

بررسی تنش های حلقوی مخازن بتن مسلح ذخیره سیال تحت اثر انفجار با در نظر

گرفتن حرکات سطحی مایع

چکیده

یکی از اجزای اصلی شبکه های آبرسانی مخازن ذخیره سیال می باشد که جهت ذخیره، نگهداری و تامین فشار مورد نیاز به کار برده میشوند. از این رو لازم است در مواقع حملات تروریستی و هدف قرار دادن این سامانه های حیاتی، مبحث پدافند غیر عامل را در مورد این نوع از سازه ها به کار برد. مخازن آب در برابر انفجار بسیار آسیب پذیر بوده و در نتیجه یکی از مسائلی که در تحلیل و طراحی اینگونه از سازه ها از اهمیت زیادی برخوردار است مساله اندرکنش سیال و سازه است. هدف از این پژوهش، بررسی تنش های حلقوی دیواره مخازن بر اثر امواج انفجار و حرکات سطحی سیال و همچنین فشار سطح آب بر اثر اندرکنش سازه به آب می باشد. به منظور رسیدن به اهداف فوق، از نرم افزار تجاری آباکوس برای شبیه سازی عددی مخازن بتن مسلح استوانه ای روزمینی ذخیره آب تحت اثر انفجار با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش آب و سازه استفاده شده است. که برای این شبیه سازی از سه مخزن با ارتفاع های ۴، ۶ و ۸ متری و شعاع ثابت ۳ متر استفاده شده که هر کدام با درصد خالی، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از عمق مخزن با آب پر شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که پارامترهای فوق بر روی پاسخ دینامیکی سازه مخزن تاثیر گذار می باشند، به طوری که فشار سطح آب در مخازن با پرشدگی ۵۰ درصد از آب بیشتر است. همچنین تنش های حلقوی با افزایش میزان آب، کاهش فاصله مواد انفجاری و کاهش ارتفاع مخازن افزایش پیدا می کند و نیروهای هیدرودینامیکی در فواصل نزدیک انفجار بیشتر نمود پیدا می کنند.

کلیدواژه ها: پاسخ دینامیکی، مخازن آب، بارگذاری انفجار، حرکات سطحی سیال، اندرکنش آب و سازه

۱- مقدمه

مخازن، یکی از اجزای مهم سامانه های آبرسانی می باشند که باید به گونه ای طراحی گردند تا علاوه بر جبران تغییرات تقاضای آب، کاهش نوسانات فشار آب در شبکه های توزیع، ذخیره و فراهم نمودن آب مورد نیاز اطفای حریق و استمرار آبرسانی و توزیع آن در هنگام قطع برق و حوادث احتمالی، از آلودگی آب نیز جلوگیری نمایند. طراحی شایسته، انتخاب مناسب مصالح، ساخت و نگهداری مخازنی که برای ذخیره سازی آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می گیرند از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به رشد جمعیت، توسعه شهرها و بالا رفتن سطح زندگی شهروندان، هر ساله در نقاط مختلف کشور مخازن متعددی برای پاسخگویی به نیازهای آبرسانی ساخته میشود. بنابراین، لازم است طرح و محاسبه این مخازن هماهنگ بوده و بر اساس آخرین استانداردهای ملی و جهانی انجام شود تا از کارآمدی این تاسیسات زیربنایی اطمینان کامل حاصل شود [۱]. امروزه با توجه به گسترش حملات تروریستی و انفجار ناشی از مواد منفجره حجیم و متمرکز وارده بر سازه ها، بررسی دقیق رفتار سازه ها تحت اثر این نوع بارها یک ضرورت محسوب می شود. با توجه به اهمیت اثر بارهای انفجار بر روی سازه مخزن با در نظر گرفتن اثر ویژه نیروی تلاطمی آب و تاثیر گذار بودن اندرکنش آب و سازه بر تنش های ایجاد شده در سازه بر آن شدیم که در این پژوهش

میزان مقاومت مخازن را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه در صورت وقوع و اعمال بارگذاری انفجار بررسی نماییم. در واقع بررسی اندرکنش آب و سازه یکی از بخشهای مهم در تحلیل سازه های درگیر با آب در پاسخ به نیروی دینامیکی می باشد. برای بررسی این موضوع آب به عنوان یک محیط پیوسته، تراکم ناپذیر و غیرچرخشی فرض میگردد و در محیط مخزن معادلات حرکت براساس معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج هیدرودینامیک و شرایط مرزی مربوطه تشکیل می شود که همان معادله لاپلاس می باشد [۲].

مخازن نگهداری مایعات تحت تحریک زلزله توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته اند. اولین مطالعات با فرض دیواره صلب روی مخازن انجام شد که در دو حالت رفتار خطی و غیر خطی برای مایع صورت گرفت. پیشگامان این مبحث هوشینز و جاکوبسن (۱۹۳۴) بودند که اثر فشار هیدرودینامیکی را در مخازن مستطیلی در معرض تحریک افقی مطالعه کردند. جاکوبسن (۱۹۳۴) مطالعات خود را بر روی مخازن استوانه ای با دیواره صلب متمرکز کرد [۳]. هاوسنر (۱۹۵۷) سیستم مخزن صلب استوانه ای و مستطیلی را به شکلی که کاربرد عملی برای مهندسی عمران داشته باشد مدلسازی کرد که بعدها توسط بویر (۱۹۶۴) اصلاحاتی روی آن انجام شد. در این مدل فشار مایع به

دو بخش ضربه‌ای که از حرکت قسمتی از مایع که شتابی معادل شتاب دیواره دارد و بخش انتقالی که از حرکت لمبزدن مایع حاصل می‌شود، تقسیم شده است [۴]. ایستین (۱۹۷۶) با ارائه یک سری معادلات و جداول با فرض اینکه مولفه انتقالی در بخش بالایی مایع اثر می‌کند به تعیین حداکثر نیروهای ناشی از زلزله پرداخت [۵]. پس از آن هارون و هاوسنر (۱۹۸۱ و ۱۹۸۲) با استفاده از روش اجزاء محدود و حل مرزی و برنامه کامپیوتری، مدل جدیدی از سیستم مخزن - مایع ارائه کردند. در این مدل علاوه بر اثر مود نوع $\cos \theta$ اثر مدهای بالاتر $\cos n\theta$ نیز مدنظر قرار گرفت [۶]. سپس در سال ۱۹۸۴ ولتسوز با جایگذاری تابع شبه شتاب به جای شتاب زمین مولفه ضربه‌ای مخازن با دیواره صلب، مخازن با دیواره انعطاف پذیر، را مدل کرد و به دنبال آن رامراستروف (۱۹۸۸) یک رویه طراحی برای مخازن با در نظر گرفتن هر دو مولفه لرزه‌ای زمین ارائه کرد [۷].

پژوهش‌های پیشین اغلب نیروی زلزله را به عنوان اثر دینامیکی بر مخازن ذخیره سیالات در نظر گرفته‌اند ولی سازه‌هایی از این نوع که در معرض بارگذاری‌های انفجاری قرار دارند که بایستی اثرات دینامیکی آنها بررسی گردد. تحلیل اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه از دهه‌ی 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 بطور گسترده‌ای توسط سازمانهای نظامی و غیر نظامی جهت طراحی سازه‌ها و به منظور جلوگیری از انتشار انفجار و حفاظت از تجهیزات و پرسنل 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 مخازن سیال انجام گرفت [۹، ۱۰]. از میان تحقیقات انجام گرفته می‌توان به پژوهش وانگ و همکاران اشاره نمود (۲۰۱۵) که نشان داده شده است مخزن به سادگی طراحی شده در مقایسه با مخزن اصلاح شده در برابر انفجار دارای مقاومت کمتری است و این فقط با افزایش انرژی داخلی و کاهش کار خارجی با اتخاذ شرایط مرزی محوری محدود شده ممکن است [۱۱]. میتال (۲۰۱۴) روی تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره‌سازی مایع تحت اثر انفجار با استفاده از ترکیب فرمول اولر و لاگرانژ تحقیق کرد و مشاهده شد که تنش‌ها با افزایش ارتفاع مایع در مخزن و کاهش فاصله مقیاس مواد منفجره و افزایش نسبت ابعاد و افزایش ارتفاع نسبت به شعاع افزایش می‌یابد [۱۲]. هو و زهو یک مخزن با مقیاس کوچک تحت اثر انفجار را در نرم‌افزار فلونت مدل نموده و با نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی نمودند [۱۳]. آنها نتایج توزیع فشار داخلی ایجاد شده در مخزن با توجه به ظرفیت تانک، نسبت ارتفاع به عمق و شکل سقف مخزن تحقیق نمودند. زهنگ و

