



Overtuning response analysis of free-standing intake tower subjected to seismic pulses

Ramtin Hajirezaei¹, Mohammad Alembagheri^{2,*}

¹M.Sc., Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

² Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

ABSTRACT: In this paper, dynamic response of free-standing intake tower is investigated by using the Abaqus software. Briones intake tower is selected and it is modeled in two free-standing and anchored conditions that in the former state, three different frictional conditions are considered between the tower and its foundation. The friction coefficients include: 1) $\mu=0.58$; 2) $\mu=1.73$; 3) $\mu=\infty$. The intake towers are modeled 3D in three dry, submerged and semi-submerged states and water-structure interaction is considered by Eulerian-Lagrangian approach. In order to validate the models, the numerical responses of rigid and flexible blocks under seismic load are compared with the obtained results by other researchers. The tower overturning responses include: tower's top relative displacement, sliding, tower's base opening, which are extracted and analyzed under seismic pulses of sinus type, with three time periods of 0.5, 1 and 1.5 seconds, and intensities of 0.2g to 1.0g. It is shown that the presence of water around the intake tower has a significant effect on overturning responses. Also, the tensile stress in the free-standing state decreased by more than 70% compared to the anchored one.

Review History:

Received: 2019-01-19

Revised: 2019-04-07

Accepted: 2019-04-16

Available Online: 2019-04-29

Keywords:

Intake tower
free-standing state
seismic pulse
submerged
overturning response

1. INTRODUCTION

Recent studies on the ancient free-standing columns that have remained stable for thousands of years, have shown that the main reason of this sustainability is the use of a special potential called rocking motion. The research by Housner [1] in 1963 was the beginning of an extensive research on the problem of the overturning of free-standing blocks. Konstantinidis and Makris [2], in 2010, studied the free-standing blocks experimentally, using shaking table, as well as numerically, and extracted the overturning spectrum of the block under pure rocking and sliding motion. In 2014, Vassiliou and Mackie [3] examined the flexibility of free-standing blocks. They found that the intensity and period of the seismic pulse as well as the flexural vibration of the blocks play an important role in their overturning or stability. Intake towers are flexible structures those interaction with reservoir was initially investigated by Liaw and Chopra [4] 1973 as the beginnings of extensive research on this issue. In 1988, Chopra and Goyal [5] presented a method for analyzing the seismic response of intake towers with optional geometry, but with two axes of symmetry in plan, and considering the effects of water-tower and foundation-tower interaction.

In this study, intake tower is modeled by Abaqus in submerged, semi-submerged and solo states with friction coefficient of 0.58, 1.73 and ∞ and overturning responses have been investigated. For solving governing equations on water and structure, Lagrangian and Eulerian approaches are

used. The friction coefficient is modeled by Coulomb friction method.

2. BOUNDARY CONDITION FORMULATION

The boundary conditions are shown in "Fig.1", each of which is described below.

There is no water flow at the interface of the water and tower. This assumption is based on the fact that the surface of the tower is impermeable and leads to a condition that there is no relative velocity in the direction perpendicular to a common boundary between the tower and the water, or in mathematical language:

$$\alpha_n^s = -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} P \cdot \bar{n} \quad (1)$$

At the free surface of the reservoir, the hydrodynamic pressure value is zero, based on which surface waves are neglected in modeling. The Sommerfeld boundary condition is one of the most common ones, which is used at the end of the reservoir to absorb pressure waves going away from the system.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

Where n is the normal vector on the end boundaries of the reservoir [6]. The interaction between contact surfaces

*Corresponding author's email: alembagheri@modares.ac.ir



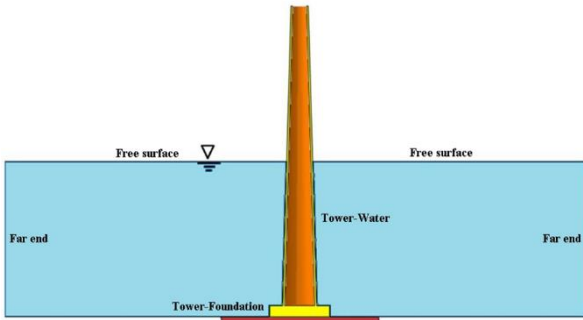


Fig. 1. Boundary conditions of the tower and reservoir

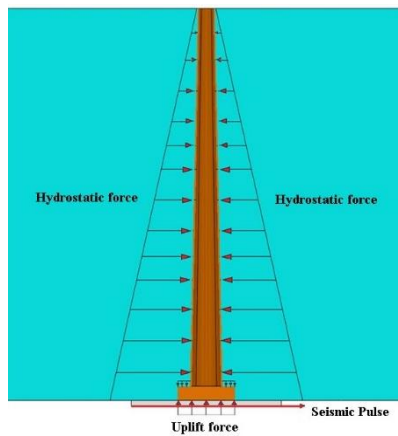


Fig. 2. Loading on the submerged intake tower

Table1.The elastic properties of concrete

| unit | value | property |
|-------|-------|---------------|
| GPa | 31 | Young'modulus |
| - | 0.17 | Poisson ratio |
| Kg/m3 | 2430 | Mass density |

Table2.The properties of water

| unit | value | property | |
|-------|-------|--------------|--|
| GPa | 2.07 | Bulk modulus | |
| | | | |
| Kg/m3 | 1000 | Mass density | |

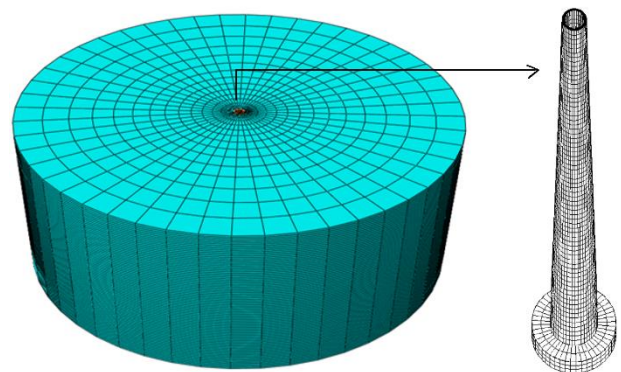


Fig. 3. Finite element model of submerged intake tower

consists of two components: a normal interaction that acts perpendicularly to the surfaces in contact and a tangential interaction that can lead to a relative sliding motion between two adjacent surfaces. The interface between the bottom of the tower and its foundation is modeled by Coulomb friction method, based on which two contact surfaces can transmit certain values of shear stresses before sliding motion begins [7]. In this model, when the sliding motion starts the final shear stress as part of the pressure contact between the two surfaces is described as follows:

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma. \quad (3)$$

3. MODELING: GEOMETRY AND LOADING

Briones tower is selected to examine and analyze overturning responses to seismic pulse. In order to simplify the problem, the reinforcement and its structural fittings are neglected in the modeling. In addition, to model the frictional interaction of concrete with soil and rock below it, effective frictional angles of 30 and 60 degrees respectively, which is equivalent to friction coefficient of 0.58 and 1.73, respectively are used. An infinite friction coefficient is also considered to investigate the effect of micro piles.

The tower is made of concrete with material properties according to “Table 1”. the loading consists of two static and dynamic steps. The static loading includes the weight of the tower, uplift and hydrostatic load due to the water and the

dynamic loading includes seismic pulses. “Fig.2” shows the loading diagram of the intake tower schematically.

The fluid properties are stated in “Table 2”.

The finite element models of the tower in the submerged state is shown in “Fig. 3”. The number of acoustic elements of the surrounding water in the submerged state is 51981.

4. CONCLUSIONS

1- maximum values of the relative displacements of the submerged and anchored intake tower are increased by 38%, 80% and 230% for the period of 0.5s, 1s and 1.5 s, respectively in comparison with the solitary and anchored tower.

2-Increasing the friction coefficient between the bottom of the tower and the underlying foundation, the top relative displacement and the base joint opening displacement are increased; however, the base joint sliding displacements are decreased

3- Overturning responses are increased by increasing the intensity and period of pulses.

4- When the tower is anchored, the contours of the maximum tensile stress are mostly located in the lower half of the tower's height but, for the solitary and semi-submerged free-standing towers, they extend from the lower half of the tower's height to the middle of its height; furthermore, the mentioned contours are advanced to the upper half of the

submerged free-standing tower.

5. REFERENCES

- [1] Housner, George W. "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes." *Bulletin of the seismological society of America* 53.2 (1963): 403-417.
- [2] Konstantinidis, Dimitrios, and Nicos Makris. "Experimental and analytical studies on the response of 1/4-scale models of freestanding laboratory equipment subjected to strong earthquake shaking." *Bulletin of earthquake engineering* 8.6 (2010): 1457-1477.
- [3] Vassiliou, Michalis F., Kevin R. Mackie, and Božidar Stojadinović. "Dynamic response analysis of solitary flexible rocking bodies: modeling and behavior under pulse-like ground excitation." *Earthquake engineering & structural dynamics* 43.10 (2014): 1463-1481.
- [4] Liaw, C. Y., and Anil K. Chopra. *Earthquake Response of Axisymmetric Tower Structures Surrounded by Water*. No. EERC-73-25. California Univ Berkeley earthquake engineering research center, 1973.
- [5] Goyal, Alok, and Anil K. Chopra. "Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamics of intake towers: earthquake responses." *Journal of Structural Engineering* 115.6 (1989): 1386-1395.
- [6] M. Alembagheri, M.Seyedkazemi.,2013. *Numerical Modeling of Concrete Gravity Dams by ABAQUS*.(in Persian)
- [7] Abaqus version 6.14-4. *Abaqus user's manual*, dassault systemes, simulia, 2014.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Hajirezaei, M. Alembagheri, *Overturning response analysis of free-standing intake tower subjected to seismic pulses*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 443-446.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15670.5992](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15670.5992)





تحلیل پاسخ واژگونی برج‌های آنگیر آزاد-ایستا تحت پالس‌های لرزه‌ای

رامتین حاجی رضایی^۱، محمد عالم باقری^{۲*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۲۹
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۸
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

کلمات کلیدی:

برج آنگیر
حالت آزاد-ایستا
پالس لرزه‌ای
حرکت گهواره‌ای
اندرکنش آب و سازه

خلاصه: در این مقاله به بررسی پاسخ واژگونی و حرکت گهواره‌ای برج‌های آنگیر آزاد-ایستا تحت پالس‌های لرزه‌ای پرداخته شده است. برج آنگیر سد برونز برای این مطالعه انتخاب شده است. برج آنگیر در دو حالت آزاد-ایستا و مهارشده مدلسازی شده که در حالت آزاد-ایستا سه شرایط اصطکاکی مختلف میان کف برج آنگیر و پی زیر آن در نظر گرفته شده است. این شرایط اصطکاکی شامل: ۱- ضریب اصطکاک ۰/۵۸، ۲- ضریب اصطکاک ۱/۷۳، و ۳- ضریب اصطکاک بی نهایت است. برج آنگیر بصورت سه‌بعدی در سه حالت خشک، مستغرق و نیمه مستغرق مدلسازی شده اند. اندرکنش آب و سازه بوسیله رفتار اوپلری-لاگرانژی در نظر گرفته شده است. به منظور صحت سنجی مدلسازی از مقایسه نتایج بلوک‌های صلب و انعطاف‌پذیر بدست آمده توسط سایر محققین و نتایج حاصل شده توسط نرم افزار تجاری مورد استفاده یعنی آباکوس استفاده شده است. پاسخ‌های واژگونی برج آنگیر که شامل: تغییر مکان نسبی نوک برج، لغزش و بازشدگی کف برج می باشند، تحت پالس‌های لرزه‌ای از نوع سینوسی، با سه زمان تناوب ۱/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه و شدت ۰/۲ تا ۱ برابر شتاب زمین استخراج و تحلیل شده است. نشان داده شده است که وجود آب اطراف بلوک تاثیر چشمگیری در پاسخ‌های واژگونی دارد. همچنین مقدار تنش‌های کششی در حالت آزاد-ایستا بیش از ۵۰ درصد نسبت به حالت مهارشده کاهش یافته است.

۱- مقدمه

و کلی آنها جلوگیری شود. حرکت گهواره‌ای به عنوان یک پتانسیل ویژه در سازه‌های لاغر و مرتفع می‌تواند کمک شایانی به پایداری این قبیل سازه‌ها کند.

سرآغاز پژوهش‌های گسترده بر روی مسئله واژگونی بلوک‌های آزاد-ایستا را می‌توان پژوهش هاوونر [۱] در سال ۱۹۶۳ دانست. هاوونر بیان داشت که برای بلوک صلب ایده‌آل شده توسط سیستم تک درجه آزادی (شکل ۱)، حرکت گهواره‌ای زمانی رخ می‌دهد که ممان محرک از ممان مقاوم ناشی از وزن سازه بیشتر شود. رابطه (۱) براساس ارضای تعادل لنگر در مدل بلوک صلب نشان داده شده در شکل ۱ است. پارامترهای رابطه (۱) در شکل نشان داده شده است.

