



تحلیل و بررسی عددی و آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌های مخازن بتن پیش‌تنیده استوانه‌ای تحت اثر نوسانات آب با استفاده از میز لرزه

احمد شکوه فر^{۱*}، محمد رهایی^۲، علی صحرایی^۳

^۱ دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۲ دانش‌آموخته، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۳ دانش‌آموخته، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۳

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۲۸

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

کلمات کلیدی:

تحریک لرزه‌ای

نوسانات سطحی مایع

بتن پیش‌تنیده

مخزن آب

تغییرات پیش‌تنیدگی

1-Dynamic-Explicit

خلاصه: مخازن بتن پیش‌تنیده معمولاً برای ذخیره حجم بالای آب یا مایعات دیگر به کار می‌روند. مخازن بتن پیش‌تنیده آب در سیستم‌های آتش‌نشانی و تصفیه آب به کار گرفته می‌شود. در این مقاله پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن بتن پیش‌تنیده استوانه‌ای تحت اثر بار زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعه‌ای از تحلیل‌های دینامیکی صریح^۱ برای بررسی تأثیر پدیده نوسانات آب به منظور مطالعه اثرات آن بر رفتار مخزن بتن پیش‌تنیده با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. آزمایش میز لرزه‌ای نیز به منظور صحت سنجی تحلیل عددی انجام شد. بدین منظور مخزن بتن پیش‌تنیده استوانه‌ای ساخته شده و به وسیله میز لرزه موجود در آزمایشگاه میز لرزان چندین شتاب‌نگاشت زلزله به آن اعمال گردید. علاوه بر این، توانایی تجزیه و تحلیل عددی برای شبیه‌سازی امواج نوسانی با استفاده از نتایج مطالعات عددی معتبر صحت سنجی شده است. چند مدل عددی با نسبت‌های شعاع مختلف به ارتفاع آب (R/H) در نظر گرفته شده است. شتاب رکوردهای زلزله السنترو و طبس به عنوان بار لرزه‌ای در مدل‌های عددی استفاده شده‌اند. مقایسه نتایج تجربی و نظری با نتایج عددی یک سازگاری منطقی بین آن‌ها را نشان می‌دهد. اثرات تحریک لرزه‌ای بر افت پیش‌تنیدگی کابل‌ها در مدل‌های عددی بررسی شده قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

۱- مقدمه

شبیه‌سازی حالت‌های تحریک و مودهای نوسانات مایع است. مدل ایدئال مکانیکی ارائه شده توسط هازنر^۱ در سال ۱۹۵۷ نتایج خوبی را فقط برای مدل‌های ساده نشان می‌دهد [۴]. مدل جرم و فنر ارائه شده توسط ولتسوس^۲ در سال ۱۹۸۴ از توزیع فشار بر دیواره صلب و انعطاف‌پذیر مخزن تشکیل شده است [۵]. روش‌های تحلیلی متعددی از جمله ذرات هیدرودینامیک (SPH)، المان محدود هیبریدی، المان محدود صریح لاگرانژی-اویلری ضمنی^۳ و حجم مایع برای کمک به رفع مشکلات تحلیل اندرکنش آب و سازه پیشنهاد شده است [۶-۸]. در سال ۲۰۱۳ نیکولچی و بیلگان^۴ تحلیل‌های دینامیک محاسباتی

آسیب‌ها در مخازن می‌توانند از نظر اقتصادی و محیط زیستی در نظر گرفته شوند. مخازن آب به عنوان بخشی از سیستم آتش‌نشانی نقش مهمی در مدیریت بحران دارند. اثرات نوسان آب نیز می‌تواند باعث ایجاد نقص در کارایی مخازن بتن پیش‌تنیده تحت اثر زلزله شود [۱]. مطالعات متعدد تجربی، تحلیلی و نظری زیادی برای توصیف پدیده نوسانات آب انجام شده است [۲]. معادلات ناویر-استوکس جریان در داخل مخزن حاکم است، اما برخی از فرضیات مانند مایع لزج و تراکم ناپذیر و حرکات چرخشی در نظر گرفته شده‌اند [۳]. کاربردی‌ترین الگوریتم برای تجزیه و تحلیل مخازن نسبتاً پر شده تحت تحریک لرزه‌ای یا تحریکات هارمونیک شامل تعدادی جرم و فنر برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahmad.shokoohfar@qiau.ac.ir

- Housner
- Veletsos
- Implicit
- Nicolici and Bilegan



را طراحی نمودند [۱۹]. در سال ۲۰۱۲ جی و همکاران^۷ طی یک آزمایش، اثر نوسانات جانبی بزرگ را بر روی نوسانات غیر تشدید یافته بررسی کردند [۲۰]. در سال ۲۰۱۷ لین و لی^۸ عملکرد مخازن بتن پیش‌تنیده تحت تحرکات شدید لرزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ایمنی این سازه‌ها را بر اساس دو حالت حدی مشخص، از جمله حالت سرویس‌دهی و حالت حد نهایی ارزیابی کردند. نتیجه تحلیل عددی نشان داد که مخازن بتن پیش‌تنیده چینی برای رکورد شتاب با 0.18 g تا 1 g در حالت سرویس‌دهی قرار می‌گیرند و برای PGA در محدوده 0.12 g تا 1.7 g از حالت حد نهایی می‌گذرد [۲۱]. در سال ۲۰۱۷ سانگ و همکاران^۹ سیستم محفظه‌های خنک‌کننده در مخازن بتن پیش‌تنیده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک تحلیل عددی خلاقانه را با توجه به اندرکنش آب و سازه در مخزن آب و اندرکنش خاک و سازه در سیستم کلی انجام دادند. آن‌ها از یک روش ساده‌شده برای در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه در مدل‌های المان محدود استفاده کردند [۲۲].

در این تحقیق، از روش تحلیل دینامیکی صریح همراه با تکنیک مش بندی سازگار که بر اساس روش لاگرانژین-اویلرین دلخواه^{۱۰} می‌باشد به منظور بهبود مدل عددی برای شبیه‌سازی غیرخطی موج نوسانات مایع از مرجع [۱] استفاده شده است. آزمایشی بر روی یک نمونه مخزن بتن پیش‌تنیده بر روی میز لرزه انجام شد تا کارایی تحلیل عددی ارزیابی شود. روش‌های نیمه ضمنی کرانک-نیکسون^{۱۱} به منظور صحت سنجی مطالعات عددی مورد استفاده قرار گرفت [۲۳].

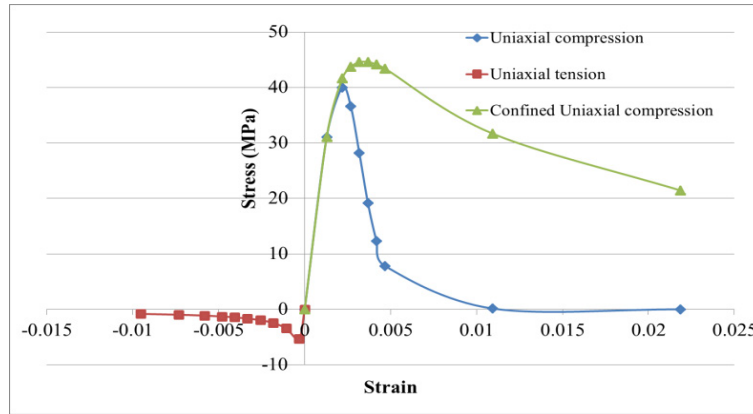
۲- روش مدل‌سازی اجزا محدود

ابتدا آنالیز استاتیکی تحت بارهای هیدرواستاتیک و پس کشیدگی بر روی مدل اجزا محدود انجام می‌شود. سپس خروجی آنالیز استاتیکی به عنوان ورودی برای آنالیز دینامیکی صریح در نظر گرفته می‌شود. آنالیز دینامیکی صریح توسط نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی بتن از المان C3D8R استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی میلگردها و کابل‌های پیش‌تنیدگی

سیالات و تحلیل تنش المان محدود برای حل یک مسئله سه‌بعدی اندرکنش آب و سازه با دیوارهای انعطاف‌پذیر را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام دادند [۹]. در سال ۲۰۱۲ مسلمی و کیانوش رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای را با تمرکز بر اندرکنش بین عوامل مؤثر بر پاسخ دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در سال ۲۰۱۶ وانگ و همکاران^۱ نقش تیغه‌ها در نوسانات مایع در مخازن استوانه‌ای را با استفاده از روش مودال چندگانه و روش المان محدود مرزی مقیاس شده مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. در سال ۲۰۱۶ اسواران و ردی^۲ تحقیقاتی را در مورد نوسانات مایع در راکتور پیشرفته ذخیره‌سازی سوخت هند با استفاده از روش VOF انجام دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۶ ماندال و مایتی^۳ از یک روش مبتنی بر فشار اویلری برای بررسی تأثیر نوسانات مایع در مخازن مستطیلی استفاده کردند [۱۳]. در سال ۲۰۱۶ ژانگ^۴ به بررسی نوسانات مایع در مخازن متخلخل با استفاده از روش المان محدود مرزی موازی پرداخت [۱۴]. در سال ۲۰۰۴ بالتاس^۵ رفتار غیرخطی لرزه‌ای مخازن بتن پیش‌تنیده دایروی طراحی‌شده بر اساس آئین‌نامه‌های مختلف را ارزیابی کرد. او یک بررسی کامل از روند طراحی و تحلیل مخازن بتن پیش‌تنیده دایروی ارائه داد و مقدار محافظه‌کاری در آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای بر اساس چند تحلیل دینامیکی غیرخطی دقیق را نشان داد [۱۵]. در سال ۲۰۰۷ لی و همکاران^۶ به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن پیش‌تنیده تخم‌مرغی شکل از طریق آزمایش‌های میز لرزه و تحلیل عددی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS پرداختند [۱۶]. در سال ۲۰۰۸ خوشنودیان و جلالی ضریب رفتار مخازن هوایی با پایه لوله‌ای را با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی به دست آوردند [۱۷]. در سال ۲۰۱۰ شاهوردیانی و رهایی با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزا محدود به بررسی تغییرات نیروی پیش‌تنیدگی در جداره‌ی استوانه‌ای مخازن بتن پیش‌تنیده پرداختند. در مقاله مذکور جهت مدل‌سازی وارفنگی بتن و وادادگی فولاد از مدل‌های مختلف استفاده شد [۱۸]. در سال ۲۰۱۰ شاهوردیانی و همکاران رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای بتنی را مورد بررسی قرار دادند و به منظور صحت سنجی مدل عددی آزمایش میز لرزه‌ای

- 1 Wang et al.
- 2 Eswaran and Reddy
- 3 Mandal and Maity
- 4 Zhang
- 5 Baltos
- 6 Li et. al.

