

# Process towers probabilistic seismic behavior evaluation using incremental dynamic analysis

F. Kolbadi<sup>1</sup>, S. Koohestani<sup>1</sup>, B. Sayyafzadeh<sup>1</sup>, A. Sarvghad Moghadam<sup>1</sup>, M. Sharifi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Qom, Qom, Iran

<sup>2</sup> Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquakes Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Process towers or vertical vessels are among the industrial structures that play a key role in the production process of petroleum products and their derivatives in refineries and oil and gas industries. Due to the vulnerability of these structures in past earthquakes, and the lack of valid regulations and methods for seismic analysis and design of these structures, a case study on a designed and constructed process tower 26.5 meters high, located in Qeshm Island Refinery, has been conducted in this research. Since considering a rigid foundation, without the interaction of soil and structure, may lead to wrong results, in this study, the tower has been modeled in Abaqus finite element software considering soil behavior. The Winkler model used for soil modeling and the seismic behavior of the tower was investigated using pushover and incremental dynamic analysis, and finally, the resulting fragility curve is presented to show the structure's vulnerability at different levels of seismic intensities. In this investigation, the probable failures, including the failure of the body and the skirt, as well as the overturning of the structure, have been investigated. According to the incremental dynamic analysis results, no buckling was observed in the body and the tower's skirt before the tower overturned. The results show that overturning was the predominant failure mode and the probability of this failure mode until  $PGA=0.1g$  is approximately equal to zero, and for  $PGA=0.35g$ , this probability is less than 20%. But for rare seismic intensities, the overturning probability is considerable.

## Review History:

Received: Jan. 17, 2023

Revised: Jun. 16, 2023

Accepted: Jun. 17, 2023

Available Online: Aug. 07, 2023

## Keywords:

Process towers

Seismic assessment

fragility curve

Incremental dynamic analysis (IDA)

Soil structure interaction (SSI)

## 1- Introduction

During the past earthquakes, many vertical process vessels have been damaged by strong earthquakes and investigations showed this phenomenon for such structures. Seismic analysis of these structures without considering the SSI effects does not indicate the correct seismic response. This research was carried out on a constructed process tower in Qeshm Island Refinery. The modeling of this tower has been done in Abaqus finite element software considering the effects of soil and structure interaction. Seismic behavior has been investigated by performing incremental dynamic analysis and its fragility function has been generated.

As presented in most reports about the overturning of process towers, considering soil-structure interaction and removing soil tension can potentially affect structural responses [1]. Also, according to the observed damage for towers and vessels in past earthquakes, in this article, the stress in the body and skirt, the strain, and the overturning of the tower have been investigated.

## 2- Methodology

### 2- 1- Numerical modeling

The process tower studied in this research is a tower with



Fig. 1. Finite element model of the tower

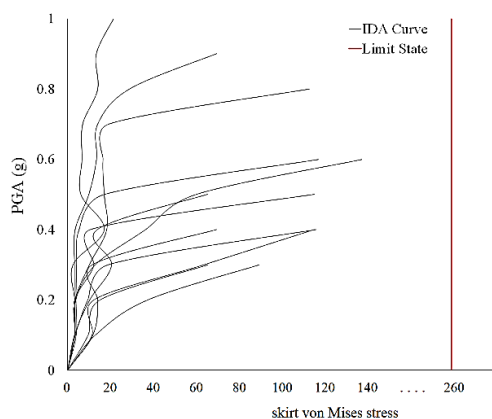
a height of 26.5 meters and a diameter of 2.8 meters mounted steel base (skirt) with a diameter of 2.8 meters. The weight of the tower in operation condition is 204 tons.

S4R shell element has been used to model the wall, skirt,

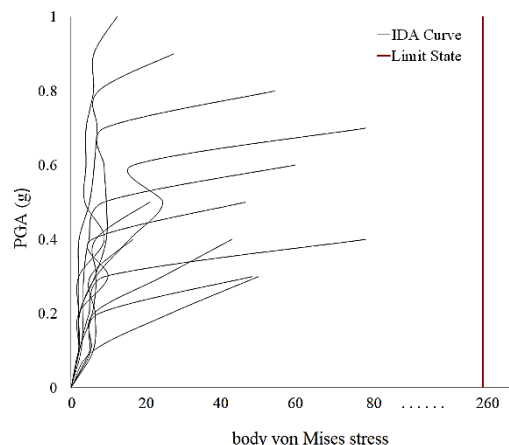
\*Corresponding author's email: m.sharifi@qom.ac.ir

**Table 1. The equation for calculating the surface stiffness of the foundation**

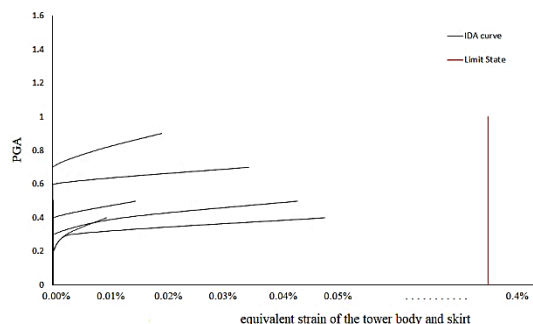
Vertical Translation, $Kz'$
$GL / (1 - V) [0.73 + 1.54(B / L)^{0.75}]$
Horizontal Translation, $Ky'$
$(GL / (2 - V)) [2 + 2.5(B / L)^{0.85}]$



**Fig. 2. IDA curve for skirt von Mises stress**



**Fig. 3. IDA curve for von Mises stress of body**



**Fig. 4. IDA curve of the equivalent strain of the tower body and skirt**

top and bottom caps of the tower. The beam element is used to model the tension force of the anchor bolt. C3D8R element, which is a solid-homogeneous element, has been used to model the pedestal and foundation.

**2- 2- Soil modeling**

The effects of soil-structure interaction (SSI) are considered using Winkler modeling according to the ATC-40 code [2]. The stiffness of the foundation springs is obtained from the equations presented in Table 1. The foundation is placed deep in the soil, so, additional coefficients are multiplied by the corresponding stiffness.

In this article, modal analysis has been done for the structure without consideration of soil-structure interaction and for the structure with consideration of soil-structure interaction. It is observed that the period of the first mode of the tower has increased from 0.26 to 0.34 considering SSI.

**2- 3- Analysis Method**

12 accelerograms corresponding to the soil characteristics of the site and the distance from the fault have been selected to perform incremental dynamic analysis. PGA is considered a fine measurement parameter for representing acceleration magnitude.

For the maximum von Mises stress of the body and

skirt and the equivalent plastic strain have been selected as engineering demand parameters (EDP) and according to the following limit states, the fragility curve is drawn.

Limit state:

Rupture of the tower wall: when the equivalent plastic strain, reaches a value equal to 0.4% [3].

Plastic limit: The equivalent design stress should be less than the value of yield strength mentioned in [4] and [5]. According to the characteristics of the material for the process tower shell, it is equal to 260 MPa.

**3- Results and Discussion**

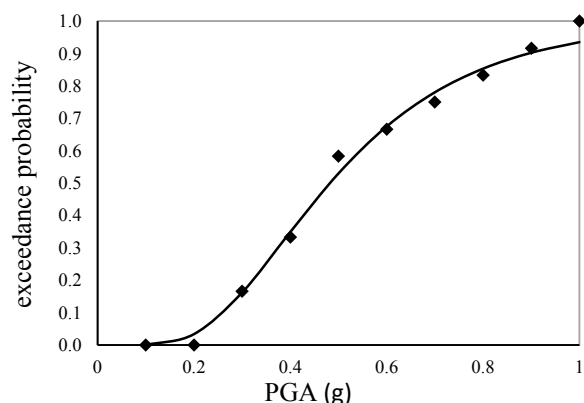
**3- 1- IDA curve**

Obtained IDA curves are shown in the following figures.

**3- 2- Fragility curve**

According to the IDA curves, the final limit state has not been reached before the overturning of the structure, so the overturning of the structure is the dominant failure mode in this case study.

Fragility curve of the overturning has been calculated and



**Fig. 5. IDA curve for von Mises stress of body**

shown in the following figure.

#### 4- Conclusions

According to the IDA curves, the von Mises stress and the equivalent plastic strain in the body and skirt have not reached to their limit state until the tower overturns and no yielding has been observed body shell, and this indicates that the overturning failure mode is predominate for the structure.

According to the fragility curve obtained for the structure up to  $g_{0.1}$  acceleration, the probability of tower overturning

is zero, and for  $g$  acceleration of 0.35 this probability is less than 20%.

But in higher intensities, this value is much higher, and for rare earthquakes, the probability of overturning is numerically large and significant.

#### References

- [1] M.a. Ronagh, Plastic Hinge Length of RC Columns Subjected to Both Far-Fault and Near-Fault Ground Motions Having Forward Directivity, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24 (2011) 421-439.
- [2] ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume 1 ATC-40, ATC 40, Applied Technology Council, 1 (1996) 334.
- [3] K. Diamanti, I. Doukas, S.A. Karamanos, Seismic analysis and design of industrial pressure vessels, *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2011: 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Programme*, (2011).
- [4] E. Committee for Standardisation, EN 1993-1-6: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, in, 2011.
- [5] M. Pluto, Tank Shell Design According to Eurocodes and Evaluation of Calculation Methods, *Faculty of Health, Science and Technology Degree*, (2018) 79.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Kolbadi, S. Koohestani, B. Sayyafzadeh, A. Sarvghad Moghadam, M. Sharifi, *Process towers probabilistic seismic behavior evaluation using incremental dynamic analysis*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(8) (2023) 333-336.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22107.7904







## بررسی رفتار احتمالاتی لرزهای برجهای فرآیندی با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی

فاطمه کلبادی<sup>۱</sup>، سعیده کوهستانی<sup>۱</sup>، بیژن سیاف زاده<sup>۱</sup>، عبدالرضا سروقد مقدم<sup>۲</sup>، مهدی شریفی<sup>۱\*</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- مرکز تحقیقات مهندسی سازه موسسه بین المللی مهندسی زلزله و زلزله شناسی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