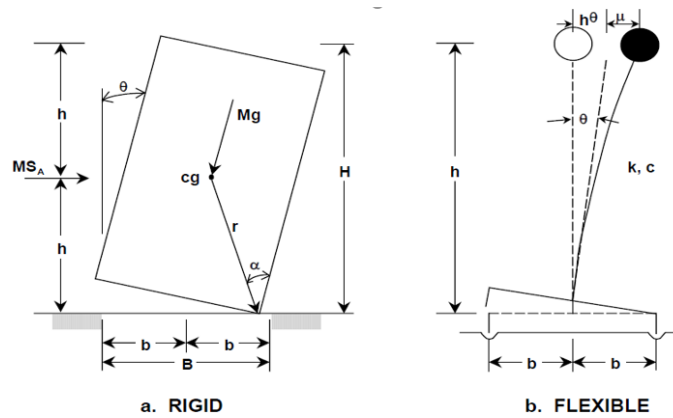
پژوهش‌های اخیر محققین بر روی ستون‌های آزاد ایستای باستانی که طی هزاران سال پایدار باقی مانده‌اند نشان داده است که رمز این پایداری در استفاده از پتانسیل ویژه‌ای به نام حرکت گهواره‌ای می‌باشد. در این زمینه می‌توان به معبد آپولو یونان که قدمت آن به سال ۵۴۰ قبل از میلاد باز می‌گردد اشاره کرد. ستونهای این معبد وزن زیادی داشته و در منطقه‌ای با لرزه خیزی بالا قرار گرفته اند.

سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها، برجهای آنگیر، تونل‌های آب بر و ... از جمله سازه‌های حیاتی و ویژه به شمار می‌روند که نه تنها در شرایط عادی و بهره برداری باید از ایمنی بالایی برخوردار باشند، بلکه در شرایط بحرانی همانند زلزله نیز باید از انهدام موضعی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alembagheri@modares.ac.ir

$$MS_A (H/2) > Mg(B/2) \quad (1)$$





شکل ۱. مدل بلوک صلب ایده آل آزاد: ایستا [۱]

Fig. 1. Ideal model of free-standing block

برج‌های آبنگیر با هندسه اختیاری اما با دو محور تقارن در پلان و همچنین در نظرگیری اثرات اندکنشی آب-برج و پی-برج ارائه کردند و اثرات هیدرودینامیکی آب داخل و خارج برج با توابع جرم افزوده تقریب زده شد. در ۲۰۰۸ ساباتینو و همکاران [۷] مدل آزمایشگاهی یک برج آبنگیر از جنس بتن مسلح را ساخته و مورد بارگذاری قرار دادند. در ادامه برج آبنگیر در نرم افزار المان محدود DIANA بصورت سه بعدی مدلسازی شده، تغییر مکان برج استخراج شده و با نتیجه آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نشان داده شد که روش المان محدود توانایی مناسبی در شبیه سازی ظرفیت سازه و ترک خوردگی دارد. راوی کومار [۸] به بررسی برج آبنگیر با نرم افزار SAP2000 پرداخت. وی مدل برج را تحت شتاب زلزله قرار داده و به این نتیجه دست یافت که حضور آب در خارج و داخل برج زمان تناوب سازه را به دلیل اثر جرم افزوده افزایش می‌دهد. با افزایش لاغری سازه به دلیل افزایش انعطاف پذیری، زمان تناوب سازه به طبع افزایش پیدا می‌کند. مدلسازی خاک زیر برج زمان تناوب را بصورت محسوسی افزایش می‌دهد. همچنین تغییر مکان نوک برج تحت تاثیر اندکنش برج-خاک افزایش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۷، شریعتمدار و میرحاج [۹] اندرکنش برج آبنگیر-مخزن-پی را بررسی کردند. بدین منظور از نرم افزار ANSYS برای مدلسازی و تحلیل دینامیکی برج آبنگیر سد دوستی استفاده شد. آنها نشان دادند که به طور کلی، حداکثر فشار هیدرودینامیکی و تغییر شکل سازه به یکدیگر وابسته اند ولی نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن در موقعیت تشکیل حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن موثر است. با توجه به مطالعات انجام شده، مدل سازی مخزن به صورت جرم

در سال ۱۹۸۰ پنزین و چوپرا [۲] با بررسی تحلیلی بلوک‌های صلب آزاد-ایستا بر روی فونداسیون صلب دریافتند که پاسخ واژگونی بلوک به اندازه و لاغری بلوک و همچنین جزئیات زمین لرزه اعمالی بسیار حساس می‌باشد. کنستانتینیدیس و ماکریس [۳] در ۲۰۱۰ بلوک‌های آزاد-ایستا را بصورت آزمایشگاهی با استفاده از میز لرزه و همچنین بصورت عددی بررسی کرده و طیف واژگونی بلوک تحت لغزش خالص و حرکت گهواره‌ای خالص را استخراج کردند. در ۲۰۱۴ واسیلیو و مکی [۴] اثر انعطاف پذیری بلوک‌های آزاد-ایستا را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که شدت و زمان تناوب پالس لرزه‌ای و همچنین ارتعاش خمشی بلوک‌ها نقش کلیدی در واژگونی یا پایداری آنها بازی می‌کند. در هر برخورد، تغییر شکل قسمت بالای بلوک که در اثر خمش ایجاد می‌شود جهت را معکوس می‌کند که این معکوس شدن موجب ایجاد ارتعاش خمشی در بلوک می‌گردد. از این رو بخشی از انرژی جنبشی بلوک انعطاف پذیر به انرژی ارتعاش خمشی تبدیل می‌شود که دیگر قادر به واژگون کردن بلوک نیست. این تبدیل انرژی، پاسخی به سوال پایداری بلوک انعطاف پذیر در مقابل بلوک صلب است.

سراغاز پژوهش‌های گسترده در مورد مسئله اندرکنش برج آبنگیر-مخزن را می‌توان پژوهش‌های لیا و چوپرا [۵] در سال ۱۹۷۳ دانست. آنها با چشم پوشی از اثرات اندکنش برج-پی-خاک و نیز اثرات ممان‌های هیدرودینامیک، رفتار مودال برج‌های آبنگیر متقارن محوری را که توسط آب احاطه شده‌اند، بررسی کردند که تلاش‌های آنها منجر به ارائه مفهوم جرم افزوده هیدرودینامیکی برای برج‌های آبنگیر شد. چوپرا و گوپال [۶] در روشی را برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای

استفاده شده است. ارتباط بین بردار فشار هیدرودینامیکی درون مخزن $\{p\}$ با بردار نیروهای اعمال شده بر روی فصل مشترک برج-مخزن و مخزن-پی $\{f\}$ را ماتریس کوپله $[Q]$ برقرار می‌کند:

$$[Q] \cdot \{P\} = \{f\} \quad (4)$$

با استفاده از گسسته سازی المان محدود مخزن و نیز با در نظرگیری معادلات المان محدود حاکم بر جامدات، اندرکنش برج-مخزن و مخزن-پی یک مسئله درگیر کلاسیک شامل یک دستگاه معادله دیفرانسیلی درجه دو است. این معادلات برای سازه و مخزن به شکل روابط (۵) و (۶) می‌باشد [۱۲]:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{f_1\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\} = \{F_1\} + [Q]\{P\} \quad (5)$$

$$[G]\{\ddot{P}\} + [C']\{\dot{P}\} + [K']\{P\} = \{F_2\} - \rho[Q]^T \left(\{\ddot{U}\} + \{\ddot{U}_g\} \right) \quad (6)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه برج، و $[G]$ ، $[C']$ و $[K']$ به ترتیب ماتریس‌های معادل جرم، میرایی و سختی مخزن می‌باشند. بردار نیروهای بدنه‌ای و هیدرواستاتیک، و $\{U\}$ و $\{P\}$ به ترتیب بردار جابجایی و فشارهای هیدرودینامیکی می‌باشند. $\{\ddot{U}_g\}$ بردار شتاب زمین و ρ چگالی سیال می‌باشد. نقطه بالای ح $\{f_1\}$ روف نمایانگر مشتق زمانی متغیر می‌باشد. معادلات حاکم بر برج آَبگیر و فونداسیون از فرمولاسیون لاگرانژی استفاده می‌کند. معادلات حاکم بر مخزن برج آَبگیر نیز بر اساس فرمولاسیون اویلری است که رفتار سیال برحسب پارامتر فشار در نقاط گرهی المان سیال مدل می‌گردند.

به منظور مدل کردن اندرکنش بین سیال و سازه در نرم افزار از روش سطحی استفاده شده است. روش سطحی به سبب آنکه می‌تواند سطوح سازه و سیال را با مش بندی‌های مختلف به هم ارتباط دهد، از کارایی بیشتری نسبت به روشهای دیگر برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر این روش هزینه‌ی محاسبات را کاهش می‌دهد و به همین جهت، از این روش استفاده شده است. در این روش سطوح سیال و سازه به ترتیب به عنوان سطح پیرو و سطح اصلی معرفی می‌شوند. سطح تماس بین سیال و سازه جایی است که فشار سیال مستقیماً

افزوده هیدرودینامیکی تنها می‌تواند برای طرح آغازین به کار رود. در این مقاله برج آَبگیر سد بریونز بصورت مهارشده در فونداسیون و آزاد-ایستا با سه ضریب اصطکاک مختلف بصورت مستغرق، نیمه مستغرق و تنها (خشک) با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. سیال پیرامون برج تراکم پذیر و بصورت اویلری در نظر گرفته شده است. در سطح تماس میان کف برج و پی زیر آن از مدل اصطکاک کولمب استفاده شده است. هدف این مقاله استخراج و تحلیل پاسخ‌های واژگونی برج شامل: تغییر مکان نسبی نوک برج، لغزش و بازشدگی کف برج و تنش‌های کششی بدنه برج می‌باشد.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات حرکت گهواره ای

اگر ضریب اصطکاک به قدری بزرگ باشد که لغزشی بوجود نیاید، معادله حرکت دینامیکی بلوک صلب آزاد-ایستا با $R = \sqrt{h^2 + b^2}$ و ضریب لاغری $\alpha = \tan^{-1}(\frac{b}{h})$ ، که تحت شتاب افقی قرار گرفته از معادله (۲) بدست می‌آید [۱۰ و ۱۱]:

$$I_0 \ddot{\theta}(t) + mgR \sin[\text{asgn}\theta(t) - \theta(t)] = -m \ddot{u}_g(t) R \cos[\text{asgn}\theta(t) - \theta(t)]$$

برای آغاز حرکت گهواره ای یک بلوک آزاد-ایستا باید $\ddot{u}_g(t) > g \tan \alpha$ باشد که در آن \ddot{u}_g شتاب زمین است. بلوکی به عرض b ، ارتفاع h و لاغری α که تحت شتاب زمین قرار گرفته است حول پاشنه‌های خود یعنی 0 و $0'$ حرکت گهواره ای را مطابق شکل ۱ انجام می‌دهد. برای بلوک مستطیلی مطابق آنچه در شکل ۱ نشان داده شد، معادله (۲) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

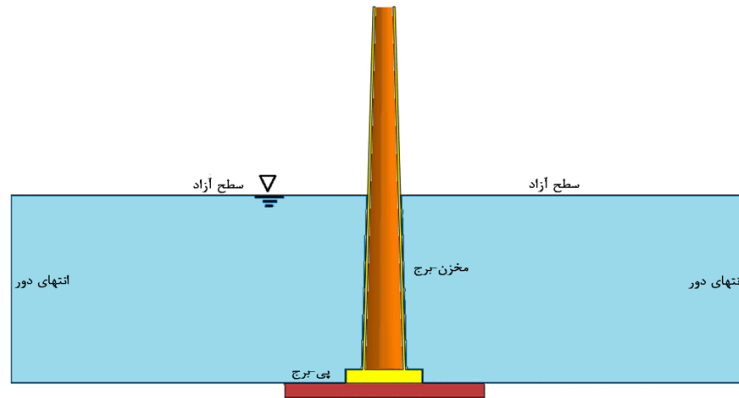
$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin[\text{asgn}(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{\ddot{u}_g(t)}{g} \cos[\text{asgn}(\theta(t)) - \theta(t)] \right\} \quad (3)$$

که در آن p پارامتر فرکانسی^۱ می‌باشد و تابع هندسه بلوک است. همچنین r فاصله پاشنه بلوک تا مرکز جرم بلوک است.

