

## نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، (پیاپی ۴۶): صص ۶۴-۵۳

علمی - ترویجی

# تجزیه و تحلیل دینامیکی مخازن آب بتن آرمه تحت اثر انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه

مجید مقدم<sup>۱</sup>، سید وحید رضوی طوسی<sup>۲\*</sup>، مهرداد شهربانوزاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳

### چکیده

با توجه به گسترش حملات تروریستی در سراسر دنیا و احتمال هدف قرار دادن سازه‌های مختلف، مبحث پدافند غیرعامل اهمیت فراوانی یافته است. یکی از این سازه‌ها، مخازن ذخیره‌ای آب می‌باشد که در برابر انفجار بسیار آسیب‌پذیر بوده و با تخریب این نوع از سازه‌ها ممکن است از نقطه نظر بعدهای انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی گاه‌ها جبران‌ناپذیر باشد. هدف از این پژوهش، بررسی اثر انفجار بر روی تنش‌های حلقوی و تغییر مکان‌های ایجادشده بر روی بدنه مخزن بتن مسلح استوانه‌ای روزمینی ذخیره آب ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن میزان پرشدگی آب و ابعاد مخازن می‌باشد. همچنین با توجه به فواصل ۵ و ۱۰ متر از مرکز انفجار، تنش‌های حلقوی ایجادشده در بدنه مخازن بررسی می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار تجاری آباکوس برای شبیه‌سازی عددی سه مخزن با ارتفاع‌های ۴، ۶ و ۸ متری و شعاع ثابت ۳ متر با درصد پرشدگی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از آب استفاده شده است. نتایج کار نشان داده است که با افزایش درصد پرشدگی آب سختی مخزن افزایش پیدا کرده و سبب شده تغییر مکان بدنه یک کاهش ۳۱/۲۵ درصدی برای مخزن کاملاً پر نسبت به مخزن خالی داشته باشد. همچنین پرشدگی آب سبب شده تا حساسیت مخازن در برابر ناپایداری کاهش یابد. نتایج نشان داده است که تنش‌های حلقوی بدنه مخزن، تحت تأثیر امواج انفجار از خارج و فشار آب از داخل قرار دارد به طوری که وجود آب در مخزن سبب شده تا تنش‌های حلقوی در بدنه حدود ۲۰ مگاپاسکال افزایش پیدا کند.

**کلیدواژه‌ها:** پاسخ دینامیکی، مخازن آب، بارگذاری انفجار، نیروی هیدرودینامیکی، اندرکنش آب و سازه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۲- استادیار دانشکاه صنعتی جندی شاپور دزفول، vrazavi@jsu.ac.ir - نویسنده مسئول

۳- استادیار دانشکاه صنعتی جندی شاپور دزفول

## ۱- مقدمه

مابع اثر می‌کند به تعیین حداکثر نیروهای ناشی از زلزله پرداخته است [۵]. پس از آن هارون و هاوسنر با استفاده از روش اجزاء محدود و حل مرزی و برنامه کامپیوتری، مدل جدیدی از سامانه مخزن - مایع ارائه کردند که در آن علاوه بر اثر مود نوع  $\cos \theta$  اثر مودهای بالاتر  $\cos n\theta$  نیز مدنظر قرار گرفته است [۶]. سپس ولتسوز با جایگذاری تابع شبه شتاب به جای شتاب زمین، مؤلفه ضربه‌ای مخزن با دیواره صلب و انعطاف‌پذیر را مدل نموده و به دنبال آن رامراستروفر یک رویه طراحی برای مخزن با در نظر گرفتن هر دو مؤلفه لرزه‌ای زمین ارائه کرد [۷].

همان‌طوری که مشاهده شده است اغلب پژوهش‌های حاضر اثر نیروی زلزله را به‌عنوان اثر دینامیکی بر مخزن ذخیره سیالات در نظر گرفته‌اند ولی این امکان وجود دارد که این‌گونه از سازه‌ها تحت تأثیر بارگذاری‌های دیگر همچون امواج انفجار نیز مورد بررسی قرار گیرند. تحلیل اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه از دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید. در سال ۱۹۵۹ ارتش آمریکا نشریه‌ای تحت عنوان سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجار منتشر نمود. نسخه‌ی ویرایش شده‌ی این نشریه که در سال ۱۹۹۰ منتشر گردید به‌طور گسترده‌ای توسط سازمان‌های نظامی و غیرنظامی جهت طراحی سازه‌ها و به‌منظور جلوگیری از انتشار انفجار و حفاظت از تجهیزات و کارکنان نظامی مورد استفاده قرار گرفت [۸]. پس از آن تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی در رابطه با اثر انفجار بر روی انواع سازه‌ها از جمله مخزن سیال انجام گرفت [۹ و ۱۰]. از میان تحقیقات انجام گرفته می‌توان به پژوهش وانگ و همکاران اشاره نمود که نشان دادند یک مخزن طراحی شده برای نیروی زلزله در برابر انفجار دارای مقاومت کمتری بوده که ناشی از افزایش انرژی داخلی و کاهش کار خارجی با اتخاذ شرایط مرزی محوری محدود شده نتیجه شده است [۱۱]. میتال روی تحلیل دینامیکی مخزن ذخیره‌سازی مایع تحت اثر انفجار با استفاده از ترکیب فرمول اولر و لاگرانژ تحقیق کرده است و نشان داده است که تنش‌ها با افزایش ارتفاع مایع در مخزن، کاهش فاصله از مرکز انفجار و افزایش نسبت ارتفاع به شعاع مخزن افزایش می‌یابد [۱۲]. لی و همکاران بر روی فشار انفجار ایجادشده در داخل و خارج فضای گروه تانک‌ها بررسی نمودند. آن‌ها با توجه فواصل مختلف بین تانک‌ها نحوه محاسبه فشار داخلی و خارجی تانک‌ها را ارائه دادند [۱۳ و ۱۴]. زهنگ و همکاران با استفاده از روش عددی تنش و تغییر شکل ایجادشده در یک مخزن گاز تحت اثر بارگذاری انفجار از نوع مواد منفجره تی‌ان‌تی را ارائه دادند [۱۵]. هو و زهو اثر انفجار بر روی یک مخزن با مقیاس کوچک را در نرم‌افزار فلونت مدل نموده و با نمونه آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۱۶]. در این پژوهش نتایج توزیع فشار داخلی ایجادشده در مخزن با توجه به ظرفیت تانک، نسبت ارتفاع به عمق و شکل سقف مخزن صحت

کاملاً واضح و مبرهن است که مخازن روزمینی از نظر ماهیت وجودی، بسیار با اهمیت بوده و از جمله سامانه‌های مهم حفاظت آب تلقی می‌شوند و در واقع حصاری است که از آلودگی آب جلوگیری می‌کند. به لحاظ تاریخی ساخت مخازن آب آشامیدنی به‌منظور جلوگیری از آلودگی آب، یکنواخت نمودن تغییرات تقاضای آب، کاهش نوسانات فشار آب در شبکه توزیع، ذخیره نمودن آب مورد نیاز جهت اطفای حریق و استمرار آبرسانی در هنگام قطع برق و حوادث انجام می‌شده است [۱]. امروزه با توجه به پیشرفت شهرها و صنایع، مخازن همچنان جزء تأسیسات ضروری شهری و صنعتی بوده و لازم است پس از وقوع حوادث غیرمترقبه مانند زلزله و انفجار، جهت تأمین نیازهای آبرسانی، بهداشتی و اطفاء حریق کاربری خود را حفظ نمایند. مخازن یکی از سازه‌های مهم در نگهداری سیالات به‌منظور ذخیره‌سازی و استفاده در شبکه‌های انتقال می‌باشند که معمولاً دارای اشکال ثابتی در پلان و ارتفاع بوده و با توجه به میزان دبی ورودی، شرایط زمین‌ساختگاه و نوع بار استاتیکی و دینامیکی طراحی و محاسبه می‌شوند. بنابراین بررسی دقیق رفتار سازه‌ها تحت اثر این نوع بارها یک ضرورت محسوب شده و یکی از بخش‌های مهم در تحلیل این‌گونه از سازه‌ها، بررسی اثرات اندرکنش آب و سازه در پاسخ به نیروی دینامیکی می‌باشد. برای بررسی این موضوع، آب به‌عنوان یک محیط پیوسته، تراکم‌ناپذیر و غیرچرخشی فرض شده و در محیط مخزن معادلات حرکت بر اساس معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج هیدرودینامیک و شرایط مرزی مربوطه تشکیل شده که همان معادله لاپلاس می‌باشد [۲].

