

Dynamic analysis of steel chimney considering rotational components of earthquake

Ehsan Teymouri¹, Hosein Bayat², Javad Moradloo^{2*}

1- PhD student, Dep. of Civil Engineering, School of Engineering, University of Zanajn, Iran

2- Assistant Professor, Dep. of Civil Engineering, School of Engineering, University of Zanajn, Iran

ABSTRACT

The present study deals with dynamic analysis of steel chimney taking rotational components of earthquake into account. The translational components of the earthquake have been used in order to obtain the rotational components of the earthquake, based on the intersecting isotropic elastic wave propagation. For this purpose, a transitional component of ground motion using frequency discrete Fourier transformed to discrete frequency and G value for each frequency determined. Then, the incident angle of the wave was calculated for each frequency. After determining the incident angle, Fourier spectrums of rocking and torsion components of ground motion were calculated. Finally, the inverse of Fourier conversion time histories of rocking and torsion components of ground motion were calculated. In order to verify the proposed methodology, the rotational components of San Fernando Earthquake were determined based on the proposed model and compared to Li and Liang's results. Then, the rotational components of San Fernando, Tabas and Taft were calculated based on the proposed model and the results were used in dynamic analysis of the steel chimneys. Finally, dynamic analyses of three model of steel chimney are presented to evaluate the effects of combined translational and rotational components on the seismic response of the dam. The deduced results show that the maximum values of displacement, stresses and shear force and also, the distribution of them have changed significantly. On the other hand, the magnitudes of these responses for different earthquakes with respect to the frequency of rotational components and the dominant frequency of the earthquake are different. The results indicate that the effects of earthquake rotational components on the dynamic response of steel chimneys are very significant. Therefore, consideration of the rotational components in the analysis of existing steel chimneys and the design of new chimneys is essential.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 February 2019

Revise Date: 04 March 2019

Accept Date: 01 May 2019

Keywords:

Seismic Analysis

Steel chimney

Rotational components

Earthquake

Finite element method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.170911.1776

*Corresponding author: Javad Moradloo

Email address: ajmoradloo@znu.ac.ir

تحلیل دینامیکی دودکش های فولادی با احتساب مولفه های دورانی زمین لرزه

احسان تیموری^۱، حسین بیات^۲، جواد مرادلو^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

چکیده

در این تحقیق اثر مولفه های دورانی ناشی از زمین لرزه بر رفتار دینامیکی خطی دودکش های فولادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در این مطالعه ابتدا مولفه های دورانی ناشی از چهار زمین لرزه با استفاده از مولفه های انتقالی و در نظر گرفتن سرعت امواج وابسته به فرکانس به دست آمده است. در ادامه برای بررسی اثرات این مولفه ها بر پاسخ دینامیکی دودکش های فولادی، شش مدل دودکش فولادی با ارتفاع های مختلف تحت بارگذاری مولفه های چهار زلزله متفاوت در حالات اعمال مولفه های دورانی و انتقالی بصورت همزمان و اثر تنها مولفه های انتقالی تحت تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی تحلیل های لرزه ای حاکی از آن است که مقادیر بیشینه تغییرمکان ها، تنش ها و برش پایه دچار تغییرات بسزایی شده و محل رخداد ماکزیمم پاسخ ها دچار تغییر شده است. همچنین نتایج نشان از تاثیر مولفه های دورانی بر پاسخ سازه ها با افزایش ارتفاع، و نزدیکی فرکانس غالب مولفه دورانی و فرکانس غالب سازه دارد به طوریکه در برخی موارد اعمال مولفه های دورانی باعث کاهش میزان پاسخ ها شده و در مواردی با نزدیک تر شدن فرکانس این مولفه ها و فرکانس غالب سازه و نیز افزایش ارتفاع سازه مقدار پاسخ ها بصورت قابل توجهی افزایش می یابد. این نتایج نشانگر اهمیت احتساب مولفه های دورانی زمین لرزه در آنالیز و طراحی این نوع از سازه ها می باشند.

کلمات کلیدی: تحلیل لرزه ای، دودکش فولادی، مولفه های دورانی، زمین لرزه، فرکانس غالب زلزله، فرکانس سازه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.170911.1776	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.170911.1776	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۳۹۷/۱۲/۱۳	۱۳۹۷/۱۱/۱۶
جواد مرادلو ajmoradloo@znu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دودکش های صنعتی سازه های بسیار مهم و بلندی هستند که در صنایع مختلفی از جمله معادن، نفت، گاز، پتروشیمی و ... مورد استفاده قرار می گیرند. در طول دهه گذشته مطالعات بر روی دودکش های صنعتی به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده است که این مطالعات علاوه بر این که شامل مطالعه بر روی مفهوم سازه می باشد شامل مطالعه روی روش های مدلسازی، آنالیز، مصالح استفاده شده و روش های ساخت می باشند. دودکش ها سازه های بسیار مهم صنعتی برای خارج کردن گازها یا دودهای سمی از یک دیگ بخار، اجاق یا بخاری دیواری به یک تراز بالاتر که گازها نتوانند جو مجاور را آلوده کنند می باشند. این سازه ها بلند، باریک و معمولاً با مقطع عرضی دایروی می باشند. مصالح ساختمانی مختلفی اعم از بتن، فولاد یا مصالح سنگی برای ساختن دودکش ها استفاده شده است. دودکش های فولادی بصورت مطلوب مناسب پروژه کاری هستند که یک پریود بالاروندگی کوتاه و ظرفیت حرارتی کم مورد نیاز باشد. دودکش های فولادی برای ارتفاع های تا ۴۵ متر اقتصادی می باشند [۱]. اغلب در قرن ۱۸ دودکش های صنعتی مجاور یک دیگ بخار یا کوره صنعتی قرار می گرفتند و گازها به این دودکش ها با یک لوله دیگر انتقال می یافتند. دودکش ها با ارتفاع بیش از ۱۵۰ متر به عنوان دودکش های بلند در نظر گرفته می شوند. البته در دسته بندی دودکش ها به عنوان دودکش بلند، معیار ارتفاع به تنهایی ملاک دودکش بلند بودن نیست [۲]. ردی و همکاران روی آنالیز لرزه ای و بادی دودکش های بلند مطالعه کردند. در این مطالعه دو دودکش بتن مسلح برای بار زلزله و باد در IS ۱۸۹۳ در سال ۲۰۰۵ و IS ۴۹۹۸ در سال ۱۹۹۲ به ترتیب مورد آنالیز قرار گرفتند. مقایسه میان بارهای زلزله و باد باعث مشخص شدن بارهای بحرانی برای طراحی دودکش های پوسته ای شد [۳]. کیرتیکانتا و همکاران در سال ۲۰۱۳ اثرات وجود حفره بر روی تنش، تغییر مکان و اشکال مودی را در دودکش های فولادی مورد بررسی و آنالیز قرار دادند. نتایج کار آن ها نشان داد که اشکال مودی بصورت قابل ملاحظه ای برای حالت در نظر گرفتن حفره در مقایسه با عدم حضور آن متفاوت می باشد. همچنین دودکش بدون حفره دارای فرکانس های اصلی بیش تری در مقایسه با حالت حفره دار می باشد [۴]. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک دودکش فولادی را با در نظر گرفتن اثرات دما، باد، بار لرزه ای و با مرده مورد تجزیه تحلیل قرار دادند آن ها اشاره کردند که نیروی طراحی در یک دودکش بسیار حساس به پارامترهای هندسی آن مانند پایه و قطر بالای دودکش، ارتفاع دودکش، ضخامت پوسته دودکش و نیز حفره ای انتهای دودکش که به منظور بازرسی می باشد بستگی دارد. آن ها دو مدل دودکش، با در نظر گرفتن حفره پایه و بدون آن را با استفاده از نرم افزار ANSYS برای بار استاتیکی باد مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۵]. ساگار و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مطالعه تحلیلی را بر روی عملکرد لرزه ای دودکش های صنعتی فولادی و بتنی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی با استفاده از نرم افزار Sap2000 انجام دادند آن ها اثرات خاک ناحیه قرارگیری دودکش را بر روی برش پایه، ماکزیمم تغییر مکان جانبی و فرکانس اصلی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها اثرات نواحی مختلف را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج کار آن ها حاکی از اقتصادی بودن دودکش های فولادی نسبت به دودکش های بتنی بود [۶]. راکشیت و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک دودکش فولادی را بر اساس استاندارد هندوستان با هدف توصیف اهمیت محدودیت های هندسی در طراحی دودکش های فولادی مورد بررسی قرار دادند آن ها همچنین اثرات حفره های بازرسی را نیز در رفتار دودکش های فولادی مورد مطالعه قرار دادند [۷]. رکادی راما تحقیقی برای ارزیابی پاسخ دینامیکی دودکش های فولادی تحت بارهای زمین لرزه و باد برای سه تراز مختلف دودکش فولادی انجام دادند و بیشینه تغییر مکان جانبی و بیشینه تنش ها را با یکدیگر برای ترازهای ارتفاعی مختلف مورد بررسی قرار دادند [۸]. دشانند و جان در سال ۲۰۱۵ مطالعه ای برای ارزیابی رابطه متقابل پیکربندی هندسی و پاسخ دینامیکی دودکش های فولادی تحت بارهای لرزه ای و بادی انجام دادند. آن ها ۴۲ شکل مختلف دودکش فولادی را با ۷ ارتفاع مختلف مورد بررسی و آنالیز قرار دادند و رابطه میان پاسخ دینامیکی و هندسه حاکم بر دودکش را به دست آوردند [۹]. بابتا دوی و سینگ در سال ۲۰۱۶ رفتار لرزه ای اشکال مختلف