- 7 Ji et al.
- 8 Lin and Li
- 9 Song et al.
- 10 Arbitrary Lagrangian-Eulerian
- 11 Crank-Nicholson



شکل ۱. نمودار تنش - کرنش بر اساس مدل ارائه شده توسط چانگ و مندر
 Fig. 1. The Chang and Mander concrete model adopted for Dynamic/Explicit analysis

۳- مدل سازی مصالح

در این بخش به منظور تعریف رفتار بتن از روش پلاستیسیته آسیب بتن استفاده شده است. مدل ایجادکننده نمودار تنش - کرنش جهت استفاده در روش پلاستیسیته آسیب بتن بر اساس فرمولاسیون ارائه شده توسط چانگ و مندر^۲ می باشد. این مدل، مدلی پیشرفته، قانونمند، تعمیم یافته و بدون بعد می باشد که رفتار بتن معمولی، پر مقاومت را در دو حالت محصور شده و نشده هم در فشار و هم در کشش شبیه سازی می کند. همان طور که در شکل نشان داده شده است، منحنی های پوش این مدل با شیب اولیه E_c ، مختصات بیشینه فشار (f'_c, ϵ'_c) ، مختصات بیشینه کشش (f_t, ϵ_t) و پارامتر شکل r تعریف می شوند. رابطه Tsai برای تعریف پوش های کشش و فشار به کار گرفته می شود.

$$f_c^- = f_c' y(\epsilon^-); E_t^- = E_c z(\epsilon^-) \quad (2)$$

$$f_c^+ = f_c' y(\epsilon^+); E_t^+ = E_c z(\epsilon^+) \quad (3)$$

در روابط بالا $y(\epsilon)$ و $z(\epsilon)$ تابع تنش بدون بعد و تابع مدول مماسی بدون بعد می باشند:

$$D(\epsilon) = 1 + \left(n - \frac{r}{r-1} \right) \epsilon + \frac{\epsilon'}{r-1} \quad (4)$$

$$y(\epsilon) = \frac{n\epsilon}{D(\epsilon)}; z(\epsilon) = \frac{(1-\epsilon^r)}{[D(\epsilon)]^2} \quad (5)$$

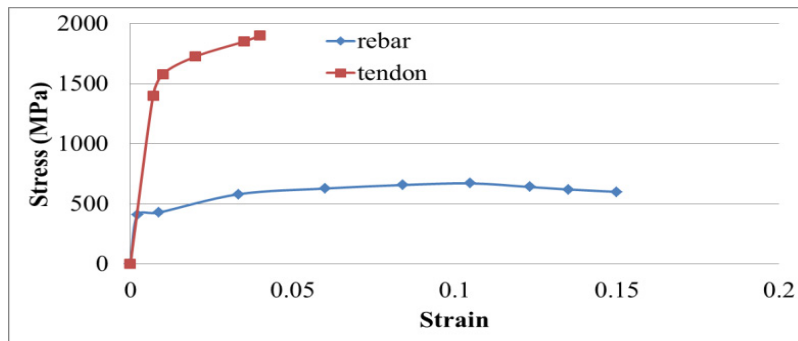
که در آن n و ϵ به صورت پوش کشش و فشار تعریف می شوند:

از المان T3D2 استفاده می شود که امکان استفاده از تکنیک ناحیه مدفون که برای تعریف رابطه بین بتن و میلگرد مورد استفاده می باشد را فراهم می آورد. نیروی پیش تنیدگی با استفاده از شرایط اولیه ای از نوع تنش برای نرم افزار ABAQUS تعریف می گردد. همچنین به منظور تعریف پس کشیدگی در کابل ها از دستور *Prestress Hold در نرم افزار ABAQUS استفاده می شود. اندرکنش بین آب و المان های بتن به صورت تماس فشاری بدون اصطکاک در نظر گرفته می شود. شرط مرزی سطح آزاد به صورتی است که نوسانات سطح آب بدون محدودیت باشد. موج نوسان با در نظر گرفتن وزن از رابطه زیر به دست می آید.

$$d_s = \frac{P}{\rho g} \quad (1)$$

که d_s ارتفاع موج، P فشار و ρ چگالی آب می باشد.

به منظور معرفی فشار هیدرواستاتیک افقی و عمودی در ابتدای آنالیز دینامیکی صریح شرط اولیه به نام "Geostatic stress" تعریف می شود. فشار هیدرواستاتیک افقی آب به وسیله یک زیرمجموعه^۱ زبان برنامه نویسی فرترن به نام "VDLOAD" برای نرم افزار ABAQUS تعریف می شود. جهت مدل سازی نوسانات آب احتیاج به تغییر شکل های بزرگ در المان های آب می باشد؛ بنابراین لازم است که تغییر شکل ها با استفاده از تکنیک مش بندی با قابلیت سازگاری بر اساس روش لاگرانژین - اویلرین دلخواه در مدل سازی مدنظر قرار گیرد.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش اجزای فولادی
Fig. 2. The stress - strain relationship of steel components

۴- صحت سنجی تحلیل‌های دینامیکی صریح توسط مطالعه باریوس و همکاران^۱

باریوس و همکاران از روش تفاضلات محدود به منظور طراحی یک روش عددی پیشرفته با صرفه جویی در زمان برای تحلیل غیرخطی نوسانات مایع استفاده کردند. آن‌ها الگوریتم‌های نیمه ضمنی و کرانک - نیکسون را ایجاد کردند و از آن‌ها برای تحلیل پاسخ نوسان مایع در مخزن‌های استوانه‌ای صلب تحت رکوردهای شتاب زلزله مکزیک استفاده کردند. یک مخزن استوانه‌ای با شعاع ۵/۵ متر و ارتفاع آب ۲/۵ متر از بین مثال‌های عددی باریوس و همکاران انتخاب شده است تا روش دینامیکی صریح مورد استفاده در این مقاله بر روی آن بررسی شود. روش نیمه ضمنی تحت مؤلفه شمال - جنوب شتاب‌نگاشت دانشگاه سیوداد (CU-NS) مورد بررسی قرار گرفت. روش کرانک - نیکسون تحت مؤلفه‌های شمال - جنوب و شرق - غرب رکورد شتاب‌نگاشت مرکزی CA de Abasto در نظر گرفته شد. شکل ۳، نشان‌دهنده مقایسه مقادیر تاریخچه ارتفاع موج در دو روش نیمه ضمنی و دینامیکی صریح است. حداکثر بزرگی ارتفاع موج حدود ۲۵۴ میلی‌متر و ۲۱۰ میلی‌متر به ترتیب برای روش نیمه ضمنی و روش دینامیکی صریح است.

شکل ۴ نشان‌دهنده مقایسه مقادیر تاریخچه ارتفاع موج در روش کرانک - نیکسون و روش مطالعه فعلی است. باریوس و همکاران روش کرانک - نیکسون را به دو حالت خطی و غیرخطی تقسیم کردند که مبتنی بر نظریه موج خطی و غیرخطی است. شکل ۴ تاریخچه ارتفاع موج را برای حالت غیرخطی هندسی روش کرانک - نیکسون نشان می‌دهد. حداکثر ارتفاع موج حدود ۱۷۴۰ میلی‌متر است و در روش

$$\varepsilon^- = \left| \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right|; n^- = \left| \frac{E_c \varepsilon'_c}{f'_c} \right| \quad (6)$$

$$\varepsilon^+ = \left| \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_t} \right|; n^+ = \frac{E_c \varepsilon_t}{f_t} \quad (7)$$

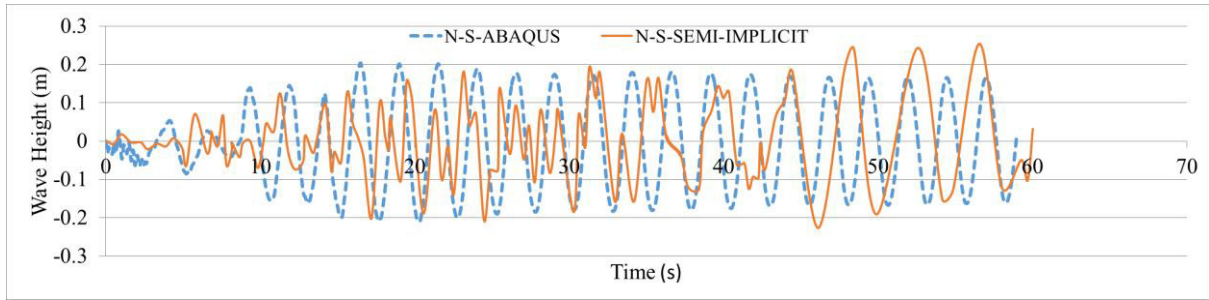
جزئیات بیشتر مدل ارائه شده توسط چانگ و مندر برای تولید نمودارهای تنش - کرنش و فرمولاسیون روش پلاستیسته آسیب بتن در مرجع [۲۴] آمده است. شکل ۱ نمودار تنش - کرنش بتن محصور شده و محصور نشده که به ترتیب برای دیواره و پی مخزن مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