### کلمات کلیدی:

برجهای فرآیندی

ارزیابی لرزه‌ای

منحنی شکنندگی

تحلیل دینامیکی افزایشی

اندرکنش خاک و سازه

**خلاصه:** برجهای فرآیندی تحت عنوان مخزنهای ذخیره عمودی از جمله سازه‌های صنعتی می‌باشد که نقش کلیدی در روند تولید مواد نفتی و مشتقات آن در پالایشگاه‌ها دارند. به دلیل آسیب پذیری این سازه‌ها در زلزله‌های گذشته و عدم وجود آیین‌نامه و روش معتبر جهت تحلیل لرزهای این سازه‌ها، مطالعه‌ای بر روی رفتار لرزه‌ای یک نمونه برج فرآیندی به ارتفاع ۲۶/۵ متر واقع در پالایشگاه جزیره قشم در این مطالعه انجام شده است. از آنجایی که در نظر گرفتن فنداسیون صلب بدون اندرکنش خاک و سازه نشان‌دهنده پاسخ لرزه‌ای نزدیک به واقعیت نیست، مدلسازی این برج در نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه انجام شده است. جهت مدلسازی خاک از مدل وینکلر استفاده شده و رفتار لرزه‌ای برج با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و توابع شکنندگی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در سطوح مختلف شدت‌های لرزه‌ای تولید شده است. در این بررسی خرابی‌های محتمل شامل خرابی بدنه و دامنه و همچنین واژگونی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی، هیچگونه کماتشی در جداره و دامنه برج قبل از وقوع واژگونی مشاهده نشده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مود خرابی غالب برج واژگونی بوده که با توجه به منحنی شکنندگی به دست آمده برای سازه تا شتاب  $0.1g$  احتمال واژگونی برج صفر می‌باشد و برای شتاب  $0.35g$  این احتمال کمتر از  $20\%$  است.

### ۱- مقدمه

برجهای فرآیندی از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در پالایشگاه‌ها می‌باشند که با وجود اهمیت بالای این برج‌ها، هیچ ضابطه آیین‌نامه‌ای خاص برای تحلیل لرزه‌ای این نوع سازه‌ها وجود ندارد [۱] و توجه به رفتار این سازه‌ها در برابر زلزله ضروری به نظر می‌رسد [۲]. از این رو آیین‌نامه‌های مخازن همچنان نیازمند تلاش‌های تحقیقاتی برای پیشرفت در دستیابی به یک فاکتور طراحی کاملاً ایمن و اقتصادی دارند [۳]. شناخت ساختار خاک و ارزیابی اثرات اندرکنش خاک و سازه یک شرط لازم در فرآیند طراحی کلی برجهای فرآیندی می‌باشد [۴]. یکی از اولین تلاش‌ها برای تحلیل اثرات زلزله بر تجهیزات فرآیندی توسط کرمیجان و همکاران در سال ۱۹۸۵ صورت گرفت، که یک مدل ارزیابی ریسک جامع برای تجهیزات اصلی فرآیندی ارائه می‌دهد و یک رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان ساختاری را که بر عملکرد خرابی تجهیزات پس از زلزله متمرکز شده است، تهیه می‌کند [۵]. ینگسای هان در سال ۲۰۰۴ با انجام تحلیل تاریخچه زمانی و طیفی بر

روی مدل کامل از یک سازه راکتور با ارتفاع ۲۳۵ فوت به همراه فنداسیون شمع و با لحاظ اندرکنش خاک و شمع و سازه به این نتیجه رسید که سازه با فنداسیون صلب بدون اثرات اندرکنش خاک و سازه نشان‌دهنده پاسخ واقعی لرزه‌ای نیست زیرا سختی مدل بیش از حد و میرایی مدل دست کم گرفته می‌شود بنابراین اعمال اثرات اندرکنش خاک و سازه در مدلسازی ضروری می‌باشد [۶]. میناوند در سال ۲۰۰۸ یک نمونه مخزن عمودی را به همراه خاک زیر فنداسیون مدلسازی کرده و با بررسی نتایج به دست آمده از ارزیابی لرزه‌ای، مشکل اصلی این مخازن را واژگونی اعلام نموده و علاوه بر آن تاثیر تنش‌های ناشی از واژگون شدن پوسته در اتصال به دامنه را مورد بررسی قرار داده است [۷]. عزت‌فر در سال ۲۰۰۸ با ارزیابی ۱۸ مدل از برجهای فرآیندی به بررسی مکانیسم خرابی هر کدام از مدل‌ها پرداخته است. در مطالعه ایشان با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مشخص شد که برجهای فرآیندی به هنگام زلزله از قابلیت جذب انرژی پائینی برخوردارند و مکانیسم خرابی به صورت کماتش الاستوپلاستیک در قسمت تحتانی جداره برج و یا قسمت تحتانی دامنه برج و یا هر دو با هم تشخیص داده

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.sharifi@qom.ac.ir



شده است [۸]. کالیوپی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام آنالیزهای پوش اور استاتیکی به این نتیجه رسید که ظرفیت برج‌های فرآیندی بسیار بالاتر از مقاومت موردنیاز در بارگذاری لرزه‌ای است و از طرفی دیگر با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی، ضریب رفتار برج با استفاده از معیار گسیختگی و کماتش جداره برج محاسبه شده است. همچنین در سال ۲۰۱۳، معیارهای شکست احتمالی برای این نوع برج‌ها پیشنهاد شده است [۲] و [۹]. انستیتوی مکزیک در سال ۲۰۱۲ با مطالعه‌ای بر روی رفتار برج‌های فرآیندی، آن‌ها را سازه‌هایی لاغر با میرایی کم معرفی می‌کند و به این نتیجه می‌رسد که تئوری تیرها رفتار واقعی این نوع سازه‌ها را نشان نمی‌دهند بنابراین این نوع سازه‌ها باید به صورت پوسته‌های متقارن مدل شوند [۸]. محرمی و امینی در سال ۲۰۱۳ منحنی‌های شکنندگی را برای یک برج فرآیند به طول ۹۶ متر واقع در پالایشگاه شازند استخراج کردند و بیان نمودند توسعه منحنی‌های شکنندگی برای تجهیزات غیرسازه‌ای ضروری نیست و با انجام تحلیل دینامیکی، خرابی به صورت کماتش جداره برج مشاهده شده است [۱۰]. دانشگاه بین‌المللی INTI مالزی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۶، هندسه، اجزای اصلی، طبقه‌بندی مواد و روند ساخت مخازن ذخیره را مورد بررسی قرار داده است. جهت طراحی یا انجام بهینه‌سازی مخازن، لازم است تا طراحان با انواع خرابی‌ها و بارها آشنا شوند و روش‌های تحلیلی مناسبی را برای تحلیل مخزن انتخاب کنند. از آن‌جا که طراحی مخازن مطابق با یک‌سری آیین‌نامه‌ها و استانداردهای متداول انجام می‌شود، جزییات بیشتری برای آیین‌نامه مخازن ASME در این مقاله درج شده است [۱۱]. در سال ۲۰۱۹ کادامرتوری و همکاران با استفاده از روش‌های ساده شده منحنی شکنندگی دو برج تحت فشار عمودی و افقی بدست آوردند و در نهایت، ریسک لرزه‌ای بر حسب فراوانی رویداد در سال محاسبه کردند [۱۲]. پوتات در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک سازه راکتور گاز، انجام داده است. پاسخ لرزه‌ای با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی ارزیابی شده است. با استفاده از دستورالعمل‌های FEMA 356 ارزیابی عملکرد انجام شده است. در نهایت این مطالعه نشان می‌دهد که ساختار راکتور، اهداف عملکرد موردنظر تحت زلزله با سطوح خطر مربوطه را برآورد می‌کند [۱۳].

در طی زمین‌لرزه‌های گذشته مخازن زیادی توسط زمین‌لرزه‌های شدید آسیب دیده‌اند و بررسی‌های تئوری نشان می‌دهد که برای چنین سازه‌هایی در نظرگرفتن فنداسیون ثابت بدون اثرات اندرکنش خاک و سازه، نشان‌دهنده

پاسخ واقعی لرزه‌ای نیست [۴].

این پژوهش بر روی نمونه برج فرآیندی ساخته شده واقع در پالایشگاه جزیره قشم انجام شده است. مدل‌سازی این برج در نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus با در نظرگرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه انجام شده است. بررسی رفتار لرزه‌ای با انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی<sup>۲</sup> صورت گرفته است که تحلیلی پر هزینه و زمان‌بر اما با نتایجی کامل از محدوده الاستیک خطی تا ظرفیت نهایی مدل می‌باشد. با بهره‌گیری از نتایج این تحلیل، توابع شکنندگی برای ارزیابی آسیب‌پذیری مخزن تولید شده است. از آنجایی که در مقالات اشاره شده است که ظرفیت اتصالات بسیار بیشتر از نیروهای برشی ایجاد شده در آنها است و اتصالات این دسته از سازه‌ها ایمن می‌باشد لذا در این تحقیق از بررسی اتصالات صرفه نظر شده است [۱۴].

