

# تحلیل لرزه‌های مخازن زمینی استوانه‌ای ذخیره آب با در نظر گرفتن آثار مولفه‌های دورانی زلزله

احسان تیموری، سعید عباسی، جواد مرادلو\*

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان
- ۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان
- ۳- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

ajmoradloo@znu.ac.ir

## چکیده

در این پژوهش پاسخ لرزه‌ای مخازن فولادی ذخیره آب با احتساب اندرکنش سد و مخزن به روش لاگرانژی- اویلری تحت اثر هم زمان مولفه‌های انتقالی و دورانی زمین لرزه برای نسبت ارتفاع به قطرهای مختلف مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. بارگذاری لرزه‌ای مشتمل بر سه مولفه انتقالی و سه مولفه دورانی زمین لرزه بوده است. ابتدا مولفه‌های دورانی زلزله با استفاده از مولفه‌های انتقالی به دست آمده و سپس تحلیل‌های لرزه‌ای با در نظر گرفتن این مولفه‌ها و بدون آن‌ها انجام گرفته است. در برآورد مولفه‌های دورانی وابستگی سرعت و زاویه برخورد موج به فرکانس در نظر گرفته شده است. اندرکنش آب و سازه در تحلیل‌ها با احتساب تراکم پذیری سیال و مرزهای جاذب انرژی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال مولفه‌های دورانی، مقادیر بیشینه تغییر مکان‌ها و تنش‌ها کاهش می‌یابند و همینطور توزیع آنها نیز تغییر می‌کند. این کاهش برای مخازن خالی به مراتب بیشتر بوده است. همینطور با افزایش ارتفاع مخزن آثار کاهنده مولفه‌های دورانی در پاسخ لرزه‌ای مخازن کاهش یافته و مقادیر پاسخ در تحلیل با اعمال مولفه‌های دورانی به مقادیر پاسخ در حالت تحلیل با مولفه‌های انتقالی نزدیک می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشانگر اهمیت احتساب مولفه‌های دورانی زمین لرزه در آنالیز و طراحی این نوع از سازه‌ها است.

**کلمات کلیدی:** مولفه‌های دورانی زمین لرزه، مخزن فولادی زمینی، اندرکنش آب و سازه، تحلیل لرزه‌ای

## ۱. مقدمه

[5] همدان و همکاران [6] رفتار لرزه‌ای و دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای فولادی مایعات را مورد بررسی قرار داده و با مشاهده میدانی و نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی مقایسه کرده‌اند. جادهاو و همکاران [7] رفتار لرزه‌ای مخازن عایق ارتعاشی شده را تحت بارگذاری میدان نزدیک زمین‌لرزه مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه مزبور مخزن به صورت جرم‌های متمرکز و نوسانی مدل شده و نیز مولفه‌های نرمال و موازی گسل در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده بود. روئیزا و همکاران [8] مدل محاسباتی کارایی برای مطالعه ارزیابی رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره‌ای مایعات ارائه

مخازن ذخیره مایعات، سازه‌های مهمی در صنعت نفت، پتروشیمی و ذخیره‌ای آب هستند. تقریباً هر رویداد بزرگ زمین‌لرزه در طول دهه‌ی گذشته سبب بروز آسیب‌های جدی در تانک‌های ذخیره‌ای فولادی شده است [1]. کوپر و همکاران [2] مثال‌های متنوعی از آسیب‌های وارد شده به تانک‌های فولادی در اثر تحریکات لرزه‌ای در طول زلزله‌های آلاسکا (۱۹۶۴)، لوما پریتا (۱۹۸۹)، لندرز (۱۹۹۲) و نورتریج (۱۹۹۴) را تشریح کرده‌اند [2]. مخازن با طراحی نامناسب در طی زمین‌لرزه‌های گذشته آسیب‌های شدیدی متقبل شده‌اند. [3 -

کردند. سوخوارش و همکاران [9] سه هندسه‌ی مختلف تانک با نسبت قطر به ارتفاع و قطر به ضخامت مختلف را تحت زلزله‌ی الاسترو برای حالات مخزن خالی و پر مورد بررسی قرار دادند. کلانی و همکاران [10] مخازن استوانه‌ای بتنی با شفت مرکزی را با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه مورد بررسی قرار دادند. شاکری و همکاران [11] پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره عایق لرزه‌ای شده تحت جنبش‌های پریود بلند زمین را برای احتساب آثار اسلاشینگ مخزن بررسی کردند. ماتوسی و همکاران [12] راه حل تحلیلی برای محاسبه پاسخ لرزه‌ای اسلاشینگ مخازن استوانه‌ای ذخیره مایعات با پوشش شناور را ارائه کردند. در این مطالعات آثار ناشی از مولفه‌های دورانی زلزله نادیده گرفته شده و تحلیل‌های لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات تنها تحت اثر مولفه‌های انتقالی ناشی از زلزله صورت گرفته است.

## ۲. مولفه‌های دورانی زلزله

### ۲.۱. موج حادث SV

شکل (۱) سیستم مختصات، مولفه‌های انتقالی حرکت زمین  $u, w$  و مولفه‌ی دورانی ناشی از موج SV،  $\phi_{gz}$  را در صفحه  $y = 0$  نشان می‌دهد. همچنین برای انتشار جهت موج حادث SV با دامنه  $(A_s)$  و امواج بازتابی  $P, SV$  با دامنه‌های  $(A_{sp})$  و  $(A_{ss})$  را نشان می‌دهد. پارامترهای غیر صفر در سیستم مختصات  $(x, z)$  برای موج SV،  $u, w, \phi_{gy}$  می‌باشد. این ویژگی‌ها برای صفحه  $x = 0$  با مولفه‌های انتقالی  $v, w$  و مولفه‌ی گهواره‌ای  $\phi_{gz}$  نیز صادق است.  $\theta_1$  زاویه موج بازتابیده‌ی  $P$  ناشی از موج حادث SV است.

شکل ۱. انتشار موج حادث SV

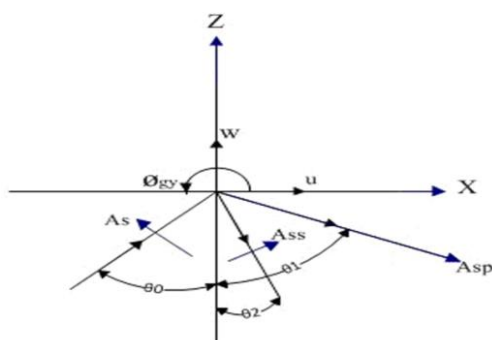


Fig. 1. Propagation of SV incident wave

در حالت کلی جنبش زمین شامل سه مولفه‌ی حرکت انتقالی و سه مولفه‌ی حرکت دورانی می‌باشد. در اکثر تحلیل‌های انجام گرفته برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله تنها اثر مولفه‌های انتقالی زلزله در نظر گرفته شده است و مولفه‌های دورانی کمتر مورد توجه واقع شدند که علت اصلی این امر کوچک بودن دامنه ارتعاش مولفه‌های دورانی و عدم امکان ثبت آنها با استفاده از دستگاه‌های استاندارد لرزه نگاری و نیز کوچک انگاشته شدن تاثیر آنها در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. نیومارک [13] به احتمال زیاد نخستین فردی است که روشی برای برآورد مولفه‌ی پیچشی از مولفه‌های انتقالی حرکات زمین ارائه کرد. در روش نیومارک سرعت انتشار موج ثابت فرض شده است. محققان زیادی مانند غفوری-آشتیانی و سینگ [14] تریفوناچ [15]، لی و تریفوناچ [16, 17]، کاستلانی و بوفی [18, 19] مطالعاتی را بر اساس روش نیومارک [13] بر روی مولفه‌های دورانی زمین انجام دادند. نوری و همکاران [20] مولفه‌ی پیچشی حرکت زمین را با استفاده از روش‌های مشتق زمانی، ژئودتیک و تفاضل محدود برآورد کردند. روش بهبود یافته‌ی توسط هونگ-نان لی و همکاران [21] که اثر امواج  $P, SV$  و  $SH$  را در نظر می‌گیرد معرفی شد. در این روش برای برآورد تاریخچه زمانی مولفه‌های دورانی در هر فرکانس، فرکانس به سرعت موج و زاویه‌ی