مدل پلاستیسته مستقل از نرخ کرنش به منظور تعریف رفتار مصالح فولادی در نظر گرفته شده است. رفتار مصالح مستقل از نرخ کرنش از رابطه زیر به دست می‌آید:

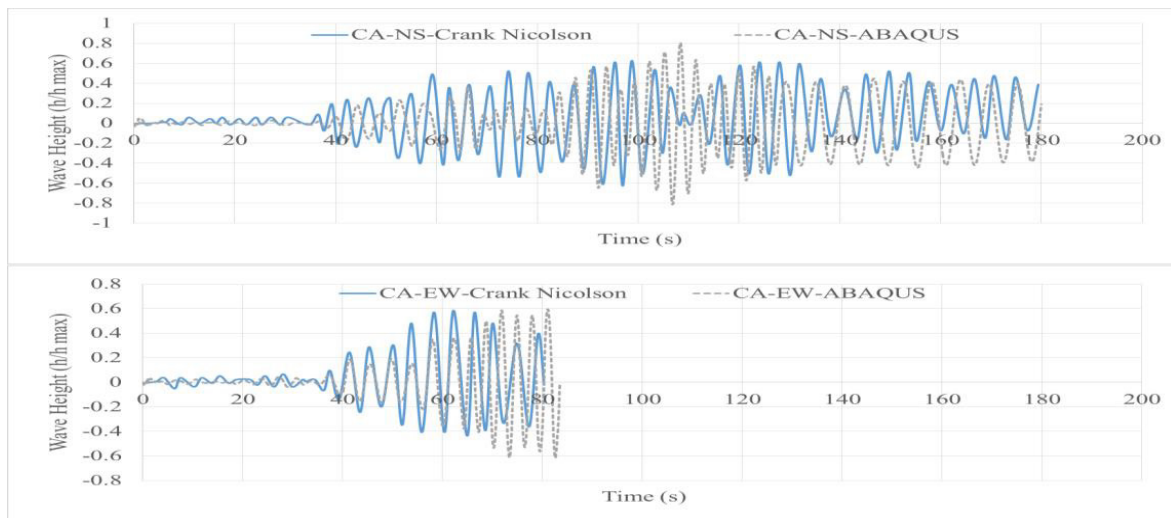
$$q = \sigma^0 \quad (8)$$

که در این رابطه $\sigma^0(\bar{\varepsilon}^{pl})$ تنش تسلیم تابع کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. افزایش کرنش پلاستیک باعث تغییر در تنش تسلیم به صورت یکنواخت در کلیه جهات می‌گردد که این رفتار را سخت‌شوندگی ایزوتروپیک می‌نامند. نمودار تنش - کرنش میلگردها و کابل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

مدل مصالح هیدرو دینامیک آب با استفاده از معادلات حالت $(U_s - U_p)$ به دست می‌آید. معادلات حالت $(U_s - U_p)$ بر اساس متداول‌ترین فرم معادله حالت Mie-Grüneisen در بیان انرژی خطی بیان شده است [۲۵].



شکل ۳. تاریخچه ارتفاع موج برای رکورد CU-NS
Fig.3. Wave height histories for CU-NS record



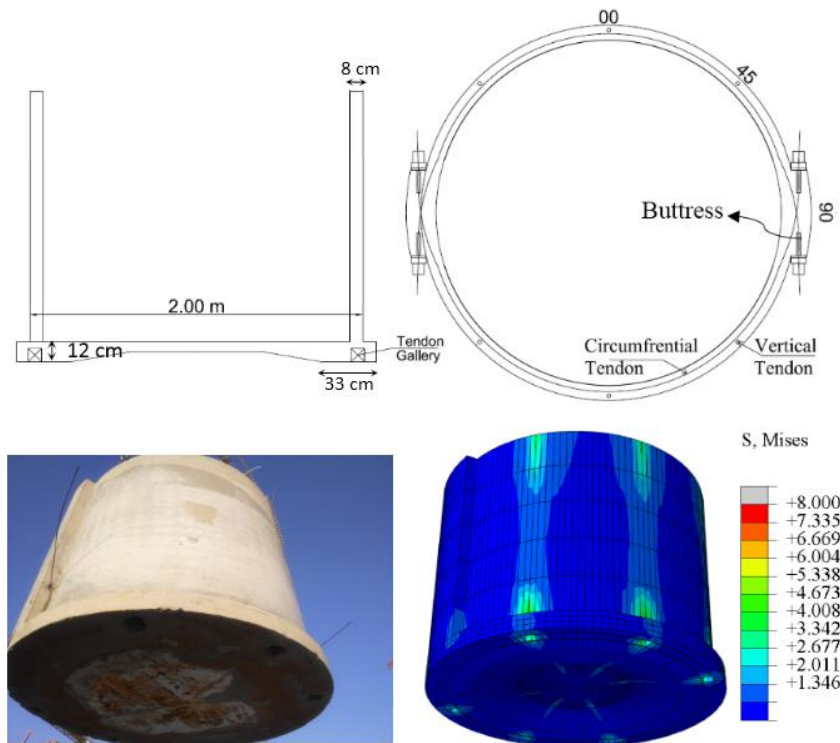
شکل ۴. تاریخچه ارتفاع موج برای رکوردهای CA
Fig.4. Wave height histories for CA records

تحلیل‌ها بسیار وقت‌گیر است. یک پاسخ قابل‌اعتماد از روش دینامیکی صریح به‌شدت وابسته به میزان کوچکی گام‌های زمانی انتخاب‌شده می‌باشد. به‌طور طبیعی، گام‌های زمانی اندک باعث وقت‌گیر شدن تحلیل‌ها می‌شود. همچنین تکنیک‌های مقیاس‌بندی زمان یا جرم برای کاهش زمان تحلیل، باعث واگرایی خطاها و اختلافات عددی می‌شود. در روش کرانک - نیکسون حداکثر ارتفاع موج ۲۳۹۰ میلی‌متر است و در زمان ۶۲/۲۱ ثانیه برای رکورد CA-EW رخ می‌دهد. مقادیر متناظر برای تحلیل‌های دینامیکی صریح ۲۵۳۰ میلی‌متر و زمان ۷۳/۳۸ ثانیه می‌باشد. مقایسه نتایج، تطابق خوبی بین روش تحقیق فعلی و مطالعه عددی باریوس را نشان می‌دهد.

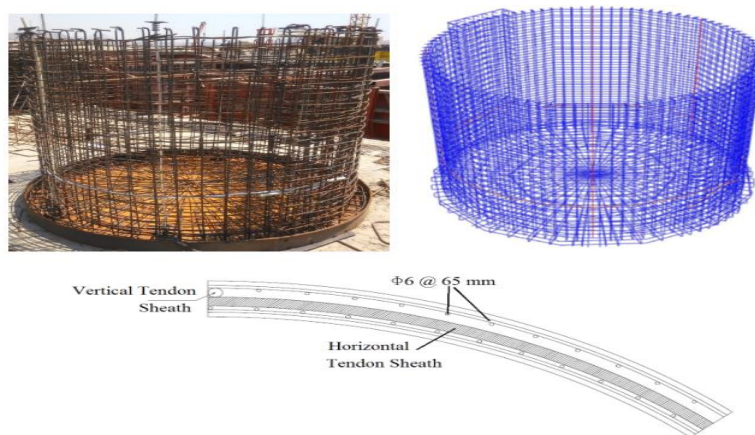
۵- صحت سنجی آزمایشگاهی

به‌منظور صحت سنجی روش تحلیل غیرخطی بیان‌شده در این

غیرخطی کرانک - نیکسون برای رکورد CA-NS در زمان ۹۸/۷۵ ثانیه رخ می‌دهد. مقادیر متناظر برای تحلیل دینامیکی صریح ۲۱۱۰ میلی‌متر و زمان ۱۰۶/۸۵۲ ثانیه می‌باشد. در حقیقت حداکثر ارتفاع موج در روش کرانک-نیکسون خطی ۲۶۰۰ میلی‌متر است، پس از آن می‌توان استنباط کرد که نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی صریح به نتایج حالت غیرخطی نزدیک‌تر می‌باشد. فرایند روش حل کرانک - نیکسون قادر به ادامه روند خود تحت رکورد شتاب CA-EW تا لحظه $81t/0.5 =$ ثانیه می‌باشد. روش کرانک - نیکسون از یک ویسکوزیته عددی مجازی برای تشدید همگرایی راه‌حل‌های عددی در پاسخ‌های نزدیک به رزونانس استفاده می‌کند. از آنجایی که دوره تناوب غالب مؤلفه EW به دوره تناوب اصلی حاکم بر سطح آب نزدیک‌تر است، ویسکوزیته مجازی باید برای دستیابی به نتایج کامل تقویت شود. باین‌حال، تحلیل غیرخطی ABAQUS می‌تواند برای آخرین لحظه رکورد شتاب اعمال شود، اما