۲-۲- فرمولاسیون المان محدود برج-مخزن

اثرات اندرکنش مخزن در آنالیز دینامیکی برج-مخزن تحت زمین‌لرزه توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های متعددی ارائه گردیده است. در تحقیق پیشرو از روش المان محدود

1 Frequency parameter



شکل ۲. شرایط مرزی مدل مخزن برج

Fig.2. Boundary conditions of tower-water system

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (8)$$

که در آن n راستای عمود بر مرز بریده شده می‌باشد. بر اساس این شرط، مرزهای انتهایی دور مخزن در جهت تحریک اعمالی موج‌های فشاری که از سیستم خارج می‌شوند را جذب می‌کنند [۱۳].

اندرکنش بین سطوح سازه ای در محل تماس برج و پی متشکل از دو جزء است: (الف) اندرکنش نرمال در راستای عمود بر سطوح و (ب) اندرکنش مماسی که می‌تواند منجر به حرکت لغزشی نسبی بین دو سطح مجاور گردد. سطح تماس میان کف برج آبگیر و فونداسیون زیر آن براساس روش اصطکاک کولمب مدلسازی شده، که براساس آن دو سطح تماس مقادیر مشخصی از تنش‌های برشی را قبل از شروع حرکت لغزشی می‌توانند منتقل کنند. در این مدل تنش برشی نهایی، هنگامی که حرکت لغزشی دو سطح آغاز می‌شود، به‌عنوان نسبتی از تماس فشاری (تنش‌های نرمال)، بین دو سطح به شکل زیر بیان می‌شود [۱۸].

$$\tau_{ii} = \mu \cdot \sigma \quad (9)$$

در رابطه فوق μ ضریب اصطکاک می‌باشد که تانژانت زاویه اصطکاک بین دو سطح است. اصطکاک ایزوتروپیک در تمام جهات برای هر دو حالت اصطکاک ایستائی و جنبشی در این مقاله در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور مدلسازی رفتار نرمال از رابطه فشار-تداخل سخت^۲ استفاده شده است. اجازه انتقال تنش کششی در سطوح مشترک داده نمی‌شود. به عبارت دیگر با رسیدن دو جسم به

به حرکات سازه ارتباط می‌یابد. از آنجا که سطح سیال به‌عنوان سطح پیرو در نظر گرفته می‌شود، مقادیر فشار بر روی این سطح براساس مقادیر درونیابی شده معادل آن بر روی سطح سازه تعیین می‌شوند [۱۲-۱۵].

۳-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل در شکل (۲) نشان داده شده که در ادامه به توصیف هر کدام پرداخته شده‌است.

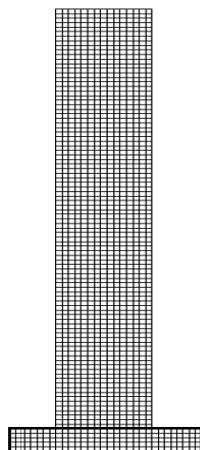
در سطح برج-مخزن جریانی در بین سطح مشترک وجود ندارد. این فرض براساس این واقعیت است که سطح برج آبگیر نفوذ ناپذیر می‌باشد. این فرض منجر به شرطی می‌شود که در جهت عمود بر مرز مشترک، سرعت نسبی وجود ندارد [۱۶]:

$$\alpha_n^s = -\frac{1}{\rho} \nabla P \cdot \vec{n} \quad (7)$$

که در آن α_n^s شتاب سازه در راستای n می‌باشد. در سطح آزاد مخزن، مقدار فشار هیدرودینامیکی صفر می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر برای کلیه گره‌های واقع بر سطح مخزن، فشار صفر به‌عنوان شرط مرزی تعریف می‌شود. همچنین این فرض، عدم وجود امواج سطحی در برج آبگیر را بیان می‌نماید. مرز بریده‌شده در انتهایی مخزن در مدل المان محدود مخازن با طول بی‌نهایت توسط محققان متعددی بررسی شده است. شرط مرزی زومرفلد^۱ یکی از معمول‌ترین آن‌ها می‌باشد که مبتنی بر فرض انتشار امواج صفحه‌ای در سیال در فاصله دور از وجه سازه می‌باشد. این فرض به شکل ریاضیاتی به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

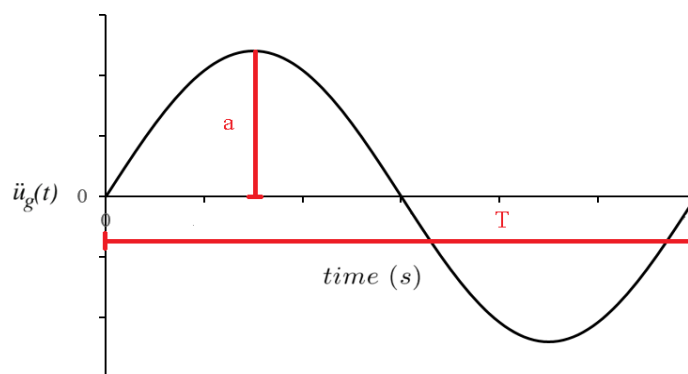
2 Hard contact

1 Sommerfeld



شکل ۳. مدل المان محدود بلوک صلب

Fig. 3. Finite element model of rigid block



شکل ۴. پالس سینوسی با دامنه a و پرپود T

Fig. 4. Sine pulse with intensity of a and period of T

استاتیکی شامل وزن بلوک آزاد-ایستا، می‌باشد. پس از بارگذاری استاتیکی، بارگذاری دینامیکی لرزه‌ای مدل آغاز می‌شود. این بارگذاری ناشی از مولفه افقی پالس‌های لرزه‌ای سینوسی (مطابق با شکل ۴) با دامنه و دوره‌های تناوب مختلف است. محور قائم معرف دامنه یا شدت شتاب پالس لرزه‌ای سینوسی می‌باشد و محور افقی معرف زمان است. با تغییر هریک از این پارامترهای لرزه‌ای می‌توان حساسیت پاسخ سازه مورد نظر را نسبت به هریک از پارامترها بررسی و تحلیل نمود.

۳-۲- برج‌های آبگیر

برج آبگیر سد بریونز برای بررسی و تحلیل پاسخ واژگونی انتخاب شده است. به منظور ساده سازی از آرمانتورگذاری و ملحقات سازه‌ای آن در مدل‌سازی صرف نظر شده است. به منظور مدل‌سازی اندرکنش اصطکاکی بتن با خاک و سنگ زیر آن به ترتیب از زوایای

یکدیگر، فشاری بین دو جسم ایجاد شده و با نفوذ بیشتر قطعات در یکدیگر فشار نیز افزایش خواهد یافت. بدیهی است با صفر شدن مقدار فشار، جدایش بین سطوح تشخیص داده می‌شود [۱۹ و ۲۰].

۳-مدلسازی

۳-۱- بلوک‌های آزاد-ایستا

در این بخش ابتدا به مدل‌سازی بلوک‌های آزاد-ایستا بصورت دو بعدی و سه بعدی پرداخته می‌شود. مدل شماره ۱ یک بلوک صلب با عرض $1/49$ متر و ارتفاع $9/29$ متر است. مدل شماره ۲ یک بلوک انعطاف‌پذیر به عرض 5 متر و ارتفاع 50 متر با مدول یانگ 30 گیگاپاسکال، ضریب پواسون $0/2$ و چگالی 2500 کیلوگرم بر مترمکعب است. مدل المان محدود بلوک صلب در شکل ۳ نشان داده شده است. بارگذاری شامل دو مرحله استاتیکی و دینامیکی است. بارگذاری

جدول ۱. مدل‌های مختلف برج آبگیر

Table 1. Different models of intake tower

| شماره مدل | ضریب اصطکاک کف / مهارشده | مخزن پیرامون برج |
|-----------|-----------------------------|------------------|
| ۱ | مهارشده | خالی |
| ۲ | مهارشده | پر |
| ۳ | ۰/۵۸ | خالی |
| ۴ | ۱/۷۳ | خالی |
| ۵ | بی نهایت | خالی |
| ۶ | ۰/۵۸ | پر |
| ۷ | ۱/۷۳ | پر |
| ۸ | بی نهایت | پر |
| ۹ | ۰/۵۸ | نیمه پر |
| ۱۰ | ۱/۷۳ | نیمه پر |
| ۱۱ | بی نهایت | نیمه پر |

جدول ۲. مشخصات الاستیک مصالح بتنی

Table 2. Elastic properties of concrete material

| واحد | مقدار | مشخصه |
|---------------------|-------|-----------------|
| گیگا پاسکال | ۳۱ | مدول الاستیسیته |
| - | ۰/۱۷ | نسبت پواسون |
| کیلوگرم بر متر مکعب | ۲۴۳۰ | چگالی |

بارگذاری دینامیکی مدل آغاز می‌شود که شامل پالس‌های لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۴ است.

مشخصات سیال پیرامون برج مطابق جدول ۳ است.

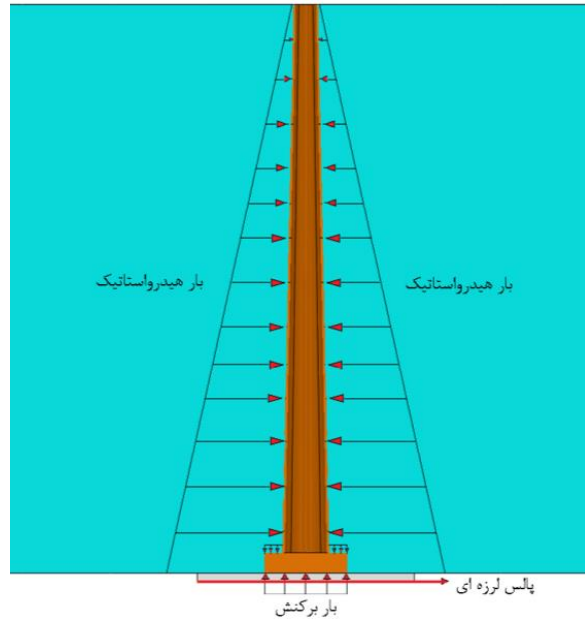
پس از مدل‌سازی و المان بندی، مدل المان محدود برج آبگیر در حالت مستغرق و نیمه مستغرق در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. تعداد المان‌های آب پیرامونی در حالت مستغرق ۵۱۹۸۱ می‌باشد. المان‌ها از نوع سه بعدی آکوستیک ۸ گره‌ای خطی با انتگرال‌گیری کاهش یافته است. درجه آزادی المان‌های آکوستیک تنها فشار دینامیکی می‌باشد. مدل‌سازی برج آبگیر نیمه مستغرق مشابه حالت مستغرق می‌باشد با این تفاوت که ارتفاع آب به نصف حالت قبل کاهش یافته است. همچنین مقدار نیروی برکنش که به کف برج اعمال شده است ۵۰ درصد حالت مستغرق است. در حالت نیمه مستغرق تعداد المانهای آب بیرونی ۲۶۳۰۴ می‌باشد.

اصطکاک موثر ۳۰ و ۶۰ درجه استفاده شده است که معادل ضریب اصطکاک ۰/۵۸ و ۱/۷۳ است. همچنین به منظور بررسی اثر حضور میکروپایل‌ها ضریب اصطکاک بی‌نهایت نیز در نظر گرفته خواهد شد. بصورت خلاصه تمام مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

اندرکنش سازه برج و آب پیرامونی آن در مدل‌سازی منظور شده است هرچند پی سنگی زیر برج به صورت صلب مدل شده و از اندکنش خاک و سازه صرف نظر شده است. برج آبگیر از جنس بتن با مشخصات مصالح مطابق جدول ۲ می‌باشد.