همکاران یک مخزن گاز را تحت اثر بارگذاری انفجار از نوع تی-ان تی با استفاده از روش عددی آنالیز نموده و تنش و تغییر شکل ایجاد شده در آن را بدست آوردند [۱۴]. لی و همکاران بر روی فشار انفجار ایجاد شده 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. [۱۵، ۱۶]. لو و همکاران با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا توانستند اثر انفجار بر روی یک مخزن فلزی استوانه‌ای را مدل نموده و سپس با نمونه آزمایشگاهی مقایسه نمایند [۱۷]. آنها با استفاده از این تحقیق توانستند مد شکست، تغییر شکل، انرژی و کرنش دینامیکی ایجاد شده را بررسی نمایند. یاسری با انجام مطالعات آزمایشگاهی توانست برای مخازنی که دارای ارتفاع کوچکتر نسبت به قطر رابطه‌ای جهت به دست آوردن توزیع فشار انفجار خارجی پیرامون مخازن تحت فشار قائم ارائه نمایند [۱۸]. پیمان صفا در پژوهشی تحلیل غیرخطی دینامیکی بر روی مخازن زمینی با سقف شناور تحت اثر بار ناشی از انفجار برای ۳۰ حالت متفاوت بار انفجاری انجام داد. [۱۹]. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که بدنه مخازن مورد بررسی، در مقابل برخی از سناریوهای بارگذاری انفجاری آسیب پذیر بوده و بر اساس معیارهای خرابی استاندارد آییننامه API650 آسیب خواهند دید. وانگ و زهو با استفاده از آنالیز عددی توانست نشان دهد که آب می‌تواند پاسخ مخزن تحت تاثیر انفجار را کاهش دهد [۲۰]. این پژوهش برای دو حالت مخزن فلزی با تکیه‌گاه ساده و محدود شده 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.

همانطور که مشاهده می‌شود تحقیقاتی در خصوص مخازن ذخیره‌سازی آب تحت اثر بارهای دینامیکی همچون زلزله و انفجار بر روی مخازن فلزی صورت گرفته که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار ما قرار داده‌اند. با این وجود خلاء پژوهشی در رابطه با بررسی رفتار و پاسخ مخازن روزمینی بتن آرمه تحت اثر انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه احساس می‌شود. برای این منظور با استفاده از فرول کوپل اولر-لاگرانژی در نرم‌افزار آباکوس تعیین تنش‌های ایجاد شده تحت اثر انفجار خارج و فشار آب از داخل، در مقابل پارامترهای تاثیرگذار در رفتار سازه با استفاده از نتایج به دست آمده پرداخته شده است. در پژوهش حاضر سه مخزن بتن آرمه با ارتفاع‌های متفاوت ۴، ۶ و ۸ متری و شعاع ثابت ۳ متر در نظر گرفته شده است، که هر کدام با درصد خالی، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از عمق مخزن با آب پر شده‌است. تنش‌های حلقوی بدنه مخازن و همچنین حرکات سطحی سیال بر اثر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گرفته شده است.

^۲ convective

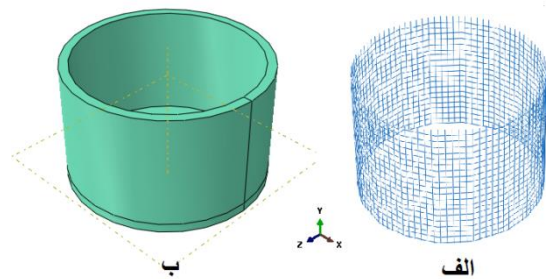
^۱ Impulsive

۲-۲- میلگرد

۲- روش کار

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 $10^4 \sim 10^2 S^{-1}$ را ایجاد می کنند، از این رو این نرخ کرنش بسیار بالا، خواص مکانیکی مصالح در سازه و

در بدنه این مخازن ۹۴ تا میلگرد نمره ۱۰ به صورت عمودی و به ازای هر ۱ متر ارتفاع ۵ میلگرد نمره ۸ به صورت حلقوی دورتادور میلگردهای عمودی را احاطه کرده است. این میلگردها در داخل بتن مدفون شده اند. در شکل (۱) قسمت (الف) طریقه بسته شدن میلگرد ها و در قسمت (ب) دیواره بتنی نمایش داده شده است.



شکل ۱- مخازن بتن مسلح

۲-۱- 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 غیر خطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت بتن 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 غیر خطی بتن استفاده می کند. مشخصات الاستیک و پلاستیک بتن تعریف شده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات الاستیک و پلاستیک بتن [۲۲]

جدول ۲- رفتار فشاری و کششی بتن در آباکوس [۲۲]

در جدول (۲) رفتار فشاری و کششی بتن در نرم افزار آباکوس در ماژول متریال به بتن اختصاص داده شده است.

ردیف	رفتار کششی		رفتار فشاری	
	Cracking strain	Yield stress	Inelastic strain	Yield stress
۱	۰	۳۲۰۰۰۰۰	۰	۲۰۴۸۰۰۰۰
۲	۰,۰۰۱۱۹	۲۲۰۰۰۰	۰,۰۵E-۶,۸۸	۲۴۰۰۰۰۰۰
۳			۰,۰۰۰۱۶۱	۲۶۸۸۰۰۰۰
۴			۰,۰۰۰۲۷۸	۲۹۱۲۰۰۰۰
۵			۰,۰۰۰۴۱۸۴	۳۰۷۲۰۰۰۰
۶			۰,۰۰۰۵۸۲۶	۳۱۶۸۰۰۰۰
۷			۰,۰۰۰۷۷	۳۲۰۰۰۰۰۰
۸			۰,۰۰۰۹۸۲	۳۱۶۸۰۰۰۰
۹			۰,۰۰۱۲۲	۳۰۷۲۰۰۰۰
۱۰			۰,۰۰۱۴۸	۲۹۱۲۰۰۰۰
۱۱			۰,۰۰۱۷۶	۲۶۸۸۰۰۰۰
۱۲			۰,۰۰۲۰۷	۲۴۰۰۰۰۰۰
۱۳			۰,۰۰۲۴	۲۰۴۸۰۰۰۰
۱۴			۰,۰۰۲۷۵	۱۶۲۲۰۰۰۰
۱۵			۰,۰۰۳۱۳	۱۱۵۲۰۰۰۰

مکانیسم های مورد انتظار را تغییر می دهد. به منظور تأثیر دادن نرخ کرنش بر تنش نیز خواص پلاستیکی فولاد را با استفاده از مدل سخت شوندگی جانسون-کوک مطابق جدول (۳) در نظر گرفته 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.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \log_e \epsilon^*) (1 - T^*m) \quad (1)$$

که در این معادله $\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد در نرخ کرنش مرجع $\epsilon_0 = \frac{1}{s}$ است و ϵ معادل نرخ کرنش پلاستیک

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	زاویه اتساع (درجه)	۳۱
۲	گریز از مرکز	۰/۱
۳	f_{b0}/f_{c0}	۱/۱۶
۴	K	۰/۱۶۶۶
۵	ویسکوزیته (ns/m^2)	۰/۰۰۰۱
۶	چگالی (kg/m^3)	۲۴۵۰
۷	مدول یانگ (nm^2)	۲۳۵e8
۸	ضریب پواسون	۰/۲

است و T^* دمای بدون بعد متناظر است. پارامتر A مقاومت گسیختگی اولیه فولاد در یک نرخ کرنش پلاستیکی $\dot{\epsilon} = \frac{1}{s}$ است و درجه حرارت ۲۹۸ کلوین می‌باشد. پارامترهای B و n رفتار سخت‌شدگی فولاد مستقل از نرخ کرنش را شبیه‌سازی می‌کنند و پارامتر C رفتار سخت‌شدگی وابسته به نرخ کرنش را منعکس می‌سازد. پارامتر m ضریب نرم‌شدگی حرارتی است که برای فولاد از تست‌های مکانیکی بدست می‌آید 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]

ردیف	متغیر	مقدار
۱	A(Mpa)	۳۶۰
۲	B(Mpa)	۶۳۵
۳	N	۱/۰۳
۴	M	-۱/۱۴
۵	Melting temperature (K)	۱۵۰۰
۶	Transition temperature (K)	۲۹۸
۷	C	۰/۰۷۵
۸	Epsilon dot zero	۱

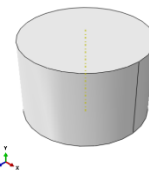
تماس اولری-لاگرانژی معروف است. از این رو این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان بسیاری از مسائل چندفازی از جمله تماس سازه با سیال را مدلسازی نمود. در این روش به دلیل مدلسازی سیال به صورت اولرین، مشکلات ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ ایجاد شده برای سیال بر طرف شده است. در روش مذکور المان‌های سیال به صورت ثابت در فضا هستند و سیال داخل آن به راحتی جریان می‌یابد، سازه مخزن نیز در این روش به صورت فرمولبندی لاگرانژی تعریف می‌شود. از آنجایی که پیاده‌سازی روش اولری در نرم‌افزار آباکوس بر اساس روش حجم سیال است، در این روش موقعیت ماده اولری در محیط مش‌بندی با محاسبه کسر حجمی^۱ اولرین در هر المان مشخص می‌شود. با این تعریف اگر یک المان به طور کامل از یک ماده پر شود مقدار کسر حجمی اولرین آن یک و اگر ماده‌ای در آن قرار نگیرد کسر حجمی اولرین آن صفر است [۲۱].