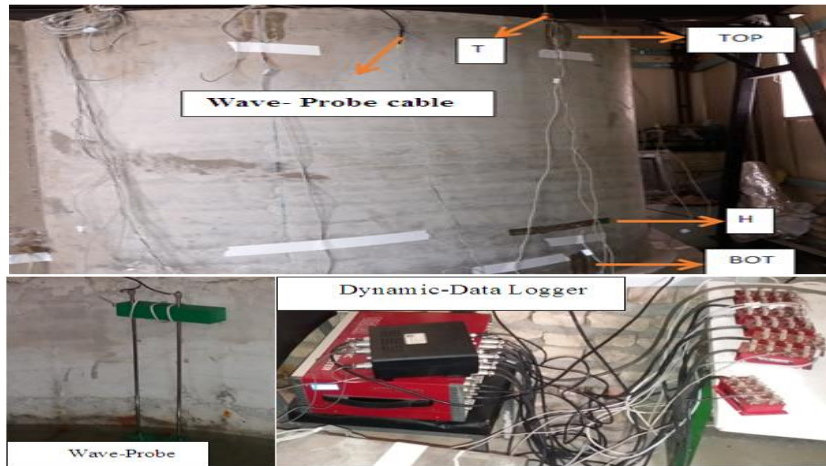
شکل ۵. هندسه مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود مخزن
Fig. 5. Geometric details of the prestressed tank test model and FE model



شکل ۶. جزئیات آرماتوربندی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود
Fig. 6. Reinforcement details of the test model and FE model

پی مخزن، ضخامت ناحیه پای دیوار بیشتر از باقی قسمت‌ها طراحی گردیده و میلگردهای شعاعی از میلگرد ۸ و میلگردهای حلقوی از میلگرد ۶ انتخاب گردید. ۶ کابل قائم به شکلی متقارن در دو سمت پشت‌بندهای مخزن قرار گرفته است. غلاف کابل‌های قائم از جنس آلومینیوم می‌باشد. کابل‌های محیطی به صورت دو کابل نیم‌دایره و تراز یک‌سوم دیواره قرار گرفته است. جنس غلاف کابل‌های افقی لوله پلاستیکی پلی وینیل می‌باشد که نسبت به غلاف آلومینیومی دارای

مقاله یک تست آزمایشگاهی به وسیله میز لرزه طراحی شده است. بدین منظور مخزن بتن پیش‌تنیده استوانه‌ای ساخته شده و به وسیله میز لرزه موجود در آزمایشگاه میز لرزان چندین شتاب‌نگاشت زلزله به آن اعمال گردید. شکل‌های ۵ و ۶ مشخصات هندسی مخزن بتن پیش‌تنیده را نشان می‌دهد. در دیواره‌ها میلگرد محیطی از میلگرد ۶ و با فواصل ۶۵ میلی‌متری و میلگردهای قائم از میلگرد ۸ و با فواصل ۱۱۰ میلی‌متری انتخاب گردیدند. در خصوص دال



شکل ۷. ابزاربندی مدل آزمایشگاهی مخزن
Fig. 7. The tank test model instrumentation

شد.

با استفاده از میز لرزه دو شتاب‌نگاشت مصنوعی السنتر و نورث‌ریج به مخزن اعمال می‌گردد.

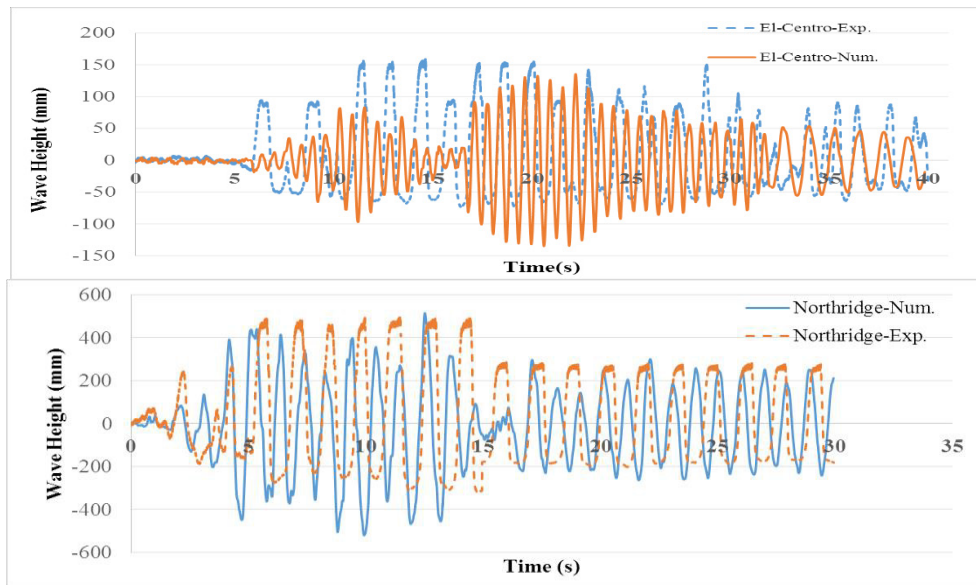
شکل ۸ تاریخچه ارتفاع موج تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی السنتر و نورث‌ریج را نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع موج در اندازه‌گیری ارتفاع موج مثبت دقیق‌تر از ارتفاع موج منفی می‌باشد. شکل ۹ بیشینه نوسانات سطحی مایع تحت شتاب‌نگاشت مصنوعی نورث‌ریج را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، موقعیت نمونه مخزن بر روی میز لرزه‌ای به‌گونه‌ای انتخاب شده است که حداکثر فشار هیدرودینامیکی در محلی خارج از دیواره پشت مخزن به وجود آید. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، تفاوت مقدار عددی و تجربی کرنش بسیار کم است. نتایج عددی با توجه به کرنش‌های بالا و پایین نمایش داده می‌شود تا مقایسه نتایج حاصل از فشار را آسان‌تر کند. تغییرات کرنش بتن در مکان‌های مختلفی از مخزن مشابه هم می‌باشد. همچنین تغییرات کرنش در کابل‌های عمودی حدود ۲۰۰ میکرواسترین است. از آنجا که یک مشکل سازه‌ای در خصوص حداقل ضخامت دیواره مخزن برای تحمل نیروی پس کشیدگی وجود داشت، مدل آزمایشگاهی طراحی شده برای نیروهای پیش‌تنیدگی و نیروهای ناشی از زلزله ابعاد مدل مخزن بتنی را تعیین نمی‌کند. نتایج کرنش‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مواد سازنده نمونه مخزن در هر نقطه به حد الاستیک خود نرسیده است. باین‌حال، حداکثر فشار هیدرودینامیک بستگی به حداکثر ارتفاع نوسان آب

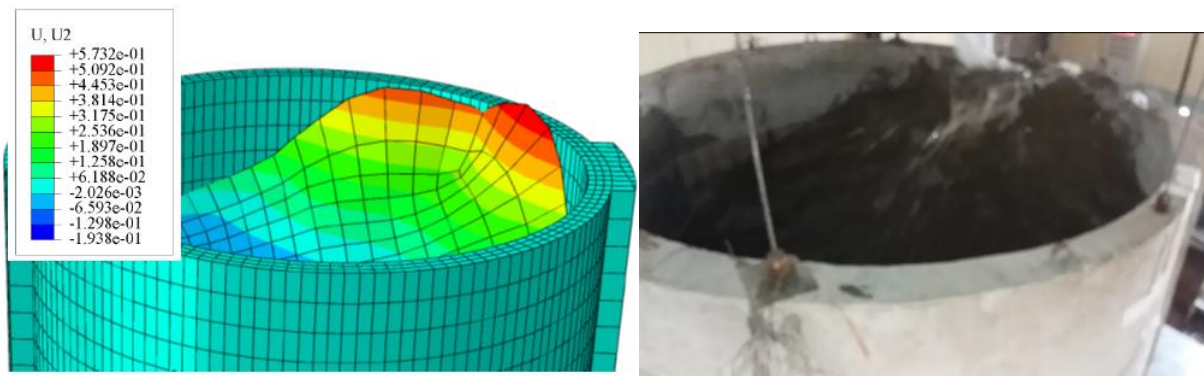
انعطاف بیشتری است. کابل‌های استفاده‌شده از نوع $0/in5$ بوده و تا 1400 MPa کشیده شده‌اند. روش پیش‌تنیدگی مورد استفاده پس کشیدگی می‌باشد.

به‌منظور تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، سه نمونه استوانه بتنی به ارتفاع 300 و قطر 150 میلی‌متر ساخته شد. بر روی نمونه‌های ساخته‌شده آزمایش مدول الاستیسیته انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایش، مدول الاستیسیته میانگین برابر $35/04 \text{ GPa}$ و ضریب پواسون برابر $0/2$ می‌باشد. میزان مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ها $48/3 \text{ MPa}$ می‌باشد. به‌منظور انجام آزمایش کشش سه نمونه میلگرد و سه نمونه کابل پیش‌تنیدگی 400 میلی‌متری انتخاب گردید. ضریب پواسون برای هر دوی میلگردها و کابل‌های پیش‌تنیدگی $0/3$ فرض شده و مقدار مدول الاستیسیته برای میلگردها و کابل‌ها به ترتیب 143 و 146 GPa می‌باشند. حداکثر مقاومت کششی میلگردها 427 MPa و این مقدار برای کابل‌ها 2462 MPa می‌باشد. شکل ۷ ابزاربندی مدل آزمایشگاهی مخزن را نشان می‌دهد. برچسب T در شکل ۷ مربوط به دو عدد کرنش‌سنج می‌باشد که روی کابل قائم و در نزدیک‌ترین نقطه به محل کشش کابل نصب شده‌اند. تعدادی از کرنش‌سنج‌های 11-60-PML نیز روی بدنه مخزن نصب شده‌اند. برچسب Top و Bot و H موجود در شکل ۷ به ترتیب مربوط به بالا و پایین کابل قائم و سطح کابل محیطی می‌باشد. به‌منظور اندازه‌گیری ارتفاع موج نوسانات سطحی مایع از دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع موج^۱ که به‌صورت قائم بر روی بدنه داخلی مخزن نصب شده است، استفاده

