

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

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

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[Hshariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:Hshariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir)

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۸)

### چکیده

در این پژوهش، روش های مدل سازی سه بعدی برج آبگیر- مخزن- پی به صورت المان محدود استاندارد به منظور در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال- سازه بر رفتار لرزه ای خطی برج های آبگیر، بررسی و نتایج به دست آمده با روش متداول " جرم افزوده هیدرودینامیکی " مقایسه شده اند. 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 لرزه ای خطی به زلزله های 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 لرزه ای نشان می دهند که پاسخ لرزه ای 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٪ می شود.

**واژگان کلیدی:** اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی، تحلیل لرزه ای خطی، فشار هیدرودینامیکی، مدل سازی المان محدود، جرم افزوده هیدرودینامیکی.

## مقدمه

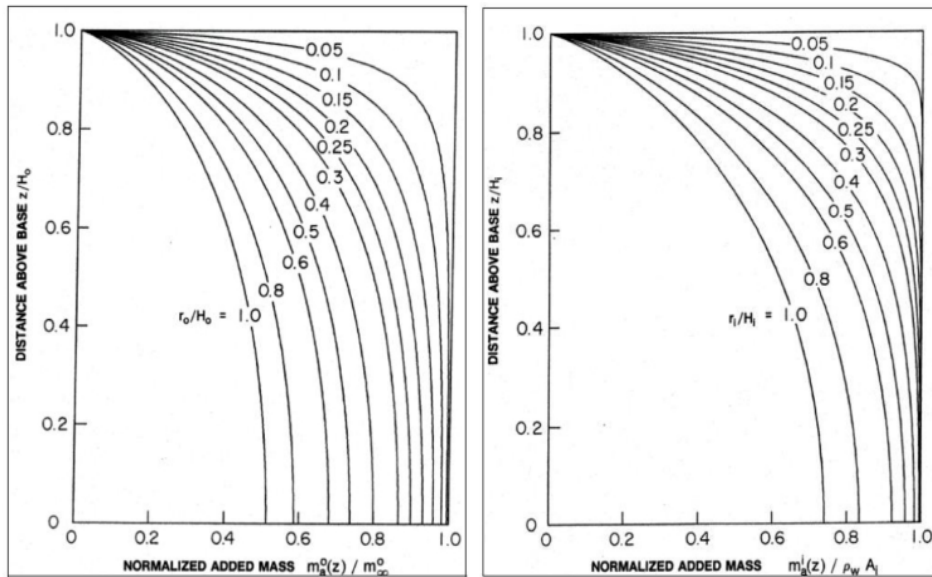
سازه های ویژه مانند سدها و برج های آبگیر، از چنان اهمیتی برخوردارند که نه تنها در شرایط عادی و بهره برداری بلکه در شرایط بحرانی چون زلزله باید دارای ایمنی بالایی باشند. پیامدهای سنگین جانی و مالی ناشی از انهدام سدهای بزرگ و سازه های مجاور آن مانند برج های آبگیر، مهندسين را رهنمون می سازد تا چنین سازه هایی را به گونه ای طراحی کنند که در مقابل زلزله های قوی با کمترین آسیب 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 آن ها وابسته است؛ مدل سازی این سازه ها باید به گونه ای باشد که بیانگر رفتار واقعی سیستم همبسته سیال - سازه باشد. برای بسیاری از سدهای خاکی و یا بتنی، جریان آب خروجی توسط برج های آبگیر بتنی کنترل می شوند. از این رو، این گونه سازه ها به ویژه زمانی که گسیختگی آن ها، انهدام سد را نیز در پی داشته باشد؛ از اهمیت ویژه ای برخوردارند. این امر اشتیاق زیادی را در میان پژوهشگران برای گسترش روش های نوین مدل سازی به منظور تحلیل دینامیکی لرزه ای پدید آورده است.

## پیشینه پژوهش ها

سرآغاز پژوهش های گسترده بر روی مساله اندرکنش برج آبگیر- مخزن را می توان پژوهش های لیا و کوپر [۳-۱] دانست. آن ها با چشمپوشی از اثرات اندرکنش برج- پی- خاک و نیز اثرات ممان های هیدرودینامیکی، رفتار مودال برج های آبگیر متقارن محوری را که توسط آب محاط شده اند؛ بررسی کردند که تلاش های آنان منجر به ارائه مفهوم "جرم افزوده هیدرودینامیکی" برای برج های آبگیر شد (شکل ۱). در سال ۱۹۳۳م. وسترگارد [۴] برای نخستین بار این مفهوم را برای درنظر گرفتن فشار آب بر سدها در هنگام زلزله پیشنهاد کرده بود. ژاکوپسون [۵] در سال ۱۹۴۹م. اثرات ضربه نیروهای هیدرودینامیکی بر مخازن استوانه ای را

بررسی کرد. همچنین کوتسوبو [۶] در سال ۱۹۶۵، بر روی اثرات نیروهای لرزه ای بر پایه های بیضوی نیمه مستغرق در آب پژوهش کرد. تحلیل هارمونیک خطی برج های آبگیر با درنظر گرفتن اندرکنش برج- آب- پی- خاک با به کارگیری از مفهوم "جرم افزوده هیدرودینامیکی" و در حوزه فرکانس، در سال ۱۹۸۹ توسط گویال و کوپرا [۷] بررسی شد. آن ها همچنین روند ساده ای برای تحلیل طیفی و سیستم یک درجه آزاد معادل برای برج های آبگیر ارائه کردند [۸]. نورزاد و مرتضی زاده [۹] در سال ۱۳۸۲، با به کارگیری از روش **Treftz** فشارهای هیدرودینامیکی سیال تراکم پذیر را روی برج های آبگیر محاسبه کردند. در سال های اخیر پس از بررسی رفتار سازه های هیدرولیکی بتنی بر اساس عملکرد [۱۰] و ارائه آئین نامه [۱۱] توسط مهندسين ارتش آمریکا، آزمایش و تحلیل هایی نیز به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای غیرخطی برجهای آبگیر موجود در ایالات متحده انجام شده است [۱۲-۱۳].

