

## تحلیل اثر فاصله و وزن خرج بر فشار بیشینه و تغییر فرم صفحه فلزی تحت بار انفجار زیر آب

سیدعلی گله‌داری<sup>۱\*</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲</sup>، سعید حدیدی مود<sup>۳</sup>، علی اکبر کریمی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۳- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، ۴- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۲۷)

### چکیده

یکی از مباحث مهم پدافند غیرعامل مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل اثرات ناشی از انفجار می‌باشد. اگر محیط انفجار، آب باشد، شدت تاثیر آب بر سازه‌های مغروق یا شناور بیشتر می‌شود. با توجه به مرزهای گسترده آبی در شمال و جنوب کشور، مطالعه در این مورد ضروری می‌باشد. با توجه به شکل هندسی سازه‌های شناور یا مغروق، دو هندسه صفحه تخت و استوانه در مطالعات پدیده انفجار زیر آب و اثر آن بر سازه‌ها بیشترین حجم مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. در این مقاله اثر پدیده انفجار زیر آب روی صفحات تخت به کمک روش اجزاء محدود مطالعه شده است. به این منظور با استفاده از نرم‌افزار تجاری ABAQUS اثرات میزان خرج انفجاری و فاصله انفجار از صفحه هدف مطالعه شده است. نتایج تحلیل به کمک نرم‌افزار، با نتایج تجربی گزارش شده هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهد. با توجه به اعتبار نتایج عددی به دست آمده، روند شبیه‌سازی و ضرایب و پارامترهای به کار رفته می‌توانند در شبیه‌سازی و مطالعه رفتار سازه‌های مختلف تحت بار انفجار زیر آب کاربرد داشته باشند. لذا طراحی اولیه محفظه تست استوانه‌ای در دو حالت بدون تقویت‌کننده و با تقویت‌کننده تحت اثر بار انفجار زیر آب مورد ارزیابی قرار گرفته است. استفاده از تقویت‌کننده‌ها در طراحی محفظه، منجر به کاهش چشم‌گیر وزن و هزینه‌های ساخت خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: انفجار زیر آب، صحت‌سنجی، محفظه تست، شبیه‌سازی اجزاء محدود، ABAQUS، پدافند غیرعامل.

## Analysis of Stand Off and Charge Weight Effect on Peak Pressure and Deformation of Metallic Plate Subjected to Under Water Explosion

S. A. Galehdari<sup>1\*</sup>, H. Khodarahmi<sup>2</sup>, S. Hadidi Moud<sup>3</sup>, A. Karimi<sup>4</sup>

Mechanical engineering Dept., Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 02/19/2011, Accepted: 12/18/2011)

### Abstract

One of the passive defense topics is the retrofitting of structures under explosive effects. The water medium has more effect on submarine and marine structures subjected to explosion. Having large marine border in our country, it is necessary to study these phenomena. Regarding the geometrical shape of submarine and marine infrastructure, there are lots of studies concerning the flat and cylindrical plates. In this paper the effect of charge weight and standoff on plate deformation have been studied using ABAQUS / Explicit software and the results have been accurately confirmed when compared with available reported experimental results and relationships. Simulation methods, coefficients and parameters used in this paper can be used in the case of study and simulation of structure response subjected to underwater explosion load. By verification of conducted simulation, the initial design of cylindrical test chamber in two states without stiffener and with stiffener under the effect of underwater explosion load has been assessed. By design of chamber using stiffener, the weight of chamber and effective cost are reduced considerably.

**Keywords:** Under Water Explosion, Verification, Test Chamber, Finite Element Simulation, ABAQUS, Passive Defens.

\*Corresponding author E-mail: ali.galehdari@gmail.com

## ۱. مقدمه

پدیده انفجار زیر آب از موضوعاتی است که در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و حل مسائل انفجار زیر آب کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف داشته است. شکل‌دهی انفجاری زیر آب، سازه‌های دریایی تحت بار انفجاری، اثر انفجار مین دریایی بر سازه کشتی‌ها و زیردریایی‌ها نمونه‌هایی از کاربردهای پدیده انفجار زیر آب می‌باشد.

در مطالعه پدیده انفجار زیر آب و اثرات آن بر سازه‌های مجاور، به علت پیچیدگی معادلات حاکم و هندسه سازه‌های مورد نظر، استفاده از حل تحلیلی تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل، روش‌های عددی در این زمینه پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته‌اند، که از این روش‌ها می‌توان به روش اجزاء محدود به عنوان پرکاربردترین آنها اشاره کرد.

در این زمینه می‌توان از نرم افزارهای تجاری مانند LS-Dyna، AUTODYN، CHEETA و ABAQUS استفاده نمود، که اساس تحلیل همه این نرم‌افزارها روش اجزاء محدود می‌باشد. از کاربردهای روش اجزاء محدود در تحلیل رفتار سازه تحت بار ناشی از انفجار زیر آب، می‌توان به تحقیق انجام شده توسط جن و تال اشاره نمود [۱]. در این تحقیق تغییر فرم صفحات تقویت شده تحت بار انفجار زیر آب با روش اجزاء محدود غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل هم‌خوانی خوبی با روابط تجربی موجود داشته است.

جهت به‌کارگیری صحیح نرم‌افزارهای تجاری برای مطالعه این پدیده، لازم است که ابتدا مدل‌های مادی مناسب را برای سازه تحت بار انتخاب نمود. این مسئله به‌ویژه برای بارهای انفجاری حائز اهمیت می‌باشد، چون رفتار و خواص مواد تحت این‌گونه بارها متفاوت از حالتی است که تحت بار استاتیکی قرار می‌گیرند. کرونین و همکارانش برای مطالعه پاسخ سازه تحت بار انفجاری در نرم‌افزار LS-Dyna از مدل مادی Johnson-Holnquist استفاده کرده و نتایج قابل قبولی را به‌دست آورده‌اند [۲]. جهت جذب انرژی ناشی از امواج انفجاری و کاهش خرابی‌های ناشی از آن، از مواد با هندسه‌های خاص استفاده می‌شود. به همین منظور مولین و او-تول در تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار LS-Dyna رفتار مواد جاذب انرژی انفجار را مطالعه نموده‌اند [۳]. در این مطالعه نشان داده شده است که با استفاده از جاذب‌های انرژی می‌توان تا حدود زیادی انرژی انفجار را جذب و از خرابی‌های ناشی از آن جلوگیری نمود. برت در موسسه تحقیقات و تکنولوژی دفاعی استرالیا با استفاده از نرم افزار DYNA2D موج ضربه‌ای و امواج فشاری تولید شده در اثر انفجار زیر آب را مورد مطالعه قرار داده است [۴].

