

## مدل سازی اندرکنش برج آبگیر - مخزن - پی تحت اثر زلزله

هاشم شریعتمدار<sup>۱\*</sup>، عادل میرحاج<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: دی ۱۳۸۷ پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۸	
<b>واژگان کلیدی:</b> اندرکنش برج آبگیر - مخزن - پی تحلیل لرزه‌ای خطی فشار هیدرودینامیکی مدل سازی المان محدود جرم افزوده هیدرودینامیکی	در این پژوهش، روش‌های مدل سازی سه بعدی برج آبگیر-مخزن-پی به صورت المان محدود استاندارد به منظور در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال-سازه بر رفتار لرزه‌ای خطی برج‌های آبگیر، بررسی و نتایج به دست آمده با روش متداول "جرم افزوده هیدرودینامیکی" مقایسه شده‌اند. با مدل سازی برج آبگیر سد دوستی (ایران) به ارتفاع ۴۶/۵ متر تا سطح آب نرمال، آب مخزن پیرامونی و محیط پی-سنگ بستر، پاسخ لرزه‌ای خطی به زلزله‌های ناغان، طبس و السنترو بررسی شد. آب مخزن پیرامونی به دو روش جرم افزوده و المان محدود مدل سازی شده است. نتایج به دست آمده از ۲۰ تحلیل لرزه‌ای نشان می‌دهند که پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر، الگوی پخش فشار هیدرودینامیکی اطراف آن و تنش اصلی به نوع مدل سازی مخزن، وجود سنگ پی، نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن و زمان حداکثر پاسخ نوک برج بستگی دارند. مثلاً در اثر زلزله طبس، برای برج با مخزن خالی، مدل سازی سنگ پی باعث کاهش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج به ترتیب به میزان ۳۱/۹٪ و ۳۵/۳٪ می‌شود.

### ۱- مقدمه

مقاومت کنند. از طرف دیگر به دلیل آن که، دو محیط سیال و سازه در تماس مستقیم با یکدیگر قرار دارند و پاسخ کلی سیستم به اندرکنش میان آن‌ها وابسته است؛ مدل سازی این سازه‌ها باید به گونه‌ای باشد که بیانگر رفتار واقعی سیستم همبسته سیال-سازه باشد. برای بسیاری از سدهای خاکی و یا بتنی، جریان آب خروجی توسط برج‌های آبگیر بتنی کنترل می‌شوند. از این رو، این گونه سازه‌ها به ویژه زمانی که گسیختگی آن‌ها، انهدام سد را نیز در پی داشته باشد؛ از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این امر اشتیاق زیادی را در میان پژوهشگران برای گسترش روش‌های نوین مدل سازی به منظور تحلیل دینامیکی لرزه‌ای پدید آورده است.

سازه‌های ویژه مانند سدها و برج‌های آبگیر، از چنان اهمیتی برخوردارند که نه تنها در شرایط عادی و بهره برداری بلکه در شرایط بحرانی چون زلزله باید دارای ایمنی بالایی باشند. پیامدهای سنگین جانی و مالی ناشی از انهدام سدهای بزرگ و سازه‌های مجاور آن مانند برج‌های آبگیر، مهندسین را رهنمون می‌سازد تا چنین سازه‌هایی را به گونه‌ای طراحی کنند که در مقابل زلزله‌های قوی با کم‌ترین آسیبی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hshariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir  
۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

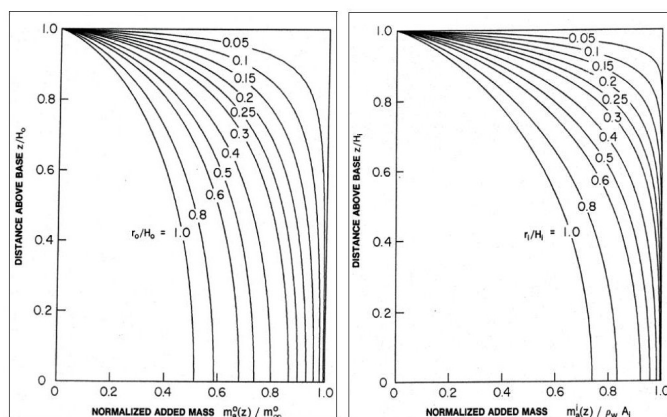
۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

## ۲- پیشینه پژوهش‌ها

روش Treftz فشارهای هیدرودینامیکی سیال تراکم پذیر را روی برج‌های آبگیر محاسبه کردند. در سال‌های اخیر پس از بررسی رفتار سازه‌های هیدرولیکی بتنی بر اساس عملکرد [۱۰] و ارائه آئین نامه [۱۱] توسط مهندسين ارتش آمریکا، آزمایش و تحلیل‌هایی نیز به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای غیرخطی برج‌های آبگیر موجود در ایالات متحده انجام شده است [۱۲-۱۳].

در اغلب پژوهش‌های یاد شده، اندرکنش برج- آب توسط "جرم افزوده هیدرودینامیکی" در نظر گرفته شده است که این روش بر پایه فرض صلب بودن سازه، تراکم ناپذیری آب و رفتار خطی مصالح سازه است و از روش "زیر سازه" به دست می‌آید که امروزه نیز به منظور طراحی و یا ارزیابی لرزه‌ای برج‌های آبگیر به کار می‌رود. ولی به دلیل گستردگی پدیده‌های محیطی موثر بر برج‌های آبگیر و پیچیدگی ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و با توجه به پیشرفت پرشتاب رایانه‌ها در دهه اخیر، مدل سازی عددی به عنوان ارزان‌ترین و موثرترین ابزار محاسبه بارهای هیدرودینامیکی و ارزیابی رفتار این سازه‌ها در اثر زمین لرزه‌ها محسوب می‌شود. از این رو، می‌توان از روش‌های عددی مانند "المان محدود استاندارد" به منظور مدل سازی واقعی و دقیق رفتار سیال و سازه و اندرکنش میان آن‌ها در اثر بارهای لرزه‌ای، در مقایسه با روش جرم افزوده هیدرودینامیکی؛ سود جست.

سرآغاز پژوهش‌های گسترده بر روی مساله اندرکنش برج آبگیر- مخزن را می‌توان پژوهش‌های Liaw و Chopra [۳-۱] دانست. آن‌ها با چشم‌پوشی از اثرات اندرکنش برج- پی- خاک و نیز اثرات ممان‌های هیدرودینامیکی، رفتار مودال برج‌های آبگیر متقارن محوری را که توسط آب محاط شده‌اند، بررسی کردند که تلاش‌های آنان منجر به ارائه مفهوم "جرم افزوده هیدرودینامیکی" برای برج‌های آبگیر شد (شکل ۱). در سال ۱۹۳۳م. Westergaard [۴] برای نخستین بار این مفهوم را برای در نظر گرفتن فشار آب بر سدها در هنگام زلزله پیشنهاد کرده بود. Jacobson [۵] در سال ۱۹۴۹م. اثرات ضربه نیروهای هیدرودینامیکی بر مخازن استوانه‌ای را بررسی کرد. همچنین Kotsubo [۶] در سال ۱۹۶۵، بر روی اثرات نیروهای لرزه‌ای بر پایه‌های بیضوی نیمه مستغرق در آب پژوهش کرد. تحلیل هارمونیک خطی برج‌های آبگیر با در نظر گرفتن اندرکنش برج- آب- پی- خاک با به کارگیری از مفهوم "جرم افزوده هیدرودینامیکی" و در حوزه فرکانس، در سال ۱۹۸۹ توسط Goyal و Chopra [۷] بررسی شد. آن‌ها همچنین روند ساده‌ای برای تحلیل طیفی و سیستم یک درجه آزاد معادل برای برج‌های آبگیر ارائه کردند [۸]. نورزاد و مرتضی زاده [۹] در سال ۱۳۸۲، با به کارگیری از



شکل ۱- جرم افزوده هیدرودینامیکی برای آب پیرامونی و درونی [۱]

