



Seismic performance evaluation of free-standing intake tower using incremental dynamic analysis

A. Ahmadi*, M. Alembagheri

Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Intake towers form the entrance to the reservoir spillway or diversion system and thus play a key role in the seismic resistance of the whole system. Safety and proper functioning of the intake towers in the event of a major earthquake are very important since the release controlled by the reservoir can help to prevent the failure of the dam after an earthquake by reducing the water pressure. In addition, the current seismic assessment based on the linear elastic constitutive model cannot adequately describe the seismic capacity of intake towers. Thus, to investigate the proper functioning of intake towers in the event of an earthquake, it is necessary to introduce IDA that takes into fully assesses the seismic performance of intake towers based on nonlinear dynamic analysis. In this paper by modeling the intake tower of the Briones dam, intake tower in three conditions of the intake tower, the intake tower-reservoir (outside water) and the tower-reservoir-inside water, under the influence of 12 earthquake records, each of which has a magnitude of seven in the earthquake intensity scale, has been investigated. The displacement at the top of the intake tower, damage to the intake tower body and the maximum tensile stress of the rebar in the intake tower were studied in all three conditions are considered as damage measure (DM), and the results were reported in the form of IDA curves. Then based on the results, the function and different limit-states (key points) of the intake tower structure are determined.

Review History:

Received: Jan. 04, 2021

Revised: Jan. 12, 2023

Accepted: Jan. 16, 2023

Available Online: Jan. 24, 2023

Keywords:

Intake tower

Seismic performance

Seismic capacity

Incremental dynamic analysis

Nonlinear behavior

1- Introduction

Safety and proper functioning of the intake towers in the event of a major earthquake are very important, since the release controlled by the reservoir can help to prevent the failure of the dam after an earthquake by reducing the water pressure. The seismic response of intake towers is always a topic of considerable interest. Goyal and Chopra developed a simplified procedure to calculate the added masses accounting for the hydrodynamic interaction of water inside and outside the tower, and the structure-foundation interaction, and it was shown that the structure-foundation interaction had a significant effect on the structural vibration mode [1, 2]. Cocco et al developed a nonlinear static method (capacity spectrum method) to assess the seismic performance of intake towers, which, however, did not take into account the seismic capacity of hoist chambers [3]. Incremental dynamic analysis (IDA) is an emerging method that offers a thorough estimation of the seismic demand and limit state capacity of a structure [4]. IDA involves performing nonlinear dynamic analyses of a prototype structural system under a suite of ground motion records, each scaled to several intensity levels designed to force the structure all the way from elastic response to final global dynamic failure. Alembagheri and Ghaemian used IDA to determine the seismic performance and different limit states of hydraulic structures, such as gravity and arch dams [5-7]. Mahmoodi et al used IDA to determine the seismic

performance and different limit states of cement dams [8].

In this paper by modeling the intake tower of the Briones dam, intake tower in three conditions of the intake tower, the intake tower-reservoir (outside water) and the tower-reservoir-inside water, under the influence of 12 earthquake records, each of which has a magnitude of seven in the earthquake intensity scale, has been investigated. The displacement at the top of the intake tower, damage of the intake tower body and the maximum tensile stress of the rebar in the intake tower were studied in all the three conditions are considered as damage measure (DM), and the results were reported in the form of IDA curves. Then based on the results, the function and different limit-states (key points) of the intake tower structure are determined.

2- Numerical modeling and Methodology

The intake tower of Briones dam was modeled in 3D in Abaqus software. This reinforced-concrete intake tower, is approximately 70.1 m high, has a hollow circular cross-section of outside diameter of 6.92 m near the base and tapering to a diameter of 3.52 m at the top. The wall thickness is 0.41 m at the base, decreasing to 0.32 m near the top. The tower is supported on a 4.0 m high solid concrete block which has a diameter of 18.3 m at the ground level (Figure 1).

The water in the reservoir surrounding the tower is idealized as a fluid domain that extends to infinity in all radial directions

*Corresponding author's email: arman.ahmady2012@gmail.com



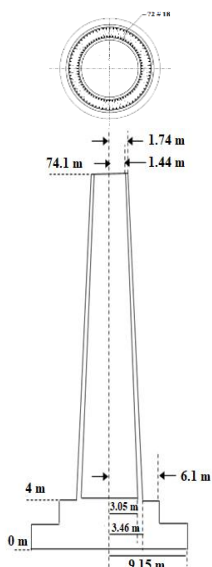


Fig. 1. Two-dimensional cross-section and plan of the Briones dam intake tower

and has a constant depth of 61.3 m. The height of the water inside and surrounding water is considered the same.

The tower is made of material properties according to Table 1. The considered nonlinear behavior of concrete and steel in this study is shown in Figure 2. Also the considered linear behavior of concrete compressive stress.

The whole FEM model was including 3D solid elements for intake tower, truss elements for rebar, and acoustic elements for water, as shown in Figure 3.

The loading consists of two stages, static and dynamic. Static loading includes the weight of the tower and hydrostatic load caused by water, and dynamic loading includes the longitudinal component of the earthquake record, which is applied as a boundary condition of the acceleration type to the bottom of the structure.

Twelve earthquake records (Table 2) matched with standard design response spectrum were selected from Pacific Earthquake Engineering Research (PEER)¹ strong motion database.

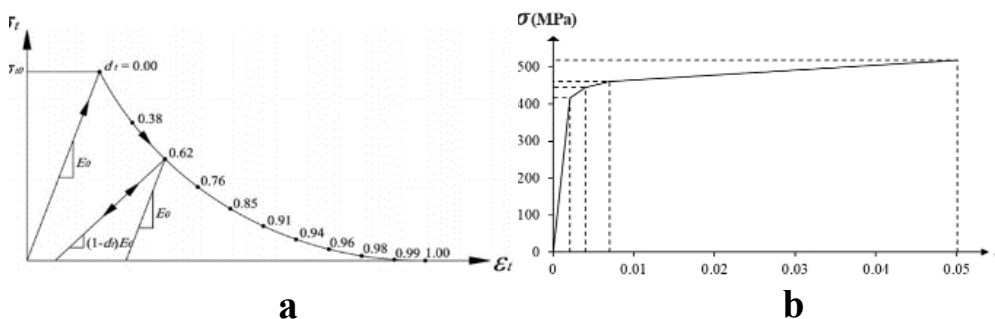


Fig. 2. Considered nonlinear behavior for concrete and steel. a) Concrete b) Steel

Table 1. Static material parameters

Material	Density (kg/m ³)	Young modulus (GPa)	Poisson ratio
Concrete	2430	31	0.17
Steel	7850	200	0.3
Water	1000	2.2(Bulk modulus)	-

3- Conclusion

An incremental dynamic analysis method is proposed for assessing the seismic performance and capacity of intake towers based on the performance-based seismic design in this study. The IDA results can be used to quantitatively determine the seismic limit states of the intake tower.

Twisted Pattern IDA curves have a wave motion around the elastic slope that follows the law of equal displacements. The twisted pattern of these curves includes successive sections of hardening and softening at different levels of earthquake intensity.

The first damage occurs in the cases of the intake tower alone and intake tower-reservoir at the spectral acceleration level of 0.2g and in the case of the intake tower-reservoir-water inside the intake tower at the spectral acceleration level of 0.1g. The first tensile damage created in the body of the intake tower and at these levels of earthquake intensity is caused in the connection section of the intake tower with solid concrete block.

Vertical cracks are mainly caused by the earthquake intensity level of 0.3 and 0.4g between horizontal cracks.

References

- [1] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamics of intake towers: earthquake responses, Journal of Structural Engineering, 115(6) (1989) 1386-1395.
- [2] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation

¹ Pacific Earthquake Engineering Research

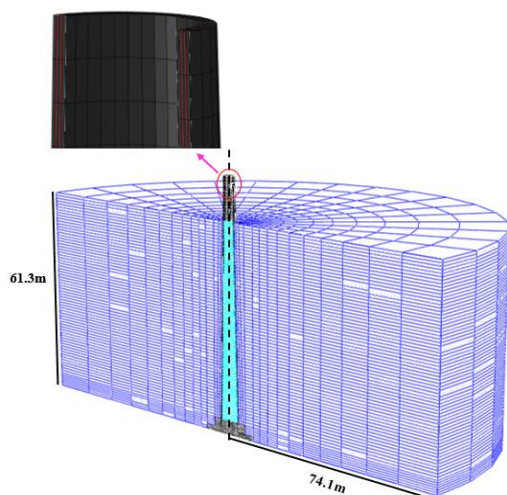


Fig. 3. Whole finite element mesh

interaction effects in dynamics of intake towers: frequency response functions, *Journal of Structural Engineering*, 115(6) (1989) 1371-1385.

- [3] L. Cocco, L.E. Suarez, E.E. Matheu, Development of a nonlinear seismic response capacity spectrum method for intake towers of dams, *Struct. Eng. Mech.*, 36(3) (2010) 321-341.
- [4] D. Vamvatsikos, *Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis*, Stanford University, 2002.
- [5] M. Alembagheri, M. Ghaemian, Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes, *Earthquake Engineering & Structural*

Table 2. Selected earthquake records

No.	Earthquakes	Name	Magnitude (M)
1	Kern County, 1952	KCTAF	7.4
2	Kern County, 1952	KCLIN	7.4
3	Imperial Valley, 1940	IVELC	7
4	Imperial Valley, 1979	IVPTS	6.5
5	Loma Prieta, 1989	LPAND	6.9
6	Loma Prieta, 1989	LPGIL	6.9
7	Loma Prieta, 1989	LPSTG	6.9
8	Morgan Hill, 1984	MHG06	6.2
9	San Fernando, 1971	SFPAS	6.6
10	San Fernando, 1971	SFPPP	6.6
11	Northridge, 1994	NRSAN	6.7
12	Northridge, 1994	NRCOM	6.7

Dynamics, 42(1) (2013) 123-144.

- [6] M. Alembagheri, M. Ghaemian, Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44 (2013) 127-137.
- [7] M. Alembagheri, M. Seyedkazemi, Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1) (2015) 41-58.
- [8] K. Mahmoodi, A. Noorzad, A. Mahboubi, M. Alembagheri, Seismic performance assessment of a cemented material dam using incremental dynamic analysis, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1187-1198.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Ahmadi, M. Alembagheri, *Seismic performance evaluation of free-standing intake tower using incremental dynamic analysis*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(3) (2023) 107-110.

DOI: [10.22060/ceej.2023.19371.7178](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.19371.7178)





ارزیابی عملکرد لرزه‌ای برج‌های آبگیر آزاد-ایستا با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی

آرمان احمدی^{*}، محمد عالم باقری

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

کلمات کلیدی:

برج آبگیر
عملکرد لرزه‌ای
ظرفیت لرزه‌ای
تحلیل دینامیکی افزایشی
رفتار غیرخطی

خلاصه: برج‌های آبگیر ورودی سرریز مخزن یا سیستم انحراف را تشکیل می‌دهند و در نتیجه نقش کلیدی در مقاومت لرزه‌ای سیستم کلی را بازی می‌کنند. ایمنی و عملکرد مناسب برج‌های آبگیر در صورت وقوع یک زلزله بزرگ بسیار مهم است، زیرا راهایی کنترل شده آب مخزن می‌تواند از شکست سد پس از زمین‌لرزه با کاهش فشار آب جلوگیری کند. علاوه بر این ارزیابی عملکرد بر اساس مدل الاستیک خطی، نمی‌تواند با دقت ظرفیت لرزه‌ای برج‌های آبگیر را توصیف کند. از این رو برای بررسی عملکرد مناسب برج‌های آبگیر در صورت وقوع یک زلزله ضروری است که IDA ارائه شود تا به طور کامل عملکرد لرزه‌ای برج‌های آبگیر بر اساس تجزیه و تحلیل دینامیکی غیرخطی تعیین شود. در این مقاله با مدل‌سازی برج آبگیر سد برونز، برج آبگیر در سه حالت برج آبگیر تنها، برج آبگیر-مخزن (آب بیرونی) و برج آبگیر-مخزن-آب داخل، تحت اثر ۱۲ رکورد زلزله که هر یک به هفت سطح از شدت زلزله مقیاس گشت، بررسی شده است. جابه‌جایی بالای برج آبگیر، خرابی بدنه برج آبگیر و ماکزیمم تنش کششی میلگردهای درون برج آبگیر در هر سه حالت به عنوان پارامتر آسیب (DM) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در قالب منحنی‌های IDA گزارش شد. سپس بر اساس نتایج، حالات حدی سطوح مختلف (نقاط کلیدی) عملکرد سازه برج آبگیر مشخص شد.

۱- مقدمه

خرابی و انهدام سدها می‌تواند پیامدهای جانی و مالی جبران ناپذیری به دنبال داشته باشد. وقوع زلزله به عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدهای محتمل در جهان به شمار می‌رود. از همین رو مقاومت سدها و سازه‌های وابسته مانند برج‌های آبگیر در مقابل این خطر بالقوه حساسیت‌های مختلفی را بر می‌انگیزد. به همین جهت محققان بی‌شماری تحقیقات فراوانی را با موضوع ارزیابی ایمنی سازه‌های هیدرولیکی انجام داده‌اند. یکی از موضوعات قابل بررسی در این گونه تحقیقات، ارزیابی ایمنی سازه‌های هیدرولیکی در دست بهره‌برداری می‌باشد. از آنجا که بسیاری از این سازه‌های هیدرولیکی با علم و اصول قدیمی ساخته شده‌اند، عملکرد غیرایمن آن‌ها در مقابل زلزله‌های محتمل قابل پیش‌بینی می‌باشد. از این رو وجود روش‌های مطمئنی که ایمن بودن یا عدم ایمنی را مشخص کند از ارزش بالایی برخوردار می‌باشد. پاسخ لرزه‌ای و ارزیابی عملکرد برج‌های آبگیر همیشه موضوع قابل توجهی بوده است که در ادامه به طور خلاصه به

تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. در شروع پژوهش‌ها گویال و چوپرا در سال ۱۹۸۹ روش ساده‌ای برای محاسبه جرم افزوده هیدرودینامیکی آب داخل و خارج از برج و اندرکنش سازه و پی به دست آوردند و نشان دادند که اندرکنش سازه-پی تاثیر زیادی بر حالت ارتعاش ساختاری دارد [۱ و ۲]. کوکو و همکاران در سال ۲۰۱۰ روش استاتیکی غیرخطی (روش طیف ظرفیت) را برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای برج‌های آبگیر توسعه دادند [۳]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ آزمایش میز ارتعاشی با یک مدل مقیاس‌پذیر از یک گروه برج‌های آبگیر را برای بررسی اندرکنش دینامیکی بین برج و مخزن، مورد مطالعه قرار دادند که بر این اساس اندرکنش برج آبگیر با مخزن را نمی‌توان در تحلیل پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر نادیده گرفت [۴].

در تحقیقات گذشته اغلب اندرکنش برج-سیال توسط جرم افزوده هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده است که این روش بر پایه فرض صلب بودن سازه، تراکم ناپذیری سیال و رفتار خطی مصالح سازه است. از آنجا که بسیاری از این سازه‌های هیدرولیکی با علم و اصول قدیمی ساخته شده‌اند، عملکرد غیرایمن آن‌ها در مقابل زلزله‌های محتمل قابل پیش‌بینی می‌باشد.