در اغلب پژوهش های 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 می آید که امروزه نیز به منظور طراحی و یا ارزیابی لرزه ای برج های آبگیر به کار می رود. ولی به دلیل گستردگی پدیده های محیطی موثر بر برج های آبگیر و پیچیدگی ساخت مدل های آزمایشگاهی و با توجه به پیشرفت پرشتاب رایانه ها در دهه اخیر، مدل سازی عددی به عنوان ارزان ترین و موثرترین ابزار محاسبه بارهای هیدرودینامیکی و ارزیابی رفتار این سازه ها در اثر زمین لرزه ها محسوب می شود. از این رو، می توان از روش های عددی مانند "المان محدود استاندارد" به منظور مدل سازی واقعی و دقیق رفتار سیال و سازه و اندرکنش میان آن ها در اثر بارهای لرزه ای، در مقایسه با روش "جرم افزوده هیدرودینامیکی؛ سود جست.



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

معادلات حاکم

مکان های ماتریس سختی دینامیکی (امپدانس) برای ناحیه پی ارتباط دارند.

به دلیل آن که نیروهای هیدرودینامیکی و توابع امپدانس برای ناحیه پی، به فرکانس تحریک وابسته اند معادلات حرکت سازه شامل اثرات اندرکنشی آب- سازه و پی- سازه به راحتی در حوزه فرکانس بیان می شوند. شکل کلی معادلات حرکت در حوزه فرکانس برای سیستم سازه- آب- پی به صورت زیر بیان می شود:

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

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 گره ای بالای پایه
- $k_{bb}$  : زیر ماتریس سختی متناظر با نقاط گره ای روی پایه
- $k_b$  : زیر ماتریس سختی همبسته که نقاط گره ای بالای پایه را به نقاط گره ای روی پایه مربوط می کند
- $k_b^T$  : ترانهاده  $k_b$

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

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

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

که در آن:

- $[M], [C], [K]$  : ماتریس های جرم، میرایی و سختی برای سازه.
- $[G], [C'], [K']$  : ماتریس های جرم، میرایی و سختی برای مخزن.
- $[Q]$  : ماتریس همبسته.
- $\{f_1\}$  : بردار نیروی جرمی<sup>۱</sup> 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 می شود. این نیروهای اندرکنشی وابسته به فرکانس هستند و با تغییر

1- Body Force

### عوامل مؤثر بر اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی

سازه های هیدرولیکی و آب از راه فشارهای هیدرولیکی بر سطح مشترک سازه- آب اندرکنش دارند. به طور کلی در هنگام زلزله، این سازه ها به حالت ارتعاش واداشته می شوند که موجب ایجاد حرکات ارتعاشی سطح بالادست که در تماس با آب است نسبت به حالت اولیه خود می شود. این تغییر مکان های نسبی سطح مشترک سیال- سازه، وضعیت کشش را- نسبت به قبل از زلزله- در جرم سیال برهم می زند و در نتیجه امواج فشاری پدید می آیند. این سیستم نوسانی که به طور دلخواهی در سیال مخزن گسترش می یابد موجب انتشار موج فشاری و فرآیند بازتاب در مرز صلب مخزن و سطح آزاد آن می شود. با مراجعه به پاسخ لرزه ای 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 می گذارد که بالعکس فشارها را نیز تحت تاثیر قرار می دهد. فشار های هیدرودینامیکی که بدین صورت تولید می شوند، تنها با در نظر گرفتن تراکم پذیری آب در مخزن می تواند، در تحلیل وارد شود. روابط کامل اندرکنش آب- سازه، فشارهای هیدرودینامیکی متغیر با زمان و وابسته به فرکانسی را ایجاد می کند که می توانند 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 می دهد که به نوبه خود موجب تغییر پاسخ طیفی و نیروهای زلزله می شود.

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

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
- (۷) مؤلفه های عمودی یا افقی زلزله

$S_f(\omega)$ : ماتریس سختی دینامیکی ناحیه پی که نسبت به نقاط گره ای روی پایه تعریف می شود.

$\bar{r}^l(\omega)$ : توابع پاسخ فرکانسی برای تغییر مکان های گره ای بالای پایه  $(I=x, y, z)$

$\bar{r}_b^l(\omega)$ : توابع پاسخ فرکانسی برای تغییر مکان های گره ای 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

$S_{rq}$ : 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 می کند.

$S_{qq}$ : زیر ماتریس سختی دینامیکی ناحیه پی که نسبت به نقاط گره ای واقع در سطح پی زیر آب تعریف می شود.