## ۲- شناسایی مکانیسم خرابی مخازن ذخیره در زلزله

زلزله یکی از مهترین مخاطرات طبیعی می‌باشد که وقایع ناگواری را در کارخانه‌های صنعتی به ویژه صنایع نفت و گاز منجر شده است. دسترسی به رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد استفاده در این صنایع و نیازهای تحقیقاتی در خصوص آشنایی بیشتر با عملکرد آنها در هنگام وقوع زلزله‌ها در مطالعات بسیاری مطرح شده است [۱۵]. گزارش‌ها حاکی از آن است که زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴، آسیب‌های قابل توجهی به مخازن ذخیره نفت در مناطق وسیعی از آلاسکا وارد نمود، بسیاری از این آسیب‌ها ناشی از سونامی، نشست زمین و روانگرایی خاک بود. انتشار موج زلزله، تولید فشار هیدرودینامیکی در سطح تماس مایع با جداره مخزن می‌کند که موجب ایجاد نیروی جانبی و لنگر واژگونی در پای مخزن می‌شود [۱۴]. در زلزله مرگان هیل امریکا در سال ۱۹۸۴، دو دیگ بخار افقی که در یک ساختمان کوچک فلزی قرار گرفته بودند دچار چندین اینچ لغزش شده‌اند [۳]. در زلزله شیلی در سال ۱۹۸۵، از ۱۲۰ مخزن قائم مهارنشده، ۱۲ مخزن به شدت آسیب دیده‌اند. این مخازن حاوی ۲۵۰۰ تا ۱۲۵۰۰۰ بشکه نفت بوده‌اند. بیشتر مخازن آسیب‌دیده، لهیدگی در صفحه زیرین و یا خرابی در جوش مابین جداره و صفحه زیرین را تجربه کرده‌اند. همچنین کماتش پافیلی متعددی در مخازن دیده شد [۱۴]. در زلزله سندای در سال ۱۹۸۷، سه مخزن موجود در پالایشگاه خراب شده و همچنین سه مخزن آسیب دیده‌اند. از آسیب‌ها می‌توان به تسلیم و کشیدگی میل‌مهارهای دور محیط یک مخزن فلزی اشاره کرد [۱۴]. در زلزله نورتریج در سال ۱۹۹۴، دو مورد از شکستگی

جدول ۱. مشخصات فولادهای مصرفی

Table 1. Characteristics of used steels

فولاد مصرفی	وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (N/m <sup>2</sup> )	ضریب پواسون	تنش تسلیم (N/m <sup>2</sup> )	تنش گسیختگی (N/m <sup>2</sup> )	کرنش گسیختگی
SA516-Gr70	۷۸۵۰	$2/0.2 \times 10^{11}$	۰/۳	$260 \times 10^6$	$485 \times 10^6$	۰/۲۱
SA283-C	۷۸۵۰	$2/0.2 \times 10^{11}$	۰/۳	$205 \times 10^6$	$380 \times 10^6$	۰/۲

جزیره قشم می‌باشد.

جهت طراحی این برج از ضوابط کلی ارائه شده در آیین نامه‌های مربوطه (ASME VIII [۱۸] و NACE<sup>۱</sup>) و هندبوک‌ها [۱۹] استفاده شده است. جرم برج در حالت بهره‌برداری ۲۰۴ تن می‌باشد. پایه برج روی یک حلقه فولادی به ضخامت ۸ سانتی‌متر قرار گرفته است، ضخامت حلقه فولادی بالایی و سخت‌کننده‌ها به ترتیب ۸ و ۳/۴ سانتی‌متر می‌باشد و این مجموعه توسط ۲۴ عدد میل‌مه‌ار M64 به پداستال متصل شده است. فولاد مورد استفاده در پوسته برج از نوع SA516-Gr70 و فولاد مصرفی در حلقه‌های بالایی و پایینی و سخت‌کننده‌ها از نوع SA283-C است. مشخصات این فولادها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

مشخصات بتن مصرفی در پداستال و فنداسیون نیز در جدول ۲ نمایش داده شده است.

در مدل‌سازی عددی، تعریف رفتار دقیق مصالح در فشار و کشش در دو فاز الاستیک و پلاستیک می‌تواند اثرات زیادی در نتایج خروجی‌های حاصل شده داشته باشد. به همین منظور از مدل CDP<sup>۲</sup> که قابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد در این تحقیق استفاده شده است. از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [۲۰] جهت تعریف رفتار بتن در Abaqus که منطبق با مشخصات بتن مصرفی در سازه مورد مطالعه می‌باشد استفاده شده است.

۳-۲- شرح جزئیات مدل اجزا محدود

مدلسازی به دو قسمت مدلسازی برج به همراه فنداسیون و مدلسازی خاک تقسیم می‌شود که در ادامه جزئیات مدلسازی هرکدام تشریح شده

مه‌ارها و سه مورد از تسلیم قابل توجه مه‌ارهای برج فرآیند گزارش شده است [۳]. زلزله کوچاقلی ترکیه در سال ۱۹۹۹ موجب لغزش مخزن‌ها شده است و همچنین مخزن راکتور مرتفع، دچار شکستگی تکیه‌گاه‌های جانبی در نزدیکی بالای مخزن شده است. زمین لرزه‌ای که در سال ۲۰۰۱ در هند اتفاق افتاد، موجب لغزش فنداسیون مخازن گسترده شد. در زلزله مائول شیلی در سال ۲۰۱۰، آسیب‌های سازه‌ای در ساختمان‌های فولادی دیگ بخار نیروگاه‌ها مشاهده شد. خرابی در تکیه‌گاه‌های لرزه‌ای در برخی موارد منجر به تخریب کامل عناصر مه‌ار شده و در نتیجه باعث برخورد سازه ساختمان و دیگ بخار شده بودند [۳]. در زلزله کوبه واژگونی، شکست میل‌مه‌ارها، تغییر شکل به دلیل روانگرایی زمین یا آسیب به فنداسیون و کم‌انرژی‌داره به دلیل امواج مایع داخلی و یا سوختن مایع قابل اشتعال مشاهده شده است [۱۶]. همچنین در زلزله ونچوان چین به آسیب مخازن به دلیل برخورد آوار، آسیب و یا شکست فنداسیون و واژگونی اشاره شده است [۱۷].

از آنجایی که در بیشتر گزارشات واژگونی مخازن عمودی گزارش شده است، در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه و حذف کشش خاک می‌تواند به طور بالقوه پاسخ‌های سازه‌ای را تحت تاثیر قرار دهد [۱۴]. با توجه به گزارش‌های خرابی‌های زلزله‌های گذشته، در این مقاله تنش در بدنه و دامنه مخزن، جایجایی بالای مخزن، واژگونی مخزن، بلندشدگی فنداسیون و در نهایت تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای مخزن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- معرفی مدل مورد مطالعه و مدل‌سازی عددی

۳-۱- شرح مشخصات مدل

برج فرآیند مورد مطالعه در این تحقیق، برجی با ارتفاع ۲۶/۵ متر و قطر ۲/۸ متر بر روی پایه فولادی (دامنه) به قطر ۲/۸ متر واقع در پالایشگاه گاز

1 National Association of Corrosion Engineers

2 Concrete Damage Plasticity

جدول ۲. مشخصات بتن مصرفی

Table 2. Specifications of concrete used

بتن مصرفی	وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (N/m <sup>2</sup> )	ضریب پواسون
C25	۲۴۰۰	$1/97 \times 10^{10}$	۰/۱۹

است.

مطالعه در آن ساخته شده است مشخصات خاک محل در جدول ۳

ارائه شده است. با توجه به مطالعات مذکور، نوع زمین براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ برابر با II و بر اساس API650 [۲۱] برابر با C مشخص شده است. بر اساس تحلیل خطر به روش روش احتمالاتی مقدار PGA سایت برابر  $g/0.344$  می‌باشد.

۳-۲-۱- مدلسازی بدنه

با توجه به اینکه در مدل در نظر گرفته شده یکی از ابعاد مدل در برابر دو بعد دیگر بسیار کوچکتر باشد و تنش‌ها در جهت آن بعد قابل صرف نظر کردن می‌باشد از المان پوسته‌ای S4R برای مدلسازی استفاده گردیده است. در المان پوسته‌ای فرض می‌شود که مقاطع صفحه‌ای عمود بر صفحه پوسته به صورت صفحه باقی خواهند ماند و برای مدلسازی جداره برج و دامنه و کلاهک بالا و پایین برج از این المان استفاده شده است.

اثرات اندرکنش خاک و سازه (SSI)<sup>۱</sup> با استفاده از مدل‌سازی وینکلر می‌تواند به میزان قابل توجهی تقاضای جابجایی لرزه‌ای سیستم در مقایسه با رفتار خاک الاستیک معادل را افزایش دهد [۲۲]. در این روش خاک زیر فنداسیون به صورت فنرهای قائم و افقی مدل می‌شود [۲۳]، جهت محاسبه سختی این فنرها می‌توان به آیین‌نامه ATC-40 مراجعه کرد [۲۴]. بر اساس این آیین‌نامه سختی فنرهای فنداسیون از روابط ارائه شده در جدول ۴ بدست می‌آید. در صورت قرارگیری فنداسیون در عمق خاک، ضرایب افزایشی مربوط به قرارگیری فنداسیون در خاک در سختی‌های مربوطه ضرب می‌شوند، و این ضرایب در جدول ۵ ارائه شده است.

برای مدلسازی میل‌مهار از المان Beam استفاده شده است که قابلیت تحمل نیروی کششی را داشته باشد. به دلیل ضخامت قابل توجه پداستال و فنداسیون، جهت مدلسازی از المان‌های C3D8R که یک المان Solid-Homogeneous است استفاده شده است. فنداسیون به ابعاد  $10/8 * 10/8$  متر با ضخامت  $1/325$  و پداستال به ابعاد  $3/8 * 3/8$  به ضخامت  $1/4$  متر مدلسازی شده است. جهت اتصال حلقه پایینی برج با سطح پداستال از قید Tie به عنوان رفتار تماسی از نوع سخت استفاده شده است. با اعمال این قید دو سطح به یکدیگر فارغ از نوع مش می‌چسبند و هنگامی که فاصله بین این دو سطح صفر شود، فشار تماسی بدون هیچ محدودیتی افزایش می‌یابد و هنگامی که این فشار حذف شود، دو سطح از یکدیگر جدا می‌شوند. در این مقاله از بررسی اتصال سازه به فنداسیون صرفه نظر شده و فرض بر این است که اتصال کفایت کافی برای انتقال نیرو از سازه به فنداسیون را دارد.

– (۱) ابعاد و مشخصات برج ارائه شده است.