۳-۲-۲- ویژگی‌های سیال در آباکوس

در مسائل مربوط به تلاطم، سیال را می‌توان به صورت تراکم-ناپذیر و ویسکوز در نظر گرفت. یک روش موثر برای مدل نمودن سیال در *Abaqus/Explicit* استفاده از مدل برشی ویسکوز نیوتن و معادله حالت U_S-U_P خطی می‌باشد. توابع مدول بالک^۲ به عنوان پارامترهای اصلاحی برای قید تراکم-ناپذیری سیال عمل می‌کنند. از آنجایی که تلاطم سیال درون مخزن به صورت آزاد و بدون محدودیت انجام می‌شود. مدول بالک می‌تواند دو تا سه مرتبه کوچک‌تر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود و همچنان سیال به صورت تراکم‌ناپذیر رفتار کند. برای خنثی نمودن مودهای برشی که باعث به هم ریختن مش می‌شود، ویسکوزیته‌ی برشی به صورت پارامتر اصلاحی عمل می‌کند. به دلیل اینکه آب یک سیال غیر ویسکوز است، ویسکوزیته-ی برشی برای سیال، باید کوچک در نظر گرفته شود. ویسکوزیته‌ی برشی بالا باعث ایجاد پاسخ‌های بیش از اندازه سخت می‌شود. مقدار ویسکوزیته‌ی مناسب را می‌توان براساس مقدار مدول بالک محاسبه نمود [۲۱].

۳-۲-۳- سیال

جنس سیال موجود در مخازن، آب می‌باشد. که هر مخزن به نسبت ارتفاع خود از آب، به میزان صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از حجم خود را از سیال پوشش می‌دهد. شکل (۲) فرم سیال را درون مخزن نمایش می‌دهد.



شکل ۲- شکل هندسی سیال درون مخزن

۳-۲-۱- ترکیب فرمول اولر و لاگرانژ (CEL)

آنالیز کوپل اولری-لاگرانژی^۱ اجازه مدلسازی اثر متقابل قلمروهای اولری و لاگرانژی را در یک مدل فراهم می‌سازد. این آنالیز به طور 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

۳-۳-۲- معادله انرژی و منحنی هوگونویت^۴

^۲ bulk functions
^۴Hugoniot curve

^۱ Coupled Euler-Lagrange
^۱ volume fractions

در رابطه (۵) ثابت ماده و ρ_0 چگالی مرجع می‌باشد. انرژی هگنونیت E_H وابسته به فشار هگنونیت می‌باشد و با استفاده از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید.

$$E_H = \frac{P_H \eta}{\gamma \rho_0} \quad (۶)$$

که در آن $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$ به عنوان تابعی از تراکم جریان ρ است. و در نهایت با جایگذاری رابطه‌ی (۵) و (۶) در رابطه (۴) معادله حالت مای گرونیسن به صورت رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$P = P_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{\gamma}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_M \quad (۷)$$

۲-۳-۵- فرم خطی هگنونیت Us-Up

معادله P_H از روی پردازش اطلاعات هگنونیت در رابطه (۸) نشان داده شده است.

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0 \eta}{(1 - S \eta)} \quad (۸)$$

که در این رابطه S و C_0 یک رابطه‌ی خطی بین سرعت ضربه U_S و سرعت ذره U_P مطابق رابطه (۹) ایجاد می‌کند.

$$U_S = C_0 + S U_P \quad (۹)$$

که S و C_0 به ترتیب شیب منحنی هگنونیت و سرعت موج صوت در آب می‌باشد. سرعت موج صوت در آب توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه K مدول بالک سیال و ρ چگالی سیال می‌باشد. با توجه به روابط بالا فرم خطی هگنونیت به صورت رابطه (۱۱) ارائه می‌شود.

$$P = \frac{\rho_0 C_0 \eta}{(1 - S \eta)} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{\gamma}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_M \quad (۱۱)$$

مطابق راهنمای نرم افزار آباکوس مقدار S ، شیب منحنی و Γ_0 ، ضریب گرونیسن برای آب برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. مشخصات آب درون مخزن در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است [۲۱].

جدول ۴- مشخصات آب درون مخزن [۱۲]

مقدار	متغیر	ردیف
۱۰۰۰	چگالی (kg/m^3)	۱

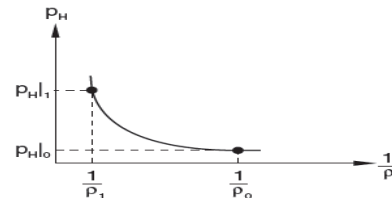
معادله انرژی در غیاب انتقال حرارت به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود.

$$\rho \frac{\partial E_M}{\partial t} = (P - P_{bv}) \frac{\partial \rho}{\rho \partial t} + S : \dot{\epsilon} + \rho \dot{Q} \quad (۲)$$

که در این رابطه P فشار، P_{bv} فشار ناشی از ویسکوزیته‌ی 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 ρ و انرژی داخلی در واحد جرم E_M می‌باشد. رابطه (۲) می‌تواند کلیه‌ی حالت‌های تعادلی که در یک جسم وجود دارد را تعریف کند. انرژی داخلی را می‌توان برای به دست آوردن رابطه‌ی بین ρ و V یا معادل آن ρ و $\frac{1}{\rho}$ ، از معادله بالا حذف نمود. رابطه بین ρ و $\frac{1}{\rho}$ ، منحنی هگنونیت نامیده می‌شود [۲۱].

$$P = f(\rho, E_M) \quad (۳)$$

شکل (۳) به طور شماتیک منحنی هگنونیت را نشان می‌دهد که فشار هگنونیت P_H ، تنها تابعی از چگالی است و این منحنی به طور کلی توسط پردازش اطلاعات تجربی ترسیم می‌شود. [۲۱]



شکل ۳- منحنی هگنونیت [۲۱]

۲-۳-۴- معادله حالت مای گرونیسن

انرژی در معادله‌ی مای گرونیسن به صورت خطی می‌باشد. فرم رایج آن در معادله (۴) ارائه شده است.

$$P - P_H = \Gamma \rho (E_M - E_H) \quad (۴)$$

که در این رابطه P_H و E_H فشار و انرژی ویژه‌ی هگنونیت در واحد جرم و Γ ضریب گرونیسن می‌باشد. ضریب گرونیسن با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود. فشار و انرژی ویژه‌ی هگنونیت فقط تابع چگالی می‌باشد.

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (۵)$$

۰/۰۰۱	ویسکوزیته (N.s/m ²)	۲
۱۴۵۰	سرعت صوت در آب (m/s)	۳
۰	شیب منحنی	۴

۴-۲- بارگذاری انفجار

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

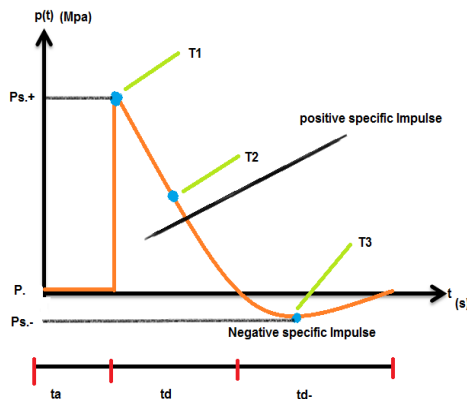
الف: بارگذاری انفجار به صورت تاریخچه فشار بر روی تمام یا قسمتی از سازه بدون در نظر گرفتن تاثیر تغییر شکل‌های سازه بر توزیع فشار، اعمال گردد.