دودکش‌های فولادی برای چهار ناحیه لرزه‌ای متفاوت با ترازهای ارتفاعی مختلف را به منظور بررسی اینکه کدام یک از اشکال دودکش‌های فولادی تحت بارهای لرزه‌ای با توجه فرکانس اصلی و حداکثر انحراف پایدار است مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. کوماری و اسریدهار در سال ۲۰۱۷ یک مدل دودکش فولادی با ارتفاع ۶۰ متر را تحت بارهای باد و زمین‌لرزه برای ۴ ناحیه لرزه‌ای متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها حاکی از افزایش مقادیر لنگر خمشی با افزایش لرزه خیزی منطقه و نیز افزایش برش پایه داشت [۱۱]. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثرات نیروهای لرزه‌ای و باد را بر روی دودکش‌های فولادی با دو تراز ارتفاعی مختلف و در چهار ناحیه لرزه خیز و با سه سرعت معین برای باد مورد بررسی قرار دادند و مقادیر ماکزیمم نیروی برشی و لنگر خمشی توسعه یافته در دودکش‌های فولادی تحت اثر بارهای جانبی را بررسی کردند [۱۲]. کالپش و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر ارتفاع به قطر پایه و نیز قطر بالای دودکش‌های فولادی به قطر پایه را تحت اثر بارهای زلزله و باد مورد بررسی قرار دادند آن‌ها بدین منظور از ۴۹ مدل دودکش فولادی و ۷ مدل مختلف برای تراز ارتفاعی و قطر بالای دودکش استفاده کردند نتایج کار آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت قطر تاج دودکش به قطر پایه مقادیر برش پایه و تنش پایه افزایش می‌یابد و از طرفی باعث کاهش میزان تغییرمکان می‌شود [۱۳]. همانطوریکه در بالا اشاره شد مطالعات روی دودکش‌های صنعتی در دهه‌ی گذشته بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است اما این مطالعات اثرات ناشی از مولفه‌های دورانی زلزله را نادیده در نظر گرفته‌اند و آنالیز دودکش‌های فولادی تحت اثر مولفه‌های انتقالی زلزله و یا تحت بار باد صورت گرفته است. درحالت کلی جنبش زمین شامل سه مولفه حرکت انتقالی و سه مولفه حرکت دورانی می‌باشد. مولفه‌های انتقالی شامل دو مولفه افقی و یک مولفه قائم و مولفه‌های دورانی حرکت زمین شامل دو مولفه گهواره‌ای (حول محورهای افقی) و یک مولفه پیچشی (حول محور قائم) هستند. آنچه تاکنون در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله مرسوم بوده در نظر گرفتن اثر مولفه‌های انتقالی زلزله می‌باشد و مولفه‌های دورانی کمتر مورد توجه واقع شده‌اند که علت اصلی این امر کوچک دانستن دامنه ارتعاش مولفه‌های دورانی و نیز عدم امکان ثبت آنها با استفاده از دستگاه‌های استاندارد لرزه نگاری و نیز کوچک انگاشته شدن تاثیر آنها در سازه‌ها می‌باشد. در حالی که برای تعریف رفتار حرکتی واقعی در هر نقطه در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی نیز علاوه بر مولفه‌های انتقالی حرکت زمین مورد نیاز است. نیومارک [۱۴] به احتمال زیاد نخستین کسی است که روشی برای برآورد مولفه‌ی پیچشی زمین لرزه از مولفه‌های انتقالی حرکات زمین را ارائه کرد. در روش نیومارک سرعت انتشار موج ثابت فرض شده است. محققان زیادی مانند غفوری- آشتیانی و سینگ [۱۵]، تریفوناچ [۱۶]، لی و تریفوناچ [۱۷ و ۱۸]، کاستلانی و بوفی [۱۹ و ۲۰] مطالعاتی را بر اساس روش نیومارک [۱۴] بر روی مولفه‌های دورانی زمین انجام داده‌اند. نوری و همکاران [۲۱] مولفه‌ی پیچشی حرکت زمین را با استفاده از روش‌های مشتق‌زمانی، ژئودتیک و تفاضل محدود برآورد کردند و نتایج حاصل از این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. یک روش بهبود یافته توسط هونگنان لی و همکاران [۲۲] که اثر امواج P, SV و SH را در نظر می‌گیرد معرفی شد. در روش آن‌ها برای برآورد تاریخیچه زمانی مولفه‌های دورانی در هر فرکانس، فرکانس به سرعت موج و زاویه برخورد امواج وابسته است. لی و لیانگ [۲۳] مولفه‌های دورانی زلزله سن‌فرناندو را با استفاده از روش هونگنان لی [۲۲] برآورد کردند. کلانی ساراکلانی و همکاران [۲۴] از روش هونگنان لی [۲۲] برای برآورد مولفه‌های دورانی زلزله استفاده کردند. کلانی ساراکلانی و همکاران [۲۵] مخازن زمینی آب با ترازهای مختلف آب را تحت مولفه‌های دورانی وابسته حرکت زمین ارزیابی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با احتساب مولفه‌های دورانی زمین لرزه در تحلیل‌ها میزان بیشینه و کمینه پاسخ‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. قزوینی و همکاران [۲۶] مولفه‌های دورانی ناشی از چند زلزله را روی مخازن هوایی آب از جنس فولاد اعمال کردند. در مطالعه آن‌ها مولفه‌های دورانی ناشی از زلزله با استفاده از روش هونگنان لی [۲۲] به دست آمد. نتایج کار آنها نشان داد که با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله مقادیر تغییرمکان و نیروی برشی به صورت

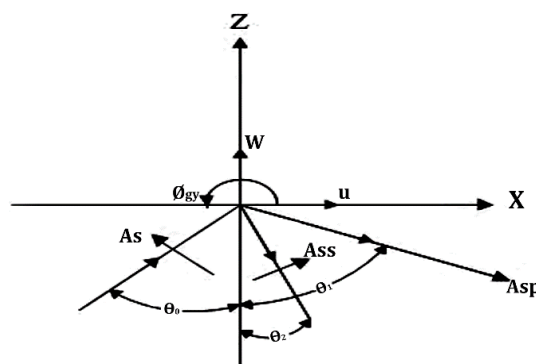
قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. در مطالعه حاضر مولفه‌های دورانی چهار زلزله‌ی در نظر گرفته شده با استفاده از روش هونگنان لی [۲۲] برآورد شد و سپس اثرات مولفه‌های مزبور بر پاسخ لرزه‌ای دودکش‌ها فولادی با سه تراز ارتفاعی مختلف ارزیابی شده است.

۲. مولفه‌های دورانی زلزله

زمانی که زمین لرزه‌ای اتفاق می‌افتد امواج صفحه‌ای هارمونیک ناشی از این حادثه سبب حرکات لرزه‌ای زمین می‌شوند. امواج عبوری تغییرمکان‌هایی در صفحات موازی و عمود بر جهت انتشار امواج ایجاد می‌کنند. امواج داخل صفحه‌ای عمود بر جهت انتشار به مولفه‌های داخل صفحه‌ای با دامنه A_{SV} ناشی از امواج SV و مولفه‌های خارج صفحه‌ای با دامنه A_{SH} ناشی از امواج SH تجزیه می‌شوند. امواج حادث و بازتابیده شده داخل صفحه‌ای در سازه‌های سه بعدی دو مولفه‌ی دورانی حرکت زمین در سطح آزاد را ایجاد خواهند کرد که با ϕ_{gx}, ϕ_{gy} نشان داده می‌شوند این مولفه‌ها به عنوان مولفه‌های دورانی شناخته می‌شود. امواج حادث و بازتابی ناشی از امواج خارج صفحه‌ای یک مولفه پیچشی حرکت زمین را در سطح آزاد ایجاد خواهند کرد که با ϕ_{gz} نشان داده می‌شود.

۱-۲. موج حادث SV

شکل ۱ سیستم مختصات، مولفه‌های انتقالی حرکت زمین u, w و مولفه دورانی ناشی از موج SV ، ϕ_{gz} را در صفحه $y=0$ نشان می‌دهد، همچنین جهت انتشار موج حادث SV با دامنه A_S و امواج بازتابی P, SV با دامنه‌های (A_{SP}) و (A_{SS}) را نشان می‌دهد. پارامترهای غیرصفر در سیستم مختصات (x, z) برای موج SV ، u, w, ϕ_{gy} می‌باشند. این خصوصیات برای صفحه $x=0$ با مولفه‌های انتقالی v, w و مولفه گهواره‌ای ϕ_{gz} نیز صادق می‌باشد. لازم به ذکر است که در شکل ۱ زوایای امواج حادث و بازتابیده SV ، θ_0 و θ_2 با یکدیگر برابر می‌باشند. همچنین θ_1 زاویه موج بازتابیده P ناشی از موج حادث SV است.



شکل ۱. انتشار موج حادث SV

معادلات ۱ و ۲ به ترتیب تغییرمکان در راستای x, z را نشان می‌دهند [۲۶]:

$$u = \frac{\partial \varphi_{sp}}{\partial x} + \frac{\partial (\psi_{sv} + \psi_{ss})}{\partial z} \quad (1)$$

$$w = \frac{\partial \varphi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial (\psi_{sv} + \psi_{ss})}{\partial x} \quad (2)$$

مطابق تئوری کلاسیک الاستیسته روابط برآورد مولفه‌های دورانی از مولفه‌های انتقالی حرکت زمین بصورت زیر می‌باشند:

$$\phi_{gy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

توابع پتانسیل برای امواج هارمونیک با فرکانس ω برابر است با [۲۶]:

$$\psi_{sv} = A_s \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_0}{\beta} x - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right) \quad (4)$$

$$\varphi_{sp} = A_{sp} \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_1}{\alpha} x - \frac{\cos \theta_1}{\alpha} z - t \right) \quad (\Delta) \psi_{ss} = A_{ss} \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_0}{\beta} x - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right) \quad (6)$$

در روابط (۴)، (۵) و (۶) α, β به ترتیب سرعت انتشار امواج P و S می‌باشند [۲۷]:

$$\alpha = \left[\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\beta = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1}{(1+\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

با اعمال شرط تنش برشی آزاد در سطح زمین خواهیم داشت:

$$\tau_{xz} \Big|_{z=0} = \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] = 0 \quad (9)$$

مولفه گهواره‌ای می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\varphi_{gy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

با در نظر گرفتن معادلات ۴ تا ۸ مولفه گهواره‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varphi_{gy} = \frac{\partial w}{\partial x} = i\omega \frac{\cos \theta_1}{\alpha} i\omega \frac{\sin \theta_1}{\alpha} \varphi_{sp} - \left[i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \right] \psi_{sv} + \left[i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \right]^2 \psi_{ss} \quad (11)$$

با در نظر گرفتن قانون اسنل، $(\sin \theta_0) / \beta = (\sin \theta_1) / \alpha$ ، مولفه گهواره‌ای می‌تواند بصورت زیر نوشته شد [۲۶]:

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \quad (12)$$

که در این رابطه داریم:

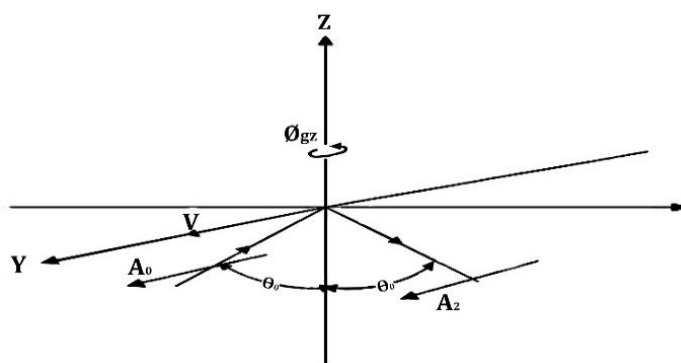
$$C_x = \frac{\beta}{\sin \theta_0} \quad (13)$$

مولفه گهواره‌ای دیگر ناشی از زلزله، φ_{gx} را نیز می‌توان از طریق این معادلات به دست آید.

۲-۲ موج حادث SH

شکل ۲ موج حادث SH را نشان می‌دهد. در این سیستم مختصات همانطوریکه از شکل نمایان است تنها یک موج بازتابی

SH وجود دارد که با زاویه برابر با زاویه برخورد موج حادث SH بازتابیده می‌شود.



شکل ۲. انتشار موج حادث SH

معادلات توابع پتانسیل برای اموج حادث و بازتابی SH می‌توانند بصورت زیر نوشته شوند [۲۷]:

$$V_{SH} = A_{SH} \exp i\omega \left[\frac{\sin \theta_0}{\beta} z - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right] \quad (14)$$

$$V_{SH'} = A_{SH'} \exp i\omega \left[\frac{\sin \theta_0}{\beta} - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right] \quad (15)$$

امواج حادث و بازتابی SH در جهت Y میدان تغییرمکان v را ایجاد می‌کنند که بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$v = 2V_{SH} = 2V_{SH} \exp i\omega \left[\frac{\sin \theta_0}{\beta} x - t \right] \quad (16)$$

مولفه پیچشی φ_{gz} که از معادلات (۱۱) و معادلات (۱۳) تا (۱۵) به دست آمده است در معادله زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \varphi_{gz} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \\ \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial V_{SH}}{\partial x} = i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \frac{v}{2} \\ &= \frac{i\omega}{2C_x} v \end{aligned} \quad (17)$$

که در این معادله داریم :

$$C_x = \beta / \sin \theta_0 \quad (18)$$

با فرض اینکه مولفه‌های انتقالی حرکت زمین u, v و w می‌توانند در میدان آزاد اندازه‌گیری شوند، مولفه‌های دورانی ناشی از حرکت زمین اعم از مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی می‌توانند به ترتیب از معادلات (۱۱) و (۱۷) به دست آیند. این معادلات نیاز به محاسبه فرکانس وابسته به زاویه برخورد امواج، $\sin \theta_0$ دارند.

۳-۲. زاویه برخورد

در این مطالعه زاویه برخورد امواج حادث با استفاده از روش هونگ-نان لی [۲۲] به دست آمده است. بنابراین در این مطالعه با در نظر گرفتن $x = \sin \theta_0$ و استفاده از قانون اسنل، زاویه برخورد امواج حادث SH و SV می‌تواند از معادلات (۱۹) و (۲۰) به دست آید:

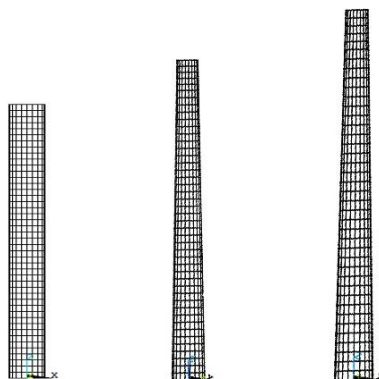
$$G = \frac{2x\sqrt{1-k^2x^2}}{k(1-2x^2)} \quad \theta_0 < \theta_c \quad (19)$$

$$G = \frac{2x\sqrt{k^2x^2-1}}{ik(1-2x^2)} \quad \theta_0 > \theta_c \quad (20)$$

در این معادله برای مولفه‌های گهواره‌ای در صفحه $x-z$ و $x-y$ ناشی از موج SV ، G به ترتیب برابر $G = tg\bar{e} = w/u$ و $G = tg\bar{e} = w/v$ می‌باشد و برای مولفه‌ی پیچشی در صفحه‌ی $x-y$ ناشی از موج SH ، $G = tg\bar{e} = v/u$ می‌باشد همچنین در این روابط $K = \alpha/\beta$ و θ_c زاویه بحرانی موج حادث می‌باشد.