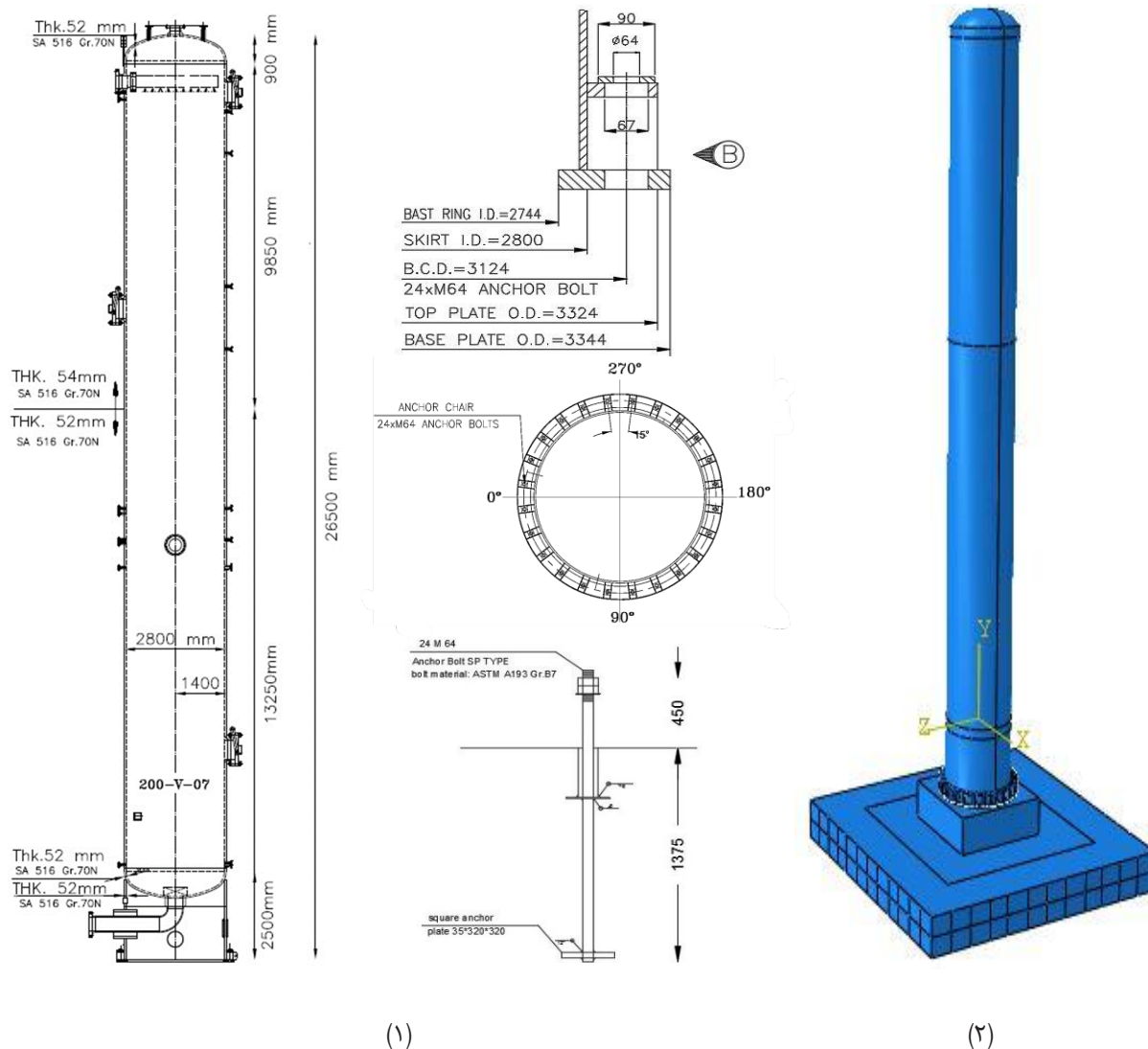
– (۲) مدلسازی برج در نرم افزار Abaqus نمایش داده شده است.

۳-۲-۲- مدلسازی خاک

بر اساس مطالعات ژئوتکنیک و نتایج آزمایشگاهی سایتی که برج مورد

لازم به ذکر است  $G$  ضریب برشی و  $V$  ضریب پواسون خاک می‌باشد. محدودیت مدل وینکلر ناشی از ضعف این مدل در توزیع تنش خاک می‌باشد. لذا جهت بهبود عملکرد این فنرها می‌توان محدوده فرگذاری را به چند دسته تقسیم کرد و سختی فنرهای کناری را افزایش و سختی فنرهای میانی را کاهش داد. نواحی انتهایی سازه فنداسیون مستطیل شکل بر مبنای سختی قائم یک فنداسیون مجزا با ابعاد  $B \times B/6$  تعیین می‌شود. سختی قائم ناحیه میانی بر مبنای روابط حاکم بر فنداسیون‌های نواری با طول بی‌نهایت محاسبه می‌شود. جهت محاسبه سختی فنرهای قائم از روابط سختی ارائه شده در واحد طول برای ناحیه  $B/6$  انتهایی و ناحیه میانی استفاده شده است. در نهایت سختی فنرهای اعمال شده در نرم‌افزار مطابق جدول ۶ می‌باشد. از ظرفیت کششی خاک به دلیل ناچیز بودن صرف نظر





شکل ۱. مشخصات برج فرآیند (۱) و مدل اجزا محدود برج (۲)

Fig. 1. Specifications of the process tower (1) and the finite element model of the tower (2)

جدول ۳. مشخصات خاک

Table 3. Soil characteristics

وزن مخصوص مرطوب خاک $g/cm^3 (\gamma_{wet})$	ضریب چسبندگی خاک (C) $kg/cm^2$	ضریب الاستیسیته ( $E_s$ ) $kg/cm^2$	ضریب برشی ( $G_s$ ) $kg/cm^2$	ضریب پواسون ( $\mu_s$ )
۱/۹	۰/۲۲	۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۳

جدول ۴. روابط برای محاسبه سختی سطحی فنداسیون [۲۴]

Table 4. Relationships for the calculation of surface stiffness of the foundation

پارامتر سختی	معادله
سختی قائم	$GL / (1 - V) [0.73 + 1.54 (B / L)^{0.75}]$
سختی افقی	$(GL / (2 - V)) [2 + 2.5 (B / L)^{0.85}]$

جدول ۵. ضرایب افزایشی مربوط به قرارگیری فنداسیون در خاک [۲۴]

Table 5. Incremental coefficients related to placing the foundation in the soil

پارامتر سختی	معادله
ضریب سختی قائم	$[1 + 0.095 (D / B) (1 + 1.3 B / L)] [1 + 0.2 (((2L + 2B) / LB) d)^{0.67}]$
ضریب سختی افقی	$[1 + 0.15 (2D / B)^{0.5}] [1 + 0.52 [(D - d / 2) / 6 (L + B) d / (BL^2)]^{0.4}]$

جدول ۶. سختی فنرها

Table 6. Stiffness of springs

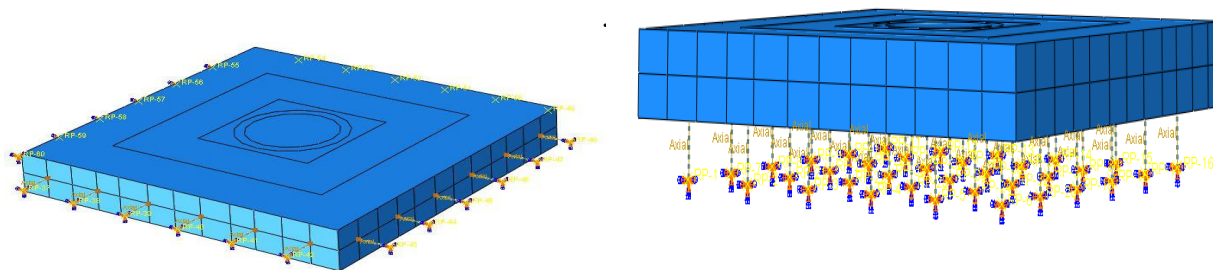
سختی	
فنر قائم انتهایی	$34/66 \times 10^8 \text{ N/m}$
فنر قائم میانی	$3/723 \times 10^8 \text{ N/m}$
فنر افقی	$77/0.4 \times 10^8 \text{ N/m}$

را در نرم افزار Abaqus مدل سازی نموده و نمودار به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل را ارائه نموده اند [۹]. نمونه مخزن مدل سازی شده در این مقاله دارای ارتفاع کلی ۲۹/۲ متر و قطر داخلی ۳/۱ متر است. ضخامت مخزن در قسمت کلاهدک پایین ۳۰ میلی متر، قسمت بدنه ۲۸ میلی متر و در قسمت کلاهدک بالایی ۲۲ میلی متر می باشد. دامنه مخزن دارای ضخامت ۴۰ میلی متر و ارتفاع ۳ متر است [۹]. مدل سازی غیرخطی برای غیرخطی هندسی (جابجایی های بزرگ و کرنش ها)، همچنین رفتار غیرالاستیک

شده است و فنرها تنها فشار را تحمل می کنند. اتصال فنرهای زیر فنداسیون با زمین در شکل ۲ نشان داده شده است.

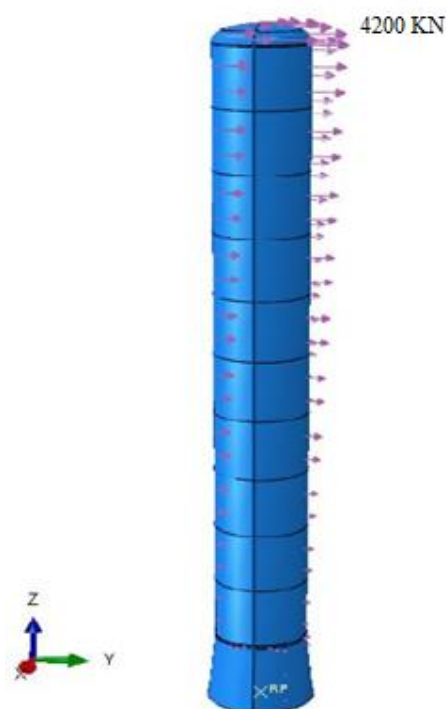
### ۳-۳- صحت سنجی

در این پژوهش به منظور اطمینان هرچه بیشتر از صحت مدل سازی از فرضیات و ضوابط مدل سازی ارائه شده برای یک نمونه مخزن ذخیره عمودی در مقاله کالیوپی و همکاران استفاده شده است. ایشان نیز مدل مورد مطالعه