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Arman.ahmady2012@gmail.com



از این رو وجود روش‌های مطمئنی که ایمن بودن یا عدم ایمنی را مشخص کند از ارزش بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین ارزیابی عملکرد بر اساس مدل الاستیک خطی، نمی‌تواند با دقت ظرفیت لرزه‌ای برج‌های آبرگیر را توصیف کند. برای بیش از یک دهه، روش طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد که برای تقاضای لرزه نیاز به ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها را دارد، در زمینه تحقیقات مهندسی زلزله قرار گرفته است. برای طراحی لرزه‌ای بر پایه‌ی عملکرد، و امواستیکاس در سال ۲۰۰۲ روشی نوینی را برای برآورد دقیق تقاضای لرزه‌ای و ظرفیت حدی یک ساختار به اسم تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ارائه کرد.

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی IDA، شامل تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های زلزله است و این شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای مقیاس شده‌اند که بتوانند محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را تحت پوشش قرار دهند. هدف اصلی این روش به دست آوردن پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف شدت زلزله می‌باشد و نتایج این تحلیل به شکل منحنی‌های IDA ارائه می‌گردد [۵]. تحلیل دینامیکی افزایشی مهم‌ترین ابزار در تخمین و ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها است [۵]. این روش با توجه به اینکه رفتار مصالح را غیرخطی در نظر می‌گیرد و نیز ماهیت دینامیکی دارد لذا در مقایسه با روش‌های استاتیکی دقیق‌ترین روش تخمین رفتار سازه‌ها می‌باشد. تحلیل دینامیکی افزایشی یکی از دقیق‌ترین روش‌های تحلیل سازه‌ها است که در آن از طریق افزایش تدریجی شدت زلزله، رفتار سازه از ابتدا (حالت خطی) تا لحظه ایجاد و گسترش ترک و آستانه انهدام، قابل حصول بوده و در ارزیابی سازه‌ها بسیار کاربردی می‌باشد. در این روش تحلیل، روی هر منحنی IDA، حالات حدی مشخص می‌شوند و سپس پاسخ‌ها برای ایجاد احتمال تجاوز از یک حالت حدی خاص در سطح شدت مورد نظر خلاصه‌سازی می‌شوند. با توجه به اینکه نتایج نهایی در فرم مناسبی قرار دارند، می‌توانند به راحتی به همراه یک منحنی خطر مورد بررسی قرار بگیرند تا بتوان نرخ سالیانه تجاوز از ظرفیت یک حالت حدی خاص یا یک تقاضای خاص را محاسبه کرد [۶]. و امواتسیکوس و کرنل به منظور تنظیم یک مرجع عمومی، به بررسی مفاهیم اصلی، تعریف اصطلاحات واحد، ارائه الگوریتم‌های مناسب و بررسی خصوصیات منحنی‌های IDA برای هر دو حالت سازه‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی پرداختند. به علاوه تکنیک‌های خلاصه‌سازی مطالعات IDA چند رکوردی را مورد بحث قرار داده و در نهایت در چهارچوب مهندسی زلزله

بر اساس عملکرد و از دیدگاه IDA تقاضا و ظرفیت را تخمین زدند [۷]. عالم باقری و قائمیان نیز در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی و قوسی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی پرداختند. تحلیل دینامیکی افزایشی سد پایین فلت با ۱۲ رکورد زلزله (تنها با مولفه افقی) انجام شد و در نهایت با معرفی بیشینه تغییر مکان تاج سد به عنوان شاخص آسیب، سطوح مختلف عملکرد سازه مشخص شد [۸-۱۰]. شیخ زاده شایان و عالم باقری در سال ۱۳۹۷ به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی-قوسی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی پرداختند. تحلیل دینامیکی با استفاده از ۷ رکورد زلزله سه مولفه‌ای که هر یک از رکوردها به ۱۰ سطح از شدت زلزله مقیاس شد، انجام شد و جابه‌جایی تاج سد، آسیب کششی بدنه سد و انرژی تلف شده ناشی از خرابی کششی به عنوان پارامتر آسیب در نظر گرفته شده‌اند. همچنین با استفاده از نتایج حاصل از منحنی‌های IDA، حالات حدی مختلف عملکرد سازه سد معرفی شده است [۱۱]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی شکنندگی لرزه‌ای سدهای قوسی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی سیستم‌های سد-مخزن-پی پرداختند که در آن پی به صورت نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته شد و باز شدن درزهای انقباضی و ترک خوردگی بتن سد به عنوان پارامتر آسیب معرفی شدند. در این تحلیل سد داگانشان با ارتفاع ۲۱۰ متر در جنوب غربی چین به عنوان مدل در نظر گرفته شد. پانصد تحلیل آسیب غیرخطی با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو با در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام شد. سه حالت حدی، یعنی آسیب جزئی، آسیب متوسط و آسیب شدید با توجه به توزیع آسیب پیشنهاد شدند و منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای نیز با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی استخراج شدند. نتایج تحلیل نشان داد که وقتی عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شود، سد ممکن است در زلزله‌های قوی به شدت آسیب ببیند [۱۲]. چن و همکاران در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی عملکرد سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی پرداختند. تحلیل دینامیکی افزایشی سد بتنی وزنی جینانچیاو از نوع بتن غلتکی تحت اثر شتاب‌های مختلف ۱۷ رکورد زلزله انجام شد و در نتیجه مکان خرابی‌ها که عمدتاً در قسمت شیب سد، مرز بین لایه غلتان، محل اتصال بین سد و پی و بالای راهرو بود، مشخص شد [۱۳]. سون و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی تونل‌های قوسی هیدرولیک تحت امواج P با زوایای ورودی دلخواه پرداختند. سیستم اندرکنش سیال-سازه-پی بر اساس روش اوپلر-لاگرانژی در نظر گرفته شد. نتایج عددی نشان می‌دهد که زاویه ورودی امواج P تأثیر زیادی بر شاخص جابه‌جایی و درجه آسیب تونل قوسی هیدرولیکی دارد [۱۴]. محمودی و

۲-۲- میزان شدت زلزله (IM)

در این تحقیق شتاب طیفی در دوره تناوب مود اصلی با میرایی ۵٪ $(S_a(T_1, 5\%))$ ، به عنوان IM در منحنی‌های IDA در نظر گرفته شد. بر این اساس با تقسیم مقادیر شتاب مولفه طولی، رکورد زلزله بر مقدار شتاب طیفی مود اول با میرایی ۵٪ مولفه افقی همان رکورد، مقادیر شتاب مقیاس شدند. سپس با انتخاب گام افزایش سطح شدت زلزله به مقدار $g/1$ هفت سطح از شدت زلزله از مقدار $g/1$ تا $g/7$ تولید شد.

۲-۳- میزان خرابی (DM)

DM، میزان تقاضای مهندسی بر روی منحنی IDA را نشان می‌دهد. بر این اساس، ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آگیر، درصد خرابی (بتن) المان‌های بدنه برج آگیر و ماکزیمم تنش کششی میلگردها (بیشترین تنش کششی ایجاد شده در میلگردها در سطوح مختلف زلزله) به عنوان DM در منحنی‌های IDA انتخاب شده است. به منظور محاسبه درصد خرابی المان‌ها بدنه برج (بتن) شاخص خرابی به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \frac{\sum D_e V_e}{\sum V_e} \quad (1)$$

که در آن D_e متغیر خرابی کششی المان e و V_e حجم المان e می‌باشد. این شاخص که میانگین وزنی خرابی اعمال شده به بدنه برج آگیر می‌باشد، می‌تواند بر روی کل بدنه و یا به صورت موضعی بر روی قسمت‌های مستعد آسیب دیدگی تعریف شود.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، نقطه a در سه حالت مختلف برای بررسی جابه‌جایی بالای برج آگیر استفاده شده است.

۳- سطوح عملکرد لرزه‌ای

سطوح عملکرد لرزه‌ای در سطوح مختلف لرزه‌ای برای برج‌های آگیر، جزء مهمی از روش طراحی بر اساس عملکرد است. با توجه به اینکه ایمنی یا به عبارتی دیگر میزان تقاضا و ظرفیت در سازه‌ها متفاوت می‌باشد. بر این اساس ۴ سطح عملکرد برای برج‌های آگیر طبق عملکرد لرزه‌ای سازه‌های هیدرولیکی مختلف در زلزله‌های گذشته [۱۷] که در شکل ۲ نشان داده شده است به شرح زیر تعریف شد:

همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سدهای مواد سیمانی با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی پرداختند. برای این منظور سد توبتسو در ژاپن تحت ۱۷ رکورد زلزله با سطح شدت مختلف قرار گرفت و تحلیل گشت. بر اساس نتایج حاصل از منحنی‌های IDA سه حالت حدی برای سد تعریف شد و منحنی‌های شکنندگی برای سد توبتسو بر اساس نتایج IDA استخراج شد. نتایج نشان داد که تمرکز تنش در بدنه سد به ویژه در پاشنه و گردن ناچیز است. همچنین، نتایج نشان داد که تنش‌های فشاری ایجاد شده در بدنه سد بسیار کمتر از مقاومت فشاری ماده است [۱۵]. تیدکا و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی تاثیر فرکانس زلزله و انعطاف‌پذیری پی بر عملکرد سیستم سد-پی-مخزن کوینا پرداختند. در این تحلیل مدل آسیب پلاستیک (پلاستیسیته خرابی) برای نشان دادن رفتار غیرخطی بتن سد استفاده شد و پی به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شد. طول ترک و انرژی تلف شده، برای ارزیابی عملکرد سیستم سد-پی-مخزن به عنوان پارامترهای آسیب در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که انعطاف‌پذیری پی تاثیر زیادی بر عملکرد سد دارد. علاوه بر این، فرکانس زلزله تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای سد در مقایسه با شدت و مدت زمان زلزله دارد [۱۶]. بنابراین، برای بررسی عملکرد مناسب برج‌های آگیر پس از یک زلزله بزرگ، مناسب است که IDA ارائه شود تا ظرفیت لرزه‌ای برج‌های آگیر به طور کامل تعیین گردد. در این تحقیق، به منظور بررسی ارزیابی عملکرد برج‌های آگیر، مدل المان محدود سه بعدی برج آگیر سد بریونز در سه حالت متمایز به صورت برج آگیر به تنهایی، برج آگیر با حضور آب پیرامونی و برج آگیر با حضور آب پیرامونی و آب داخل برج آگیر مدل شد. سپس پاسخ لرزه‌ای سازه در سه حالت مختلف تحت اثر ۱۲ رکورد زلزله که هر یک به ۷ سطح از شدت زلزله مقیاس گشت، با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی بررسی شده و نتایج در قالب منحنی‌های IDA ارائه شده‌اند.

۲- ارزیابی عملکرد بر اساس روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

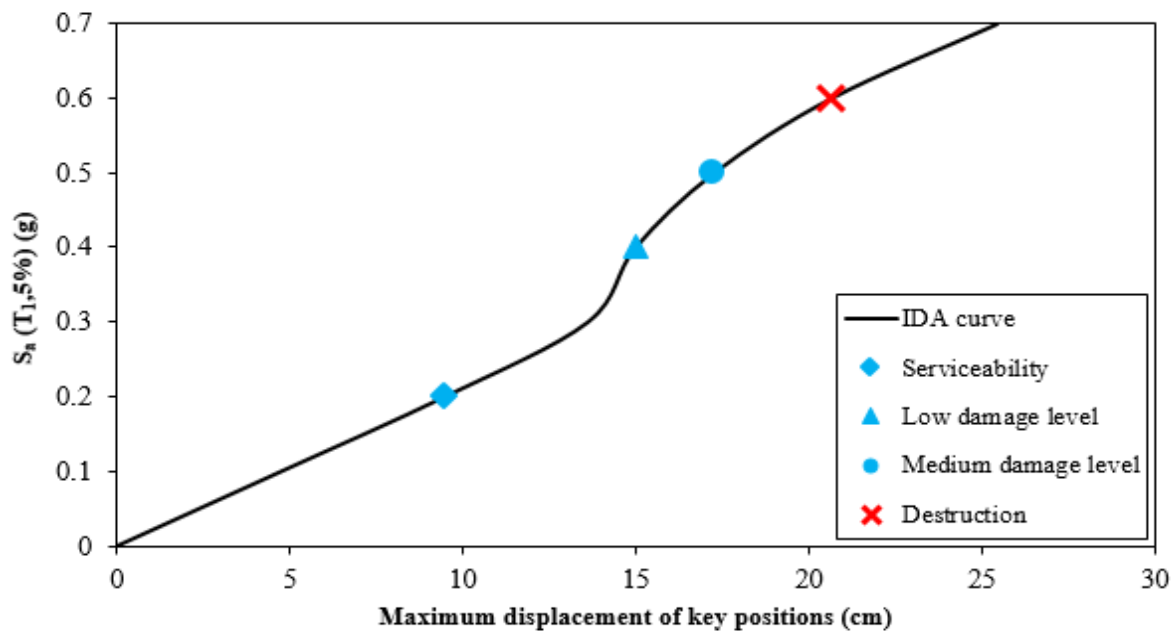
۲-۱- روش IDA

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی IDA، شامل تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های زلزله است و این شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای مقیاس شده‌اند که بتوانند محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را تحت پوشش قرار دهند. هدف اصلی این روش به دست آوردن پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف شدت زلزله می‌باشد و نتایج این تحلیل به شکل منحنی‌های IDA ارائه می‌گردد.



شکل ۱. نقطه انتخابی برای سنجش جابه‌جایی بالای برج آبگیر

Fig. 1. The selected point for measuring the displacement at top of intake tower



شکل ۲. منحنی ظرفیت (نقاط حدی لرزه‌ای در منحنی IDA)

Fig. 2. Capacity curve (seismic limit state points in IDA curve)

$$p = -k_f(x, \theta_i) \frac{\partial}{\partial x} u^f \quad (3)$$

که در آن k_f مدول بالک سیال است [۱۱].

۵- فرمولاسیون اجزای محدود سیستم برج آبگیر-مخزن

به طور کلی، اندرکنش سازه-مخزن به وسیله دو دسته معادلات دیفرانسیل همبسته مرتبه دوم بیان می‌شود. معادلات سازه و مخزن می‌تواند به شکل زیر نوشته شوند:

$$\begin{aligned} [M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + [K][U] &= \{f_1\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\} \\ \{F_1\} + [Q]\{P\} & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [G][\ddot{P}] + [C'][\dot{P}] + [K']\{P\} &= \{F\} - \rho[Q]^T(\{\ddot{U}\} + \{\ddot{U}_g\}) \\ \{F_2\} - \rho[Q]^T\{\ddot{U}\} & \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، $[G]$ ، $[C']$ و $[K']$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی مخزن می‌باشند. $\{f_1\}$ بردار نیروهای بدنه‌ای و هیدرواستاتیک، و $\{U\}$ و $\{P\}$ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی سازه و فشارهای هیدرودینامیکی مخزن می‌باشند. \ddot{U}_g بردار شتاب زمین و ρ چگالی آب می‌باشد [۱۸].

۶- اعتبارسنجی

در شروع کار نتایج حاصل از تحلیل برج آبگیر سد بریونز مدل شده در نرم‌افزار آباکوس با نتایج موجود از کار گویال و چوپرا در مرجع [۱۹] که با فرتن استخراج شد است مقایسه شده‌اند تا صحت مدل‌سازی و نتایج استخراجی از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گیرد. برج آبگیر با هندسه مشخص که در شکل ۷ نشان داده شده است در برنامه آباکوس مدل‌سازی شد. مشخصات مصالح بتن عبارتند از چگالی ۲۴۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ اولیه ۳۱ گیگاپاسکال و نسبت پواسن ۰/۱۷. برج آبگیر روی

۱- قابلیت بهره‌برداری: این دوره شامل زمانی است که برج آبگیر رفتار کاملاً خطی داشته و هیچ‌گونه ترک و آسیب جدی در سازه مشاهده نمی‌شود. این دوره با شروع اولین ترک جدی که معادل تسلیم اولیه در نظر گرفته شده، به پایان می‌رسد.

