



## مقاوم سازی لرزه ای تجهیزات مکعبی غیر سازه ای حساس در شرکت های نفت و گاز

محمد کجوری منش<sup>1</sup>، محمد علی هادیان فرد<sup>2</sup>، عبدالکریم الیاسی<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک شرکت ملی گاز ایران، فارس، ایران  
mohamadkojouri@yahoo.com

2-- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز، ایران  
hadianfard@sutech.ac.ir

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز، ایران  
eng.elyasia@yahoo.com

### چکیده

بیشتر تجهیزاتی که در ساختمان های فنی شرکتهای مخابرات، آب، برق، گاز، نفت و... بعنوان اجزای غیر سازه ای نظیر تجهیزات برقی، مکانیکی، مخابراتی، ارتباطی و... استفاده می شوند بلوکی شکل بوده و به صورت آزاد بر روی بستر خود در کف ساختمان و یا در سطح طبقات قرار دارند. در هنگام زلزله، واژگونی این اجزا علاوه بر قطع ارتباط، خسارت های بسیاری به مجموعه وارد می کند. تنها روش بکار رفته در برخی از ساختمان های حساس کشور، فیکسینگ این اجزا به کف و یا به دیوار جهت جلوگیری از واژگونی کامل می باشد. متأسفانه در مورد مدل های سه بعدی و دینامیک حرکتی آنها قدم های موثری در کشور برداشته نشده تا بر اساس نتایج آن بتوان مقاوم سازی لرزه ای مناسب را پیاده سازی نمود. در این مقاله دینامیک حرکتی یک بلوک مکعب مستطیلی صلب که بر روی سطح افقی واقع شده بصورت شبیه سازی نرم افزاری بدست آمده است. سطح زیرین این بلوک بر اثر ارتعاشات ناشی از زمین لرزه ای همچون زلزله بم دارای حرکتی در راستای افقی و عمودی است و کف مدل دارای ضریب اصطکاک کافی جهت ممانعت از حرکت انتقالی جسم می باشد، لذا بر اثر زمین لرزه بر روی یکی از چهار ضلع مستطیل و با بر روی یکی از چهار گوشه مستطیل خواهد چرخید. هدف از این مدل سازی بررسی پایداری بلوک مکعبی بر اثر نیروی اعمالی از طرف زمین لرزه می باشد. همچنین برای اولین بار با کمک یک سری فنر و کمک فنرهای الحاقی، پایداری سیستم را افزایش داده و میزان چرخش جسم را به حداقل می رسانیم که این مهم علاوه بر ممانعت از واژگونی جسم باعث حفظ کارایی و تداوم کارکرد صحیح آن می شود.

**واژه های کلیدی:** اجزای غیر سازه ای، آسیب پذیری لرزه ای، مهار اجزای غیر سازه ای، تجهیزات حساس شرکت گاز

### 1. مقدمه

در زمان زلزله، بسیاری از اجزای غیر سازه ای همانند تابلوهای برق، تجهیزات صنعتی و اداری و ... بر اثر نیروی زلزله دچار دوران و در نهایت واژگونی می گردند. در دههای قبل مطالعه بر روی پاسخ گذرای اجزای غیر سازه ای موجود در ساختمانهایی که در مناطق زلزله خیز بودند، برای بررسی پایداری آنها و کنترل صدمات وارده