بارگذاری شامل دو مرحله استاتیکی و دینامیکی است. بارگذاری استاتیکی شامل وزن برج آبگیر، بار برکنش^۱ و بار هیدرواستاتیک ناشی از سیال اطراف برج آبگیر می‌باشد. بطور شماتیک بارگذاری برج آبگیر در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از بارگذاری استاتیکی،

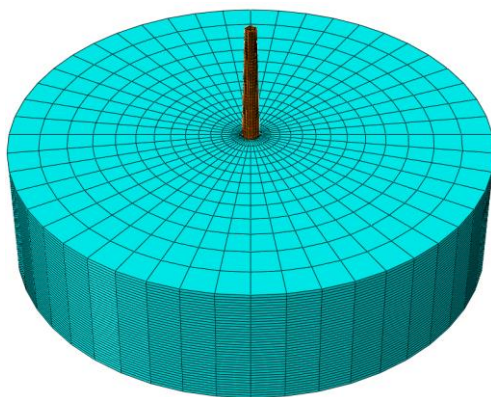
1 Uplift



شکل ۵. بارگذاری برج آبگیر مستغرق
Fig. 5. Loading of submerged tower

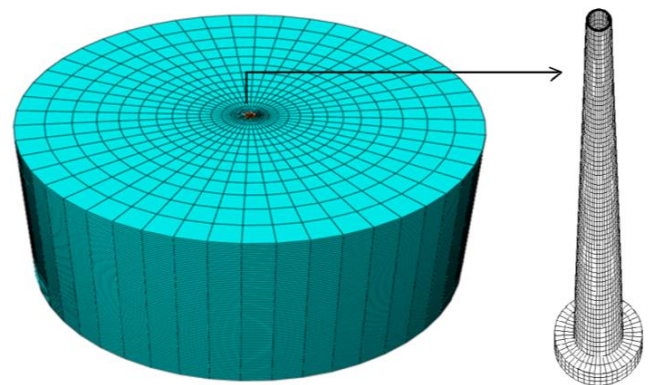
جدول ۳. مشخصات الاستیک مصالح آب
Table 3. Properties of water material

| مشخصه | مقدار | واحد |
|-----------|-------|---------------------|
| مدول بالک | ۲/۰۷ | گیگا پاسکال |
| چگالی | ۱۰۰۰ | کیلوگرم بر متر مکعب |



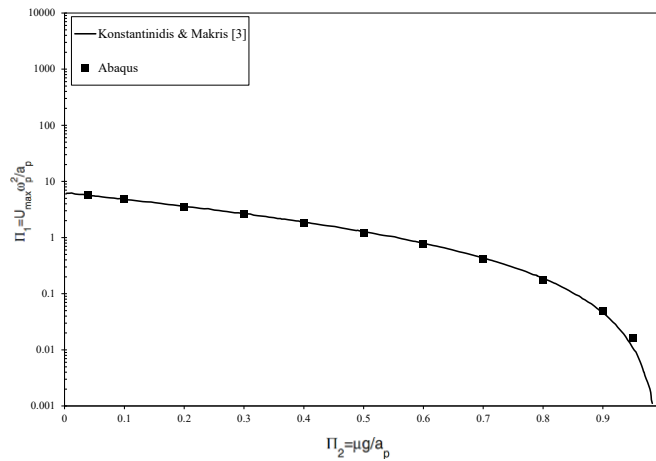
شکل ۷. مدل المان محدود برج آبگیر و مخزن سد بریونز در حالت نیمه مستغرق

Fig. 7. Finite element mode of Brions intake tower in semi-submerged condition

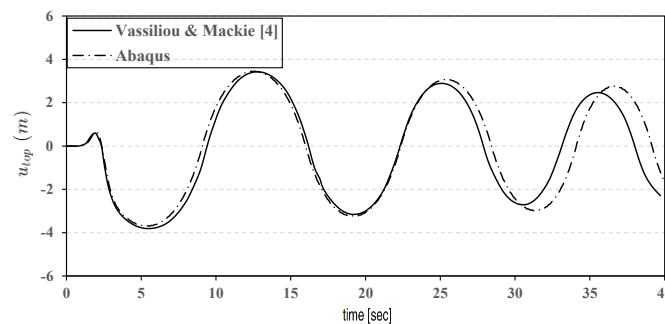


شکل ۶. مدل المان محدود برج آبگیر و مخزن سد بریونز در حالت مستغرق

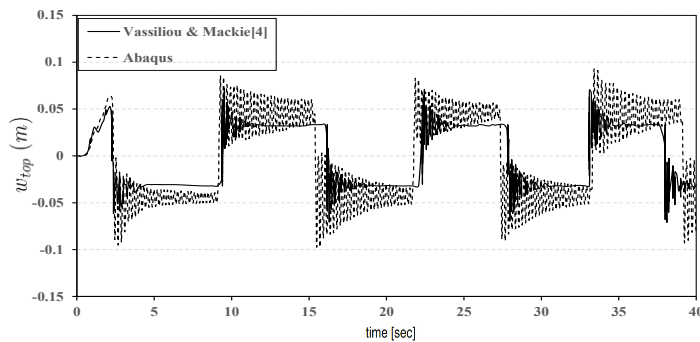
Fig. 6. Finite element mode of Brions intake tower in fully submerged condition



شکل ۸. بیشینه جابجایی بلوک شماره ۱ تحت پالس های سینوسی
Fig. 8. Maximum deflection of Block 1 under sine pulses



شکل ۹. تغییر مکان نوک بلوک انعطاف پذیر شماره ۲
Fig. 9. Top deflection of flexible Block 2

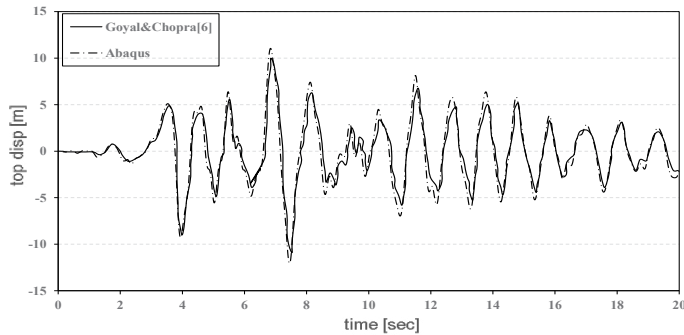


شکل ۱۰. تغییر مکان ناشی از خمش بلوک انعطاف پذیر شماره ۲
Fig. 10. Deflection induced by bending in Block 2

از ترکیب پالس ها و ضرایب اصطکاکی مختلف مطابق شکل ۸ بدست آمده و با نتایج کنستانتینیدیس و ماکریس [۳] مقایسه شده است. تطابق مناسبی بین نتایج هر دو مطالعه دیده می شود. در ادامه تغییر مکان نسبی و تغییر مکان ناشی از خمش بلوک انعطاف پذیر شماره ۲ تحت پالس ریکر با شدت ۵/۷۴ متر بر مجذور

۴- اعتبارسنجی

به منظور صحت سنجی، بلوک صلب شماره ۱ که در قسمت قبل مدلسازی شد تحت پالس های سینوسی با دامنه و زمان تناوب های مختلف قرار می گیرد. ضرایب اصطکاک مختلف میان کف بلوک و پی زیر آن در نظر گرفته شده است و بیشینه جابجایی نرمال شده بلوک



شکل ۱۱. تغییر مکان نسبی نوک برج آبگیر بریونز

Fig. 11. Relative displacement of Brions intake tower

شده است. با توجه به شکل ۱۲ تغییر مکان نسبی نوک برج با افزایش شدت پالس لرزه‌ای افزایش پیدا کرده که این افزایش ارتباط خطی با شدت پالس دارد. همچنین در مدل شماره ۲ که برج مستغرق است، زمان تناوب جابجایی نسبی نوک برج نسبت به مدل شماره ۱ افزایش داشته و برخلاف حالت برج تنها، تا ثانیه ۱۲ تمام انرژی مستهلک نشده و برج به حالت پایدار خود نرسیده است. در حالت مستغرق بعلت وجود نیرو جانبی ناشی از سیال تحت عنوان فشار هیدرودینامیکی، تغییر مکان‌های نسبی نوک برج نسبت به حالت تنها افزایش داشته است.

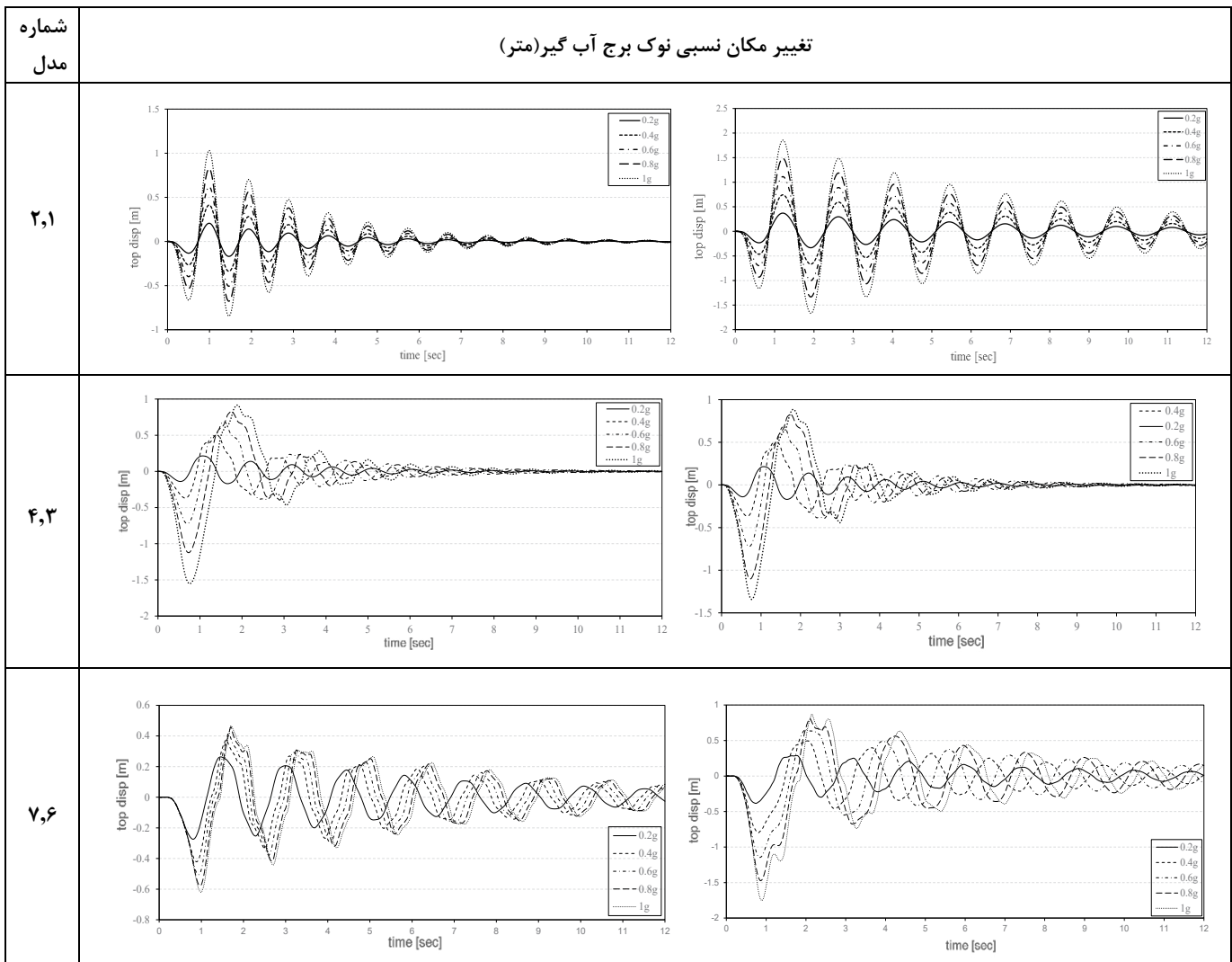
در سایر مدلها (مدلهای شماره ۳، ۴، ۶ و ۷) برج آبگیر بصورت آزاد-ایستا مدل شده است. در هر یک از نمودارها بیشترین مقدار تغییر مکان‌های نسبی به ازای شدت‌های مختلف در مدت زمان یکسان صورت نگرفته است و فاصله قله‌های جواب از یکدیگر با افزایش شدت پالس افزایش یافته است. یا بعبارت دیگر انجام یک حرکت گهواره‌ای کامل که برج طی آن روی پاشنه و پنجه خود بلند می‌شود افزایش یافته است. در حالت آزاد-ایستا بر خلاف حالت گیردار تغییر مکان نسبی در اولین بلندشدگی بسیار بیشتر است. فرورفتگی‌هایی در قله‌های جواب مدل‌های آزاد-ایستا مشاهده شده است. علت ایجاد این پدیده تغییر مکان پایه و نوک برج آبگیر در جهت مخالف یکدیگر است که بعد از هر ضربه اتفاق افتاده است. معکوس شدن تغییر مکان‌های یادشده در چند دهم ثانیه رخ داده است. توزیع غیر یکنواخت جرم در ارتفاع برج آبگیر، تغییرات سختی خمشی در ارتفاع و انتقال انرژی جنبشی به بدنه برج انعطاف پذیر می‌تواند از دلایل این رخداد باشند. این فرورفتگی‌ها در لحظات اولیه بسیار مشهود می‌باشد اما با گذشت زمان از بین می‌رود. در حالت مستغرق بعلت ایجاد تنش‌های کششی

ثانیه و زمان تناوب $1/93$ ثانیه، مطابق شکل ۹ و ۱۰ از نرم افزار استخراج شده و با نتایج واسیلیو و مکی [۴] مقایسه شده است. مجدداً تطابق مناسبی بین نتایج هر دو مطالعه دیده می‌شود.