با در نظر گرفتن قانون اسنل،  $(\sin \theta_0) / \beta = (\sin \theta_1) / \alpha$  مولفه گهواره‌ای می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [25]:

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \quad (9)$$

که در این رابطه داریم:

$$C_x = \frac{\beta}{\sin \theta_0} \quad (10)$$

مولفه گهواره‌ای دیگر ناشی از زلزله،  $\varphi_{gx}$  نیز می‌تواند از طریق این معادلات به دست آید.

### ۲.۲. موج حادث SH

شکل (۲) موج حادث SH را نشان می‌دهد. همانطوری که از شکل نمایان است تنها یک موج بازتابی SH وجود دارد که با زاویه‌ی برابر با زاویه‌ی برخورد موج حادث SH بازتابیده می‌شود.

شکل ۲. انتشار موج حادث SH

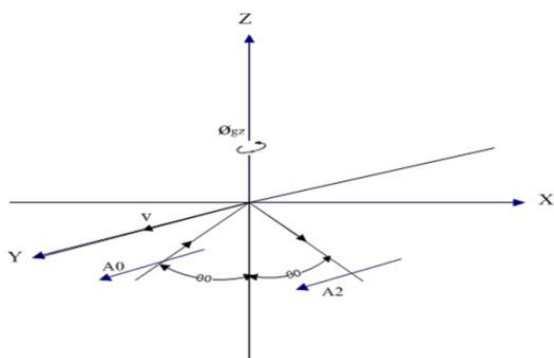


Fig. 2. Propagation of SH incident wave

معادلات توابع پتانسیل برای امواج حادث و بازتابی SH می‌تواند بصورت زیر نوشته شود [25]:

$$V_{SH} = A_{SH} \cdot \exp i\omega \left[ \frac{\sin \theta_0}{\beta} x - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right] \quad (12)$$

معادلات زیر به ترتیب تغییرمکان در راستای  $x$  و  $z$  را ارائه می‌دهند [25].

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

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

مطابق تئوری الاستیسته مولفه‌های دورانی از مولفه‌های انتقالی حرکت زمین بصورت زیر به دست می‌آیند:

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

توابع پتانسیل برای امواج هارمونیک با فرکانس  $\omega$  برابر است با [25]:

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

$$\varphi_{sp} = A_{sp} \exp i\omega \left( \frac{\sin \theta_1}{\alpha} x - \frac{\cos \theta_1}{\alpha} z - t \right) \quad (5)$$

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

$\alpha$ ،  $\beta$  به ترتیب سرعت انتشار امواج  $P$  و  $S$  است. مولفه گهواره‌ای می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\varphi_{gy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (7)$$

با در نظر گرفتن معادلات ۴ تا ۷ مولفه گهواره‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \varphi_{gy} &= \frac{\partial w}{\partial x} = \\ & i\omega \frac{\cos \theta_1}{\alpha} i\omega \frac{\sin \theta_1}{\alpha} \varphi_{sp} - \\ & \left[ i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \right] \psi_{sv} + \left[ i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \right]^2 \psi_{ss} \end{aligned} \quad (8)$$

برای مولفه گهواره‌ای در صفحه  $x-z$  و  $x-y$  ناشی از موج  $SV$ ،  
به ترتیب برابر  $G = tg\bar{e} = w/u$  و  $G = tg\bar{e} = w$  و  $G = tg\bar{e} = w$  و  
برای مولفه‌ی پیچشی در صفحه  $x-y$  ناشی از موج  $SH$ ،  
است.  $G = tg\bar{e} = v/u$  و  $K = \alpha / \beta$  و  $\theta_c$  زاویه بحرانی موج  
حادث است.

### ۳ برآورد مولفه‌های دورانی زلزله :

#### ۳,۱ برآورد مولفه‌های دورانی

از آنجایی که امواج ناشی از زلزله بیش‌تر ناشی از حرکت زمین  
در راستای گسل بوده و چنین حرکتی منجر به ایجاد امواج  
برشی می‌شود [26] از تابع پتاسیل موج  $SV$  برای تولید مولفه-  
های گهواره‌ای و موج  $SH$  برای تولید مؤلفه‌ی پیچشی استفاده  
می‌شود. بدین منظور ابتدا مولفه‌های انتقالی جنبش زمین با  
استفاده از تبدیل فوریه به فرکانس‌های گسسته تبدیل شده و  
مقدار  $G$  برای هر فرکانس تعیین می‌شود. سپس با استفاده از  
روابط (۱۶) و (۱۷) زاویه‌ی برخورد موج برای هر فرکانس  
محاسبه می‌شود. با مشخص شدن زاویه‌ی برخورد، طیف  
فوریه‌ی مولفه‌های پیچشی و گهواره‌ای جنبش زمین به ترتیب  
با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۳) محاسبه شده و در نهایت با  
تبدیل عکس فوریه تاریخچه‌ی زمانی مولفه‌های پیچشی و  
گهواره‌ای جنبش زمین تعیین می‌شود.

#### ۳,۲ درستی‌آزمایی

برای درستی‌آزمایی ابتدا مولفه پیچشی ناشی از زمین‌لرزه سن  
فرناندو ثبت شده در ایستگاه سد پاکویما با استفاده از روش  
ارائه شده فوق محاسبه شده و سپس با نتایج کار لی و  
لیانگ [21, 22] مقایسه شده است. 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 است.  
در شکل (۳) مولفه پیچشی به دست آمده از کار لی و لیانگ  
[21] با نتایج پژوهش مقایسه شده‌اند. بیشینه شتاب‌های  
پیچشی و گهواره‌ای ناشی از کار لی و لیانگ [21] به ترتیب

امواج حادث و بازتابی  $SH$  در جهت  $y$  میدان تغییر مکان  $v$  را  
ایجاد می‌کنند که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$v = 2V_{SH} = 2V_{SH} \exp i\omega \left[ \frac{\sin \theta_0}{\beta} x - t \right] \quad (13)$$

مولفه پیچشی  $\varphi_{gz}$  از معادلات (۱۱) و معادلات (۱۳) تا (۱۵)  
به صورت معادله زیر دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \varphi_{gz} &= \frac{1}{2} \left( -\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \\ \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial V_{SH}}{\partial x} = i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta} \frac{v}{2} \\ &= \frac{i\omega}{2C_x} v \end{aligned} \quad (14)$$

که در این معادله داریم :

$$C_x = \beta / \sin \theta_0 \quad (15)$$

با فرض اینکه مولفه‌های انتقالی حرکت زمین  $w$  و  $u, v$   
می‌توانند در میدان آزاد اندازه‌گیری شوند، مولفه‌های دورانی  
ناشی از حرکت زمین اعم از مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی  
می‌توانند به ترتیب از معادلات (۸) و (۱۴) به دست آیند. این  
معادلات نیاز به محاسبه‌ی فرکانس وابسته به زاویه برخورد  
امواج،  $\sin \theta_0$  دارند.