۳- مدل اجزا محدود سیستم دودکش فولادی

شکل ۳ مدل دودکش‌های فولادی مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد. برای اعمال مولفه‌های دورانی زلزله مدل‌های مورد بررسی با المان پوسته با ۶ درجه آزادی (Shell 181) در نرم افزار ANSYS مدل شده‌اند. این سازه‌ها به طور کامل در پی فیکس شده‌اند. مشخصات هندسی و مادی دودکش‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. مدل اجزا محدود دودکش فولادی

معادله دینامیکی سازه برای مدل ارائه شده در شکل ۳ می‌تواند بصورت زیر ارائه شود [۲۹]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (21)$$

که در رابطه بالا M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم و میرایی و سختی سیستم می‌باشند. \ddot{u} و \dot{u} و u بردارهای شتاب و سرعت و تغییر مکان هستند و $F(t)$ بردار بارهای خارجی وارده بر سیستم می‌باشد. بردار نیروی $F(t)$ طوری تعریف می‌شود که بتواند مولفه‌های دورانی زلزله را نیز را در نظر بگیرد.

جدول ۱- مشخصات هندسی دودکش‌ها

مدل	مصالح	ارتفاع (متر)		قطر (متر)		ضخامت (میلی متر)	
		پایین	بالا	پایین	بالا	پایین	بالا
۱	فولاد	۲۷		۲/۷۰	۲/۷۰	۸	۸
۲	فولاد	۴۷		۵	۲/۹۰	۸	۱۰
۳	فولاد	۵۳		۵/۵۰	۳/۵۰	۸	۱۰
۴	فولاد	۷۵		۸/۵	۳/۸	۸	۱۵
۵	فولاد	۱۰۰		۱۰/۵	۴/۲	۸	۱۵
۶	فولاد	۱۳۰		۱۲	۴/۵	۸	۱۵

جدول ۲- مشخصات مادی دودکش های فولادی

۱۹۹/۰۰ GPA	مدول الاستیسیته
۰/۳۲	نسبت پواسون
(kg/m ³)۷۸۵۰	چگالی

۳-۱ صحت سنجی

برای صحت سنجی روش ساخت دودکش های فولادی مورد مطالعه ابتدا یک مدل دودکش فولادی با استفاده از مرجع [۳۰] ساخته شده و نتایج حاصل از آنالیز مودال این مدل ها با نتایج مرجع [۳۰] مقایسه شده که نتایج حاکی از اختلاف اندک بین فرکانس های دو مدل مزبور دارد (جدول شماره ۳). در ادامه برای بررسی اثرات مولفه های دروانی ناشی از زمین لرزه بر پاسخ دینامیکی دودکش های فولادی مدل های ارائه شده در جدول ۱ مطابق مدل صحت سنجی شده سنجی شده ساخته و آنالیز شده اند.

جدول ۳ نتایج صحت سنجی مدل دودکش

درصد اختلاف	فرکانس (هرتز)		قطر		ارتفاع مدل
	مطالعه حاضر	مرجع [۳۰]	پایین	بالا	
۳/۴۶	۲/۱۵۲۹	۲/۲۳۰	۱	۱	۳۰

۴- نتایج عددی

در این تحقیق به منظور تحلیل دینامیکی دودکش های مد نظر ابتدا مولفه های دورانی ناشی از زلزله های در نظر گرفته شده با استفاده از کد نویسی در نرم افزار Matlab و از طریق روش ذکر شده در بالا به دست آمده است، همچنین برای بررسی اثرات مولفه های دورانی بر رفتار دودکش های فولادی ۳ مدل دودکش ارائه شده در جدول ۱ با ارتفاعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، در ادامه تحلیل های لرزه ای دودکش های مورد مطالعه با در نظر گرفتن مولفه های دورانی زلزله و بدون این مولفه ها انجام شده است.

۴-۱ برآورد مولفه های دورانی

در این قسمت برای صحت سنجی روش مورد استفاده در این تحقیق ابتدا مولفه ی پیچشی ناشی از زمین لرزه سن فرناندو با استفاده از روش ارائه شده در این مطالعه محاسبه شده و سپس با نتایج کار لی و لیانگ [۲۲] مقایسه شده است. برای این منظور ابتدا مولفه های انتقالی زمین لرزه با استفاده از تبدیل فوریه از قلمرو زمان به قلمرو فرکانس تبدیل شده، سپس مقدار G متناظر با هر فرکانس محاسبه و با جایگذاری در روابط ۱۹ و ۲۰ و حل همزمان معادلات، زاویه برخورد فرکانس تعیین می شود. با محاسبه زاویه برخورد، سرعت ظاهری انتشار امواج $C_x = \beta / \sin \theta$ برای هر فرکانس تعیین می گردد و در نهایت با تبدیل عکس فوریه، تاریخچه زمانی مولفه های دورانی تعیین می شود. بیشینه شتاب مولفه افقی (S74) و قائم زلزله سن فرناندو که در سال ۱۹۷۲ ثبت شده است به ترتیب ۱۰۵۵ و ۶۹۶ سانتی متر بر مجذور ثانیه می باشد. در شکل ۴ مولفه ی پیچشی به دست آمده از کار لی و لیانگ [۲۲] با تحقیق حاضر با یکدیگر مقایسه شده اند. بیشینه شتاب های پیچشی و گهواره های ناشی از کار لی و لیانگ [۲۲] به ترتیب برابر ۲۴۸- و ۳۷۲/۵ میلی رادیان بر مجذور ثانیه می باشد که این مقادیر برای تحقیق حاضر برابر ۲۴۲- و ۳۸۳- به دست آمده است که نشانگر اختلاف ۳

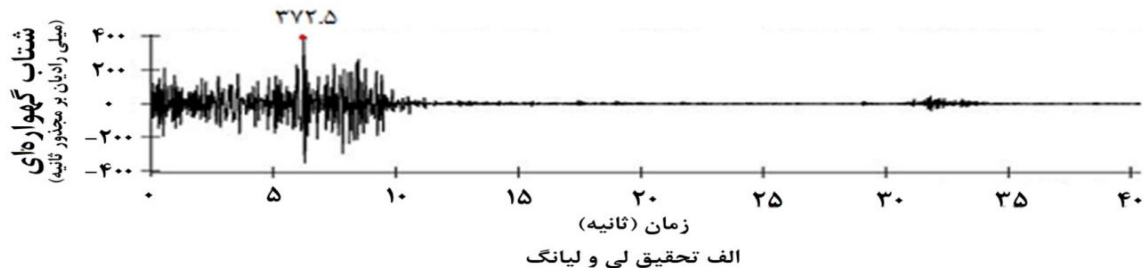
درصدی می‌باشد که این اختلاف ناشی از ثابت در نظر گرفته شدن زاویه برخورد و سرعت موج برشی در کار لی لیانگ [۲۲] است در حالی که در این تحقیق زاویه برخورد و سرعت موج در هر فرکانس متفاوت است. در ادامه با توجه به روش ارائه شده در بالا تاریخچه زمانی مولفه‌های گهواره ای و پیچشی برای زلزله‌های ارائه شده در جدول ۴ بدست آمده و در جدول شماره ۵ مقادیر بیشینه شتاب زاویه‌ای و فرکانس غالب مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی برای هر چهار زلزله مزبور ارائه شده است. در ادامه طیف دامنه فوریه برای مولفه‌های پیچشی و گهواره‌ای زلزله‌های مورد بررسی در شکل ۴ ارائه شده است که در قسمت توصیف نتایج از نتایج بدست آمده از این بخش جهت توصیف رفتار سازه‌های مورد بررسی استفاده می‌شود.

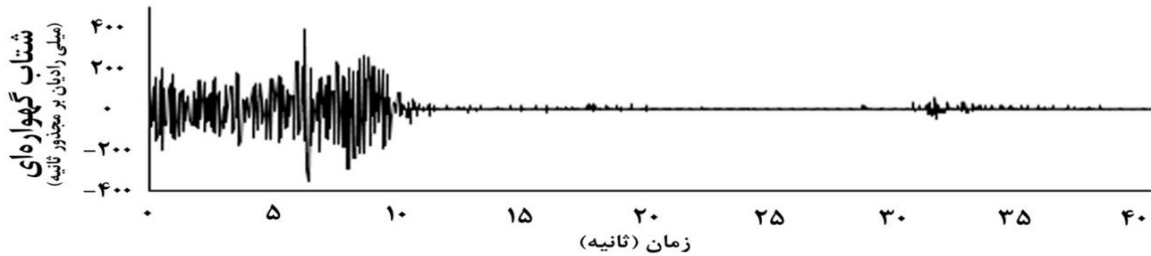
۲-۴ آنالیز مودال

برای بررسی بهتر اثرات مولفه‌های دورانی زلزله بر پاسخ دینامیکی دودکش‌های مورد مطالعه فرکانس‌های غالب دودکش‌ها و فرکانس غالب مولفه‌های دورانی زلزله مورد نیاز است که در این قسمت برای تعیین فرکانس‌های طبیعی مدل‌های دودکش مورد بررسی آنالیز مودال برای هر سه مدل انجام گرفته است و مقادیر ۵ فرکانس طبیعی اول آنها در جدول ۶ ارائه شده است.

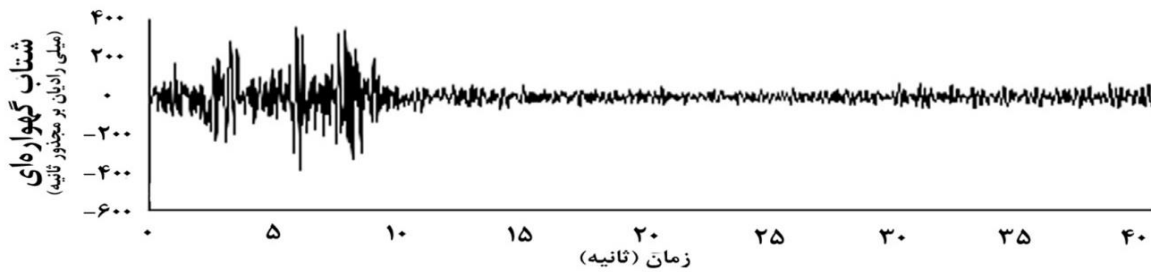
جدول ۴. مشخصات زمین لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه

سرعت موج برشی (m/s)	PGA(g)	مولفه ثبت شده	فاصله مرکز سطحی (km)	ایستگاه	تاریخ وقوع	زمین لرزه
۲۰۱۶/۱	۰/۶۹۹	PCDDWN	۱۱/۸۶	Pacoima dam	۱۹۵۱/۰۱/۲۴	سن‌فرناندو
	۱/۲۲۶	PCD164				
	۱/۱۶	PCD254				
۳۸۵/۴	۰/۱۵۵	VERTICAL	۳۵	Lincoln School	۱۹۷۱/۰۷/۲۱	تفت
	۰/۱۷۹	S69E				
	۰/۱۷۰	EAST-WEST				
۳۳۸/۶	۰/۰۸۵	BOS-V1	۷۴/۶۶	Boshrooye70	۱۹۵۲/۰۷/۲۱	طیس
	۰/۱۰۷	BOS-L1				
	۰/۰۸۹	BOS-T1				
۵۳۳/۴۰	۰/۰۷۳	ALS-V	۳۷/۸۳	ALS	۱۹۹۹/۰۹/۲۰	چی چی
	۰/۱۸۳	ALS-E				
	۰/۱۶۳	ALS-N				