مخازن نگهداری مایعات تحت تحریک زلزله توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات اولیه در این خصوص با فرض دیواره صلب مخازن و در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی برای مایع صورت گرفته است. پیشگامان این مبحث جاکوبسن [۳] و هوشینز [۴] بودند که اثر فشار هیدرودینامیکی را در مخازن در معرض تحریک افقی مطالعه کردند. جاکوبسن مطالعات خود را بر روی مخازن استوانه‌ای با دیواره صلب متمرکز کرده و هاوسنر سامانه مخزن صلب استوانه‌ای و مستطیلی را به شکلی که کاربرد عملی برای مهندسان عمران داشته باشد مدل‌سازی کرده است. در مدل هاوسنر فشار مایع به دو بخش ضربه‌ای<sup>۱</sup> که ناشی از بخشی از مایع که شتابی معادل شتاب دیواره دارد و بخش انتقالی<sup>۲</sup> که از ناشی از لمبرزدن مایع حاصل می‌شود، تقسیم شده است. سپس ایستین با ارائه یک سری معادلات و جداول با فرض اینکه مؤلفه انتقالی در بخش بالایی

<sup>1</sup> Impulsive  
<sup>2</sup> convective

می‌سازد. این تجزیه و تحلیل به‌طور معمول جهت مدل‌سازی اثرات متقابل جسم جامد با یک سیال استفاده می‌شود. بنابراین در روش CEL ماده اولری می‌تواند با ماده لاگرانژی در تماس باشد، که این نوع از تماس به تماس اولری-لاگرانژی معروف است. از این‌رو این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان بسیاری از مسائل چندفازی از جمله تماس سازه با سیال را مدل‌سازی نمود. در این‌روش به‌دلیل مدل‌سازی سیال به‌صورت اولرین، مشکلات ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ ایجادشده برای سیال بر طرف شده است. در این‌روش المان‌های سیال به‌صورت ثابت در فضا در نظر گرفته شده و سیال در داخل آن به‌راحتی می‌تواند جریان یابد. همچنین سازه مخزن نیز به‌صورت فرمول‌بندی لاگرانژی تعریف می‌شود. از آنجایی که پیاده‌سازی روش اولری در نرم‌افزار آباکوس بر اساس روش حجم سیال است، در این‌روش موقعیت ماده اولری در محیط مش‌بندی با محاسبه کسر حجمی<sup>۲</sup> اولرین در هر المان مشخص می‌شود. با این تعریف اگر یک المان به‌طور کامل از یک ماده پر شود مقدار کسر حجمی اولرین آن یک و اگر خالی از ماده مورد نظر باشد کسر حجمی اولرین آن صفر است [۲۱].

## ۲-۲- ویژگی‌های سیال در آباکوس

در مسائل مربوط به تلاطم، سیال را می‌توان به‌صورت تراکم‌ناپذیر و غیرویسکوز در نظر گرفت. یک روش موثر برای مدل‌نمودن سیال در Abaqus/Explicit، استفاده از مدل برشی ویسکوز نیوتن و معادله حالت  $U_s-U_p$  خطی می‌باشد. در این‌روش توابع مدول‌بالک<sup>۳</sup> به‌عنوان پارامترهای اصلاحی برای قید تراکم‌ناپذیری سیال عمل می‌کنند. از آنجایی که تلاطم سیال درون مخزن به‌صورت آزاد و بدون محدودیت انجام می‌شود مدول بالک می‌تواند دو تا سه مرتبه کوچک‌تر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود و همچنان سیال به‌صورت تراکم‌ناپذیر رفتار کند. برای خنثی‌نمودم موده‌های برشی که باعث به هم ریختن مش می‌شود، ویسکوزیته برشی به‌صورت پارامتر اصلاحی عمل می‌کنند. به‌دلیل اینکه آب یک سیال غیر ویسکوز است، ویسکوزیته برشی برای سیال، باید کوچک در نظر گرفته شود. ویسکوزیته برشی بالا باعث ایجاد پاسخ‌های بیش از اندازه سخت می‌شود. مقدار ویسکوزیته مناسب را می‌توان بر اساس مقدار مدول بالک محاسبه نمود [۱۳].

سنجی شده است. لو و همکاران اثر انفجار بر روی یک مخزن فلزی استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینما مدل‌نموده و با نمونه آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۱۷]. نتایج این تحقیق به بررسی مد شکست، تغییر شکل، انرژی و کرنش دینامیکی ایجادشده منجر شده است. پیمان صفا در پژوهشی تحلیل غیرخطی دینامیکی بر روی مخازن زمینی با سقف شناور تحت اثر بار ناشی از انفجار با استفاده از روش عددی و برای ۳۰ حالت متفاوت بار انفجاری انجام داده است [۱۸]. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که بدنه مخازن مورد بررسی، در مقابل برخی از سناریوهای بارگذاری انفجاری آسیب پذیر بوده و بر اساس معیارهای خرابی استاندارد آئین‌نامه API650 آسیب خواهند دید. یاسری با انجام مطالعات آزمایشگاهی به ارائه رابطه‌ای جهت به‌دست آوردن توزیع فشار انفجار خارجی پیرامون مخازن تحت فشار قائم اقدام کرد [۱۹]. نتایج این تحقیق برای مخازنی که دارای ارتفاع کوچک‌تر نسبت به قطر دارند کاربرد داشته است. در مطالعه عددی وانگ و زهو بر روی مخزن آب تحت تأثیر بارگذاری انفجار نشان داده شده است که آب می‌تواند پاسخ مخزن تحت تأثیر انفجار را کاهش دهد [۲۰]. این پژوهش برای دو حالت مخزن با تکیه‌گاه ساده و محدودشده در محور سازه انجام شده و نشان داده است که برای مخزن با شرایط تکیه‌گاهی محدود در محور انرژی داخلی افزایش و کار خارجی کاهش پیدا کرده است.

تمرکز اصلی تحقیقات پیشین بر روی پدیده انفجار در مخازن فولادی با در نظر گرفتن امکان مشتعل بودن محتویات درون مخزن، عمق‌های پرشدگی آب، نسبت ارتفاع به قطر مخزن، شرایط تکیه‌گاهی و عملکرد مخزن بدون در نظر گرفتن اندرکنش مایع و بدنه مخزن پرداخته شده است. در این پژوهش بررسی رفتار و پاسخ مخازن روزمینی بتن آرمه تحت اثر انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه با استفاده از فرول کوپل اولر-لاگرانژی در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. تعیین تنش‌های ایجادشده تحت اثر انفجار خارج و فشار آب از داخل، در مقابل پارامترهای تأثیرگذار در رفتار سازه با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده برای سه مخزن با ارتفاع‌های متفاوت (۸و۴،۶ متر) و شعاع ثابت (۳ متر) از اهداف اصلی این پژوهش است.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- ترکیب فرمول اولر و لاگرانژ (CEL)

تجزیه و تحلیل کوپل اولری-لاگرانژی<sup>۱</sup> اجازه مدل‌سازی اثر متقابل قلمروهای اولری و لاگرانژی را در یک مدل فراهم

<sup>۲</sup> volume fractions

<sup>۳</sup> bulk functions

<sup>۱</sup> Coupled Euler-Lagrange

که در این رابطه  $P_H$  و  $E_H$  فشار و انرژی ویژهی هوگونوییت در واحد جرم و  $\Gamma$  ضریب گرونیسن می‌باشد. ضریب گرونیسن با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. فشار و انرژی ویژهی هوگونوییت فقط تابع چگالی می‌باشد.