## ۳- معادلات حاکم

فرکانس بیان می‌شوند. شکل کلی معادلات حرکت در حوزه فرکانس برای سیستم سازه-آب-پی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left\{ -\omega^2 \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} + (1+i\eta_s) \begin{bmatrix} K & K_b \\ K_b^T & K_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & S_f(\omega) \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \bar{r}_h^l(\omega) \\ \bar{r}_b^l(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_l^l \\ m_b^l \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{R}_h^l(\omega) \\ -S_{rq} S_{qq}^{-1} \bar{Q}_h(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

که در آن:

$\omega$ : فرکانس تحریک هارمونیک

$m$ : زیر ماتریس جرمی متناظر با نقاط گره ای بالای

پایه

$m_b$ : زیر ماتریس جرمی متناظر با نقاط گره ای روی

پایه

$i$ : عدد پایه موهومی  $\sqrt{-1}$

$\eta_s$ : فاکتور میرایی هیسترتیک ثابت برای سازه

$k$ : زیر ماتریس سختی متناظر با نقاط گره‌ای بالای

پایه

$k_{bb}$ : زیر ماتریس سختی متناظر با نقاط گره‌ای

روی پایه

$k_b$ : زیر ماتریس سختی همبسته که نقاط گره‌ای

بالای پایه را به نقاط گره‌ای روی پایه مربوط می‌کند

$k_b T$ : ترانهاده  $k_b$

$S_f(\omega)$ : ماتریس سختی دینامیکی ناحیه پی که

نسبت به نقاط گره ای روی پایه تعریف می‌شود.

$\bar{r}_h^l(\omega)$ : توابع پاسخ فرکانسی برای تغییر مکان‌های

گره ای بالای پایه ( $I=x,y,z$ )

$\bar{r}_b^l(\omega)$ : توابع پاسخ فرکانسی برای تغییر مکان‌های

گره‌ای روی پایه

$I$ : زیر ماتریس  $I$  مربوط به نقاط گره ای بالای پایه

$I_b$ : زیر ماتریس  $I$  مربوط به نقاط گره ای روی پایه

$\bar{R}_h^l(\omega)$ : بردار توابع پاسخ فرکانسی برای نیروهای

هیدرودینامیکی متناظر با نقاط گره ای واقع در مرز

مشترک سازه-آب

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

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f_1\} - [M]\{\ddot{u}_{gh}\} - [M]\{\ddot{u}_{gv}\} + [Q].\{P_h(t)\} \quad (1)$$

$$[G]\{\ddot{P}_h\} + [C']\{\dot{P}_h\} + [K']\{P_h\} = \{f_2\} - \rho.[Q]^T \{\ddot{u}\} \quad (2)$$

که در آن:

$[M], [C], [K]$ : ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی

برای سازه.

$[G], [C'], [K']$ : ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی

برای مخزن.

$[Q]$ : ماتریس همبسته.

$\{f_1\}$ : بردار نیروی جرمی  $1$  و نیروی

هیدرواستاتیک.

$\{f_2\}$ : مؤلفه نیروی ناشی از شتاب در مرزهای بین

سازه- مخزن و مخزن- پی.

$\{Ph\}$ : بردار فشار هیدرودینامیکی.

$\{u\}$ : بردار تغییر مکان.

$\{\ddot{u}_g\}$ : شتاب زمین.

$\rho$ : چگالی سیال [۱۴]

اندرکنش دینامیکی میان سازه و پی، توسط نیروهای

اندرکنشی در سطح مشترک سازه- پی بیان می‌شود.

این نیروهای اندرکنشی وابسته به فرکانس هستند و

با تغییر مکان‌های ماتریس سختی دینامیکی

(امپدانس) برای ناحیه پی ارتباط دارند.

به دلیل آن که نیروهای هیدرودینامیکی و توابع

امپدانس برای ناحیه پی، به فرکانس تحریک

وابسته‌اند معادلات حرکت سازه شامل اثرات

اندرکنشی آب- سازه و پی- سازه به راحتی در حوزه

که در تماس با آب است نسبت به حالت اولیه خود می‌شود. این تغییر مکان های نسبی سطح مشترک سیال-سازه، وضعیت کشش را- نسبت به قبل از زلزله- در جرم سیال برهم می‌زند و در نتیجه امواج فشاری پدید می‌آیند. این سیستم نوسانی که به طور دلخواهی در سیال مخزن گسترش می‌یابد موجب انتشار موج فشاری و فرآیند بازتاب در مرز صلب مخزن و سطح آزاد آن می‌شود. با مراجعه به پاسخ لرزه‌ای سازه، فقط بازتاب موج در وجه بالادست مورد توجه است. نتیجه سریع بازتاب موج، فشار هیدرودینامیکی ناشی از تغییر شکل الاستیک سازه است. پس فشارهای هیدرودینامیکی به وجود آمده از حرکات سازه و زمین، بر تغییر شکل سازه اثر می‌گذارد که بالعکس فشارها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. فشارهای هیدرودینامیکی که بدین صورت تولید می‌شوند، تنها با در نظر گرفتن تراکم پذیری آب در مخزن می‌تواند، در تحلیل وارد شود. روابط کامل اندرکنش آب- سازه، فشارهای هیدرودینامیکی متغیر با زمان و وابسته به فرکانسی را ایجاد می‌کند که می‌توانند به صورت نیروی اضافی، جرمی اضافی و با میرایی اضافی تفسیر شوند [۱۵]. جرم افزوده هیدرودینامیکی پاسخ سازه را با طولانی کردن دوره تناوب ارتعاشی تغییر می‌دهد که به نوبه خود موجب تغییر پاسخ طیفی و نیروهای زلزله می‌شود.

میرایی افزوده هیدرودینامیکی برآمده از تشعشع امواج فشاری و نیز برای برج‌های آبگیر ناشی از بازتاب یا جذب امواج فشاری در زیر مخزن است. میرایی افزوده، دامنه پاسخ سازه را به ویژه در مودهای بالاتر، کاهش می‌دهد.

به طور کلی اندرکنش سازه- سیال به عوامل زیر بستگی دارد:

- (۱) طول یا شعاع مخزن
- (۲) شکل مقطع دره در محور سازه یا سد
- (۳) میزان تراکم پذیری زمین در مرز مخزن
- (۴) شیب وجه بالادست سازه در تماس با سیال
- (۵) راستای گذر زلزله نسبت به محور سازه یا سد
- (۶) شکل نوسان مربوط به سیستم همبسته سازه- سیال

Sr<sub>q</sub>: زیر ماتریس همبسته سختی دینامیکی ناحیه پی که نقاط گره ای سطح پی در زیر پی سازه را به نقاط گره ای در سطح پی زیر آب مرتبط می‌کند.

Sq<sub>q</sub>: زیر ماتریس سختی دینامیکی ناحیه پی که نسبت به نقاط گره‌ای واقع در سطح پی زیر آب تعریف می‌شود.

$\bar{Q}_h(\omega)$ : بردار توابع پاسخ فرکانسی برای نیروهای هیدرودینامیکی متناظر با نقاط گره‌ای واقع در سطح پی زیر آب.

ماتریس امپدانس پی میان نیروهای اندرکنشی و تغییر مکان‌ها نسبت به حرکت آزاد زمین در جهت، به صورت زیر ارتباط برقرار می‌کند:

$$S_f(w) \cdot \bar{r}_b^l(w) = \bar{R}_h^l(w) \quad (4)$$

نیروهای هیدرودینامیکی و توابع امپدانس پی از تحلیل‌های جداگانه حوزه فرکانس و زیرسازه سنگ پی به دست می‌آیند [۱۱]. این معادلات برای سیستم همبسته برج آبگیر- مخزن- پی به طور جامع در مرجع [۷] آمده‌اند. فشار هیدرودینامیکی  $P(x, y, z, t)$  نیز برای سیال تراکم پذیر به وسیله معادله موج به صورت زیر بیان می‌شود:

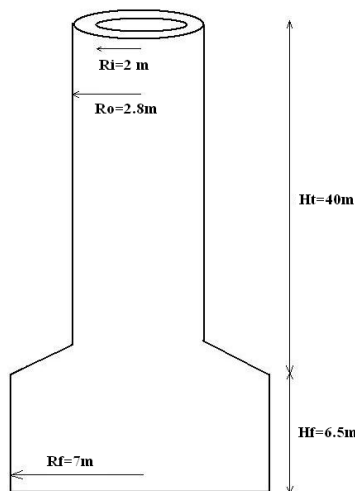
$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (5)$$

که در آن  $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ : سرعت موج یا سرعت صوت در سیال و  $K$  مدول به الک است.