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

ماتریس امیدانس پی میان نیروهای اندرکنشی و تغییر مکان ها نسبت به حرکت آزاد زمین در جهت  $I$ ، به صورت زیر ارتباط برقرار می کند:

(۴)

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

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

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

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

از نرم افزار 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

می آید. به دلیل بارگذاری دینامیکی لرزه ای بر روی برج آبگیر، مقادیر مقاومت های فشاری و کششی و نیز مدول ارتجاعی دینامیکی که  $1/3$  برابر مقادیر متناظر استاتیکی است؛ به کار رفته اند. 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 آئین نامه ها [۱۱] حوزه سنگ پی، بدون جرم فرض می شود. آب مخزن به صورت تراکم پذیر با جرم حجمی

$\gamma_w = 1030 \frac{kg}{m^3}$  فرض می شود که سرعت انتشار امواج

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

جذب مرز کف مخزن چشمپوشی 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 (Smeared) در نظر می گیرد. پلاستیسیته شدن، خزش و نرم شدگی کرنش از دیگر توانایی های این المان است.

(۸) تراکم پذیری آب

(۹) نسبت فرکانس غالب زلزله به فرکانس پایه سیستم همبسته سازه- سیال

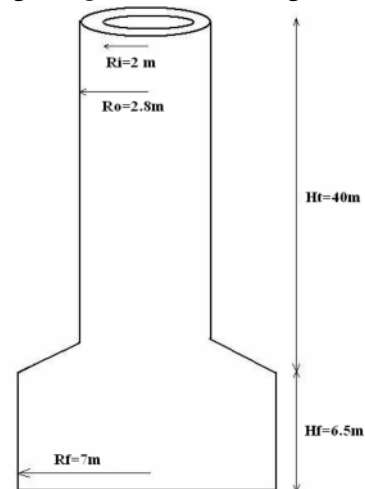
(۱۰) صلبیت یا انعطاف پذیری سازه

(۱۱) چرخش پی

به بیان دیگر، در طی مدت تحریک لرزه ای، اثرات اینرسی در جرم سیال بر روی سطوحی از سازه که با آب در تماس هستند؛ افزایش می یابند. 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 گرفته اند.

### 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 لرزه ای خطی با به کارگیری از روش "المان محدود استاندارد" است. پژوهش های انجام شده تا به امروز [۷, ۱۶]، رفتار سه بعدی برج آبگیر و مخزن را در نظر نگرفته اند و برج به صورت دوبعدی با المان های تیر و فشار هیدرودینامیکی به صورت جرم افزوده هیدرودینامیکی مدل سازی و رفتار خطی آن بررسی شده است. بدین منظور، مدل ساده شده ای از برج آبگیر سد دوستی واقع بر رودخانه هریرود در مرز ایران- ترکمنستان انتخاب شد که شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- ابعاد هندسی برج آبگیر سد دوستی

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 برج تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. از این رو، شعاع قطع مخزن پیرامونی به صورت  $R_p = 30R_0$  به دست می آید. در مرجع [۱۷] تمام نمودارهای مربوط به فشار هیدرودینامیکی در انتهای دور و بر روی برج به طور کامل نشان داده شده اند. 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 آبگیر به دست می آید که بنا بر پیشنهاد دستورالعمل [۱۱] تا عمقی برابر با ارتفاع برج ( $H_1$ ) در مدل سازی گسترش یافته است. تمام درجات آزادی گره های واقع در بستر سنگ پی بسته شده اند ولی برای گره های کناری آن، تکیه گاه غلطکی تعریف می شود. در سطح مشترک کف پی برج با حوزه سنگی پی، تغییر مکان گره ها در همه جهات به همدیگر بسته شده اند.

سه زلزله ناغان، طبس و السنترو به منظور تحریک لرزه ای انتخاب شده اند. 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 پرپود غالب آن  $0.764sec$  است. این زلزله به منظور بررسی اثرات نیروهای لرزه ای کوتاه مدت ضربه ای برگزیده شده است. زلزله طبس با  $P.G.D = 945.8mm$  و  $P.G.A = 0.851g$  شکل ۵ در  $t = 11.04sec$  و در مدت زمان تکان قوی ۲۵ ثانیه ثبت شده است. محل وقوع

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، 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 آرماورها 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  $Z, Y, X$  و ۱ درجه آزادی فشار می باشند ولی المان های دور از سازه فقط دارای ۱ 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>