آغاز گردیده است. ولی بیشتر مقالات چه با در نظر گرفتن اجزای غیر سازه ای مهار شده، چه مهار نشده بر اساس ساده سازی اشکال سه بعدی به مدل دو بعدی متقارن و با در نظر گرفتن نیروهای خارجی متفاوت پایه ریزی شده اند. در نتیجه مسئله از نظر ریاضیات به چرخش یک بعدی در چهار چوبهای متفاوت تبدیل می شود [1-2]. اما بیشتر موضوعات واقعی در زمینه مهندسی بصورت سه بعدی می باشند. هنگامی که چرخش در سه بعد به چرخش یک بعدی ساده سازی می شود، چرخش حول یک نقطه ثابت به چرخش حول یک محور ثابت تبدیل شده و مولفه های ممان اینرسی در راستاهای دیگر صرف نظر می گردند. یک جسم سه بعدی واقعی یک رفتار دینامیکی متفاوتی نسبت به مدل دو بعدی ساده شده خود دارد. ایجاد یک مدل سه بعدی با استفاده از تئوری چرخش حول یک نقطه در فضا بصورت 4 بعدی با در نظر گرفتن بعد چهارم زمان مورد نیاز می باشد. در مورد مدل های سه بعدی افرادی همچون آقایان یانهنگ و همکاران، لام و همکاران در سال 2008، پنا و همکاران در سال 2007، اگیدیو و همکاران در سال 2011 کارهای خوبی را انجام داده اند که تعداد این نمونه از فعالیتها به نسبت مدل های دو بعدی بسیار کم بوده و هر یک در مورد یک پروژه خاص مدل سه بعدی را مورد استفاده قرار داده اند. لازم بذکر است این پروژه ها بیشتر در راستای آسیب شناسی سیستم ها فعالیت داشته اند و در مورد روش های کاهش آسیب، فعالیت عمده ای انجام نداده اند. لذا وقت را غنیمت شمرده و با توجه به نیاز سازمان ها و صنایع کشور در زمینه مقاوم سازی لرزه ای این مطالعه بر روی تجهیزات حساس بلوکی شکل شرکت های نفت و گاز که نمونه ای از آن در شکل 1 آورده شده، صورت گرفته است [3-4].



شکل (1): نمونه ای از تجهیزات منصوبه در پایانه های راه دور مخابراتی (RTU) بعنوان اجزای غیر سازه ای

## 2. معادلات حاکمه

تجهیزات مختلف در ساختمان ها، اغلب از نظر مهندسی به صورت بلوکی شکل بوده و این تجهیزات با تقریب قابل قبولی به صورت صلب فرض می شوند. بلوک تجهیزات غیر سازه ای تحت تحریک جانبی احتمال دو

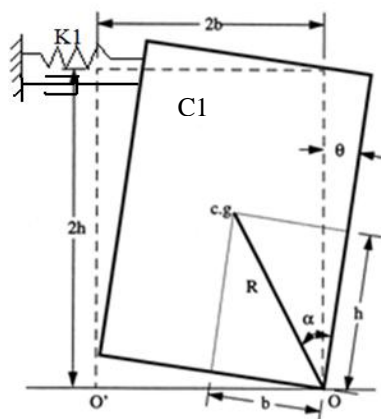
نوع پاسخ لغزش (Sliding) و دوران یا حرکت گهواره ای (Rocking) را خواهند داشت. تحت شتاب مثبت افقی زمین و با فرض کافی بودن ضریب اصطکاک بین کف جسم و سطح زمین به منظور جلوگیری از لغزش جسم، جسم شروع به چرخش در جهت مثبت می نماید. معادله این حرکت برای یلوک مستطیلی دو بعدی تحت شتاب افقی و عمودی زمین عبارت است از:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin[\alpha. \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{\ddot{x}_g}{g} \cos[\alpha. \text{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)] \right\} \quad (1)$$

که در آن  $p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$  پارامتر فرکانس حرکتی بلوک می باشد [5-6]. اگر تجهیزات بلوکی شکل را از یک طرف مهار نماییم، می توان مهار استفاده شده را بصورت یک فنر و دمپر مدل سازی نمود که در این صورت مدل قبل بصورت شکل 2 درآمده و بر این اساس معادله (1) بصورت معادلات (2) و (3) در می آید که در این صورت میزان چرخش کم شده و ارتعاشات نیز میرا می گردد [7].

$$\sum M_{O'} = 0, \theta < 0 \Rightarrow I\ddot{\theta} + mgR\sin(-\alpha - \theta) + 2kh\theta(2h) + 2c\dot{\theta}(2h) = -m\ddot{x}_g R \cos(-\alpha - \theta) \quad (2)$$