۲- سطح آسیب کم: در این سطح آسیب‌ها شامل ترک‌ها با باز شدگی‌های زیاد و خورد شدگی بتن و یا له شدگی فولاد در بعضی نقاط می‌باشد. این دوره با شروع اولین ترک جدی که در انتهای دوره عملکرد قبل رخ می‌دهد، آغاز شده و توسعه آسیب در آن می‌تواند در حدی باشد که یک ترک سراسری در مقطع برج آبگیر ایجاد شود و حدود ۱۰٪ از حجم المان‌های بدنه برج آبگیر خراب شوند.

۳- سطح آسیب متوسط (تعمیرپذیر): در این سطح خرابی‌ها آسیب‌ها شامل تغییر هندسه سازه، ورود آسیب زیاد به اعضای باربر و آسیب به لوازم می‌باشد. این دوره پس از وقوع ترک سراسری در برج آبگیر آغاز می‌شود و با گسترش و نفوذ سایر ترک‌ها در بدنه برج آبگیر، تا زمانی ادامه می‌یابد که حدود ۳۰٪ درصد از حجم المان‌های بدنه برج آبگیر آسیب ببینند.

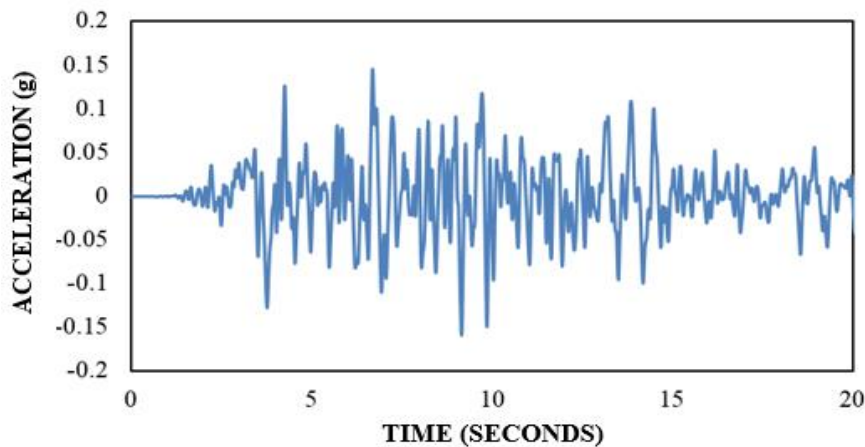
۴- سطح آسیب زیاد (انهدام): در این سطح آسیب‌ها شامل انهدام اعضای باربر قائم، خرابی شدید بتن و تسلیم شدن فولاد در بعضی نواحی می‌شود. در فاصله بین آستانه انهدام کلی و تعمیرپذیری برج آبگیر که معادل انهدام نهایی سازه می‌باشد، ترک‌ها به صورت گسترده در بدنه برج آبگیر ایجاد می‌شوند و حدود ۵۰٪ المان‌های بدنه برج آبگیر آسیب جدی می‌بینند.

۴- معادلات آکوستیک

معادله تعادل برای حرکات کوچک ذرات یک سیال تراکم‌پذیر و آدیباتیک که اتلاف مومنتم در آن وابسته به سرعت است به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۱]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma(x, \theta_i) \dot{u}^f + \rho_f(x, \theta_i) \ddot{u}^f = 0 \quad (2)$$

که در آن ρ اضافه فشار در سیال (فشار افزون بر فشار استاتیک)، x موقعیت مکانی ذره سیال، \dot{u}^f سرعت ذره سیال، \ddot{u}^f شتاب ذره سیال، ρ_f چگالی سیال، γ دراگ حجمی (نیرو در واحد حجم در سرعت) و θ_i متغیرهای مستقلی مثل دما، رطوبت هوا، شوری آب که γ و ρ_f می‌تواند به آن وابسته باشد، هستند. معادله دالامبر بدون عبارت مربوط به شتاب انتقالی نوشته شده و با فرض سیالی لزج، خطی و تراکم‌پذیر داریم:



شکل ۳. طیف تاریخچه زمانی شتاب زلزله کرن کانتی

Fig. 3. Ground motion recorded at Kern county

گام‌های بارگذاری شامل دو گام بارگذاری استاتیکی و دینامیکی است. در گام بارگذاری استاتیکی کف برج آبیگر بسته است و بار وزن و هیدرواستاتیک به برج آبیگر اعمال می‌شوند. در تحلیل دینامیکی، برج آبیگر تحت افزایش بار پله‌ی جانبی به شکل مثلثی قرار می‌گیرد تا سازه به مرز فروپاشی برسد. در شکل ۵-پ جهت اعمال بار جانبی نمایش داده شده است. همچنین با توجه به شکل ۵-ت برج آبیگر به المان‌های از نوع المان سه بعدی تنش/جاب‌جایی هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته و میلگردها به المان‌های خرابی دو گره‌ای تقسیم شدند.

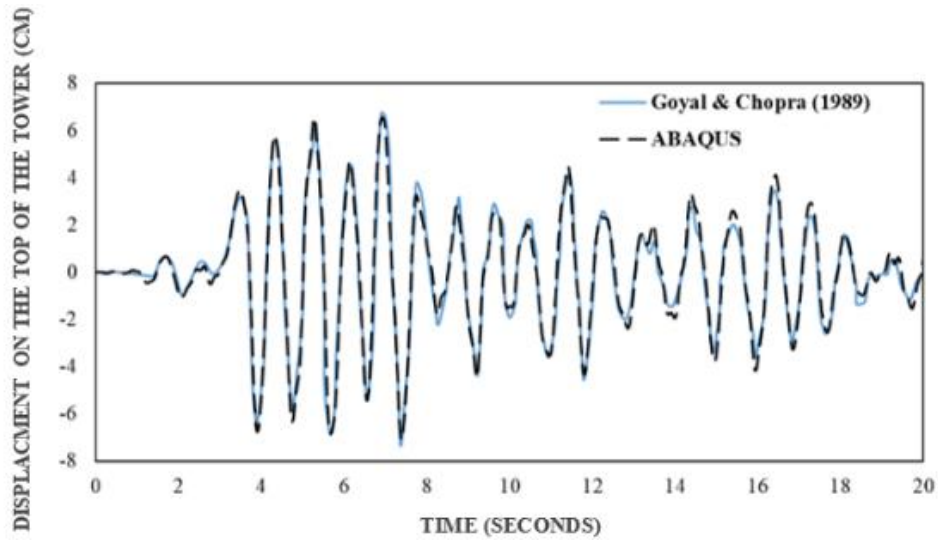
منحنی ظرفیت حاصل از سیستم برج آبیگر مدل شده در نرم‌افزار آباکوس با نتیجه حاصل از نرم‌افزار SAP2000 در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در قسمت خطی منحنی ظرفیت به دلیل اینکه تنها پارامتر موثر در مقاومت سازه مدول الاستیسیته است، نتایج دو برنامه در این ناحیه با همدیگر تطابق دارند اما با شروع اولین ترک و غیرخطی شدن المان‌ها با توجه به اینکه خصوصیات غیرخطی بتن و فولاد با آنچه که در آیین‌نامه مهندسی ارتش آمریکا در نظر گرفته شده است متفاوت است، روند منحنی ظرفیت در ناحیه غیرخطی دو برنامه با هم اختلاف دارد. با این حال قرابت مناسبی در هر دو ناحیه خطی و غیرخطی بین نتایج آباکوس و نتایج آیین‌نامه مهندسی ارتش آمریکا مشاهده می‌شود.

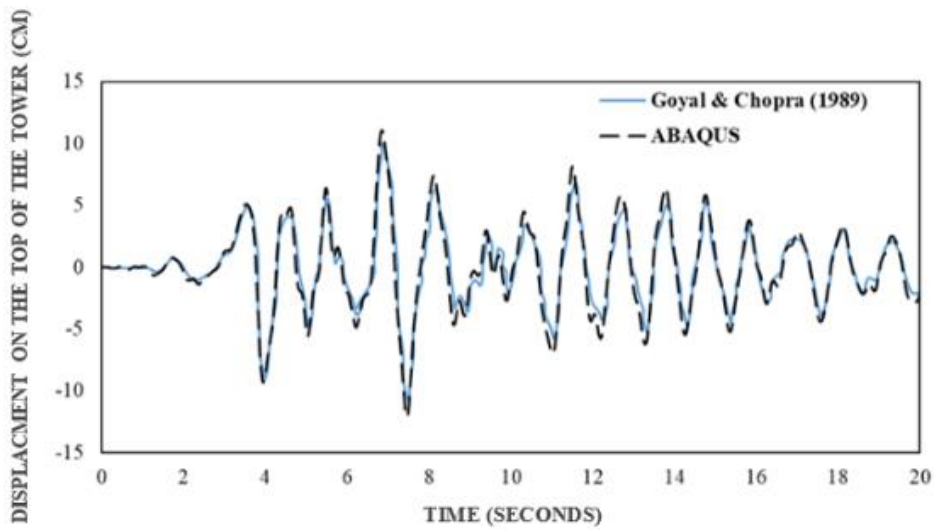
پی صلب بدون جرم با وزن مخصوص ۲۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون ۰/۳۳ قرار دارد. برج بریونز تحت مولفه افقی رکورد زمین‌لرزه کرن کانتی مطابق شکل ۳ قرار داده شد و پاسخ برج تحت زلزله مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سیستم برج آبیگر به صورت تاریخچه زمانی جابه‌جایی نسبی افقی بالای برج آبیگر نسبت به کف سازه برج در حالت‌های برج آبیگر تنها، برج آبیگر-مخزن، برج آبیگر-آب داخل و برج آبیگر-پی صلب-مخزن-آب داخل تحت مولفه طولی زلزله کرن کانتی، استخراج و با نتایج گویال و چوپرا در شکل ۴ مقایسه شده‌اند.

همچنین مدل سه بعدی برج آبیگر مورد مطالعه در آیین‌نامه مهندسی ارتش آمریکا [۲۰] مطابق با مشخصاتی که در شکل ۵-الف آورده شده است با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل شد. تا نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی سیستم برج آبیگر در نرم‌افزار آباکوس با نتایج آیین‌نامه که با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 محاسبه شده است مقایسه گردد. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود پایین‌ترین بلوک برج آبیگر با استفاده از دو ردیف میلگرد طولی مسلح شده است.

مشخصات الاستیک مصالح مدل غیرخطی در جدول ۱ آورده شده است. به توجه به مشخص نبودن رفتار غیرخطی بتن و فولاد در منبع ذکر شده برای رفتار غیرخطی بتن و میلگردها رفتاری که در بخش ۷ برای بتن و میلگردها آورده شده است، در نظر گرفته شد.



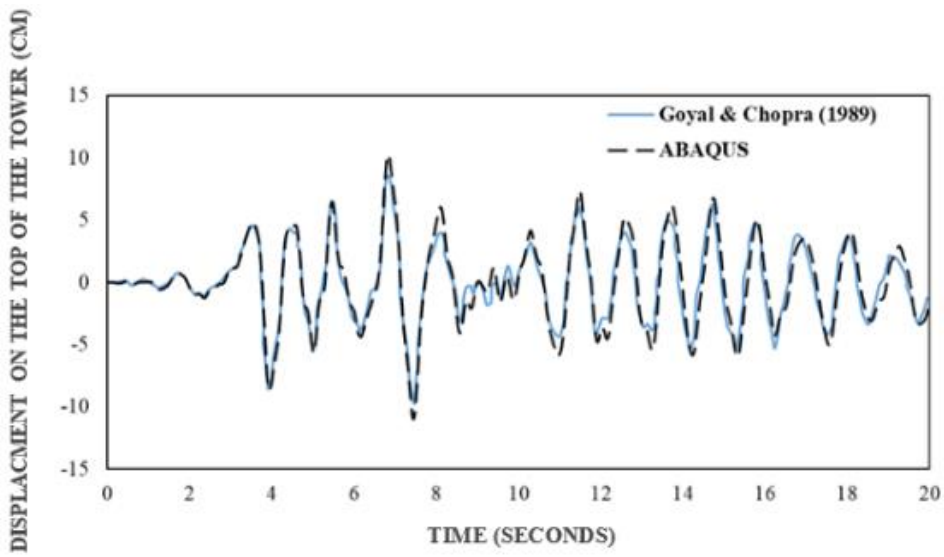
الف (a)



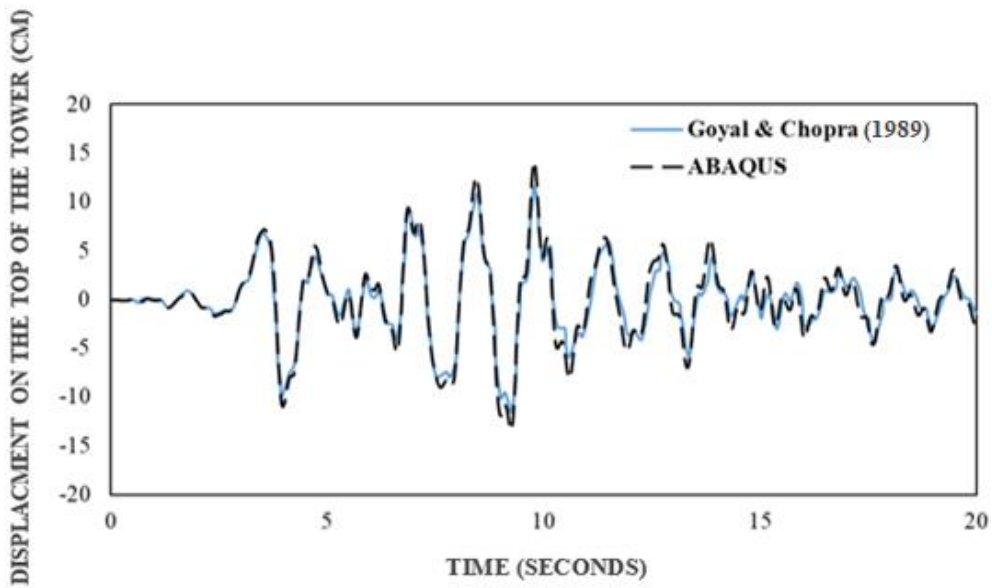
ب (b)

شکل ۴. پاسخ جابه‌جایی بالای برج آبگیر سد بریونز در اثر مولفه طولی زلزله کورن کانتی الف) برج آبگیر تنها ب) برج آبگیر-مخزن پ) برج آبگیر-آب داخل ت) برج آبگیر-پی (پی صلب)-مخزن-آب داخل (ادامه دارد).

Fig. 4. Displacement response at the top of briones dam intake tower due to of taft ground motion. a) Intake tower b) Intake tower-surrounding water c) Intake tower-inside water d) Intake tower-foundation(rigid)- surrounding water-inside water(Continued).