ب: تحقیق حاضر (مدل مستقل از فرکانس: مدل اصلی لی و لیانگ)

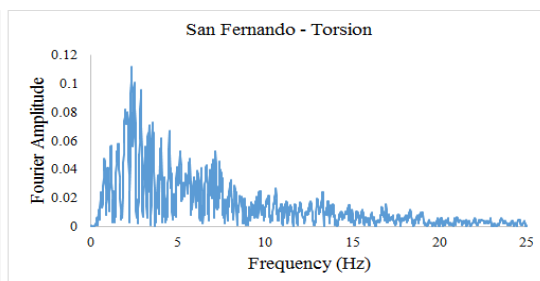
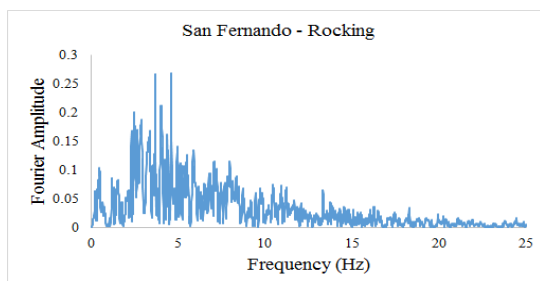


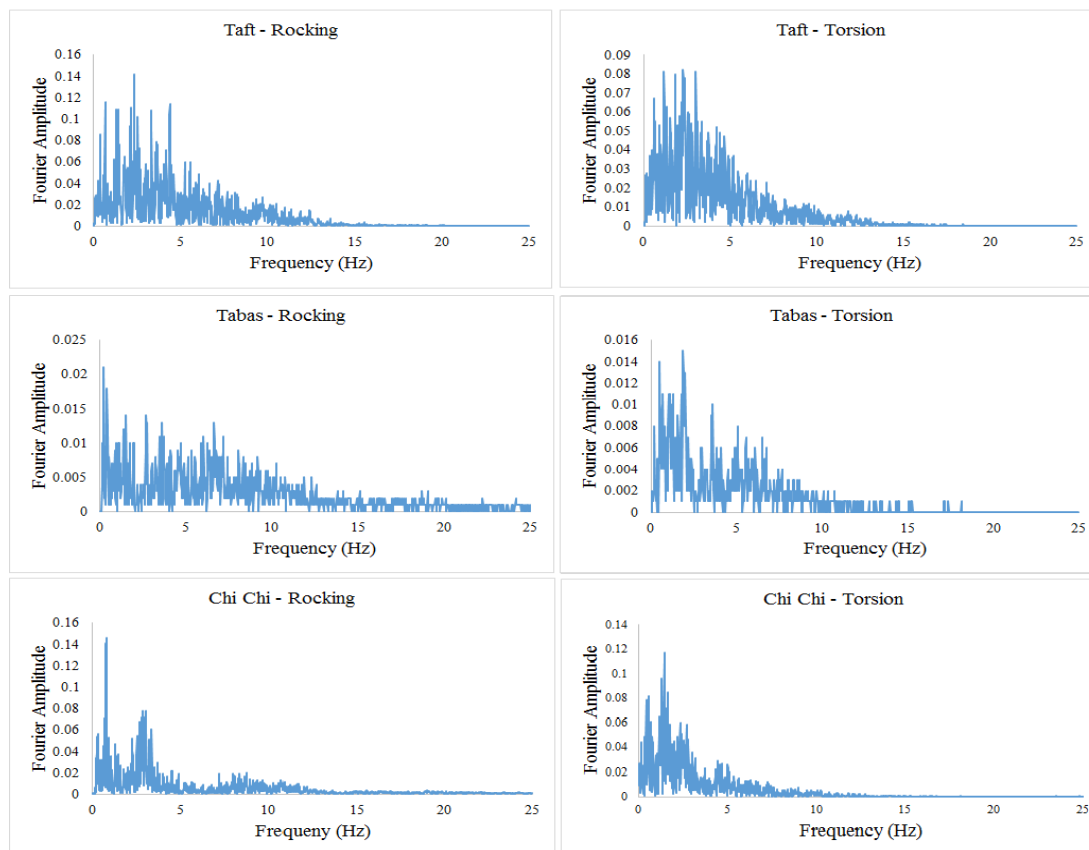
ج: تحقیق حاضر (مدل وابسته به فرکانس)

شکل ۴. تاریخچه زمانی مولفه ی بیجشی زلزله سن فرناندو (تحقیق لی و لیانگ - تحقیق حاضر

جدول ۵. مقادیر بیشینه سرعت زاویه ای و فرکانس غالب مولفه های دورانی

زلزله	مولفه ی گهواره ای		مولفه ی بیجشی	
	شتاب (mrad/s^2)	فرکانس غالب (Hz)	شتاب (mrad/s^2)	فرکانس غالب (Hz)
سن فرناندو	۰/۳۸۳	۴/۵۷۸	۰/۲۴	۲/۳۳۲
تفت	۰/۰۸۱۱	۲/۳۴۴	۰/۰۹۷۹	۲/۲۷۱
طیس	۰/۰۲۰۷	۰/۲۲	۰/۰۱۱۹	۱/۸۵۵
چی چی	۰/۰۶۱۹	۰/۷۵۷	۰/۰۶۳۸	۱/۴۵۳





شکل ۵. طیف دامنه فرکانسی مولفه های گهواره ای و پیچشی زلزله های مورد بررسی

جدول ۶. ۵ فرکانس اول دودکش ها مورد بررسی و فرکانس غالب

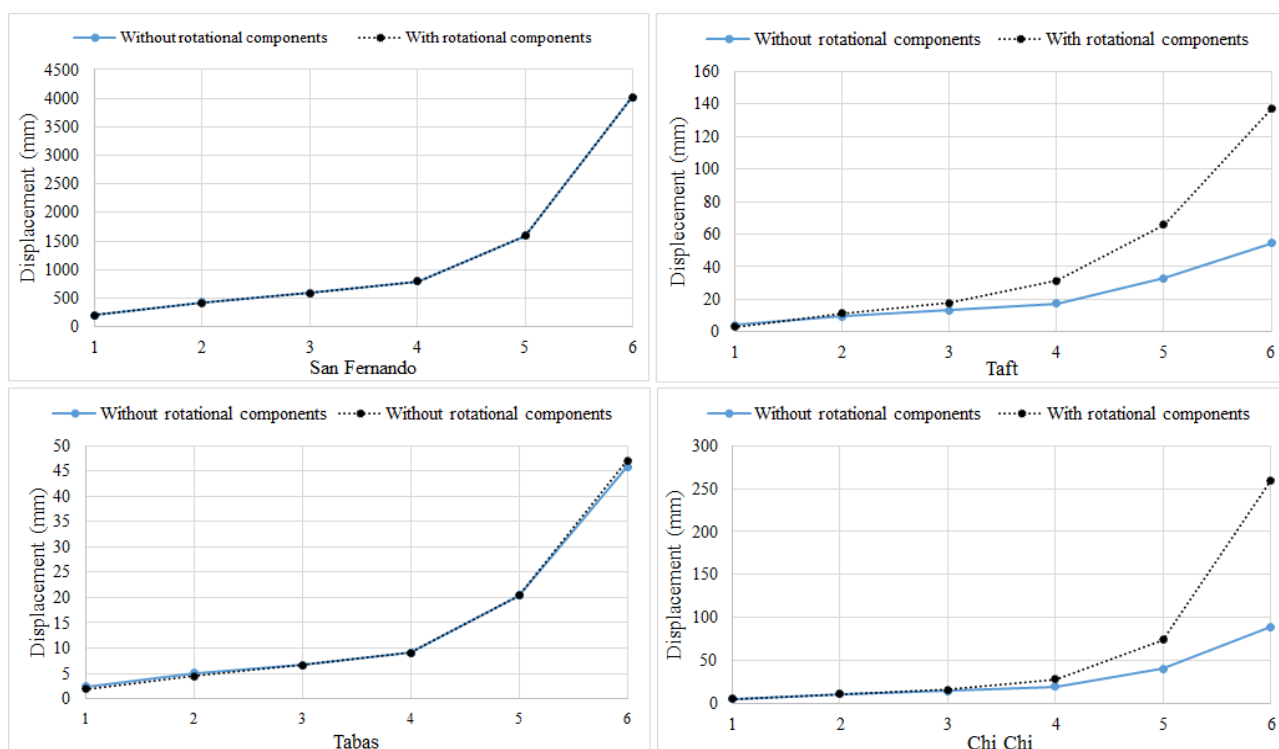
فرکانس غالب (Hz)	فرکانس طبیعی پنجم (Hz)	فرکانس طبیعی چهارم (Hz)	فرکانس طبیعی سوم (Hz)	فرکانس طبیعی دوم (Hz)	فرکانس طبیعی اول (Hz)	دودکش فولادی
۳/۶۲۴۸	۸/۹۱۱۲	۸/۱۹۸۲	۷/۷۰۸۲	۳/۶۲۴۸	۳/۱۱۵۲	مدل اول
۲/۶۱۰۶۳	۵/۹۴۰۳۱	۴/۶۵۳۹۷	۴/۲۳۴۳۴	۲/۶۱۰۶۳	۲/۱۵۷۹۶	مدل دوم
۲/۲۲۸۸۶	۴/۷۰۷۹۱	۳/۶۲۱۷۶	۳/۵۳۰۹۹	۲/۲۲۸۸۶	۱/۵۹۸۴۷	مدل سوم
۲/۰۵۸۳۵	۲/۲۵۰۸۴	۲/۷۰۱۳۲	۲/۵۹۴۹۳	۲/۰۵۸۳۵	۱/۲۵۲۳۵	مدل چهارم
۱/۴۵۲۰۹	۲/۴۲۵۳۳	۱/۸۸۸۳۴	۱/۸۸۳۶۹	۱/۴۵۲۰۹	۰/۹۴۲۸۲	مدل پنجم
۰/۹۹۰۵۶	۱/۸۶۶۲۶	۱/۴۴۰۷۵	۱/۳۳۰۱۰	۰/۹۹۰۵۶	۰/۷۴۴۶۴	مدل ششم

۴-۳ تحلیل های دینامیکی

نتایج حاصل از تحلیل مدل های مورد بررسی در حالات اثر مولفه های انتقالی و اثر توامان مولفه های دورانی و انتقالی در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ۶ مشخص می شود که با اعمال مولفه های دورانی در تحلیل مقادیر بیشینه تغییر مکان برای زلزله های سن فرناندو، تفت و طبس و برای مدل اول نسبت به حالتی که مولفه های دورانی در نظر گرفته نشده اند کاهش یافته است که این پارامتر برای زلزله چی چی تغییر نمی کند اما با افزایش ارتفاع اثر این مولفه های دورانی بیش تر شده بطوریکه مقادیر