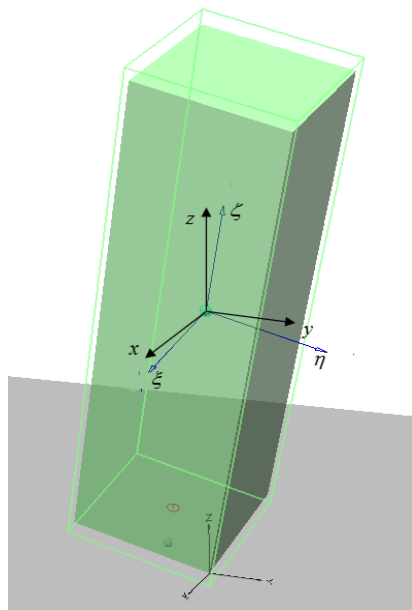
$$\sum M_O = 0, \theta > 0 \Rightarrow I\ddot{\theta} + mgR\sin(\alpha - \theta) + 2kR\theta(2R) + 2cR\dot{\theta}(2R) = -m\ddot{x}_g R \cos(\alpha - \theta) \quad (3)$$



شکل (2): مدل دو بعدی از تجهیزات بلوکی شکل مهار بندی شده بصورت فنر و دمپر

در مدل سه بعدی مسئله به مراتب پیچیده تر می گردد. لذا با توجه به نمونه ای از پایانه های ارتباطی که در شکل 1 آمده است، بلوک مکعبی با جرم  $m=200$  کیلوگرم و ارتفاع مرکز جرم از کف  $h=2$  متر که در شکل 3 نشان داده شده است را در نظر بگیرید. این بلوک صلب فرض شده و در ابتدای اعمال نیروی زمین لرزه با زمین بصورت کامل از کف در تماس می باشد. حالت چرخش از زمانی که این بلوک صلب از زمین بلند می شود شروع می گردد. در این حالت معادله حرکت جسم صلب بهتر است در چهارچوب  $(\xi - \eta - \zeta)$  که موازی با

محورهای بلوک است و مرکز آن نقطه برخورد بلوک با زمین می باشد را در نظر بگیریم. برای جابجایی از محور مختصاتی XYZ به  $(\xi - \eta - \zeta)$  نیاز به استفاده از زوایای اوپلری می باشد [8].



شکل (3): مدل سه بعدی بلوک مهار بندی نشده در اثر اعمال نیروی زلزله

با استفاده از زوایای اوپلری، ابتدا چرخشی به اندازه  $\phi$  بصورت پاد ساعتگرد حول محور X شروع کرده سپس چرخش دوم به اندازه  $\theta$  حول محور  $y'$  و شکل پاد ساعتگرد و در نهایت چرخش سوم به اندازه  $\psi$  بشکل پاد ساعتگرد حول محور  $\zeta$  انجام می دهیم تا چهارچوب جدید  $(\xi - \eta - \zeta)$  ایجاد شود. لذا ماتریس انتقال بین دو چهارچوب XYZ و  $(\xi - \eta - \zeta)$  بصورت زیر می توان نمایش داد:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{\xi} \\ \hat{i}_{\eta} \\ \hat{i}_{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \\ \hat{i}_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

سرعت زاویه ای بلوک بر اثر این دوران را بصورت زیر می توان نشان داد:

$$\bar{\omega} = \dot{\phi} \hat{k}_x + \dot{\theta} \hat{n}_{y'} + \dot{\psi} \hat{k}_{\zeta} = \dot{\phi} [\cos \theta (\cos \psi \hat{i}_{\xi} - \sin \psi \hat{j}_{\eta}) + \sin \theta \hat{k}_{\zeta}] + \dot{\theta} (\sin \psi \hat{i}_{\xi} + \cos \psi \hat{j}_{\eta}) + \dot{\psi} \hat{k}_{\zeta} \quad (5)$$