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)  $\Gamma_0$  ثابت ماده و  $\rho_0$  چگالی مرجع می‌باشد. انرژی هوگونوییت  $E_H$  وابسته به فشار هوگونوییت می‌باشد و با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$E_H = \frac{P_H \eta}{2\rho_0} \quad (۵)$$

که در آن  $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$  به عنوان تابعی از تراکم جریان  $\rho$  است. و در نهایت با جایگذاری رابطه‌ی (۴) و (۵) در رابطه (۳) معادله حالت مای گرونیسن به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$P = P_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_H \quad (۶)$$

### ۲-۲-۳- فرم خطی هوگونوییت Us-Up

معادله  $P_H$  از روی پردازش اطلاعات هوگونوییت در رابطه (۷) نشان داده شده است:

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - S\eta)^2} \quad (۷)$$

که در این رابطه  $S$  و  $C_0$  یک رابطه‌ی خطی بین سرعت ضربه  $Us$  و سرعت ذره  $Up$  مطابق رابطه (۸) ایجاد می‌کند:

$$U_S = C_0 + S U_P \quad (۸)$$

که  $S$  و  $C_0$  به ترتیب شیب منحنی هوگونوییت و سرعت موج صوت در آب می‌باشد. سرعت موج صوت در آب توسط رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (۹)$$

که در این رابطه  $K$  مدول بالک سیال و  $\rho$  چگالی سیال می‌باشد.

با توجه به روابط بالا فرم خطی هوگونوییت به صورت رابطه (۱۰) ارائه می‌شود:

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - S\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_H \quad (۱۰)$$

مطابق راهنمای نرم افزار آباکوس مقدار  $S$ ، شیب منحنی و  $\Gamma_0$ ، ضریب گرونیسن برای آب برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. مشخصات آب درون مخزن در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

### ۲-۲-۱- معادله انرژی و منحنی هوگونوییت<sup>۱</sup>

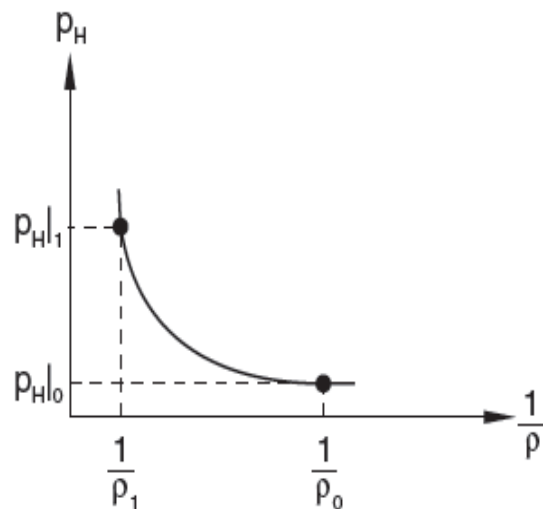
معادله انرژی در غیاب انتقال حرارت به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (P - P_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + S : \dot{\epsilon} + \rho \dot{Q} \quad (۱)$$

که در این رابطه  $P$  فشار،  $P_{bv}$  فشار ناشی از ویسکوزیته سیال،  $S$  تانسور تنش انحرافی،  $\dot{\epsilon}$  بخش انحرافی نرخ کرنش،  $\dot{Q}$  نرخ گرما در واحد جرم و  $E_m$  انرژی داخلی در واحد جرم می‌باشد. معادله حالت تابعی از چگالی  $\rho$  و انرژی داخلی در واحد جرم  $E_m$  می‌باشد. رابطه (۲) می‌تواند کلیه حالت‌های تعادلی که در یک جسم وجود دارد را تعریف کند. انرژی داخلی را می‌توان برای به دست آوردن رابطه‌ی بین  $\rho$  و  $V$  یا معادل آن  $\frac{1}{\rho}$ ، از معادله بالا حذف نمود. رابطه بین  $\rho$  و  $\frac{1}{\rho}$ ، منحنی هوگونوییت نامیده می‌شود [۲۱].

$$P = f(\rho, E_m) \quad (۲)$$

شکل (۱) به طور شماتیک منحنی هوگونوییت را نشان می‌دهد که فشار هوگونوییت  $P_H$  تنها تابعی از چگالی است و این منحنی به طور کلی توسط پردازش اطلاعات تجربی ترسیم می‌شود [۲۱].



شکل (۱): منحنی هوگونوییت [۲۱]

### ۲-۲-۲- معادله حالت مای گرونیسن<sup>۲</sup>

انرژی در معادله مای گرونیسن به صورت خطی می‌باشد. فرم رایج آن در معادله (۳) ارائه شده است:

$$P - P_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (۳)$$

<sup>۱</sup> Hugoniot curve

<sup>۲</sup> Mie-Grüneisen

جانسون-کوک<sup>۱</sup> مطابق جدول (۳) استفاده شده است. با توجه به رابطه (۱۱) تنش به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما در مدل جانسون-کوک تعریف می شود [۲۳]. این ویژگی به راحتی در نرم افزار آباکوس قابل تعریف است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \log_e \varepsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (11)$$

که در این معادله  $\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد در نرخ کرنش مرجع  $\dot{\varepsilon}_0 = \frac{1}{s}$  است و  $\varepsilon$  معادل نرخ کرنش پلاستیک است و  $T^*$  دمای بدون بعد متنظر است. پارامتر A مقاومت گسیختگی اولیه فولاد در یک نرخ کرنش پلاستیکی  $\dot{\varepsilon} = \frac{1}{s}$  است و درجه حرارت ۲۹۸ کلوین می باشد. پارامترهای B و n رفتار سخت شدگی فولاد مستقل از نرخ کرنش را شبیه سازی می کنند و پارامتر C رفتار سخت شدگی وابسته به نرخ کرنش را منعکس می سازد. پارامتر m ضریب نرم شدگی حرارتی است که برای فولاد از تست های مکانیکی به دست می آید و برابر با ۰/۱۱۴ است. مشخصات مدل جانسون-کوک برای میلگرد در این پژوهش در جدول (۳) آورده شده است [۲۳].

جدول (۳): مشخصات مدل جانسون-کوک [۲۳]

مقدار	متغیر	ردیف
۳۶۰	A(Mpa)	۱
۶۳۵	B(Mpa)	۲
۱/۰۳	n	۳
۰/۱۱۴	m	۴
۱۵۰۰	Melting temperature (K)	۵
۲۹۸	Transition temperature (K)	۶
۰/۰۷۵	C	۷
۱	Epsilon dot zero	۸

### ۵- بارگذاری انفجار

در حالت کلی برای مدل سازی بارگذاری انفجار بر روی سازه ها دو نوع دیدگاه وجود دارد:

الف: بارگذاری انفجار به صورت تاریخچه فشار بر روی تمام یا قسمتی از سازه بدون در نظر گرفتن تأثیر تغییر شکل های سازه بر توزیع فشار اعمال می گردد.

ب: بارگذاری با مدل سازی کامل محیط سازه و سیال به صورت کوپل کامل مد نظر قرار می گیرد.