شکل ۲. مدل‌سازی فنرها

Fig. 2. Modeling of springs

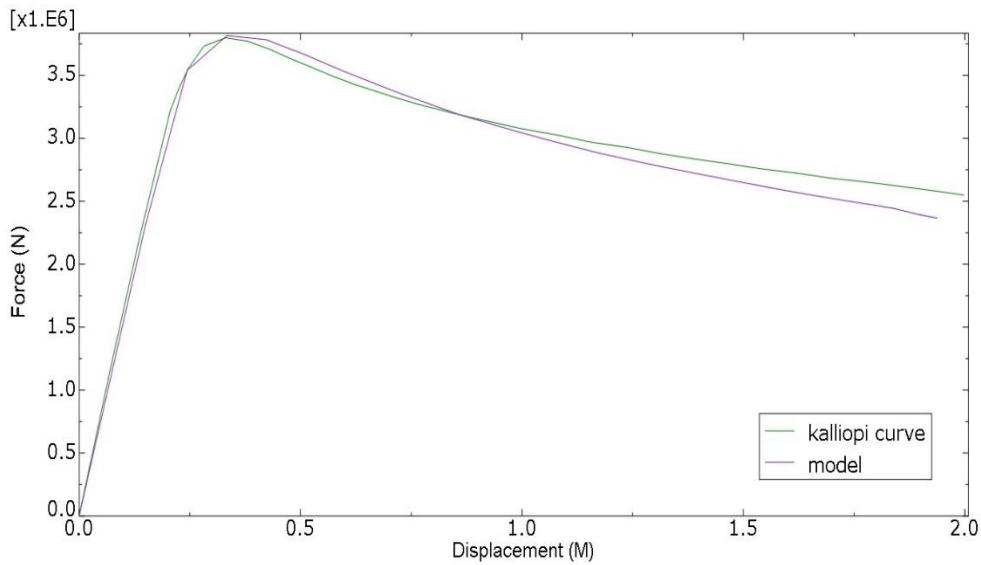


شکل ۳. مخزن با توزیع بار مثلثی

Fig. 3. Tank with triangular load distribution

استفاده شده است. مدل‌سازی مطابق با داده‌های موجود انجام گردید و منحنی پوش‌اور به دست آمده با منحنی پوش‌اور مقاله موردنظر مقایسه شد که این مقایسه در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. انطباق این دو نمودار، نشان از صحت روند مدل‌سازی دارد و با همین فرضیات نسبت به مدل‌سازی برج مورد مطالعه اقدام گردید.

مواد از طریق مدل مواد پلاستیکی فون میسر با سخت‌شدگی ایزوتروپیک، براساس مقادیراسمی فولاد P265GH محاسبه شده است [۹] و [۲۵]. مدل المان محدود مخزن ذخیره در شکل ۳ نشان داده شده است، جداره برج بوسیله المان shell مدل شده است. بار به صورت مثلثی معکوس به سازه اعمال شده است. جهت اعمال اثرات نیروی وزن در مدل‌سازی، از حلگر static general و جهت اعمال بار جانبی مثلثی از حلگر static riks



شکل ۴. منحنی نیرو-تغییر مکان

Fig. 4. Force-displacement curve

#### ۴- پیش‌نیازهای تحقیق

##### ۴-۱- محاسبه دوره تناوب تحلیلی سازه

برج مورد نظر را به دلیل یکسان بودن قطر بدنه و دامنه برج می‌توان به صورت یک ستون طره‌ای یکنواخت در نظر گرفت و طبق فرمول درج شده در آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تاسیسات و سازه‌های صنعت نفت [۲۶] و مرجع [۲۷] دوره تناوب سازه مورد نظر را بدون لحاظ کردن اثرات خاک محاسبه کرد. دوره تناوب ستون طره‌ای طبق رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد که در این رابطه،  $H$  ارتفاع کل تیر،  $W$  وزن واحد طول،  $E$  ضریب ارتجاعی،  $I$  ممان اینرسی و  $g$  ثابت گرانش زمین می‌باشد.

$$T = 1.79 \sqrt{((WH^4) / EIg)} \quad (1)$$

زمان تناوب اصلی سازه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه مطابق پیوست پنجم آیین‌نامه ۲۸۰۰ از رابطه (۲) بدست می‌آید [۲۸].

$$\bar{T} = T \sqrt{[1 + (K) / (K_y)] [1 + (K_y \bar{h}^2) / (K_\theta)]} \quad (2)$$

در این رابطه  $T$  پریود اصلی ساختمان بدون توجه به اثرات اندرکنش است و  $\bar{h}$  ارتفاع موثر سازه که برابر  $0.7$  ارتفاع کل سازه در نظر گرفته می‌شود.  $\bar{K}$  سختی سازه در حالت تکیه گاه ثابت است و از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\bar{K} = 4 \pi^2 [(\bar{W}) / (GT^2)] \quad (3)$$

$\bar{W}$  وزن موثر لرزه‌ای که در محاسبات اندرکنش برابر  $0.7$  وزن کل سازه است.  $K_y$  و  $K_\theta$  سختی حرکت جانبی پی و سختی حرکت دورانی می‌باشد.

##### ۴-۲- معرفی تحلیل دینامیکی افزایشی

تحلیل دینامیکی افزایشی یک روش تحلیل لرزه‌ای است که شامل انجام چندین تحلیل دینامیکی غیرخطی از یک مدل سازه‌ای تحت مجموعه رکوردهای حرکت زمین است، که هر کدام به چندین سطح از شدت لرزه‌ای مقیاس می‌شود [۲۹]. سطوح مقیاس شده باید طوری انتخاب گردند که سازه طیف وسیعی از رفتار الاستیک تا ویرانی را شامل شود. به منظور بررسی کمی یک سازه از نظر وقوع خسارت و آسیب، می‌بایست پارامتری انتخاب گردد

جدول ۷. مشخصات شتابنگاشت‌ها

Table 7. Characteristics of accelerometers

شماره	رویداد	سال	ایستگاه	بزرگی	PGA
۱	san fernando	۱۹۷۱	La – Hollywood stor	۶/۶	۰/۲۱
۲	Imperial Valley	۱۹۷۹	El Centro Array #11	۶/۵	۰/۳۸
۳	Superstition hills	۱۹۸۷	Poe road (temp)	۶/۵	۰/۴۵
۴	Loma prieta	۱۹۸۹	capitola	۶/۹	۰/۵۳
۵	Loma prieta	۱۹۸۹	Gilroy array #3	۶/۹	۰/۵۶
۶	Landers	۱۹۹۲	Yermo fire station	۷/۳	۰/۲۴
۷	Northridge	۱۹۹۴	Beverly hills - mulhol	۶/۷	۰/۵۲
۸	Northridge	۱۹۹۴	Canyon country-wlc	۶/۷	۰/۴۸
۹	Kocaeli , turkey	۱۹۹۹	Duzce	۷/۵	۰/۳۶
۱۰	Imperial Valley	۱۹۷۹	Plaster City	۶/۵	۰/۰۴۲
۱۱	Loma prieta	۱۹۸۹	Sunnyvale Colton Ave	۶/۹	۰/۲۰۷
۱۲	Imperial Valley	۱۹۷۹	El Centro Array #13	۶/۵	۰/۱۱۷

و مطالعات کرنل و وامواتسیکوس که منطبق با مشخصات خاک منطقه و فاصله از گسل (دور) می‌باشد انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به این شتاب نگاشت‌ها از بانک اطلاعاتی PEER اخذ گردیده است. این شتاب نگاشت‌ها دارای بزرگای نسبتاً قوی ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر بوده و فاصله آن‌ها از گسل دور می‌باشد. در این مطالعه شتاب نگاشت‌های حوزه‌ی دور مورد بررسی قرار گرفته است و شتاب نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک اعمال نشده است.

۴-۴- استخراج منحنی‌های شکنندگی

به منظور بیان کمی آسیب‌پذیری اجزای مختلف سازه‌ای و غیرسازه‌ای بر حسب میزان خطر زلزله می‌توان در مورد هر نوع سازه یا اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب یا جابه‌جایی نسبی، احتمال وقوع یا فراگذشت از یک میزان خسارت خاص را بر حسب یک ویژگی معرف نظیر PGA و PGV<sup>1</sup> و

که به نحو مناسبی بیانگر این موضوع بوده و خود وابسته به سایر متغیرهای دیگر نباشد. با توجه به خرابی‌های مشاهده شده در زلزله‌های گذشته، حداکثر تنش جداره و دامنه برج، حداکثر جابجایی بالای برج، حداکثر نیروی فنرهای زیر و اطراف فنداسیون و کرنش پلاستیک به عنوان پارامترهای تقاضای مهندسی (EDP) انتخاب گردیده است که از خروجی تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید و در سایر مطالعات نیز پارامترهای مذکور به عنوان پارامترهای تقاضای مهندسی انتخاب شده بودند.

۴-۳- انتخاب شتابنگاشت و مقیاس آنها

مطالعات کرنل و شوم نشان می‌دهد برای یک سازه با ارتفاع متوسط، عموماً استفاده از ۱۰ تا ۲۰ شتاب نگاشت به منظور تخمین دقیق پاسخ لرزه‌ای سازه کافی و مناسب است [۲۹]. با توجه به نوع خاک منطقه (تیپ II)، ۱۲ عدد شتاب نگاشت مطابق جدول ۷ از آیین نامه FEMA P-695

1 Peak Ground Velocity

## ۵- بحث و تحلیل نتایج

### ۵-۱- نتایج تحلیل مودال

در این مقاله جهت پی بردن به ضرورت و اثرات SSI برای سازه موردنظر، تحلیل مودال یکبار برای سازه بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه و بار دیگر برای سازه با لحاظ اندرکنش خاک و سازه انجام پذیرفته است. سه مود ارتعاشی غالب برج بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه که بیشترین مشارکت جرمی را داشتند در شکل ۵ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۸ قابل مشاهده است دوره تناوب مود اول برج با لحاظ SSI از مقدار ۰/۲۶ به ۰/۳۴ افزایش پیدا کرده است. بنابراین در نظرگرفتن خاک زیر و اطراف فنداسیون برای برج موردنظر به مقدار قابل توجهی در دوره تناوب و میرایی سازه تاثیرگذار می باشد.

دوره تناوب برج موردنظر مطابق رابطه (۱) برای سازه با تکیه گاه گیردار برابر ۰/۲۵ و مطابق رابطه (۲) برای سازه با لحاظ کردن اثرات اندرکنش خاک و سازه برابر ۰/۳۴۱۷ به دست آمده است و با دوره تناوب مدل اجزاء محدود برج مقایسه شده است همانطور که مشخص است مطابقت نسبی این دو مقدار می تواند دلیلی بر صحت مدلسازی باشد و همچنین حکایت از این دارد که سازه موردنظر در صورت عدم در نظرگیری اثرات اندرکنشی خاک رفتاری همانند تیر طره دارد و مشاهده می شود که در نظرگیری اثرات اندرکنشی تغییرات دوره تناوب سازه را به مقدار قابل توجهی همراه دارد.