در این تحقیق، پدیده‌هایی مانند حرکت موج انفجار در ماده منفجره، تولید و انتشار موج ضربه‌ای، نوسان‌های حباب و امواج فشاری ناشی از نوسان‌های حباب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا اثر

مقدار ماده منفجره و عمق محل انفجار بر روی پدیده‌های فوق‌الذکر بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل به کمک نرم‌افزار در رابطه با موج ضربه‌ای و امواج فشاری با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند. با توجه به همخوانی خوب نتایج، نشان داده شده است که روش اجزا محدود روش مناسبی برای مطالعه پدیده انفجار زیر آب می‌باشد. در تحقیقی دیگر احمد و همکارانش مطالعات تجربی پیرامون اثر انفجار زیر آب بر پوسته‌ها انجام داده‌اند [۵].

هم‌چنین رام جی مطالعات مشابهی بر روی اثر بار انفجار زیر آب بر پوسته محفظه‌ها داشته است [۶]. در تاریخچه بحث انفجار زیر آب می‌توان به تحقیق انجام شده توسط اسپراگو و همکارانش اشاره کرد. در این تحقیق از روش اجزا محدود برای تجزیه و تحلیل رفتار یک سازه دریایی مانند کشتی، تحت بار انفجار زیر آب استفاده شده است [۷].

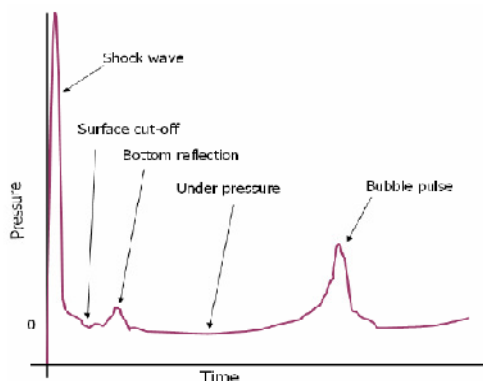
مطالعه منابع فوق‌الذکر جهت انتخاب روش اجزا محدود و در مرحله بعد انتخاب نرم‌افزار مناسب، انجام شده است. اولسون و نوریک مطالعاتی پیرامون اثر بار انفجاری بر روی صفحات فلزی مستطیلی با تقویت‌کننده و بدون تقویت‌کننده انجام داده‌اند [۸]. اثر بارگذاری انفجار زیر آب بر روی سازه‌های تقویت شده توسط سپجوسی با روش اجزا محدود و به کمک نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است [۹].

مطالعه دو تحقیق اخیر به منظور شبیه‌سازی محفظه‌ی تقویت شده انجام شده است. مظاهری و همکارانش به بررسی حباب ایجاد شده در اثر انفجار زیر آب با استفاده از معادلات اویلر یک بعدی در مختصات لاگرانژ پرداخته‌اند. در این تحقیق نحوه تشکیل موج ضربه‌ای در حباب و تولید پالس‌های ثانویه در آب در زمان‌های مختلف ارائه شده است [۱۰]. هم‌چنین احمدی و همکارانش به بررسی مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی برای حل مسئله اندرکنش آب و سازه‌های دریایی ناشی از انفجار زیر آب پرداخته است [۱۱].

لازمه این تحقیقات انجام آزمون‌های تجربی و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جهت مطالعه پدیده‌هایی چون موج ضربه‌ای، امواج فشاری و جت پر سرعت آب می‌باشد. با توجه به هزینه بالای انجام آزمون در مقیاس واقعی، استفاده از محفظه تست به منظور انجام آزمون در مقیاس کوچک رایج است.

هدف اصلی این مقاله ارائه روشی مناسب جهت شبیه‌سازی پدیده انفجار زیر آب می‌باشد. از روش ارائه شده می‌توان جهت تحلیل سازه‌های دریایی در راستای افزایش استحکام آنها در مقابل بار ناشی از انفجار زیر آب در هنگام حملات دریایی و هوایی استفاده نمود. هم‌چنین از این روش جهت ساخت محفظه تست انفجار زیر آب استفاده شده است. ساخت این محفظه به منظور مطالعه پدیده انفجار زیر آب و انجام تست‌های تجربی پیرامون آن می‌باشد. از روش مذکور جهت مقایسه نتایج تجربی به‌دست آمده از انجام تست با نتایج

مطابق شکل (۱) پس از تکمیل پدیده انفجار فشار ایجاد شده (که در حدود چند هزار اتمسفر است) به آب اعمال می‌شود و باعث ایجاد موج ضربه‌ای در آب و حرکت آن در تمامی جهات می‌شود. فشار زیاد اولیه ناشی از انفجار، پس از انتشار موج ضربه‌ای به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، اما این فشار هنوز خیلی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک محل وقوع انفجار است. همین فشار بالا به آب سرعتی در جهت انتشار موج ضربه‌ای می‌دهد. در اثر این حرکت آب، شعاع کره گازی (حباب) با نرخ نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد.



شکل ۱. نمودار توزیع فشار- زمان در پدیده انفجار زیر آب [۱۲]

انبساط حباب و افزایش شعاع آن تا زمان نسبتاً زیادی (نسبت به مقیاس زمانی حرکت موج ضربه‌ای) ادامه می‌یابد و فشار داخلی حباب در اثر افزایش حجم کاهش می‌یابد. انبساط حباب حتی بعد از زمانی که فشار داخل آن به فشار هیدرواستاتیک آب و فشار اتمسفر می‌رسد (به علت اینرسی) ادامه می‌یابد و در نتیجه فشار داخل حباب از فشار تعادل اطراف آن کمتر می‌شود. در اثر کاهش فشار داخل حباب، حرکت سیال اطراف حباب معکوس شده و حجم حباب کاهش و در نتیجه فشار درون آن افزایش می‌یابد. در زمانی که حباب تا حداقل شعاع فشرده شده، فشار بالا موجب انبساط مجدد آن شده و موج شوک دوم منتشر می‌گردد. این موج شوک دوم پالس حباب نامیده می‌شود. لازم به ذکر است فشارهای ماکزیمم در پالس‌های فشاری در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشار ماکزیمم در موج ضربه‌ای اولیه هستند. اما زمان ماندگاری آنها بیشتر از زمان ماندگاری موج ضربه‌ای اولیه است. در رابطه با پالس‌های فشاری این نکته قابل ذکر است که دوری و یا نزدیکی محل وقوع انفجار، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی شکل پالس دارد که علت این امر انعکاس و برگشت پالس‌های فشاری از روی سطوح در مجاورت محل انفجار و ترکیب آنها با پالس‌های ناشی از نوسان‌های می‌باشد [۱۲].

