرخطی خود پیشروی بیشتری داشته، پراکندگی در نتایج عرض ترک بیشتر مشاهده می شود.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، منحنی شکنندگی مخازن بتنی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مربوط به ترک خوردگی بتن استخراج شده است و نتایج آن با منحنی های شکنندگی مربوط به تحلیل های خطی بدون در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی مقایسه شده است. نتایج حاکی از این است که اثر ترک خوردگی در آنالیز مخازن، می تواند به طور معناداری باعث تغییر در منحنی های مربوط به شکنندگی مخازن نسبت به حالت آنالیزهای خطی بدون ترک بتن گردد. برای حد خرابی متناسب با عرض ترک ۰/۳ میلی متر، مقدار انحراف معیار استاندارد بیشتر از حد خرابی متناسب با عرض ترک ۰/۱ میلی متر حاصل شده است. همچنین نتایج حاکی از آن است که پاسخ سازه ها (عرض ترک) در ناحیه غیرخطی نسبت به حالت خطی تفاوت بیشتری دارند. به طور کلی با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخازن مورد بررسی پژوهش از مخزن کوتاه به متوسط ۲۵٪ و از مخزن متوسط به بلند ۵۰٪ احتمال آسیب پذیری مخازن بر اساس منحنی شکنندگی افزایش می یابد.

مراجع

- [1] SYNER-G. "D8.10 - Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities." (2013).
- [2] MR, HAZUS-MH. "Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model." Department of Homeland Security, FEMA, Washington, DC (2003). Porter, Keith. "Beginner's guide to fragility, vulnerability, and risk." *Encyclopedia of earthquake engineering* (2015): 235-260.
- [3] Bhargava, Kapilesh, A. K. Ghosh, and S. Ramanujam. "Seismic response and fragility analysis of a water storage structure." *Nuclear engineering and design* 235.14 (2005):

- Research Center, Department of Surface and Subsurface Studies, "Tehran Geotechnical Zoning Report" (2017). (In Persian)
- [18] Vamvatsikos, Dimitrios, and C. Allin Cornell. Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis. Diss. Stanford University, 2002.
- [19] Moslemi, M., and M. R. Kianoush. "Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks." *Engineering Structures* 42 (2012): 214-230.
- [20] Baker, Jack W. "Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis." *Earthquake Spectra* 31.1 (2015): 579-599.
- "Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling." *Strength of materials* 45.2 (2013): 231-241.
- [15] Eads, Laura, et al. "An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 42.1 (2013): 25-41.
- [16] Wells, Donald L., and Kevin J. Coppersmith. "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement." *Bulletin of the seismological Society of America* 84.4 (1994): 974-1002.
- [17] Tehran Engineering and Engineering Consulting Organization Geotechnical and Resistance Materials

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Khosravi, M. M. Yousefi, M. A. Goudarzi, *Development of Seismic Fragility Curves of Cylindrical Concrete Tanks Using Nonlinear Analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 71-88.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.19121.7079](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19121.7079)