ب: بارگذاری با مدل سازی کامل محیط سازه و سیال به صورت کوپل کامل مد نظر قرار گیرد. 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. مدل سازی 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_{s0}^+) به سرعت بعد از زمان رسیدن فشار انفجار به سازه (t_d) 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 (۴) با استفاده از معادله اصلاح‌شده فریدلندر به صورت رابطه (۱۲) توصیف می‌شود [۱۲].

$$P(t) = p_{s0}^+ \left(1 - \frac{t}{t_d^+}\right)^{\left(\frac{-b(t-t_d)}{t_d^+}\right)} \quad (12)$$

که در این رابطه $P(t)$ نشان دهنده شدت بار انفجاری برخوردی به مخزن می‌باشد و p_{s0}^+ مقدار اوج فشار انفجاری بر حسب MPa است، t_d زمان ورود موج انفجار بر حسب ثانیه است، t_d^+ طول زمان فشار مثبت بر حسب ثانیه است و b یک مقدار بی بعد است که میزان افت فشار را کنترل می‌کند [۱۲].



شکل ۴- فشار-زمان برای امواج انفجاری در هوا [۱۲]

یکی از روش‌های بارگذاری انفجار در نرم افزار آباکوس روش کانوپ 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].

$$P(t) = P_i(t) \quad (13)$$

if: $\cos\theta < \cdot$

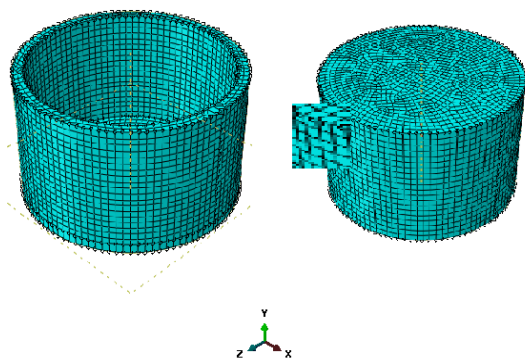
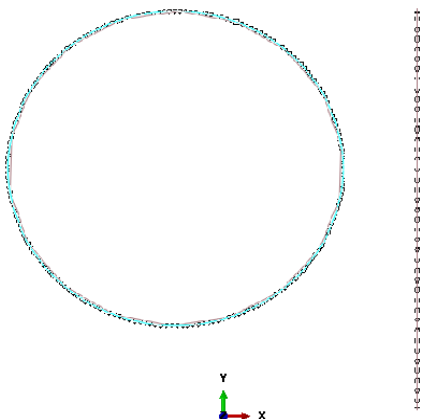
$$P(t) = P_i(t)(1 + \cos\theta - \gamma \cos^2\theta) + P_r(t)\cos^2\theta$$

if: $\cos\theta \geq \cdot$

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

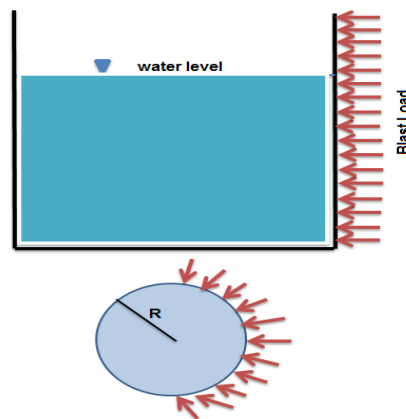
لحظه رسیدن فشار انفجار به دیواره مخزن در شکل (۵) نمایش داده شده است. افزایش میزان فشار وارده به سازه رابطه مستقیمی با فاصله و میزان مواد منفجره دارد.

کیفیت و کمیت جواب تاثیر گذاشته و کوچکتر از آن در جواب تغییری ایجاد ننماید.



شکل ۷- مش بندی بهینه

لوسیونی و همکاران [۲۴]، اثر اندازه مش المان محدود مورد استفاده در نرم افزارهای تجاری برای شبیه سازی و پیش بینی پاسخ به بارهای انفجاری را مورد مطالعه قرار داده اند. این محققین به این نتیجه رسیدند که چنانچه اندازه مش المان محدود در حدود ۱۰ سانتیمتر انتخاب گردد، چگونگی گسترش بار انفجاری به نحو دقیقی مدل خواهد گردید. در مقاله حاضر مش های متفاوت هر قطعه را انتخاب کرده و تا زمان همگرایی پاسخ ها مش ها را ریز می کنیم، در مش های سیال، بتن و فولاد ابعاد مش های اولیه را ۳۰ سانتیمتر و سپس ۲۰ سانتیمتر و در نهایت با ۱۰ سانتیمتر پاسخ های تنش های حلقوی مدلسازی همگرا شده اند. شکل (۷) مش بندی اجزای مخزن را به اندازه ۱۰ سانتیمتر در هر قطعه نمایش می دهد.



شکل ۵- بارگذاری انفجار بر روی دیواره مخزن [۱۲]

۳- فشار هیدرواستاتیکی

بار هیدرواستاتیکی به صورت فشاری از داخل به دیواره مخزن وارد می شود. شکل (۶) فشار وارده از جانب سیال به دیواره مخزن را نشان می دهد. به راحتی فشار هیدرواستاتیکی در Abaqus standard تعریف می شود.



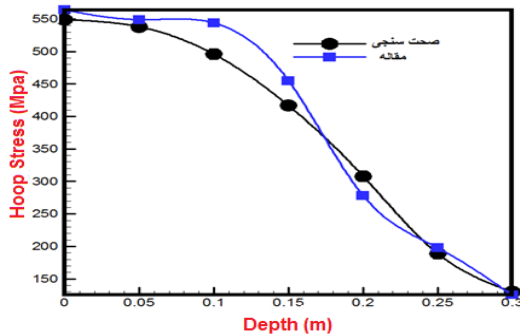
شکل ۶- توزیع قائم فشار هیدرواستاتیکی در مخزن آب

۴- مش بندی و آنالیز حساسیت

اهمیت انجام آنالیز حساسیت به گونه ای است، که پس از پایان رسیدن اولین آنالیز و بررسی مقادیر تنش و مدل آسیب در مدل مش زده شده، نواحی بحرانی مشخص می شوند. حال با توجه به حساسیت این نتایج به مش تعریف شده و از طرفی دیگر ضرورت توجه لازم به گام های زمانی آنالیز و همچنین هزینه های زمانی بهینه صرف شده، در نواحی بحرانی با تغییر مش تلاش می کنیم تا به بهینه ترین سایز مش برسیم. این اندازه بهینه برای سایز مش زمانی ایجاد می گردد که بزرگتر از آن اندازه سبب شده تا در

۵- اعتبارسنجی

همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود درصد خطای مقاله میتال (Mital et al [12]) با پژوهش حاضر اختلافی زیر ۱۰ درصد دارند و همچنین متوسط خطا ۵/۹ است که این مقدار خطا قابل پذیرش می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه تنش حلقوی مدل انجام شده با پژوهش

میتال و همکاران (Mital et al [12])

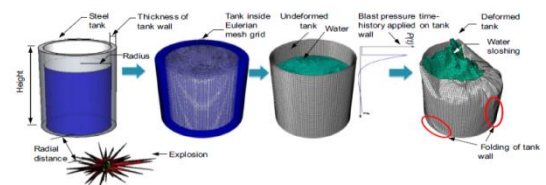
جدول ۵- درصد خطای مقاله میتال (Mital et al [12]) با

پژوهش حاضر				
ردیف	عمق	میتال	پژوهش	درصد خطا
۱	0	549	564	2.73224
۲	0.05	538	546	1.486989
۳	0.1	496	544	9.677419
۴	0.15	417	455	9.11271
۵	0.2	308	278	9.74026
۶	0.25	189	198	4.761905
۷	0.3	130	125	3.846154
		5.908		
		2		

۶- بررسی یافته‌های پژوهش

در پژوهش حاضر پایداری مخازن استوانه‌ای روزمینی بتن آرمه تحت اثر انفجار، با توجه به حالات مختلف از جمله نسبت ارتفاع به شعاع، میزان درصد مختلف آب داخل مخزن و فواصل انفجاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بررسی 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 (۹) 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

به منظور بررسی صحت روش به کار گرفته شده جهت اعمال بار انفجاری به سازه‌های آبی (مخازن آب) در مدل‌سازی عددی مورد استفاده، مقایسه‌ای با نتایج تحقیقات قبلی صورت گرفته شده است. به همین منظور برای اعتبارسنجی عملکرد رفتار سیال آب با سازه مخزن از کوپل اولر-لاگرانژ مطابق شکل (۸)، بارگذاری انفجار بر سازه در نرم افزار ABAQUS با نتایج مدل‌سازی عددی صورت گرفته توسط Mital et al [12] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شده است. در این مقاله مخازن فولادی با ابعاد متفاوت با درصد پرشدگی‌های مختلف از آب، تحت اثر ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلفی از مخزن مورد تحلیل قرار گرفته شده است. شکل (۸) نمایی کلی از مدل‌سازی این مخازن در مقابل بار انفجار را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات در نظر گرفته شده برای مخازن فولادی مدل سخت‌شوندگی جانسون - کوک و برای آب معادلات هوگنویت می‌باشند. مشخصات ذکر شده این مقاله در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و در ادامه به مقایسه نتایج و اعتبارسنجی مدل پرداخته شده است.