#### ۴- عوامل مؤثر بر اندرکنش برج آبگیر-

##### مخزن- پی

سازه‌های هیدرولیکی و آب از راه فشارهای هیدرولیکی بر سطح مشترک سازه- آب اندرکنش دارند. به طور کلی در هنگام زلزله، این سازه‌ها به حالت ارتعاش واداشته می‌شوند که موجب ایجاد حرکات ارتعاشی سطح بالادست



شکل ۲- ابعاد هندسی برج آبگیر سد دوستی

از نرم‌افزار کامپیوتری ANSYS برای مدل سازی، بارگذاری و تحلیل، استفاده شده است. بتن به کاررفته در

برج آبگیر دارای مقاومت فشاری  $f'_c = 300 \frac{kg}{cm^2}$ ، جرم

حجمی  $\gamma_c = 2400 \frac{kg}{m^3}$ ، مدول ارتجاعی استاتیکی

$(E_c)_{st} = 273664.03 \frac{kg}{cm^2}$  و نسبت پواسون

$\nu = 0.3$  است. مقاومت کششی استاتیکی بتن از رابطه

$f'_t = 0.53 \sqrt{f'_c}$  برابر با  $f'_t = 9.18 \frac{kg}{cm^2}$  به دست

می‌آید. به دلیل بارگذاری دینامیکی لرزه‌ای بر روی برج

آبگیر، مقادیر مقاومت‌های فشاری و کششی و نیز مدول

ارتجاعی دینامیکی که  $\frac{1}{3}$  برابر مقادیر متناظر استاتیکی

است؛ به کار رفته‌اند. برج آبگیر بر روی ساختگاه سنگی با

مدول ارتجاعی استاتیکی برابر با

$(E_{rock})_{st} = 30000 \frac{kg}{cm^2}$  بنا شده است. بر اساس

پیشنهاد آئین‌نامه‌ها [۱۱] حوزه سنگ پی، بدون جرم

فرض می‌شود. آب مخزن به صورت تراکم پذیر با جرم

حجمی  $\gamma_w = 1030 \frac{kg}{m^3}$  فرض می‌شود که سرعت

انتشار امواج فشاری در آن  $V_w = 1440 \frac{m}{s}$  است. از اثر

امواج سطحی و جذب مرز کف مخزن چشم‌پوشی

(۷) مؤلفه‌های عمودی یا افقی زلزله

(۸) تراکم پذیری آب

(۹) نسبت فرکانس غالب زلزله به فرکانس پایه سیستم

همبسته سازه- سیال

(۱۰) صلبیت یا انعطاف پذیری سازه

(۱۱) چرخش پی

به بیان دیگر، در طی مدت تحریک لرزه‌ای، اثرات اینرسی

در جرم سیال بر روی سطوحی از سازه که با آب در

تماس هستند؛ افزایش می‌یابند. پیامد فوری این اثرات،

فشار هیدرودینامیک ناشی از حرکت صلب سازه نسبت به

آب مخزن است [۱۵]. در این پژوهش با به کارگیری روش

المان محدود اثرات تراکم پذیری زمین در مرز مخزن،

تراکم پذیری آب، انعطاف پذیری سازه و چرخش پی مورد

بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۵- بیان مساله و روش مدل سازی

هدف از این پژوهش، بررسی اثر روش مدل سازی سه

بعدی آب مخزن و پی به صورت جداگانه و با هم و نیز

اندرکنش برج- آب- پی بر رفتار لرزه‌ای خطی با به

کارگیری از روش "المان محدود استاندارد" است.

پژوهش‌های انجام شده تا به امروز [۷ و ۱۶]، رفتار سه

بعدی برج آبگیر و مخزن را در نظر نگرفته‌اند و برج به

صورت دوبعدی با المان‌های تیر و فشار هیدرودینامیکی

به صورت جرم افزوده هیدرودینامیکی مدل سازی و رفتار

خطی آن بررسی شده است. بدین منظور، مدل ساده

شده‌ای از برج آبگیر سد دوستی واقع بر رودخانه هریرود

در مرز ایران-ترکمنستان انتخاب شد که شکل ۲ نشان

داده شده است.

درجه آزادی فشار هستند. نرم افزار ANSYS در حل معادلات برای این المان، معادله موج سه بعدی با فرض سیال تراکم پذیر (معادله ۵) را به کار می برد.

از طرف دیگر، برای مدل سازی آب مخزن پیرامونی به صورت "جرم افزوده هیدرودینامیکی"، المان Mass21 به کار رفته است. این المان در تعریف جرم متمرکز به صورت دو بعدی و یا سه بعدی با در نظر گرفتن اثرات جرم انتقالی و ممان اینرسی چرخشی کاربرد دارد. با به کارگیری از نمودارهای مربوط به آب پیرامونی در شکل ۱، جرم افزوده هیدرودینامیکی مشخصی به کمک این المان، به گره های واقع در تراز یکسان اختصاص داده می شود.

شش حالت گوناگون برای مدل سازی و انجام تحلیل لرزه ای خطی در نظر گرفته می شود که عبارتند از:

۱. برج با پایه ثابت- مخزن خالی (ERFB)<sup>۱</sup>
۲. برج با پایه ثابت- مخزن پیرامونی (SRFB)<sup>۲</sup>
۳. برج با پایه ثابت- مخزن پیرامونی با جرم افزوده (MRFB)<sup>۳</sup>
۴. برج با سنگ پی- مخزن خالی (ERSB)<sup>۴</sup>
۵. برج با سنگ پی- مخزن پیرامونی (SRSB)<sup>۵</sup>
۶. برج با سنگ پی- مخزن پیرامونی با جرم افزوده (MRSB)<sup>۶</sup>

مخزن پیرامونی باید تا شعاعی ادامه یابد که تغییرات فشار هیدرودینامیکی قابل چشمپوشی شود. بدین منظور و برای تعیین شعاع قطع مخزن پیرامونی در انتهای دور، با انجام آنالیز مودال و بررسی مود اول، فشار هیدرودینامیکی روی برج و انتهای دور مخزن برای نسبت های گوناگون شعاع مخزن به شعاع برج به دست آمد. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود با افزایش شعاع مخزن پیرامونی، فشار هیدرودینامیکی انتهای دور مخزن کاهش می یابد ولی فشار هیدرودینامیکی روی بدنه

می شود. فرض می شود که بین پی و حوزه پی سنگی تماس کامل برقرار است و هیچ گونه بلند شدگی رخ نمی دهد.

بر اساس پیشنهاد آئین نامه های مربوطه [۱۱]، المان Solid برای مدل سازی بدنه برج آبگیر مناسب تشخیص داده می شود که در برنامه ANSYS، المان Solid65 به کار رفته است. این المان سه بعدی مکعبی، از ۸ گره تشکیل شده است که در هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی در راستای X, Y, Z وجود دارد. این المان در تحلیل پدیده ترک خوردگی در کشش و خرد شدگی در فشار به کار می رود که می توان بیش از سه نوع مصالح تقویتی (Rebar) به صورت نسبت حجمی در آن تعریف کرد. این المان، آرماتورهای تقویتی را به صورت پخش شده در حجم (Smear) در نظر می گیرد. پلاستیسیته شدن، خزش و نرم شدگی کرنش از دیگر توانایی های این المان است.

برای مدل سازی حوزه پی سنگی، المان Solid45 به کار رفته است که با فرض رفتار خطی، دارای ویژگی های مشابهی با المان Solid65 است.

به منظور مدل سازی حوزه سنگ پی نیز بنا بر پیشنهاد دستورالعمل های مربوطه [۱۱ و ۱۶]، از المان Solid بدون جرم استفاده می شود که در نرم افزار ANSYS، المان سه بعدی Solid45 به کار رفته است. این المان از تمام جهات همانند المان Solid65 است که فقط توانایی مدل سازی آرماتورها را ندارد.