جدول (۱): مشخصات آب درون مخزن [۱۲]

مقدار	متغیر	ردیف
۱۰۰۰	چگالی ( $kg/m^3$ )	۱
۰/۰۰۱	ویسکوزیته ( $N.s/m^2$ )	۲
۱۴۵۰	سرعت صوت در آب ( $m/s$ )	۳
۰	شیب منحنی	۴

### ۳- بتن

بتن از جمله موادی است که سطح گسیختگی حاکم بر آن وابسته به فشار هیدرواستاتیک می باشد. معیارهای متفاوتی در مورد بتن مطرح شده، که یکی از این معیارها معیار تسلیم آسیب های پلاستیکی بتن است که وابسته به فشار هیدرواستاتیکی در مدل سازی بتن می باشد. جهت پیش بینی رفتار غیرخطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت آن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک استفاده می شود. که در آن رفتار فشاری و کششی بتن و همچنین دو پارامتر خسارت فشاری و خسارت کششی در نظر گرفته می شود. این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می کند. مشخصات الاستیک و پلاستیک بتن تعریف شده در این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات الاستیک و پلاستیک بتن [۲۲]

مقدار	مشخصه	ردیف
۳۱	زاویه اتساع (درجه)	۱
۰/۱	گریز از مرکز	۲
۱/۱۶	$f_{b0}/f_{c0}$	۳
۰/۶۶۶	K	۴
۰/۰۰۰۱	ویسکوزیته ( $n.s/m^2$ )	۵
۲۴۵۰	چگالی ( $kg/m^3$ )	۶
۲۳۵۵۸	مدول یانگ ( $n/m^2$ )	۷
۰/۲	ضریب پواسون	۸

### ۴- میلگرد

از فولاد برای مدل کردن مسلح کننده ها در بتن استفاده می شود. با توجه به اینکه بارهای انفجاری معمولاً نرخ کرنش های بسیار بالا در محدوده  $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$  را ایجاد می کنند، از این رو این نرخ کرنش بسیار بالا، خواص مکانیکی مصالح در سازه و مکانیسم های مورد انتظار را تغییر می دهد. به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش برای خواص پلاستیکی فولاد از مدل سخت شونده

<sup>1</sup> Johnson-cook hardening

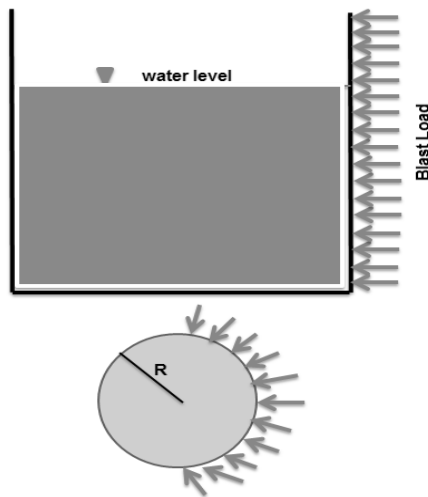
یکی از روش‌های بارگذاری انفجار در نرم‌افزار آباکوس روش کانوپ<sup>۱</sup> است که در این روش بار انفجار به صورت مقدار مشخصی از تی‌ان‌تی در فاصله معینی از سازه اعمال می‌شود. مدل کانوپ را می‌توان به طور خلاصه با استفاده از نمودار فشار-زمان مربوط به انفجار آزاد که توسط معادله اصلاح‌شده فریدلندر توصیف می‌شود که به صورت رابطه (۱۳) بیان شده است تعریف نمود [۱۲].

$$P(t) = P_1(t) \\ \text{if: } \cos\theta < 0$$

$$P(t) = P_1(t)(1 + \cos\theta - 2\cos^2\theta + P_r(t)\cos^2\theta) \\ \text{if: } \cos\theta \geq 0 \quad (13)$$

که در رابطه بالا شدت موج فشاری کلی اعمال شده بر سازه مجاور در زمان  $t$ ، فشار فاز مثبت برخوردی در زمان  $t$ ،  $P_1(t)$  فشار بازتابی در زمان  $t$  و  $\theta$  زاویه بین بردار نرمال سطح جسم با برداری که سطح برخورد را به محل انفجار وصل می‌کند، می‌باشد [۱۲].

لحظه رسیدن فشار انفجار به دیواره مخزن در شکل (۳) نمایش داده شده است. افزایش میزان فشار وارده به سازه رابطه مستقیمی با فاصله و میزان مواد منفجره دارد.



شکل (۳): بارگذاری انفجار بر روی دیواره مخزن [۱۲]

### ۶- بررسی یافته‌های پژوهش

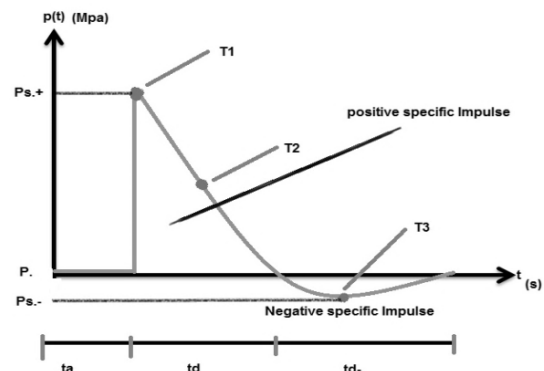
در پژوهش حاضر پایداری مخازن استوانه‌ای روزمینی بتن آر مه تحت اثر انفجار، با توجه به حالات مختلف از جمله نسبت ارتفاع به شعاع، میزان درصد پرشدگی آب داخل مخزن و فواصل انفجاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بررسی

روش دوم در صورت اجرای دقیق، به نتایج بسیار دقیق‌تر از روش اول خواهد انجامید. ولی دارای پیچیدگی‌های زیاد بوده و زمان تحلیل بسیار طولانی‌تر خواهد بود. مدل‌سازی به روش اول در نرم‌افزارهای معمولی اجزاء محدود قابل انجام است، ولی در مورد روش دوم بسیاری از نرم‌افزارهای موجود توانایی چنین تحلیلی را ندارند و یا در صورت داشتن چنین قابلیت‌هایی انجام تنظیمات آن وقت‌گیر و پیچیده خواهد بود. بسیاری از بارگذاری‌های انفجاری را می‌توان با تقریب خوبی حاصل از انفجار یک خرج کروی دانست.

بار انفجار بر روی مخازن بتنی با استفاده از منحنی تاریخچه فشار-زمان اعمال می‌شود. شکل (۲) منحنی فشار-زمان موج انفجار در محیط آزاد را نشان می‌دهد. این منحنی به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود که اغلب در تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار می‌باشد که فاز منفی به دلیل ناچیز بودن فشار انفجار (مکش) از اهمیت کمتری برخوردار است. افزایش سریع فشار، فاز مثبت یا فاز اضافه فشار نامیده می‌شود، در این فاز حداکثر فشار ( $p_{s_0}^+$ ) به سرعت بعد از زمان رسیدن فشار انفجار به سازه ( $t_a$ ) تشکیل شده و در زمان ماندگاری ( $t_d$ ) به فشار اتمسفر ( $p_0$ ) باز می‌گردد. در فاز منفی نیز در زمان ماندگاری ( $t_d^-$ ) فشار در ابتدا کاهش و پس از آن افزایش یافته و به فشار اتمسفر ( $p_0$ ) باز می‌گردد. منحنی فشار-زمان شکل (۲) با استفاده از معادله اصلاح‌شده فریدلندر به صورت رابطه (۱۲) توصیف می‌شود [۱۲].

$$P(t) = p_{s_0}^+ \left(1 - \frac{t}{t_d^+}\right)^{\frac{-b(t-t_a)}{t_d^+}} \quad (12)$$

که در این رابطه  $P(t)$  نشان‌دهنده شدت بار انفجاری برخوردی به مخزن می‌باشد و  $p_{s_0}^+$  مقدار اوج فشار انفجاری بر حسب MPa است،  $t_a$  زمان ورود موج انفجار بر حسب ثانیه است،  $t_d^+$  طول زمان فشار مثبت بر حسب ثانیه است و  $b$  یک مقدار بی‌بعد است که میزان افت فشار را کنترل می‌کند [۱۲].