#### ۳,۲ زاویه برخورد

با در نظر گرفتن  $x = \sin \theta_0$  و استفاده از قانون اسنل، زاویه  
برخورد امواج حادث  $SV$  و  $SH$  از معادلات (۱۶) و (۱۷) به  
دست می‌آید [24]:

$$G = \frac{2x\sqrt{1-k^2x^2}}{k(1-2x^2)} \quad (16) \theta_0 < \theta_c$$

$$G = \frac{2x\sqrt{k^2x^2-1}}{ik(1-2x^2)} \quad (17) \theta_0 > \theta_c$$

شکل ۳. مقایسه تاریخچه زمانی مولفه‌ی پیچشی حول محور Z برای این پژوهش و کار لی و لیانگ

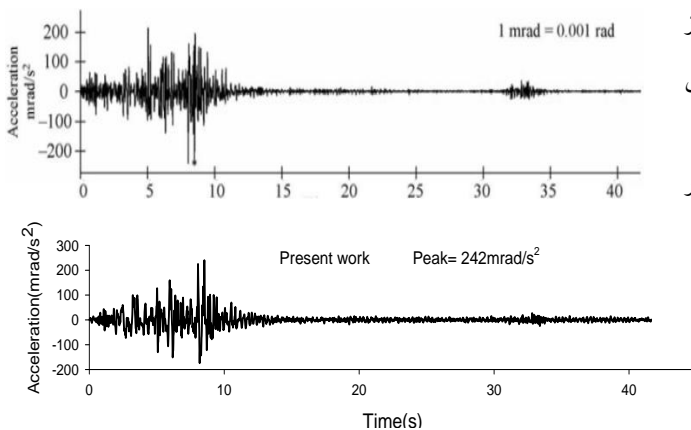


Fig. 3. Comparison of the time history of the torsional component around the Z axis ( the present study and the Lee and Liang's research

برابر ۲۴۸- و ۳۷۲/۵ میلی رادیان بر مجذور ثانیه است که این مقادیر برای این پژوهش برابر ۲۴۲- و ۳۸۳- میلی رادیان بر مجذور ثانیه به دست آمده است. اختلاف ناچیز ناشی از ثابت در نظر گرفته شدن زاویه‌ی برخورد و سرعت موج برشی در کار لی لیانگ [21] است .

مشخصات زمین لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در ادامه در اشکال (۴ تا ۷) تاریخچه زمانی مولفه‌های پیچشی و گهواره‌ای برآورد شده روش ارائه شده فوق برای زلزله‌های مزبور نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات زمین لرزه‌های استفاده شده در این پژوهش

Event	Event date	Station	Epicentral Distance (km)	Registered Component	PGA(g)	Shear wave velocity (m/s)
San Fernando	1951/01/24	Pacoima dam	11.86	PCDDWN	0.699	2016.1
				PCD164	1.226	
				PCD254	1.16	
Taft	1952/07/21	Lincoln School	35	VERTICAL	0.155	385.4
				S69E	0.179	
				EAST-WEST	0.17	
Tabas	1952/07/21	Boshrooye70	74.66	BOS-V1	0.085	338.6
				BOS-L1	0.107	
				BOS-T1	0.089	

Table 1. The characteristics of the used earthquake's records

شکل ۴. مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی زلزله سن فرناندو

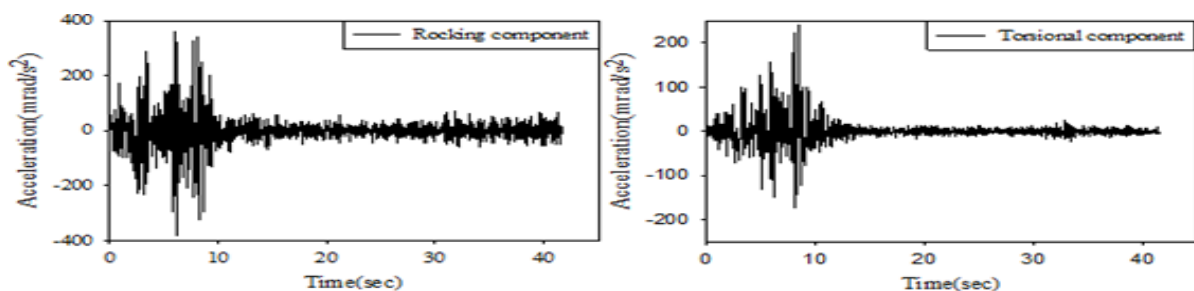


Fig. 4. Rocking and torsional components of the San Fernando earthquake

شکل ۵. مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی زلزله تفت

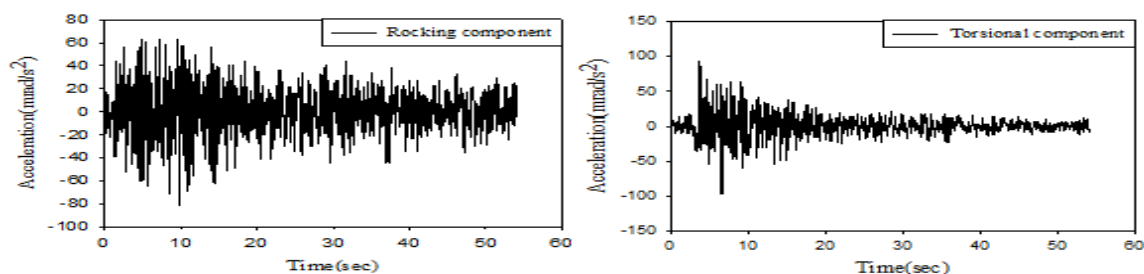


Fig. 5. Rocking and torsional components of Taft earthquake

شکل ۶. مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی زلزله طیس

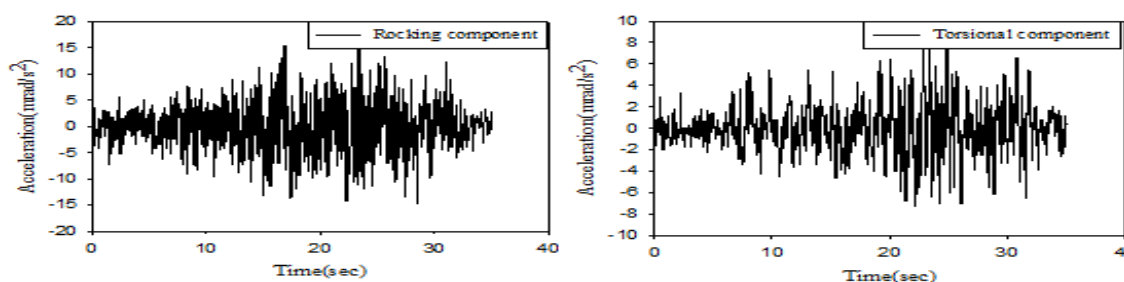


Fig. 6. Rocking and torsional components of the Tabas earthquake

جدول ۲. مشخصات هندسی مدل‌های مورد بررسی قرار گرفته

Model	Diameter (m)	Height (m)	Thickness (mm)	Ratio of height to radius
A	3.05	1.2	9.53	0.4
B	3.05	3.05	9.53	1
C	3.05	6.1	9.53	2
D	3.05	9.15	9.53	3

Table 2. Geometric characteristics of the studied models

جدول ۳. مشخصات مادی سیال و مخزن

Viscosity	Bulk Module	Density
$1.13 \times 10^{-3} \text{ (N.s/m}^2\text{)}$	$2068.5 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Steel		
Poisson Ratio	Density	Module of Elasticity
0.3	$7857 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	200 (GPa)

Table 3. Specifications of fluid and tank material Water

برای صحت سنجی مدل ساخته شده نتایج حاصل از آنالیز مودال مدل مربوطه با نتایج آنالیز مودال تانک اشاره شده در مرجع [9] مورد مقایسه قرار گرفته که نشان از صحت مدل ساخته شده مربوطه دارد (جدول ۴). در ادامه در این

## ۴. مدل‌سازی عددی

۴.۱. مدل اجزا محدود سیستم تانک و مخزن

در این مطالعه تانک‌های عمودی در سه مدل با نسبت ارتفاع به قطرهای مختلف که نشان دهنده تانک‌های بلند و کوتاه می‌باشد در نرم افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل شدند. در تحلیلها برای مدل‌سازی سازه تانک از المان پوسته و برای مدل‌سازی آب از المان اکوستیک استفاده شده است. در شکل ۷ مدل المان محدود تانک و مخزن ارائه شده است و نیز در جدول ۲ و ۳ به ترتیب مدل‌های مورد بررسی و مشخصات مادی تانک ارائه شده است.