شکل ۸- مراحل شبیه‌سازی کوپل اولر-لاگرانژ [۱۲]

به منظور بررسی اعتبارسنجی مدل مذکور یکی از مخازن با ارتفاع ۰/۳ متر و شعاع ۰/۶ متر با درصد پرشدگی ۵۰ درصد از آب تحت اثر ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۳۵ متر از مخزن در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و مورد بررسی گرفته شده است.

شکل (۹) نشان دهنده نتایج حاصل شده از تنش حلقوی جداره مخزن که روبه اثر انفجار قرار دارد، می‌باشد. در لحظه اوج انفجار و فشارهای وارده به مخزن به بررسی نمودار تنش‌های حلقوی جداره پرداخته شده است. بدین منظور یک مسیر از لبه جداره به سمت کف آن انتخاب شده است. نحوه انتخاب مسیر از روی گره‌های المان‌های مخزن صورت گرفته که هر گره با مقدار تنش حلقوی خود مشخص شده و نمودار آن رسم گردیده است.

۲-۶- بررسی تنش‌های حلقوی بر اساس درصد پرشدگی

آب

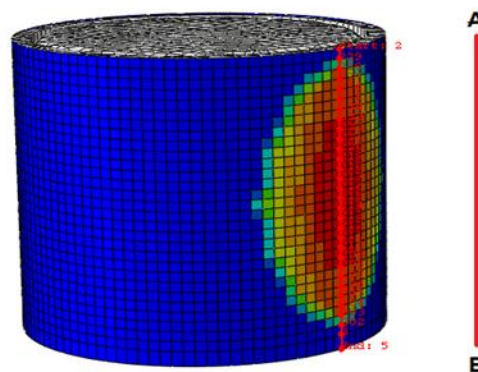
برای مشاهده نمودارهای مربوط به تنش حلقوی دیواره مخزن یک مسیر در کنار دیواره مخزن (مسیر AB در شکل ۱۰) که با فشار انفجار مواجه است انتخاب شده است. تنش‌های حلقوی مربوط به این قسمت از مخزن از روی گره‌های انتخابی با استفاده از شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) نمایش داده شده است. که بعد از افقی شدن دهنده عمق مخزن و بعد از قائم نمودار نشان دهنده تنش‌های حلقوی می‌باشد. نمودارهای اشکال (۱۱) تا (۱۶) تنش حلقوی در دیواره مخزن که بر اثر انفجار به وجود آمده است نمایش می‌دهد. در این نمودارها با سه متغیر مواجه 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). هر کدام از متغیرهای فوق تاثیر عمده‌ای بر تنش‌های حلقوی ایجاد شده در دیواره مخزن دارند. 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.

۳-۶- 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 می‌شود. تنش حلقوی تحت فشار انفجار در راس مخزن و بخش فوقانی مخزن حداکثر مقدار را دارد. از روی نمودارهای اشکال (۱۱) تا (۱۶) 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.

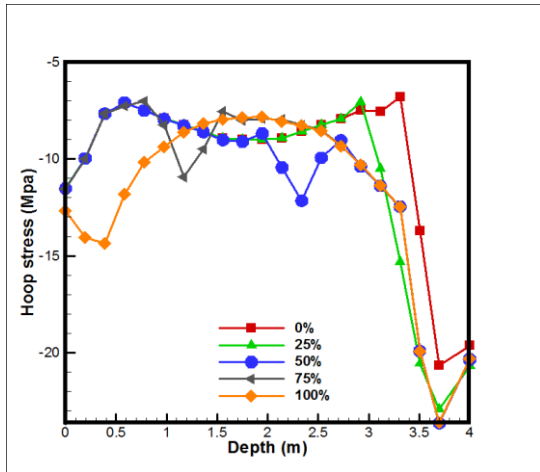
ثبت می‌کند و به فرم نمودار نمایش می‌دهد. محور قائم این نمودارها نشان دهنده تنش یا کرنش به وجود آمده در دیواره مخزن و محور افقی آن‌ها ارتفاع مخزن را نمایش می‌دهد.



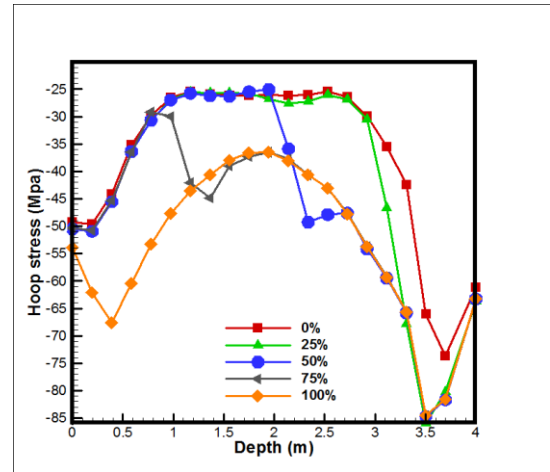
شکل ۱۰- مسیر AB روی دیواره روبه انفجار مخزن

۶-۱- بررسی تنش‌های حلقوی ایجاد شده در بدنه مخزن

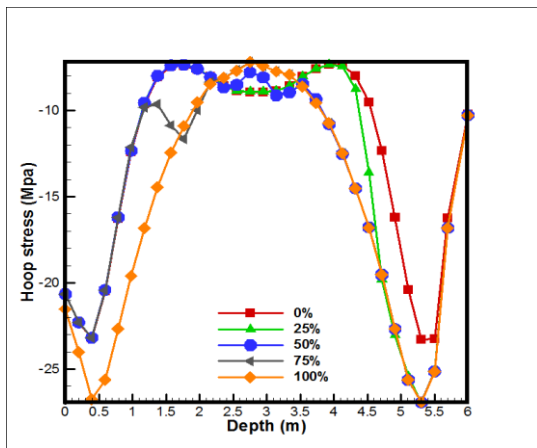
با توجه به اینکه در هنگام انفجار، مخزن از طرف بیرون تحت موج فشاری ناشی از انفجار و از داخل تحت فشار ناشی از آب قرار می‌گیرد، به همین دلیل سیال درون مخزن طبق تئوری هاوسنر به دو بخش جرم سخت و موج تقسیم‌بندی می‌شود [۴]. عامل اصلی ایجاد تنش‌های حلقوی بخش موج آب می‌باشد. با توجه به اینکه در حالت ۱۰۰ درصد پر 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 متاثر باشد.