### ۵-۲- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه با الگوی بار مثلثی معکوس به صورت نمودار نیرو تغییرمکان در شکل ۶ نمایش داده شده است. تحلیل استاتیکی نشان می دهد که پاسخ سازه تقریباً تا حدود نیوتن خطی است و در نیوتن به حداکثر ظرفیت می رسد و سپس ظرفیت برج با شیب ملایم کاهش می یابد.

### ۵-۳- نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی

با انجام تحلیل های دینامیکی افزایشی برای شتاب نگاشت های عنوان شده، در این بخش به مرور نتایج حاصله از تحلیل های مذکور پرداخته می شود. منحنی های IDA برای حداکثر تنش فون میسز جداره و دامنه و کرنش پلاستیک معادل تهیه شده است. با مقایسه منحنی های IDA تنش حداکثر در جداره و دامنه برج پر واضح است که وضعیت تنش در دامنه برج بحرانی تر از وضعیت تنش در جداره برج می باشد که دلیل آن حمل تنش های بیشتر توسط دامنه برج می باشد.

PGD<sup>1</sup> بیان کرد. تکرار این عملیات برای مقادیر مختلف PGA، موجب تولید منحنی هایی مرسوم به منحنی های شکنندگی می شود. این منحنی ها برای هر حالت خرابی رسم می شوند. به طور کلی منحنی های شکنندگی به صورت رابطه زیر تعریف می شوند [۳۰].

$$P(C | I) = \frac{n}{N} \quad (4)$$

در هر سطح شدت I، یک احتمال شرطی فروپاشی، (I | PC) از معادله (۴) به دست می آید که در آن n تعداد آنالیزهای با شدت I، که فروپاشی برای آن اتفاق افتاده است و N تعداد کل آنالیزهای انجام شده در شدت I است. نمودار احتمال شرطی تخمین زده شده فروپاشی را می توان به عنوان تابعی از شدت، با استفاده از تخمین مناسب از پراکندگی، توسعه داد و یک توزیع لگ نرمال را می توان به داده ها برازش داد.

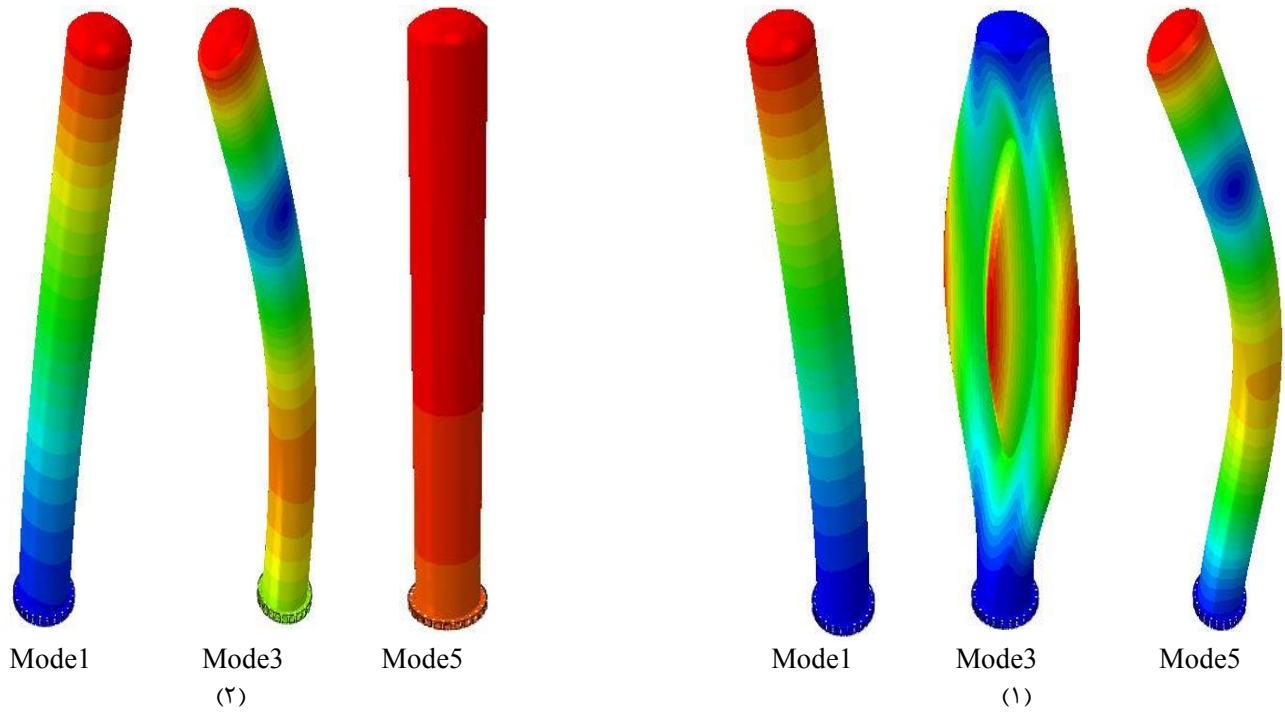
### ۴-۵- حالات حدی

در این مطالعه، دو معیار شکست مختلف، به شرح زیر مشخص شده است.

- معیار شکست ۱ (پارگی دیواره مخزن) : در حالتی هست که کرنش پلاستیک معادل<sup>۲</sup> (peeq) به مقدار برابر با ۰/۴٪ می رسد [۹].
- معیار شکست ۲ (حد پلاستیک) : مطابق رابطه (۵) تنش طراحی معادل باید کمتر از مقدار مشخصه مقاومت تسلیم تقسیم بر ضریب جزئی برای حد پلاستیک ( $\gamma_{MO}$ ) باشد [۳۱] و [۳۲] مقدار مشخصه مقاومت تسلیم برابر با مقاومت تسلیم در نظر گرفته شده است که با توجه به خصوصیات ماده عنوان شده در جدول ۱ برای پوسته برج برابر ۲۶۰ MPa برای حلقه بالا و پایینی و سخت کننده ها برابر ۲۰۵ MPa می باشد. ضریب جزئی با توجه به ضمیمه [۳۳] برابر ۱ می باشد.

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{Mo}} \quad (5)$$

1 Peak Ground Displacement  
2 Equivalent plastic strain (PEEQ%)



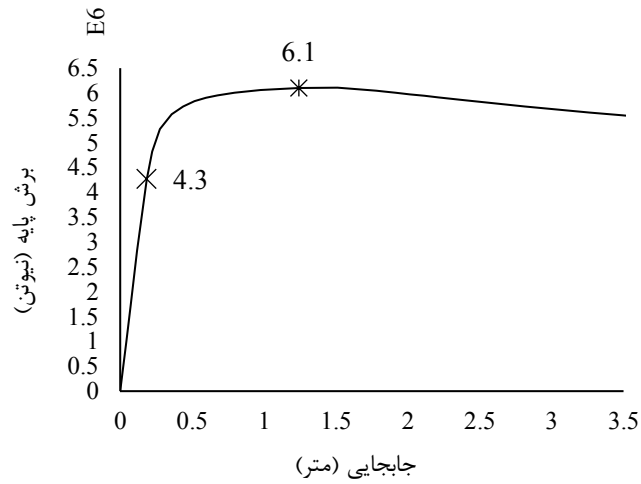
شکل ۵. سه مود ارتعاشی غالب برج بدون در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه (۱) و با در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه (۲) با بیشترین مشارکت جرمی

Fig. 5. The three dominant vibration modes of the tower without considering the interaction of soil and structure (1) and considering the interaction of soil and structure (2) with the largest mass contribution

جدول ۸. دوره تناوب سازه

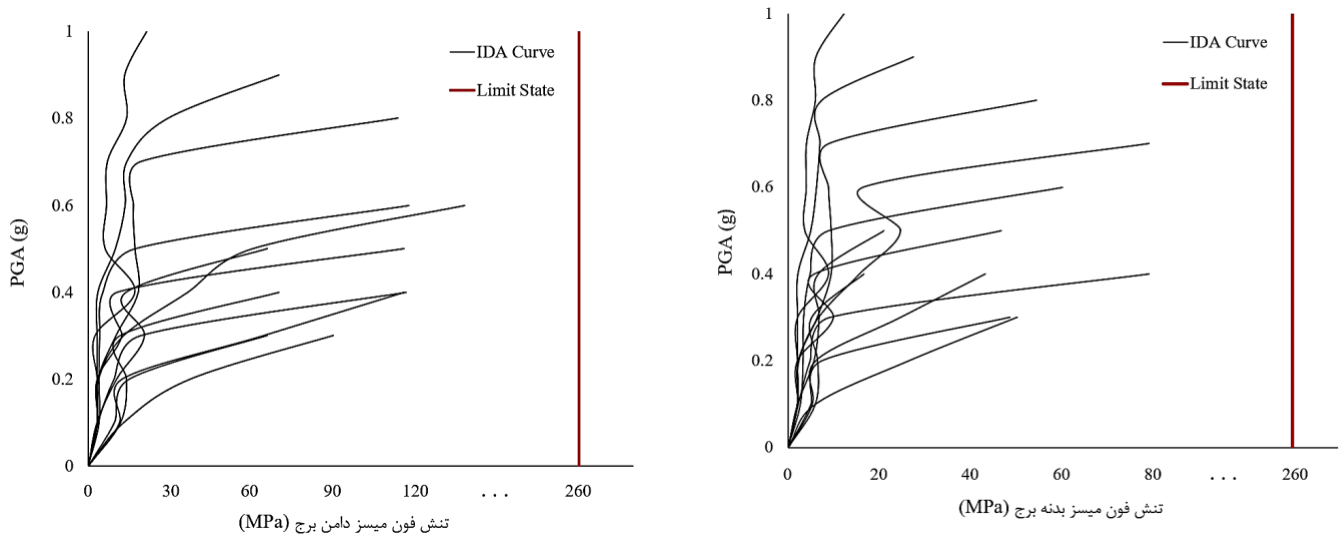
Table 8. periodicity of the structure

مود	دوره تناوب سازه بدون لحاظ SSI	دوره تناوب آیین نامه بدون لحاظ SSI	دوره تناوب سازه با لحاظ اثرات SSI	دوره تناوب آیین نامه با لحاظ SSI
اول	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۴۱۷
دوم	۰/۰۵۲	-	۰/۰۸	-
سوم	۰/۰۴۹	-	۰/۰۷	-