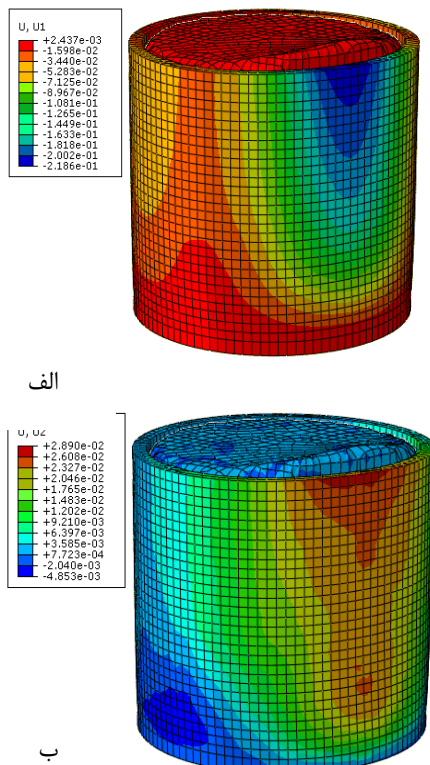


شکل (۲): فشار-زمان برای امواج انفجاری در هوا [۱۲]

<sup>1</sup> conwep

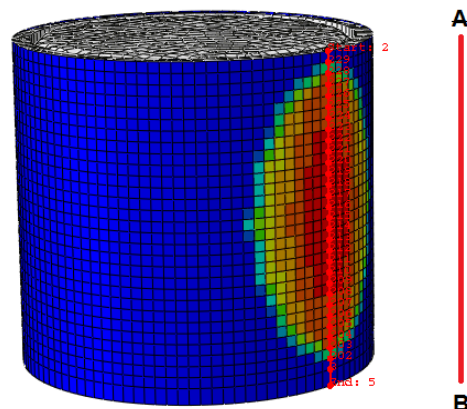


تغییر مکان افقی را ۲۱ سانتی‌متر و بیشینه تغییر مکان قائم را ۲ سانتی‌متر نشان می‌دهند. هر کدام از نمودارهای شکل (۶) نشان می‌دهد که وجود آب در مخازنی که در معرض امواج انفجار قرار دارند بر روی تغییر مکان‌های بدنه مخازن تأثیر بسزایی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار امواج انفجار دیواره مخزن را به داخل تحریک می‌کند و فشار آب از داخل به بیرون در برابر این تحریک انفجاری مقابله می‌کند. در این نمودارها قابل مشاهده است که هرچه ارتفاع آب درون مخزن بیشتر باشد میزان تغییر مکان دیواره مخزن به داخل کمتر است. با توجه به اینکه امواج انفجار به وسط ارتفاع مخزن اصابت می‌کند، لذا تغییر مکان مخزن از این نقطه ارتفاعی مورد تحلیل قرار گرفته شده است. اگر نمودار الف در شکل (۸) را مد نظر قرار دهیم، به‌وضوح مشاهده می‌شود که در ارتفاع ۲ متری مخزن (محل اصابت امواج انفجار) تغییر مکان‌هایی به داخل ایجاد شده است، که این تغییر مکان‌ها به سمت بالا افزایش و به سمت پایه مخزن کاهش پیدا می‌کنند. مخزن خالی بیشترین تغییر مکان را نسبت به مخزن دیگر دارد که نسبت این تغییر مکان در ارتفاع ۲ متری مخزن به شعاع آن برابر ۰/۱۶ می‌باشد. همچنین این نسبت برای مخازن ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرشدگی از آب به ترتیب برابر با ۰/۱۵، ۰/۱۱، ۰/۰۷ و ۰/۰۵ بدست آمده است. این نسبت در لبه مخزن بیشتر شده و در پایه مخزن همگی یکسان و به صفر ختم می‌شوند.



شکل (۵): (الف) کانتور تغییر مکان افقی بدنه مخزن (ب) دانتور تغییر مکان قائم بدنه مخزن

تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در بدنه مخازن، تغییرات صورت گرفته بر روی یک مسیر انتخابی بر روی دیواره مخزن در نظر گرفته شده است. این مسیر که در شکل (۴) نشان داده شده است، در وجه روبه روی نقطه انفجار قرار دارد و از نقطه A شروع شده و در نقطه B پایان می‌یابد. در واقع در مسیر ارتفاعی مخزن هر گره دارای تنش و کرنشی مجزا می‌باشد که آباکوس آنها را در مسیر ثبت می‌کند و به فرم نمودار نمایش می‌دهد. محور قائم این نمودارها نشان‌دهنده تنش یا کرنش به وجود آمده در دیواره مخزن و محور افقی آن‌ها ارتفاع مخزن را نمایش می‌دهد.



شکل (۴): مسیر AB روی دیواره روبه انفجار مخزن

### ۱-۶- بررسی تغییر مکان ایجاد شده دیواره مخزن

با توجه به اینکه، امواج انفجار به روش کانوپ، مستقیم به وسط بدنه مخزن از لحاظ بعد ارتفاعی وارد می‌شوند، لذا پس از بارگذاری انفجار، امواج به بالا و پایین مخزن منتشر می‌شوند. شکل (۴) نمایانگر مسیره‌های انتخابی بر روی دیواره در مقابل انفجار می‌باشند که از بالاترین گره دیواره مخزن به کف مخزن انتخاب شده‌اند. گره المان‌های دیواره مخزن که مستقیماً تحت اثر انفجار قرار دارند را گام زده و گام‌بندی به‌صورت گره به گره می‌باشد، این گره‌ها پس از انفجار دارای تغییر مکان‌هایی به‌صورت فشاری به درون مخزن هستند. نمودارها از روی ارتفاع آب درون مخزن و ابعاد مخزن مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند.

### ۱-۶-۱- بررسی تغییر مکان<sup>۱</sup> مخازن بر اساس درصد پرشدگی از آب

در این بخش تأثیر درصد پرشدگی آب داخل مخزن بر روی تغییر مکان‌های دیواره بر اثر امواج انفجاری بررسی شده است. شکل (۵) کانتور تغییر مکان‌های افقی و قائم مخزن را تحت اثر بارهای انفجاری نمایش می‌دهد، که بیشترین تغییر مکان‌ها در بالاترین نقطه ارتفاعی مخزن مشاهده شده است. کانتورها بیشینه

<sup>1</sup> Displacement

ارتفاع مخزن باعث ناپایداری آن در برابر بارهای انفجاری می‌باشد. نسبت ارتفاع به شعاع مخزن از وسط ارتفاع مخزن تا پایه آن تأثیر ناچیزی در نسبت تغییر مکان به شعاع مخزن دارد، ولی این نسبت از وسط ارتفاع بدنه تا پایه مخزن بر روی نسبت تغییر مکان به شعاع مخزن تغییرات متفاوتی دیده شده است. بیشترین نسبت تغییر مکان به شعاع بدنه مخزن  $(\frac{H}{R} = \frac{4}{3})$ ، در لبه بالایی مخزن رخ داده است ولی در مخازن  $(\frac{H}{R} = \frac{6}{3})$  و  $(\frac{H}{R} = \frac{8}{3})$ ، بیشترین نسبت تغییر مکان به شعاع در وسط ارتفاع بدنه ایجاد شده است.