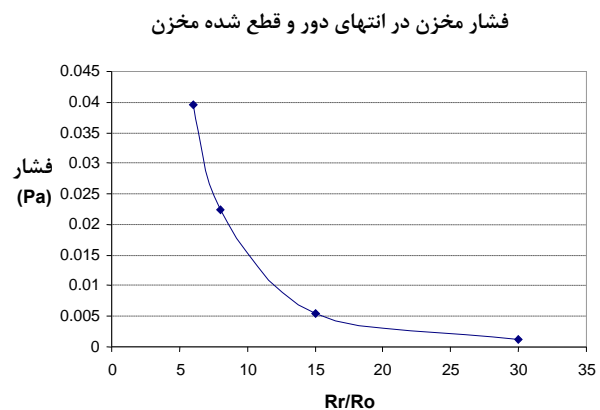
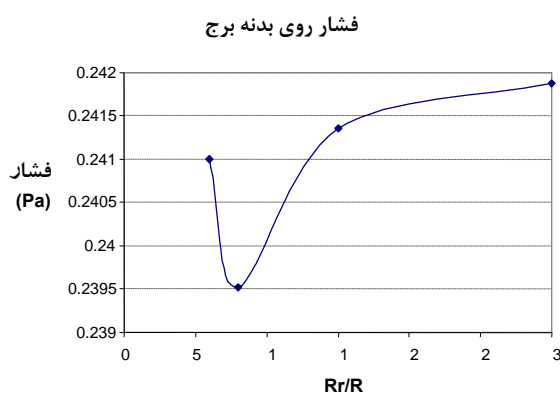
برای مدل سازی آب مخزن به صورت المان محدود از المان Fluid30 استفاده می شود. این المان سه بعدی مکعبی و ۸ گرهی برای مدل سازی سیال و سطح اندرکنش سیال-سازه در مسائل اندرکنشی به کار می رود دارای دو حالت "چسبیده به سازه" و "دور از سازه" است. المان هایی که به سازه چسبیده اند و با آن تماس مستقیم دارند، در هر گره ۴ درجه آزادی وجود دارد که شامل ۳ درجه آزادی انتقالی در راستای X, Y, Z و ۱ درجه آزادی فشار می باشند ولی المان های دور از سازه فقط دارای ۱

- 1-Empty Reservoir Fixed Base
- 2-Surrounding Reservoir Fixed base
- 3-Mass Reservoir Fixed Base
- 4- Empty Reservoir Soil Base
- 5 - Surrounding Reservoir Soil Base
- 6- Mass Reservoir Soil Base

سه زلزله ناغان، طبس و السنترو به منظور تحریک لرزه‌ای انتخاب شده‌اند. زلزله ناغان که در مدت زمان تکان قوی ۵ ثانیه ثبت شده (شکل ۴) دارای  $P.G.A = 0.7136g$  و  $P.G.D = 60.964mm$  در  $t = 2.00sec$  و محل وقوع آن بر روی خاک نوع  $I$  [۱۸] و پی‌بود غالب آن  $0.764sec$  است. این زلزله به منظور بررسی اثرات نیروهای لرزه‌ای کوتاه مدت ضربه‌ای برگزیده شده است. زلزله طبس با  $P.G.A = 0.851g$  و  $P.G.D = 945.8mm$  در  $t = 11.04sec$  و در مدت زمان تکان قوی ۲۵ ثانیه ثبت شده است. محل وقوع این زمین‌لرزه بر روی خاک نوع  $II$  [۱۸] و پی‌بود غالب آن  $0.769sec$  است که برای بررسی اثرات تداوم زلزله و شتاب زیاد لرزه‌ای انتخاب شده است. زلزله السنترو نیز که در مدت زمان ۵۴ ثانیه ثبت شده (شکل ۶) دارای  $P.G.A = 0.3129g$  و  $P.G.D = 133mm$  و پی‌بود غالب آن  $0.555sec$  است.

برج تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. از این رو، شعاع قطع مخزن پیرامونی به صورت  $R_y = 30R_0$  به دست می‌آید. در مرجع [۱۷] تمام نمودارهای مربوط به فشار هیدرودینامیکی در انتهای دور و بر روی برج به طور کامل نشان داده شده‌اند. آدمیتانس مرزی در انتهای دور مخزن برابر با یک است تا از بازتاب امواج فشاری گسترش یافته در مخزن جلوگیری شود.

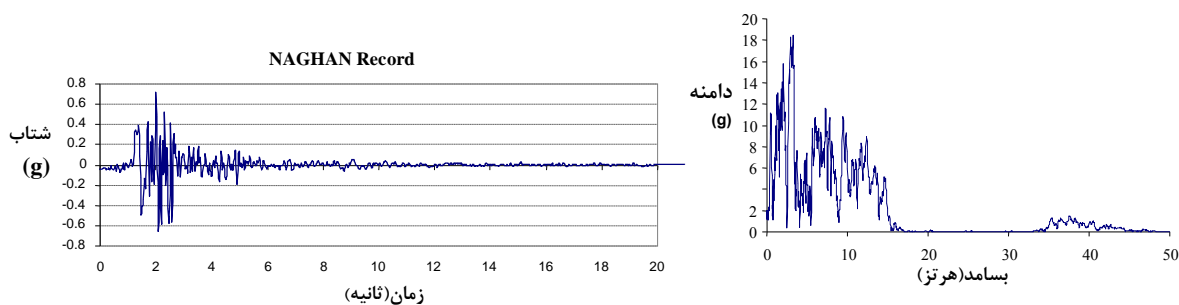
شعاع سنگ پی با کنترل تنش اصلی اول در حوزه سنگی به مقدار ۶ برابر شعاع پی برج آنگیر به دست می‌آید که بنا بر پیشنهاد دستورالعمل [۱۱] تا عمقی برابر با ارتفاع برج ( $H_f$ ) در مدل سازی گسترش یافته است. تمام درجات آزادی گره‌های واقع در بستر سنگ پی بسته شده‌اند ولی برای گره‌های کناری آن، تکیه گاه غلطکی تعریف می‌شود. در سطح مشترک کف پی برج با حوزه سنگی پی، تغییر مکان گره‌ها در همه جهات به هم‌دیگر بسته شده‌اند.



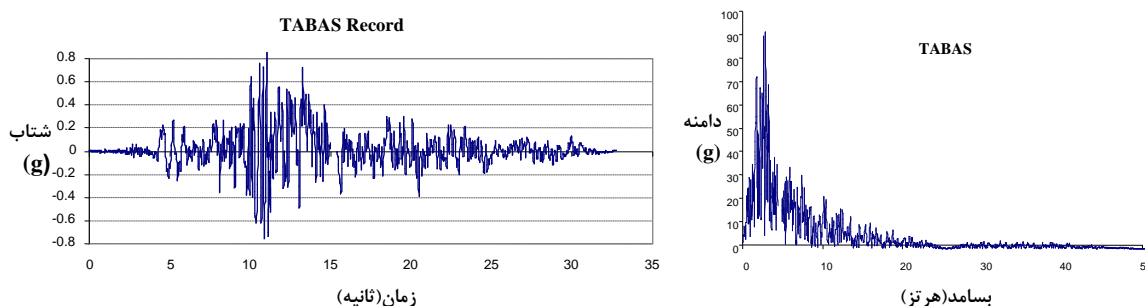
شکل ۳- فشار هیدرودینامیکی در انتهای دور (راست) و بر روی بدنه برج (چپ)

می‌شوند. به دلیل آن که اغلب تحلیل‌های اندرکنشی در حوزه فرکانس انجام می‌گیرد محتوای فرکانسی زلزله‌های مذکور با به کار گیری نرم‌افزار Signal-Seismo به دست آمده است.