1-Empty Reservoir Fixed Base

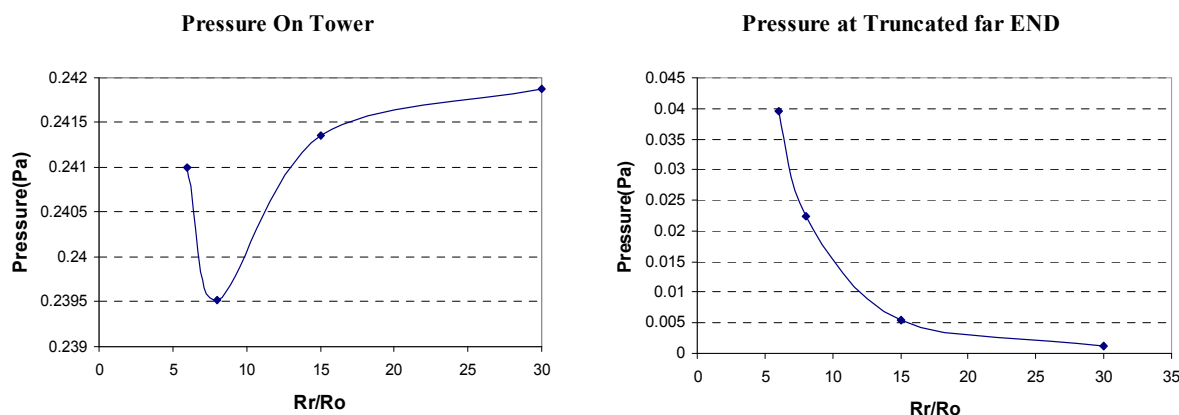
2-Surrounding Reservoir Fixed base

3-Mass Reservoir Fixed Base

4- Empty Reservoir Soil Base

5 - Surrounding Reservoir Soil Base

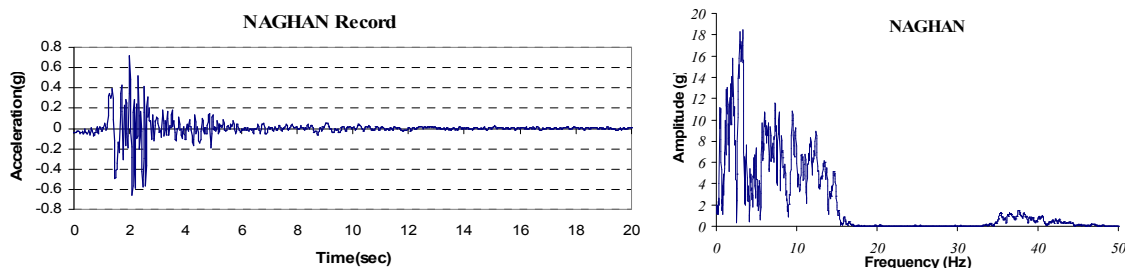
6- Mass Reservoir Soil Base



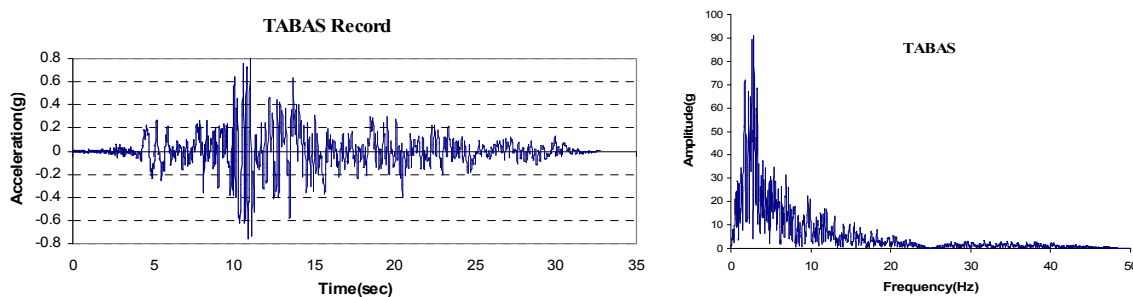
شکل ۳- فشار هیدرودینامیکی در انتهای دور (راست) و بر روی بدنه برج (چپ)

خاک- سازه و جذب درونی غیر هیستریزیس می توانند با میرایی لزج معادل ۵ درصد مقدار بحرانی تعریف شوند. به دلیل ویژگی تقارن محوری، تحریکات فقط در یک راستا وارد می شوند. به دلیل آن که اغلب تحلیل های اندرکنشی در حوزه فرکانس انجام می گیرد محتوای فرکانسی زلزله های مذکور با به کار گیری نرم افزار **Seismo Signal** به دست آمده است.

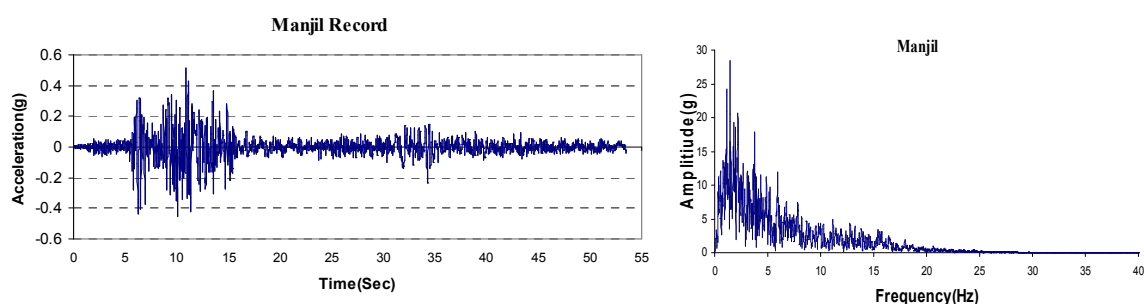
این زمین لرزه بر روی خاک نوع II [۱۸] و پیروید غالب آن  $0.769sec$  است که برای بررسی اثرات تداوم زلزله و شتاب زیاد لرزه ای انتخاب شده است. زلزله السنترو نیز که در مدت زمان ۵۴ ثانیه ثبت شده (شکل ۶) دارای  $P.G.A = 0.3129g$  و  $P.G.D = 133mm$  و پیروید غالب آن  $0.555sec$  است. درباره زمین لرزه های مورد اشاره فرض شده است که رکوردهای ثبت شده به صورت **Free Field** در پای سازه هاست و تمامی اثرات نامعلوم اندرکنش



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



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



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

اختصار نتایجی از هر زلزله ارائه شده است. تمامی نمودارها برای دیگر زلزله ها در مرجع [۱۷] آورده شده است. برای زلزله طبس، حداکثر مقادیر تغییر مکان و شتاب نوک برج و زمان وقوع آن ها و نیز تنش اصلی اول و فشارهای هیدرودینامیکی (برای مدل های دارای مخزن) در این زمان ها در جدول ۱ آمده است.