### ۲-۶- بررسی تنش‌های حلقوی ایجاد شده در بدنه مخزن

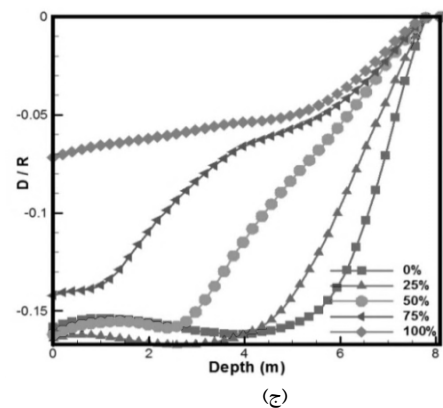
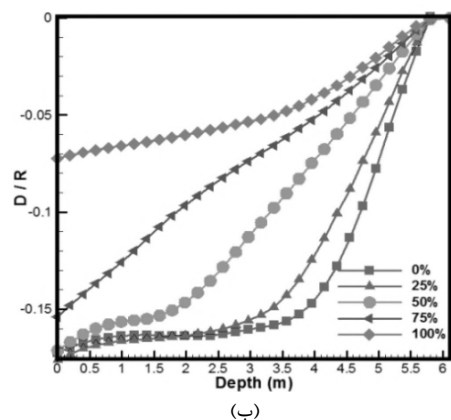
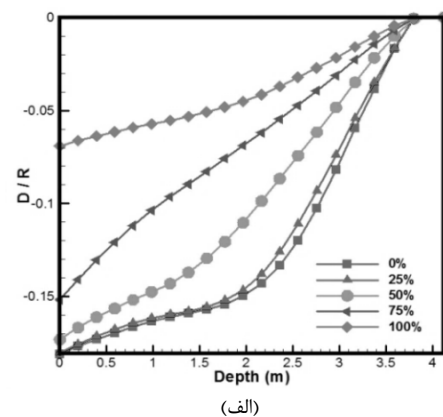
برای مشاهده نمودارهای مربوط به تنش حلقوی دیواره مخزن یک مسیر در کنار دیواره مخزن (مسیر AB در شکل ۶) که با فشار انفجار مواجه است انتخاب شده است. تنش‌های حلقوی مربوط به این قسمت از مخزن از روی گره‌های انتخابی با استفاده از شکل‌های (۷) تا (۱۲) نمایش داده شده است. در این نمودارها محور افقی نشان‌دهنده عمق مخزن و محور قائم نشان‌دهنده تنش‌های حلقوی می‌باشد. در این نمودارها با سه متغیر مواجهه هستیم (الف) درصد پرشدگی آب در مخزن (خالی، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪)، (ب) فاصله انفجار (۵ و ۱۰ متر) و (ج) ارتفاع مخزن (۴، ۶ و ۸ متر). مسیر انتخابی جهت نمایش تنش‌های حلقوی، از بالا به پایین مخزن روبروی بار انفجار انتخاب شده است. محل ارسال امواج انفجار وسط بدنه مخزن می‌باشد.

### ۲-۶-۱- بررسی تنش‌های حلقوی بر اساس درصد پرشدگی آب

با توجه به اینکه در هنگام انفجار، مخزن از طرف بیرون تحت موج فشاری ناشی از انفجار و از داخل تحت فشار ناشی از آب قرار می‌گیرد، به همین دلیل سیال درون مخزن طبق تئوری هاوسنر به دو بخش جرم سخت و موج تقسیم‌بندی می‌شود [۴]. عامل اصلی ایجاد تنش‌های حلقوی بخش موج آب می‌باشد. با توجه به اینکه در حالت ۱۰۰ درصد پرشدگی، بخش موج درصد بیشتری از کل آب را شامل می‌شود در نتیجه تنش‌های حلقوی ناشی از آن بیشتر نمایان می‌شود. از نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که بیشترین تنش حلقوی در حالت ۱۰۰ درصد پر شده از آب اتفاق می‌افتد. و با کاهش درصد پرشدگی از ۷۵ به ۵۰ و ۲۵ و خالی این تنش‌ها کاهش می‌یابند. نمودارها نشان می‌دهند که وجود آب در مخازن می‌تواند بر روی میزان تنش‌های حلقوی تأثیرگذار باشد.

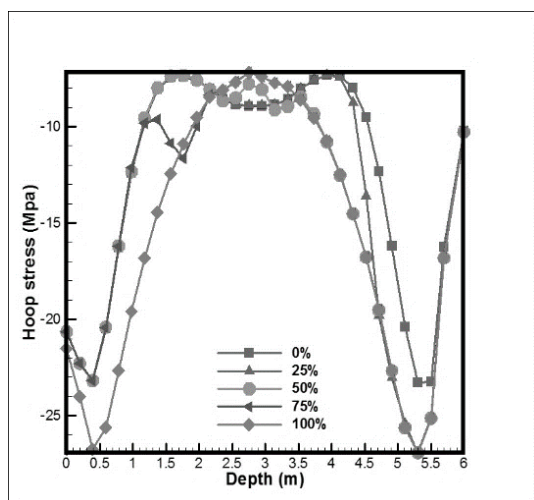
### ۲-۱-۶- بررسی تغییر مکان مخازن بر اساس نسبت $\frac{H}{R}$

در این بخش به تأثیر نسبت ارتفاع به شعاع مخزن بر روی نسبت تغییر مکان بدنه به شعاع مخزن پرداخته شده است. در نمودارهای (الف) تا (ج) در شکل (۶) مشاهده می‌شود که مخازن با نسبت ارتفاع به شعاع بیشتر، نسبت تغییر مکان به شعاع بزرگ‌تری دارند. مخزن  $(\frac{H}{R} = \frac{4}{3})$ ، نسبت به مخازن  $(\frac{H}{R} = \frac{6}{3})$  و  $(\frac{H}{R} = \frac{8}{3})$ ، نسبت تغییر مکان به شعاع کمتری را در وسط بدنه دارد.

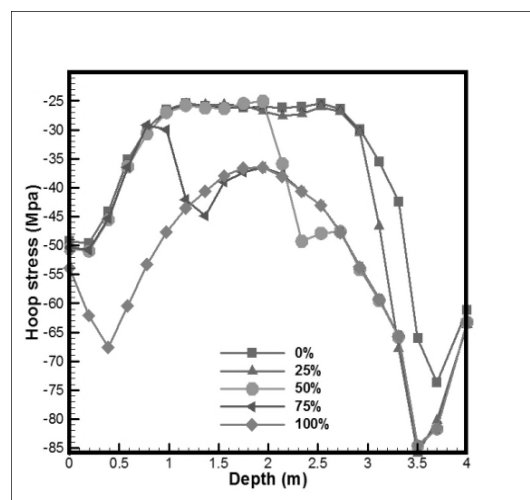


شکل (۶): نسبت تغییر مکان بدنه به شعاع مخزن با توجه به عمق مخزن (الف)  $(\frac{H}{R} = \frac{4}{3})$  (ب)  $(\frac{H}{R} = \frac{6}{3})$  (ج)  $(\frac{H}{R} = \frac{8}{3})$

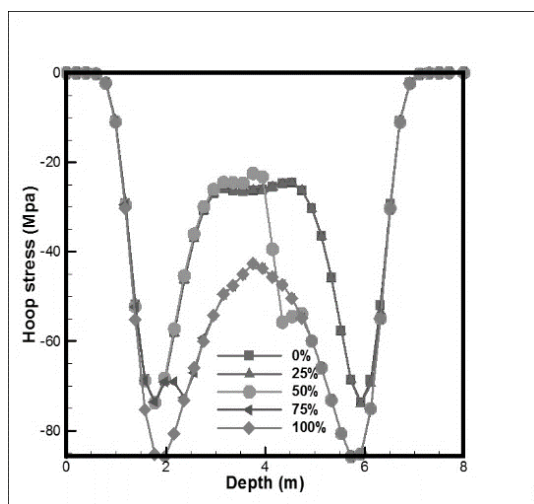




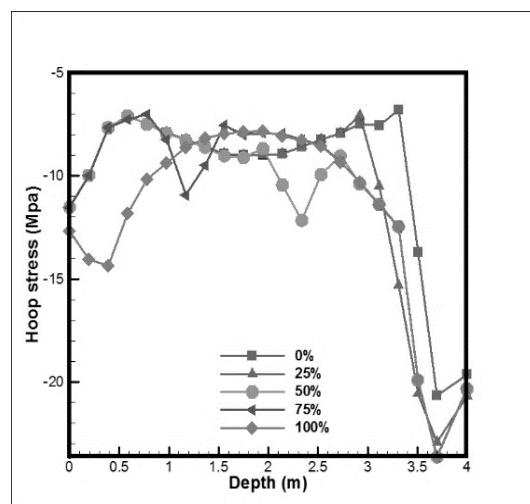
شکل (۱۰): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$ ) با فاصله انفجار ۱۰ متری