ماکزیمم تغییرمکان افقی برای هر چهار نوع تحلیل با در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی به مقدار تغییرمکان در تحلیل بدون مولفه‌های دورانی نزدیک شده و یا بیش‌تر از آن شده است. همچنین با توجه به جدول مربوطه مشخص می‌شود برای زلزله‌های تفت، طبس و چی چی با افزایش ارتفاع اثرات مولفه‌های دورانی روند فزاینده داشته و نسبت تغییرمکان برای هر دو حالت تحلیل با این زلزله‌ها با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد در حالیکه برای زلزله سن فرناندو پاسخ نرمال شده برای دوحالت تحلیل مزبور برابر مقدار ثابت ۱ می‌باشد که این نتایج نشان از تاثیر پارامترهای دیگری علاوه بر پیک زلزله‌های مزبور بر ماکزیمم پاسخ این سازه‌ها دارد که این پارامترها فرکانس غالب مولفه‌های دورانی و فرکانس غالب سازه و ارتفاع آن می‌باشد به عبارت بهتر هرچقدر مقادیر پیک ماکزیمم شتاب گهواره‌ای و پیچشی به ترتیب به مقادیر ماکزیمم شتاب‌های افقی و قائم زلزله نزدیک گردد و نیز از طرفی مقادیر فرکانس غالب مولفه‌های گهواره-ای و پیچشی زلزله‌های مزبور در نزدیکی فرکانس غالب سازه قرار گیرد و این مولفه‌ها اثرات فزاینده بر بیشینه پاسخ تغییرمکان افقی خواهند داشت که از نتایج ارائه شده برای پیک مولفه‌های دورانی و تغییرمکان ماکزیمم به ترتیب در جداول ۷ و ۸ مشخص است که برای زلزله سن فرناندو علی‌رغم بالا بودن مقدار پیک مولفه‌های دورانی، به دلیل اختلاف زیاد بین مقادیر ماکزیمم شتاب‌های انتقالی و دورانی اثرات مولفه‌های دورانی زلزله مزبور کاهنده بوده و با افزایش ارتفاع نتایج حاصل از تحلیل با در نظر گرفتن این مولفه‌ها و بدون آن‌ها به یکدیگر نزدیک می‌گردد و به همین صورت برای زلزله طبس نیز به دلیل اختلاف فاحش بین مقادیر پیک مولفه‌های دورانی و انتقالی اثرات این مولفه‌ها در تعیین ماکزیمم تغییرمکان افقی کاهنده می‌باشد و با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن فرکانس مولفه‌های دورانی و فرکانس غالب سازه به یکدیگر این مولفه‌ها تاثیر فزاینده خود را نشان می‌دهند که این مورد را همچنین برای بررسی بهتر می‌توان با توجه به نتایج حاصل از آنالیز دو زلزله تفت و سن فرناندو نیز مشاهده کرد بطوریکه با توجه به نتایج مزبور مشخص می‌شود که هرچند بیشینه مقدار شتاب گهواره‌ای و پیچشی زلزله سن فرناندو نسبت به زلزله تفت بیش‌تر می‌باشد ولی اثرات مولفه‌های دورانی زلزله تفت بر مقادیر تغییرمکان افقی حالت فزاینده دارد در حالی که برای زلزله سن فرناندو در مدل اول حالت کاهنده داشته و برای دومدل دیگر تقریباً پاسخ‌ها را تغییر نمی‌دهد. برای بررسی بهتر روند افزایش مقدار تغییرمکان افقی مدل‌های مورد بررسی تحت اثر مولفه‌های چهار زلزله مدنظر روند تغییرات ماکزیمم تغییرمکان برای مدل‌های مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است که با توجه به شکل مزبور مشخص می‌شود که برای زلزله تفت و چی چی با افزایش ارتفاع آهنگ افزایش شیب پاسخ برای تحلیل با اعمال مولفه‌های دورانی نسبت به حالتی که این مولفه‌ها لحاظ نشده‌اند افزایش یافته در حالیکه این آهنگ افزایش شیب برای زلزله سن فرناندو و طبس و برای هر دوحالت اعمال مولفه‌های دورانی و عدم اعمال آن‌ها تقریباً برابر می‌باشد. در ادامه با توجه به جدول ۷ مشخص می‌شود که برای زلزله‌های سن فرناندو و طبس با اعمال مولفه‌های دورانی در تحلیل دودکش‌های مزبور مقادیر بیشینه تغییرمکان قائم نسبت به حالتی که این مولفه‌ها لحاظ نشده‌اند کاهش می‌یابد در حالیکه برای زلزله تفت در ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش ارتفاع روند صعودی به خود گرفته و مقدار پاسخ نرمال شده برای مدل چهارم به بعد بیش‌تر از یک می‌گردد و در نهایت برای زلزله چی چی مقدار پاسخ نرمال شده برای تمامی مدل‌ها بزرگ‌تر از یک بوده که با افزایش ارتفاع روند صعودی به خود گرفته است. نتایج نشان داده شده در جدول شماره ۷ و برای ماکزیمم برش پایه برای زلزله‌های سن فرناندو و طبس نشان از کاهش مقدار پارامتر مدنظر با اعمال مولفه‌های دورانی دارد در حالیکه برای زلزله تفت این پارامتر در ابتدا و برای مدل‌های اول تا سوم کاهش یافته است که این کاهش نیز مطابق تغییرمکان قائم با افزایش ارتفاع دودکش کم‌تر شده و روند صعودی به خود می‌گیرد و در نهایت برای زلزله چی-چی پاسخ نرمال شده برای مقدار ماکزیمم برش پایه در مدل‌های اول تا سوم برابر با یک بوده و در ادامه با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابد که نتایج مزبور نیز اهمیت ارتفاع سازه و فرکانس‌های غالب سازه و زلزله را نشان می‌دهد. در ادامه برای بررسی رفتار این سازه‌ها در جدول ۸ مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی اول، سوم و تنش برشی برای تحلیل‌های مدنظر ارائه شده است. با توجه به نتایج

ارائه شده در جدول ۸ مشخص شده است که مقادیر بیشینه تنش اصلی اول برای زلزله‌های تفت، طبس و چی چی افزایش می‌یابد و این افزایش برای زلزله تفت و طبس با افزایش ارتفاع سازه تا مدل سوم روند صعودی به خود می‌گیرد و در مدل چهارم نسبت به مدل سوم کاهش یافته و سپس دوباره روند صعودی به خود می‌گیرد، این پارامتر برای زلزله چی چی روند صعودی خود را حفظ می‌کند و برای زلزله سن‌فرناندو مقدار تنش اصلی اول در حالت تحلیل با مولفه‌های دورانی نسبت به حالات تحلیل بدون این مولفه‌ها کاهش می‌یابد که پاسخ نرمال شده آن با افزایش ارتفاع دودکش‌ها به یک نزدیک شده و در ادامه برای مدل پنجم مقدار این پاسخ نرمال شده کاهش یافته و پس از آن دوباره روند صعودی به خود می‌گیرد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد تاثیر مولفه‌های دورانی روی بیشینه تنش اصلی اول برای برخی از زلزله‌ها اثر کاهنده و برای برخی دیگر اثر فزاینده دارد. در ادامه با توجه به جدول مزبور مشخص می‌شود که برای مدل‌های اول تا چهارم و نیز برای زلزله‌های سن‌فرناندو، تفت و طبس با اعمال مولفه‌های دورانی در تحلیل دودکش‌های مزبور مقادیر بیشینه تنش برشی و بیشینه تنش اصلی سوم نسبت به حالاتی که این مولفه‌ها لحاظ نشده‌اند کاهش یافته است در حالیکه برای مدل‌های پنجم و ششم تحلیل با مولفه‌های زلزله‌ی تفت مقدار این پاسخ بیش تر شده است و در نهایت برای زلزله چی چی مقدار پاسخ نرمال شده برای ماکزیمم تنش اصلی سوم و ماکزیمم تنش برشی با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله افزایش یافته است که مقدار این پارامتر با افزایش ارتفاع روند صعودی به خود می‌گیرد. نتایج مزبور همانطوریکه در قسمت‌های قبلی اشاره شده ناشی از اثرات ارتفاع، فرکانس غالب مولفه‌های دورانی و نیز فرکانس غالب سازه می‌باشد. در ادامه برای بررسی اثرات مولفه‌های دورانی بر تاریخچه زمانی تغییرمکان تاج دودکش، برش پایه و پوش تنش اصلی اثرات مولفه‌های دورانی و انتقالی زلزله تفت بر پاسخ لرزه‌ای دودکش‌های مزبور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶. آهنگ افزایش ماکزیمم تغییرمکان افقی

جدول ۷. مقادیر بیشینه تغییرمکان ها و برش پایه

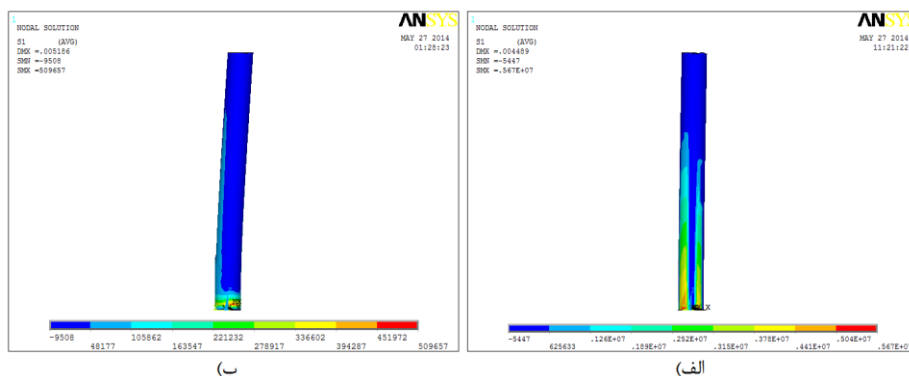
سیستم مورد بررسی	نوع زلزله	بیشینه تغییرمکان افقی (mm)		پاسخ نرمال شده	بیشینه تغییرمکان قائم (mm)		پاسخ نرمال شده	بیشینه برش پایه (MPa)		پاسخ نرمال شده
		انتقالی و دورانی	فقط انتقالی		انتقالی و دورانی	فقط انتقالی		انتقالی و دورانی	فقط انتقالی	
۱	سن فرناندو	۲۰۶	۲۰۳	۰/۹۸۵	۱۷	۱۴	۰/۸۲۳	۱/۴۰	۱/۳۳	۰/۹۵
	تفت	۴/۱	۳/۲	۰/۷۸	۰/۴۶۱	۰/۲۵۰	۰/۵۹۴	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۲۷	۰/۸۸
	طیس	۲/۴۳	۱/۹۱	۰/۷۸۶	۰/۲۹۸	۰/۱۲۹	۰/۴۳۳	۰/۰۱۵۳	۰/۰۱۲۳	۰/۸۰۴
	چی چی	۴/۸۴۳	۴/۸۴۴	۱	۰/۳۳۰	۰/۳۵۴	۱/۰۷	۰/۰۲۶۶	۰/۰۲۶۶	۱
۲	سن فرناندو	۴۲۶	۴۱۹/۲۲	۰/۹۸۴	۲۶/۴۷	۲۲/۲	۰/۸۴	۴/۰۹	۳/۵۸	۰/۸۷۵
	تفت	۹/۶	۱۱/۵	۱/۲	۰/۸۵۹	۰/۶۲۳	۰/۷۲۵	۰/۰۷۲۸	۰/۰۶۸۳	۰/۹۴
	طیس	۵/۱	۴/۵۰۴	۰/۸۸	۰/۵۶۹	۰/۲۸۶	۰/۵۰۲	۰/۰۴۱۵	۰/۰۳۵۶	۰/۸۵۸
	چی چی	۱۰/۶	۱۰/۶۰۲	۱	۰/۵۶۳	۰/۶۹۹	۱/۲۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۱
۳	سن فرناندو	۵۸۷	۵۸۷	۱	۳۶/۳	۳۱/۵۴	۰/۸۷	۴/۸۱	۴/۳۲	۰/۸۹۸
	تفت	۱۳/۳	۱۷/۸	۱/۳۴	۱/۲	۰/۹۶۴	۰/۸۰۳	۰/۰۸۹	۰/۰۸۸۴	۰/۹۴۸
	طیس	۶/۶۷	۶/۶۱۵	۰/۹۹	۰/۸	۰/۳۷۴	۰/۴۶۷	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۴۷	۰/۸۹
	چی چی	۱۴/۵	۱۵/۷	۱/۰۸	۰/۷۹۵	۱/۰۲۴	۱/۲۹	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷	۱
۴	سن فرناندو	۷۹۱	۷۹۱	۱	۴۴	۳۹/۳	۰/۸۹۳	۱۲/۴	۱۱/۵	۰/۹۲۷
	تفت	۱۷/۴	۳۱/۵	۱/۸۱	۱/۵	۱/۵۴	۱/۰۲	۰/۲۳	۰/۲۷۳	۱/۱۸۷
	طیس	۹/۱	۹/۱	۱	۱/۱۲	۰/۶۰۲	۰/۵۳۷	۰/۱۲۹	۰/۱۱۵	۰/۸۹
	چی چی	۱۹/۳	۲۸	۱/۴۵۸	۰/۹۶۶	۱/۵	۱/۵۵	۰/۲۵۳	۰/۲۵۳	۱
۵	سن فرناندو	۱۵۸۹	۱۵۸۹	۱	۷۵	۷۲/۲	۰/۹۶۳	۱۸/۸	۱۷/۴	۰/۹۲۵
	تفت	۳۳	۶۶	۲	۲/۷۷	۳	۱/۰۸	۰/۳۴۸	۰/۴۱۷	۱/۱۹۸
	طیس	۲۰/۴	۲۰/۴	۱	۲/۰۶	۱/۰۵	۰/۵۱	۰/۱۹۰	۰/۱۷۷	۰/۹۳۱
	چی چی	۴۰/۴	۷۳/۸	۱/۸۲	۱/۷	۳/۳	۱/۹۴	۰/۳۷۷	۰/۴	۱/۰۶
۶	سن فرناندو	۴۰۱۴	۴۰۱۴	۱	۱۹۰	۱۵۰	۰/۷۹	۲۵/۸	۲۵/۸	۱
	تفت	۵۴/۴۳	۱۳۷	۲/۵۱۷	۴/۶۴	۵/۳۶	۱/۱۵۵	۰/۴۱۶	۰/۵۲۲	۱/۲۵۵
	طیس	۴۵/۹	۴۷/۱	۱/۰۲۶	۳/۷	۱/۸۴	۰/۴۹۷	۰/۲۶۵	۰/۲۰۲	۰/۷۶۲
	چی چی	۸۸/۹	۲۶۰	۲/۹۲	۳/۲۶	۹/۸۴	۳/۰۱	۰/۵۰۵	۰/۹۲۱	۱/۸۲