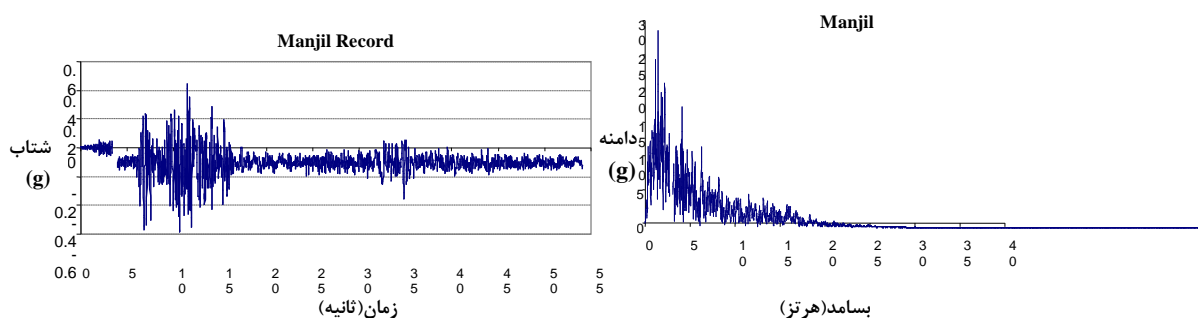
درباره زمین لرزه‌های مورد اشاره فرض شده است که رکوردهای ثبت شده به صورت Free Field در پای سازه‌هاست و تمامی اثرات نامعلوم اندرکنش خاک-سازه و جذب درونی غیر هیستریزیس می‌توانند با میرایی لزج معادل ۵ درصد مقدار بحرانی تعریف شوند. به دلیل ویژگی تقارن محوری، تحریکات فقط در یک راستا وارد



شکل ۴- نمودار محتوای فرکانسی (راست) و شتاب نگاشت (چپ) زلزله ناغان [۱۸]



شکل ۵- نمودار محتوای فرکانسی (راست) و شتاب نگاشت (چپ) زلزله طیس [۱۸]



شکل ۶- نمودار محتوای فرکانسی (راست) و شتاب نگاشت (چپ) زلزله منجیل [۱۸]

## ۶- نتایج تحلیل دینامیکی خطی

پس از تحلیل دینامیکی خطی، پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر شامل حداکثر تغییر مکان و شتاب نوک برج و زمان وقوع آن‌ها، حداکثر فشار هیدرودینامیکی، تنش اصلی اول و نیز توزیع نیروی برشی در ارتفاع و پوش تغییر شکل برای مدل‌های گوناگون به دست می‌آید که در این مقاله به اختصار نتایجی از هر زلزله ارائه شده است.

با توجه به محتوای فرکانسی دیده می‌شود که این زلزله‌ها فرکانس‌های بین ۰ تا ۴۰ هرتز را پوشش می‌دهند که فرکانس‌های ۰ تا ۵ هرتز توسط زلزله‌های طیس و السنترو بیش از سایر فرکانس‌ها تحریک می‌شوند ولی زلزله ناغان در برگیرنده فرکانس‌های بین ۰ تا ۱۵ هرتز است. رکورد لرزه نگاشت زلزله‌های انتخاب شده به تکیه گاه برج آبگیر وارد می‌شود که در نتیجه آن شتاب وارد بر سازه برج موجب ایجاد نیرو و فشارهای هیدرودینامیکی می‌شود.



فشارهای هیدرودینامیکی (برای مدل‌های دارای مخزن) در این زمان‌ها در جدول ۱ آمده است.

تمامی نمودارها برای دیگر زلزله‌ها در مرجع [۱۷] آورده شده است.

برای زلزله طبس، حداکثر مقادیر تغییر مکان و شتاب نوک برج و زمان وقوع آن‌ها و نیز تنش اصلی اول و

جدول ۱- مقادیر پاسخ حداکثر برای زلزله طبس

پارامترهای پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر	زمان	ERFB	SRFB	MRFB	ERSB	SRSB	MRSB
تغییر مکان (m)	time(sec)	۱۷.۶	۱۱.۹۴	۱۲.۹۸	۱۵.۴۸	۱۶.۰۶	۱۳.۰۲
	MTD	۰.۴۳۶۷۴	۰.۲۷۲۲	۰.۳۸۸۴	۰.۲۹۷۴	۰.۵۱۵۵	۰.۲۶۱۳
	MTA	۳۷۷	-۷۲.۳۸۸	-۹۲.۴۸۸	-۸۴.۲۵۶	۸۳.۸۳۱	-۷۹.۱۳۳
شتاب نوک برج (m/s <sup>2</sup> )	time(sec)	۱۹.۶۶	۱۱.۹۴	۱۱.۰۴	۱۲.۷۲	۱۰.۷	۱۰.۲
	MTA	۳۷۷	-۷۲.۳۸۸	-۹۲.۴۸۸	-۸۴.۲۵۶	۸۳.۸۳۱	-۷۹.۱۳۳
	MA	۱۲۲	۳۷۶	۹۰۰	۲۳۳	۱۱۰۰	۵۶۰
تنش اصلی اول (kg/cm <sup>2</sup> )	MTA	۸۰۷	۵۸.۱	۹۰۰	۵۸۰	۷۷۲	۳۱۸
	MTD	۹۸۴	۶۷۵	۱۰۴۰	۶۳۰	۱۳۰۸	۶۳۳
	MA		۲۱.۶			۱۲۱.۲	
فشار هیدرودینامیکی (KPa)	MTA		۲۶۵.۳			۹۴	
	MTD		۴۱.۳۳			۱۰۹.۲	
	MA						

MA: Maximum Acceleration.

MTA: Maximum Top Acceleration.

MTD: Maximum Top Displacement

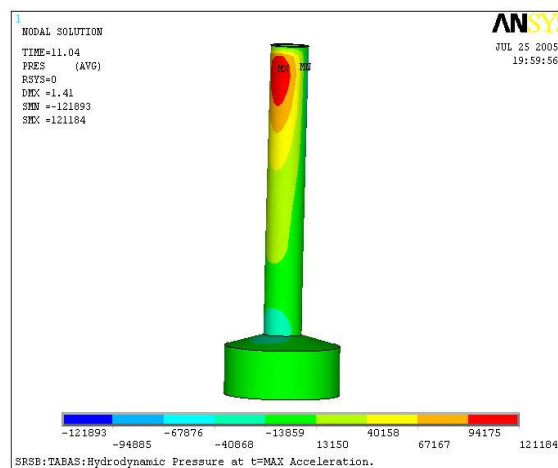
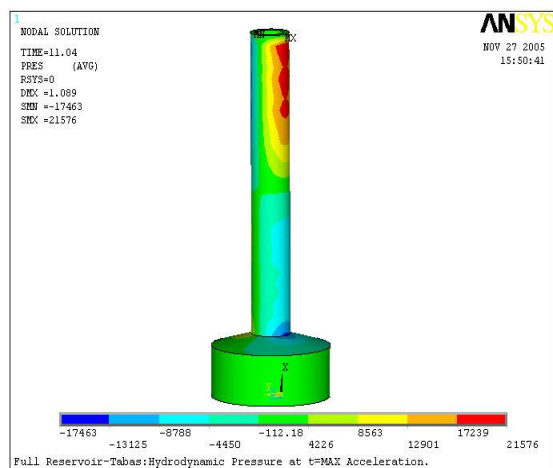
در زمان حداکثر تغییر مکان نوک برج در اثر زلزله السنترو در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین با توجه به تنش اصلی اول به ویژه در زمان تغییر مکان حداکثر نوک برج، لزوم تحلیل لرزه‌ای غیر خطی آشکار می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود برای برج با مخزن خالی، مدل سازی سنگ پی باعث کاهش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج می‌شود اما برای برج با مخزن پیرامونی، مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج می‌شود. علاوه بر این، مدل سازی مخزن به صورت المان محدود برای حالت برج با پایه ثابت، تغییر مکان نوک برج و شتاب انتقالی به آن را کاهش می‌دهد. از طرفی، مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده نیز، باعث کاهش تغییر مکان و شتاب نوک برج می‌شود. برای این حالت، مدل سازی سنگ پی، باعث کاهش تغییر مکان نوک برج می‌شود و از شتاب انتقالی به آن نیز می‌کاهد. روش مدل سازی مخزن بر ایجاد تنش اصلی اول اثری متفاوت می‌گذارد به گونه‌ای که اگر مخزن