با توجه به محتوای فرکانسی دیده می شود که این زلزله ها فرکانس های بین ۰ تا ۴۰ هرتز را پوشش می دهند که فرکانس های ۰ تا ۵ هرتز توسط زلزله های طبس و السنتر و بیش از سایر فرکانس ها تحریک می شوند ولی زلزله ناغان در برگیرنده فرکانس های بین ۰ تا ۱۵ هرتز است. رکورد لرزه نگاشت زلزله های انتخاب شده به تکیه گاه برج آبگیر وارد می شود که در نتیجه آن شتاب وارد بر سازه برج موجب ایجاد نیرو و فشارهای هیدرودینامیکی می شود.

### نتایج تحلیل دینامیکی خطی:

پس از تحلیل دینامیکی خطی، پاسخ لرزه ای برج آبگیر شامل حداکثر تغییر مکان و شتاب نوک برج و زمان وقوع آن ها، حداکثر فشار هیدرودینامیکی، تنش اصلی اول و نیز توزیع نیروی برشی در ارتفاع و پوش تغییر شکل برای مدل های گوناگون به دست می آید که در این مقاله به

جدول ۱- مقادیر پاسخ حداکثر برای زلزله طبس

نام مدل							
پارامترهای پاسخ لرزه ای 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
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
تنش اصلی اول (kg/cm <sup>2</sup> )	MA	۱۲۲	۳۷۶	۹۰۰	۲۳۳	۱۱۰۰	۵۶۰
	MTA	۸۰۷	۵۸,۱	۹۰۰	۵۸۰	۷۷۲	۳۱,۸
	MTD	۹۸۴	۶۷۵	۱۰۴۰	۶۳۰	۱۳۰,۸	۶۳۳
فشار هیدرودینامیکی (KPa)	MA		۲۱,۶			۱۲۱,۲	
	MTA		۲۶۵,۳			۹۴	
	MTD		۴۱,۳۳			۱۰۹,۲	

MA: Maximum Acceleration.

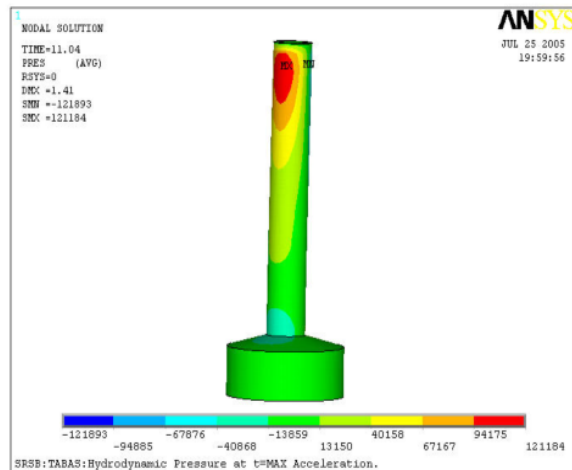
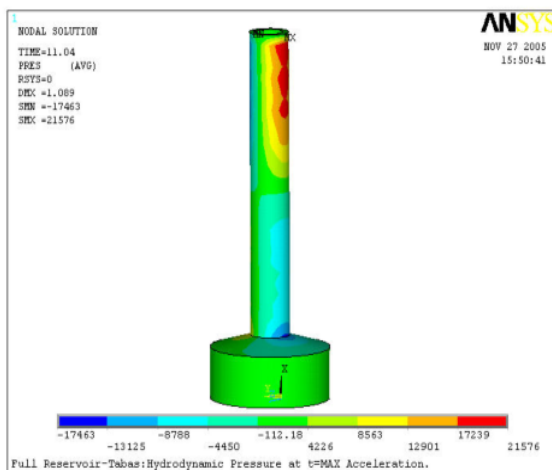
MTA: Maximum Top Acceleration.

MTD: Maximum Top Displacement

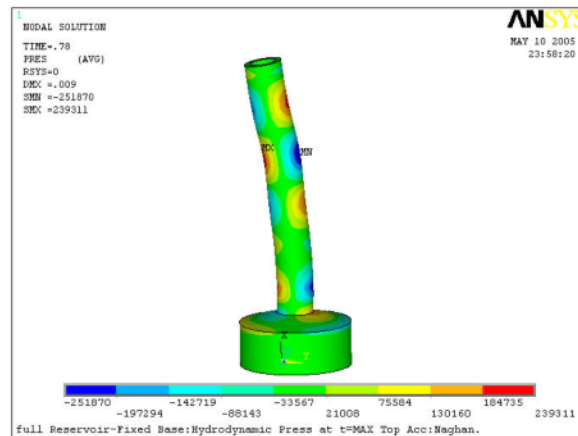
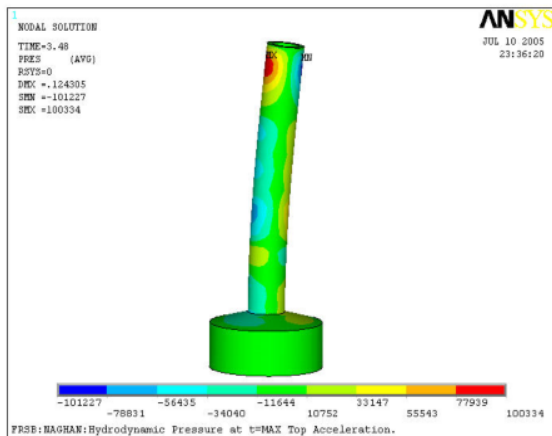