1 Wave-Probe



شکل ۸. تاریخچه ارتفاع موج تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی السنترو و نورث‌ریج
 Fig. 8. Nonlinear sloshing of water surface under Artificial acceleration records of Northridge



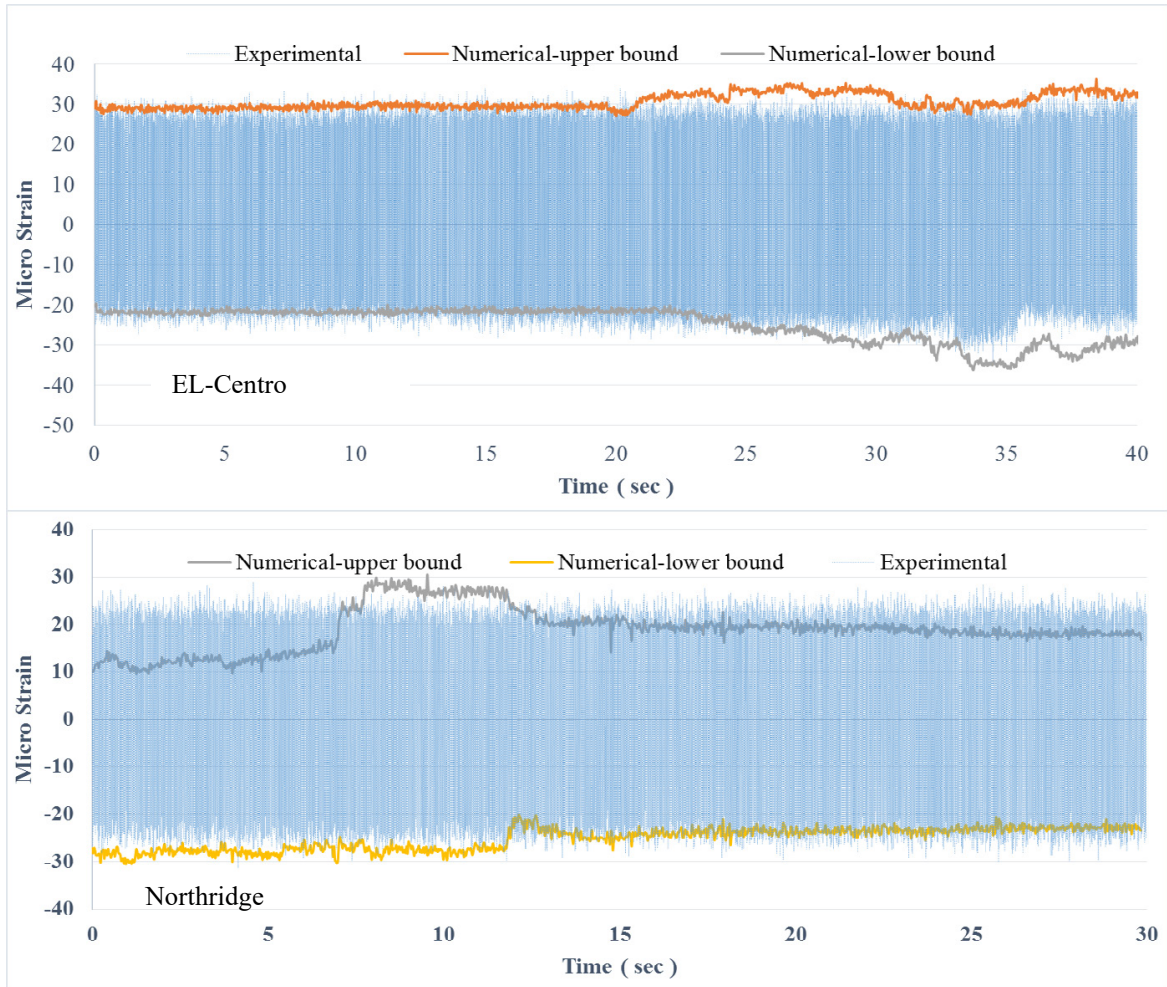
شکل ۹. بیشینه نوسانات سطحی مایع تحت شتاب‌نگاشت مصنوعی نورث‌ریج
 Fig. 9. Maximum water height under artificial acceleration record adopted in Northridge (U2 in meters)

تعداد کابل‌ها و میلگردها مخزن بتنی تحت نیروهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک در نظر گرفته می‌شود. برش پایه لرزه‌ای برای سه مدل F1، F2 و F3 به ترتیب برابر ۴/۴۴۸۳، ۹۸/۷۵۸۰ و ۳۴/۱۰۶۹۰ کیلونیوتن می‌باشد. در گام دوم به منظور کنترل حد سرویس‌دهی تعدادی کابل به مدل مخزن اضافه می‌شود. در نهایت کلیه مدل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدل می‌شود. شکل ۱۱ و جدول ۱ مشخصات هندسی مدل‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۲ مشخصات میلگردها را بر اساس ناحیه‌های مشخص شده بر روی پی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد. جدول ۳ مشخصات کابل‌های پیش‌تیندگی را بر اساس ناحیه‌های مشخص شده بر روی دیوار در شکل ۱۱ نشان می‌دهد. اتصال دیواره‌ها

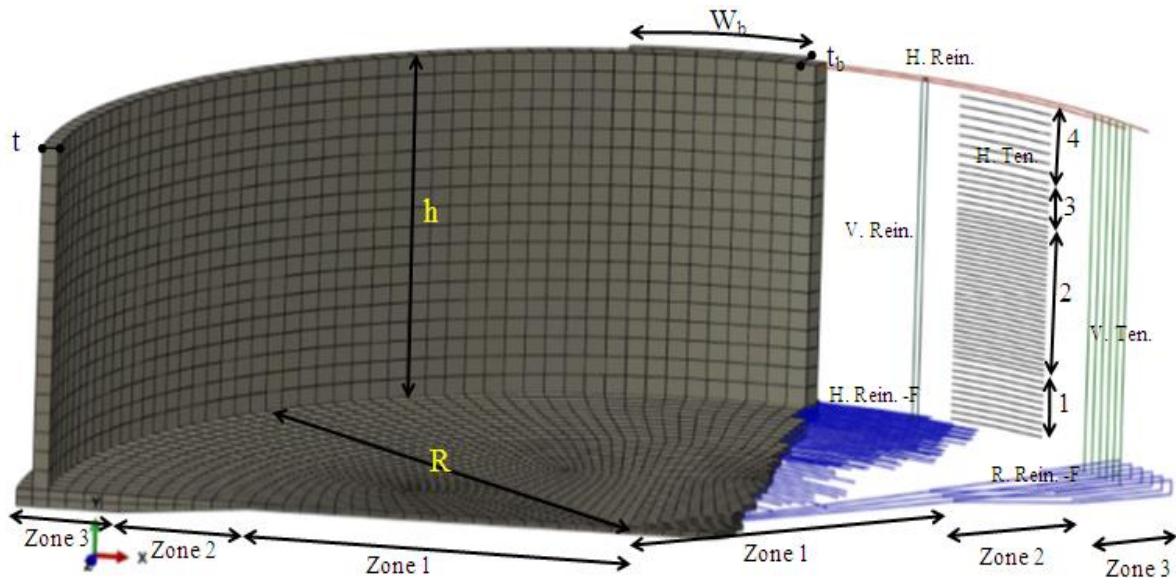
دارد، اما افزایش تأثیر امواج نوسان محدود به حداکثر ارتفاع دیواره مخزن می‌باشد.

۶- مشخصات مدل‌های عددی

مدل‌ها در سه نسبت شعاع به حداکثر ارتفاع آب داخل مخزن (۴ و ۲/۳ R/H) در نرم‌افزار Sap 2000 طرح گردیدند. اندازه مش دیوار مخزن بسته به نسبت R/H مقداری بین 275×1120 تا 275×2240 می‌باشد. از المان پوسته موجود در نرم‌افزار Sap 2000 به منظور طراحی مخزن استفاده شده است. روند طراحی دارای دو گام می‌باشد. در گام اول به منظور تعیین بیشینه نیروهای داخلی و



شکل ۱۰. تغییرات کرنش قائم بتن در بالای مخزن (برچسب T)
 Fig. 10. Concrete strain at the top of the tank (Lable T)



شکل ۱۱. مدل اجزا محدود ساخته شده در نرم افزار ABAQUS
 Fig. 11. FE models in the ABAQUS software

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل‌ها
Table 1. Geometric features

عرض ناحیه ۲ (mm)	ضخامت پاشنه (ناحیه (mm) (۱)	عرض پاشنه (ناحیه ۱) (mm)	عرض ناحیه پشت‌بند (W _b) (mm)	ضخامت دیواره (t) (mm)	ارتفاع مخزن (h) (m)	شعاع مخزن (R) (m)	مدل‌ها
۲۲۰۰	۲۷۵	۱۵۰۰	۳۰۸۰	۲۷۵	۵/۵	۱۰	F ^۱
۲۲۰۰	۲۷۵	۱۵۰۰	۴۵۸۸	۲۷۵	۵/۵	۱۵	F ^۲
۲۲۰۰	۲۷۵	۱۵۰۰	۶۰۲۹	۲۷۵	۵/۵	۲۰	F ^۳