به منظور راستی آزمایی اندرکنش آب و سازه، نتایج مطالعات گویال و چوپرا [۶] با نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس مقایسه شده است. مدل شماره ۲ برج آبگیر که در قسمت قبل شرح داده شد تحت مولفه افقی رکورد زلزله تفت قرار گرفته است. پس از تحلیل، تغییر مکان نسبی نوک بلوک که از تفاضل تغییر مکان‌های نوک برج و پایه برج بدست می‌آید، مطابق شکل ۱۱ با نتایج همین مدل توسط گویال و چوپرا مقایسه می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی با نتایج عددی گویال و چوپرا وجود دارد.

۵- نتایج تحلیل‌های عددی و بحث

در این بخش ابتدا برج آبگیر در حالت مهارشده بررسی می‌شود. سپس پاسخ برج آبگیر با فرض وجود درز در پایه و وارد شدن به حرکت گهواره‌ای در حالت‌های مختلف مستغرق، تنها (عدم وجود آب) و نیمه مستغرق تحت پالس‌های سینوسی با دوره تناوب و شدت‌های مختلف بررسی خواهد شد. در این بررسی‌ها پاسخ‌هایی نظیر تغییر مکان نسبی نوک برج، لغزش و بازشدگی پایه برج، و تنش‌های کششی بیشینه استخراج شده و ارتباط آنها با محتوای فرکانسی و مدت پالس زلزله اعمالی بررسی شده است. به دلیل زیاد بودن تعداد مدل‌های تحلیل شده در بخش پاسخ‌های تاریخیچه زمانی برج آبگیر، تنها نتایج مربوط به مدل‌های مختلف تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت‌های $0/2$ تا ۱ برابر شتاب ثقل زمین ارائه شده است. در ادامه پاسخ‌های مختلف مربوط به کلیه مدل‌ها با یکدیگر مقایسه



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی نوک برج تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت های ۰/۲ تا ۱ g
 Fig. 12. Time history of relative displacement under pulse with period of 1 sec and intensity of 0.2 to 1.0 g

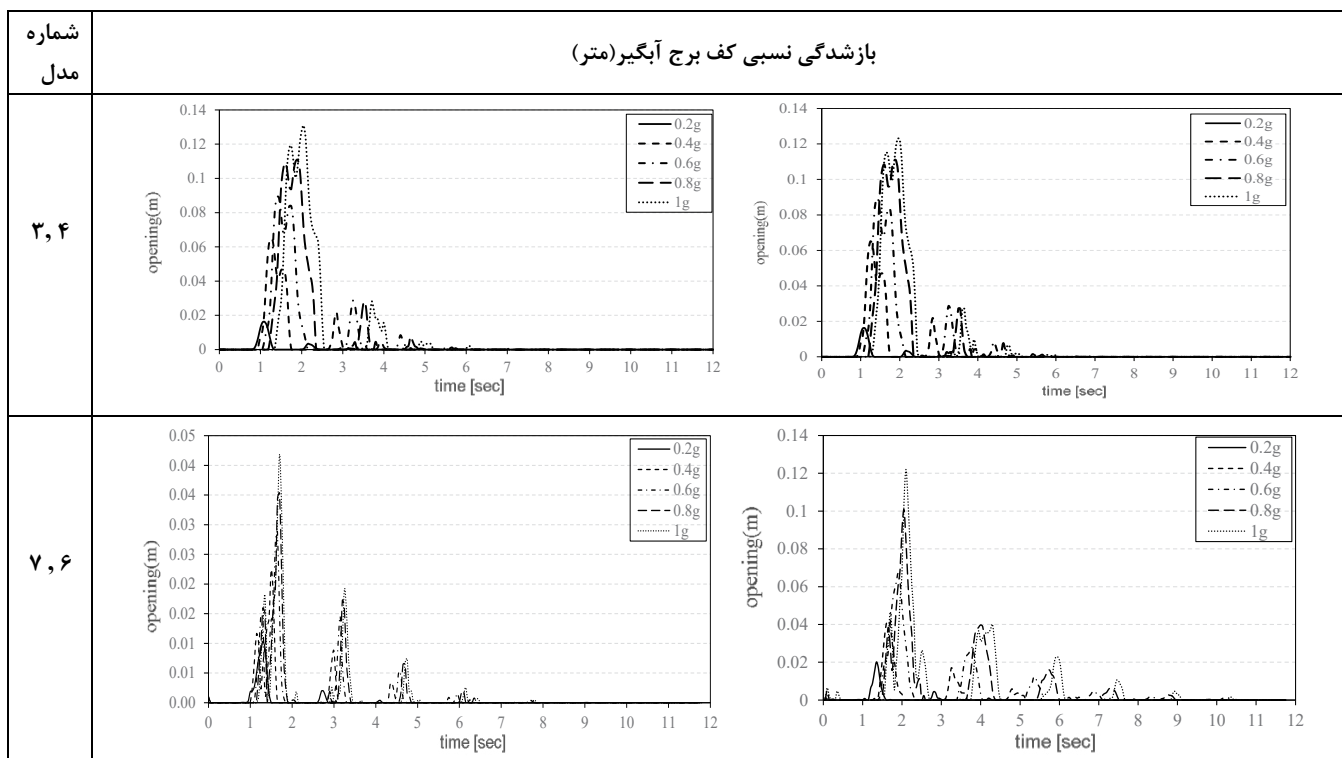
به طوری که در مدل مستغرق زمانی که بازشدگی در پاشنه سمت چپ برج وجود دارد تغییر شکل بالای برج به سمت چپ می باشد در نتیجه وزن قسمت بالایی در این حالت لنگر مقاوم ایجاد کرده و به بسته شدن درز کمک می کند. اما در حالت خشک این موضوع عکس حالت مستغرق است به همین دلیل شیب نمودارها در حالت مستغرق نسبت به حالت خشک افزایش یافته است. از طرف دیگر تعداد بازشدگی های حالت مستغرق نسبت به حالت خشک بیشتر شده است.

در شکل ۱۴ تاریخچه زمانی لغزش نسبی کف برج آبگیر برای مدل های مشخص شده ارائه شده است. در مدل ۳ مقادیر لغزش به ازای شدت های ۰/۲ تا ۰/۶ برابر صفر است. بطور کلی با افزایش

و فشاری در نزدیکی نوک برج که از نیروی هیدرودینامیکی ناشی شده اند، این پدیده تشدید شده است.

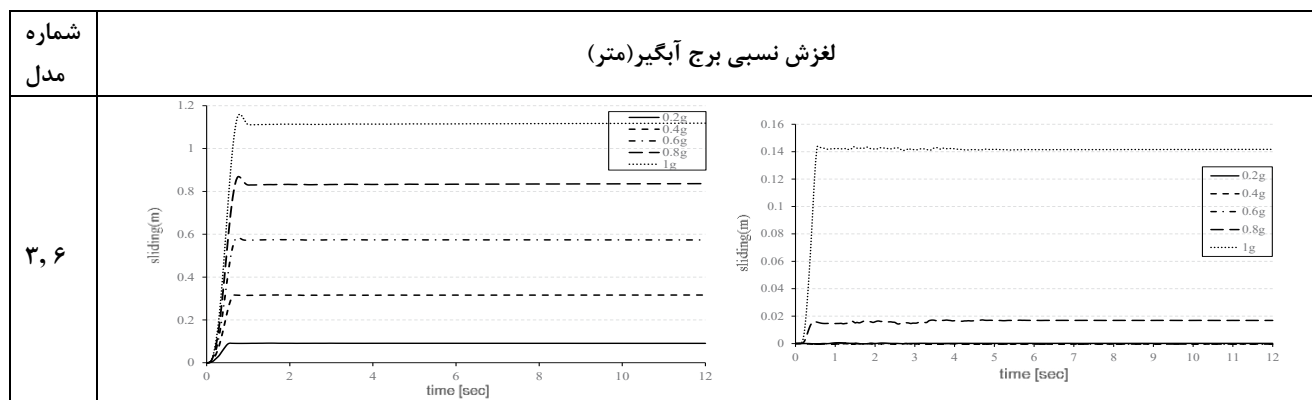
در شکل ۱۳ تاریخچه زمانی بازشدگی سمت چپ کف برج آبگیر برای مدل های مشخص شده ارائه شده است. با توجه به جهت بار لرزه ای اعمال شده به کف برج مطابق شکل ۵، باز شدگی گوشه سمت چپ برج تا ثانیه حدود ۱ صفر می باشد، یا به عبارت بهتر تنها در لحظاتی که برج روی پاشنه سمت راست خود قرار دارد، برای پاشنه سمت چپ بازشدگی وجود دارد. با افزایش شدت پالس مقادیر بازشدگی در حالت های مختلف افزایش یافته است.

تغییر شکل های ایجاد شده در نیمه بالایی برج بعد از هر برخورد باعث تغییر در سرعت باز و بسته شدن کف برج آبگیر شده است



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی بازشدگی کف برج تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت های ۰/۲ تا ۱ g

Fig. 13. Time history of tower base opening under pulse with period of 1 sec and intensity of 0.2 to 1.0 g



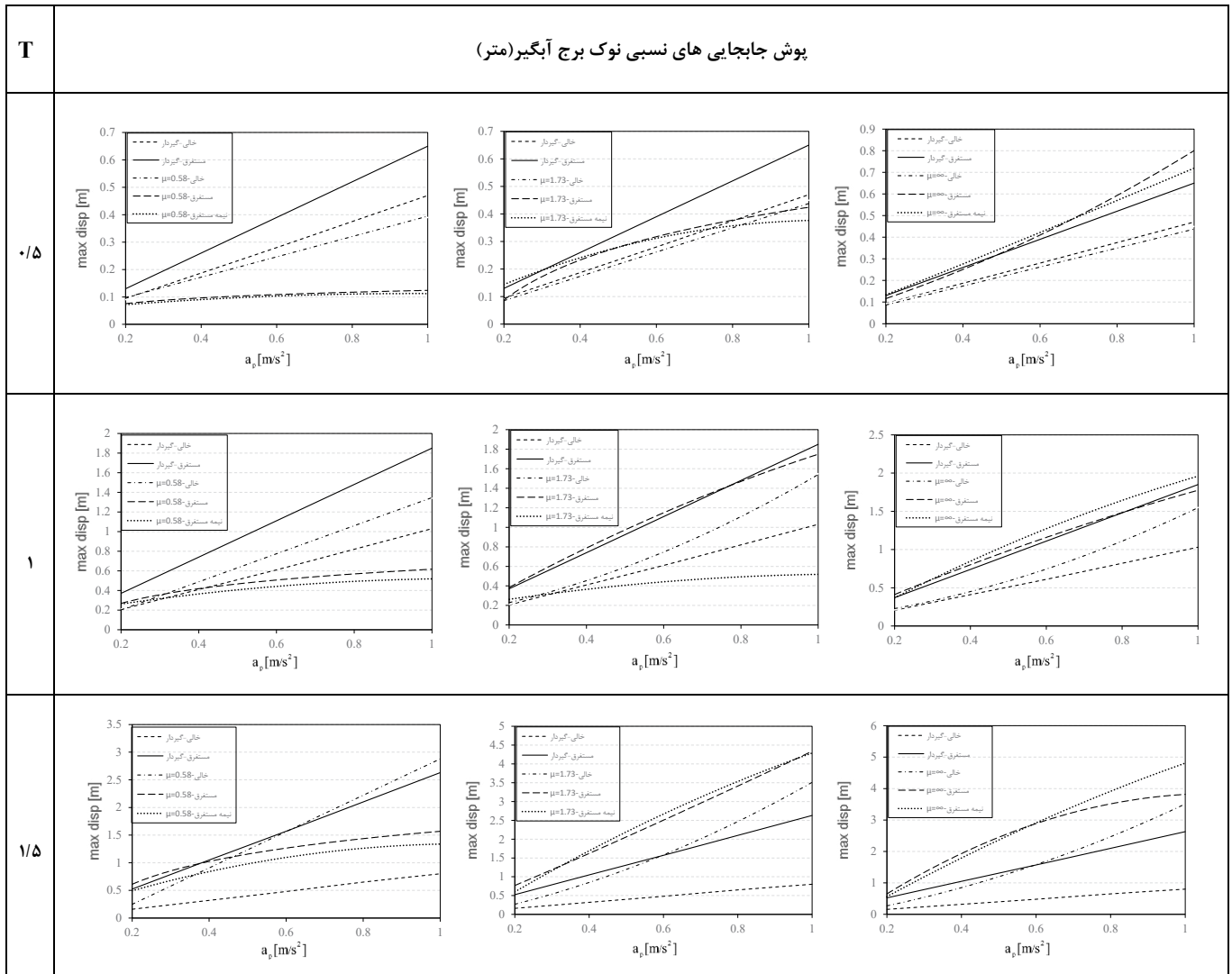
شکل ۱۴. تاریخچه زمانی لغزش نسبی کف برج تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت های ۰/۲ تا ۱ g

Fig. 14. Time history of tower base sliding under pulse with period of 1 sec and intensity of 0.2 to 1.0 g

برج به حداکثر مقدار لغزش خود می‌رسد که برج در حداکثر مقدار بازشدگی اولیه کف خود قرار دارد.