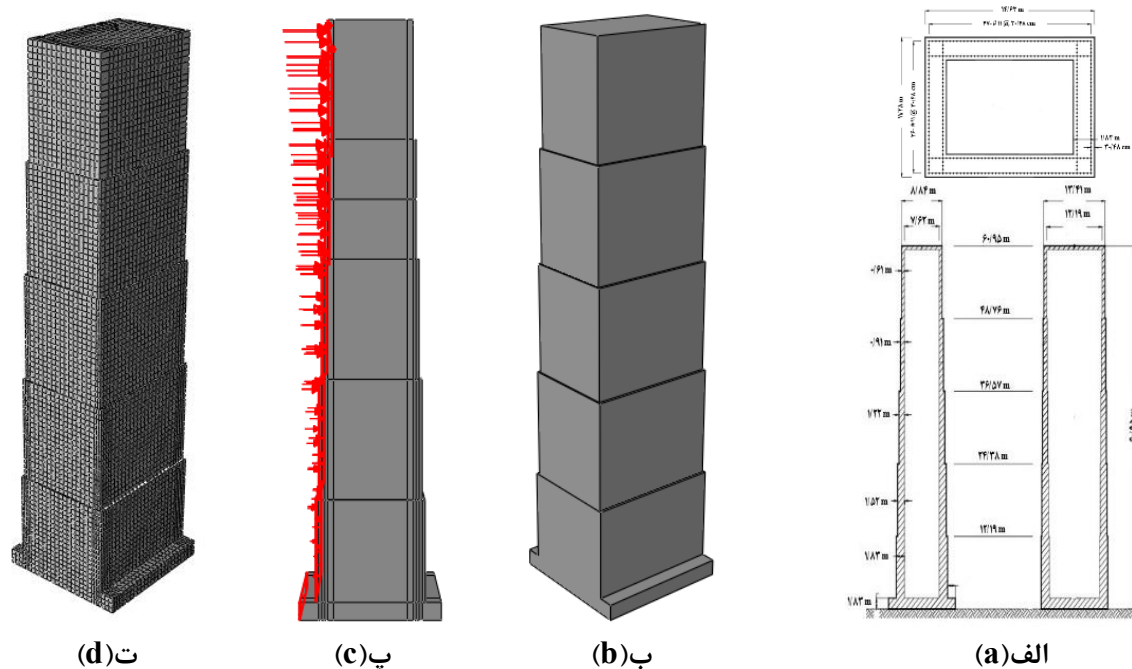
پ (c)



ت (d)

شکل ۴. پاسخ جابه‌جایی بالای برج آبگیر سد بریونز در اثر مولفه طولی زلزله کرن کانتی الف) برج آبگیر تنها ب) برج آبگیر-مخزن پ) برج آبگیر-آب داخل ت) برج آبگیر-پی (پی صلب)-مخزن-آب داخل.

Fig. 4. Displacement response at the top of briones dam intake tower due to of taft ground motion. a) Intake tower b) Intake tower-surrounding water c) Intake tower-inside water d) Intake tower-foundation(rigid)- surrounding water-inside water.



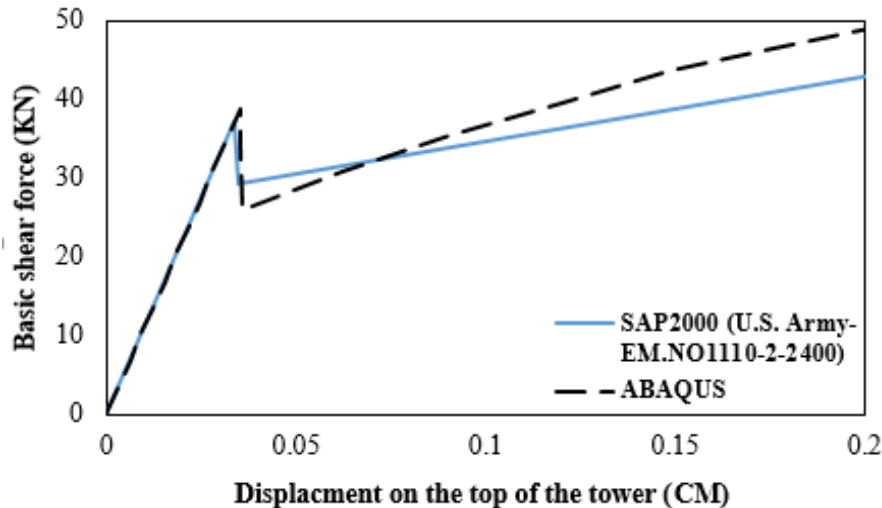
شکل ۵. مدل برج آبگیر غیرخطی (الف) نماهای کناری برج آبگیر و بلان پایین ترین بلوک برج (ب) مدل سه بعدی برج آبگیر مدل سازی شده در آباکوس (پ) جهت اعمال بار جانبی مثلثی به برج آبگیر (ت) مش المان محدود مدل برج آبگیر

Fig. 5. Nonlinear intake tower model. a) The side views of the intake tower and the plan of the base block of the tower b) Intake tower modeled in Abacus c) Triangular lateral load applied to the intake tower d) Finite element mesh of intake tower model

جدول ۱. مشخصات ساختار الاستیک مصالح

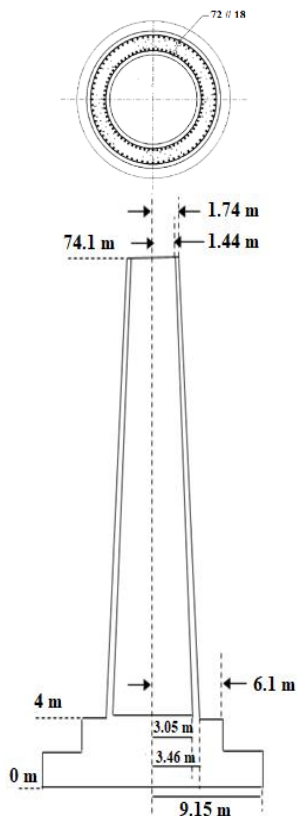
Table 1. Elastic properties of material

سیستم	نوع مصالح	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون (ν)
برج آبگیر	بتن	۲۴۰۳	۲۱/۵	۰/۲
	میلگرد	۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۳



شکل ۶. منحنی ظرفیت برج آبگیر در اثر بار جانبی مثلثی

Fig. 6. Capacity curve of intake tower due to triangular lateral load



شکل ۷. مقطع دو بعدی و پلان برج آبگیر سد بریونز

Fig. 7. Two-dimensional cross-section and plan of the intake tower

۷- مدل سازی عددی

برج آبگیر سد بریونز به عنوان نمونه به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس مدل سازی شد در شکل ۷ مقطع دو بعدی و پلان برج آبگیر سد بریونز نشان داده شده است. برج آبگیر سد بریونز، یک برج آزاد-ایستا از جنس بتن مسلح، با ارتفاع ۷۰/۱ متر و سطح مقطع دایره‌ای که قطر بیرونی آن در پایه برابر ۶/۹۲ متر و ۳/۵۲ متر در بالای برج می‌باشد. ضخامت دیوار برج در پایه برابر ۰/۴۱ متر و در بالای برج برابر ۰/۳۲ متر می‌باشد. برج روی یک تکیه‌گاه توپر بتنی با ارتفاع ۴ متر و قطر ۱۸/۳ متر قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود برج آبگیر با استفاده از دو ردیف میلگرد طولی هم ارتفاع با برج آبگیر مسلح شده است که در هر ردیف ۷۲ عدد میلگرد با قطر ۵/۷ سانتی‌متر متناسب با شیب دیواره‌ها قرار گرفته‌اند.

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای برج آبگیر، سیستم برج آبگیر در سه حالت متمایز همان‌طور که جزئیات مدل‌ها در جدول ۲ بیان شده است، به صورت برج آبگیر به تنهایی، برج آبگیر به همراه آب پیرامونی (مخزن) و برج آبگیر به همراه آب پیرامونی و آب درون سازه در نظر گرفته شد.

مشخصات مصالح بتن عبارتند از چگالی ۲۴۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ اولیه ۳۱ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۱۷. رفتار غیرخطی مصالح بتن بدنه برج آبگیر با استفاده از رویکرد پلاستیسته خرابی بتن

1 Concrete damage plasticity

جدول ۲. حالت‌های مختلف ارزیابی رفتار سیستم برج آبگیر

Table 2. Various conditions for evaluating the behavior of intake tower system

مدل	پی	آب پیرامون	آب داخل
۱	صلب	ندارد	ندارد
۲	صلب	دارد	ندارد
۳	صلب	دارد	دارد

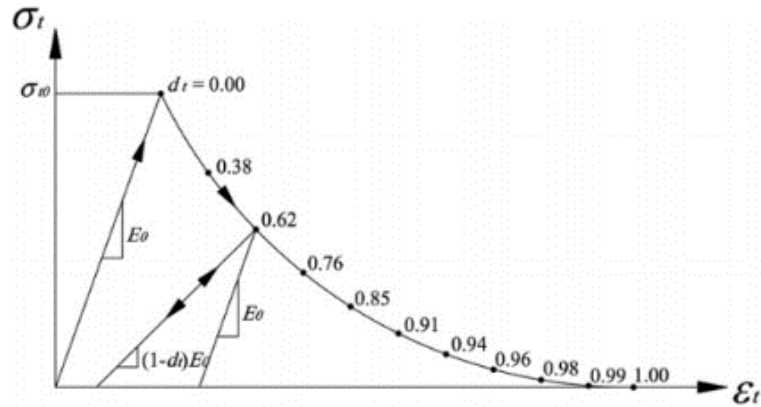
ندارند. شکل ۹ مدل اجزای محدود سیستم در حالت کلی را نشان می‌دهد. شرایط مرزی موجود همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید مرز شماره ۱ در برنامه آباکوس اندرکنش سازه و سیال با استفاده از روش گره زدن، تعریف می‌شود. با توجه به اینکه در اثر تحریک لرزه‌ای افقی به دلیل عدم تحمل برش توسط سیال، فشار هیدرودینامیک در مخزن فقط از طریق تحریک بدنه برج آبگیر ایجاد می‌شود، وجه بیرونی برج آبگیر به عنوان سطح اصلی و سطح تماس سیال با بدنه برج آبگیر به عنوان سطح پیرو انتخاب شده و معادلات مربوط به اندرکنش این دو سطح، حل می‌گردند. همچنین اندرکنش آب داخل برج آبگیر با استفاده از روش گره زدن وجه داخلی برج آبگیر به عنوان سطح اصلی و سطح تماس سیال با وجه داخلی برج آبگیر به عنوان سطح پیرو انتخاب شده و معادلات مربوط به اندرکنش این دو سطح، حل می‌گردند. مرزهای شماره ۲ به طور مستقیم و با صفر قرار دادن مقدار فشار در سطح آزاد، به عنوان یک شرط مرزی از نوع فشار آکوستیک در نرم‌افزار تعریف می‌شود. مرز شماره ۳ به دلیل این که پی صلب در نظر گرفته شده است هیچ گونه شرایط مرزی در این سطح تعریف نمی‌شود. مرز شماره ۴ که کف برج آبگیر می‌باشد زلزله به این ناحیه وارد می‌شود. در مرز شماره ۵ به منظور اعمال شرط مرزی انتهایی دور مخزن در نرم‌افزار آباکوس برای این مرز یک سطح از نوع غیرانعکاسی و صفحه‌ای در نظر گرفته شده است. مرز شماره ۶ اندرکنش میان آرماتور و سازه است که با استفاده از روش گره زدن معادلات مربوطه حل می‌گردد. در مدل بتن مسلح، بتن و میلگرد به ترتیب با المان‌های جامد سه بعدی و المان خرابایی شبیه‌سازی شدند. برای هر میلگرد برنامه آباکوس تقاطع بین المان‌های سه بعدی و میلگرد را پیدا می‌کند و گره‌هایی را در این محل‌ها ایجاد می‌کند. همچنین برنامه آباکوس همانند

مدل‌سازی شده است. در این پژوهش، برای رفتار غیرخطی بتن تنها متغیر خرابی کششی منظور شده و با توجه به این که بتن مقاومت فشاری نسبتاً بالای دارد متغیر خرابی فشاری صفر منظور می‌شود، یا به عبارت دیگر رفتار بتن در فشار خطی فرض شده است. رفتار تنش-کرنش بتن در حالت غیرخطی به همراه مقادیر متناظر خرابی کششی در شکل ۸-الف نشان داده شده است [۸]. رفتار پس از تسلیم، به صورت نرم شونده با کاهش مدول الاستیسیته بتن با یک متغیر خرابی کششی (D) مدل می‌شود. متغیر خرابی کششی تابعی از کرنش‌های غیرخطی بوده و تغییرات آن در شکل ۸-الف نشان داده شده است. مقدار تنش تسلیم بتن در کشش (σ_{t0}) ۲/۹ مگاپاسکال منظور می‌شود.

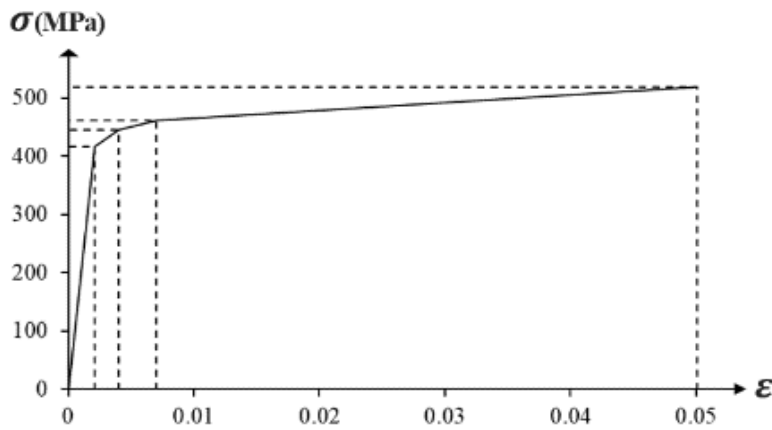
مشخصات مصالح فولاد عبارتند از چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ اولیه ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۴۱۷ مگاپاسکال. رفتار غیرخطی مصالح فولاد با استفاده از رویکرد پلاستیک با سخت شوندهگی ایزوتروپیک مدل‌سازی شده است. رفتار تنش-کرنش فولاد در حالت غیرخطی در شکل ۸-ب نشان داده شده است [۲۱].

مخزن (آب پیرامون) و آب داخل برج آبگیر تا ارتفاع سطح نرمال مخزن و برابر ۶۱/۳ متر با رفتار خطی برای آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول بالک ۲/۲ گیگاپاسکال مدل شده است. همچنین پی به صورت صلب در نظر گرفته شد.