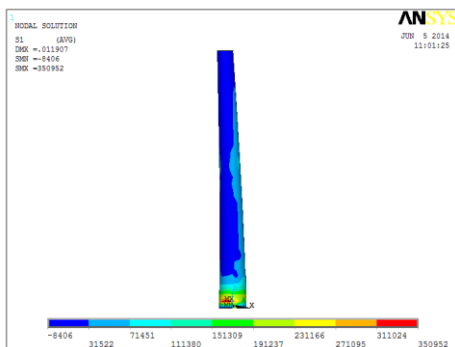
جدول ۸. مقادیر بیشینه تنش اصلی اول، سوم و تنش برشی

مدل	زلزله	تنش اصلی اول بیشینه (مگاپاسکال)		پاسخ نرمال شده	تنش اصلی سوم بیشینه (مگاپاسکال)		پاسخ نرمال شده	تنش برشی بیشینه (مگاپاسکال)		پاسخ نرمال شده
		فقط انتقالی	انتقالی و دورانی		فقط انتقالی	انتقالی و دورانی		فقط انتقالی	انتقالی و دورانی	
۱	سن فرناندو	۳۸۳	۳۰۸	۰/۸۰۴	۴۰۰	۳۲۷	۰/۸۱۷۵	۴۱/۲	۲۸/۱	۰/۶۸
	تفت	۰/۵۱۰	۵/۶۷	۱۱/۱۱	۹/۹۳	۵/۶۵	۰/۵۷	۱/۰۲	۰/۵۸	۰/۵۷
	طیس	۰/۳۳	۲/۹۱	۸/۸۱	۶/۰۳	۳/۰۸	۰/۵۱۱	۰/۶۰۱	۰/۲۷۱۶	۰/۴۵۲
	چی چی	۷/۴۰	۷/۸۷	۱/۰۶	۷/۸۴	۸/۳۲	۱/۰۶	۰/۶۸۲	۰/۸۲۷	۱/۲۱۲
۲	سن فرناندو	۳۴۴	۲۹۲	۰/۸۴۹	۳۶۲	۳۰۸	۰/۸۵۱	۳۱/۴	۲۶/۹	۰/۸۵۷
	تفت	۰/۳۵۱	۷/۵۷	۲۱/۵۷	۱۰/۵	۷/۶۱	۰/۷۲۵	۰/۸۹۵	۰/۶۱۹	۰/۶۹۱
	طیس	۰/۲۰۴	۳/۱۷	۱۵/۵۴	۶/۳۴	۳/۳۱	۰/۵۲۲	۰/۵۳۴	۰/۲۸۸	۰/۵۴
	چی چی	۷/۳۷	۸/۷۸	۱/۱۹	۷/۹۳	۹/۳۲	۱/۱۷۵	۰/۶۹۳	۰/۸۰۱	۱/۱۵۵
۳	سن فرناندو	۳۹۲	۳۶۶	۰/۹۳	۴۲۰	۳۷۷	۰/۸۹۸	۳۷/۶	۳۲	۰/۸۵۱
	تفت	۰/۴۲۸	۱۰/۱	۲۳/۶	۱۲/۵	۱۰/۲	۰/۸۱۶	۱/۱۰	۰/۸۷	۰/۷۹۱
	طیس	۰/۲۵۴	۴/۰۹	۱۶/۱۰	۷/۸۱	۴/۲۶	۰/۵۵	۰/۶۸۴	۰/۳۵۷	۰/۵۲۲
	چی چی	۸/۹۸	۱۱/۱	۱/۲۳۶	۹/۲۶	۱۱/۷	۱/۲۶	۰/۸۲۱	۱/۰۴	۱/۲۶۶
۴	سن فرناندو	۳۶۶	۳۵۴	۰/۹۶۷	۴۰۳	۳۷۲	۰/۹۲۳	۴۹/۲	۳۸/۲	۰/۷۷۶
	تفت	۰/۹۰۶	۱۲/۲	۱۳/۴۶	۱۲/۸	۱۲/۲	۰/۹۵۳	۱/۵۸	۱/۴	۰/۸۸۶
	طیس	۰/۵۸۹	۴/۰۳	۶/۸۴	۸/۵	۴/۲۴	۰/۵	۱/۰۵	۰/۴۵	۰/۴۲۸
	چی چی	۸/۶۶	۱۲/۳	۱/۴۲	۹/۴۳	۱۲/۴	۱/۳۱۵	۰/۹۷	۱/۵۵	۱/۶
۵	سن فرناندو	۵۶۳	۴۵۷	۰/۸۱۱	۵۳۳	۵۱۶	۰/۹۷	۷۳	۵۵/۵	۰/۷۶
	تفت	۱/۲۹	۱۸/۴	۱۴/۲۶	۱۷/۱	۱۸/۸	۱/۱	۲/۲۲	۲/۳۷	۱/۰۶
	طیس	۰/۹۲	۵/۹۷	۶/۴۵	۱۲/۳	۶/۲۱	۰/۵۰۵	۱/۶۰	۰/۷۱۳	۰/۴۴۵
	چی چی	۷/۹۲	۲۰/۶	۲/۶۰	۱۲/۲	۲۰/۷	۱/۶۷	۱/۳۱	۲/۶۵	۲/۰۳
۶	سن فرناندو	۹۱۱	۷۴۷	۰/۸۲۰	۹۴۰	۵۵۴	۰/۵۹	۱۱۷	۷۷/۲	۰/۶۶
	تفت	۱/۳۰	۲۲/۷	۱۷/۴۶	۱۹	۲۳/۲	۱/۲۲	۲/۳۵	۲/۸۱	۱/۲۰
	طیس	۱/۰۳	۸/۹۶	۸/۶۷	۱۴/۹	۸/۲۷	۰/۵۵	۱/۸۴	۱/۱۲	۰/۶۰۱
	چی چی	۱۶/۹	۴۴/۸	۲/۶۵	۱۷/۴	۴۳/۸	۲/۵۲	۱/۷۶	۵/۱۱	۲/۹۰

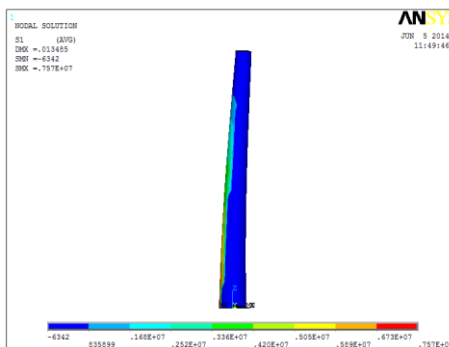
۴-۴ بررسی موردی زلزله تفت

در این قسمت برای بررسی بهتر اثرات مولفه‌های دورانی زلزله بر پاسخ لرزه‌ای مدل‌های مورد بررسی اثرات زلزله تفت بر پاسخ دینامیکی مدل‌های مزبور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در ادامه پوش تنش اصلی اول، تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تاج دودکش‌ها و نیز تاریخچه زمانی برش پایه آن‌ها ارائه شده است. در شکل ۷ پوش تنش اصلی اول برای هر شش مدل دودکش و برای تحلیل‌های مدنظر ارائه شده است. با توجه به جدول ۷ و شکل مذکور مشخص می‌شود که پاسخ نرمال شده برای ماکزیمم تنش اصلی اول با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله و با افزایش ارتفاع سازه تا مدل سوم روند صعودی به خود می‌گیرد و در مدل چهارم نسبت به مدل سوم کاهش می‌یابد و پس از آن دوباره روند صعودی به خود می‌گیرد بطوریکه به ترتیب با افزایش ارتفاع و برای مدل‌های مورد مطالعه مقدار پاسخ نرمال شده تنش اصلی اول به ترتیب برابر ۱۱/۱۱، ۲۱/۶، ۲۳/۶، ۱۳/۴۶، ۱۴/۲۶ و ۱۷/۴۶ می‌باشد که نشان دهنده اثر افزایش مولفه‌های دورانی زلزله در مقدار تنش اصلی اول بوده و نیز نشان از کاهش مقدار پاسخ نرمال شده در مدل چهارم نسبت به مدل سوم دارد که این نتایج اهمیت تاثیر مولفه‌های دورانی، ارتفاع سازه و نیز فرکانس مولفه‌های مزبور را نشان می‌دهد که بسیار مهم و قابل توجه است. همچنین با توجه به شکل مزبور مشخص می‌شود که با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله محل رخ دادن بیشینه تنش اصلی اول و نیز نحوه توزیع آن تغییر می‌کند. در شکل ۸ برای بررسی تغییرمکان تاج دودکش‌های مزبور و بررسی اثرات مولفه‌های دورانی بر تاریخچه زمانی تغییرمکان یک نقطه در تراز تاج دودکش در راستای X برای هر کدام از دودکش‌های مورد بررسی تحت اثر مولفه‌های زلزله تفت ارائه شده است که نقطه مزبور به دلیل متفاوت بودن محل ماکزیمم تغییرمکان‌ها الزاما محل تغییر مکان ماکزیمم نبوده و صرفا جهت بررسی اثرات این مولفه بر تاریخچه زمانی تغییرمکان تاج دودکش‌ها ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش ارتفاع میزان بیشینه تغییرمکان‌های افقی افزایش می‌یابد به طوریکه مقادیر بیشینه تغییرمکان در حالات تحلیل بدون مولفه‌های دورانی برای مدل‌های مورد بررسی به ترتیب برابر ۳/۱۶، ۷/۰۱، ۹/۵۹، ۱۲/۶، ۲۷ و ۵۴/۴ میلی‌متر می‌باشند و برای تحلیل با اعمال مولفه‌های دورانی این پاسخ‌ها به ترتیب برابر ۳/۱۸، ۱۱/۵، ۱۷/۸، ۳۱/۶، ۶۶ و ۱۳۷ میلی‌متر می‌باشند که ۱/۰۰۶، ۱/۶۴، ۱/۸۶، ۲/۵۰۸، ۲/۴۴ و ۲/۵۱۸ برابر شده‌اند. همچنین با توجه به شکل مزبور مشخص می‌شود که مولفه‌های دورانی زلزله علاوه بر افزایش مقادیر تغییرمکان در راستای افقی شکل کلی تاریخچه زمانی تغییرمکان و نیز زمان رخ دادن بیشینه مقدار آن را نیز تغییر می‌دهد. همچنین در شکل ۹ مقادیر بیشینه برش پایه برای هر چهار مدل مورد بررسی تحت اثر مولفه‌های دورانی زلزله تفت و بدون این مولفه‌ها ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده برای تاریخچه زمانی برش پایه در شکل ۹ مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی در تحلیل مقادیر بیشینه برش پایه در راستای محور X منطبق بر محور X به ترتیب برابر ۰/۱۷۶، ۰/۰۶۸، ۰/۰۸۸، ۰/۲۷۳، ۰/۴۱۷ و ۰/۵۲۲ مگاپاسکال می‌باشد که برای تحلیل بدون اعمال این مولفه‌ها برابر ۰/۲۲۷، ۰/۰۶۰۷، ۰/۰۶۹۴، ۰/۱۷۸، ۰/۲۵۱ و ۰/۴۱۶ مگاپاسکال می‌باشد که نشانگر افزایش برش پایه در این راستا با افزایش ارتفاع می‌باشد. نتایج ارائه شده در جداول مربوط و نحوه تغییر تاریخچه زمانی تغییرمکان‌ها، برش پایه، تنش‌ها و نیز اشکال مربوطه مشخص می‌شود که در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی زمین‌لرزه و بررسی محتوای فرکانسی و پیک آن‌ها و محتوای فرکانسی سازه در طراحی و بررسی عملکرد دودکش‌های فولادی بسیار مهم بوده و بایستی در نظر گرفته شوند.