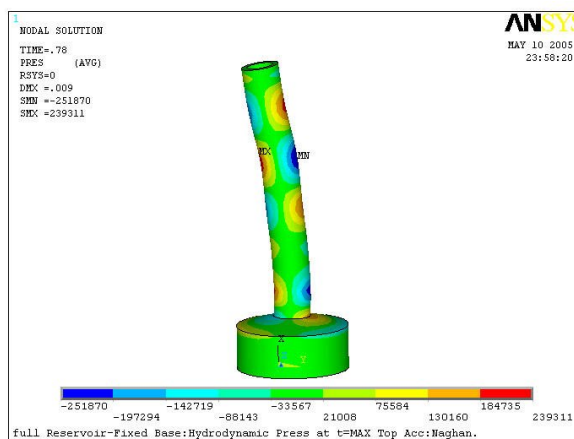
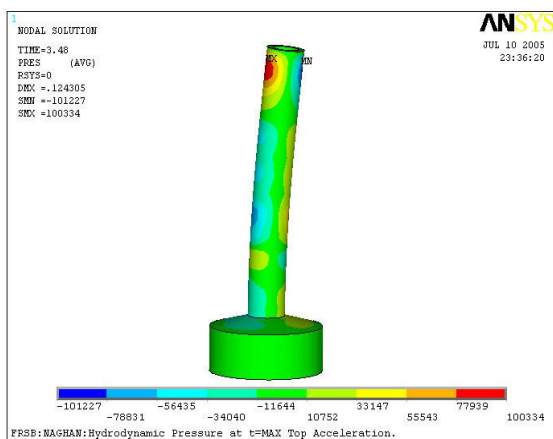
با بررسی فشار هیدرودینامیکی، دیده می‌شود که مدل سازی سنگ پی باعث کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه برج آبگیر می‌شود. در زمانی که تغییر مکان نوک برج افزایش می‌یابد به دلیل انعطاف پذیری سازه و وجود اندرکنش برج با مخزن، فشار هیدرودینامیکی نیز زیاد می‌شود. اگرچه فشار هیدرودینامیکی و تغییر شکل سازه به همدیگر وابسته‌اند ولی نقش نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن را در موقعیت تشکیل حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن نیز نباید از یاد برد [۱۷]. در ارتفاعی که برج بر روی آب سوار می‌شود؛ فشار منفی به صورت مکش و در ارتفاعی که آب بر روی سازه برج تاثیر می‌گذارد، فشار مثبت است. علاوه بر این، الگوی پخش فشار هیدرودینامیکی تحت تاثیر امواج فشاری منتشر شده در مخزن نیز قرار دارد. موقعیت تشکیل حداکثر فشار هیدرودینامیکی بر روی بدنه برج در زمان حداکثر شتاب زلزله طبس در شکل ۷، در زمان حداکثر شتاب نوک برج در اثر زلزله ناغان در شکل ۸ و

مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده هیدرودینامیکی در تمام زمانها، تنش اصلی اول را افزایش می دهد. این افزایش در زمان MTA به مقدار  $11/52\%$  و در زمان MTD به میزان  $5/7\%$  اندازه گیری شده است.

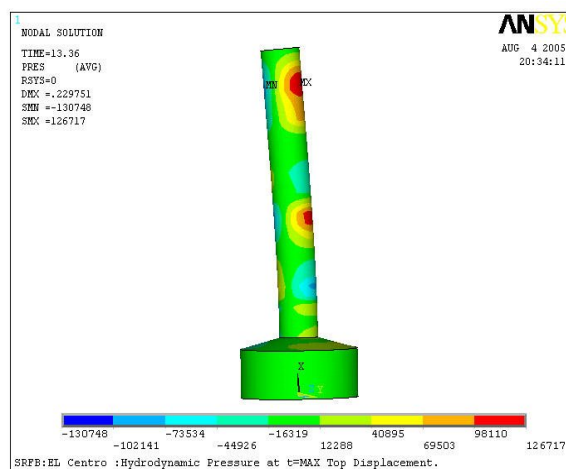
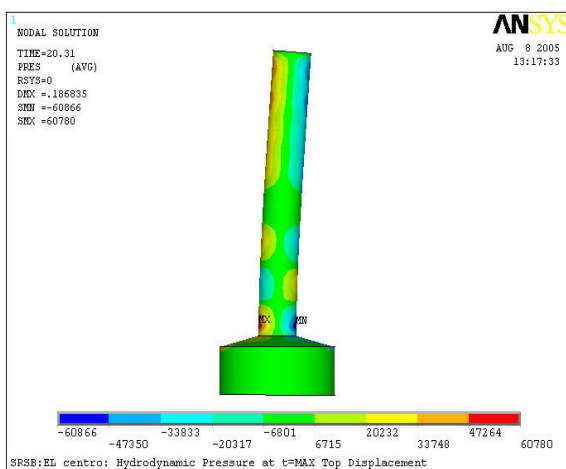
به صورت المان محدود مدل شود؛ جز در زمان حداکثر شتاب زلزله طیس، در زمان MTA باعث کاهش به میزان  $92/8\%$  و در زمان MTD به میزان  $31/4\%$  در تنش اصلی اول ایجاد شده روی بدنه برج می شود. در حالی که



شکل ۷- محل فشار هیدرودینامیکی حداکثر برای مدل SRFB (راست) و SRSB (چپ) در زمان حداکثر شتاب زلزله طیس



شکل ۸- محل فشار هیدرودینامیکی حداکثر برای مدل SRFB (راست) و SRSB (چپ) در زمان حداکثر شتاب نوک برج زلزله ناغان

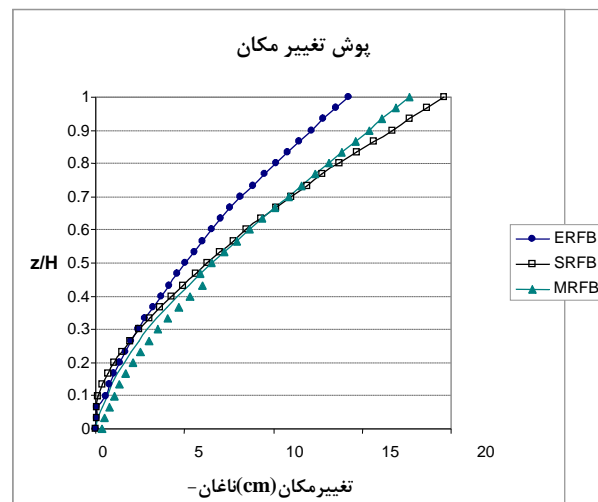
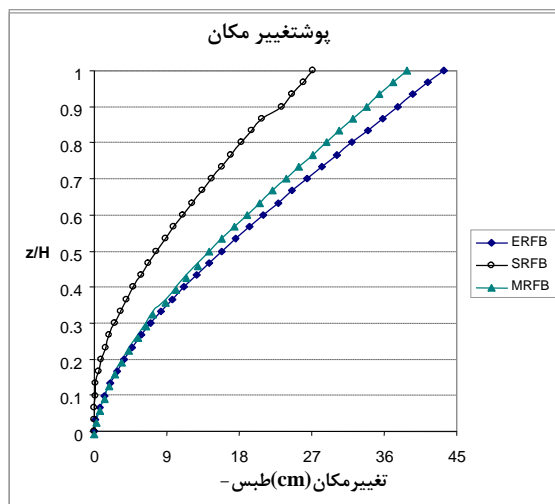


شکل ۹- محل فشار هیدرودینامیکی حداکثر برای مدل SRFB (راست) و SRSB (چپ) در زمان حداکثر تغییر مکان نوک برج زلزله

السنتر

اثرات مدل سازی مخزن بر پوش تغییر شکل برج آبگیر در ارتفاع برای مدل های بررسی شده در حالت خطی و برای زلزله های ناغان و طبس، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