برج آبگیر به المان‌های از نوع المان سه بعدی تنش/جابجایی هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته و میلگردها به المان‌های خرابایی دو گره‌ای تقسیم شدند. همچنین سیال (مخزن و آب داخل برج) از نوع المان آکوستیک سه بعدی هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته در نظر گرفته شد که فقط دارای درجه آزادی فشار بوده و درجات آزادی انتقالی



(الف)



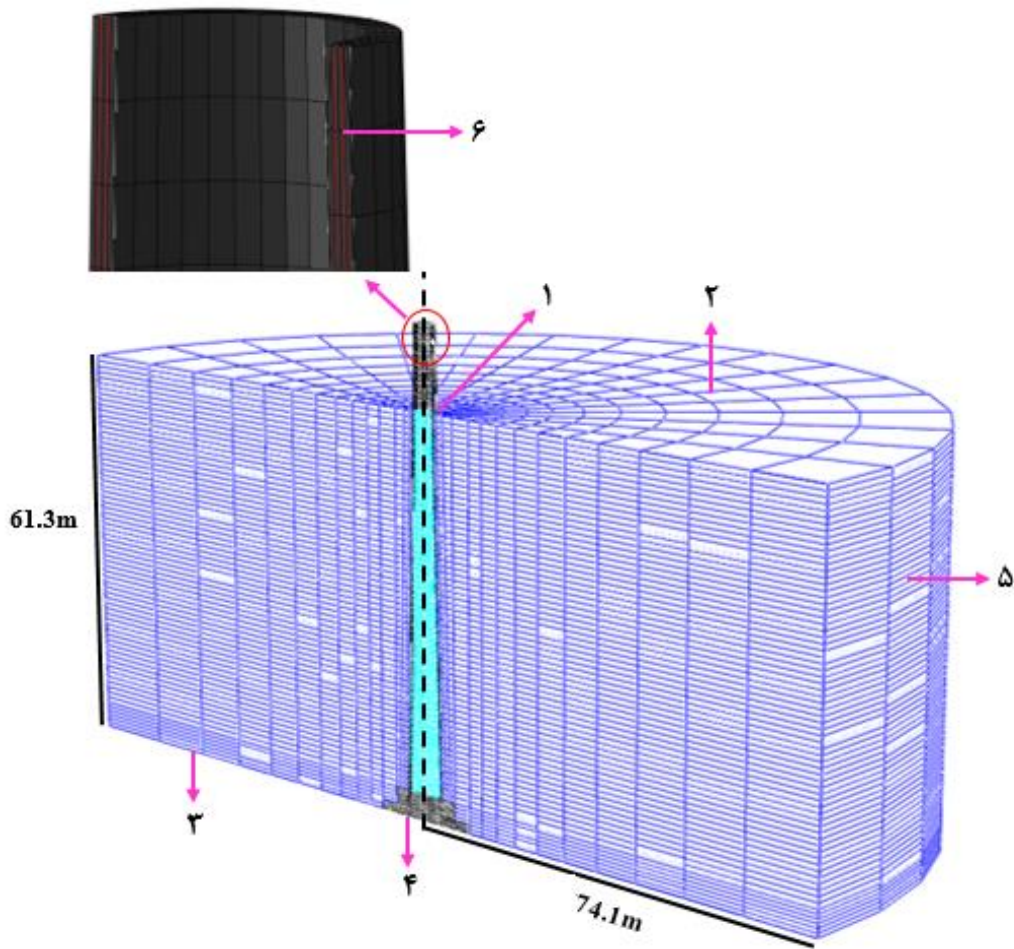
(ب)

شکل ۸. نمودار تنش-کرنش بتن و فولاد (الف) نمودار تنش-کرنش بتن (ب) نمودار تنش-کرنش فولاد

Fig. 8. Considered nonlinear behavior for concrete and steel. a) Concrete b) Steel

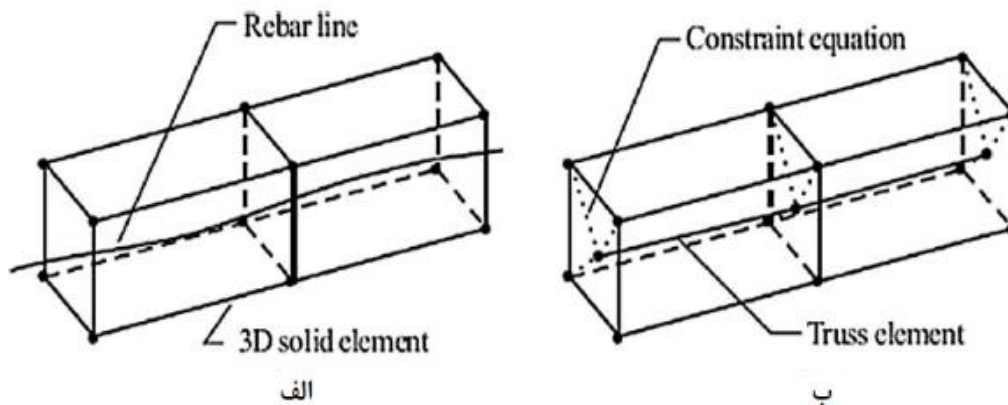
اعمال می‌شود. همچنین در حالت برج آبیگر با حضور مخزن و آب داخل برج آبیگر بار وزن و بار هیدرواستاتیک ناشی از مخزن و آب داخل برج در گام بارگذاری استاتیکی به برج اعمال می‌شود. در تحلیل دینامیکی، در کلیه حالت‌ها مولفه‌ی طولی رکورد زلزله به صورت شرط مرزی از نوع شتاب به کف سازه در جهت X اعمال می‌شود. شکل ۱۱ جهت اعمال شتاب به سازه را نشان می‌دهد. به این منظور در تحقیق حاضر، دوازده رکورد زلزله با توجه به ساختگاه سازه، بزرگای زلزله، فاصله از محل گسل و سرعت موج برشی

شکل ۱۰ بین گره‌های ایجاد شده و سه گره گوشه المان سه بعدی اندرکنش برقرار می‌سازد. فرض بر است که میلگردها، درون بتن هیچ گونه لغزشی ندارند و سخت شوندگی آن‌ها از نوع ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. گام‌های بارگذاری شامل دو گام بارگذاری استاتیکی و دینامیکی است. در حالت برج آبیگر تنها، در گام بارگذاری استاتیکی کف برج آبیگر بسته است و بار وزن به برج آبیگر اعمال می‌شود. اما در حالت برج آبیگر با حضور مخزن علاوه بر بار وزن، بار هیدرواستاتیک ناشی از مخزن نیز به برج آبیگر



شکل ۹. مقطع مدل اجزای محدود سیستم کلی

Fig. 9. Whole finite element mesh



شکل ۱۰. مدل بتن مسلح الف) قبل از تولید فایل داده ب) بعد از تولید فایل داده

Fig. 10. Reinforced concrete model. a) before generation of data file. b) after generation of data file

جدول ۳. رکوردهای زلزله انتخاب شده در تحلیل دینامیکی افزایشی

Table 3. Selected earthquake records

شماره	زلزله	اسم	بزرگا (ریشتر)	فاصله از محل گسل (کیلومتر)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	نوع خاک	بیشینه شتاب
							زمین (g) طولی
۱	Kern County, 1952	KCTAF	۷/۴	۴۱	۳۸۵/۴۳	B	۰/۱۵۲
۲	Kern County, 1952	KCLIN	۷/۴	۳۸/۴	۴۱۵/۱۳	B	۰/۱۴۵
۳	Imperial Valley, 1940	IVELC	۷	۸۳	۲۱۳/۴۴	C	۰/۲۹۵
۴	Imperial Valley, 1979	IVPTS	۶/۵	۱۴/۲	۳۴۸/۶۹	B	۰/۲۰۳
۵	Loma Prieta, 1989	LPAND	۶/۹	۲۱/۴	۴۸۸/۷۷	B	۰/۲۴۳
۶	Loma Prieta, 1989	LPGIL	۶/۹	۱۱/۶	۷۲۹/۶۵	B	۰/۳۵۷
۷	Loma Prieta, 1989	LPSTG	۶/۹	۱۳	۳۸۰/۸۹	B	۰/۳۰۶
۸	Morgan Hill, 1984	MHG06	۶/۲	۱۱/۸	۶۶۳/۳۱	B	۰/۲۵۸
۹	San Fernando, 1971	SFPAS	۶/۶	۳۱/۷	۴۱۵/۱۳	B	۰/۱۱۰
۱۰	San Fernando, 1971	SFPPP	۶/۶	۳۸/۹	۵۲۹/۰۹	B	۰/۱۳۵
۱۱	Northridge, 1994	NRSAN	۶/۷	۳۴/۵	۳۷۹/۴۳	B	۰/۱۱۶
۱۲	Northridge, 1994	NRCOM	۶/۷	۳۴/۸	۳۵۱/۴	C	۰/۱۲۴



شکل ۱۱. جهت اعمال شتاب زلزله به سازه (در جهت x)

Fig. 11. The direction of earthquake acceleration to the structure (in the x direction)

از پایگاه داده PEER¹ انتخاب شدند. بزرگای این رکوردهای زلزله در بازه ۶ تا ۸ در مقیاس ریشتر، فاصله آن‌ها از محل گسل بین ۵ تا ۵۰ کیلومتر و سرعت موج برشی آن‌ها بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. مشخصات رکوردهای زلزله انتخاب شده در جدول ۳ ذکر شده است.

۸- نتایج

نتایج حاصل تحلیل برج آبگیر در سه حالت ذکر شده به طور خلاصه در جدول ۴ آورده شده است. در ادامه نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها در سه حالت مختلف مورد بررسی آورده شده است و در مورد نتایج حاصل بحث شده است.

۸-۱- مدل برج آبگیر تنها

منحنی‌های IDA بیشینه تغییر مکان نسبی بالای برج آبگیر نسبت به کف برج آبگیر، درصد خرابی المان‌های بدنه (بتن) برج آبگیر و ماکزیمم تنش

1 Pacific Earthquake Engineering Research

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل برج آبگیر در حالت‌های مختلف (فقط در سطح شدت ۰/۷ g)

Table 4. The results of the analysis of intake tower in various state (only at the intensity level of 0.7g)

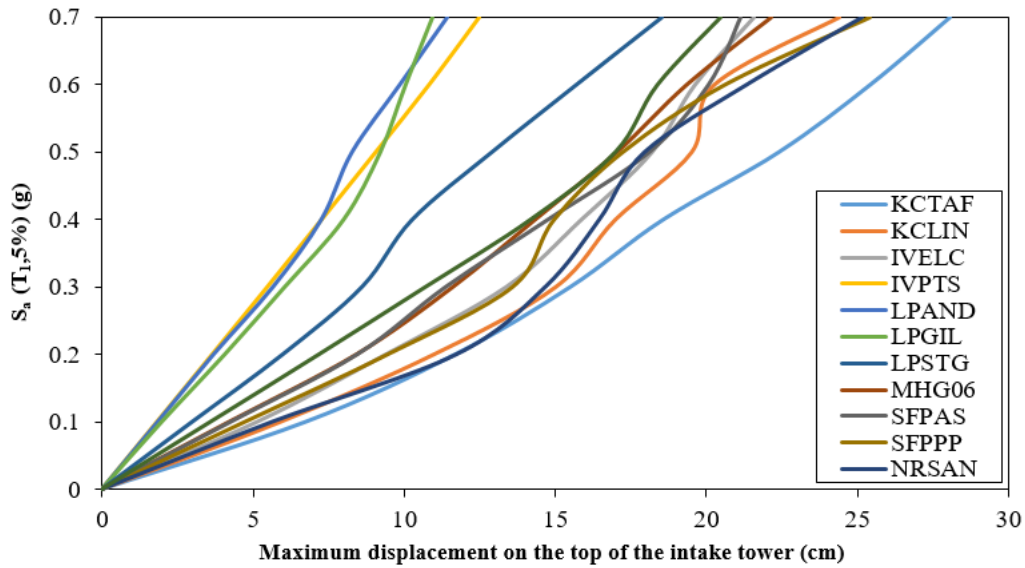
پارامترها حالت‌ها	سطح شدت زلزله	جابه‌جایی بالای برج آبگیر (سانتی‌متر)		خرابی بدنه برج آبگیر (درصد)		ماکزیمم تنش کششی میلگردها (مگاپاسکال)	
		کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
برج آبگیر تنها	۰/۷ g	۱۰/۹۴	۲۸/۱	۱۰۰	۹/۱	۸۹/۶۲	۳۸۴/۶
برج آبگیر-مخزن	۰/۷ g	۹/۹۷	۵۱/۷۴	۴/۱۸	۸۶/۵۶	۱۱۶/۱	۴۱۷/۸
برج آبگیر-مخزن-آب داخل برج آبگیر	۰/۷ g	۱۲/۸۴	۴۰/۰۴	۱۶/۴	۹۹/۱	۱۰۹/۸	۴۱۶/۸

همان‌طور که در شکل ۱۲-پ مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین مقدار ماکزیمم تنش کششی ایجاد شده در میلگردها، متناظر با سطح شدت لرزه ۰/۷ g، به ترتیب ۳۸۴/۶ مگاپاسکال و ۸۹/۶۲ مگاپاسکال می‌باشد. که نشان می‌دهد که میلگردها در تمامی سطوح زلزله‌ها رفتار خطی دارند و تسلیم نمی‌شوند.

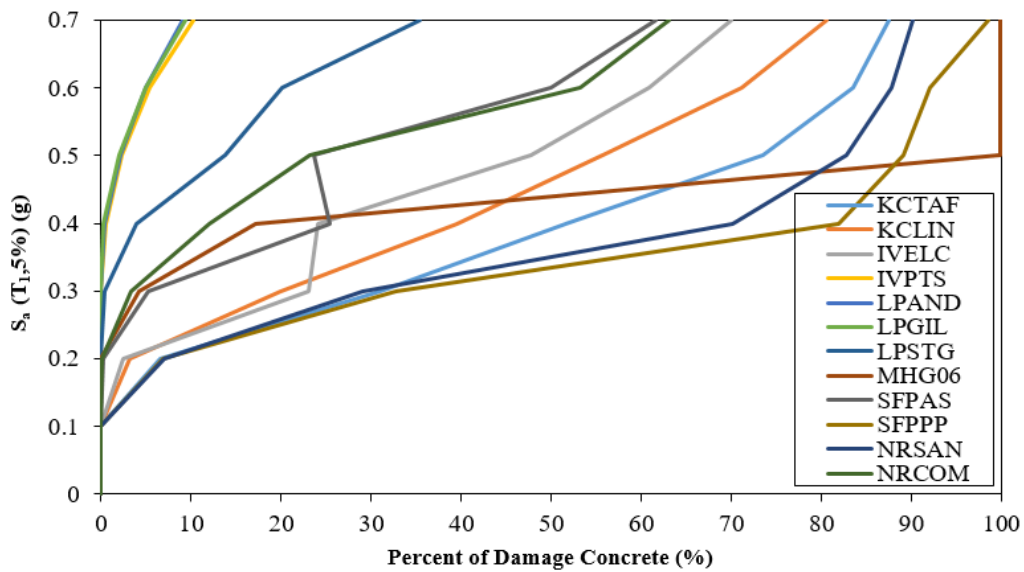
با توجه سطوح عملکرد تعریف شده منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر تنها در شکل ۱۲-ت آورده شده است. با توجه به منحنی ظرفیت تا سطح شدت لرزه ۰/۲ g که ماکزیمم مقدار جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر به میزان ۷/۹ سانتی‌متر است، معادل دوره اول عملکرد سازه (قابلیت بهره‌برداری) می‌باشد. با وقوع اولین ترک‌های جدی در محل اتصال بدنه برج آبگیر به بلوک بتنی توپر، سازه به سطح دوم عملکرد خود (آسیب کم) وارد می‌شود. انتهای این دوره عملکرد که متناظر با سطح شدت زلزله ۰/۴۲ g بوده و مقدار ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر برابر با ۱۳/۷ سانتی‌متر می‌باشد، ترک‌ها تا وقوع ترک‌های سرتاسری در بدنه برج آبگیر پیش رفته‌اند. پس از ایجاد ترک‌های سرتاسری در بدنه برج آبگیر و با افزایش شدت زلزله از سطح ۰/۵۷ g (دوره عملکرد آسیب شدید)، ترک‌ها در سایر قسمت‌های بدنه برج آبگیر گسترش یافته و باعث غیرخطی شدن حدود ۰/۵۰٪ از حجم المان‌های سازه می‌شوند. با افزایش آسیب‌های کششی و ایجاد خرابی در بخش عمده‌ای از بدنه برج آبگیر، سازه از عملکرد خود خارج شده و انهدام نهایی سازه رخ می‌دهد.