عددی استفاده خواهد شد. در نتیجه، می‌توان از این محفظه پیرامون شناخت پدیده انفجار زیر آب در جهت طراحی مقاوم‌تر سازه‌های دریایی، استفاده نمود. در مسیر طراحی محفظه ابتدا می‌بایست اثر مقدار خرج بر تغییر فرم بدنه مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، در این تحقیق ابتدا شبیه‌سازی عددی مسئله در محیط نرم‌افزار ABAQUS/Explicit انجام شده است.

با توجه به کمبود تجربیات عملی پیرامون انفجار زیر آب در داخل کشور، کسب تجربه شبیه‌سازی در این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور صحت‌سنجی، نتایج حل عددی با نتایج تجربی مسئله مشابه موجود و روابط تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است و روند شبیه‌سازی اعم از مدل‌سازی، اندازه‌مش، پارامترها و ضرایب لازم مورد تأیید قرار گرفته است. پس از اطمینان از روند شبیه‌سازی، مدل اولیه‌ای از محفظه تست در دو حالت با تقویت و بدون تقویت مدل‌سازی و تحت اثر بار حاصل انفجار زیر آب در داخل محفظه، تحلیل تنش و مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن می‌تواند در مرحله ساخت محفظه مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

## ۲. شرحی بر پدیده انفجار زیر آب

### ۲-۱. منحنی فشار- زمان حاصل از انفجار زیر آب

در پدیده انفجار زیر آب موج ایجاد شده پس از انفجار تابعی از اندازه فشار و جابه‌جایی سیال می‌باشد و به صورت ضربه‌ای و با سرعتی چند برابر سرعت صوت در آب حرکت می‌کند. از طرفی نوسان‌های حباب گاز ایجاد شده در اثر افزایش فشار ناگهانی اولیه، انتشار انرژی به فرم امواج فشاری را در پی دارد که به صورت شعاعی از محل انفجار به تمام جهات منتشر می‌گردد. توالی پدیده‌هایی که در انفجار زیر آب اتفاق می‌افتد، عبارتند از:

الف) انتشار موج ضربه‌ای اولیه با دامنه زیاد و زمان ماندگاری کم  
ب) انتشار امواج فشاری در اثر نوسان‌های حباب با دامنه کمتر با زمان ماندگاری زیادتر نسبت به موج ضربه‌ای  
ج) پدید آمدن جت پر سرعت سیال که می‌تواند به سازه مجاور آن برخورد کند.

تراکم‌پذیری آب باعث می‌شود که فشار ایجاد شده در یک نقطه از آن به صورت موج منتشر گردد. در این حالت اگر امواج به صورت امواج تخت در نظر گرفته شوند، بدون لحاظ کردن میرایی طبیعی، دامنه امواج نسبتاً ثابت می‌ماند، اما اگر امواج در تمامی جهات به صورت کروی پخش شوند، به دلیل پخش انرژی در سطح وسیع‌تر کروی، دامنه امواج نسبت به فاصله از منبع تولید موج کاهش یافته و در اصطلاح، موج میرا می‌گردد.

## ۲-۲. معادلات تجربی حاکم بر پدیده انفجار زیر آب

پس از وقوع انفجار زیر آب، موج ضربه‌ای از محل وقوع انفجار منتشر شده و به اطراف گسترش می‌یابد. در هر نقطه از سیال که موج به آن می‌رسد، فشار سیال به‌طور ناگهانی و در زمان کوتاهی (کمتر از  $10^{-7}$  ثانیه) به مقدار بیشینه  $P_m$  افزایش می‌یابد و سپس با تابعی تقریباً نامی می‌رود. فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه‌ای بر حسب زمان با نماد  $P(t)$  نشان داده می‌شود. رابطه فشار بر حسب زمان معمولاً به شکل رابطه تجربی (۱) بیان می‌شود، که  $P_m$  و  $\theta$  مطابق روابط (۲) و (۳) داده شده‌اند. لازم به ذکر است که  $W$  وزن ماده منفجره معادل TNT بر حسب کیلوگرم،  $S$  فاصله هر نقطه از محل انفجار بر حسب متر،  $P_m$  بر حسب مگاپاسکال و  $\theta$  بر حسب  $\frac{kg^{0.5}}{m^{4.5}}$  می‌باشد [۱۳].

$$P(t) = P_m \cdot e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} \quad (1)$$

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/5}}{S}\right)^{1.13} \quad (2)$$

$$\theta = 96.5 \left(W^{1/5}\right) \left(\frac{W^{1/5}}{S}\right)^{-0.22} \quad (3)$$

با توجه به انعکاس موج انفجار از روی صفحه، فشار کلی اعمالی بر صفحه با توجه به تعامل سازه و سیال از رابطه (۴) بر اساس تئوری صفحه‌ی تیلور محاسبه می‌گردد.

$$P_t = 2 \times P(t) - (\rho c v(t) / \sin \phi) \quad (4)$$

در این رابطه  $v(t)$  میدان سرعت القا شده،  $Z$  نسبت وزن مخصوص سازه و  $\phi$  زاویه حمله موج ضربه‌ای، مطابق روابط زیر می‌باشد.

$$v(t) = (2P_m / (\rho c (z-1))) [e^{(-t/(z\theta))} - e^{(-t/\theta)}] \quad (5)$$

$$z = m / \rho c \theta \quad (6)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{R_0}{R} \right) \quad (7)$$

هم‌چنین  $\rho$  چگالی سیال،  $c$  سرعت صوت در سیال و  $m$  جرم بر واحد سطح سازه می‌باشد.  $P_t$  در واقع فشار کلی اعمال شده به مرکز سطح سازه در طول مدت انفجار می‌باشد که در تحلیل اجزا محدود از آن استفاده شده است [۱۴].

## ۳. مشخصات و نتایج تست‌های تجربی

برای بررسی اثر مقدار خرج بر تغییر فرم صفحه فولادی تحت بار انفجار زیر آب و به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار ABAQUS، مشخصات یک‌سری تست تجربی انجام گرفته توسط رام‌جی، استخراج شده و در نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. در این تست‌ها صفحه فولادی مستطیلی به ابعاد  $0.25 \times 0.3$  متر و ضخامت ۲ میلی‌متر و با تکیه‌گاه گیردار در حالی که پشت صفحه هوا قرار دارد (شکل ۳)، مورد استفاده گرفته است و ماده منفجره به وزن ۱۰ تا ۶۰ گرم در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از مرکز صفحه قرار دارد. جهت انجام تست، مجموعه نشان داده شده در شکل (۲) در درون آب دریا قرار می‌گیرد. مشخصات صفحه فولادی مطابق جدول (۱) می‌باشد.