جدول ۲. مشخصات میلگردها
Table 2. Reinforcing bar details

میلگردهای حلقوی پی (H-Rein-F)			میلگردهای شعاعی پی (V-Rein-F)			میلگردهای قائم (V-Rein.)	میلگردهای افقی (H-Rein.)	مدل‌ها
ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱	Φ۱۰@ ۷۵mm	Φ۱۰@ ۷۵mm	F ^۱ -F ^۲ -F ^۳
Φ۱۲@ ۲۰۰mm	Φ۱۶@ ۲۰۰mm	Φ۱۶@ ۱۰۰mm	Φ۱۲@ ۲۰۰mm	Φ۱۶@ ۲۰۰mm	Φ۱۶@ ۱۰۰mm			

جدول ۳. مشخصات کابل‌های پیش‌تنیدگی
Table 3. Prestressing tendon details

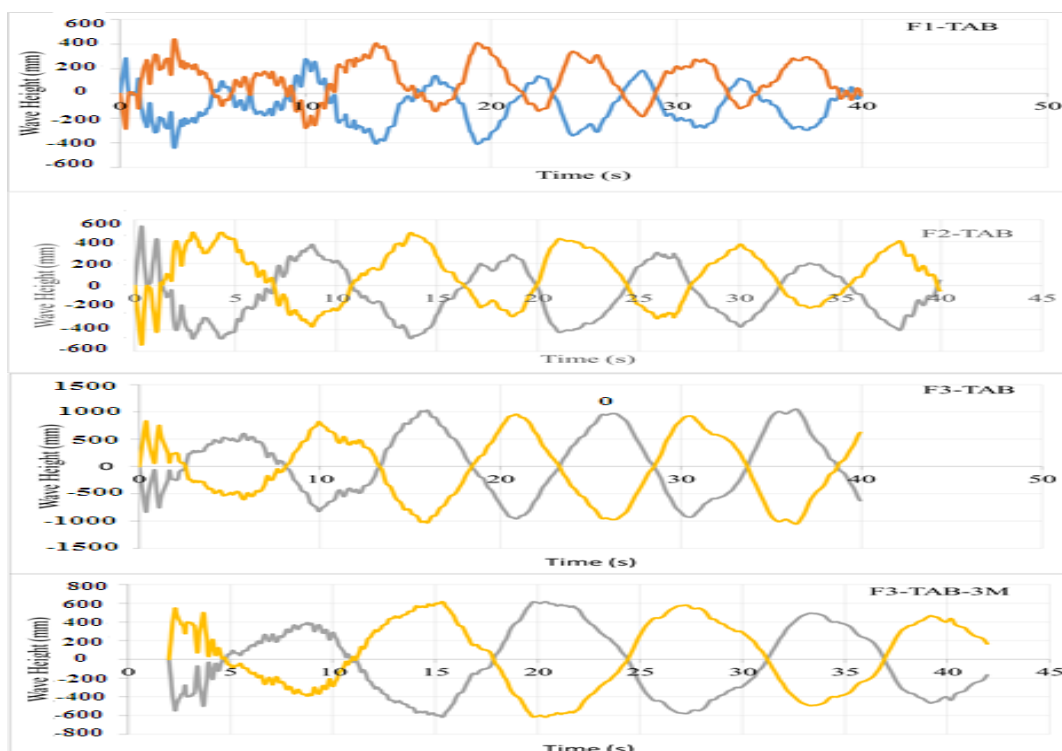
کابل‌های محیطی (H-Ten)				کابل‌های قائم (V-Ten.)	مدل‌ها
ناحیه ۴	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱		
No.: ۷-@ ۱۵۷mm	No.: ۷-@ ۱۱۷mm	No.: ۲۹-@ ۸۵mm	No*.: ۱۰-@ ۱۱۰mm	۱" ۱/۲ @ ۲۰۰mm	F ^۱
No*.: ۱۲-@ ۸۰mm	No*.: ۲۶-@ ۷۵mm	No*.: ۱۰-@ ۸۰mm	No*.: ۸-@ ۱۰۰mm	۱" ۱/۲ @ ۱۷۵mm	F ^۲
No*.: ۱۳-@ ۷۷mm	No*.: ۳۳-@ ۶۶mm	No*.: ۹-@ ۷۷mm	No*.: ۱۲-@ ۹۱mm	۱" ۱/۲ @ ۱۷۵mm	F ^۳

به پی به صورت یکپارچه بوده و از اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است.

السنتر در می ۱۹۴۰ از ایستگاه السنتر می‌باشد. نوسانات سطحی آب در مخازن پیش‌تنیده استوانه‌ای برای سه نسبت ابعادی (۴ و ۲/۳ R/H) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ تاریخچه ارتفاع موج مدل‌های مختلف با ابعاد و ارتفاع آب پر شده متغیر را تحت شتاب‌نگاشت زلزله طبس مقایسه می‌کند. هر نمودار شامل تاریخچه ارتفاع نوسانات دو نقطه در سطح آب با حداکثر ارتفاع نوسان نشان می‌دهد. این نقاط از دو طرف مدل در نظر گرفته شده

۷- نتایج عددی و بررسی آن

رکوردهای لرزه‌ای مقیاس شده برای محدودیت‌های طراحی شامل مؤلفه شرق - غرب شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه طبس در سپتامبر ۱۹۷۸ از ایستگاه دی هوک و مؤلفه شمال - جنوب شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه



شکل ۱۲. تاریخچه ارتفاع موج تحت شتاب‌نگاشت طبس
 Fig. 12. Wave height history under Tabas acceleration record

جدول ۴. نتایج عددی مدل‌های معرفی شده تحت شتاب‌نگاشت
 Table 4. Summary of numerical results

نام مدل	شتاب‌نگاشت	میزان آسیب نسبی (%)	حداکثر فشار (MPa)	حداکثر ارتفاع نوسان (mm)	محل حداکثر فشار از پایین (m)
F ₁ -TABAS	طیس	۰٪	۳/۲۸	۴۳۸	۲/۸۹۷
F _۲ -TABAS	طیس	۰٪	۵/۳۸	۸۱۴	۵/۱۹۴
F _۳ -TABAS	طیس	۷۳٪	۸/۱۷	۱۰۵۰	۵/۵
F _۳ -TABAS-۳m	طیس	۰٪	۷/۴۸	۶۰۶	۵/۱۰۷
F _۱ -ELCENTRO	السنتر	۰٪	۴/۱۶	۵۱۲	۲/۸۹۷
F _۲ -ELCENTRO	السنتر	۰٪	۵/۴۴	۵۷۹	۵/۱۹۴
F _۳ -ELCENTRO	السنتر	۷۳٪	۸/۳۹	۸۲۴	۵/۵
F _۳ -ELCENTRO-۳M	السنتر	۰٪	۷/۴۸	۵۴۱	۵/۱۰۷

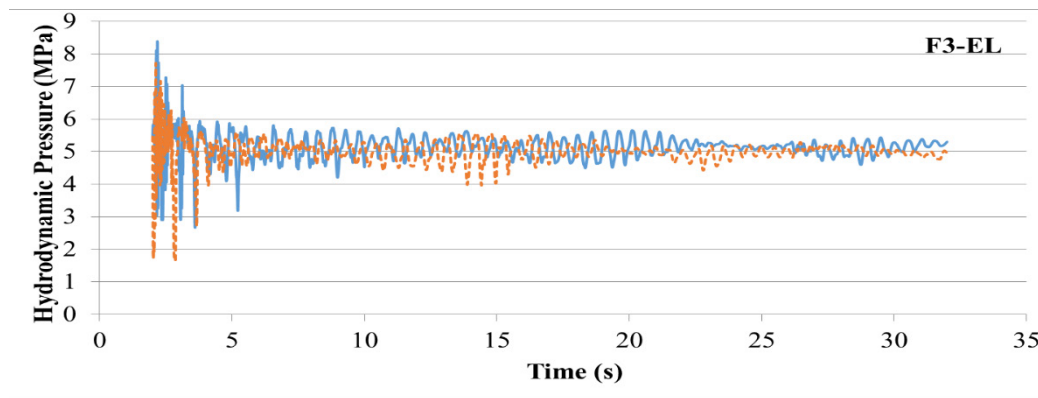
لحظه ۳۶/۳۹ ثانیه از شتاب‌نگاشت زلزله طبس رخ می‌دهد. نتایج عددی نشان می‌دهد که ارتفاع موج نوسان در نسبت R/H بالاتر افزایش می‌یابد. حداکثر حساسیت ارتفاع موج نوسان به نسبت R/H در مدل‌های تحت شتاب‌نگاشت زلزله طبس بیشتر از مدل‌های تحت شتاب‌نگاشت زلزله السنتر است. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، تاریخچه ارتفاع موج، نقاط اوج مختلفی را در مدت

در امتداد جهت تحریک لرزه‌ای انتخاب شده‌اند. حداکثر ارتفاع موج نوسانات برای موارد مورد مطالعه در جدول ۴ خلاصه شده است. آخرین نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تاریخچه ارتفاع موج در حالت پرشده نسبی با آب "F3" برای مطالعه عملکرد لرزه‌ای بحرانی‌ترین مورد با سطح آب پایین‌تر است. حداکثر ارتفاع موج نوسان متعلق به مدل "TAB-F3" است و حدود ۱۰۵۰ میلی‌متر می‌باشد که در