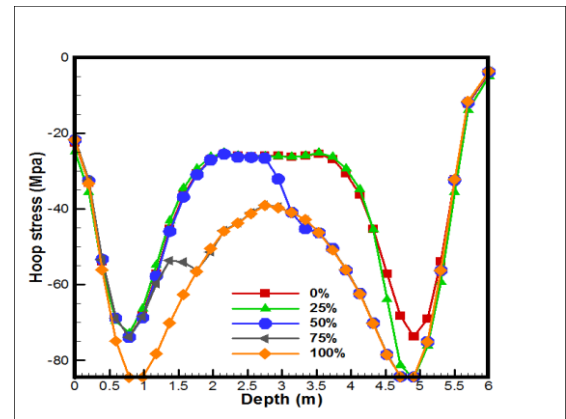
شکل ۱۲- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$) با فاصله انفجار ۱۰ متری



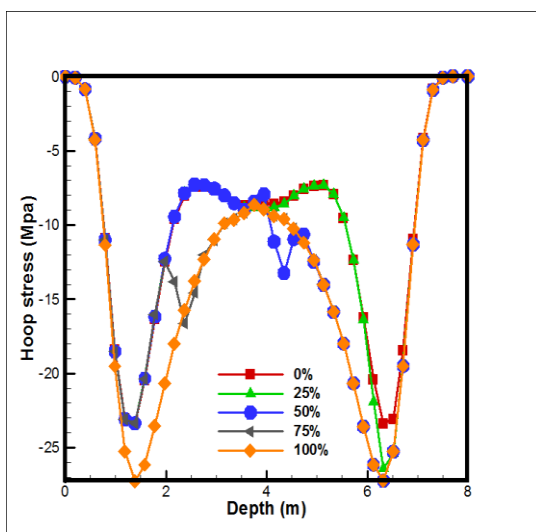
شکل ۱۱- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$) با فاصله انفجار ۵ متری



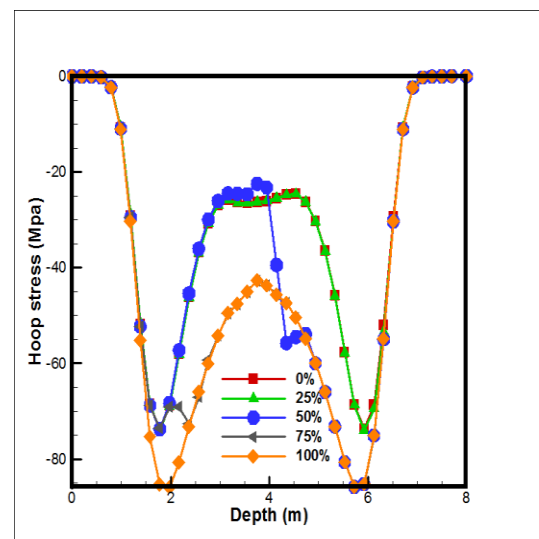
شکل ۱۴- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$) با فاصله انفجار ۱۰ متری



شکل ۱۳- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$) با فاصله انفجار ۵ متری



شکل ۱۶- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با فاصله انفجار ۱۰ متری



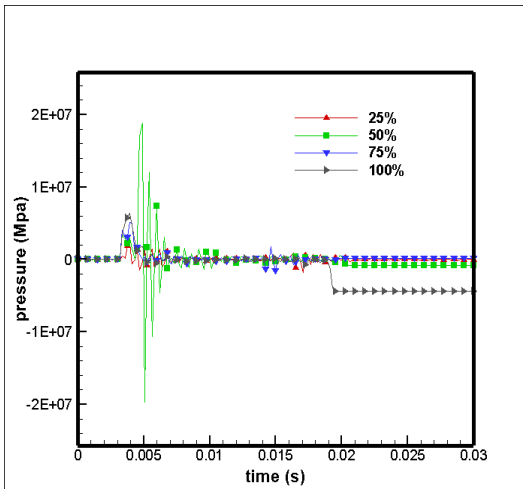
شکل ۱۵- تنش های حلقوی ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با فاصله انفجار ۵ متری

۴-۶- بررسی تنش‌های حلقوی بر اساس نسبت $(\frac{H}{R})$

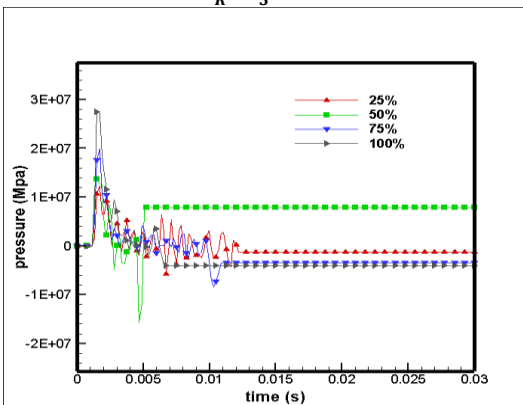
با توجه به شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) می‌توان تاثیر نسبت $\frac{H}{R}$ را روی تنش‌های حلقوی بدنه مخزن مشاهده کرد. این نسبت در وسط بدنه مخزن که در معرض مستقیم امواج انفجار قرار دارد بی تاثیر است و هیچ‌گونه تغییری در تنش‌ها ایجاد نمی‌کند. ولی با توجه به انتشار امواج انفجار بر روی بدنه و حرکت این امواج به بخش فوقانی و تحتانی مخزن از قدرت آنها کم می‌شود و تنش‌های حلقوی روبه کم شدن می‌روند. 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.

۴-۵- بررسی فشار ایجاد شده در سطح آب

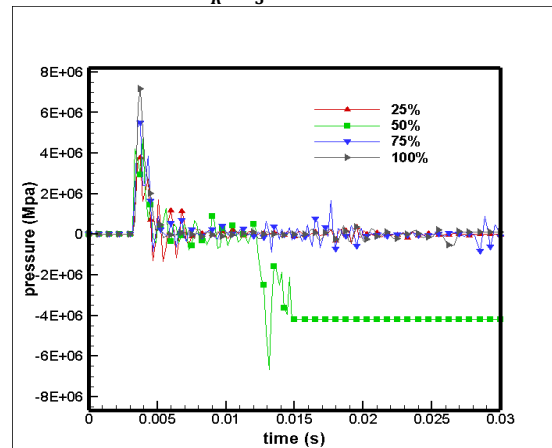
با توجه به شکل‌های (۱۷) تا (۲۲) می‌توان فشارهای ایجاد شده در سطح سیال را بر اثر انفجار مشاهده کرد. فشاری که در المان‌های سطح سیال ایجاد می‌شود، ناشی از بارگذاری انفجار بر روی دیواره مخزن و اندرکنش دیواره بر روی سیال داخل مخزن رخ می‌دهد. این نوع از فشار که در سیال اتفاق می‌افتد، در مخازن با ارتفاع‌های متفاوت و درصد پرشدگی مختلف از آب و همچنین فواصل مبدا انفجار تا دیواره مخزن دارای نمودارهای متنوعی می‌باشد. هر کدام از این اشکال (۱۷) تا (۲۲) نمودارهای فشار سطح آب را در طول زمان نشان می‌دهد.



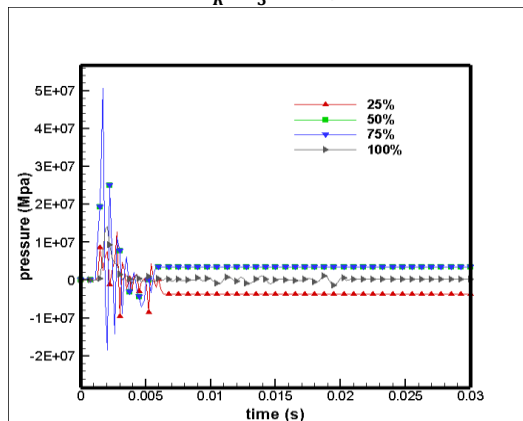
شکل ۱۸- فشارهای سطح آب $(\frac{H}{R} = \frac{4}{3})$ با فاصله انفجار ۱۰ متری



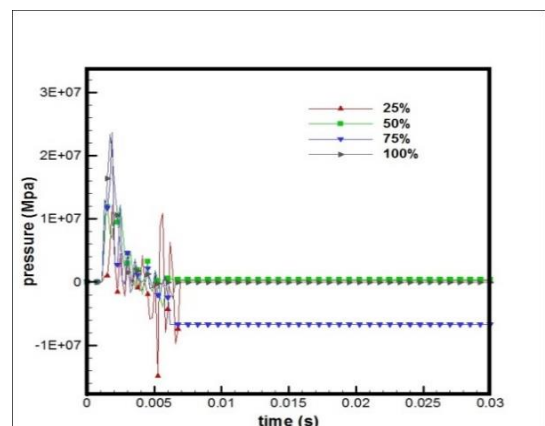
شکل ۱۹- فشارهای سطح آب $(\frac{H}{R} = \frac{6}{3})$ با فاصله انفجار ۵ متری