شکل ۲. قاب نگهدارنده صفحه فولادی [۱۴]

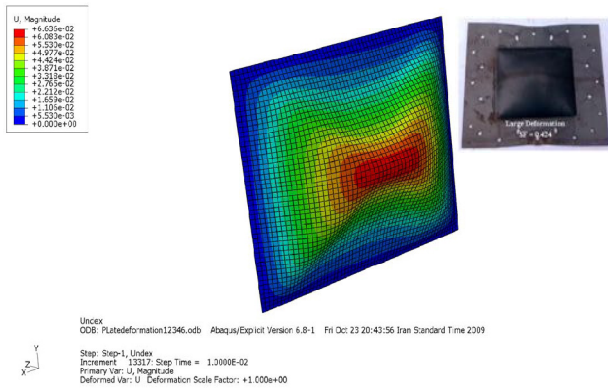
جدول ۱. مشخصات صفحه فولادی [۱۴]

|                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| مدول الاستیسیته (E)<br>(مگاپاسکال) | ۲/۱ × ۱۰ <sup>۵</sup> |
| ضریب پواسون                        | ۰/۳                   |
| چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )         | ۷۸۶۰                  |
| تنش تسلیم (مگاپاسکال)              | ۳۰۰                   |
| تنش زوال (مگاپاسکال)               | ۳۸۰                   |

نتایج ۶ تست در فاصله ثابت ۱۵ سانتی‌متر و مقدار خرج از ۱۰ تا ۶۰ گرم مطابق جدول (۲) برای تغییر فرم دائمی مرکز صفحه و شکافکتور مربوطه داده شده است [۱۴].

جدول ۲. نتایج تست تجربی [۱۴]

| تغییر فرم دائمی مرکز صفحه (cm) | شاک فاکتور $(0.45 \times W^{0.5} / R)$<br>$(kg^{0.5} / m)$ | فاصله (R)Standoff (cm) | وزن ماده منفجره TNT (W) (gr) | شماره تست |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------|
| ۴                              | ۰/۳                                                        | ۱۵                     | ۱۰                           | ۱         |
| ۵/۷۸                           | ۰/۴۲۴                                                      | ۱۵                     | ۲۰                           | ۲         |
| ۶/۷۷                           | ۰/۵۲۰                                                      | ۱۵                     | ۳۰                           | ۳         |
| ۸/۶۴                           | ۰/۶                                                        | ۱۵                     | ۴۰                           | ۴         |
| ۱۰/۷۸                          | ۰/۶۷۱                                                      | ۱۵                     | ۵۰                           | ۵         |
| ۱۲/۵                           | ۰/۷۳۵                                                      | ۱۵                     | ۶۰                           | ۶         |



شکل ۳. کانتور تغییر فرم صفحه فولادی و نمونه تست تجربی به ازاء وزن خرج ۲۰ گرم [۱۴]

جدول ۳. نتایج تست تجربی و حل عددی [۱۴]

| تغییر فرم دائمی مرکز صفحه (سانتی‌متر) | تغییر فرم دائمی تجربی (cm) | فاصله (R)Standoff (cm) | وزن ماده منفجره TNT (W) (gr) | شماره تست |
|---------------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|-----------|
|                                       |                            |                        |                              |           |
| ۳۳۴                                   | ۷۵۰                        | ۳۰۰۰                   | ۳/۹۵                         | ۱         |
| ۳/۸۸۹                                 | ۳/۸۶۵                      | ۴                      | ۱۵                           | ۱         |
| ۶/۳۴                                  | ۶/۴۷۲                      | ۶/۶۵                   | ۵/۷۸                         | ۲         |
| ۸/۳۸۷                                 | ۷/۸۵۹                      | ۷/۹۱                   | ۶/۷۷                         | ۳         |
| ۹/۷۴۶                                 | ۸/۷۹۸                      | ۹/۶۷۱                  | ۸/۶۴                         | ۴         |
| ۱۱/۴۷                                 | ۱۰/۶۸                      | ۱۲/۲۳                  | ۱۰/۷۸                        | ۵         |
| ۱۳/۹                                  | ۱۲/۷۵                      | ۱۲/۶۸                  | ۱۲/۵                         | ۶         |

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. تحلیل اثر مقدار خرج بر تغییر شکل صفحه فلزی

در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته با نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌سازی صفحه فولادی و سیال، به‌ترتیب با استفاده از المان‌های Shell Tri و AC3D4 (A4-node linear Acoustic Tetra Hereon) انجام شده است.

جهت ایجاد شرایط مرزی، ابتدا درجات آزادی حرکت در سه جهت اصلی (U1 و U2 و U3) در مرکز صفحه بسته شده، سپس در تمام وجوه سیال به جز وجه متصل به صفحه فلزی و وجه بالایی، شرط مرزی بدون انعکاس (Non-reflecting Boundary Condition) و روی وجه بالایی فشار جو (۱۰۱۵۳۹ پاسکال) اعمال گردیده است. لازم به ذکر است که اعمال شرط مرزی بدون انعکاس به منظور شبیه‌سازی سیال با محیط نیمه بی‌نهایت می‌باشد.

جهت بررسی اثر اندازه مش در تغییر فرم صفحه، مدل‌سازی صفحه با تعداد المان ۳۳۴ و ۷۵۰ و ۳۰۰۰ انجام گردید و در هر مورد تغییر فرم دائمی مرکز صفحه از حل عددی به‌دست آمده است. در شکل (۳) نمایی از صفحه‌ی تغییر فرم یافته برای وزن خرج ۲۰ گرم از حل عددی و تست تجربی نشان داده شده است. نتایج مقادیر عددی به دست آمده برای مقادیر مختلف خرج در جدول (۳) ارائه و با مقدار تجربی مقایسه شده است. با توجه به جدول (۳)، نتایج عددی مدل صفحه با تعداد المان ۷۵۰ تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد، حداکثر تفاوت موجود ۱۶٪ می‌باشد. تغییر فرم در راستای طولی صفحه حاصل از حل عددی و تست تجربی مطابق نمودارهای شکل (۴)، (۵) و (۶) برای وزن خرج‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ گرم نشان داده شده است. در این نمودارها نتایج حاصل از حل عددی و تست‌های تجربی مقایسه شده و تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