که با ساده سازی انجام شده بر روی این فرمول خواهیم داشت:

$$\bar{\omega} = (\cos \theta \cos \psi \dot{\varphi} + \sin \psi \dot{\theta}) \hat{i}_{\xi} + (-\cos \theta \sin \psi \dot{\varphi} + \cos \psi \dot{\theta}) \hat{j}_{\eta} + (\sin \theta \dot{\varphi} + \dot{\psi}) \hat{k}_{\zeta} \quad (6)$$

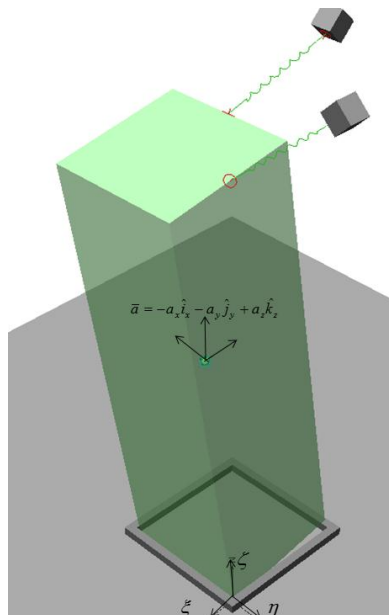
بردار  $\bar{r}_{PG}$  همانند فرمول 4 برابر است با  $\bar{r}_{PG} = \theta_3 \times \theta_2 \times \theta_1 \times \bar{r}_{0PG}$  و سرعت مرکز جرم بلوک نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$\bar{V}_G = \frac{d\bar{r}}{dt} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial \psi} \dot{\psi} + \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} \quad (7)$$

همچنین ممان اینرسی بلوک حول مرکز جرم بدین شکل می باشد:

$$I_0 = \frac{m}{12} \begin{bmatrix} b^2 + h^2 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 + h^2 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 + b^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

نمونه ای از مهار بندی انجام شده بر روی مدل سه بعدی بلوک به کمک 2 عدد فنر و کمک فنر را در شکل 4 می توان دید که به کمک این اجزای الحاقی با افزایش پایداری سیستم، میزان لرزه و چرخش سیستم بشدت کاهش یافته و سیستم حتی در لرزه های شدید از کار نمی افتد.



شکل (4): مدل سه بعدی بلوک مهار شده با فنر و کمک فنر در اثر اعمال نیروی زلزله

برای بررسی این موضوع و محاسبه معادله حرکت جسم می توان از معادله اویلر-لاگرانژ بصورت زیر استفاده نمود:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial q_i} = Q_i \quad (9)$$

در این معادله  $L$  مقدار لاگرانژین (تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل)،  $R$  انرژی اتلاف شده از سیستم،  $Q$

نیروهای تعمیم یافته اعمال شده به سیستم و  $q$  درجات آزادی سیستم که همان سه زاویه چرخش هستند می باشد. جهت محاسبه لاگرانژین مسئله و معادله اویلر-لاگرانژ، نیاز به دانستن میزان انرژی جنبشی جسم، انرژی پتانسیل گرانشی و دو فنر الحاقی، انرژی اتلافی توسط کمک فنرها و نیروی خارجی زلزله می باشد. بر این اساس انرژی جنبشی برابر است با:

$$T = \frac{1}{2} \omega \cdot (I_0 \cdot \omega) + \frac{1}{2} mV^2 \quad (10)$$

مقدار انرژی پتانسیل نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$U = mg\hat{k}_z + \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 x_2^2 \quad (10)$$

انرژی اتلافی توسط دو عدد کمک فنرهای الحاقی به سیستم برابر است با:

$$R = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 \dot{x}_2^2 \quad (11)$$

و زلزله وارد شده به سازه را می توان بصورت نیرویی بشکل  $\bar{F} = m\bar{a}$  با لحاظ شتاب خارجی مسئله نسبت به درجات آزادی آن طبق فرمول 9 مشتق گرفته تا سه معادله مرتبه دو بر حسب سه درجه آزادی چرخش حول سه محور بدست آید و پس از آن، با حل عددی مسئله بصورت زیر می توان میزان چرخش جسم در سه جهت را در هر لحظه محاسبه نمود:

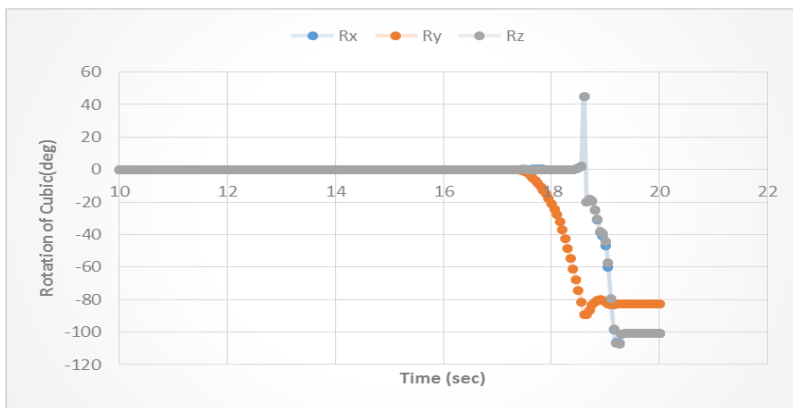
$$\ddot{\theta}(i) = \frac{\theta(i+1) - 2\theta(i) + \theta(i-1)}{dt^2} \quad (12)$$

$$\theta_{i+1} = \ddot{\theta}_i \times dt^2 + 2 \times \theta_i - \theta_{i-1}$$

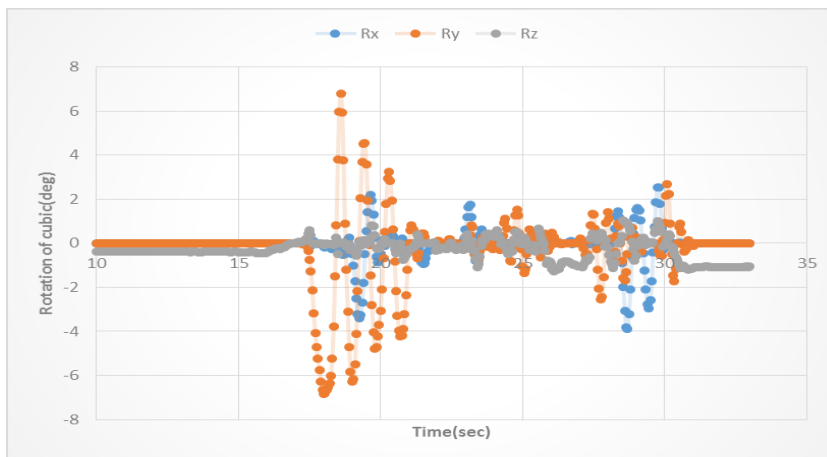
### 3. مدلسازی و حل معادلات

با استفاده از معادلات حرکتی فوق، رفتار بلوک را بر اثر زمین لرزه بم در سه جهت مختصاتی محاسبه کرده تا واژگونی یا عدم واژگونی این بلوک در برابر زلزله مشخص گردد. برای این کار از حل عددی استفاده می گردد و پس از آن با توجه به میزان چرخش و احتساب حداکثر چرخش 3 درجه برای کارکرد صحیح جسم و با توجه به معادلات حل شده یک سری فنر و کمک فنر با مشخصات معلوم به سیستم اضافه نموده تا علاوه بر