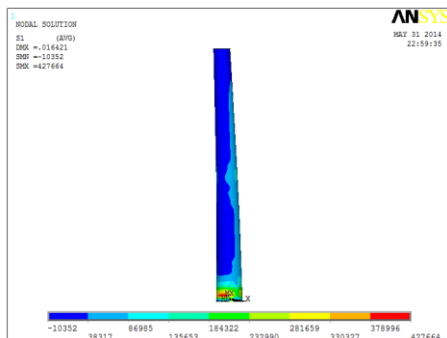




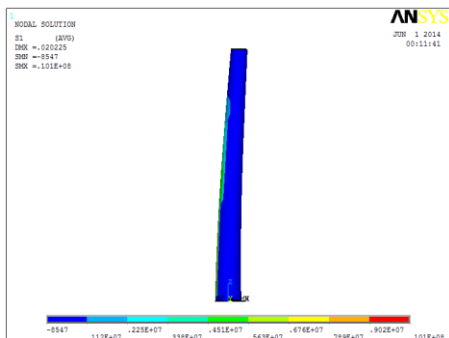
(ب)



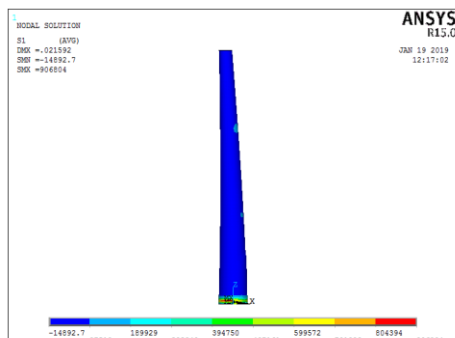
(ف)



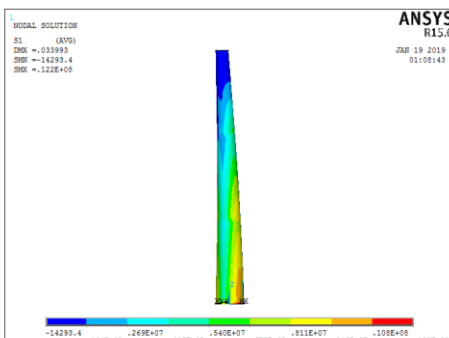
(ب)



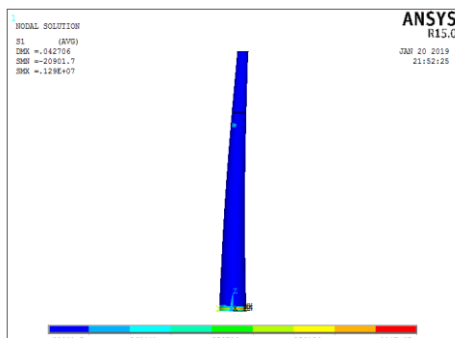
(ف)



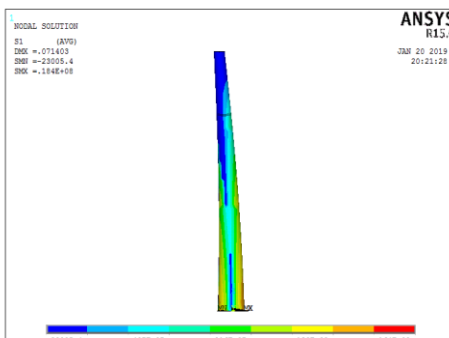
(ب)



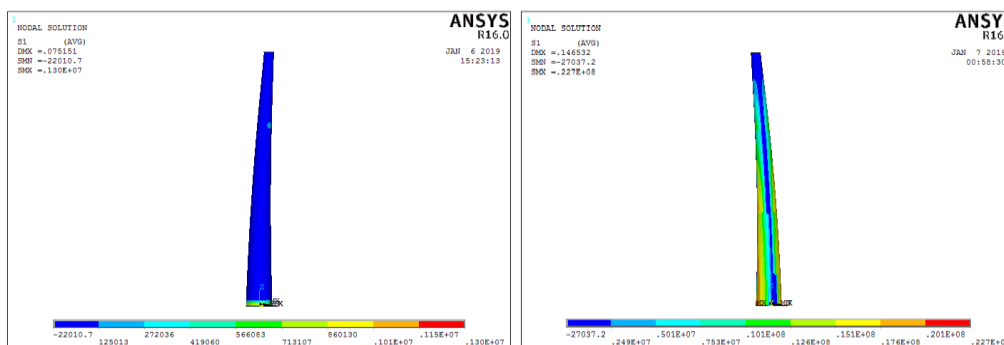
(ف)



(ب)



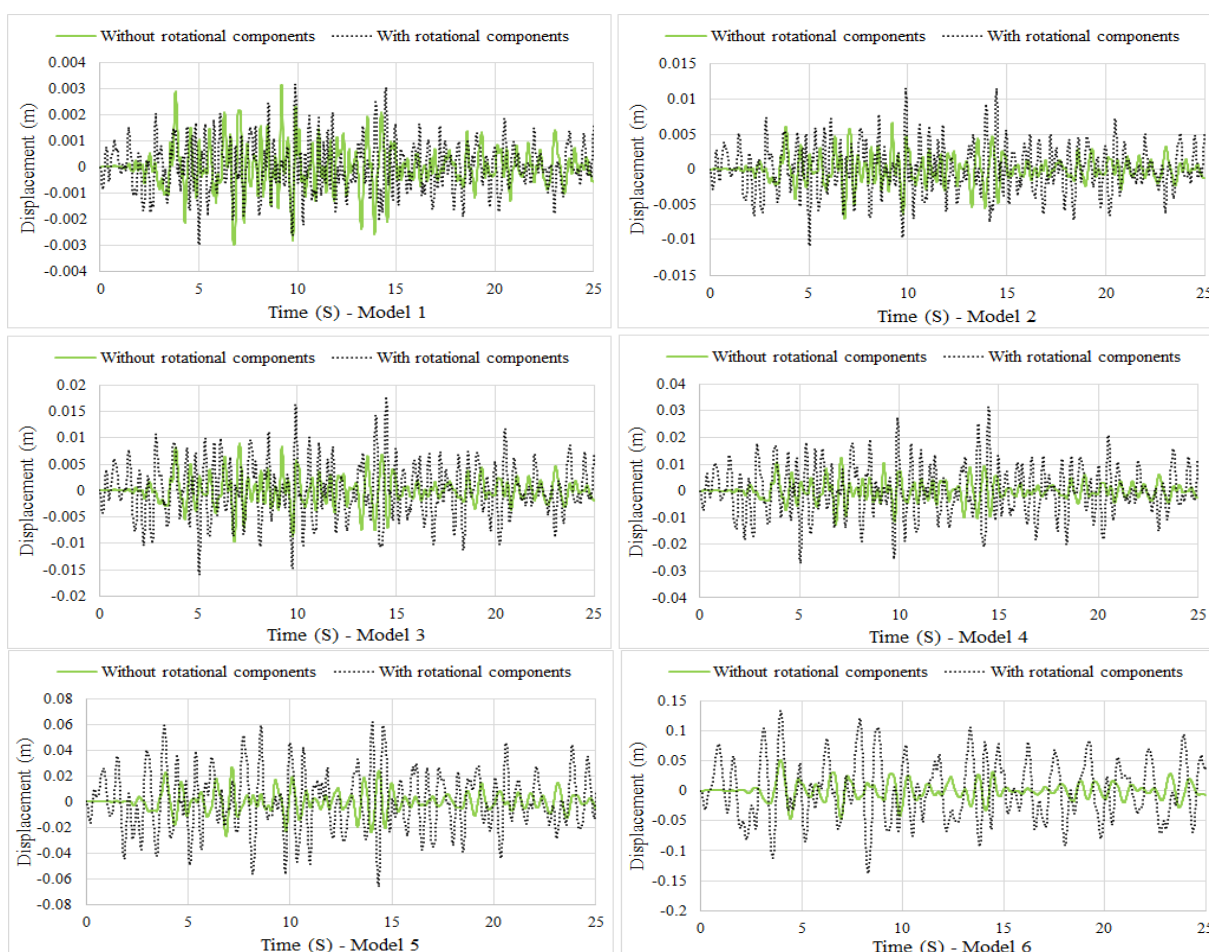
(ف)



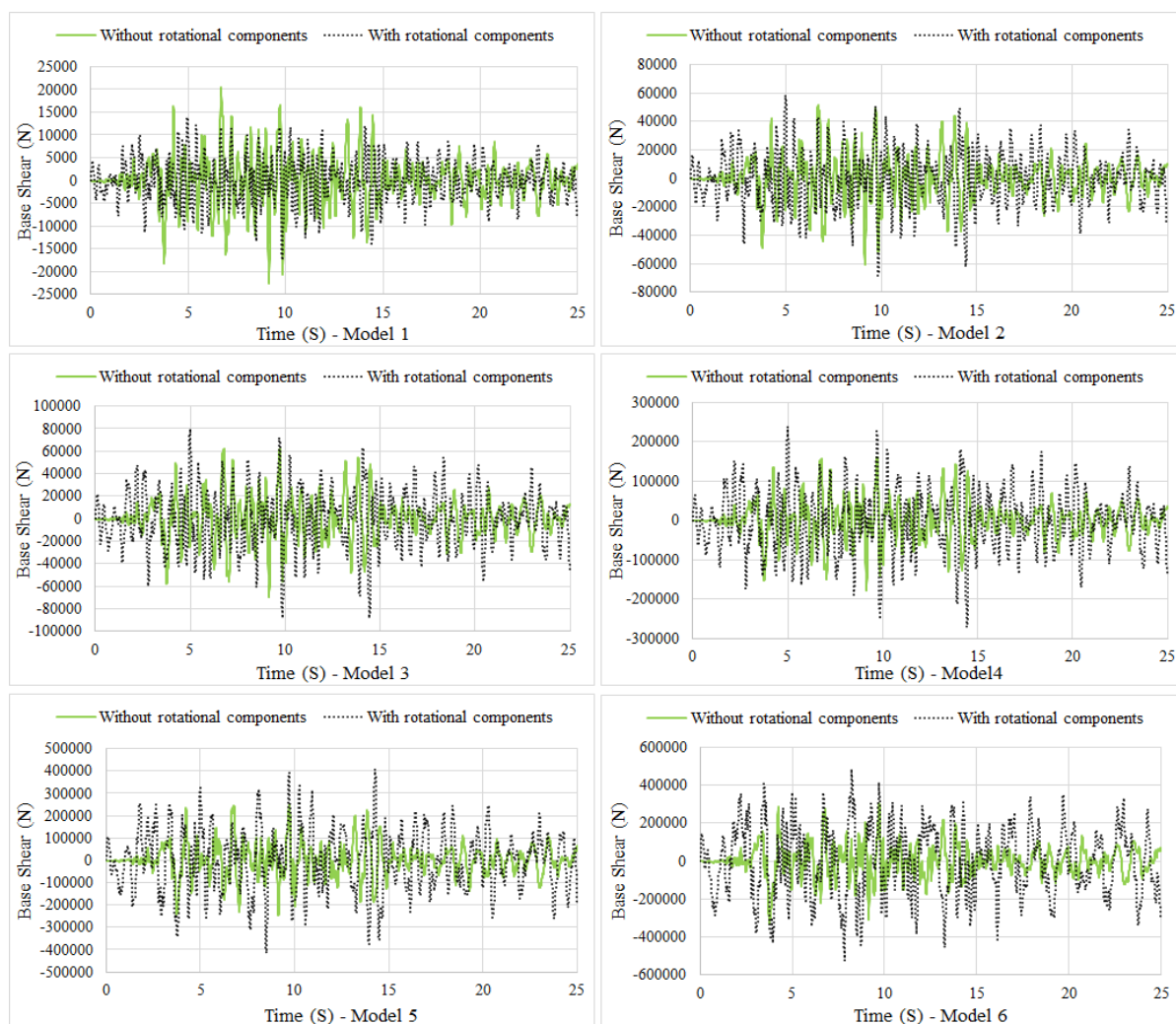
(ب)

(الف)

شکل ۷. پوش تنش اصلی اول دودکش های مورد مطالعه برای زلزله تفت. الف) مولفه های انتقالی ب) مولفه های دورانی (به ترتیب مدل اول تا ششم)



شکل ۸. تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج دودکش تحت اثر زلزله تفت در راستای X منطبق بر محور X (مدل ۱ تا ۶)



شکل ۹. تاریخچه زمانی برش پایه دودکش تحت اثر مولفه های زلزله تفت در راستای X منطبق بر محور X (مدل ۱ تا ۶)

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار دینامیکی خطی دودکش های فولادی با ارتفاع های مختلف تحت اثر مولفه های انتقالی و اثر توامان مولفه های انتقالی و دورانی ناشی از چهار زلزله مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و نتایج زیر به دست آمده است:

۱- مولفه پیچشی ناشی از زلزله سن فرناندو با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه شد و با نتایج کار سایر مولفان مقایسه شد که نشان از تطابق خوب روش به کار رفته در این مطالعه دارد. میزان اختلاف پاسخ ها حدود ۳ درصد بوده که این اختلاف ناشی از ثابت در نظر گرفتن سرعت موج برشی و زاویه برخورد در کار این مولفان می باشد.