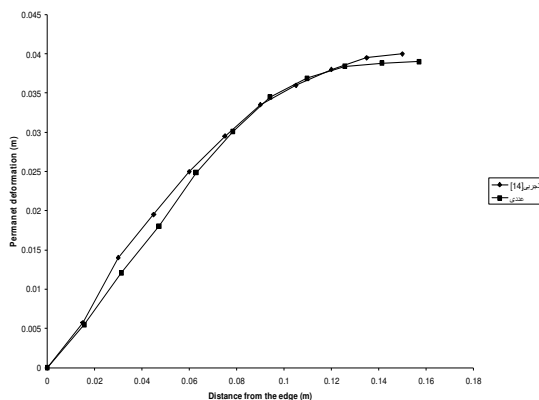
##### ۴-۲. تحلیل اثر فاصله محل انفجار و مقدار خرج بر فشار

###### بیشینه سیال

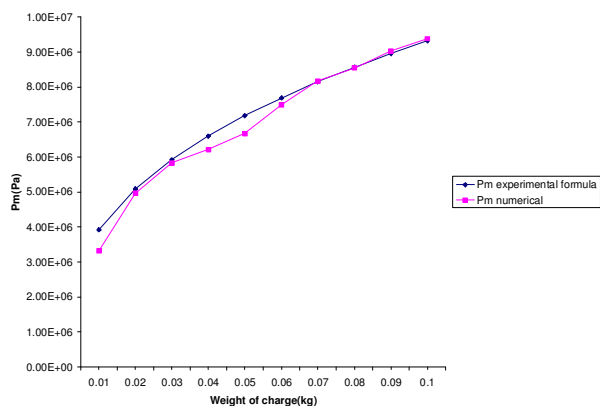
فشار بیشینه حاصل از موج ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب، وابسته به دو عامل مهم مقدار خرج و فاصله از محل انفجار R(Standoff) می‌باشد. برای بررسی این دو عامل و تعیین نقش آن در طراحی محفظه تست، مدل‌سازی یک محیط سیال به شکل مکعب مستطیل به ابعاد  $۱/۵ \times ۱/۵ \times ۰/۵$  متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر مقدار خرج بر فشار بیشینه، با تغییر مقدار خرج از ۱۰ تا ۱۰۰ گرم، فشار بیشینه ( $P_m$ ) حاصل از حل عددی به کمک نرم‌افزار ABAQUS با مقدار به‌دست آمده از رابطه (۱) برای نقطه‌ای از سیال به فاصله ۲ متر از محل انفجار به‌دست آمده و در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به شکل فوق، فشار بیشینه ( $P_m$ ) به‌دست آمده از حل عددی تطابق خوبی با نتایج به‌دست آمده از رابطه تجربی دارد.

برای بررسی اثر فاصله از محل انفجار بر فشار بیشینه ( $P_m$ )، با مقدار خرج ثابت ۱۰۰ گرم TNT، مدل سازی مسئله مشابه حالت قبل انجام گرفته و مقدار فشار در فواصل مختلف از حل عددی به کمک نرم افزار به همراه مقادیر حاصل از رابطه تجربی (۱) در نمودار شکل (۸) آورده شده است. در نمودار، مقدار فشار بر حسب فاصله، از حل عددی و رابطه تجربی مقایسه شده و تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد، به طوری که حداکثر اختلاف در حدود ۸٪ می‌باشد.

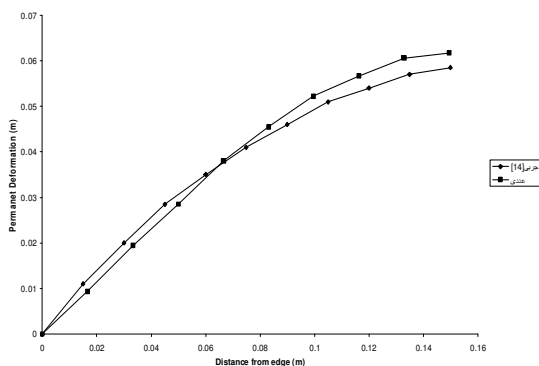
در شکل (۹) با برش مقطع مدل، کانتور فشار در سیال و نحوه انتشار جبهه موج، به ازاء وزن خرج ۱۰۰ گرم در فاصله‌های ۲/۰۵، ۲/۰۰۱۴ و ۲/۱۱ متر از محل انفجار نمایش داده شده است. همچنین نمودار فشار سیال بر حسب زمان برای فاصله Standoff ۲/۰۰۱۴ متر و ۱۰۰ گرم TNT در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



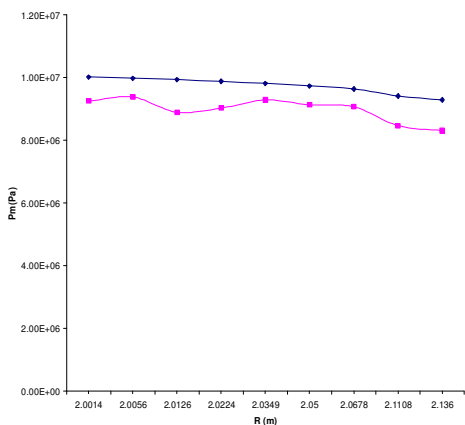
شکل ۴. مقادیر عددی و تجربی تغییر فرم بر حسب فاصله طولی از لبه صفحه برای ۱۰ گرم TNT



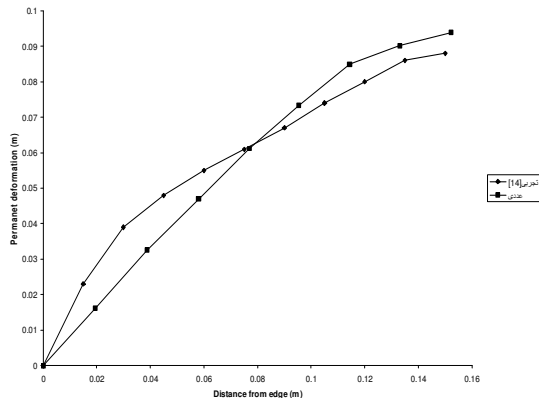
شکل ۷. نمودار مقایسه فشار بیشینه ( $P_m$ ) حاصل از حل عددی و رابطه تجربی در فاصله ۲ متری از محل انفجار به ازاء وزن‌های مختلف خرج



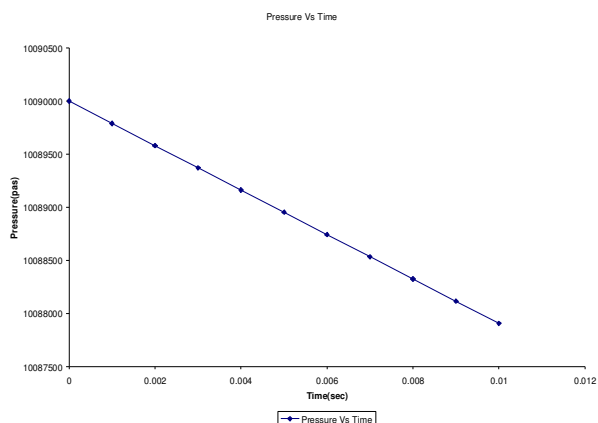
شکل ۵. مقادیر عددی و تجربی تغییر فرم بر حسب فاصله طولی از لبه صفحه برای ۲۰ گرم TNT