شکل ۲۰- فشارهای سطح آب $(\frac{H}{R} = \frac{6}{3})$ با فاصله انفجار ۱۰ متری



شکل ۲۱- فشارهای سطح آب $(\frac{H}{R} = \frac{8}{3})$ با فاصله انفجار ۵ متری

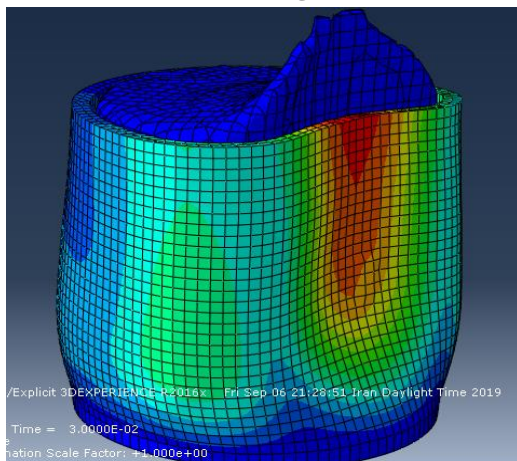


شکل ۱۷- فشارهای سطح آب $(\frac{H}{R} = \frac{4}{3})$ با فاصله انفجار ۵ متری

با توجه به اینکه افزایش ارتفاع مخازن باعث فضای ذخیره ای بیشتری می شود، لذا مخازنی که دارای نسبت $\frac{H}{R}$ بیشتری باشند در نتیجه سیال بیشتری در خود ذخیره می کنند و قسمت موج بیشتری را شامل می شود. افزایش قسمت موج در سطح آب باعث می شود انرژی بیشتری از طرف دیواره به سیال منتقل شود و در نتیجه سطح آب فشار بیشتری را در خود نشان می دهد. به طوری که فشار سطح آب مخزن با نسبت $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ ، ۵۰ درصد بیشتر از مخزن با نسبت $\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$ می باشد. و همچنین فشار سطح آب در مخزن با نسبت $\frac{H}{R} = \frac{6}{3}$ ، ۳۳ درصد بیشتر از مخزن با نسبت $\frac{H}{R} = \frac{4}{3}$ می باشد.

۶-۱۰- بررسی بالا آمدگی سیال در مخزن بر اثر انفجار

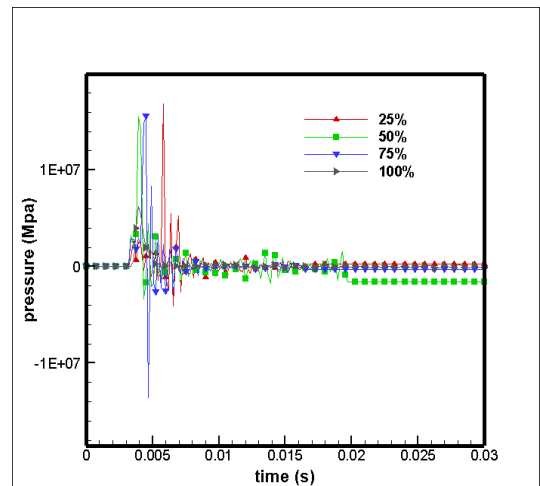
در اثر پدیده تلاطم آب، آب ضربه هایی به بدنه داخلی مخزن وارد می کند و امواجی در سطح آب تشکیل می شود. امواج به صورت افقی و قائم حرکت می کنند و در مخازن روباز آب به بیرون پرتاب می شود. در شکل (۲۳) مشاهده می شود که برخورد آب به دیواره مخزن باعث ایجاد نیرویی در داخل مخزن می شود و مخزن در مقابل آن نیرویی متقابل اعمال می کند. امواجی که به صورت افقی به بدنه وارد می شوند با نیروی هیدرودینامیکی خود مانع تغییر مکان مخزن به داخل می شوند. به نوعی می توان گفت که با فشار انفجار به داخل مخزن، آب هم با نیروی هیدرودینامیکی در مقابل این فشار مقاومت می کند و مخزن را از آسیب های احتمالی حفظ می کند. با توجه به اینکه مخزن روباز است، امواج قائم آب در جهت بیرون مخزن حرکت می کنند.



شکل ۲۳- تلاطم آب مخزن بر اثر برخورد امواج انفجار به دیواره

۶-۱۱- بررسی ارتفاع موج سیال با گره های المان آب

مخزن با نسبت $\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$ را با درصد های پرشدگی مختلف مورد مطالعه قرار داده ایم. یک گره از سیال در دیواره مقابل انفجار که تقریباً در سطح قرار دارد را به دلخواه انتخاب می کنیم و حرکات آن را طی زمان انفجار مورد بررسی قرار می دهیم. این گره به نمایندگی سطح سیال حرکات متنوعی از خود نشان می دهد که نشان دهنده ی ارتفاع امواج سیال بر اثر اصابت موج های انفجار به دیواره مخزن و اندرکنش سازه با آب می باشد. در



شکل ۲۲- فشارهای سطح آب ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با فاصله انفجار ۱۰ متری

۶-۷- بررسی فشار سطح آب بر اساس درصد پرشدگی

سیال ذخیره شده در مخازن بر اثر رسیدن امواج انفجار به دیواره مخزن و اندرکنش دیواره نسبت به آن باعث موج شدن سطح سیال می شود. 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 می گیرد، به همین دلیل سیال درون مخزن طبق تئوری هاوسنر به دو بخش جرم سخت و موج تقسیم بندی می شود [۴]. بیشترین فشار سیال در بخش موج اتفاق می افتد و با توجه به اینکه بار انفجار به وسط بدنه ارتفاعی مخزن برخورد می کند، لذا مخازنی که دارای ۵۰ درصد از سیال هستند به دلیل قرارگیری سطح سیال در معرض امواج انفجار دارای فشار بیشتری می باشند.

۶-۸- بررسی فشار سطح آب بر اساس فاصله مواد منفجره از

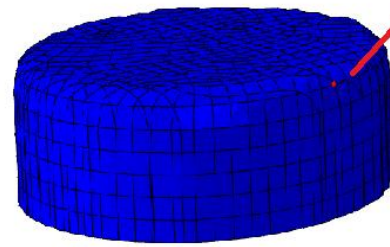
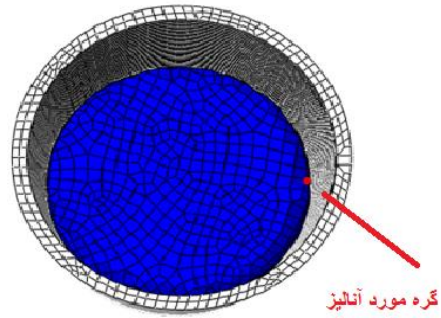
مخزن

هنگامی که امواج انفجار به مخازن می رسند، بر اساس مسافتی که تا دیواره طی می کنند از شدت آنها کم می شود و این تاثیر مستقیمی بر روی فشار آب داخل مخزن دارد. از اشکال (۱۷) تا (۲۲) کاملاً به وضوح قابل مشاهده است که فشار سطح آب در اثر انفجار در فاصله ۵ متری نسبت به فاصله ۱۰ متری تقریباً ۲ برابر شده است. یعنی به صورت متوسط حدود ۱۰ مگاپاسکال افزایش یافته است.

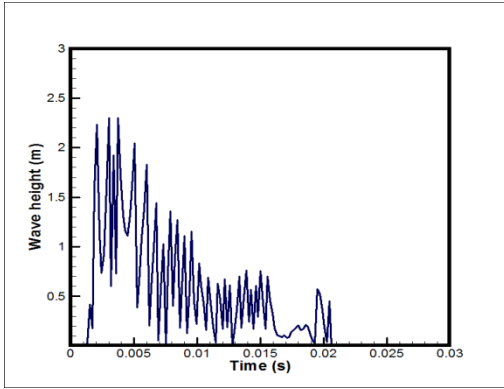
۶-۹- بررسی فشار سطح آب بر اساس نسبت $\left(\frac{H}{R}\right)$

با توجه به شکل های (۱۷) تا (۲۲) می توان تاثیر نسبت $\frac{H}{R}$ را روی فشار سطح آب مشاهده کرد. این نسبت در ابتدای لحظه انفجار ماکزیمم مقدار را دارد و در ادامه زمان کاهش پیدا می کند و فشارش به صفر نزدیک می شود.

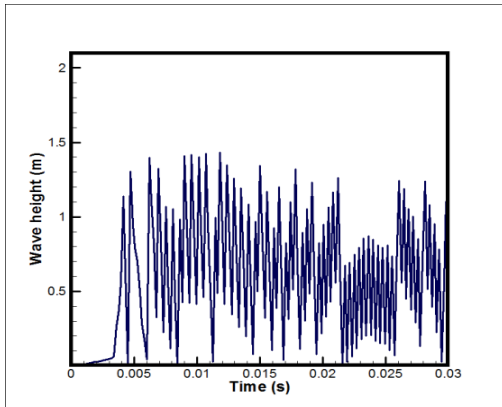
شکل (۲۴) گره مورد بررسی را نشان می دهد، که این گره در سطح سیال قرار داشته و به نسبت درصد پرشدگی مخازن شماره گره تغییر می کند.