شکل ۷. مدل اجزا محدود مخزن و تانک

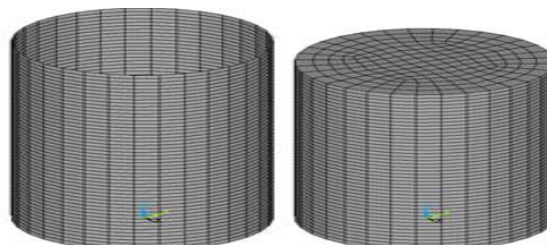


Fig. 7. Finite element model of tank and containing fluid

## ۶-۱ بررسی لرزه‌ای تانک‌های مورد مطالعه تحت زلزله تفت

در شکل (۸) پوش تنش اصلی اول به ترتیب برای حالات تانک پر نشان داده شده است. مقادیر بیشینه این تنش‌ها برای تانک‌های پر و خالی در جدول (۵ و ۶) ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جداول و اشکال فوق مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی، بیشینه مقدار تنش اصلی اول نسبت به حالاتی که این مولفه‌ها در نظر گرفته نشده است کاهش پیدا کرده و نیز الگوی توزیع تنش اصلی اول نیز تغییر یافته است. در حالات تانک خالی مقادیر بیشینه تنش اصلی اول برای حالات تحلیل سه مولفه‌ای به ترتیب برابر ۰/۰۴۳، ۰/۰۵، ۰/۰۶۹ و ۰/۰۹۲۵ و برای تحلیل با احتساب مولفه‌های دورانی به ترتیب برابر ۰/۰۲۴، ۰/۰۳۰۶ و ۰/۰۴۶ و مگاپاسکال است که نشان از کاهش بیشینه مقدار تنش اصلی اول در تحلیل با احتساب مولفه‌های دورانی دارد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که بیشینه مقدار تنش اصلی اول مخزن پر در حالات تحلیل سه مولفه‌ای به ترتیب ۲/۹۴، ۹/۵، ۱۹/۵ و ۲۹/۴ و برای تحلیل ۵ مولفه‌ای به ترتیب برابر ۲/۲۷، ۷/۷۲، ۱۶/۷ و ۲۶ مگاپاسکال است که نشانگر کاهش بیشینه مقدار تنش اصلی اول در حالت احتساب مولفه‌های دورانی می‌باشد. اما در حالت مخزن پر مقادیر پاسخ‌ها از اختلاف کم-تری نسبت به مخزن خالی برخوردارند.

در شکل (۹) تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج تانک برای هر سه مدل مورد مطالعه برای مخازن پر و خالی ارائه شده است. مقادیر بیشینه تغییر مکان تاج برای مدل‌های خالی در تحلیل سه مولفه‌ای به ترتیب برابر ۱/۸۶، ۱/۷۷، ۷/۱۰ و ۲۰/۵ (mm\*10<sup>-3</sup>)<sup>۳</sup> و برای تحلیل با احتساب مولفه‌های دورانی به ترتیب برابر ۱/۳۴، ۱/۴۰ و ۵/۶ (mm\*10<sup>-3</sup>) است که این مقادیر برای مخزن پر در تحلیل سه و پنج مولفه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۷۳۲، ۱۲/۱، ۷۸/۲ و ۲۵۸ و ۵۹/۴، ۸/۹۹ و ۱۹۶ (mm\*10<sup>-3</sup>) است که نشانگر کاهش تغییر مکان در تحلیل با احتساب مولفه‌های دورانی نسبت به تحلیل‌های سه مولفه‌ای است و همچنین دریافته می‌شود که با افزایش ارتفاع تاثیر مولفه‌های دورانی بیش‌تر می‌شود.

تحقیق دو مدل دیگر برای بررسی اثرات تراز مخزن و نیز نسبت قطریه ارتفاع بر روی پاسخ سازه تحت مولفه‌های دورانی زلزله توسط مولفین ساخته شدند.

جدول ۴. مقایسه نتایج مقادیر ویژه تحلیل بانایج مرجع [۹]

Full Tank		Empty Tank	
refrence [9]	Present study	refrence [9]	Present study
10.353	10.67	3.27	3.34

Table 4. Comparison of the eigen values ( present analysis with refrence)

## ۵-۱ اندرکنش سازه و سیال

معادله‌ی حاکم بر توزیع فشار هیدرودینامیکی در محیط سیال، معادله‌ی هلمهولتز می‌باشد:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (18)$$

در این رابطه:  $\rho$  دانسیته سیال،  $P$  فشار سیال،  $C$  سرعت صوت در سیال می‌باشد. در حل معادله‌ی فوق از شرایط مرزی زیر استفاده شده است:

در سطح آزاد  $P=0$

در مرزهای جامد  $\rho \bar{a}_{ns} = - \frac{\partial P}{\partial n}$

$n$  و  $a_{ns}$  شتاب سازه نرمال بر مرز و بردار نرمال مرز می‌باشند.

## ۶. تحلیل‌های لرزه‌ای مخازن

در این مطالعه تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی برای هر سه تانک مزبور برای حالات ۹۰ درصد پر و خالی تحت سه زلزله‌ی ارائه شده در جدول ۱ با در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی و بدون آنها انجام گرفته است. مدل میرایی مورد استفاده مدل میرایی رایلی، با نسبت میرایی ۵ درصد و با در نظر گرفتن مودهای اول و سوم به دست آمده است. در این بخش نتایج تحلیل‌ها برای بارگذاری زمین‌لرزه تفت ارائه شده و در ادامه آن خلاصه نتایج برای بارگذاری‌های دیگر ارائه می‌شود.