شکل ۶. تحلیل استاتیکی غیر خطی

Fig. 6. Non-linear static analysis



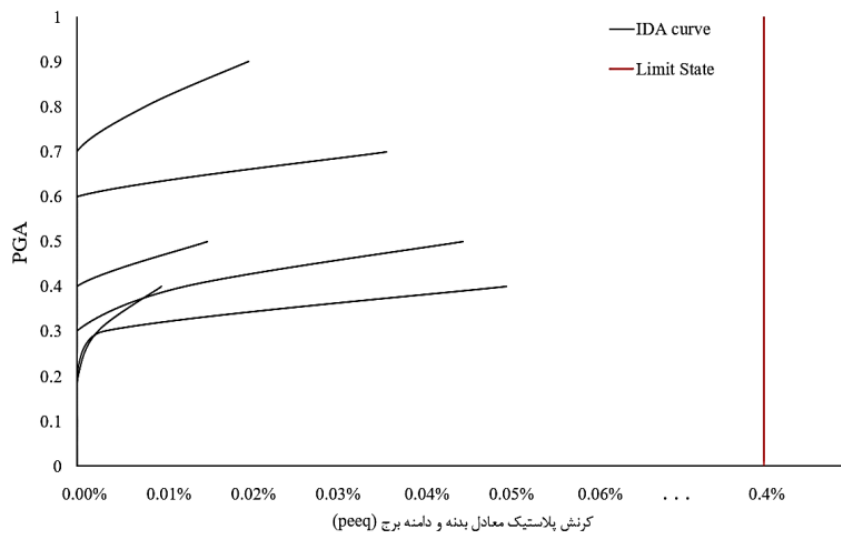
شکل ۷. منحنی IDA تنش فون میسز بدنه و دامن برج

Fig. 7. Von Mises stress IDA curve of tower body and skirt

در شکل ۸ نیز منحنی IDA برای پارامتر کرنش پلاستیک معادل رسم شده است. برای ۶ عدد از نگاشت‌ها مقدار کرنش بدست آمده نزدیک به صفر می‌باشد. برای ۶ شتابنگاشت دیگر اگرچه کرنش رخ داده است اما رفتار تقریباً صلب سازه برج تا زمان واژگونی می‌باشد.

حداثر مقدار کرنش ثبت شده، از حالت حدی که معادل ۰/۴٪ است بسیار کمتر هستند که این موضوع در شکل نیز نشان داده شده است که بیانگر رفتار تقریباً صلب سازه برج تا زمان واژگونی می‌باشد.





شکل ۸. منحنی IDA کرنش معادل بدنه و دامنه برج

Fig. 8. IDA curve of equivalent strain of tower body and skirt

نیروهای متفاوتی از بار ثقلی توسط فنرها مشاهده می‌گردد. با توجه به محدود شدن فنرها به جذب نیروی فشاری و عدم جذب نیروهای کششی، با آغاز بلندشدگی و متعاقباً واژگونی سازه، از ثانیه ۴/۲ نیروی برخی از فنرها به سمت صفر میل کرده است که نشان از وقوع کشش در آنها دارد و در سایر فنرها افزایش بسیار نیروها مشاهده می‌گردد که این وضعیت نشان از واژگونی سازه دارد.

با توجه به نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و منحنی‌های IDA، واژگونی برج نیز به عنوان یک پارامتر پاسخ از سازه جهت تولید منحنی‌های شکنندگی انتخاب گردید. برای رسم منحنی شکنندگی، تعداد وقوع واژگونی برج در  $PGA_1$  برابر با مجموع واژگونی‌های اتفاق افتاده در سطوح PGA کمتر و یا مساوی با آن  $PGA_1$  در نظر گرفته شد [۳۰]. به طور مثال برج موردنظر در بیشینه شتاب  $g/0.6$  از ۱۲ شتاب نگاشت مورد بررسی در ۸ مورد دچار واژگونی شده است یا به عبارتی احتمال واژگونی برج در  $g/0.6$ ، ۶۷٪ می‌باشد. براین اساس منحنی شکنندگی برای واژگونی سازه مورد بررسی مطابق با شکل ۱۱ حاصل گردید.

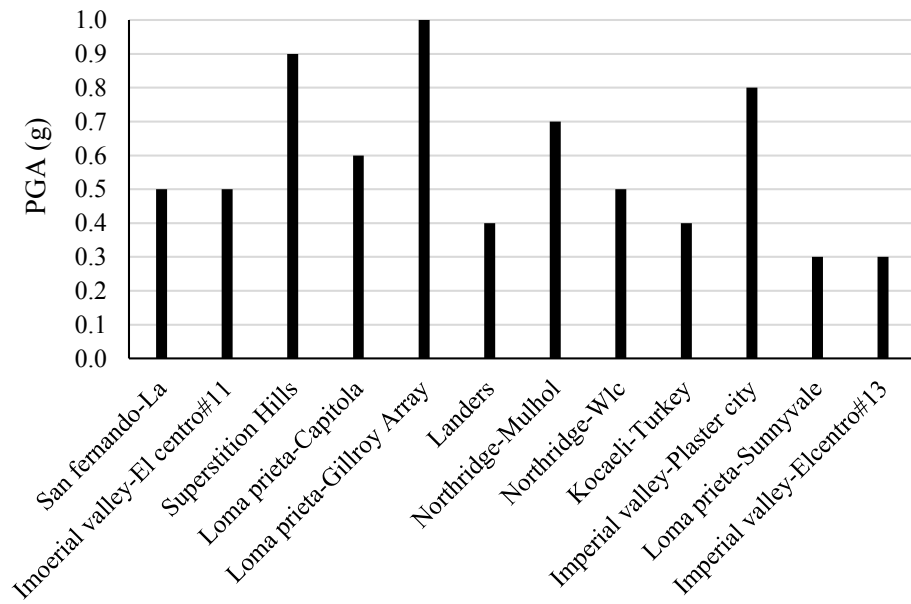
#### ۵-۴- منحنی شکنندگی حاصل از IDA

با توجه به منحنی‌های IDA به دست آمده و سطوح عملکرد تعریف شده برای تنش جداره و دامنه برج و کرنش پلاستیک، تنش در جداره و دامنه برج تا قبل از واژگونی سازه به حالت حدی نهایی نرسیده و هیچگونه کماتش ناشی از تسلیم مصالح در جداره و دامنه مشاهده نشده است بنابراین واژگونی سازه مود حاکم بر خرابی در این مطالعه موردی می‌باشد.

لازم به ذکر است در انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تحت بیشینه شتاب‌های مختلف، بلندشدگی فنداسیون نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۹ بلند شدگی شدت متناظر با وقوع بلندشدگی برای هر شتاب نگاشت نمایش داده شده است.

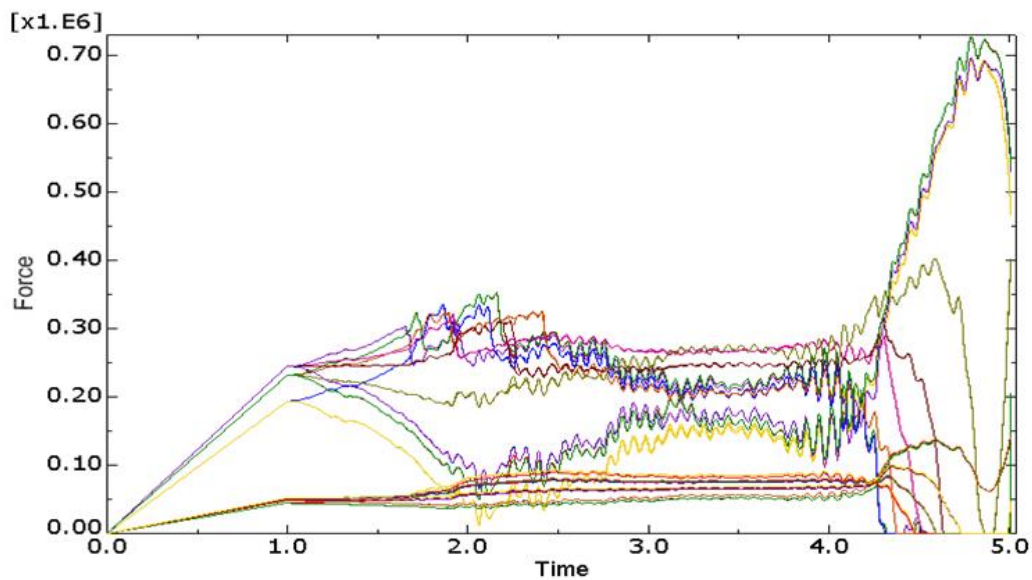
جهت بررسی دقیق‌تر رفتار سازه در هنگام بلندشدگی نیروهای فنر قائم برای شتاب نگاشت Superstition Hill در شکل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است.