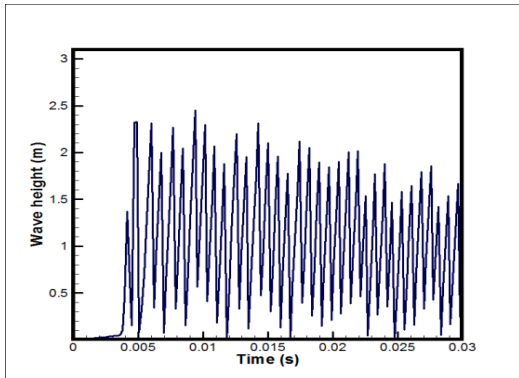
شکل ۲۴- گره سطحی سیال



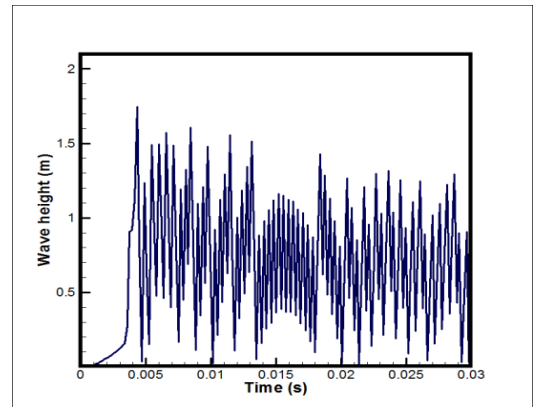
شکل ۲۶- تغییر مکان گره شماره ۱۷۳۹۷ آب ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با درصد پرشدگی ۵۰ درصد از آب در فاصله انفجار ۱۰ متری



شکل ۲۷- تغییر مکان گره شماره ۲۴۹۴۷ آب ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با درصد پرشدگی ۷۵ درصد از آب در فاصله انفجار ۱۰ متری



شکل ۲۸- تغییر مکان گره شماره ۳۴۱۶۸ آب ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد از آب در فاصله انفجار ۱۰ متری



شکل ۲۵- تغییر مکان گره شماره ۸۴۱۴ آب ($\frac{H}{R} = \frac{8}{3}$) با درصد پرشدگی ۲۵ درصد از آب در فاصله انفجار ۱۰ متری

هر المان قابل مشاهده است. قابل ذکر است که گره ها به صورت دلخواه انتخاب شده اند و لزوما نتایج نباید مطابقت داشته باشند ، زیرا هر گره از آب رفتار منحصر به فردی در طی تحلیل انفجار از خود نشان می دهد که قابل پیشبینی نیست و نمی توان اظهار نظر قطعی در مورد بقیه گره ها کرد.

در شکل های (۲۵) تا (۲۸) مشاهده می شود که نوسان سیال چه مسیری را تا پایان انفجار طی کرده است. مخازن ۵۰ و ۱۰۰ درصد پر شده از سیال، آب را تا ارتفاع ۲/۵ متر به بالا پرتاب کرده اند و مخازن ۲۵ و ۷۵ درصد از سیال تا ارتفاع ۱/۵ متر آب را پرتاب کرده اند . این تفاوت ناشی از اختلاف سطح آب با نقطه مورد اصابت امواج انفجار است. از آن جهت که امواج انفجار به وسط بدنه وارد می شوند، سیال پشت بدنه را از طریق اندرکنش سازه با سیال تحریک می کند و موجب تغییر مکان هایی در سیال می شود که این تغییر مکان ها از روی گره های

۷- نتیجه گیری

۳. بیشترین کرنش‌های ایجاد شده در بالای سطح آب ظاهر شده، لذا مخازن دارای آب می‌توانند با نیروهای هیدرودینامیکی مانع پیشروی بدنه به داخل شوند.

۴. تنش‌های حلقوی بدنه مخزن ناشی از امواج انفجار از خارج و فشار آب از داخل می‌باشد. وجود آب در مخازن به طور متوسط حدود ۲۰ مگاپاسکال تنش‌های حلقوی را تشدید می‌کند.

۵. با افزایش ارتفاع مخازن تنش‌های حلقوی در قسمت‌های فوقانی و تحتانی به سمت صفر میل می‌کند.

۶. با توجه به اینکه بیشترین آسیب‌های فشاری از امواج انفجار به نقاط بدون سیال اعمال می‌شود، لازم است در این نقاط جهت مقاوم سازی مد نظر قرار داده شوند.

۷. لازم است ایده‌های تقویتی مخزن در وجه روبروی انفجار به دلیل آسیب‌های بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

در این پژوهش پاسخ‌های دینامیکی مخازن بتن مسلح ذخیره آب تحت بار انفجاری معین مورد مطالعه قرار گرفته است. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشند.

۱. وجود سیال در مخزن به دلیل افزایش سختی و در نتیجه سختی مخزن، موجب فشارهایی در درون مخزن می‌شود و حدود ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال از فشار انفجار را کاهش می‌دهد.
۲. در مخازنی که نسبت ارتفاع به شعاع بیشتری دارند می‌توان حساسیت پایداری آنها را احساس کرد. لازم است که در این مخازن درصد بیشتری از سیال قرار داد تا پایداری خود را با افزایش سختی کنترل کند.

Dimensional Structures"; Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1977, 11, 57-74

[10] Bmbach, M. R. "Design of Metal Hollow Section Tubular Columns Subjected to Transverse Blast Loads"; Thin-Walled Struct. 2013, 68, 92-105

[11] Wang, Y., Liew JYR, Lee SC. Structural performance of water tank under static and dynamic pressure loading. Int J Impact Eng, 2015, 85, 110-23

[12] Mittal, V., Chakraborty, T., Matsagar, V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation. Thin Walled Struct. 2014, 84, 91-111.

[13] K. Hu and Y. Zhao, Numerical simulation of internal gaseous explosion loading in large-scale cylindrical tanks with fixed roof, Thin-Walled Structures, 105 (2016) 16-28.

[14] 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, 22(9) (2018) 3419-3429.

[15] 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. 2018, 55, 359-380

[16] 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, 2018, 119, 360-378.

[17] L. Shengzhuo, W. Wang, C. Weidong, M. Jingxin, S. Yaqin, and X. Chunlong, Behaviors of thin-walled

۸- مراجع

[۱] ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، نشریه شماره ۱۲۳ دفتر امور فنی و تدوین معیارها سازمان مدیریت و برنامه ریزی

[2] Munson, B., young, D., okiishi, t., fluid mechanics, wiley, (2016)

[3] Hoskins, L.M., Jacobsen, L.S., Water Pressure in a Tank Caused by Simulated Earthquake, Bull. Seimological Soc. Am 1934, 24, 1-32.

[4] Housner, G.W., Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America. 1957, 15_35

[5] Epstein, H.I., Seismic Design of Liquid Storage Tanks, J. Struct. Division - ASCE. 1976, 102, 1659-1673.

[6] Haroun, M.A., Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks, EERL. 1980, 80-104

[7] Veletsos, A. S. (1984). "Seismic response and design of liquid storage tanks." Guidelines for the seismic

[8] US Department of Army, the Navy and Air Force. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM 5-1300. Washington DC: NAVFAV P-397. 559-920

[9] Stein, L. R.; Gentry, R. A.; Hirt, C. W. "Computational Simulation of Transient Blast Loading on Three-

cylindrical shell storage tank under blast impacts, shock and vibration, 2019.

[18] S. Yasserli, Blast pressure distribution around large storage tanks, Blast information Group, 2015,67, 133-134.

[19] P. Safa, Investigation of explosion effect on the ground tank with floating roof, shock and vibration, 2015, 6(1). In Persian.

[20] W. Yonghui, Z. Hongyuan, Numerical study of water tank under blast loading, Thin-Walled Structures,2015, 90, 42-48.

[21] Abaqus/Explicit User's Manual, Version. Dassault Systems Simulia Corporation, Providence, Rhode Island, USA.2016.

[22] Hafez, A. "Seismic Response of Ground-Supported Circular Concrete Tanks"; Ph.D. Thesis, Graduate School of Ryerson University, 2012.

[23] Johnson, GR, Cook, WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperature and pressures. IntJFractMech 1985, 21:31-48

[۲۴] Luccioni, B.; Ambrosini, D.; Danesi, R. "Blast Load Assessment Using Hydrocodes"; Eng. Struct. 2006, 28, 1736-1744.