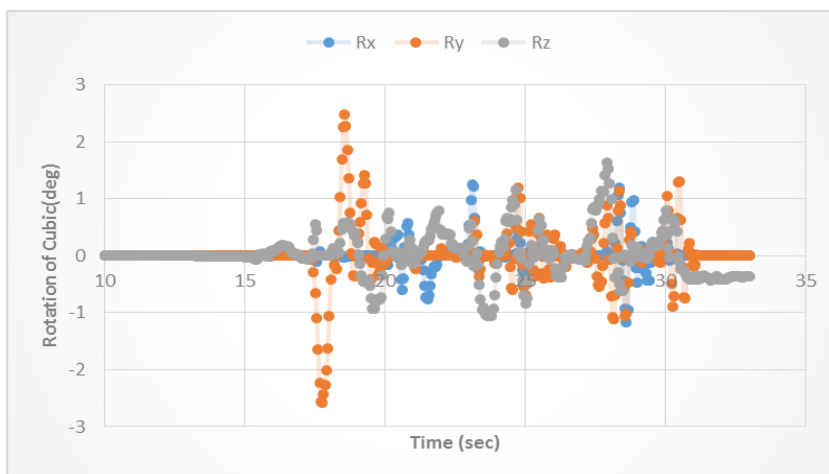
افزایش پایداری، باعث ممانعت از واژگونی تجهیزات و قطع ارتباطات شود. بر این اساس نتایج حاصل در سه حالت عنوان شده بصورت زیر می باشد:



شکل (5): میزان چرخش بلوک بدون اعمال فنر و کمک فنر الحاقی در اثر نیروی زلزله بم



شکل (6): میزان چرخش بلوک با اعمال فنر الحاقی در اثر نیروی زلزله بم



شکل (7): میزان چرخش بلوک با اعمال فنر و کمک فنر الحاقی در اثر نیروی زلزله بم

#### 4. خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به زلزله خیز بودن بیشتر مناطق کشور و عدم فیکسینگ مناسب تجهیزات بلوکی حساس ارتباطاتی موجود در شرکت های نفت و گاز، واژگونی این تجهیزات دور از انتظار نمی باشد که نمودار شکل 5 این موضوع را بخوبی نشان می دهد. برای جلوگیری از این اتفاق می توان از سیستم های جاذب ارتعاش استفاده نمود. بر این اساس اگر از سیستم فنری بهره برد تجهیزات واژگون نگردیده ولی میزان چرخش آن بیشتر از 5 درجه می شود که این مسئله احتمال پرتاب قطعات داخلی تجهیزات به بیرون و قطع ارتباط در تجهیزات را بدنبال خواهد داشت. اگر از سیستم فنر و کمک فنر استفاده شود علاوه بر کاهش میزان ارتعاش به کمتر از 3 درجه، سیستم در برابر زلزله آسیبی ندیده و کارایی خود را حفظ می کند. لذا پیشنهاد می گردد از فنر و کمک فنرهای الحاقی به صورت بهینه در سالن ها و کانکس های ارتباطی شرکت های نفت و گاز جهت پیشگیری از ایجاد حادثه در هنگام زلزله استفاده شود.

#### 5. مراجع

- [1] Yang, Y.B., Hung, H. and He. M.J., Sliding and Rocking Response of Rigid Blocks Due to Horizontal Excitations, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 9, No. 1, pp 1-16, 2000.
- [2] Aslam, M., Godden, W.G. and Scalise, D. T., Earthquake rocking response of rigid bodies, *J. Eng. Mech. Div. ASCE* 106, pp 377-392, 1980.
- [3] Egidio, A., Contento, A., and Zulli, D., Dynamics of 3D non-symmetric rigid bodies resting on a horizontal surface, *Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno*, University of L'Aquila, Italy, 2012.



- [4] Makris, N., Zhang, J., *Rocking Response and Overturning of Anchored Equipment Under Seismic Excitations*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1999.
- [5] Prieto, F., Lourenc, P.B., CamposCosta A., and Lemos J.V., On the dynamics of rocking motion of single rigid-block structures,” *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2007; 36:2383–2399, 2007.
- [6] کلانتری، ا. و شهبازی، و.، مطالعه آسیب پذیری لرزه ای اجزای غیر سازه ای موجود در ساختمان ها، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، 1387.
- [7] هادیان فرد، م. و الیاسی، ع. و کجوری منش، م.، بررسی آسیب پذیری لرزه ای تجهیزات مخابراتی بعنوان اجزای غیر سازه ای، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، 1392.
- [8] Yanheng, L., Baoping, Sh., *Response of 3D Free Axisymmetrical Rigid Objects under Seismic Excitations*, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, 2008.