در شکل ۱۵ پوش تغییر مکان‌های نسبی برج آبگیر در شرایط مختلف تحت پالس با سه زمان تناوب و شدت های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. مقادیر تغییر مکان‌های نسبی برج آبگیر مهارشده مستغرق نسبت به برج مهارشده تنها برای زمان تناوب‌های

شدت پالس میزان لغزش افزایش یافته است. در حالت خشک ابتدا برج وارد مود لغزش می‌گردد و سپس بازشدگی کف برج آغاز می‌گردد. با ایجاد بازشدگی سطح تماس کف برج با پی زیر آن کاهش یافته و همین امر موجب افزایش لغزش شده است اما در حالت مستغرق به دلیل فشارهای ناشی از سیال مانند فشار برکنش، لغزش و بازشدگی بصورت هم زمان آغاز شده‌است. همچنین در تمامی موارد زمانی

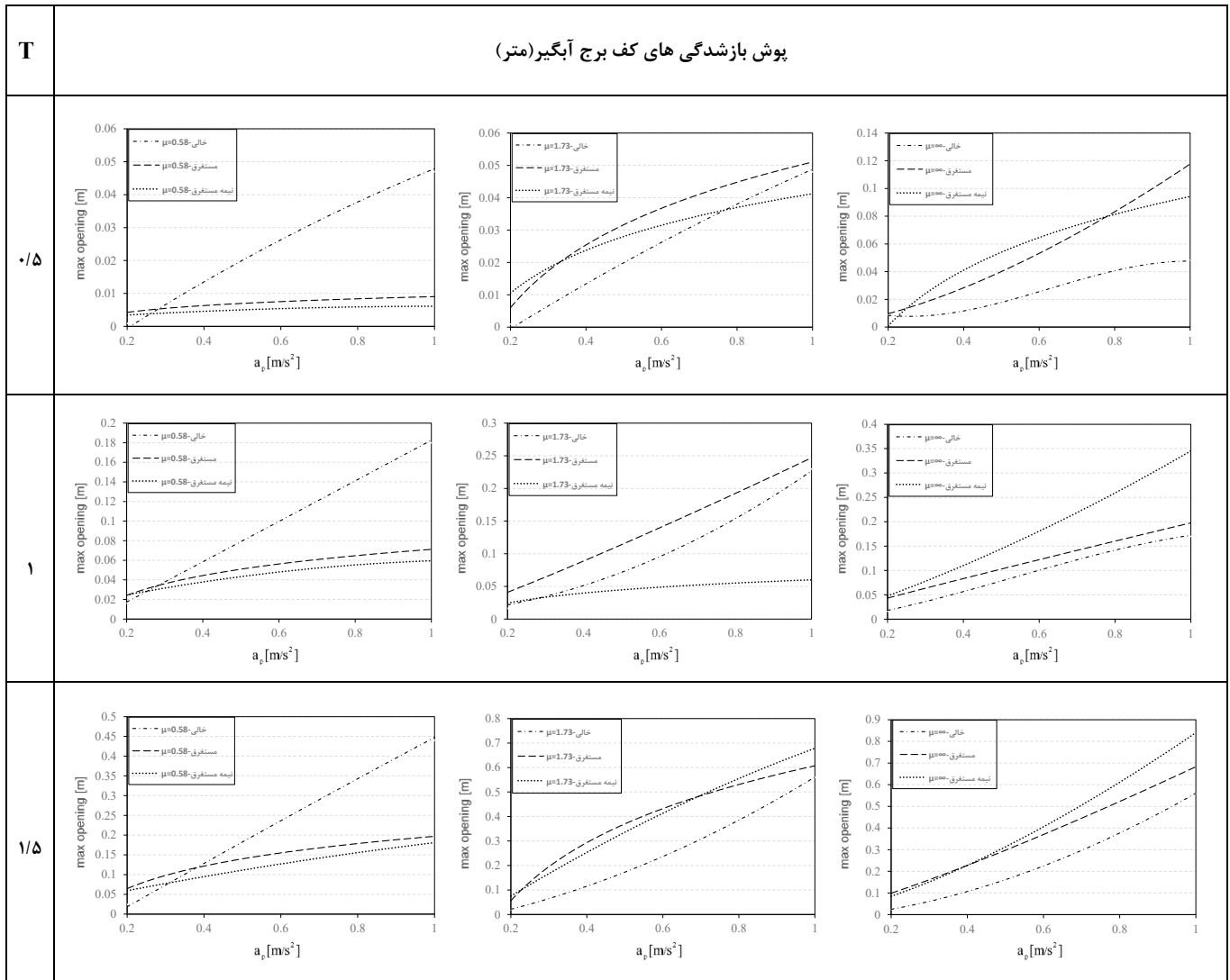


شکل ۱۵. پوش جابجایی های نسبی نوک برج آنگیر در حالات مختلف تحت سه پالس با زمان تناوب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه

Fig. 15. Envelope of tower's top relative displacement in different conditions under pulses with periods of 0.5, 1.0 and 1.5 sec

از ۱/۵ ثانیه شده است. تحت پالس ۰/۵ ثانیه مقادیر و روند تغییرات تغییر مکان برج تنهای مهارشده و برج آزاد-ایستا با ضریب اصطکاک ۰/۵۸ بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. همچنین تحت پالس ۱ ثانیه مقادیر و تغییرات تغییر مکان برج مستغرق مهارشده و برج آزاد-ایستا با ضریب اصطکاک ۱/۷۳ و بی نهایت بسیار بهم نزدیک هستند. با توجه به نمودارها پوش جابجایی برج مهارشده و تنها تحت پالس با زمان تناوب ۰/۵ ثانیه در تمامی حالات بیشتر از برج آزاد-ایستای تنها است و تحت پالس با زمان تناوب های ۱ و ۱/۵ ثانیه کمتر است. اضافه بر این بطور کلی با افزایش ضریب اصطکاک در سطح تماس برج و فونداسیون تغییر مکان نسبی نوک برج آزاد-ایستا در تمامی حالات

۰/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه به ترتیب ۳۸، ۸۰ و ۲۳۰ درصد افزایش یافته است. همچنین به علت عدم وجود منشا غیرخطی در سیستم، روند تغییرات تغییر مکان های نسبی برج مهارشده تنها و مستغرق بصورت خطی است اما بعلت وجود درز در کف برجهای آنگیر آزاد-ایستا، این تغییرات غیر خطی شده است. بطور کلی در تمامی حالات نشان داده شده در شکل با افزایش زمان تناوب و شدت پالس های لرزه ای مقادیر تغییر مکان نسبی افزایش یافته است، اما بعلت نزدیک بودن زمان تناوب طبیعی برج مهارشده تنها به زمان تناوب ۱ ثانیه، تحت پالس با این دوره تناوب، تشدید در پاسخ رخ داده است به همین سبب تغییر مکان برج مذکور تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه بیشتر



شکل ۱۶. پوش بازشدگی های کف برج آبیگر در حالات مختلف تحت سه پالس با زمان تناوب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه
Fig. 16. Envelope of tower's base opening in different conditions under pulses with periods of 0.5, 1.0 and 1.5 sec

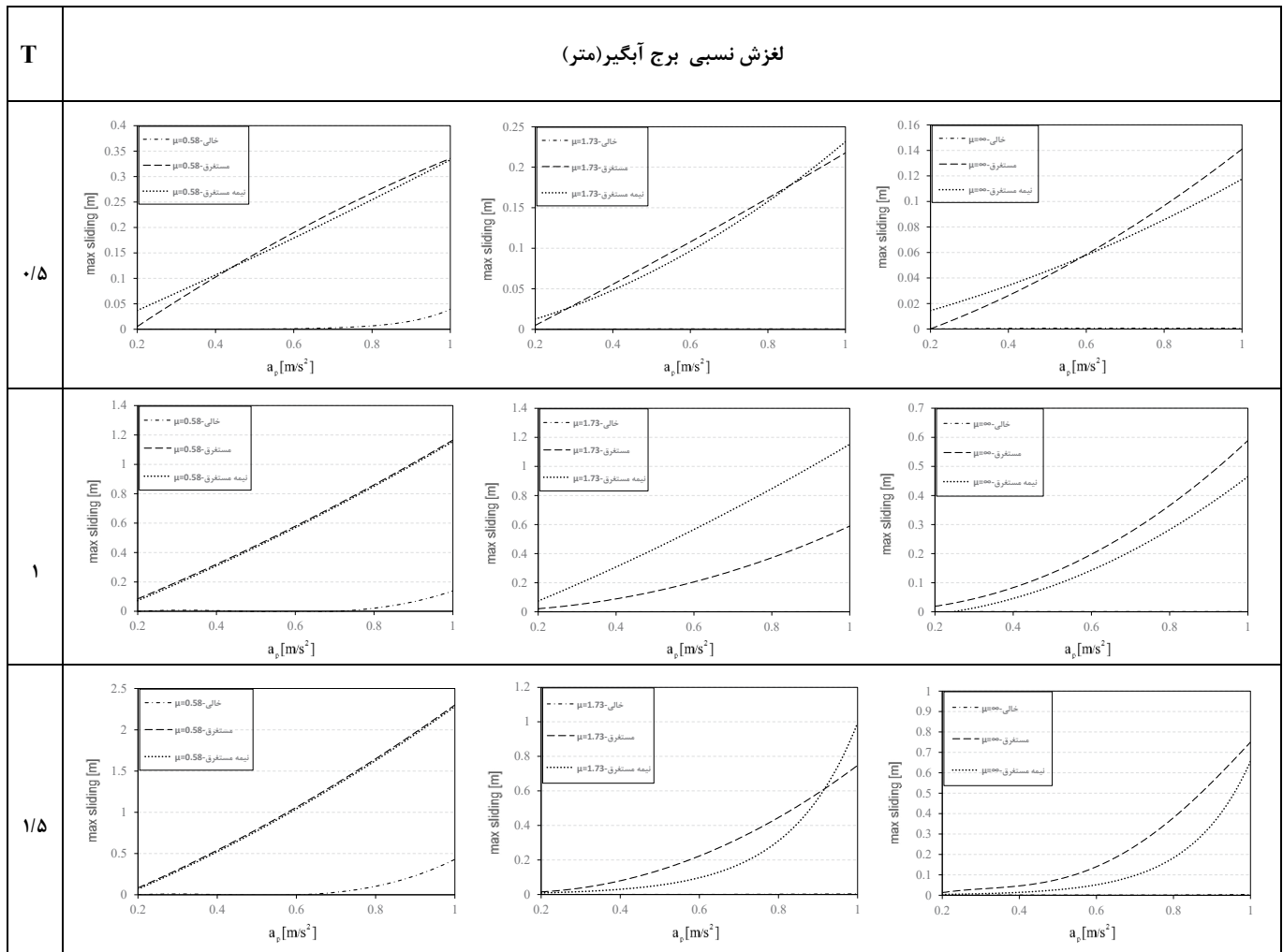
مختلف، تغییر مکان مکان برج مستغرق تحت برخی شدت‌ها بیشتر و تحت برخی دیگر کمتر از برج نیمه مستغرق شده است. بنابراین در مقایسه حالات مستغرق و نیمه مستغرق نمیتوان قضاوت مشخصی کرد. اما در بیش از ۸۰ درصد حالات تغییر مکان‌های برج مستغرق بیشتر یا برابر حالت نیمه مستغرق شده است.

با توجه به شکل و مقایسه پاسخ‌ها به ازای ضرایب اصطکاک مختلف میتوان به این نتیجه رسید که با افزایش ضریب اصطکاک میان کف برج و پی زیر آن مقادیر تغییر مکان نسبی نوک برج افزایش میابد. قابل ذکر است که این افزایش برای برج تنها برخلاف حالات مستغرق و نیمه مستغرق بسیار کم می‌باشد.

افزایش یافته است.

تغییر مکان‌های نسبی نوک برج آبیگر آزاد-ایستای تنها، با ضریب اصطکاک کف ۰/۵۸، بجز زمانی که تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت ۰/۲g تا ۰/۳g و زمان تناوب ۱/۵ ثانیه و شدت‌های ۰/۲g تا ۰/۴g قرار گرفته است، در تمامی حالات بیشتر از برج مستغرق و نیمه مستغرق است. در سایر حالات مقادیر آن کمتر از برج مستغرق و نیمه مستغرق گردیده است.