کششی میلگردها (بیشترین تنش کششی در میلگردها) تحت دوازده رکورد زلزله انتخابی برای مدل برج آبگیر تنها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در منحنی‌های IDA ارائه شده در شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود، بیشینه و کمینه جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر نسبت به کف برج آبگیر، متناظر با سطح شدت لرزه ۰/۷ g، به ترتیب ۲۸/۱ سانتی‌متر و ۱۰/۹۴ سانتی‌متر می‌باشد. میزان پراکندگی نرمال شده مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در سطوح شدت زلزله ۰/۴ g تا ۰/۷ g در بازه ۰/۲۸٪ تا ۰/۳۰٪ قرار دارد.

منحنی‌های IDA خرابی کششی بدنه برج آبگیر در شکل ۱۲-ب نشان می‌دهند که بیشترین درصد خرابی بدنه برج آبگیر متناظر با سطح شدت لرزه ۰/۷ g، برابر ۱۰۰٪ بدین معنی می‌باشد که حجم کل المان‌های بدنه برج آبگیر خراب شده و کمترین درصد خرابی بدنه برج آبگیر در همین سطح شدت برابر ۹/۱٪ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا سطح شدت زلزله برابر با ۰/۲ g هیچ‌گونه خرابی در بدنه برج آبگیر ایجاد نشده است و اولین خرابی‌ها در این سطح شکل می‌گیرد. غیرخطی شدن المان‌های بدنه برج آبگیر، تقریباً از سطح شدت ۰/۲ g که مقدار متوسط جابه‌جایی نسبی بالای برج برابر با ۷/۹ سانتی‌متر می‌باشد آغاز شده و با افزایش سطح شدت زلزله از سطح مذکور، منحنی‌ها با سرعت بیشتری نسبت به منحنی‌های شکل ۱۲-ب، به سمت گسترش خرابی‌ها ادامه پیدا می‌کنند.



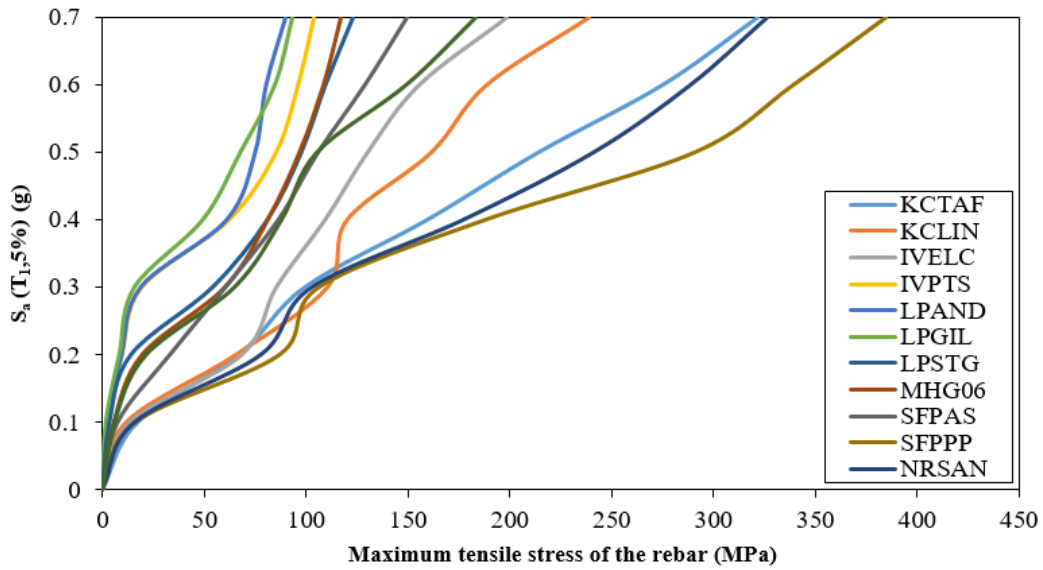
(الف) الف



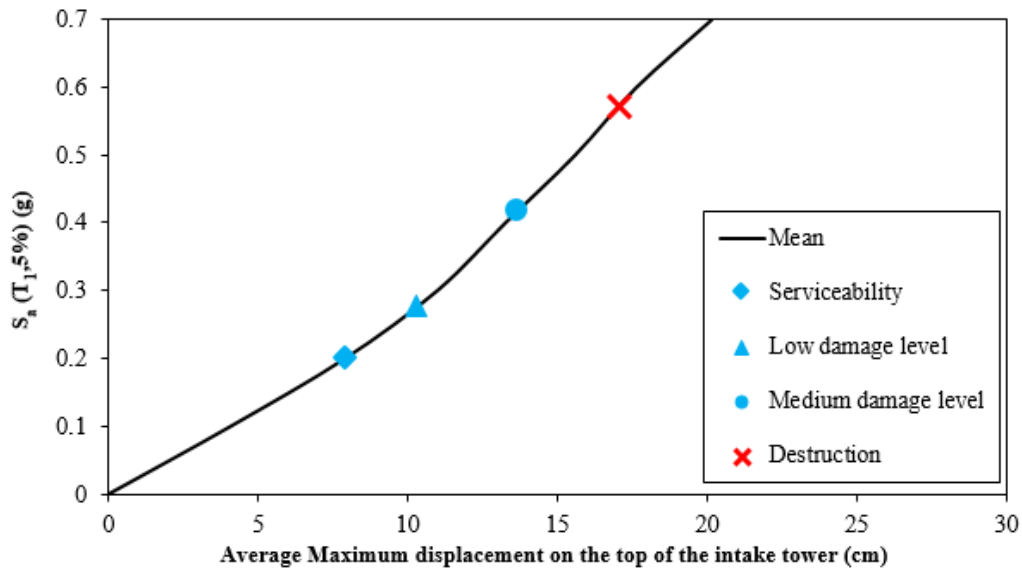
(ب) ب

شکل ۱۲. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر تنها الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر (ادامه دارد)

Fig. 12. IDA curves of various intake tower model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower model(Continued)



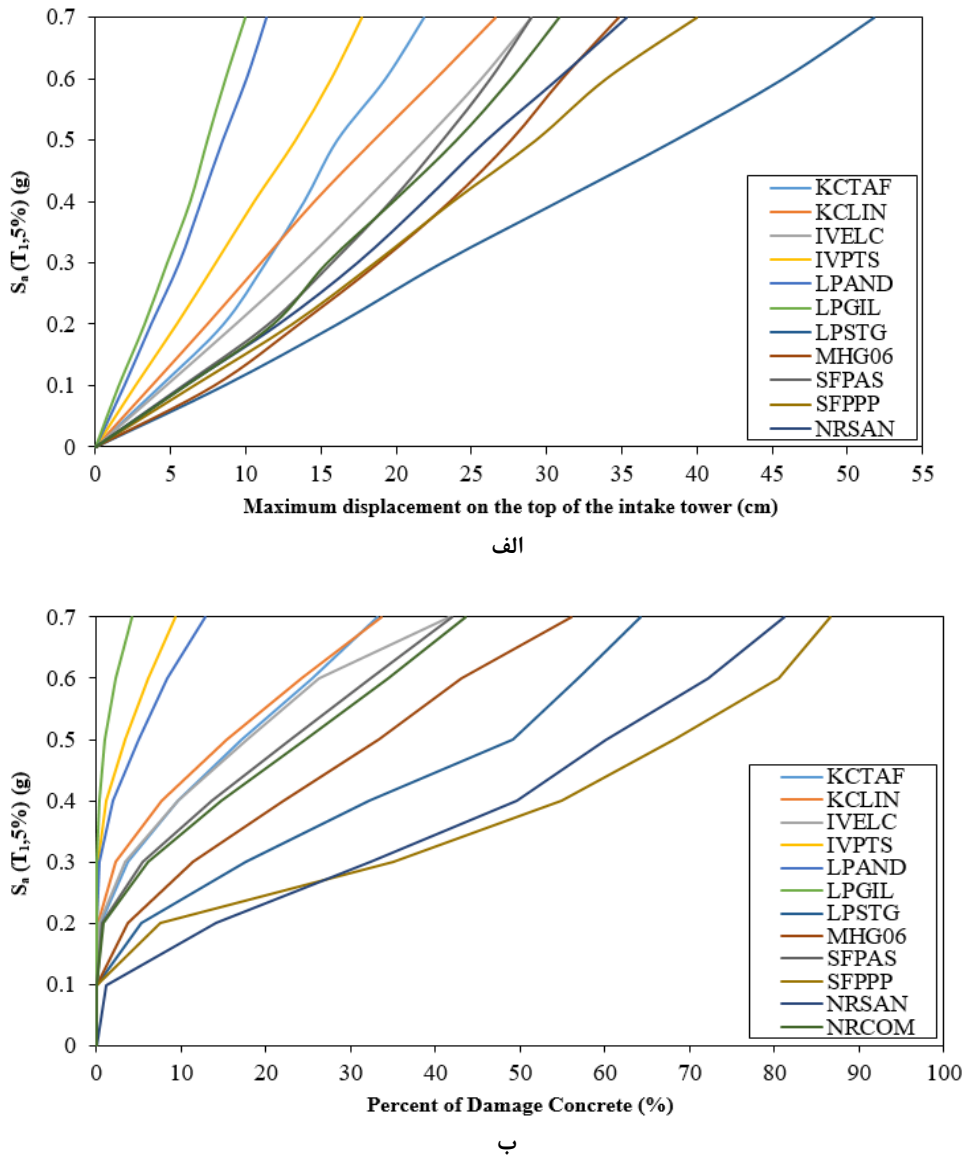
پ(c)



ت(d)

شکل ۱۲. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر تنها الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر.

Fig. 12. IDA curves of various intake tower model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower model.



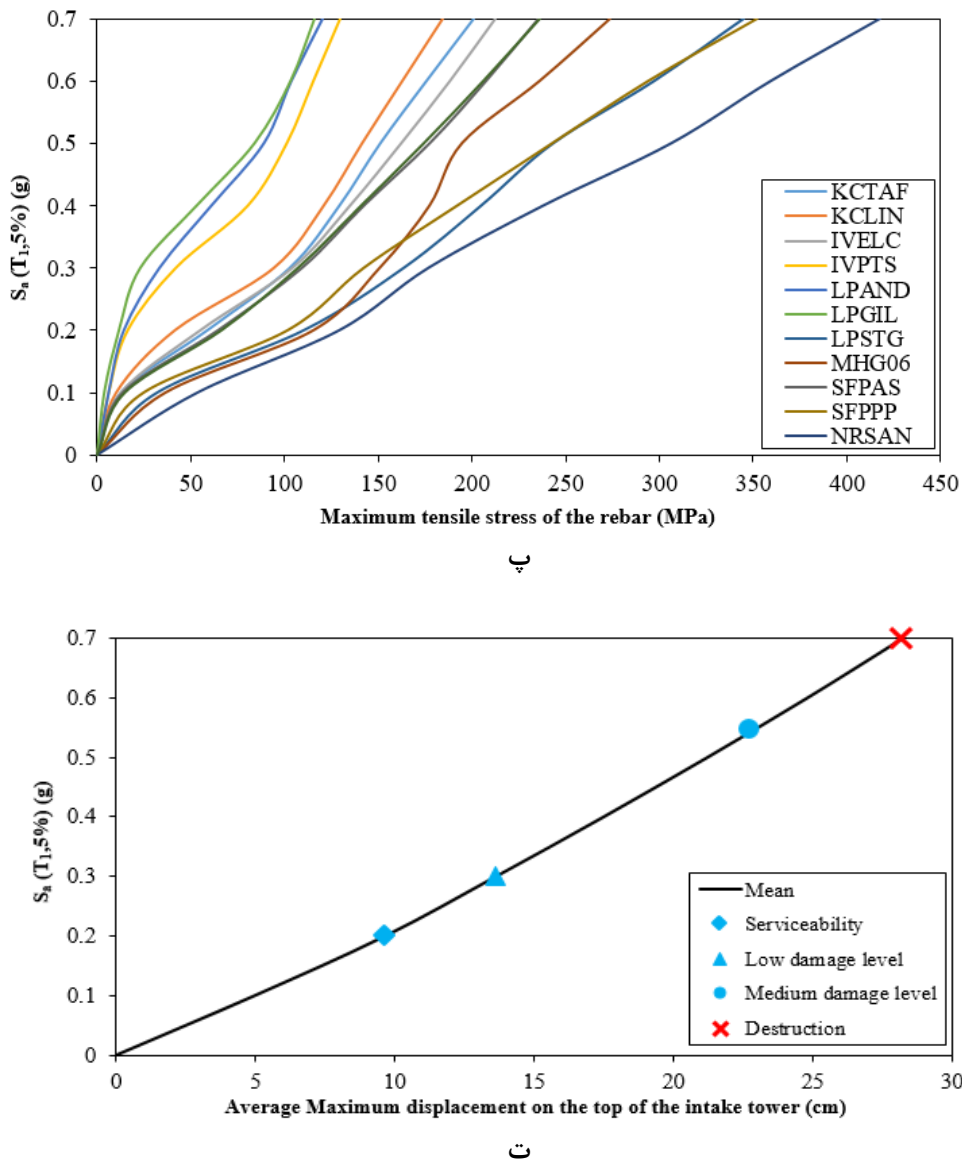
شکل ۱۳. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر-مخزن (الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر (ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر (پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها (ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر-مخزن (ادامه دارد).

Fig. 13. IDA curves of various intake tower-reservoir model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower- reservoir model (Continued).

در سطح شدت زلزله $0.7g$ در این حالت در مقایسه با حالت برج آبگیر تنها تقریباً ۲ برابر شده است. میزان پراکندگی نرمال شده مقادیر جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در این حالت در سطوح شدت زلزله $0.4g$ تا $0.7g$ در بازه 41% تا 42% قرار دارد که مقدار ماکزیمم پراکندگی این پارامتر نسبت به حالت برج آبگیر تنها 40% افزایش یافته است. متوسط مقدار ماکزیمم

۸-۲- مدل برج آبگیر-مخزن

همان‌طور که در منحنی‌های IDA ارائه شده در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، بیشینه و کمینه جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر نسبت به کف برج آبگیر، متناظر با سطح شدت لرزه $0.7g$ ، به ترتیب $51/74$ سانتی‌متر و $9/97$ سانتی‌متر می‌باشد. که مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر



شکل ۱۳. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر-مخزن الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر-مخزن (ادامه دارد).

Fig. 13. IDA curves of various intake tower-reservoir model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower- reservoir model (Continued).