همان طور که در جدول ۱ دیده می شود برای برج با مخزن خالی، مدل سازی سنگ پی باعث کاهش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج می شود اما برای برج با مخزن پیرامونی، مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان و شتاب انتقالی به نوک برج می شود. علاوه بر این، مدل سازی مخزن به صورت المان محدود برای حالت برج با پایه ثابت، تغییر مکان نوک برج و شتاب انتقالی به آن را کاهش می دهد. از طرفی، مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده نیز، باعث کاهش تغییر مکان و شتاب نوک برج می شود. برای این حالت، مدل سازی سنگ پی، باعث کاهش تغییر مکان نوک برج می شود و از شتاب انتقالی به آن نیز می کاهد. روش مدل سازی مخزن بر ایجاد تنش اصلی اول اثری متفاوت می گذارد به گونه ای که اگر مخزن به صورت المان محدود مدل شود؛ جز در زمان حداکثر شتاب زلزله طبس، در زمان  $MTA$  باعث کاهشی به میزان  $۹۲/۸\%$  و در زمان  $MTD$  به میزان  $۳۱/۴\%$  در تنش اصلی اول ایجاد شده روی بدنه برج می شود. در حالی که مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده هیدرودینامیکی در تمام زمان ها، تنش اصلی اول را افزایش می دهد. این افزایش در زمان  $MTA$  به مقدار  $۱۱/۵۲\%$  و در زمان  $MTD$  به میزان  $۵/۷\%$  اندازه گیری شده است.

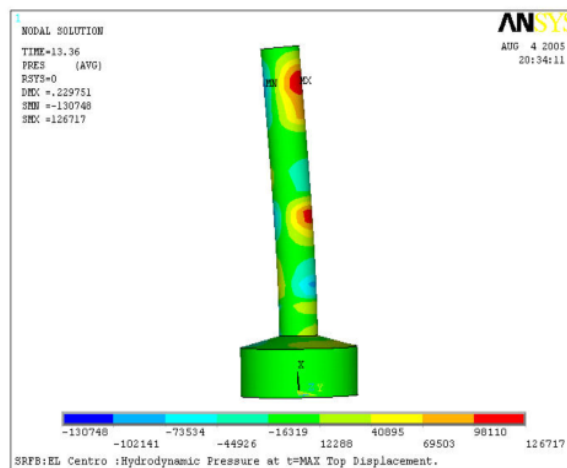
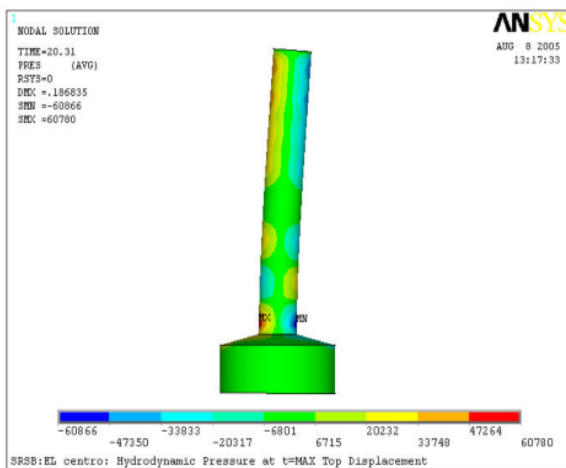
با بررسی فشار هیدرودینامیکی، دیده می شود که مدل سازی سنگ پی باعث کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه برج آبیگر می شود. در زمانی که تغییر مکان نوک برج افزایش می یابد به دلیل انعطاف پذیری سازه و وجود اندرکنش برج با مخزن، فشار هیدرودینامیکی نیز زیاد می شود. اگرچه فشار هیدرودینامیکی و تغییر شکل سازه به همدیگر وابسته اند 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 می شود؛ فشار منفی به صورت مکش و در ارتفاعی که آب بر روی سازه برج تاثیر می گذارد، 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 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 لرزه ای غیر خطی آشکار می شود.



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



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 السترو

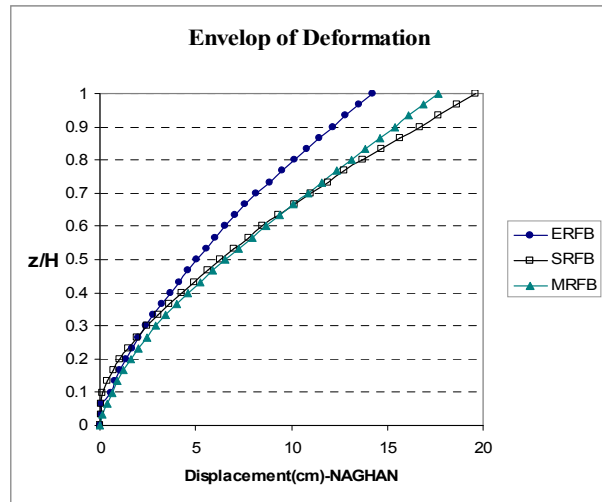
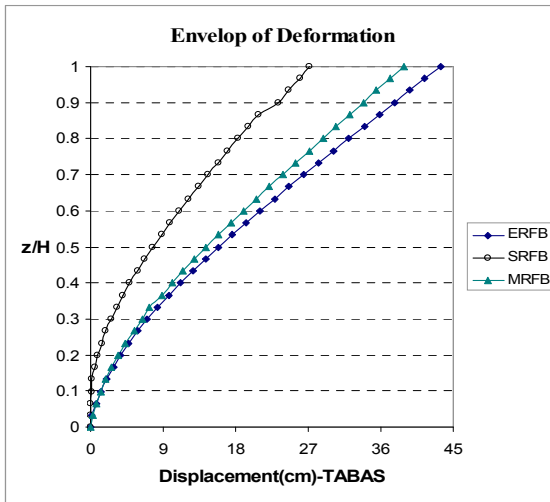
مخزن به روش المان محدود استاندارد به وجود می آورد اما دیده می شود که با مدل سازی مخزن، تغییر شکل برج آبگیر تحت اثر زلزله ناغان افزایش می یابد. مدل سازی مخزن به صورت المان محدود به اندازه ۳۸٪ و مدل سازی مخزن به صورت جرم افزوده به میزان ۲۴٪ باعث افزایش تغییر مکان نوک برج می شوند ولی در ارتفاع  $0.65H_t$ ، 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 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

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.