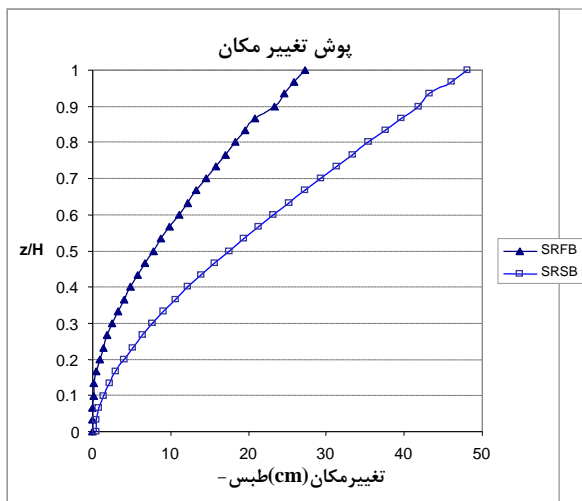
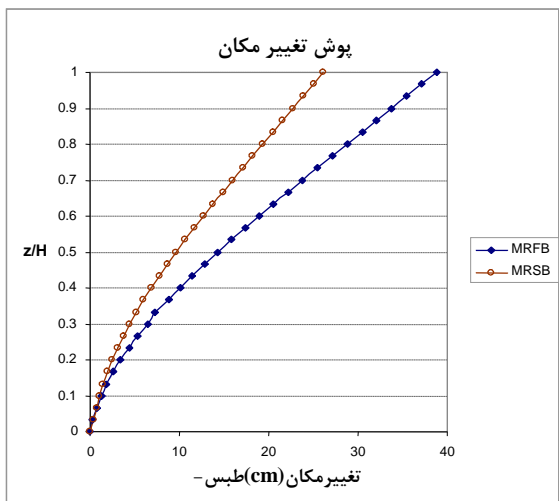
با دقت در اشکال بالا مشخص می شود که در تحلیل لرزه ای خطی، فشار هیدرودینامیکی حداکثر لزوماً در تراز و زمان تغییر مکان حداکثر رخ نمی دهد. برای زلزله های ناغان و طبس، حداکثر فشار هیدرودینامیکی در نواحی بالای برج تشکیل شده است.



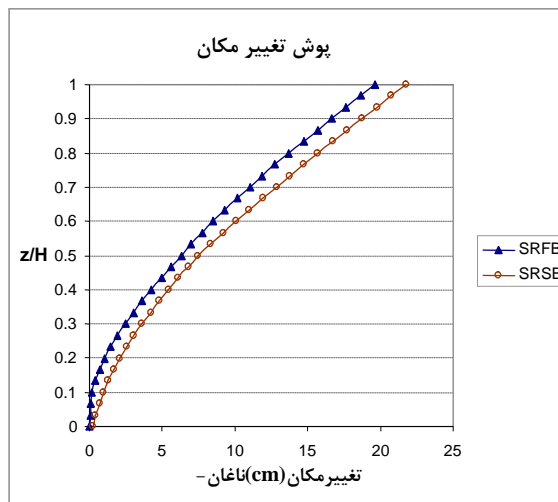
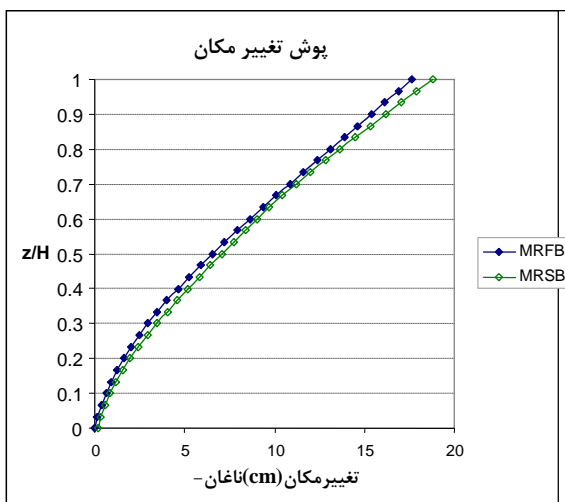
شکل ۱۰- اثرات مدل سازی مخزن بر پوش تغییر مکان، زلزله ناغان (راست) و زلزله طبس (چپ)

خالی می شود. این امر ممکن است به دلیل اثر محصور کنندگی مخزن در پایین برج هنگامی که به صورت المان محدود مدل سازی می شود و نیز سختی پی ناشی از ممان اینرسی زیاد آن باشد. نمودارهای اشکال ۱۱ و ۱۲ اثر همزمان مدل سازی مخزن و سنگ پی را به ترتیب برای زلزله های طبس و ناغان نشان می دهند. در اثر زلزله طبس، اگر مخزن به صورت المان محدود مدل سازی شده باشد آن گاه مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان نوک برج به میزان ۷۰٪ نسبت به حالت SRFB می شود اما چنان چه مخزن به صورت جرم افزوده مدل شود، مدل سازی سنگ پی تغییر مکان نوک برج را ۳۳٪ کاهش می دهد. برعکس، برای برج با مخزن پیرامونی چه به صورت المان محدود و چه جرم افزوده، در اثر زلزله ناغان مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان برج در سرتاسر ارتفاع می شود.

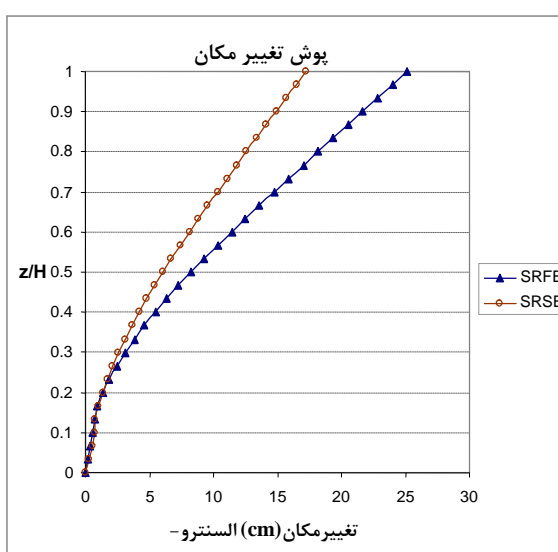
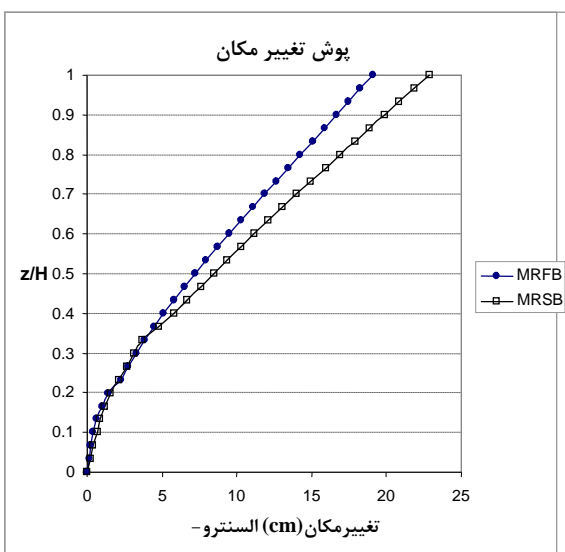
کلید تغییر شکل ها به صورت خمشی هستند. همان طور که دیده می شود، با مدل سازی مخزن، تغییر شکل برج آبگیر تحت اثر زلزله طبس کاهش می یابد این کاهش در حالتی که مخزن به صورت المان محدود مدل سازی می شود، به میزان ۳۷٪ و در حالت مخزن با جرم افزوده هیدرودینامیکی به مقدار ۱۰٪ نسبت به حالت ERFB است. علاوه بر این، مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده، تغییر شکل های بیشتری نسبت به مدل سازی مخزن به روش المان محدود استاندارد به وجود می آورد اما دیده می شود که با مدل سازی مخزن، تغییر شکل برج آبگیر تحت اثر زلزله ناغان افزایش می یابد. مدل سازی مخزن به صورت المان محدود به اندازه ۳۸٪ و مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده به میزان ۲۴٪ باعث افزایش تغییر مکان نوک برج می شوند ولی در ارتفاع  $0.65H_t$ ، تغییر شکل برج با مخزن پیرامونی به صورت المان محدود کمتر از تغییر شکل برج با مخزن به صورت جرم افزوده است حتی در ارتفاعی در حدود  $0.25H_t$ ، تغییر شکل برج با مخزن پیرامونی کمتر از تغییر شکل برج با مخزن



الف. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن المان محدود  
 ب. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن جرم افزوده  
 شکل ۱۱- اثرات مدل سازی سنگ پی بر پوش تغییر شکل - زلزله طیس



الف. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن المان محدود  
 ب. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن جرم افزوده  
 شکل ۱۲- اثرات مدل سازی سنگ پی بر پوش تغییر شکل - زلزله ناغان



الف. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن المان محدود  
 ب. پوش تغییر شکل برای مدل های با مخزن جرم افزوده  
 شکل ۱۳- اثرات مدل سازی سنگ پی بر پوش تغییر شکل - زلزله السنترو

ترتیب به میزان ۱۰٪ و ۷۵/۴۷٪ نسبت به حالت مخزن خالی کاهش می‌دهد.