شکل ۸. نمودار مقایسه فشار بیشینه فشار تجربی و عددی به ازاء فواصل مختلف Standoff به ازاء ۱۰۰ گرم TNT



شکل ۶. مقادیر عددی و تجربی تغییر فرم بر حسب فاصله طولی از لبه صفحه برای ۴۰ گرم TNT



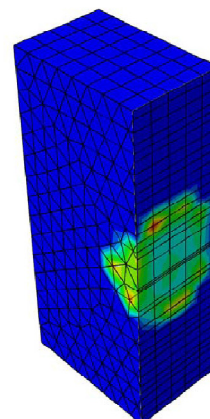
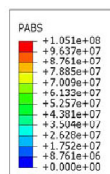
شکل ۱۰. نمودار فشار سیال بر حسب زمان برای فاصله Standoff ۲/۰۰۱۴ متر و ۱۰۰ گرم TNT

تطابق مناسب نتایج عددی با تجربی پیرامون چگونگی تغییر فشار سیال در پدیده انفجار زیر آب، نشان می‌دهد، اولاً این نرم‌افزار قابلیت مناسبی برای تحلیل مسائل انفجار زیر آب را دارد؛ ثانیاً روش مدلسازی و پارامترهای به کار رفته نیز کاربردی می‌باشد. لذا با انجام مراحل صحت‌سنجی فوق، از روش شبیه‌سازی مذکور در تحلیل و شبیه‌سازی محفظه تست انفجار زیر آب استفاده شده است.

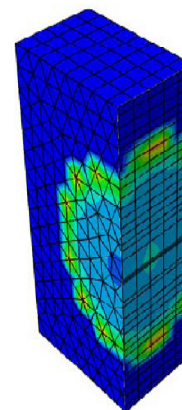
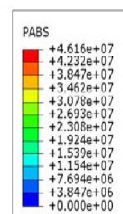
#### ۴-۳. ارزیابی طراحی اولیه محفظه تست انفجار زیر آب

با تحلیل صورت گرفته و شناخت اثرات مقدار و فاصله محل خرج بر فشار حاصل از انفجار زیر آب و اثرات آن بر تغییر فرم صفحه فلزی و صحت‌سنجی تحلیل‌های صورت گرفته با نتایج و روابط تجربی موجود و اطمینان حاصل شده نسبت به روند مدل‌سازی و پارامترها و ضرایب به کار گرفته شده در شبیه‌سازی عددی انفجار زیر آب، می‌توان از تجربیات حاصل شده در شبیه‌سازی و تحلیل محفظه تست انفجار کمک گرفت. بدین منظور بر اساس نیازمندی موجود، ابتدا طراحی اولیه استاتیکی محفظه استوانه‌ای فولادی به قطر ۴ و ارتفاع ۳ متر، بر مبنای فشار حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT بر مبنای روابط ساده مقاومت مصالح انجام گردید و با تعیین ضخامت لازم برای تحمل فشار وارده، مدل‌سازی محفظه در محیط نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته و طراحی اولیه ابتدا بدون تقویت‌کننده و سپس با اضافه کردن تقویت‌کننده در بستر محفظه، تحت اثر بار انفجار زیر آب تحلیل تنش شده و طرح مورد ارزیابی قرار گرفته است.

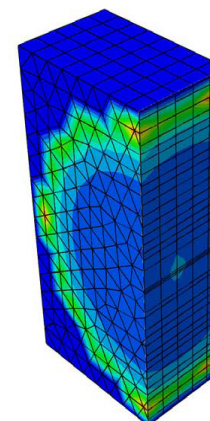
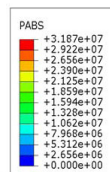
با توجه به وزن خرج و فاصله محل انفجار (محور استوانه) تا دیواره محفظه، از رابطه تجربی (۱) فشار بیشینه حاصل از انفجار تقریباً ۷/۷ مگاپاسکال به دست می‌آید. با انتخاب جنس فولاد T۶-۲۰۱۴ با مقاومت تسلیم دینامیکی ۴۳۸ مگاپاسکال با اعمال ضریب اطمینان ۲، با استفاده از تئوری فون‌میسز ضخامت لازم برای محفظه در طراحی استاتیکی، معادل ۵ سانتی‌متر به دست می‌آید [۱۵].



R= ۲/۰۰۱۴ m



R= ۲/۰۵ m



R= ۲/۱ m

شکل ۹. کانتور فشار سیال و انتشار جبهه موج در لحظات اولیه پس از انفجار به ازا فواصل مختلف R

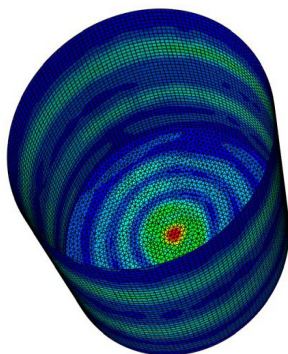
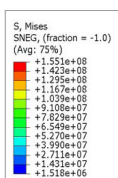
با توجه به ضخامت به دست آمده از طراحی استاتیکی، می توان محفظه با مشخصات ارائه شده در جدول (۴) را در نرم افزار ABAQUS مدل کرده و شبیه سازی عددی محفظه تحت بارگذاری انفجار زیر آب به کمک بخش Undex در آن را انجام داد. مدل سازی محفظه و سیال به ترتیب با استفاده از المان های Shell Tri و AC3D4 (A4-node linear Acoustic Tetra Hereon) انجام شده است. در این مدل سازی سیال درون محفظه و سازه به طور جداگانه مدل می شوند. محل قرارگیری خرج در مرکز استوانه و در فاصله ۲ متری از دیواره و ۱/۵ متری از بستر محفظه می باشد. در شکل (۱۱) نمایی از جزئیات مدل سازی نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات محفظه