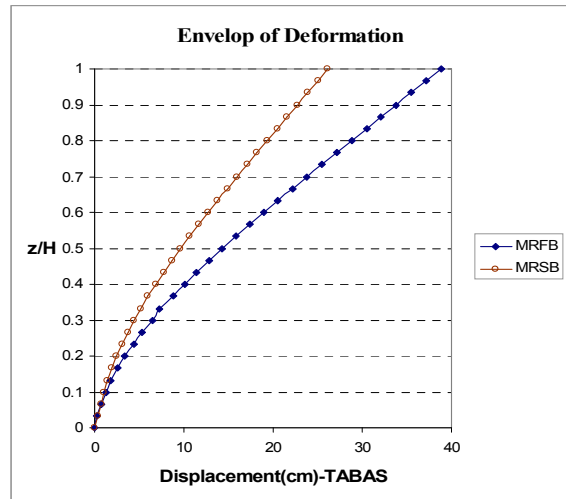
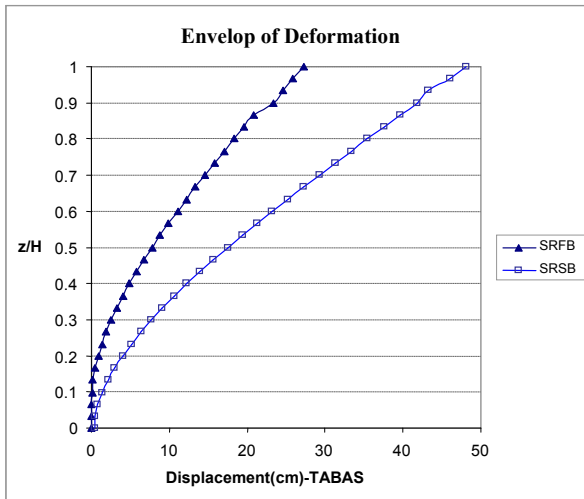
اثرات مدل سازی مخزن بر پوش تغییر شکل برج آبگیر در ارتفاع برای مدل های بررسی شده در حالت خطی و برای زلزله های ناغان و طبس، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. کلیه تغییر شکل ها به صورت خمشی هستند. همان طور که دیده می شود، با مدل سازی مخزن، تغییر شکل برج آبگیر تحت اثر زلزله طبس کاهش می یابد این کاهش در حالتی 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

نشان می دهند. همان طور که در نمودارهای سمت چپ دیده می شود 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 می دهد.

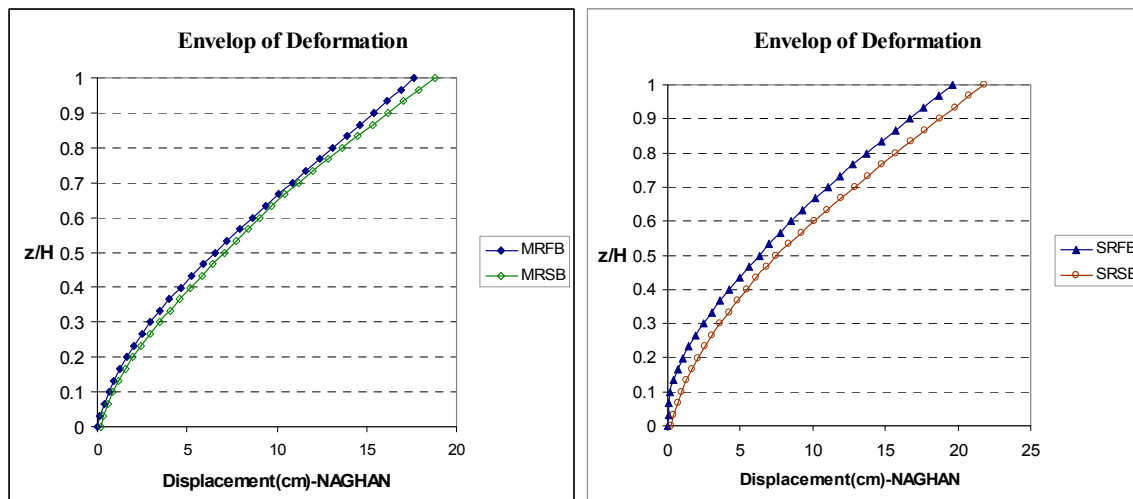
صورت المان محدود مدل سازی شده باشد آن گاه مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان نوک برج به میزان ۷۰٪ نسبت به حالت **SRFB** می شود اما چنان چه مخزن به صورت جرم افزوده مدل شود، مدل سازی سنگ پی تغییر مکان نوک برج را ۳۳٪ کاهش می دهد. برعکس، برای برج با مخزن پیرامونی چه به صورت المان محدود و چه جرم افزوده، در اثر زلزله ناغان مدل سازی سنگ پی باعث افزایش تغییر مکان برج در سرتاسر ارتفاع می شود. نمودارهای شکل ۱۳ نیز تغییرات پوش تغییر شکل در ارتفاع را برای حالت خطی و تحت زلزله السنترو