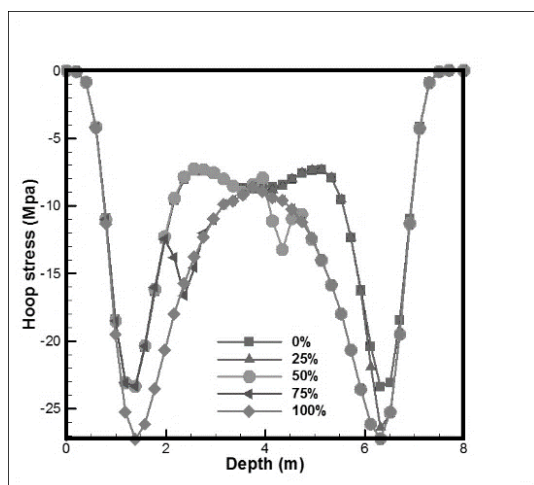
شکل (۷): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$ ) با فاصله انفجار ۵ متری



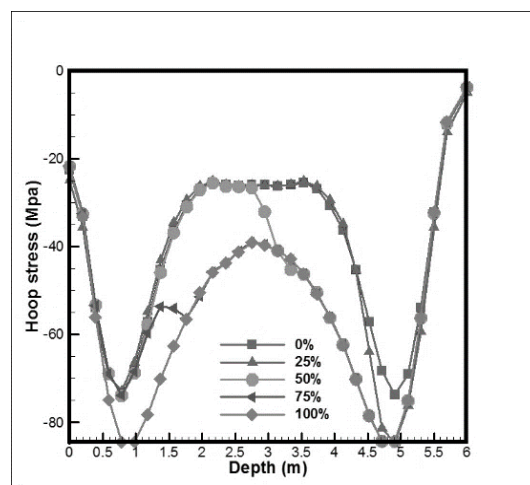
شکل (۱۱): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ ) با فاصله انفجار ۵ متری



شکل (۸): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$ ) با فاصله انفجار ۱۰ متری

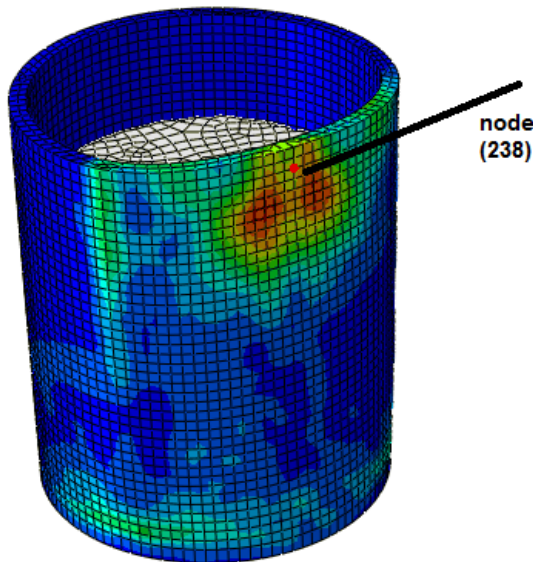


شکل (۱۲): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ ) با فاصله انفجار ۱۰ متری

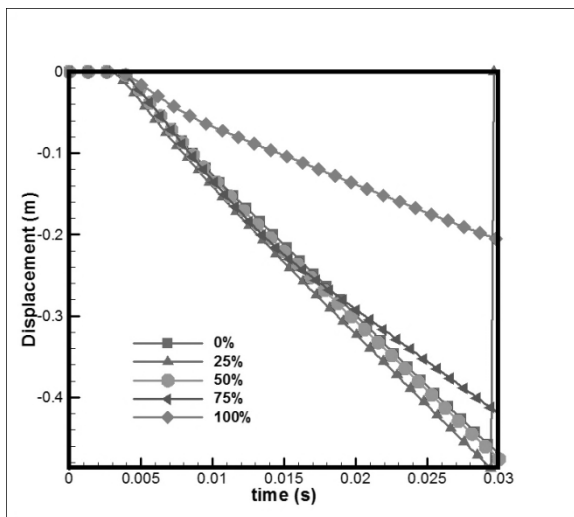


شکل (۹): تنش‌های حلقوی ( $\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$ ) با فاصله انفجار ۵ متری

می‌توان مشاهده کرد که مخازن خالی، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از آب، به دلیل وجود ارتفاع آزاد و نبود نیروهای هیدرودینامیکی بیشترین فرورفتگی و تقریباً یکسانی دارند. اما مخزن با ۱۰۰ درصد پرشدگی، وجود نیروی هیدرودینامیکی آب مانع از فرورفتگی گره به داخل مخزن شده است.



شکل (۱۳): نمایش گره ۲۳۸ روی مخزن



شکل (۱۴): مقایسه تغییر مکان گره شماره ۲۳۸ مخزن ( $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ )

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پاسخ‌های دینامیکی مخازن بتن مسلح ذخیره آب تحت بار انفجاری معین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای میزان پرشدگی آب، نسبت ارتفاع به شعاع مخزن و فاصله از مرکز انفجار بر روی پاسخ دینامیکی سازه مخزن تأثیرگذار می‌باشند، به طوری که تغییر مکان‌های افقی با کاهش

#### ۶-۲-۲- بررسی تنش‌های حلقوی بر اساس فاصله مواد منفجره از مخزن

در لحظه انفجار، ضربه شدیدی در پشت دیواره مخزن وارد می‌شود در نتیجه، دیوار مخزن به سمت داخل جابجا می‌شود و در بالای آن دچار آسیب دیدگی می‌شود. تنش حلقوی تحت فشار انفجار در رأس مخزن و بخش فوقانی مخزن حداکثر مقدار را دارد. از روی نمودارهای اشکال (۷) تا (۱۲) قابل مشاهده است که وقتی فاصله انفجار از ۵ متر به ۱۰ متر تغییر می‌کند، تنش‌های حلقوی به صورت میانگین برای تمام مخازن حدود ۸۷/۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.

#### ۶-۲-۳- بررسی تنش‌های حلقوی بر اساس نسبت ( $\frac{H}{R}$ )

با توجه به شکل‌های (۷) تا (۱۲) می‌توان تأثیر نسبت  $\frac{H}{R}$  را روی تنش‌های حلقوی بدنه مخازن مشاهده کرد. این نسبت در وسط بدنه مخزن که در معرض مستقیم امواج انفجار قرار دارد بی‌تأثیر است و هیچ‌گونه تغییری در تنش‌ها ایجاد نمی‌کند. ولی با توجه به انتشار امواج انفجار بر روی بدنه و حرکت این امواج به بخش فوقانی و تحتانی مخزن از قدرت آن‌ها کم می‌شود و تنش‌های حلقوی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه بار انفجار به وسط بدنه مخزن برخورد می‌کند، لذا مخازنی که دارای نسبت  $\frac{H}{R}$  بیشتری باشند قسمت‌های فوقانی و تحتانی آن‌ها کمترین تنش حلقوی را دارا می‌باشند. از روی نمودارها قابل مشاهده است که تنش‌های حلقوی در وسط ارتفاع بدنه تمام مخازن یکسان است و فقط قسمت‌های فوقانی و تحتانی آن‌ها تغییر می‌کند به طوری که مخزن با نسبت  $\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$  دارای تنش حلقوی فوقانی ۵۵ مگاپاسکال، مخزن با نسبت  $\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$  دارای تنش حلقوی فوقانی ۲۲ مگاپاسکال و مخزن با نسبت  $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$  دارای تنش حلقوی فوقانی صفر مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۶-۳- بررسی تغییر مکان گره ۲۳۸ مخزن

در مخزنی که نسبت ارتفاع به شعاع ( $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ ) دارد یک گره در روبروی امواج انفجار انتخاب شده است. گره مورد نظر گره شماره ۲۳۸ نشان داده شده در شکل (۱۳) می‌باشد. تغییرات تغییر مکان این گره نسبت به زمان در نمودار شکل (۱۴) نشان داده شده است. این نمودار تأثیر مستقیم نیروهای هیدرودینامیکی در افزایش یا کاهش تغییر مکان بدنه مخزن را ارائه می‌دهد. در نمودار شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که گره شماره ۲۳۸ بر اثر انفجار به داخل مخزن تغییر مکان پیدا کرده است. این تغییر مکان در مخزن خالی بیشتر از مخازن دارای سیال بوده است. از آن جهت که گره در بالاترین ارتفاع مخزن انتخاب شده است،