جدول ۵. تغییرات تنش کابل
Table 5. Tendon stress variations

Model	F ^۱ -EL	F ^۱ -TAB	F ^۲ -EL	F ^۲ -TAB	F ^۳ -EL	F ^۳ -TAB	F ^۳ -EL-۳M	F ^۳ -TAB-۳M
حداکثر تنش تاندون‌های محیطی (MPa)	۹۲۰/۸۰	۹۲۱/۰۹	۹۳۱/۸۳	۹۳۱/۲۳	۱۱۵۰/۹۸	۱۱۳۷/۹۰	۱۱۰۵/۴۹	۹۳۳/۴۰
حداقل تنش تاندون‌های محیطی (MPa)	۸۸۳/۶۳	۸۸۳/۶۳	۸۵۴/۵۲	۸۵۴/۵۵	۸۴۹/۶۱	۸۵۰/۹۴	۸۵۸/۶۱	۸۵۸/۶۴
حداکثر تنش تاندون‌های عمودی (MPa)	۹۰۷/۴۲	۹۰۷/۴۲	۹۱۵/۲۶	۹۱۴/۸۰	۹۲۴/۸۷	۹۲۵/۹۸	۹۱۱/۷۷	۹۱۱/۳۵
حداقل تنش تاندون‌های عمودی (MPa)	۸۷۹/۰۲	۸۷۹/۰۲	۸۶۵/۷۴	۸۶۵/۹۵	۸۳۳/۳۷	۸۳۳/۱۳	۸۷۷/۸۱	۸۷۸/۶۵
میانگین تنش تاندون‌های محیطی (MPa)	۸۹۸/۷۵	۸۹۷/۸۰	۸۹۷/۶۴	۸۹۷/۶۵	۹۰۳/۳۷	۹۰۳/۴۲	۸۹۶/۸۲	۸۹۶/۸۰
میانگین تنش تاندون‌های عمودی (MPa)	۸۹۷/۴۲	۸۹۷/۲۳	۸۹۶/۶۲	۸۹۶/۶۲	۸۹۴/۹۹	۸۹۴/۹۹	۸۸۹/۶۱	۸۸۹/۶۶

شکل ۱۳. تاریخچه حداکثر فشار هیدرودینامیک برای مدل «F3-EL»
Fig. 13. Maximum hydrodynamic pressure history for model "F3-EL"

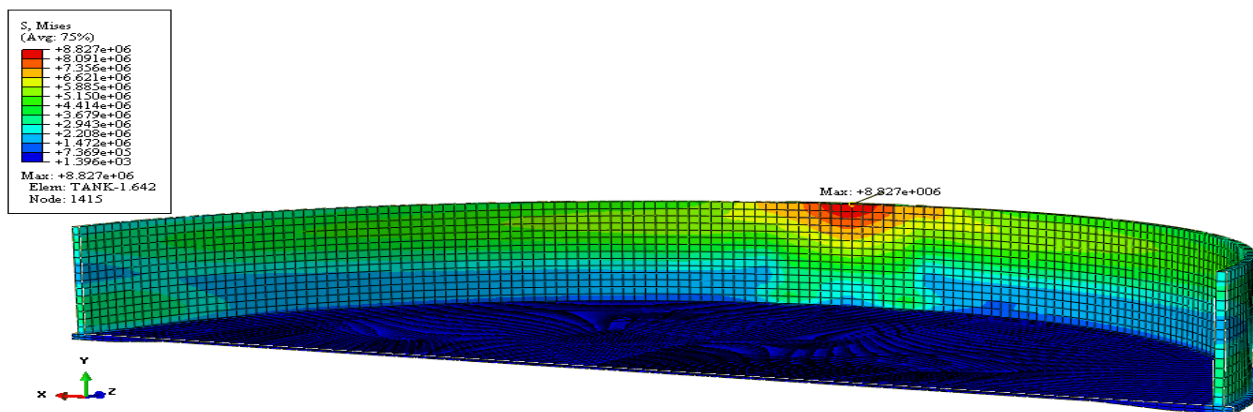


میانمی به سمت بالای دیواره مخزن حرکت می‌کند. حداکثر تنش ناشی از فشار هیدرودینامیکی در جدول ۴ ثابت می‌کند که تفاوت بین شتاب‌نگاشت انتخاب‌شده تأثیر زیادی بر پاسخ فشار هیدرودینامیکی ندارد.

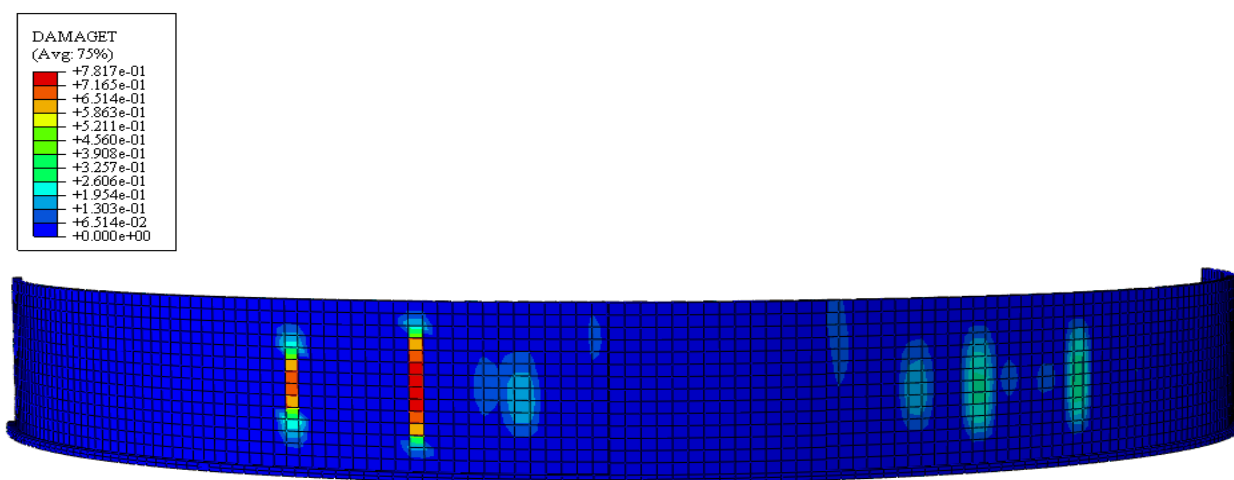
شکل ۱۵ آسیب‌های سازه‌ای ایجادشده در دیواره مدل EL-F3 به علت تحریک لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که حداکثر تنش به دلیل فشار هیدرودینامیک نشان داده‌شده است، آسیب‌های سازه‌ای بیشتر در مدل‌های با بالاترین نسبت (R / H) رخ می‌دهد و تفاوت در شتاب‌نگاشت زلزله تغییرات قابل توجهی را در حالت آسیب سازه‌ای نشان نمی‌دهد و بیشتر آسیب‌های سازه‌ای تحت تنش‌های کششی شکل می‌گیرد. کاهش ارتفاع آب به ۳ متر در بیشتر مدل‌های F3-EL و "و" TAB-F3 منجر به کاهش فشار هیدرودینامیکی و آسیب

زمان ثبت شتاب تجربه می‌کند. حداکثر ارتفاع نوسان معمولاً در اولین لحظه رکورد شتاب رخ می‌دهد. برخلاف دیگر موارد مورد مطالعه، حداکثر ارتفاع نوسان در آخرین لحظات رکورد شتاب برای موارد "TAB-F3" و "F3-طیس-۳ متر" رخ می‌دهد. این مسئله احتمالاً ناشی از تأثیر حالت‌های ارتعاشی بالاتر است. جدول ۶ حداکثر فشار هیدرودینامیکی را در دیواره مخزن بتن پیش‌تنیده برای مدل‌های عددی ارائه می‌دهد. حداکثر فشار حدود ۸/۳۸ MPa می‌باشد و از تحلیل غیرخطی مدل "EL-F3" حاصل می‌شود. تاریخچه فشار هیدرودینامیکی برای مدل EL-F3 در شکل ۱۳ نشان داده‌شده است. شکل ۱۴ موقعیت مکانی حداکثر فشار را نشان می‌دهد.

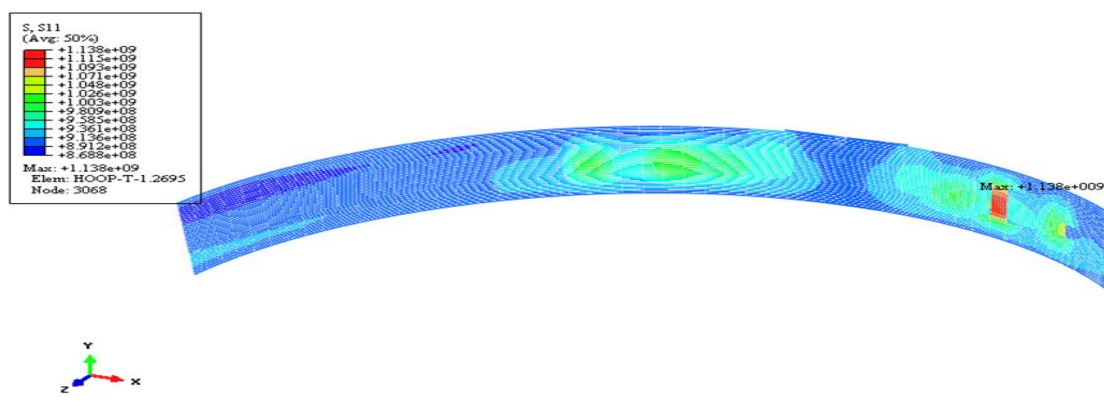
حداکثر فشار هیدرودینامیکی با افزایش نسبت (R / H) بیشتر می‌شود. موقعیت حداکثر فشار با افزایش نسبت R / H از نقاط



شکل ۱۴. محل ثبت حداکثر فشار هیدرودینامیکی در مدل «F3-EL» (تنش برحسب پاسکال)
 Fig. 14. Maximum hydrodynamic pressure location in model "F3-EL" (Stress in Pa)



شکل ۱۵. آسیب‌های کششی در مدل «F3-EL»
 Fig. 15. Tensile damages in model "F3-EL"



شکل ۱۶. کانتور تغییرات تنش پیش تنیدگی افقی F3-TAB (تنش برحسب پاسکال)
 Fig. 16. Circumferential tendon stress contour in "F3-TAB" model (Stress in Pa)

نتایج تنش کابل‌های عمودی و محیطی از سه سطح پوش متوسط، حداقل و حداکثر استخراج می‌شود. جدول ۵ محدوده بیشینه پوش

سازه‌ای می‌شود. شدت آسیب در جدول ۴ با آسیب نسبی نشان داده شده است.