به ازای ضریب اصطکاک ۰/۵۸ به ازای تمام پالس‌ها، تغییر مکان برج مستغرق با اختلاف کمی بیشتر از برج نیمه مستغرق است. همچنین به ازای دو ضریب اصطکاک دیگر و پالس با زمان تناوب‌های



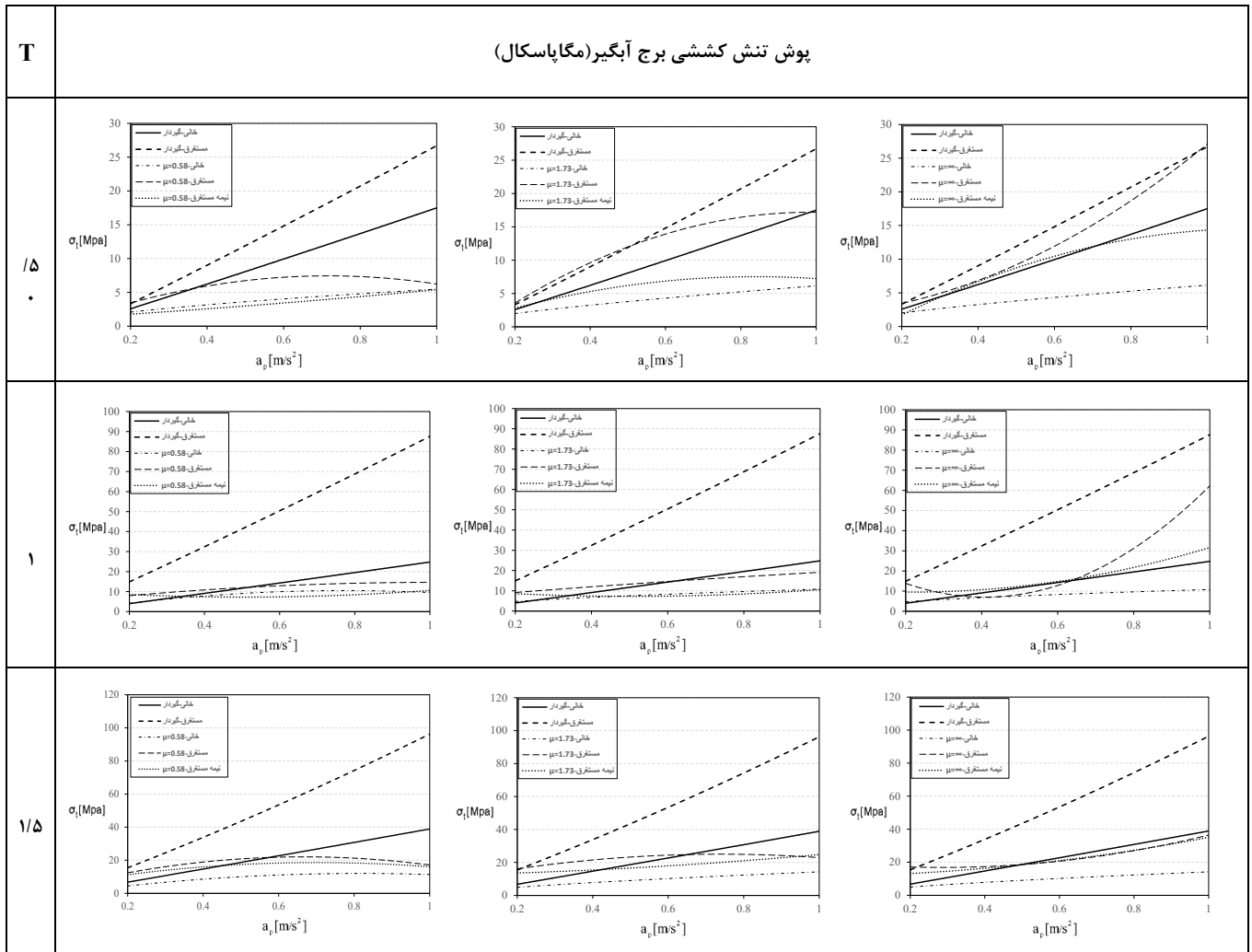
شکل ۱۷. پوش لغزش‌های نسبی برج آبگیر در حالات مختلف تحت سه پالس با زمان تناوب ۱/۵ و ۱ و ۰/۵ ثانیه

Fig. 17. Envelope of tower's base sliding in different conditions under pulses with periods of 0.5, 1.0 and 1.5 sec

این افزایش برای برج تنها برخلاف حالات مستغرق و نیمه مستغرق بسیار کم می‌باشد. میزان بازشدگی‌های کف برج آبگیر آزاد-ایستای تنها به ازای ضریب اصطکاک کف ۰/۵۸، بجز زمانی که تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت $0.2g$ تا $0.25g$ و زمان تناوب ۱/۵ ثانیه و شدت‌های $0.2g$ تا $0.3g$ قرار گرفته است، در تمام حالات بیشتر از برج مستغرق و نیمه مستغرق است. اما در سایر حالات عمدتاً کمتر از آنها می‌باشد. در مقایسه حالات مستغرق و نیمه مستغرق نیز در بیش از ۸۰ درصد حالات تغییر مکان‌های برج مستغرق بیشتر از حالت نیمه مستغرق شده است.

در شکل ۱۷ پوش لغزش نسبی برج آبگیر در شرایط مختلف تحت پالس با سه زمان تناوب و شدت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. با افزایش شدت و زمان تناوب در همه حالات میزان لغزش

در شکل ۱۶ پوش بازشدگی کف برج آبگیر در شرایط مختلف تحت پالس با سه زمان تناوب و شدت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل، به ازای ضریب اصطکاک ۰/۵۸ در تمامی حالات بجز شدت‌های کم، بازشدگی کف برج تنها بیشتر از برج مستغرق و نیمه مستغرق است و بازشدگی برج مستغرق با اختلاف کم بیشتر از نیمه مستغرق می‌باشد. اما به ازای ضریب اصطکاک ۱/۷۳ و بی نهایت، بازشدگی کف برج مستغرق بیشتر از برج آزاد-ایستای تنها است. همچنین به ازای ضریب اصطکاک بی نهایت در تمامی حالات بازشدگی کف برج نیمه مستغرق بیشتر از برج تنها است. با توجه به نمودارهای مقایسه بازشدگی‌ها به ازای ضرایب اصطکاک مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ضریب اصطکاک میان کف برج و پی زیر آن مقادیر بازشدگی کف برج افزایش می‌یابد.



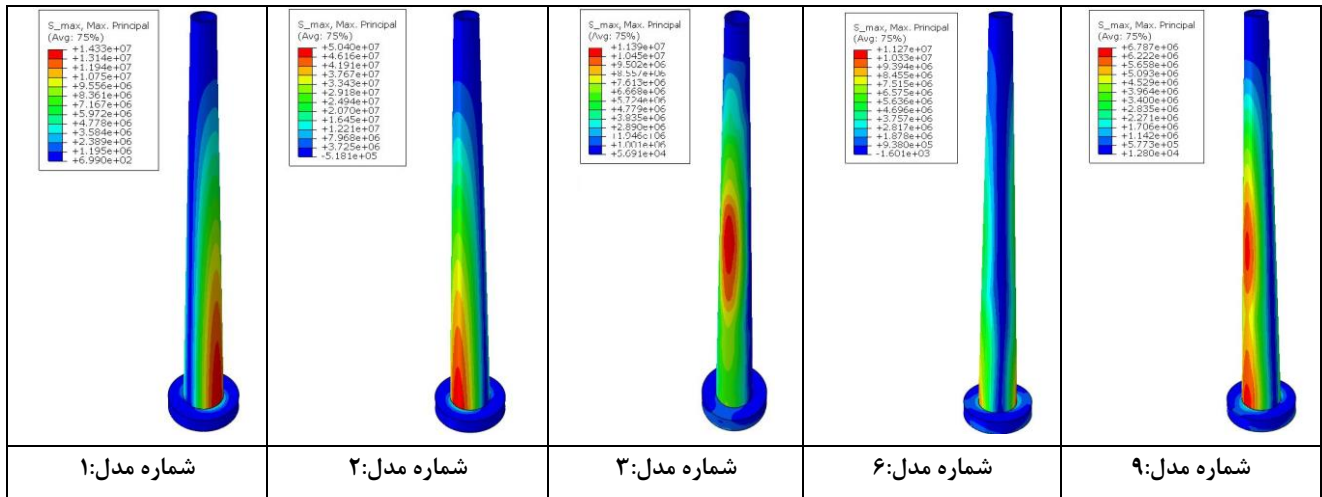
شکل ۱۸. پوش بیشینه تنش های کششی برج آبگیر در حالات مختلف تحت سه پالس با زمان تناوب ۱/۵ و ۱، ۰/۵ ثانیه

Fig. 18. Envelope of tower's maximum tensile stress in different conditions under pulses with periods of 0.5, 1.0 and 1.5 sec

پالس ۰/۵ ثانیه و اصطکاک ۱/۷۳ و بی‌نهایت نیز این مقادیر تقریباً با هم برابرند. تحت پالس ۱ ثانیه و ضریب اصطکاک ۱/۷۳ پوش لغزش برج نیمه مستغرق بیشتر از پوش مستغرق شده است.

با توجه به شکل ۱۸ تنش‌های کششی بطور محسوسی در حالت آزاد-ایستا کاهش یافته است. در حالت عدم وجود آب بیشترین مقدار کاهش مربوط به برج تنها با اصطکاک کف ۰/۵۸ تحت پالس با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه است که تنش‌ها ۶۷٪ نسبت به برج تنها مهارشده کاهش داشته است و در حالت مستغرق نیز بیشترین مقدار کاهش مربوط به برج مستغرق با اصطکاک کف ۰/۵۸ تحت پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه است که تنش‌ها ۸۲٪ نسبت به برج مستغرق مهارشده کاهش داشته است. در حالت آزاد-ایستا به دلیل وارد شدن برج

برج افزایش یافته است. تحت پالس با زمان تناوب‌های ۰/۵ و ۱/۵ ثانیه، بیشترین مقادیر لغزش بترتیب ۳۴، ۱۱/۶ و ۲۳ سانتی متر می‌باشد که مربوط به حالت مستغرق با ضریب اصطکاک ۰/۵۸ است. لغزش برج آبگیر تنها، با اصطکاک ۰/۵۸ تا شدت ۰/۸ g صفر است و با اصطکاک ۱/۷۳ و بی‌نهایت، تحت تمام شدت‌ها برابر صفر است. پوش لغزش نسبی برج مستغرق و نیمه مستغرق با ضریب اصطکاک کف ۰/۵۸ تقریباً با یکدیگر برابر هستند و در تمام حالات با افزایش ضریب اصطکاک از ۰/۵۸ تا بی‌نهایت لغزش برج کاهش پیدا کرده است. پوش لغزش برج آبگیر تنها، در تمام حالات کمتر از برج مستغرق و نیمه مستغرق است. پوش لغزش برج مستغرق و نیمه مستغرق با ضریب اصطکاک ۰/۵۸ تقریباً با یکدیگر برابر است. همچنین تحت



شکل ۱۹. کانتور پوش تنش های کششی بیشینه برج آبگیر بریونس تحت پالس سینوسی با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت $0.6g$

Fig. 19. Envelope contour of maximum tensile stress of Brions intake tower under sine pulse with period of 1 sec and intensity of $0.6g$

برج مستغرق به ترتیب ۱۹،۱۰ درصد افزایش و با افزایش از $1/73$ به بی‌نهایت برای برج مستغرق و نیمه مستغرق به ترتیب 252.1 درصد و 200.10 درصد رشد داشته است. در نهایت تحت پالس با زمان تناوب $1/5$ ثانیه، با افزایش ضریب اصطکاکی از $0/58$ به $1/73$ ، کمترین و بیشترین مقادیر یاد شده به ترتیب 50.23 درصد و 29.4 درصد افزایش و با افزایش از $1/73$ به بی‌نهایت به ترتیب 41 درصد و 33.1 درصد رشد داشته است.

با توجه به شکل ۱۹، محل پوش تنش‌های کششی بیشینه برج مهارشده مستغرق تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت $0/6g$ در سمت چپ محل اتصال بدنه و پایه برج است و برای برج مهارشده تنها، در سمت راست آن ایجاد شده است. همچنین برای برج مهارشده مستغرق تحت پالس با زمان تناوب‌های $0/5$ و $1/5$ ثانیه و شدت‌های مختلف به ترتیب در سمت چپ و دو طرف محل اتصال پایه به بدنه برج می‌باشد و برای برج مهارشده تنها، محل پوش تنش‌های کششی تحت پالس با زمان تناوب‌های $0/5$ و $1/5$ ثانیه به ترتیب در سمت راست و دو طرف محل اتصال ایجاد شده است.