شدت لرزه g ۰/۷، برابر ۸۶/۵۶٪ و کمترین درصد خرابی بدنه برج آبگیر در همین سطح شدت برابر ۴/۱۸٪ می‌باشد. غیرخطی شدن المان‌های بدنه برج آبگیر، همانند مدل برج آبگیر تنها تقریباً از سطح شدت g ۰/۲ که مقدار متوسط جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در این سطح برابر ۹/۶۳ سانتی‌متر است آغاز شده و با افزایش سطح شدت زلزله از سطح مذکور، منحنی‌ها

جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در سطح شتاب طیفی متناظر g ۰/۵، به میزان ۲۱/۱۷ سانتی‌متر گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با مدل قبلی و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۳۶٪ افزایش پیدا کرده است. منحنی‌های IDA خرابی کششی بدنه برج آبگیر در شکل ۱۳-ب نشان می‌دهند که بیشترین درصد خرابی بدنه برج آبگیر متناظر با سطح

۴۲٪ افزایش و نسبت به حالت برج آبیگر-مخزن ۲۹٪ کاهش پیدا کرده است. میزان پراکندگی نرمال شده مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر در این حالت در سطوح شدت زلزله g ۰/۴ تا g ۰/۷ در بازه ۲۸٪ تا ۲۹٪ قرار دارد. همچنین متوسط مقادیر جابه‌جایی نسبی ماکزیمم بالای برج آبیگر در سطح شتاب طیفی متناظر g ۰/۵، به میزان ۲۰/۱۱ سانتی‌متر گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با حالت برج آبیگر تنها و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۲۹٪ افزایش و در مقایسه با حالت برج آبیگر-مخزن در همین سطح شدت زلزله ۸٪ کاهش پیدا کرده است.

منحنی‌های IDA خرابی کششی بدنه برج آبیگر در شکل ۱۴-ب نشان می‌دهند که بیشترین درصد خرابی بدنه برج آبیگر متناظر با سطح شدت لرزه g ۰/۷، برابر ۹۹/۱٪ و کمترین درصد خرابی بدنه برج آبیگر در همین سطح شدت برابر ۱۶/۴٪ می‌باشد. غیرخطی شدن المان‌های بدنه برج آبیگر، از سطح شدت g ۰/۱ که مقدار متوسط جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر برابر ۵/۴۷ سانتی‌متر می‌باشد، شروع شده که در دو حالت قبل شروع خرابی از سطح شدت زلزله g ۰/۲ بود. مقدار متوسط مقادیر خرابی بدنه برج آبیگر در سطح شتاب زلزله g ۰/۵، به میزان ۴۵/۵۴٪ گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با مدل برج آبیگر تنها و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۶٪ افزایش و نسبت به مدل برج آبیگر-مخزن نیز به میزان ۷۲٪ افزایش پیدا کرده است.

با توجه به شکل ۱۴-پ مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین مقدار ماکزیمم تنش کششی ایجاد شده در میلگردها، متناظر با سطح شدت لرزه g ۰/۷، به ترتیب ۴۱۶/۸ مگاپاسکال و ۱۰۹/۸ مگاپاسکال می‌باشد که نشان می‌دهد مقادیر ماکزیمم تنش کششی موجود در میلگردها نسبت به مدل برج آبیگر تنها افزایش و نسبت به مدل برج آبیگر-مخزن مقدار کمی کاهش پیدا کرده است. بیشترین مقدار ماکزیمم تنش کششی در میلگردها در سطح شدت g ۰/۷ مربوط به زلزله ۱۹۷۲، SFPPP (San Fernando) می‌باشد. همچنین مقدار متوسط مقادیر ماکزیمم تنش کششی ایجاد شده در میلگردها در سطح شتاب زلزله g ۰/۵، به میزان ۱۶۶/۳۳ مگاپاسکال گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با مدل برج آبیگر تنها و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۱۹٪ افزایش و نسبت به مدل برج آبیگر-مخزن ۳٪ کاهش پیدا کرده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۴-ت مشاهده می‌گردد، تسلیم اولیه سازه که با وقوع اولین ترک کششی در بدنه برج آبیگر شکل می‌گیرد در سطح شتاب طیفی g ۰/۱ رخ داده است و متناظر با جابه‌جایی نسبی بالای برج

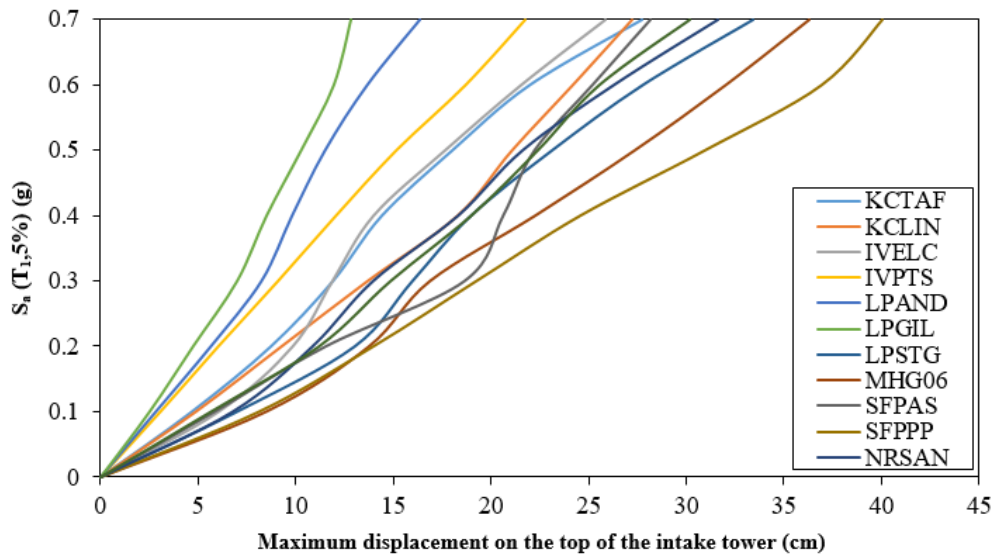
با سرعت بیشتری نسبت به منحنی‌های شکل ۱۳-ب به سمت گسترش خرابی‌ها ادامه پیدا می‌کنند. مقدار متوسط جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر در مدل برج آبیگر-مخزن نسبت به مدل برج آبیگر تنها در شروع خرابی‌ها به میزان ۲۲٪ افزایش پیدا کرده است. مقدار متوسط مقادیر خرابی بدنه برج آبیگر در سطح شتاب زلزله g ۰/۵، به میزان ۲۶/۵٪ گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با مدل قبلی و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۶۲٪ کاهش پیدا کرده است.

با توجه به شکل ۳-پ، بیشترین و کمترین مقدار ماکزیمم تنش کششی ایجاد شده در میلگردها، متناظر با سطح شدت لرزه g ۰/۷، به ترتیب ۴۱۷/۸ مگاپاسکال و ۱۱۶/۱ مگاپاسکال می‌باشد که نشان می‌دهد مقادیر ماکزیمم تنش کششی موجود در میلگردها نسبت به حالت قبل افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار ماکزیمم تنش کششی در میلگردها همان‌طور که گفته شد برابر ۴۱۷/۸ مگاپاسکال و مربوط به زلزله-NRSAN (North ridge, 1994) می‌باشد که موجب تسلیم شدن چندین میلگرد در ناحیه کوچکی در محل اتصال بلوک بتنی به برج آبیگر شده است. همچنین مقدار متوسط مقادیر ماکزیمم تنش کششی ایجاد شده در میلگردها در سطح شتاب زلزله g ۰/۵، به میزان ۱۷۲/۲۹ مگاپاسکال گزارش شده است که این مقدار در مقایسه با مدل قبلی و در همین سطح از شدت زلزله، به میزان ۲۴٪ افزایش پیدا کرده است.

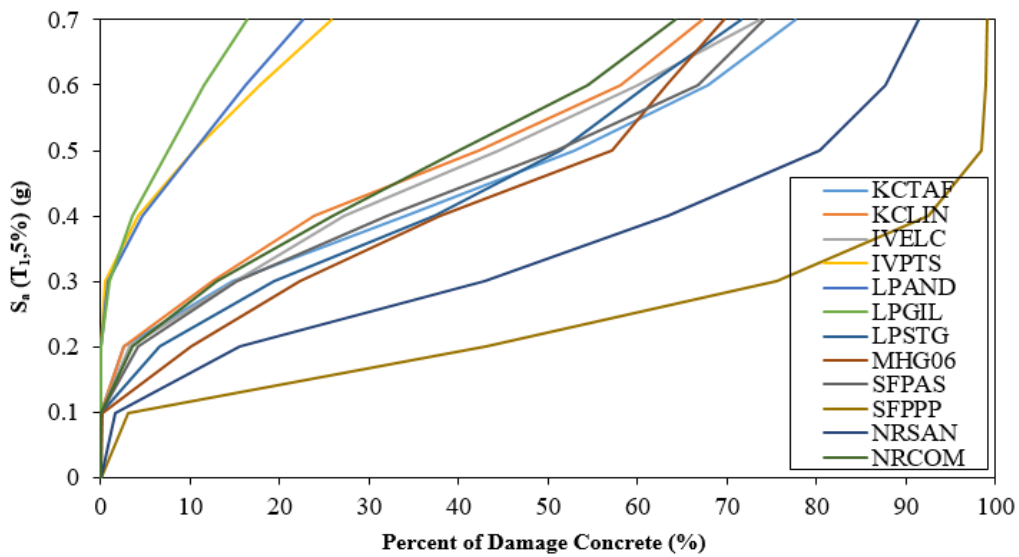
با توجه به منحنی ظرفیت مدل برج آبیگر-مخزن که در شکل ۱۳-ت مشاهده می‌گردد، تسلیم اولیه سازه که با وقوع اولین ترک کششی در بدنه برج آبیگر شکل می‌گیرد در سطح شتاب طیفی g ۰/۲ رخ داده است و متناظر با جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر به میزان ۹/۶۳ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش شدت زلزله و در سطح شتاب طیفی g ۰/۵۴، ترک سرتاسری در بدنه برج آبیگر شکل می‌گیرد که با گسترش آسیب در سایر ناحیه‌ها، در تراز شدت زلزله g ۰/۷، انهدام مقطعی در سازه رخ داده و میانگین مقادیر آسیب کششی برج آبیگر به مرز ۵۰ درصد کل المان‌های بدنه برج آبیگر می‌رسد.

۸-۳- مدل برج آبیگر-مخزن-آب داخل برج آبیگر

همان‌طور که در منحنی‌های IDA ارائه شده در شکل ۱۴-الف مشاهده می‌شود، بیشینه و کمینه جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر نسبت به کف برج آبیگر، متناظر با سطح شدت لرزه g ۰/۷، به ترتیب ۴۰/۰۴ سانتی‌متر و ۱۲/۸۴ سانتی‌متر می‌باشد که مقدار بیشینه جابه‌جایی نسبی بالای برج آبیگر در سطح شدت زلزله g ۰/۷ در این حالت در مقایسه با حالت برج آبیگر تنها



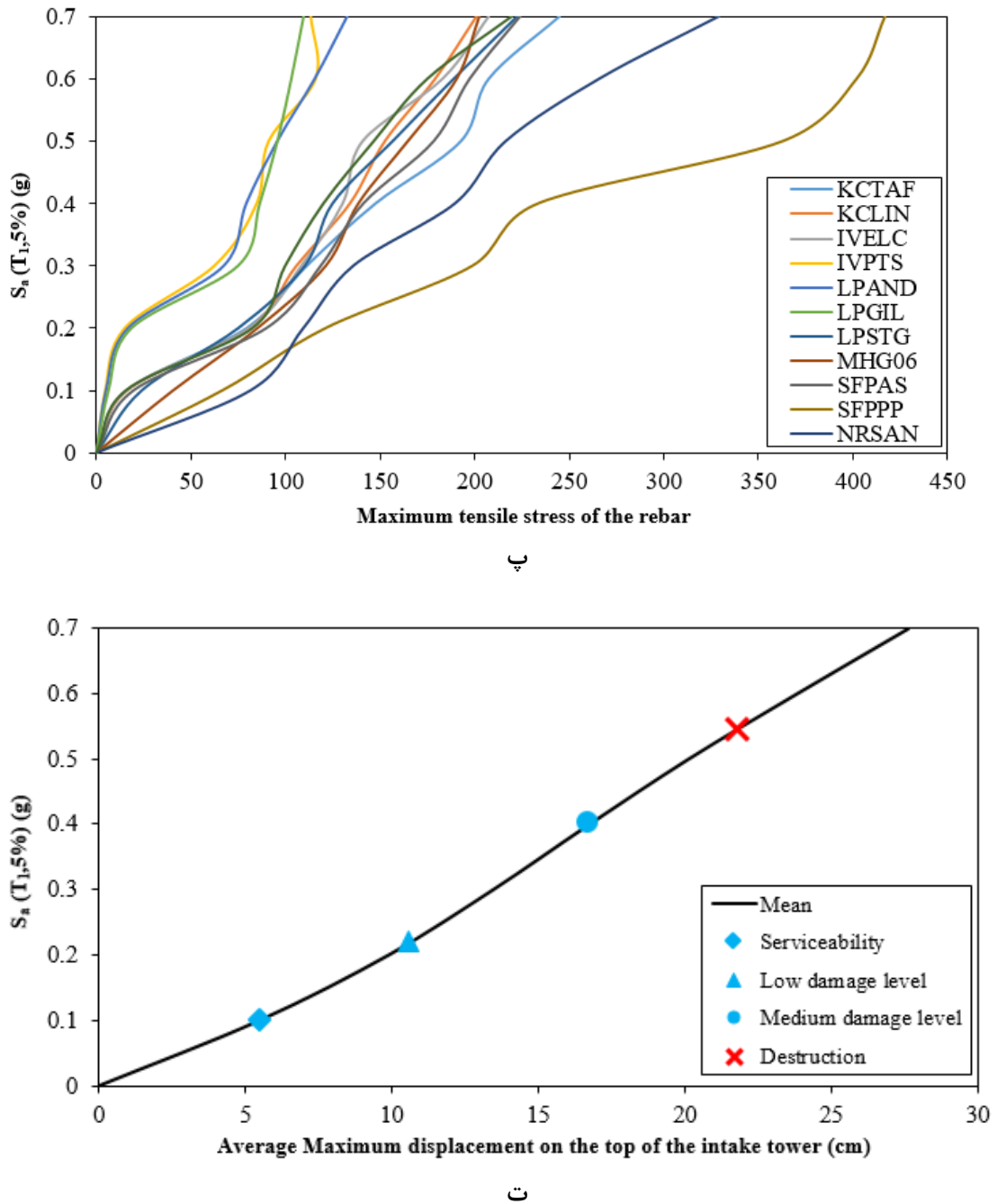
الف



ب

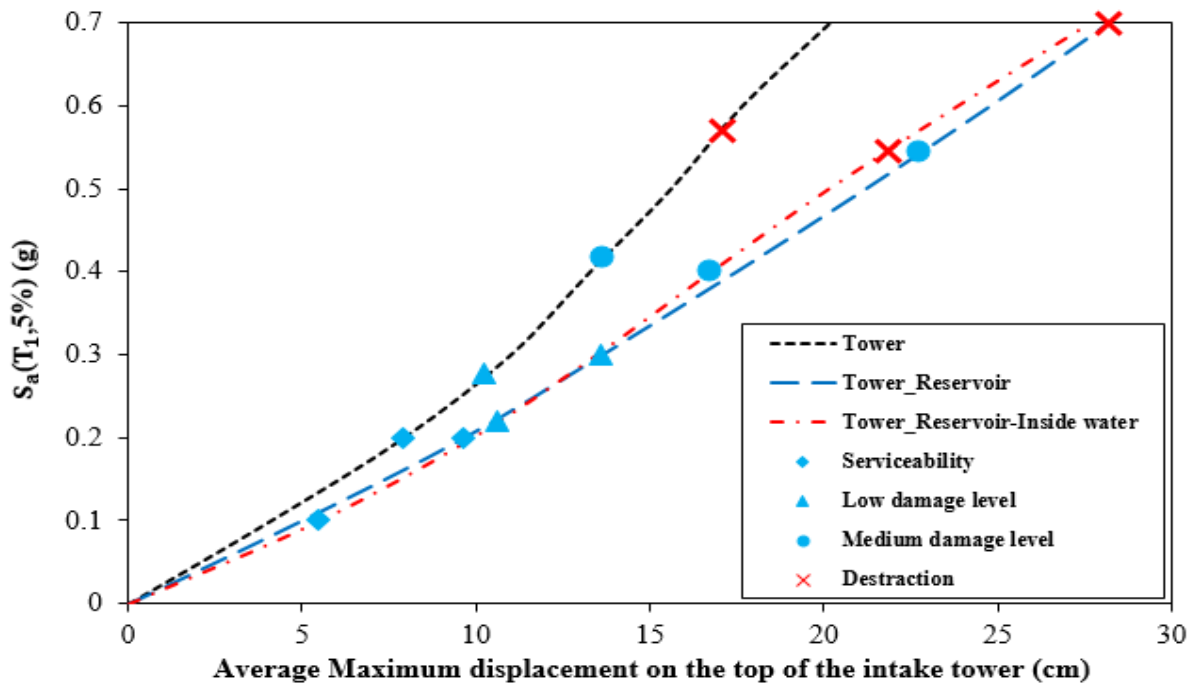
شکل ۱۴. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر- مخزن- آب داخل برج آبگیر (الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر (ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر (پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها (ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل (ادامه دارد).