فشار هیدرودینامیک با افزایش ارتفاع موج نوسان افزایش می‌یابد. عدم تشابه بین شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده زلزله‌های طبرس و السنترو باعث تغییرات کمتر در فشار هیدرودینامیکی می‌شود.

(۲) آسیب‌های سازه‌ای بیشتر در مدل‌های با نسبت R/H بالاتر دیده می‌شود. آسیب‌های کششی در قالب ترک‌های عمودی بر دیواره مخزن بتن پیش‌تنیده دیده می‌شود. ارتفاع موج نوسان مستقیماً مرتبط با ایجاد ترک بر دیواره مخزن است. تغییر ارتفاع سطح آب از ۵ متر به ۳ متر موجب کاهش مکان‌های آسیب‌دیده در مدل‌های بحرانی "EL-F3" و "TAB-F3" می‌شود.

(۳) میانگین کاهش نیروی پیش‌تنیدگی از طریق تحریک لرزه‌ای قابل‌اغماض می‌باشد و از ۹ تا ۱۷ مگاپاسکال متغیر است. برخلاف کاهش نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌های عمودی، افزایش نسبت R/H منجر به کاهش نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌های محیطی می‌شود. حداکثر تنش کابل در مدل EL-F3 همراه با حداکثر فشار هیدرودینامیکی اتفاق می‌افتد. نتایج عددی مطالعات فعلی تحت شتاب‌نگاشت‌های السنترو و طبرس نشان می‌دهد که تغییرات تنش تحت رویدادهای لرزه‌ای ناچیز است.

مراجع

- [1] J.C. Virella, C.A. Prato, L.A. Godoy, Linear and nonlinear 2D finite element analysis of sloshing modes and pressures in rectangular tanks subject to horizontal harmonic motions, *Journal of Sound and Vibration*, 312(3) (2008) 442-460.
- [2] S. Rebouillat, D. Liksonov, Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: a comparative review of numerical approaches, *Computers & Fluids*, 39(5) (2010) 739-746.
- [3] Y. Chen, K. Djidjeli, W. Price, Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers, *Computers & fluids*, 38(4) (2009) 830-842.
- [4] G.W. Housner, Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bulletin of the seismological society of America*, 47(1) (1957) 15-35.
- [5] A. Veletsos, Seismic response and design of liquid storage tanks, *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*, (1984) 255-370.

حداکثر، مقدار کمینه پوش حداقل و مقدار نهایی متوسط تنش کابل را نشان می‌دهد. محاسبه میزان کاهش پیش‌تنیدگی با استفاده از میانگین نتایج تنش‌های کابل انجام می‌شود. همان‌طور که از نتایج حداکثر تنش حاصل از فشار هیدرودینامیک قابل پیش‌بینی است، حداکثر تنش پیش‌تنیدگی در کابل‌های افقی و برای مدل F3-EL ثبت گردید. نتایج عددی نشان می‌دهد که مقادیر کاهش پیش‌تنیدگی بسیار کوچک و بین ۹ تا ۱۷ مگاپاسکال متغیر می‌باشد. برخلاف کاهش نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌های محیطی، کاهش در کابل‌های عمودی با افزایش نسبت (R/H) بیشتر می‌شود.

افزایش نسبت (R/H) موجب کاهش در بیشینه پوش حداکثر و کمینه پوش حداقل تنش‌های کابل می‌شود. افزایش جهشی مقدار بیشینه پوش حداکثر در مدل‌های EL-F3 و TAB-F3 به دلیل افزایش تنش کششی در بتن و ایجاد آسیب سازه‌ای در آن می‌باشد. شکل ۱۶ مقدار حداکثر تنش پیش‌تنیدگی در کابل‌های افقی در F3-TAB نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۱۵ و ۱۶ رابطه بین آسیب سازه‌ای در بتن و حداکثر تنش در کابل محیطی را تأیید می‌کند. به‌طور کلی، تحلیل دینامیکی صریح غیرخطی مخازن پیش‌تنیده تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله انتخاب‌شده نشان می‌دهد که کاهش نیروی پیش‌تنیدگی ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن بتن پیش‌تنیده استوانه‌ای با استفاده از تغییرات تنش، فشار هیدرودینامیکی و پارامترهای ارتفاع موج نوسان بررسی شده است. آزمایش میز لرزه‌ای بر روی مدل مخزن بتن پیش‌تنیده برای اعتبار سنجی تحلیل غیرخطی دینامیکی صریح انجام شد. روش شبیه‌سازی عددی با استفاده از نتایج نظری و تجربی تأیید شده است. صحت سنجی عددی نشان می‌دهد که روش تحلیل غیرخطی فعلی منجر به نتایج مشابه با روش کرانک - نیکسون می‌شود. اعتبار سنجی آزمایشگاهی توانایی تحلیل غیرخطی دینامیکی صریح را نشان می‌دهد تا نتایج مختلف ارتفاع موج نوسان را تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف ارائه دهد.

نتایج خروجی تحقیقات عددی می‌تواند به شرح زیر بیان شود:

(۱) حداکثر ارتفاع موج نوسان با افزایش ضریب تناسب (R/H) تقویت می‌شود. تنش موجود در دیواره مخزن بتن پیش‌تنیده در نتیجه

- performances of the prestressed egg-shaped digester with shaking table test, *Engineering structures*, 29(4) (2007) 552-566.
- [17] F. Khoshnoudian, R. Jalali, Response Modification Factor of Shaft Supported Concrete Elevated Water Tanks, *Structure and Steel journal*, 4(3) (2008) 36-48. (in Persian)
- [18] K. Shahverdiani, A. Rahai, Effect of Time Dependent Deformations of Concrete on Prestressing Force in Cylindrical Tank's shells, *Modares Civil Engineering journal*, 10(3), (2010) 49-61. (in Persian)
- [19] K. Shahverdiani, A. Rahai, Sloshing in concrete cylindrical tanks subjected to earthquake, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 163(4) (2010), 261-269.
- [20] Y.M. Ji, Y.S. Shin, J.S. Park, J.M. Hyun, Experiments on non-resonant sloshing in a rectangular tank with large amplitude lateral oscillation, *Ocean engineering*, 50 (2012) 10-22.
- [21] F. Lin, H. Li, Safety analysis of nuclear containment vessels subjected to strong earthquakes and subsequent tsunamis, *Nuclear Engineering and Technology*, 49(5) (2017) 1079-1089.
- [22] C. Song, X. Li, G. Zhou, C. Wei, Research on FSI effect and simplified method of PCS water tank of nuclear island building under earthquake, *Progress in Nuclear Energy*, 100 (2017) 48-59.
- [23] H. Hernández-Barríos, E. Heredia-Zavoni, Á.A. Aldama-Rodríguez, Nonlinear sloshing response of cylindrical tanks subjected to earthquake ground motion, *Engineering Structures*, 29(12) (2007) 3364-3376.
- [24] Shokoohfar, A. Rahai, Nonlinear analysis of prestressed concrete containment vessel (PCCV) using the damage plasticity model, *Nuclear Engineering and Design*, 298 (2016) 41-50.
- [25] Dassault, 6.14—Abaqus Analysis User's Manual, Dassault Systèmes Simulia Corp, (2014).
- [6] M. Vesenjak, H. Mullerschön, A. Hummel, Z. Ren, Simulation of fuel sloshing-comparative study, *LS-DYNA Anwenderforum*, (2004) 1-8.
- [7] A. Lakis, G. Bursuc, M. Toorani, Sloshing effect on the dynamic behavior of horizontal cylindrical shells, *Nuclear Engineering and Design*, 239(7) (2009) 1193-1206.
- [8] Di Carluccio, G. Fabbrocino, E. Salzano, G. Manfredi, Analysis of pressurized horizontal vessels under seismic excitation, in: *ICSV18: 18th The World Conference on Earthquake Engineering: October, 2008*, pp. 12-17.
- [9] S. Nicolici, R. Bilegan, Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks, *Nuclear Engineering and Design*, 258 (2013) 51-56.
- [10] M. Moslemi, M. Kianoush, Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks, *Engineering Structures*, 42 (2012) 214-230.
- [11] W. Wang, Y. Peng, Y. Zhou, Q. Zhang, Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited cylindrical tanks equipped with multi baffles, *Applied Ocean Research*, 59 (2016) 543-563.
- [12] M. Eswaran, G. Reddy, Liquid sloshing in fuel storage bays of advanced reactor subjected to earthquake loading, *Procedia Engineering*, 144 (2016) 1278-1285.
- [13] K.K. Mandal, D. Maity, Pressure based Eulerian approach for investigation of sloshing in rectangular water tank, *Procedia Engineering*, 144 (2016) 1187-1194.
- [14] C. Zhang, Nonlinear simulation of resonant sloshing in wedged tanks using boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 69 (2016) 1-20.
- [15] C. Baltos, E. Fieberling, D. Lee, Seismic Upgrade of Prestressed Concrete Water Tanks, in: *13 WCEE: 13 th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings*, 2004.
- [16] J. Li, H.-M. Chen, J.-B. Chen, Studies on seismic

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Rahai, A. Shokoohfar, A. Sahrai, *Seismic analysis of prestressed concrete cylindrical tanks*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 1577-1592.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15441.5935](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15441.5935)