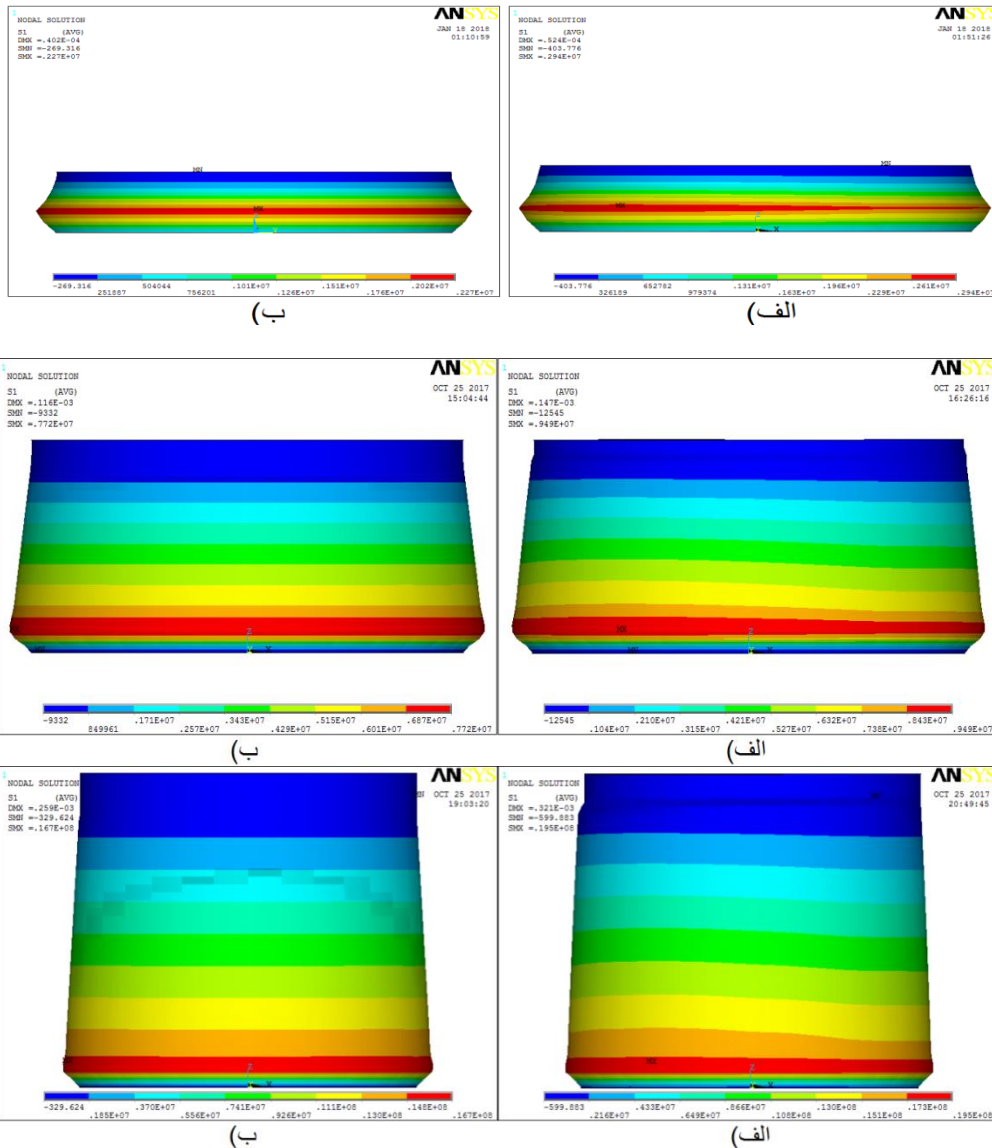


۲-۶ نتایج دیگر تحلیل‌ها

افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع میزان تفاوت پاسخ‌ها کم‌تر شده و تاثیر مولفه‌های دورانی کمتر می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) برای مخزن پر مشخص می‌شود که مانند حالات مخزن خالی میزان تغییر مکان بیشینه، تنش اصلی اول و تنش برشی بیشینه برای مدل‌های مورد بررسی نیز در حالت با احتساب مولفه‌های دورانی نسبت به تحلیل سه مولفه-ای کاهش پیدا کرده است. در حالات مخزن پر، مولفه‌های دورانی زلزله تاثیر کمتری در کاهش میزان تغییر مکان‌ها نسبت به حالات خالی دارند.

در جداول (۵ و ۶) به ترتیب بیشینه تغییر مکان افقی، بیشینه تنش اصلی اول و نیز بیشینه تنش برشی برای هر کدام از زلزله-های مزبور ارائه شده است. با توجه به جدول (۵) برای مخزن خالی مشخص می‌شود که مقادیر بیشینه پاسخ‌ها شامل تغییر مکان‌ها، تنش اصلی اول و تنش برشی بیشینه با احتساب مولفه‌های دورانی زمین‌لرزه کاهش یافته است. علاوه بر این مقادیر بیشینه تغییر مکان‌ها برای حالات بدون احتساب و با احتساب مولفه‌های دورانی با افزایش نسبت ارتفاع به قطر

شکل ۸. پوش تنش اصلی اول مخزن پر تحت زلزله تفت. الف) فقط انتقالی - ب) انتقالی و دورانی به ترتیب برای مدل‌های A, B, C





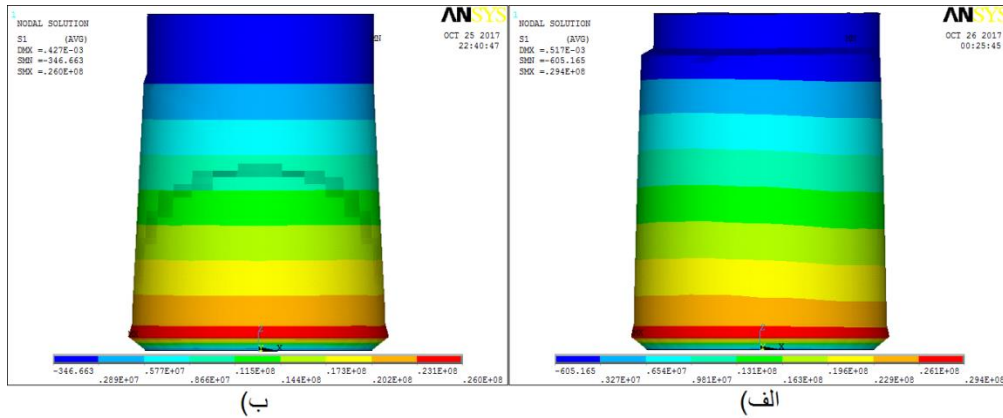
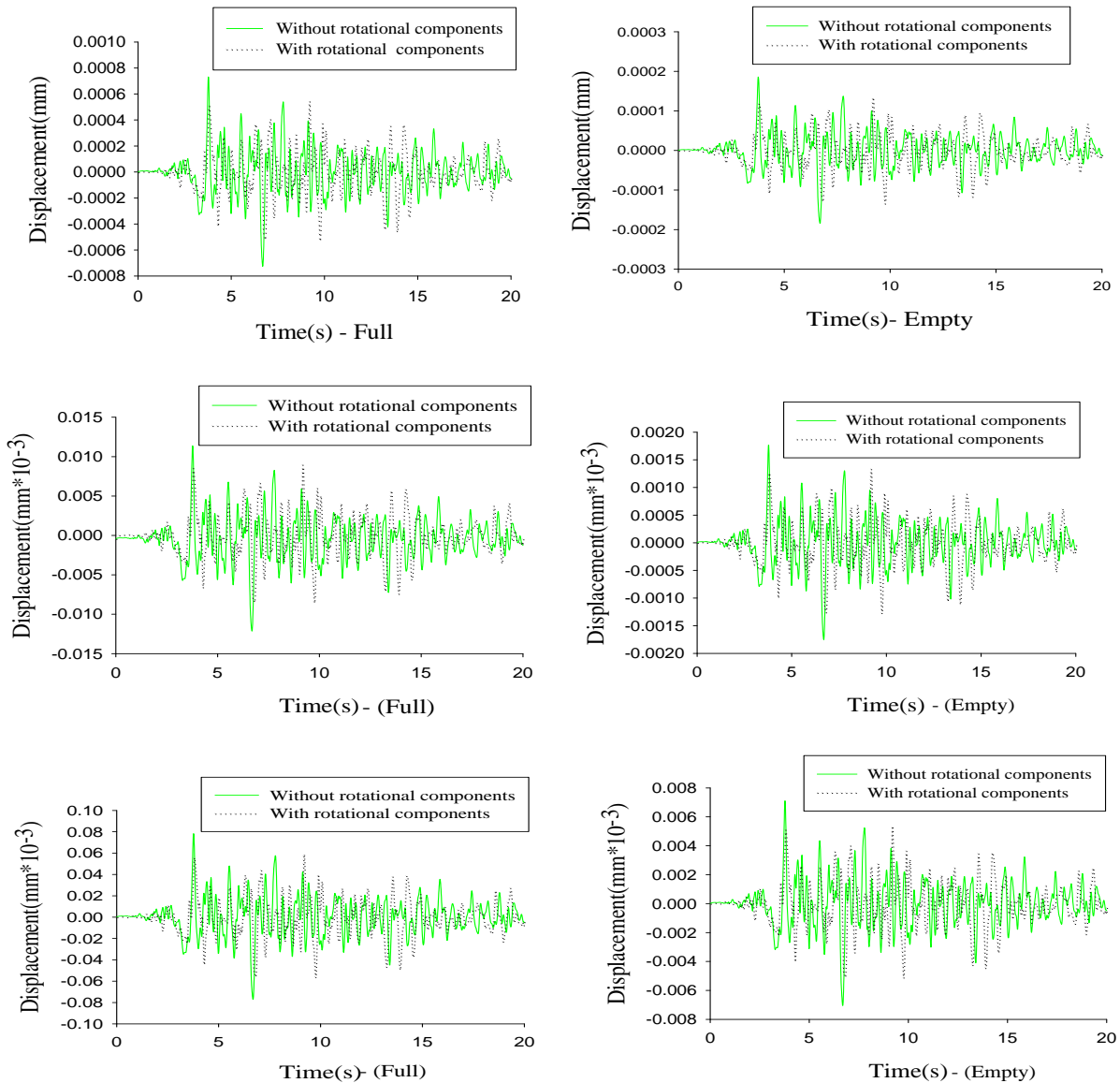