همچنین با توجه به شکل ۱۹ پوش تنش‌های کششی بیشینه برج تنها، با اصطکاک کف $0/58$ و تحت بارگذاری یاد شده در وسط بدنه برج ایجاد شده و برای برج مستغرق با شرایط مشابه در دو طرف محل اتصال پایه به بدنه ایجاد شده است، همچنین برای برج نیمه مستغرق نیز در محل اتصال و وسط بدنه برج ایجاد شده است. پوش تنش‌های

آبگیر به مود حرکت گهواره‌ای انرژی جنبشی از طریق ضربه وارد کل بدنه برج شده و مستهلک می‌گردد. اما در حالت مهارشده بخش زیادی از این انرژی در پایه برج متمرکز می‌گردد و استهلاک انرژی در این حالت ناچیز است. به همین دلیل میزان نیروی برشی و خمشی در پایه برج بطور اساسی زیاد می‌باشد. در حالت کلی با افزایش ضریب اصطکاک تنش‌های برج آزاد-ایستا به مقادیر تنش‌های برج مهارشده نزدیک می‌شود ولی نکته قابل توجه آن است که در حالت عدم وجود آب با افزایش ضریب اصطکاک، مقدار کاهش تنش نسبت به حالت مهارشده بسیار جزئی است اما در حالت مستغرق قابل توجه است. بطور کلی با افزایش عمق در تمام مدل‌ها تنش‌های کششی افزایش یافته است. همچنین بطور کلی و با صرف نظر از موارد معدودی، با افزایش شدت و زمان تناوب تنش کششی افزایش داشته است.

با افزایش ضریب اصطکاک، تنش‌های کششی برج آزاد-ایستا تنها، تغییرات خیلی کمی داشته اما برج مستغرق و نیمه مستغرق با تغییرات محسوسی روبرو شده است به طوری که تحت پالس با زمان تناوب $0/5$ ثانیه، با افزایش ضریب اصطکاک از $0/58$ به $1/73$ ، کمترین و بیشترین مقادیر پوش تنش کششی برج مستغرق و نیمه مستغرق به ترتیب 139.17 درصد و 38.36 درصد افزایش و با افزایش از $1/73$ به بی‌نهایت به ترتیب 59.11 درصد و 113.1 درصد رشد داشته است. تحت پالس با زمان تناوب ۱ ثانیه، با افزایش ضریب اصطکاک از $0/58$ به $1/73$ ، کمترین و بیشترین مقادیر پوش تنش کششی

۵- در حالتی که برج در پایه مهار شده است پوش بیشینه تنش‌های کششی در نیمه پایینی ارتفاع برج و در محل اتصال بدنه برج به پایه آن قرار دارد اما در حالت آزاد-ایستا تنها و نیمه مستغرق عمدتاً از محل اتصال پایه به بدنه برج تا وسط ارتفاع آن امتداد یافته است و در حالت مستغرق این تنش‌ها تا حدود ۱۲ متری نوک برج پیشروی می‌کند.

۶- وقوع حداکثر تنش‌های کششی در نزدیکی لبه پایینی پایه برج بسیار غیر محتمل است و تنها به ازای پالس با شدت‌های بیشتر از $g/0.8$ رخ داده است.

۷- در جدول زیر پاسخ‌های واژگونی برج آنگیر آزاد-ایستا بطور خلاصه در حالت‌های مختلف و صرف نظر از تعداد محدودی از حالات نقض کننده مقایسه شده است. تغییر مکان نسبی نوک برج تنها و بازشدگی کف آن، تنها به ازای ضریب اصطکاک 0.58 بیشتر از حالت مستغرق و نیمه مستغرق است و به ازای ضریب اصطکاک $1/73$ و بی‌نهایت کمتر از حالات یاد شده است. بطور کلی لغزش برج، با افزایش عمق بیشتر شده است و برج تنها، به ازای ضرایب اصطکاک $1/73$ و بی‌نهایت، نمی‌لغزد. با توجه به جدول تنش‌های کششی برج مستغرق و نیمه مستغرق با ضرایب اصطکاکی مختلف بیشتر از برج تنها است.

| تغییر مکان نسبی نوک برج | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| $\mu=0.58$ | نیمه مستغرق > مستغرق > تنها |
| $\mu=1/73$ | مستغرق < نیمه مستغرق < تنها |
| $\mu=\infty$ | مستغرق \approx نیمه مستغرق < تنها |
| بازشدگی کف برج | |
| $\mu=0.58$ | نیمه مستغرق > مستغرق > تنها |
| $\mu=1/73$ | مستغرق < نیمه مستغرق < تنها |
| $\mu=\infty$ | مستغرق \approx نیمه مستغرق < تنها |
| لغزش نسبی | |
| $\mu=0.58$ | مستغرق \approx نیمه مستغرق < تنها |
| $\mu=1/73$ | مستغرق < نیمه مستغرق < $0 =$ تنها |
| $\mu=\infty$ | مستغرق < نیمه مستغرق < $0 =$ تنها |
| تنش‌های کششی | |
| 0.58 تا | مستغرق < نیمه مستغرق < تنها |
| $\mu=\infty$ | |

کششی بیشینه در حالت خشک و نیمه مستغرق اکثراً در نیمه پایینی ارتفاع برج قرار می‌گیرد این در حالی است که در حالت مستغرق پوش تنش‌های کششی تا نیمه بالایی ارتفاع برج پیشروی کرده است. ارتباط مشخصی میان الگوی ناحیه بیشینه تنش کششی در بدنه برج و پارامترهای پالس لرزه‌ای وجود ندارد ولی با افزایش زمان تناوب و شدت پالس، بیشینه تنش‌های کششی در نزدیکی لبه پایینی پایه برج ایجاد می‌گردد که تنها شامل: ۱- برج تنها با ضرایب اصطکاک 0.58 ، $1/73$ و بی‌نهایت تحت پالس با زمان تناوب‌های ۱ و $1/5$ ثانیه و شدت‌های $g/0.8$ تا ۱، ۲- برج مستغرق با ضریب اصطکاک بی‌نهایت تحت زمان تناوب ۱ ثانیه و شدت $g/0.8$ تا ۱ و تحت پالس با زمان تناوب $1/5$ ثانیه و شدت‌های $g/0.8$ تا ۱، ۳- برج مستغرق با ضریب اصطکاک $1/73$ تحت پالس با زمان تناوب $1/5$ ثانیه و شدت $g/1$ و ۴- برج نیمه مستغرق با ضریب اصطکاک بی‌نهایت و پالس با زمان تناوب $1/5$ ثانیه و شدت‌های $g/0.8$ تا ۱.

۶- نتیجه گیری

۱- تغییر مکان‌های نسبی نوک برج مهار شده مستغرق نسبت به برج مهار شده تنها، تحت زمان تناوب‌های 0.5 ، ۱ و $1/5$ ثانیه به ترتیب 38% ، 80% و 230% افزایش یافته است.

۲- بطور کلی با افزایش ضریب اصطکاک میان کف برج و پی زیر آن، مقادیر تغییر مکان نسبی نوک برج، بازشدگی کف برج و مقادیر تنش‌های کششی افزایش پیدا می‌کند. توجه شود که برای برج تنها، برخلاف برج مستغرق و نیمه مستغرق مقادیر افزایش یافته بسیار جزئی می‌باشد. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک میزان لغزش برج آنگیر کاهش پیدا کرده است.

۳- بطور کلی با افزایش شدت و زمان تناوب پالس‌های اعمالی، پاسخ‌های واژگونی افزایش پیدا می‌کند.

۴- در حالت آزاد-ایستا علاوه بر کاهش سختی در تکیه‌گاه برج، در اثر هر برخورد و ایجاد تغییر مکان‌های خمشی در بدنه برج بخش زیادی از انرژی به وسیله این مکانیزم اتلاف می‌شود. در نتیجه تنشها بصورت محسوسی نسبت به حالت مهار شده کاهش یافته است. مقدار کاهش تنش‌های کششی بیشینه در حالت مهار شده نسبت به آزاد-ایستا برای برج مستغرق بیشتر از برج خالی است بطوری که در حالت تنها، بیشترین کاهش تنش 67% و در حالت مستغرق 82% می‌باشد.

foundation interaction effects in dynamics of intake towers: earthquake responses.” *Journal of Structural Engineering* 1395-1386 :(1989) 115.6.

- [7] Sabatino, R., et al. “Nonlinear seismic assessment of lightly reinforced concrete intake towers.” *Ensuring reservoir safety into the future: Proceedings of the 15th Conference of the British Dam Society at the University of Warwick from 13–10 September 2008*. Thomas Telford Publishing, 2008.
- [8] Ravikumara. “A study on dynamic analysis of dam intake tower and foundation.” *National Institute of Technology Karnataka, India* (7308-2321):(2015).
- [9] Shariatmadar, Mirhaj. “Modeling of intake tower-reservoir-foundation interaction subjected to earthquake.”
- [10] MAKRIŠĆ, N., and YS ROUSSOSĆ. “Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions.” (1999).
- [11] Makris, Nicos, and Jian Zhang. “Rocking response of anchored blocks under pulse-type motions.” *Journal of engineering mechanics* 493-484 :(2001) 127.5.
- [12] M. Alembagheri, M.Seyedkazemi.,2013. Numerical Modeling of Concrete Gravity Dams by ABAQUS.(in Persian)
- [13] Abaqus version 4-6.14. Abaqus user’s manual, dassault systemes, simulia,2014.
- [14] Millan, M. A., Young, Y. L., & Prévost, J. H. (2009). Seismic response of intake towers including dam-tower interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(38), 329-307.
- [15] Goyal, A., & Chopra, A. K. (1989). Earthquake response spectrum analysis of intake-outlet towers. *Journal of engineering mechanics*, 7(115), 1433-1413.
- [16] Spyrakos, C. C., & Xu, C. (1997). Soil-structure-water interaction of intake-outlet towers allowed to uplift. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2(16), 159-151.
- [17] Xu, C., & Spyrakos, C. C. (1996). Seismic analysis of towers including foundation uplift. *Engineering structures*, 4(18), 278-271.
- [18] Alembagheri, M. (2016). Dynamics of submerged intake towers including interaction with dam and

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

- a شدت پالس ($\frac{m}{s^2}$)
 b عرض (m)
 E مدول یانگ ($\frac{N}{m^2}$)
 h ارتفاع (m)
 P پارامتر فرکانسی ($\frac{rad}{s}$)
 T زمان تناوب (s)

علائم یونانی

- ρ وزن مخصوص ($\frac{kg}{m^3}$)
 σ تنش نرمال ($\frac{N}{m^2}$)
 α لاغری (rad)
 μ ضریب اصطکاک

مراجع

- [1] Housner, George W. “The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes.” *Bulletin of the seismological society of America* 417-403 :(1963) 53.2.
- [2] Yim, Chik-Sing, Anil K. Chopra, and Joseph Penzien. “Rocking response of rigid blocks to earthquakes.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 8.6 565 :(1980).
- [3] Konstantinidis, Dimitrios, and Nicos Makris. “Experimental and analytical studies on the response of -4/1scale models of freestanding laboratory equipment subjected to strong earthquake shaking.” *Bulletin of earthquake engineering* 1477-1457 :(2010) 8.6.
- [4] Vassiliou, Michalis F, Kevin R. Mackie, and Božidar Stojadinović. “Dynamic response analysis of solitary flexible rocking bodies: modeling and behavior under pulse-like ground excitation.” *Earthquake engineering & structural dynamics* 1481-1463 :(2014) 43.10.
- [5] Liaw, C. Y., and Anil K. Chopra. *Earthquake Response of Axisymmetric Tower Structures Surrounded by Water*. No. EERC25-73-. california univ berkeley earthquake engineering research center, 1973.
- [6] Goyal, Alok, and Anil K. Chopra. “Hydrodynamic and

- Engineering & Structural Dynamics*, 11(23), 1237-1219.
- [20] Williams, A. N. (1991). Analysis of the base-excited response of intake-outlet towers by a Green's function approach. *Engineering Structures*, 1(13), 53-43.
- foundation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 119-108.
- [19] Daniell, W. E., & Taylor, C. A. (1994). Full-scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower. *Earthquake*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Hajirezaei, M. Alembagheri, *Overtuning response analysis of free-standing intake tower subjected to seismic pulses*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 1817-1836.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15670.5992](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15670.5992)