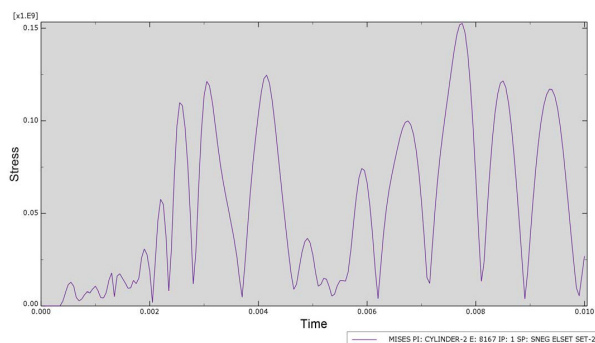
|                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| قطر                   | ۴ متر                    |
| ارتفاع                | ۳ متر                    |
| ضخامت                 | ۵ سانتی متر              |
| جنس                   | فولاد 2014-T6            |
| فشار داخلی            | ۷/۷۱۱ مگاپاسکال          |
| فشار خارجی            | ۱۰۱۳۲۰ پاسکال            |
| ضریب پواسون           | ۰/۳                      |
| تنش تسلیم<br>دینامیکی | ۴۳۸ مگا پاسکال           |
| چگالی                 | $7860 \text{ kg/m}^3$    |
| مدول الاستیسیته       | $210 \times 10^9$ پاسکال |

جدول ۵. مقادیر بیشینه تنش فون میسز به ازاء تعداد المان های مختلف

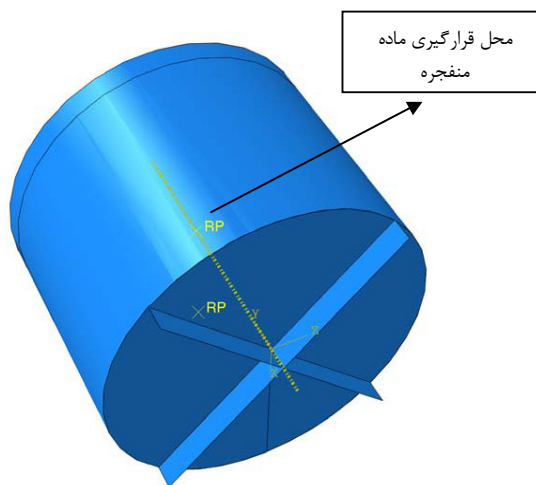
| شماره تحلیل | تعداد المان | بیشینه تنش فون میسز ( مگاپاسکال) |
|-------------|-------------|----------------------------------|
| ۱           | ۳۰۲۰        | ۱۲۴                              |
| ۲           | ۶۴۳۲        | ۱۴۰                              |
| ۳           | ۱۱۲۹۶       | ۱۵۵                              |
| ۴           | ۲۵۳۴۵       | ۱۵۴                              |



شکل ۱۲. کانتور تنش فون میسز محفظه در زمان  $7/75 \times 10^{-3}$  ثانیه



شکل ۱۳. منحنی تنش فون میسز بر حسب زمان در المان شماره ۱۰۲۰



شکل ۱۱. جزئیات مدل سازی محفظه و سیال

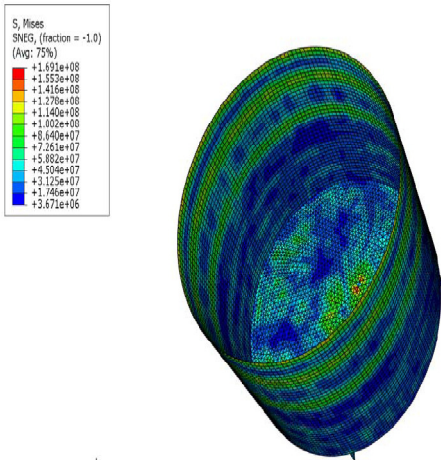
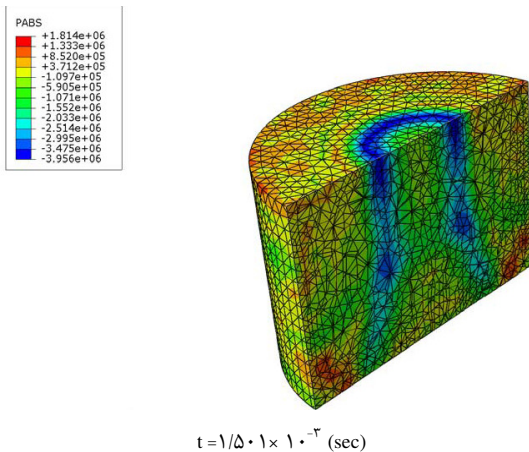
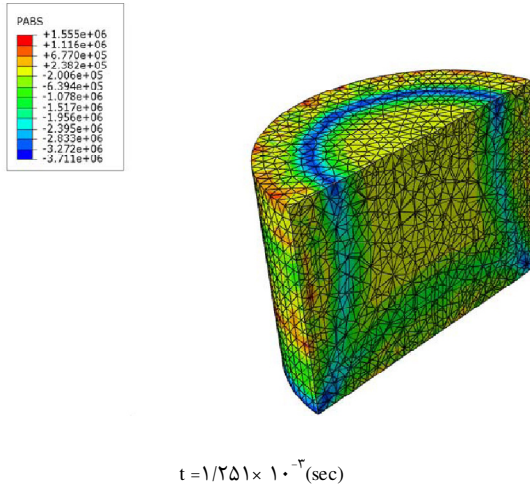
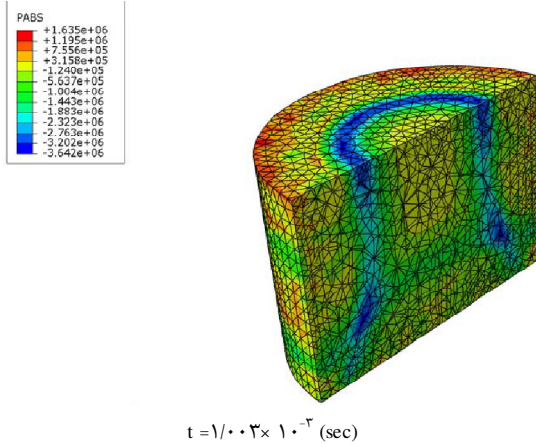


با مقایسه حداکثر تنش ایجاد شده با مقاومت تسلیم دینامیکی محفظه، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اطمینان ۲/۸۲ نسبت به تسلیم وجود داشته و انفجار ۱۰۰ گرم TNT نمی‌تواند سبب تسلیم و تغییر فرم دائمی محفظه گردد.

به منظور کاهش وزن محفظه در راستای اصلاح طرح اولیه، می‌توان مدل‌سازی محفظه را از حالت ساده به محفظه با تقویت‌کننده تغییر داد. این اصلاحیه باعث کاهش هزینه ساخت محفظه خواهد شد. برای این منظور، می‌توان از دو تقویت‌کننده طولی به منظور بالا بردن مقاومت سازه و هم‌چنین کمتر کردن ضخامت، استفاده کرد. بر این اساس ضخامت بدنه سیلندر به ۲ سانتی‌متر کاهش یافت و در مقابل، از ۲ تقویت‌کننده طولی در بستر محفظه به شکل عمود بر هم استفاده شده است. این تقویت‌کننده‌ها به عرض ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر طراحی شده‌اند.