<sup>1</sup> Node

- [3] L. M. Hoskins and L. S. Jacobsen, "Water pressure in a tank caused by simulated earthquake," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 24, pp. 1-32, 1934.
- [4] G. W. Housner, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers," *Bulletin of the seismological society of America*, pp. 1-32, 1957.
- [5] H. I. Epstin, "Seismic design of liquid storage tanks," *J. Struct. Division - ASCE*, vol. 102, pp. 1673-1659, 1976.
- [6] M. A. Haroun, "Dynamic analyses of liquid storage tanks," *EERL*, pp. 80-104, 1980.
- [7] A. S. Veletsos, "Seismic response and design of liquid storage tanks," *Guidelines for the seismic*, 1984.
- [8] US Department of Army, the Navy and Air Force, "The design of structures to resist the effects of accidental explosions," TM-5-1300. Washington DC: NAVFAV P-397, pp. 559-920, 1990.
- [9] L. R. Stein, R. A. Gentry, and C. W. Hirt, "Computational simulation of transient blast loading on three-dimensional structures," *Comput. Methods Appl.*, vol. 11, pp. 57-74, 1977.
- [10] M. R. Bmbach, "Design of metal hollow section tubular columns subjected to transverse blast loads," *Thin-Walled Struct.*, pp. 68-105, 2013.
- [11] Y. Wang, J. Y. R. Liew, and S. C. Lee, "Structural performance of water tank under static and dynamic pressure loading," *Int J Impact Eng*, vol. 85, pp. 110-123, 2015.
- [12] V. Mittal, T. Chakraborty, and V. Matsagar, "Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation," *Thin Walled Struct.*, vol. 84, pp. 91-111, 2014.
- [13] J. Li, H. Hao, Y. Shi, Q. Fang, Z. Li, and L. Chen, "Experimental and computational fluid dynamics study of separation gap effect on gas explosion mitigation for methane storage tanks," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 55, pp. 359-380, 2018.
- [14] J. Li and H. Hao, "Far-field pressure prediction of a vented gas explosion from storage tanks by using new CFD simulation guidance," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 119, pp. 360-378, 2018.
- [15] R. L. Zhang, J. J. Jia, H. F. Wang, and Y. H. Guan, "Shock response analysis of a large LNG storage tank under blast loads," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 9, pp. 3419-3429, 2018.
- [16] K. Hu and Y. Zhao, "Numerical simulation of internal gaseous explosion loading in large-scale cylindrical tanks with fixed roof," *Thin-Walled Structures*, vol. 105, pp. 16-28, 2016.
- [17] L. Shengzhuo, W. Wang, C. Weidong, M. Jingxin, S. Yaqin, and X. Chunlong, "Behaviors of thin-walled cylindrical shell storage tank under blast impacts," *shock and vibration*, 2019.
- میزان درصد پرشدگی آب و افزایش ارتفاع مخازن افزایش می‌یابد و همچنین تنش‌های حلقوی با افزایش میزان آب، کاهش فاصله مواد انفجاری و کاهش ارتفاع مخازن افزایش پیدا می‌کند. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشند.
- ✓ وجود سیال در مخزن به دلیل افزایش سختی و در نتیجه سختی مخزن، موجب کاهش تغییر مکان‌های افقی به داخل مخزن می‌شود. که این تغییر مکان در مخزن کاملاً پر نسبت به مخزن خالی ۳۱/۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.
- ✓ در مخازنی که نسبت ارتفاع به شعاع بیشتری دارند می‌توان حساسیت پایداری آنها را احساس کرد. در این مخازن، با افزایش درصد پرشدگی آب و در نتیجه افزایش سختی مخزن می‌توان ناپایداری آن را کنترل نمود.
- ✓ بیشترین کرنش‌های ایجاد شده در بالای سطح آب ظاهر شده، لذا مخازن دارای آب می‌توانند با استفاده از تأثیر نیروهای هیدرو دینامیکی مانع پیشروی بدنه به داخل شوند.
- ✓ تنش‌های حلقوی بدنه مخزن تحت تأثیر امواج انفجار از خارج و فشار آب از داخل قرار دارد. وجود آب در مخازن به طور متوسط حدود ۲۰ مگاپاسکال تنش‌های حلقوی را تشدید می‌کند.
- ✓ با افزایش ارتفاع مخازن تنش‌های حلقوی در قسمت‌های فوقانی و تحتانی به سمت صفر میل می‌کنند.
- ✓ با توجه به اینکه بیشترین آسیب‌های فشاری ناشی از امواج انفجار در نواحی بدون سیال دیده شده است، لازم است در این نواحی تمهیدات مقاوم‌سازی در نظر گرفته شود.
- ✓ G. Hsin Lai, Ch. Chen, B. Chiang Jeng, and W. Chao, "Antbased IP traceback," *Expert Systems with Applications*, vol. 34, pp. 3071-3080, 2008.

## ۸- مراجع

- [1] Criteria for design and calculation of groundwater tank, Journal No. 123, Office of Technical Affairs and Criteria Development Management and Planning Organization, 2013. (In Persian).
- [2] B. Munson, D. Young, and T. Okiishi, "Fluid Mechanics, Wiley, 2016.

- [21] Abaqus/Explicit User's Manual, Version 2017, Dassault Systems Simulia Corporation, Providence, Rhode Island, USA, 2017.
- [22] A. Hafez, "Seismic response of ground-supported circular concrete tanks," Ph.D. Thesis, Graduate School of Ryerson University, 2012.
- [23] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperature and pressures," Int. J. Fract. Mech., vol. 21, pp. 31-48.
- [18] P. Safa, "Investigation of explosion effect on the ground tank with floating roof, shock and vibration," Passive Defense, vol. 1, pp. 13-24, 2015. (In Persian)
- [19] S. Yasseri, "Blast pressure distribution around large storage tanks, Blast information Group," vol. 67, pp. 133-134, 2015.
- [20] W. Yonghui and Z. Hongyuan, "Numerical study of water tank under blast loading," Thin-Walled Structures, vol. 90, pp. 42-48, 2015.

## **Dynamic Analysis of RC Water Tanks under Explosion with the Consideration of Water-Structure Interaction**

M. Moghadam, S.V. Razavi Tosee\*, M. Shahrbanouzadeh

### **Abstract**

The issue of passive defense has become very important due to the increasing number of terrorist attacks around the world and the possibility of targeting various structures. Water storage tanks are such targeted structures which are very vulnerable to explosions and the destruction of this type of structure may cause unrecoverable losses in terms of humanistic, economical, and environmental parameters. The purpose of this study is to investigate the effect of explosions on cyclic stresses and the displacement created on the body of a cylindrical reinforced concrete tank with water content due to hydrodynamic forces by considering the amount of water filling and the dimensions of the tanks. Also, according to the distances of 5 and 10 meters from the center of the explosion, the cyclic stresses created in the body of the tanks are investigated. For this purpose, Abacus commercial software has been used to numerically simulate three tanks with the heights of 4, 6, and 8 meters and a fixed radius of 3 meters with a filling percentage of 0, 25, 50, 75, and 100 percent of water. The results show that with increasing the percentage of water filling, the hardness of the tank has increased and has caused the displacement of the body to have a decrease of 31.25% for a fully filled tank compared to an empty tank. Water filling also reduces the sensitivity of tanks to instability. The results show that the cyclic stresses of the tank body are affected by blast waves from the outside and water pressure from the inside so that the presence of water in the tank has caused the cyclic stresses in the body to increase by about 20 MPa.

**Key Words:** *Dynamic Response, Water Tanks, Explosion Loading, Hydrodynamic Force, Water-Structure*

---

\* Assistant Professor, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Tehran, Iran, (vrazavi@jsu.ac.ir)- Writer-in-Charge