Fig. 9. The push of first principal stress of the full tank subjected to the Taft earthquake. (A) Transitional only (b) Transitional and Rotational component for models A, B, C

شکل ۹. تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج تانک تحت اثر زلزله تفت (به ترتیب اشکال برای مدل‌های A, B, C, D)



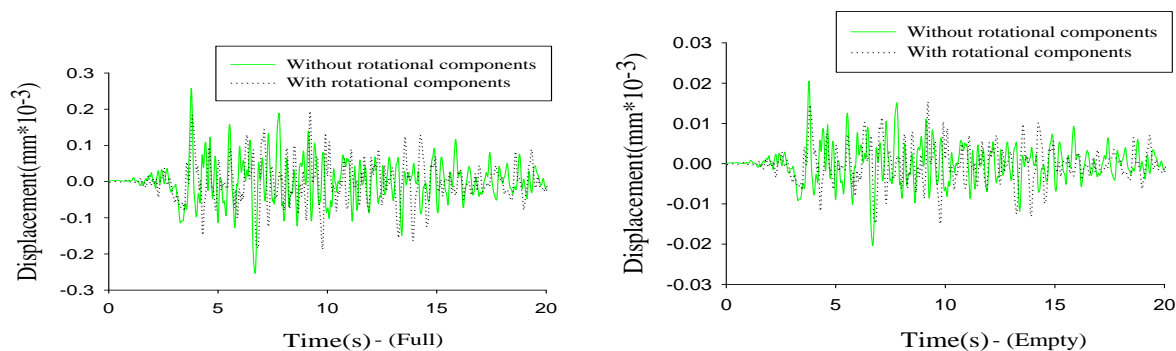


Fig. 10. Time history of tank crown displacement subjected to Taft earthquake loading (Models A, B, C, D, respectively)

جدول ۵. بیشینه مقادیر تغییر مکان افقی و تنش‌های اصلی و تنش برشی برای مخزن خالی

Model	Earthquake	The maximum of horizontal displacement $mm \cdot 10^{-3}$			The maximum of the first principal stress (MPa)			Maximum Shear Stress (MPa)		
		3-Component	5-Component	Percentage Change	3 component	5-component	Percentage Change	3-Component	5-Component	Percentage change
A	San Fernando	35.7	33	7.5	2.23	1.58	29.14	1.14	1.01	11.4
	Tabas	0.757	0.323	57.33	0.022	0.015	31.81	0.0126	0.01	20.63
	Taft	1.05	0.508	51.64	0.043	0.0241	43.95	0.0229	0.016	30.131
B	San Fernando	96.2	86.6	9.98	5.76	4.23	26.56	3.09	2.75	11
	Tabas	1.54	0.881	42.79	0.028	0.0159	43.21	0.043	0.033	23.26
	Taft	1.98	1.34	32.32	0.05	0.024	52	0.062	0.0449	27.58
C	San Fernando	386	349	5.59	13	9.18	29.38	6.24	5.55	11.06
	Tabas	4.37	3.5	19.91	0.042	0.0196	53.33	0.077	0.0569	26.1
	Taft	7.15	5.42	24.2	0.069	0.0306	55.65	0.125	0.091	27.2
D	San Fernando	1113	1006	9.61	23.4	17.1	26.92	9.39	8.35	11.08
	Tabas	12.6	10.1	19.84	0.051	0.028	45.1	0.112	0.078	30.36
	Taft	20.6	15.7	23.79	0.092	0.046	50	0.188	0.136	27.66

Table 5. Maximum values of horizontal displacement and principal stresses and shear stresses for empty reservoir

جدول ۶. بیشینه مقادیر تغییر مکان افقی، تنش‌های اصلی و تنش برشی برای مخزن پر

Model	Earthquake	The maximum of horizontal displacement $mm \cdot 10^{-3}$			The maximum of the first principal stress (MPa)			Maximum Shear Stress (MPa)		
		3-Component	5-Component	Percentage change	3 component	5-component	Percentage Change	3-Component	5-Component	Percentage Change
A	San Fernando	531	522	1.69	33	28.6	13.33	16.2	11.8	27.16
	Tabas	47.1	37.6	20.17	2.68	2.12	20.9	1.33	1.05	21.05
	Taft	51.1	40.2	21.33	2.94	2.27	22.79	1.46	1.13	22.6
B	San Fernando	1399	1365	2.43	101	78.5	22.28	44.9	33	26.5
	Tabas	133	108	18.8	8.82	7.21	18.25	4.36	3.56	18.35
	Taft	144	115	20.14	9.49	7.72	18.65	4.68	3.81	18.59
C	San Fernando	4222	4004	5.16	206	159	22.82	89.2	79.6	10.76
	Tabas	292	243	16.78	18.5	15.6	15.68	9.14	7.7	15.75
	Taft	314	259	17.52	19.5	16.7	14.36	9.6	8.21	14.48
D	San Fernando	13865	12604	9.09	350	259	26	150	134	10.67
	Tabas	476	402	15.55	28.4	24.4	14.08	14	12	14.29
	Taft	507	427	15.78	29.4	26	11.56	14.4	12.8	11.11

Table 6. Maximum values of horizontal displacement and principal stresses and shear stresses for full reservoir

در ادامه برای مقایسه بهتر رفتار تانک‌های پر و خالی مورد مطالعه با نسبت‌های ارتفاع به شعاع متفاوت مقادیر بیشینه تغییرمکان در راستای افقی برای هر یک از زلزله‌های مزبور در نمودارهای ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده است. با توجه به اشکال مربوطه دریافت می‌شود که برای تمامی حالات و زلزله‌های مزبور با افزایش نسبت ارتفاع به قطر شیب افزایش تغییرمکان برای تحلیل سه مولفه‌ای نسبت به تحلیل پنج مولفه‌ای تندر است به عبارت بهتر هرچند با افزایش ارتفاع مقادیر پاسخ برای هر کدام از تحلیل‌های مدنظر افزایش می‌یابد ولی این افزایش برای

تحلیل سه مولفه‌ای بیش‌تر است. همچنین با توجه به نمودار-های مربوطه مشخص می‌شود که برای هر دو حالت تحلیل سه و پنج مولفه‌ای در حالت خالی، شیب افزایش تغییرمکان از مدل اول به مدل دوم نسبت به مدل دوم تا مدل سوم و نیز از مدل دوم به مدل سوم نسبت به مدل سوم تا مدل چهارم کندتر است و این برای مخزن پر زلزله سن فرناندو نیز صادق است در حالی‌که برای زلزله تفت و طیس تفاوت میان شیب تغییرمکان از مدل دوم تا سوم نسبت به مدل سوم تا چهارم تقریباً یکسان است.