با فرضیات فوق طرح جدید در نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. با توجه به نتایج، حداکثر تنش ایجاد شده در محفظه در زمان  $10^{-3} \times 7/75$  ثانیه به میزان ۱۶۹ MPa می‌باشد (شکل (۱۴)).

با اصلاح انجام شده در طراحی، وزن محفظه ۵۸٪ کاهش یافته و منجر به صرفه‌جویی در ساخت خواهد شد. با مقایسه حداکثر تنش ایجاد شده با تنش تسلیم دینامیکی محفظه، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اطمینان ۲/۵۹ نسبت به تسلیم وجود داشته و انفجار ۱۰۰ گرم TNT نمی‌تواند سبب تسلیم و تغییر فرم دائمی در محفظه تقویت شده گردد. تغییرات فشار در سیال و موج انعکاسی از سطح محفظه در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۵. تغییرات فشار در سیال و موج انعکاسی از سطح محفظه در زمان‌های بعد از انفجار

شکل ۱۴. کانتور تنش فون‌میسز محفظه تقویت شده در  $10^{-3} \times 7/75$  ثانیه

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور طراحی و ساخت یک محفظه جهت انجام تست‌های انفجار زیر آب و مطالعه این پدیده، تحلیل اثر مقدار خرج بر تغییر فرم صفحه فلزی و اثر فاصله و مقدار خرج بر بیشینه فشار ناشی از انفجار زیر آب به کمک نرم‌افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج عددی به‌دست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید. در تحلیل مسئله تغییر فرم صفحه فلزی، نتایج حل عددی با نتایج تجربی تطابق خوبی داشته و حداکثر تفاوت ۱۶٪ مشاهده شده است. در بررسی اثر مقدار و فاصله خرج بر بیشینه فشار نیز نتایج عددی به‌دست آمده از نرم‌افزار در اغلب موارد تطابق خوبی داشته و حداکثر تفاوت ۸٪ به‌دست آمده است. این مهم نشان می‌دهد که روند شبیه‌سازی، ضرایب و پارامترهای به‌کار رفته مناسب بوده و می‌تواند در شبیه‌سازی و مطالعه رفتار سازه‌هایی که تحت بار انفجار زیر آب قرار می‌گیرند، کاربرد داشته باشد.

انطباق مناسب نتایج عددی با نتایج تجربی صحت روش شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این روش در مطالعه رفتار سازه‌های تحت بار انفجار زیر آب کاربرد دارد. همچنین می‌تواند مبنای طراحی و شبیه‌سازی محفظه قرار گیرد. با طراحی اولیه محفظه به روش استاتیکی بر مبنای فشار بیشینه به‌دست آمده از روابط تجربی و معیار تسلیم ون-میزز ضخامت محفظه تخمین زده شده است. سپس محفظه و سیال در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و تحت فشار انفجار زیر آب طراحی اولیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج، محفظه نسبت به تسلیم و تغییر فرم دائمی ضریب اطمینان خوبی دارد. به‌علاوه به منظور کاهش وزن محفظه، به کمک تقویت‌های طولی ضخامت آن کاهش داده شد و طرح جدید مجدداً تحلیل تنش شده و مشخص گردید با استفاده از تقویت کننده طولی در بستر محفظه، وزن محفظه ۵۸٪ کاهش می‌یابد که مستقیماً در کاهش هزینه‌های ساخت محفظه موثر خواهد بود.

## ۶. مراجع

- [1]. Jen, C.; Tai, Y. S. "Deformation Behavior of a Stiffened Panel Subjected to Underwater Shock Loading Using the Non-Linear Finite Element Method."; *Material & Design* 2010, 31, 325-335.
- [2]. Cronin, D. S. "Implementation & Validation of Johnson-Halmquist Material Model in Ls-Dyna."; 4<sup>th</sup> European Ls-Dyna Users Conference, ULM, 2003.
- [3]. Mullin, M. J.; O'Tool, B. J. "Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures."; 8<sup>th</sup> Int. LS-Dyna Users Conference, Michigan, 2004.
- [4]. Brett, J. M. "Numerical Modeling of Shock Wave and Pressure Pulse Generation by Underwater Explosions."; DSTO-TR-0677, 1998.
- [5]. Ahmed, J.; Wong, K.; Porter, J. "Non-linear Dynamic Analysis Assessment of Explosively Loaded Submarine Hull Panels."; *Shock Vib Bull* 1990, 60, 139-170.
- [6]. Ramajeyathilagam, K.; Vendhan, C. P.; BhujangaRao, V. "Experimental and Numerical Investigations on Deformation of Cylindrical Shell Panels to Underwater Explosion."; *Shock Vib Bull* 2001, 8, 253-270.
- [7]. Sprague, M. A.; Geers, T. L. "A Spectral-Element/Finite Element Analysis of a Ship-Like Structure Subjected to an Underwater Explosion."; *Computational Method Applied Mechanics and Engineering* 2006, 196, 2149-2167.
- [8]. Olson, M. D.; Nurick, G. N.; Fagnan, J. R. "Deformation and Rupture of Blast Loaded Square Plates-Predictions and Experiments."; *International Journal of Impact Engineering* 1993, 13, 279-291.
- [9]. Cichocki, K. "Effect of Underwater Blast Loading on Structures with Protective Elements."; *International Journal of Impact Engineering* 1999, 22, 609-617.
- [۱۰]. مظاهری کیومرث و طاهری محمد، "شبیه‌سازی دینامیک حباب حاصل از انفجار زیر آب با استفاده از روش گودونوفی مرتبه سوم لاگرانژی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۳، صفحه ۳۸۹، ۱۳۸۲.
- [۱۱]. احمدی محمدتقی و پوربهبی محمدصادق، "مروری بر روش‌های تحلیل اندرکنش آب و سازه‌های دریایی ناشی از انفجار زیر آب"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۳، صفحه ۳۸۹، ۱۳۸۲.
- [12]. Keil, A. H. "Introduction to Underwater Explosion Research."; UERD, Norfolk Naval Ship Yard, Portsmouth, Virginia, 1956.
- [13]. Taylor, G. I. "The Pressure and Impulse of Submarine Explosion Wave on Plates."; *Underwater Explosion Research* 1941, 1, 1155-1173.
- [14]. Ramajeyathilagam, K.; Vendhan, C. P. "Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Subjected to Underwater Shock."; *International Journal of Impact Engineering* 2004, 30, 699-719.
- [15]. Shigley, J. E. "Mechanical Engineering Design."; McGraw-Hill: New York, 1986.