(۵) به طور کلی، حداکثر فشار هیدرودینامیکی و تغییر شکل سازه به یکدیگر وابسته اند ولی نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن در موقعیت تشکیل حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن موثر است.

(۶) با توجه به نمودار ارتفاع- تغییر مکان، نتیجه می‌شود که در حالت خطی، تغییر شکل برج برای تمام مدل‌های بررسی شده به صورت خمشی خالص است.

(۷) برای زلزله ناغان، مدل سازی مخزن باعث افزایش تغییر شکل برج نسبت به حالت بدون مخزن می‌شود. این افزایش برای مخزن المان محدود به مقدار ۳۸٪ و برای مخزن جرم افزوده به میزان ۲۴٪ است.

(۸) با مدل سازی سنگ پی، میزان تغییر شکل برج در ارتفاع به نوع مدل سازی مخزن و محتوای فرکانسی زلزله وابسته می‌شود.

(۹) در اثر زلزله طبس، حداکثر تنش اصلی برای برج بدون مخزن و با مخزن جرم افزوده، با مدل سازی سنگ پی به ترتیب به میزان ۳۵/۹۷٪ و ۳۹/۱۳٪ کاهش می‌یابد اما برای مخزن المان محدود، مدل سازی سنگ پی، تنش روی برج را به اندازه ۹۳/۷۷٪ افزایش می‌دهد.

(۱۰) در اثر زلزله طبس، مدل سازی مخزن به روش المان محدود، حداکثر تنش اصلی را به میزان ۳۱/۴٪ نسبت به حالت مخزن خالی با پایه ثابت کاهش می‌دهد در حالی که مدل سازی مخزن با "جرم افزوده" تنش اصلی را به میزان ۵/۷٪ افزایش می‌دهد.

(۱۱) با توجه به مطالعات انجام شده، مدل سازی مخزن به صورت "جرم افزوده هیدرودینامیکی" تنها می‌تواند برای طرح آغازین به کار رود. بهتر است به منظور بررسی دقیق رفتار لرزه‌ای برج آنگیر تحت اثر زلزله‌های موثر ساختگاه، مدل سازی سه بعدی به روش "المان محدود استاندارد" انجام گیرد.

نمودارهای شکل ۱۳ نیز تغییرات پوش تغییر شکل در ارتفاع را برای حالت خطی و تحت زلزله السنتر نشان می‌دهند. همان طور که در نمودارهای سمت چپ دیده می‌شود در حالت برج با مخزن پیرامونی به صورت المان محدود، مدل سازی سنگ پی باعث کاهش تغییر شکل نسبت به حالت SRFB به اندازه ۳۱/۴۴٪ شده است. از طرفی دیگر، اگر مخزن پیرامونی به روش جرم افزوده هیدرودینامیکی مدل شود؛ مدل سازی سنگ پی، تغییر شکل برج را به میزان ۱۹/۸٪ افزایش می‌دهد.

## ۷- نتیجه گیری

از بررسی اثر مدل سازی اندرکنش برج آنگیر-مخزن پی بر رفتار لرزه‌ای خطی برج آنگیر مطالعه شده در این پژوهش، نتایج زیر به دست آمده است.

(۱) در اثر زلزله طبس، برای برج با مخزن خالی، مدل سازی سنگ پی باعث کاهش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج به ترتیب به میزان ۳۱/۹٪ و ۳۵/۳٪ می‌شود.

(۲) برای برج با مخزن پیرامونی به صورت المان محدود استاندارد، در اثر زلزله طبس، مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج به ترتیب به میزان ۸۹/۳۸٪ و ۱۵/۸۲٪ می‌شود.

(۳) اگر مخزن پیرامونی به صورت "جرم افزوده هیدرودینامیکی" مدل شود؛ با مدل سازی سنگ پی، در اثر زلزله طبس تغییر مکان و شتاب نوک برج هر دو به ترتیب به میزان ۳۲/۷۲٪ و ۱۴/۴۴٪ کاهش می‌یابند.

(۴) در اثر زلزله طبس، مدل سازی مخزن به روش المان محدود استاندارد، تغییر مکان نوک برج و شتاب انتقالی به آن را به ترتیب به میزان ۳۷٪ و ۸۰/۸٪ و روش "جرم افزوده هیدرودینامیکی" به

## مراجع

1. Liaw, C.Y. and Chopra, A.K., "Earthquake Response of Axisymmetric Tower Structures Surrounded by Water", Report No. EERC 73-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, (1973).
  2. Liaw, C.Y. and Chopra, A.K., "Dynamic of Tower Surrounded by Water", *Earthquake eng. struct. dyn*, 3, pp. 33-49, (1974).
  3. Liaw, C.Y. and Chopra, A.K., "Earthquake Analysis of Axisymmetric Towers Partially Submerged in Water", *Earthquake eng. struct. dyn*, 3, pp. 233-248, (1975).
  4. Westergaard, H., "Water Pressure on Dams During Earthquakes", *Trans. of ASCE*, 98, (1933).
  5. Jacobson, L.S., "Impulsive Hydrodynamic of Fluids Inside a Cylindrical Tank and of Fluid Surrounding a Cylindrical Pier", *Bull. seism. soc*, 39, pp. 189-204, (1949).
  6. Kotsubo, S., "Seismic Forces Effect on Submerged Pier with Elliptical Cross Sections", Proc.3<sup>rd</sup> World Conferene Earthquake Engrg., II., pp. 342-356, (1965).
  7. Goyal, A. and Chopra, A.K., "Earthquake Analysis of Intake-Outlet Towers Including Tower-Water-Foundation-Soil Interaction", *Earth Engrg. struct dynam*, 18, No. 3, pp. 325-344, (1989).
  8. Goyal, A, Chopra, A.K, "Earthquake Response Spectrum Analysis Of Intake-Outlet Towers", *Journal.Eng.Mech*, Vol.11, 5, No.7, pp:14131433, (1989).
  9. Noorzad A., Mortezaazadeh A., "Hydrodynamic Pressure Of Compressible Fluid On Intake Tower By Using Treftz Method", 4<sup>th</sup> Nation Conference on Seismology & Earthquake Engineering. (2003).
  10. Ghanaat, Y., "Seismic Performance and Damage Criteria for concrete Dams", Proc, 3rd US-Japan Workshop on Advanced Reseach on Earthquake Engineering for Dams, San Diego, California, June 22-23, (2002).
  11. Ghaemian.M, Ghobarah.A., "Nonlinear seismic response of concrete gravity dam with dam-reservoir interaction", *Int. J. of Eng Struct*, Vol.21, pp.306-315, (1999).
  12. EM 1110-2-6051, "Time History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures", US Army Corps of Engineering, December 22, (2003).
  13. Dove, R.C., "Structural parameters analysis of U.S Army Corps of Engineers existing intake tower inventory", Technical Reports SL-96-1, U.S. Army Engineers waterways experiments station, Vicksbur, MS, (1996).
  14. Dove, R.C., "Performance Of Lightly Reinforced Concrete Intake Towers Under Selected Loadinf", Technical Reports ERDC/SL TR-00-6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, (2002).
  15. Priscu, R, Popovici, A, Stematiu, D, "Earthquake Engineering For Large Dames", ISBN 0 471 90047 8, John Wiley, Romania, (1980).
  16. EM 1110-2-6050, "Response Spectra And Seismic Analysis For Concrete Hydraulic Structure", Appendix H, US Army Corps of Engineering, June (1999).
۱۷. میرحاج، ع، " بررسی اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی تحت اثر بارهای لرزه‌ای"، پایان نامه کارشناسی ارشد: به راهنمایی دکتر هاشم شریعتمدار، دانشگاه سمنان، خرداد (۱۳۸۶).
۱۸. آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ض-۲۵۳، (۱۳۸۴).