شکل ۱۰. بیشینه تغییرمکان برای زلزله سن فرناندو

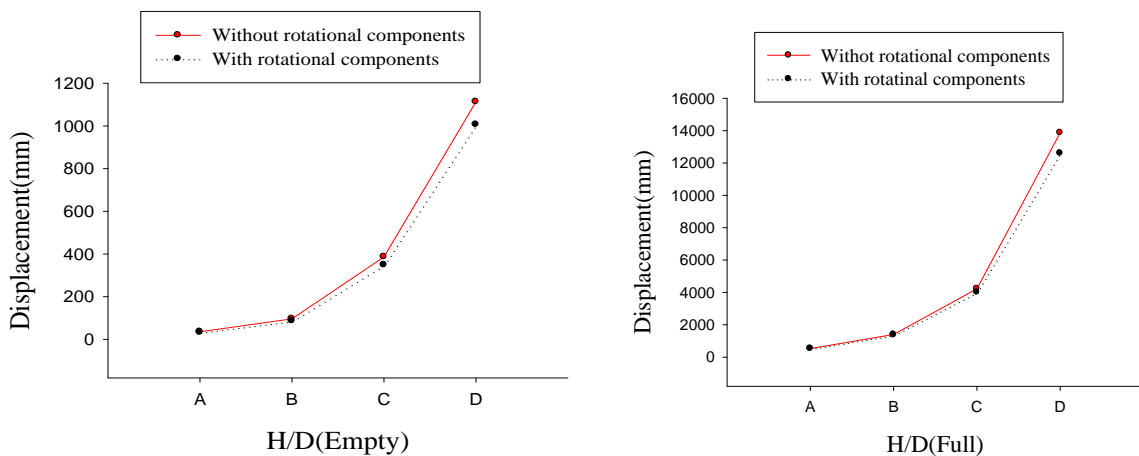


Fig. 11. The maximum displacement for San Fernando Earthquake

شکل ۱۱. بیشینه تغییرمکان برای زلزله طیس

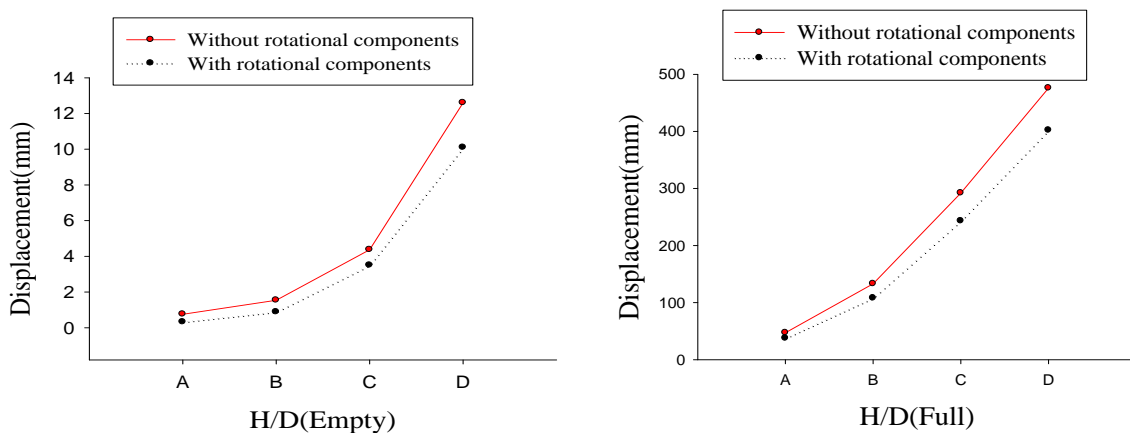


Fig. 12. The maximum displacement for Tabas Earthquake

شکل ۱۲. بیشینه تغییر مکان برای زلزله تفت

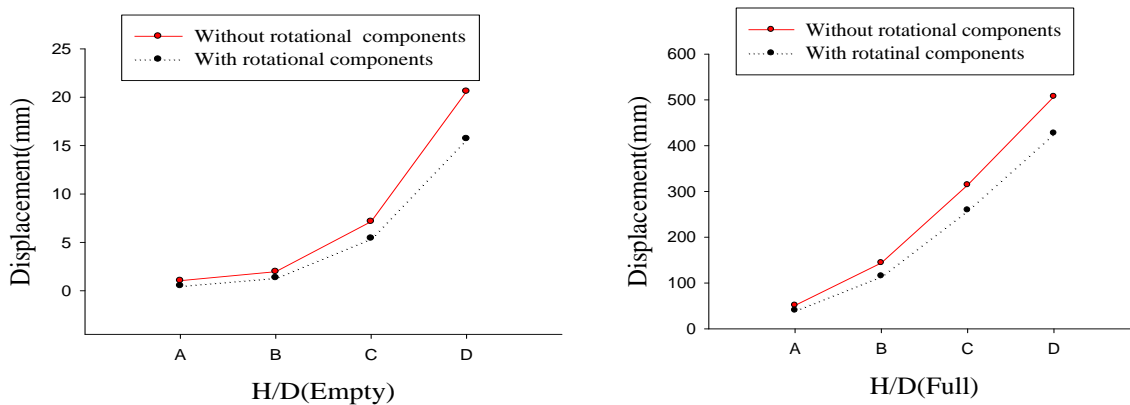


Fig. 13. The maximum displacement for Taft Earthquake

دورانی و بدون آن‌ها تندتر می‌شود که این افزایش شیب برای تحلیل سه مولفه‌ای بیشتر است

۵. تاثیر مولفه‌های دورانی برای ترازهای پایین تر آب قابل ملاحظه‌تر است. در حالات مخزن پر مولفه‌های دورانی زلزله تاثیر کمتری در کاهش میزان تغییر مکان‌ها نسبت به حالت مخزن خالی دارند.

۶. پاسخ‌های سازه‌ای با تغییر شتاب بیشینه زمین، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه و مولفه‌های دورانی و تراز آب مخزن تغییر می‌کنند.

۷. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن مولفه‌های دورانی زلزله برای تحلیل و بررسی مخازن فولادی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و باید در آنالیز و طراحی‌ها مدنظر قرار گیرد.