Fig. 14. IDA curves of various intake tower-reservoir-inside water model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower-reservoir-inside water model (Continued).



شکل ۱۴. منحنی‌های IDA در مدل برج آبگیر- مخزن- آب داخل برج آبگیر الف) ماکزیمم جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر ب) درصد خرابی بتن بدنه برج آبگیر پ) ماکزیمم تنش کششی میلگردها ت) منحنی ظرفیت مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل.

Fig. 14. IDA curves of various intake tower-reservoir-inside water model. a) Maximum displacement on the top of the intake tower b) Percent of damage concrete c) Maximum tensile of the rebar d) Capacity curve of intake tower-reservoir-inside water model.



شکل ۱۵. منحنی ظرفیت برج آبگیر در سه حالت

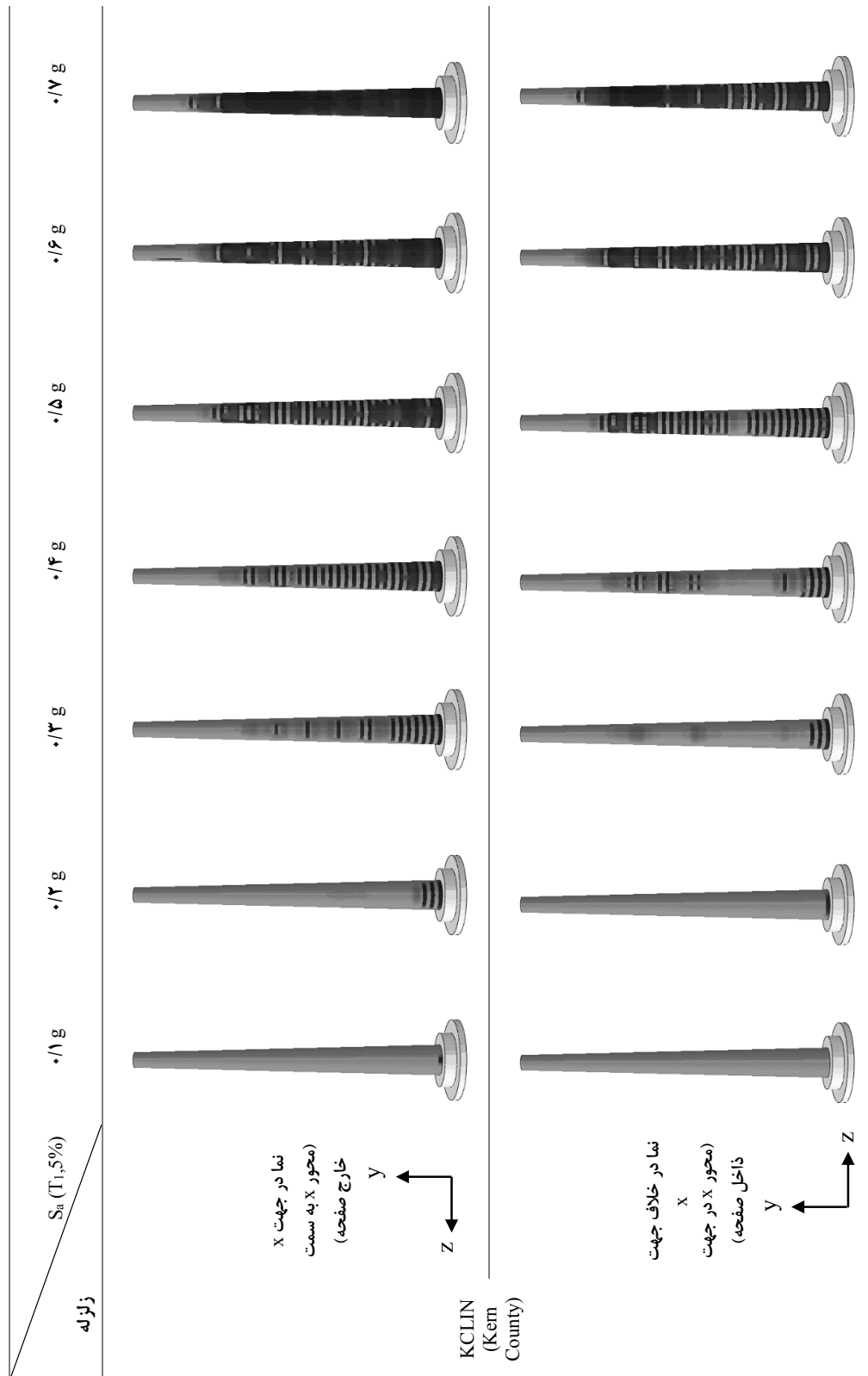
Fig. 15. Capacity curve of the intake tower in three state

سطح شدت زلزله $g/3$ مقادیر میانگین جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل نسبت به منحنی مدل برج آبگیر-مخزن بیشتر می‌باشند اما از این سطح و تا سطح $g/7$ مقادیر میانگین جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در مدل برج آبگیر-مخزن از مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل بیشتر می‌باشند.

در شکل ۱۶ برای نمونه الگوی خرابی‌های کششی ایجاد شده در بدنه برج آبگیر در مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل برج آبگیر تحت رکورد زلزله KCLIN (Kern County), 1952 در سطوح مختلف شدت زلزله آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد اولین ترک‌های افقی در این مدل در سطح $g/1$ اما در دو مدل دیگر در سطح $g/2$ ، در محل اتصال بلوک بتنی توپر با برج آبگیر شروع می‌گردد. سپس با افزایش شدت سطح زلزله ترک‌های افقی از محل اتصال بلوک بتنی با برج آبگیر تقریباً تا ارتفاع میانی بدنه برج آبگیر گسترش پیدا می‌کنند. همچنین ترک‌های قائم عمدتاً در سطوح $g/3$ تا $g/4$ ایجاد می‌گردند و باعث گسترش سریع‌تر خرابی در بدنه برج آبگیر می‌شوند.

آبگیر به میزان $5/47$ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش شدت زلزله و در سطح شتاب طیفی $g/4$ ، ترک سرتاسری در بدنه برج آبگیر شکل می‌گیرد که با گسترش آسیب در سایر ناحیه‌ها، در تراز شدت زلزله $g/54$ ، انهدام مقطعی در سازه رخ داده و میانگین مقادیر آسیب کششی برج آبگیر به مرز ۵۰ درصد کل المان‌های بدنه برج آبگیر می‌رسد.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد، منحنی ظرفیت برج آبگیر در سه حالت مختلف، در یک نمودار آورده شده است. بر این اساس همان‌طور که گفته شد در مدل برج آبگیر تنها و برج آبگیر-مخزن، اولین ترک‌ها در سطح شدت $g/2$ و اولین ترک‌ها در مدل برج آبگیر-مخزن-آب داخل برج آبگیر در سطح $g/1$ رخ می‌دهد. مقادیر میانگین جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در همه سطوح شدت زلزله در مدل برج آبگیر تنها نسبت به دو مدل دیگر کمتر می‌باشند. منحنی‌های مقادیر میانگین جابه‌جایی نسبی بالای برج آبگیر در هر سه مدل تا سطح شدت زلزله $g/3$ تقریباً به صورت خطی در حال افزایش می‌باشد اما از این سطح به بعد منحنی مدل برج آبگیر تنها با روند کندتری نسبت به منحنی‌های دو مدل دیگر افزایش می‌یابد. همچنین تا



شکل ۱۶. الگوی خرابی کششی در جهت x و خلاف جهت x در زلزله KCLIN (Kern County) در مدل برج آبیگر-مخزن-آب داخل برج آبیگر

Fig. 16. Tensile damage pattern at Kern County earthquake in the x direction and against the x direction in the intake tower-reservoir-inside water mode

۹- نتیجه‌گیری

منابع

- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی برج آبگیر در سه حالت مختلف بررسی گردید و در پایان برای هر مدل، منحنی ظرفیت ارائه و سطوح عملکرد سازه با توجه به سطوح تعریف شده، بر روی منحنی ظرفیت هر سازه مشخص گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت:
- ۱) الگوی پیچ‌دار منحنی‌های IDA حرکتی موجی در اطراف شیب الاستیک دارند که از قانون تغییر مکان‌های مساوی پیروی می‌کنند. الگوی پیچ‌دار این منحنی‌ها شامل بخش‌های متوالی سخت‌شدگی و نرم‌شدگی در سطوح مختلف شدت زلزله است.
 - ۲) با ایجاد اولین آسیب کششی جدی در بدنه برج آبگیر، دوره عملکرد اول سازه که معادل با دوره قابلیت بهره‌برداری می‌باشد، پایان یافته و با تسلیم اولیه سازه وارد دوره عملکرد آسیب کم می‌شود. سطح شدت زلزله متناظر با این سطح، در حالت‌های برج آبگیر تنها و برج آبگیر-مخزن در سطح شتاب طیفی $g/0.2$ و در حالت برج آبگیر-مخزن-آب داخل برج آبگیر در سطح شتاب طیفی $g/0.1$ می‌باشد. اولین آسیب کششی ایجاد شده در بدنه برج آبگیر و در این سطوح از شدت زلزله در ناحیه اتصال برج آبگیر با بلوک بتنی توپر ایجاد می‌گردد.
 - ۳) در سه حالت مختلف بعد از ایجاد اولین ترک‌های افقی در محل اتصال بدنه برج آبگیر به بلوک بتنی توپر، با افزایش شدت سطح لرزه ترک‌های افقی به صورت لایه لایه به سمت بالای برج آبگیر گسترش پیدا می‌کنند. همچنین ترک‌های قائم عمدتاً از سطح شدت لرزه‌ی $g/0.3$ و $g/0.4$ مابین ترک‌های افقی نیز ایجاد می‌گردند و باعث گسترش سریع خرابی در بدنه برج آبگیر می‌شوند.
 - ۴) میلگردهای درون برج آبگیر در سه حالت مختلف تحلیل تنها در حالت برج آبگیر-مخزن و در شدت سطح لرزه‌ی $g/0.7$ ، رکورد NRSAN (Northridge), 1994 در ناحیه کوچکی در محل اتصال بدنه برج آبگیر به بلوک بتنی تسلیم می‌شوند و در تمامی سطوح زلزله و حالت‌های دیگر رفتار خطی دارند.
 - ۵) به دلیل آسیب‌های کششی بیش از حد در بدنه برج آبگیر در ترازهای نهایی شدت زلزله که به علت الگوی پخشی ترک‌های ایجاد شده می‌باشد، تحلیل‌ها تا سطح شدت زلزله $g/0.7$ ادامه یافته است. در حقیقت در ترازهای نهایی شدت زلزله، به دلیل شدت آسیب‌های کششی، سازه از عملکرد خود خارج شده و نیازی به ادامه تحلیل‌ها تا سطوح بالاتر شتاب طیفی نمی‌باشد.
- [1] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamics of intake towers: earthquake responses, *Journal of Structural Engineering*, 115(6) (1989) 1386-1395.
- [2] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamics of intake towers: frequency response functions, *Journal of Structural Engineering*, 115(6) (1989) 1371-1385.
- [3] L. Cocco, L.E. Suarez, E.E. Matheu, Development of a nonlinear seismic response capacity spectrum method for intake towers of dams, *Struct Eng Mech*, 36(03) (2010) 321-341.
- [4] H. Wang, D. Li, B. Tang, Experimental study of dynamic interaction between group of intake tower and water, *Earthq Struct*, 6(02) (2014) 163-179.
- [5] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis, Stanford University Stanford, CA, USA, 2002.
- [6] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering, in: *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, 2002.
- [7] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3) (2002) 491-514.
- [8] M. Alembagheri, M. Ghaemian, Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(1) (2013) 123-144.
- [9] M. Alembagheri, M. Ghaemian, Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44 (2013) 127-137.
- [10] M. Alembagheri, M. Seyedkazemi, Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1) (2015) 41-58.

- performance evaluation of dam-foundation-reservoir system for the effect of frequency content and foundation flexibility, *Ocean Engineering*, 247 (2022) 110586.
- [17] M.o. power, Seismic analysis and design of different water structures, journal 52-N, (2008). (in Persian)
- [18] R.C. Dove, "Performance Of Lightly Reinforced Concrete Intake Towers Under Selected Loadin^f", Technical Reports ERDC/SL TR-00-6, U.S.Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, (2002).
- [19] A. Goyal, A.K. Chopra, Earthquake analysis and response of intake-outlet towers, California, Berkeley, 1988.
- [20] E.M.N. U.S. Army Corps of Engineers. , "Structural design and evaluation of outlet works", Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA., (2003).
- [21] U.S.A.C.o. Engineers, Structural design and evaluation of outlet work, Department of the Army, Washington, DC, USA, Engineer Manual No. 1110 (2003) 2-2400.
- [11] R. Shikhzadeh Shayan, M. Alembagheri, Seismic performance evaluation of concrete arch-gravity dams using incremental dynamic analysis, *Modares Civil Engineering Journal*, (2018). (in Persian)
- [12] J.-T. Wang, M.-X. Zhang, A.-Y. Jin, C.-H. Zhang, Seismic fragility of arch dams based on damage analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109 (2018) 58-68.
- [13] D.-H. Chen, Z.-H. Yang, M. Wang, J.-H. Xie, Seismic performance and failure modes of the Jin'anqiao concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis, *Engineering Failure Analysis*, 100 (2019) 227-244.
- [14] B. Sun, S. Zhang, W. Cui, M. Deng, C. Wang, Nonlinear dynamic response and damage analysis of hydraulic arched tunnels subjected to P waves with arbitrary incoming angles, *Computers and Geotechnics*, 118 (2020) 103358.
- [15] K. Mahmoodi, A. Noorzad, A. Mahboubi, M. Alembagheri, Seismic performance assessment of a cemented material dam using incremental dynamic analysis, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1187-1198.
- [16] A.R. Tidke, S. Adhikary, E.N. Farsangi, On the seismic

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ahmadi, M. Alembagheri, *Seismic performance evaluation of free-standing intake tower using incremental dynamic analysis*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(3) (2023) 505-530.

DOI: [10.22060/ceej.2023.19371.7178](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.19371.7178)