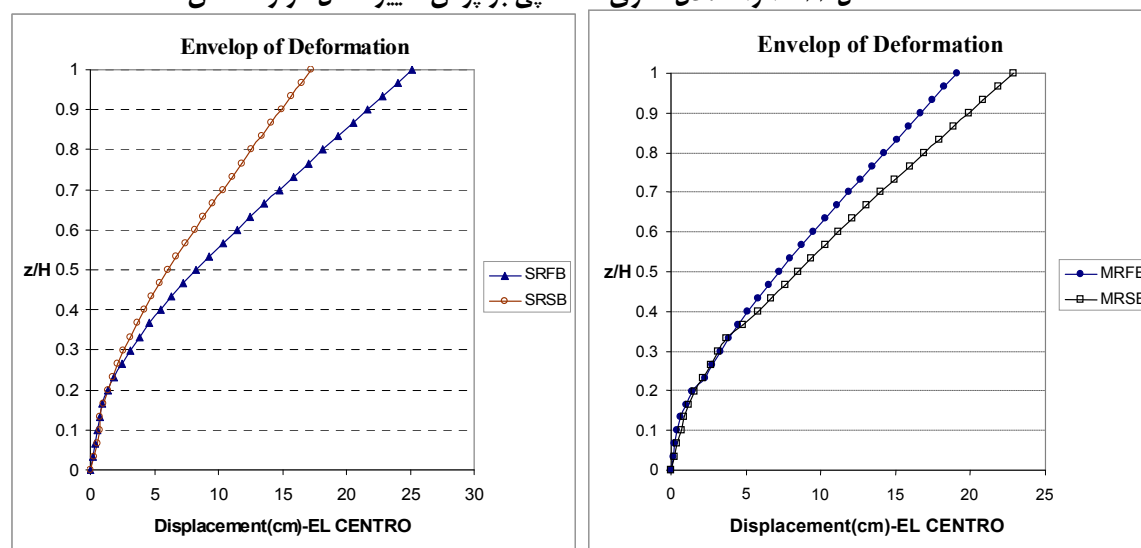
شکل ۱۰- اثرات مدل سازی مخزن بر پوش تغییر مکان، زلزله ناغان (راست) و زلزله طبس (چپ)



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 طبس



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

### نتیجه گیری

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  $32/72\%$  و  $14/44\%$  کاهش می یابند.  
 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  $37\%$  و  $80/8\%$  و روش "جرم افزوده هیدرودینامیکی" به ترتیب به میزان  $10\%$  و  $75/47\%$  نسبت به حالت مخزن خالی کاهش می دهد.  
 ۵) به طور کلی، حداکثر فشار هیدرودینامیکی و تغییر شکل سازه به یکدیگر وابسته اند ولی نوع زلزله و محتوای

از بررسی اثر مدل سازی اندرکنش برج آبگیر- مخزن-پی بر رفتار لرزه ای خطی برج آبگیر 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  $31/9\%$  و  $35/3\%$  می شود.  
 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  $89/38\%$  و  $15/82\%$  می شود

رفتار لرزه ای برج آبگیر تحت اثر زلزله های موثر ساختگاه، مدل سازی سه بعدی به روش "المان محدود استاندارد" انجام گیرد.

فرکانسی آن در موقعیت تشکیل حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن موثر است.

۶) با توجه به نمودار ارتفاع- تغییر مکان، نتیجه می شود که در حالت خطی، تغییر شکل برج برای تمام مدل های بررسی شده به صورت خمشی خالص است.

۷) برای زلزله ناغان، مدل سازی مخزن باعث افزایش تغییر شکل برج نسبت به حالت بدون مخزن می شود. 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 می شود.

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 می یابد اما برای مخزن المان محدود، مدل سازی سنگ پی، تنش روی برج را به اندازه ۹۳/۷۷٪ افزایش می دهد.

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 می دهد در حالی که مدل سازی مخزن با "جرم افزوده" تنش اصلی را به میزان ۵/۷٪ افزایش می دهد.

۱۱) با توجه به مطالعات انجام شده، مدل سازی مخزن به صورت "جرم افزوده هیدرودینامیکی" تنها می تواند برای طرح آغازین به کار رود. بهتر است به منظور بررسی دقیق

## مرجع

- [1] Liaw, C.Y., 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., Chopra, A.K., " Dynamic of tower surrounded by water", Earthquake eng. struct. dyn, 3, pp:33-49, (1974).
- [3] Liaw, C.Y., 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, Am 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., Chopra, A.K., " Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction", Earth Engrg. struct dynam, V18, N3, pp:325-344, (1989).
- [8] Goyal, A., Chopra, A.K., " Earthquake response spectrum analysis of intake-outlet towers", Journal. Eng. Mech, Vol. 115, No. 7, pp: 1413-1433, (1989).
- [9] Noorzad, A., Mortezaadeh, 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, 3<sup>rd</sup> US-Japan Workshop on Advanced Reseach on Earthquake Engineering for Dams, San Diego, California, June 22-23, (2002).
- [11] Ghaemian, M., Ghojarah, 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 Dams", 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 لرزه ای"، 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).

چکیده انگلیسی مقالات