## References

1. Manos G, Clough RW. 1985 Tank damage during the May 1983 Coalinga earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, 449-66.
2. Cooper TW, Wachholz TP. 1999 Optimizing post-earthquake lifeline system reliability, *Proceeding of the 5th US conference on lifeline earthquake engineering*, ASCE, Vol.16, pp. 878-86.
3. HALL, J. F. (Ed.) 1995 Northridge Earthquake of January 17, 1994, reconnaissance report. Vol. 1. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland,
4. BROWN, K. J. et al. 1995 Seismic performance of Los Angeles water tanks. *Proceedings of the Fourth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*

## ۷- نتایج

در این مطالعه روش جدیدی برای محاسبه مولفه‌های دورانی ناشی از زمین‌لرزه با استفاده از مولفه‌های انتقالی زلزله پیشنهاد شده و در ادامه آثار توام مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی زمین‌لرزه به همراه مولفه‌های انتقالی آن بر پاسخ لرزه‌ای مخازن فولادی ذخیره آب در حالات خالی و پر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱. مقادیر بیشینه پاسخ‌ها شامل تغییر مکان‌ها، تنش‌های اصلی اول و تنش برشی بیشینه با احتساب مولفه‌های دورانی زمین‌لرزه کاهش می‌یابند. علاوه بر این مقادیر بیشینه تغییر مکان برای هردو حالات با احتساب مولفه‌های دورانی و بدون احتساب آن با افزایش نسبت ارتفاع به قطر افزایش می‌یابد.

۲. اعمال مولفه‌های دورانی باعث کاهش بیشینه مقادیر تغییر مکان برای تاریخچه زمانی تاج تانک است و نیز زمان رخداد مقدار ماکزیمم تغییر مکان برای هر دو حالت تحلیل مدنظر یکسان نیست..

۳. با افزایش ارتفاع مخازن میزان تفاوت حاصل در پاسخ‌ها کاهش یافته و تاثیر مولفه‌های دورانی کمتر می‌شود.

۴. با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع، شیب افزایش تغییر مکان برای حالات مخازن پر و خالی و تحلیل با اعمال مولفه‌های

## ۸- منابع

16. Lee VW, Trifunac MD. 1985 Torsional accelerograms” *Int. J. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*, 4(3), pp.132-139
17. Lee VW, Trifunac MD. 1987 Rocking strong earthquake accelerations”, *Int. J. of Soil Dynamic and Earthquake Engineering.*, 6(2), 75-89
18. 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), 751-767
19. Castellani A, Boffi G. 1989 On the rotational components of seismic motion”, *Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamic.*, 18(6) , 785-797
20. 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), 32-44
21. 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), 131-137
22. Lee VW, Liang L. 2008 Rotational components of strong motion earthquakes”. 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Beijing, China
23. Kalani Sarokolayi L, Navayi Neya B, Tavakoli HR. 2012 Rotational Components Generation of Earthquake Ground Motion Using Translational Components”, 15th World Conference on Earthquake Engineering., Lisboa
24. Kalani Sarokolayi L, Navayi Neya B, Vaseghi Amiri J, Tavakoli HR. 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) , 199-207
25. 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), 1155-117
- (O'Rourke, M. J., Ed.), ASCE, New York, pp. 668-675.
5. LUND, L. V. 1995 Lifeline utilities lessons, Northridge Earthquake. Proceedings of the Fourth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering (O'Rourke, M. J., Ed.), ASCE, New York, pp. 676-683.
6. Hamdan , F.H. 2000 Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks “*Journal of Constructional Steel Research* 53(3):307-333
7. Jadhav, M.B.; Jangid, R.S., 2006 Response of base-isolated liquid storage tanks to near-fault motions “ , *Structural Engineering and Mechanics.*, Volume 23, Issue 6, pp.615-634
8. Ruiza, R.O, Lopez-Garciaa, b, D , Taflanidisb, A.A. 2015 An efficient computational procedure for the dynamic analysis of liquid storage tanks” *Engineering Structures* , Volume 85, 15, 206-218
9. Sukhvarsh Jerath and Mark Lee 2015 Stability Analysis of Cylindrical Tanks under Static and Earthquake Loading. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9 , 72-79
10. L. Kalani Sarokolayi1, B. Navayineya2 , M. Hosainalibegi , J. Vaseghi Amiri3. 2008 DYNAMIC ANALYSIS OF WATER TANKS WITH INTERACTION BETWEEN FLUID AND STRUCTURE. The 14th World Conference on Earthquake Engineering , Beijing, China
11. Shekari , M.R., Khaji, N., , Ahmadi M.T. 2010 On the seismic behavior of cylindrical base-isolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions “*Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , Volume 30, Issue 10, 968-980
12. Matsui Tetsuya 2006 Sloshing in a Cylindrical Liquid Storage Tank With a Floating Roof Under Seismic Excitation “*J. Pressure Vessel Technol* 129(4), 557-566
13. Newmark NM. 1969 Torsion in symmetrical buildings”, 4th World Conf. on Earthquake Engineering, 2, Santiago, Chile, 19- 32
14. Ghafory-Ashtiany M, and Singh MP. 1986 Structural response for six correlated earthquake components”, *Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamic.*, 14(1), pp 103-119
15. Trifunac MD. 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), 11-19

# Seismic Analysis of Cylindrical Ground Liquid Storage Tanks Incorporating the Effects of Rotational Components of Earthquake

Ehasn Teymoori<sup>1</sup>, Said Abbasi<sup>2</sup>, Javad Moradloo<sup>3\*</sup>

1. PhD Candidate, Department of Civil engineering, University of Zanjan
2. Assistant Professor, Department of Civil engineering, University of Zanjan
3. Assistant Professor, Department of Civil engineering, university of zanjan, Corresponding authore

ajmoradloo@znu.ac.ir

## Abstract:

The present study deals with the seismic analysis of cylindrical liquid tanks, taking the rotational components of the earthquake into account for various ratios of reservoir height to diameters of tanks. While defining actual kinematic behavior of any point requires incorporating the rotational components of ground motions, as well as the translational components, however majority of studies ignore the effects of rotational components. Here we propose a methodology to evaluate the rotational components of the earthquake based on the translational components. Since the earthquake waves are mainly created by ground movements in fault direction and such kind of movements leads to creation of the shear waves, potential functions of SV and SH waves are used to evaluate the rocking and torsion components, respectively.

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. The methodology introduced to evaluate time history of rocking and torsion components of ground motion was coded in MATLAB software. 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. The results differed only for about 3% which could be attributed to the different wave velocities and incident angles. In Li's model, the incident angle and apparent wave velocity was supposed to be constant while in the present study the incident angle and apparent wave velocity were variable based on each frequency. Then, the rotational components of San Fernando, Tabas and Taft earthquakes were calculated based on the proposed model and the results were used in dynamic analysis of the tanks. Finally, seismic analyses of cylindrical liquid tanks were presented to evaluate the effects of rotational components on the seismic response of the tanks. The time history method was employed for dynamic analysis of the structure considering fluid-structure interaction. The complete fluid structure interaction was considered in analyses taking account the compressibility of fluid. Fluid domain behavior implies small displacements of inviscid compressible fluid with irrotational motion. Water compressibility has a significant impact on the fluid-structure interaction for a wide range of ratios in natural frequencies of structure to fluid domain.

It is evident that the distribution of displacements and stress is very sensitive to the rotational components of the earthquake. Applying rotational components of earthquake may alter the maximum displacement values, as well as the pattern of displacements distribution in all three directions. Incorporation of rotational components will lead to decreases in the maximum stress and displacement. This reduction in responses is more obvious in the empty tanks. An increase in the height of the tanks can boost the effects of rotational components on the structure. Results indicate that it is necessary to take rotational components of the earthquake into account while designing and analyzing cylindrical liquid tanks.

**Keywords:** rotational components of earthquake, liquid storage tanks, fluid structure interaction, seismic analysis