در حد فاصل زمانی صفر تا ۱ ثانیه فنرها تحت بار ثقلی قرار گرفته‌اند و با توجه به یکسان نبودن سختی فنرها، در فاصله زمانی مذکور جذب



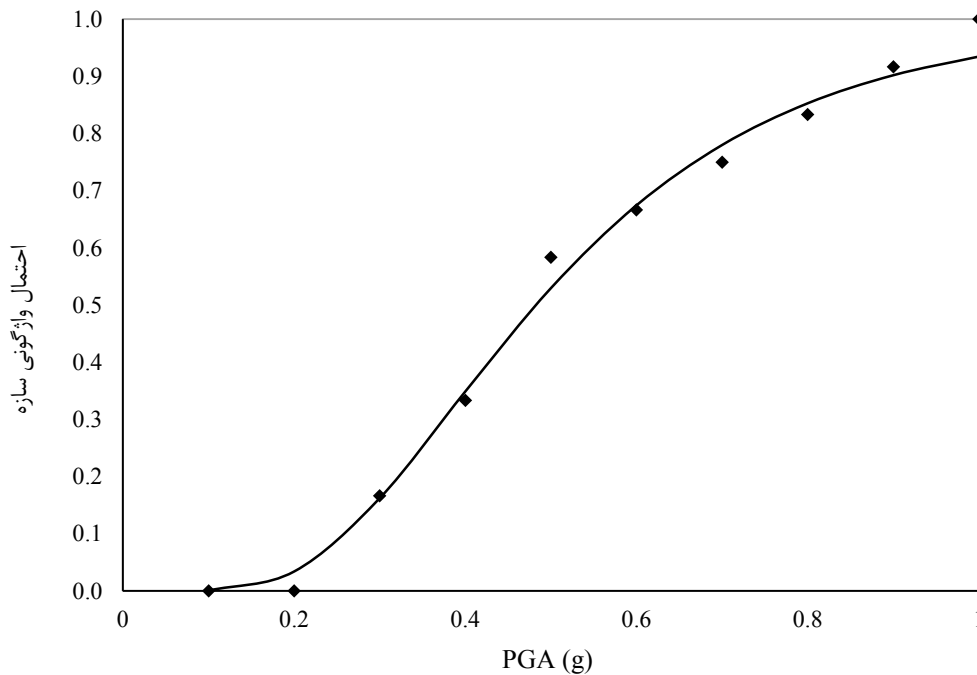
شکل ۹. PGA شتابنگاشت معادل بلندشدگی سازه

Fig. 9. PGA accelerometer is equivalent to the uplift of the structure



شکل ۱۰. نیروی فنرهای قائم تحت زلزله Superstition Hills با بیشینه شتاب  $g/9$

Fig. 10. Force of vertical springs under Superstition Hills earthquake with  $PGA=0.9g$



شکل ۱۱. منحنی شکنندگی احتمال واژگونی برج

Fig. 11. Fragility curve of tower overturning probability

#### ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله با صرف هزینه محاسباتی بالا یک مدل اجزاء محدود مخازن عمودی با نظریه اندرکنش خاک و سازه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است که نتایج حاصل از آن می‌تواند به عنوان مرجعی جهت مقایسه با نتایج مدل‌های ساده سازی شده قرار گیرد. رفتار لرزه‌ای با استفاده از تحلیل پوش آور و تحلیل دینامیکی افزایشی بررسی قرار گرفت. مکانیسم‌های شکست مورد بحث قرار گرفت و منحنی شکنندگی رسم گردید.

(۱) با مقایسه دوره تناوب مدلسازی در نرم افزار Abaqus و دوره تناوب به دست آمده از آیین‌نامه، سازه موردنظر رفتاری همانند تیر طره دارد. با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، دوره تناوب سازه افزایش می‌یابد و این نشان از تاثیرگذاری خاک در رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها دارد.

(۲) با توجه به منحنی‌های IDA، تا قبل از واژگونی برج تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل در بدنه و دامنه به حالت حدی خود نرسیده و هیچگونه تسلیم شدگی در آن مشاهده نشده است و این نشان از حاکم بودن مود خرابی واژگونی برای سازه مورد نظر می‌باشد. فنداسیون برج در

برابر زلزله‌ها با بیشینه شتاب‌های زیاد آسیب‌پذیر بوده و جهت بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها نمی‌توان از اثرات خاک صرف‌نظر کرد.

(۳) با توجه به منحنی شکنندگی بدست آمده برای سازه تا شتاب  $g$   $0.35$  این احتمال  $0.1$  احتمال واژگونی برج صفر می‌باشد و برای شتاب  $g$   $0.35$  این احتمال کمتر از  $20\%$  است. اما در شدت‌های بالاتر این مقدار همانطور که مشاهده می‌گردد بسیار بیشتر بوده و برای زلزله‌های نادر مقدار احتمال واژگونی عددی بزرگ و قابل توجه می‌باشد. این موضوع برای مطالعات مربوط به ارزیابی ریسک لرزه‌ای کارخانه‌های نفت و گاز تحت زلزله‌های قوی که زنجیره‌های وقایع بعدی را به همراه دارد از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۳۴] و لذا توجه ویژه به مود خرابی واژگونی این دسته از سازه‌ها با توجه به نتایج حاصله و مشاهده این مود خرابی در گزارش‌های زلزله‌های گذشته برای مطالعات مذکور اکیدا توصیه می‌گردد.

(۴) با توجه به اینکه طیف وسیعی از برج‌های فرآیندی با ارتفاع‌های مختلف در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد مطالعه‌ای جامع‌تر جهت در نظرگیری سایر ارتفاع‌های این دسته از برج‌ها توصیه می‌شود.

- [12] M. Cademartori, C. Morassi, R. Siano, M. Faravelli, E. Brunesi, Seismic risk analysis of pressure vessels, *Fresenius Environmental Bulletin*, 28 (2019) 1025-1031.
- [13] J. Puttatt, SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF A REACTOR STRUCTURE IN A SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF A REACTOR, (2021).
- [14] M.a. Ronagh, Plastic Hinge Length of RC Columns Subjected to Both Far-Fault and Near-Fault Ground Motions Having Forward Directivity, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24 (2011) 421-439.
- [15] B. Sayyafzadeh, S. Kouhestani, M. Sharifi, Derrick - Supported Flare - Stacks Seismic Fragility Assessment : A Case Study, 2 (2021) 1-16.
- [16] K. SUZUKI, Earthquake Damage to Industrial Facilities and Development of Seismic and Vibration Control Technology, *Journal of System Design and Dynamics*, 2 (2008) 2-11.
- [17] E. Krausmann, A.M. Cruz, B. Affeltranger, The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23 (2010) 242-248.
- [18] ASME, ASME-BPVC-Sec-VIII-Div1-2017-1, ASME-BPVC-Sec-VIII-Div1-2017-1, Div1 (2017) 799.
- [19] D.R. Moss, *Pressure vessel design manual*, (2004).
- [20] T. Jankowiak, T. Lodygowski, Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, *Foundations of civil and environmental ...*, (2005) 53-69.
- [21] API Standard 650, *Welded Tanks for Oil Storage*, Twelfth Edition, (2013).
- [22] H. Asadi-Ghoozhi, R. Attarnejad, A Winkler-based model for inelastic response of soil-structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects, *Structures*, 28 (2020) 589-603.
- [23] A.G. Baghmisheh, M. Mahsuli, Seismic performance and fragility analysis of power distribution concrete poles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150 (2021) 106909.
- [1] R.N. Rao, J.S. Vishwanatha, M. Mayya, S. Prabhu, G. Santhosh, Design of pressure vessel for improvement of a system in a process unit, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9 (2019) 1157-1164.
- [2] A.S. Kiremidjian, K. Ortiz, R. Nielsen, B. Safavi, *Seismic Risk To Major Industrial Facilities.*, Report - Stanford University, John A. Blume Earthquake Engineering Center, (1985).
- [3] B. Rodolfo José Danesi Supervisors, P. Bazzurro, D. Vamvatsikos, *Seismic Risk of Industrial Plants: Assessment of a Petrochemical Piperack Using Incremental Dynamic Analysis*, (2015).
- [4] Y.H. Fluor, *Seismic Response of Industrial Structures Considering Soil-Pile-Structure Interaction*, (2004).
- [5] E. Salzano, I. Iervolino, G. Fabbrocino, Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis, 16 (2003) 403-409.
- [6] M. Daali, *Industrial Facilities and Earthquake Engineering*, 13th WCEE, (2004).
- [7] M. Minavand, *Seismic Evaluation and Strengthening of Vertical and Horizontal PressureVessels ABSTRACT* :, (2008).
- [8] H.S. Sánchez, *Structural Behavior of Process Steel Towers Submitted to Seismic Actions*, in: 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), 2012.
- [9] K. Diamanti, I. Doukas, S.A. Karamanos, *Seismic analysis and design of industrial pressure vessels*, ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2011: 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Programme, (2011).
- [10] NIST, NIST GCR 12-917-21 *Soil-Structure Interaction for Building Structures*, 12 (2012) 292.
- [11] A. Toudehdeghan, T.W. Hong, *A critical review and analysis of pressure vessel structures*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 469 (2019).

- on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, 1 (2014).
- [31] E. Committee for Standardisation, EN 1993-1-6: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, in, 2011.
- [32] M. Pluto, Tank Shell Design According to Eurocodes and Evaluation of Calculation Methods, Faculty of Health, Science and Technology Degree, (2018) 79.
- [33] J.M.F.G. Holst, J.M. Rotter, C.R. Calladine, E. Dunphy, E.S.N.E.E. NORM, DNV, E.C. Carvalho, C.T.C. Sc, O. Park, R.T. Haftka, B.V. Sankar, J.H. Starnes, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-2: Tanks Eurocode3- Calculdesstructuresenacier-Partie4-2: Tanks EN 1993-4-2 February, in: Journal of Constructional Steel Research, 2011, pp. 18-20.
- [34] S. Biass, C. Bonadonna, F. di Traglia, M. Pistolesi, M. Rosi, P. Lestuzzi, Probabilistic evaluation of the physical impact of future tephra fallout events for the Island of Vulcano, Italy, Bulletin of Volcanology, 78 (2016) 1-22.
- [24] ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume 1 ATC-40, ATC 40, Applied Technology Council, 1 (1996) 334.
- [25] M. Wieschollek, K. Diamanti, M. Pinkawa, B. Hoffmeister, M. Feldmann, Guidelines for seismic design and analysis of pressure vessels, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 8 (2013) 1-10.
- [26] Seismic Design of Oil Facilities Code 038-3rd final, (1389).
- [27] C.E. Carraher, G. Barot, General Topics, Polymer News, 30 (2005) 358-360.
- [28] The Iranian Standard No. 2800 (National Standard for Seismic. Design of Buildings)
- [29] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, The Incremental Dynamic Analysis and Its Application To Performance-Based Earthquake Engineering, European Conference on Earthquake Engineering, (2002) 10.
- [30] FEMA P58 seismic performance assessment of buildings, NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Kolbadi, S. Koohestani, B. Sayyafzadeh, A. Sarvghad Moghadam, M. Sharifi, Process towers probabilistic seismic behavior evaluation using incremental dynamic analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1561-1578.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.22107.7904