۲- نتایج نشان داد که چنانچه فرکانس مولفه های گهواره ای زمین لرزه و فرکانس غالب سازه در یک بازه قرار گرفته باشند اثرات مولفه های گهواره ای بر میزان پاسخ تغییر مکان در راستای افقی حالت تشدید کننده دارند بطوریکه در حالت اعمال مولفه های دورانی زلزله مقدار ماکزیمم تغییر مکان برای مدل های مورد بررسی نسبت به حالت عدم اعمال این مولفه ها ۳ برابر می شود در حالی که چنانچه مقادیر فرکانس غالب سازه و فرکانس غالب مولفه ای گهواره ای با یکدیگر اختلاف داشته باشند هر چند که مقادیر بیشینه شتاب مولفه ای گهواره ای زیاد باشد ولی اثرات این مولفه ها بر بیشینه پاسخ افقی سازه قابل توجه نمی باشد و حتی در مواردی اعمال مولفه های دورانی بر پاسخ ها تاثیر کاهنده دارند بطوریکه بیشترین مقدار کاهش پاسخ برای تغییر مکان افقی ۰/۷۸ برابر تغییر مکان افقی بدون اعمال این مولفه می باشد.

- ۳- با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله مقادیر بیشینه تغییرمکان قائم نسبت به حالاتی که این مولفه‌ها لحاظ نشده‌اند در برخی موارد افزایش یافته و در برخی موارد کاهش می‌یابد که مقادیر این کاهش و افزایش بسته به نوع زلزله و ارتفاع سازه تغییر می‌کند بطوریکه در بیشترین حالت افزایش و کاهش پاسخ، مقدار پاسخ تغییرمکان قائم با اعمال مولفه‌های دورانی به ترتیب تا ۳ و ۰/۵ برابر آنالیز بدون این مولفه‌ها می‌گردد.
۴. با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله مقادیر بیشینه برش پایه نسبت به حالاتی که این مولفه‌ها لحاظ نشده‌اند در اکثر موارد کاهش می‌یابد و در چند مورد افزایش می‌یابد که ماکزیمم مقادیر این کاهش و افزایش به ترتیب برابر ۰/۸۰۴ و ۱/۸۰۲ می‌باشد که بسته به نوع زلزله و ارتفاع سازه تغییر می‌کند.
- ۵- با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع دودکش آهنگ افزایش ماکزیمم تغییرمکان افقی با در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی نسبت به حالاتی که این مولفه‌ها در نظر گرفته نشده برای دو مورد از زلزله‌ها تندتر شده است در حالیکه برای دو مورد دیگر تقریباً برابر است که نشان از اهمیت مولفه‌های دورانی زلزله و نیز محتوای فرکانسی آن دارد.
- ۶- با اعمال مولفه‌های دورانی زلزله مقادیر بیشینه تنش اصلی اول برای برخی از زلزله‌ها افزایش یافته و برای برخی کاهش می‌یابد که مقادیر این افزایش‌ها زیاد و قابل توجه می‌باشد بطوریکه ماکزیمم و مینیمم پاسخ نرمال شده برای تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۲۳/۶ و ۰/۸۰۴ می‌باشد هم‌چنین با افزایش ارتفاع اثر مولفه‌های دورانی زلزله بر تنش اصلی اول افزایش پیدا می‌کند و از طرفی محل رخ دادن بیشینه تنش اصلی اول نیز تغییر می‌کند.
- ۷- نتایج بدست آمده برای تاریخچه زمانی ارائه شده برای شش مدل مورد بررسی تحت مولفه‌های زلزله تفت نشان می‌دهد که مقادیر و شکل پاسخ برای تنش‌های اصلی، تاریخچه زمانی برش پایه و تغییرمکان افقی تاج دودکش و زمان رخ دادن بیشینه پاسخ دچار تغییر شده است.
- ۸- با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که فرکانس غالب زلزله، فرکانس غالب سازه و ارتفاع آن در حالت‌های تحلیل با مولفه‌های دورانی نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به پیک این مولفه‌ها داشته و زیاد بودن پیک مولفه‌ی دورانی به تنهایی نمی‌تواند مقادیر پاسخ‌ها را افزایش دهد.
- ۹- باتوجه به نتایج ارائه شده مشخص شد که تاثیر مولفه‌های دورانی زلزله بر پاسخ دودکش‌های فولادی بسیار قابل توجه بوده و از طرفی مقادیر این پاسخ‌ها برای زلزله‌های مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد و لذا در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی در تحلیل بررسی دودکش‌های فولادی موجود و طراحی دودکش‌های جدید ضروری می‌باشد.

مراجع

- [۱] Rajkumar, V. and Vishwanath, B. Patil. (2013). "Analysis of Self-Supporting Chimney". International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 3(5), Page (85-91).
- [۲] Rohini Padmavathi, V. and Siva Konda Reddy, B. and Srikanth. (2012). "Study of wind load effects on tall RC chimneys". Int. J. of Advanced Engineering Technology, 3(2), Page (92-97).
- [۳] Reddy, K. R. C. and Jaiswal, O. R. and Godbole, P. N. (2011). "Wind and Earthquake Analysis of Tall RC Chimneys". Int. J. of ISSN 0974-5904, 4(6), Page (508-511).
- [۴] Kirtikanta S, Pradip S, Robin D. (2013). "Analysis of self-supported steel chimney with the effects of manhole and geometrical Properties". Int. J. of Scientific and Engineering Research, 4(5), Page (250-253).
- [۵] Reddy, B T K. S M. Hussain, S M A M. (2014). "Analysis of Self Supported Steel Chimney with Effect of Manhole". Int. J. of Scientific and Engineering, 4(5).
- [۶] Sagar S, Basvaraj G. (2015). "Performance based seismic evaluation of industrial chimney by static and dynamic analysis". Int. R. J. of Engineering and Technology, 2(4), Page (1670-1674).
- [۷] Rakshit B D, Ranjit A, Sanjith J, Chetan G. (2015). "Analysis of Contilever Steel Chimney as per Indian Satandard". J. of Engineering Search and Applications, 5(5), Page (151-162).
- [۸] Rekadi Rama, S V. Reddy, V P. (2016). "Computerized Virtual Study on Self-Supporting and Guyed Steel Chimney". Int. J. of Engineering and Technology, 3(5), Page(778-791).

- [۹] Deshpande, H. John, R. (2015). "Correlation of Geometry and Dynamic Response of Self Supported Short Circular Steel Stacks". Int. J. of Engineering Technology Science and Research IJETS R, 2(Special Issue), Page (133-144).
- [۱۰] Devil, B. Singh, S, S. (2016). "Analysis of self supporting Steel Stacks with Variable Geometrical Configuration under the seismic loading for different shapes". Int. J. of Engineering Research and General Science, 4(4), Page (229-233).
- [۱۱] Santhi, K. Sridhar, P. (2017). "Analysis of Self Supported Steel Chimney". Int. J. for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 5(3), Page (651-656).
- [۱۲] Kumar, M, A. Raju, P, M. Babu, N, V. Roopesh, K. (2017). "A parametric study on lateral load resistance of steel chimneys". Int. J. of Civil Engineering and Technology, 8(7), Page (858-875).
- [۱۳] Kalpesh, D. Shrirang, T. Abhijeet, O. (2018). "analysis of self support steel chimney with the effects of geometrical Parameters". Int. J. of Engineering Research and Application, 8(5), Page (4-9).
- [۱۴] Newmark, N M. (1969). "Torsion in symmetrical buildings". In: 4th World Conf. on Earthquake Engineering, 2. Santiago, Chile, Page (19- 32).
- [۱۵] Ghafory-Ashtiany, M. Singh, M P. (1986). "Structural response for six correlated earthquake components". Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 14(1), Page (103-119).
- [۱۶] Trifunac, M D. (1982). "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves". Int. J. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1(1), Page (11-19).
- [۱۷] Lee, V W. Trifunac, M D. (1985). "Torsional accelerograms". Int. J. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 4(3), Page (132-139).
- [۱۸] Lee, V W. Trifunac, M D. (1987). "Rocking strong earthquake accelerations". Int. J. of Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 6(2), Page (75-89).
- [۱۹] Castellani, A. Boffi, G. (1986). "Rotational components of the surface ground motion during an earthquake". Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 14(5), Page (751-767).
- [۲۰] Castellani, A. Boffi, G. (1989). "On the rotational components of seismic motion". Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 18(6), Page (785-797).
- [۲۱] Nouri, GR. Ghayamghamian, MR. Hashemifard, M. (2010). "A comparison among different methods in the evaluation of torsional ground motion". Int. J. of Iran Geophysics, 4(2), Page (32-44).
- [۲۲] Hong-Nan, L. Sun, L. Wang, SY. (2004). "Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion". Int. J. of Nuclear Engineering and Design, 232(2), Page (131-137).
- [۲۳] Lee, V W. Liang, L. (2008) "Rotational components of strong motion earthquakes". In: 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [۲۴] Kalani Sarokolayi, L. Navayi Neya, B. Tavakoli, H R. (2012). "Rotational Components Generation of Earthquake Ground Motion Using Translational Components". In: 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.
- [۲۵] Kalani Sarokolayi, L. Navayi Neya, B. Vaseghi Amiri, J. Tavakoli, H R. (2013). "Seismic Analysis of Evaluated water Storage Tanks Subjected to Six Correlated Ground Motion Component". Int. J. of Iranica Journal of Energy & Environment, 4(3), Page (199-207).
- [۲۶] Ghazvini, T. Tavakoli, H. Navayineya, B. Kalani Sarokolayi, L. (2013). "Seismic analysis of above ground storage steel tanks subjected to six correlated earthquake components". Int. J. of Latin American Journal of Solids and Structures, 10(6), Page (1155-1176).
- [۲۷] Sandeep, C. Desai, Raviji, S. Gupta, D. (2010) " Practical Engineering Approach For Generating The torsional Earthquake Excitation From Translational component". Int. J. of Advanced Structural Engineering, 4(1), Page (1-10).
- [28] ANSYS Inc.: ANSYS Documentation Version 12.1
- [29] Bathe, K. J. (1996). "Finite element procedures", In Engineering Analysis". 2th Edn. Prentice Hall: University of Michigan, Page (768-769).
- [30] Devi, B. Singh, S, S. (2016). "Analysis of Self supporting Steel Stacks with Variable Geometrical Configuration under the seismic loading for different shapes". Int. J. of Engineering Research and General Science, 4(4), Page (229-233).