

ISME2011-XXXX

تحلیل اثر فاصله و وزن خرج بر فشار سیال در پدیده انفجار زیر آب

سید علی گله داری^۱، حسین خدارحمی^۲، علی اکبر کریمی^۳

^۱مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجوی دکتری، ali.galehdari@gmail.com

^۲تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشیار گروه مکانیک، hossein_khodarahmi@yahoo.com

^۳تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، استادیار گروه مکانیک، aliakbarakrimi@yahoo.com

چکیده

برت^۴ در یک پروژه تحقیقاتی که برای موسسه تحقیقات و تکنولوژی دفاعی استرالیا انجام داده است با استفاده از نرم افزار DYNA2D موج ضربه‌ای و امواج فشاری تولید شده در اثر انفجار زیر آب را مورد مطالعه قرار داده است [۲]. در این تحقیق پدیده‌هایی مانند حرکت موج انفجار در ماده منفجره، تولید و انتشار موج ضربه‌ای، نوسانات حباب و امواج فشاری ناشی از نوسانات حباب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا اثرات مقدار ماده منفجره و عمق محل انفجار بر روی پدیده‌های فوق‌الذکر بررسی شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل به کمک نرم‌افزار در رابطه با موج ضربه‌ای و امواج فشاری با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند. لازمه این تحقیقات انجام آزمون‌های تجربی و استفاده از نرم افزارهای 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.

در یک پروژه‌ی عملی، به منظور شناخت پدیده‌ی انفجار زیر آب و تحلیل اثرات بارگذاری ناشی از آن بر روی سازه‌های مختلف، طراحی و ساخت یک محفظه مورد توجه قرار گرفته است. 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 تجربه‌ی 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 و سایر موارد مورد تایید قرار گرفته است. پس از اطمینان از روند شبیه‌سازی، مدل اولیه‌ای از محفظه تست 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 بهره برداری قرار گیرد.

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 بطور ناگهانی و در زمان کوتاهی (کمتر از 10^{-7} ثانیه) به مقدار بیشینه P_m افزایش می‌یابد و سپس با تابعی تقریباً نمایی میرا می‌شود. فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه‌ای بر حسب

تحلیل اثر بارگذاری فشاری ناشی از انفجار زیر آب بر سازه‌های فلزی در محدوده‌ی متنوعی از مسائل از شکل‌دهی انفجاری صفحات تا مطالعه‌ی اثر انفجار بر بدنه‌ی کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و سازه‌های دریایی کاربرد داشته و مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، با هدف مطالعه پدیده انفجار زیر آب اثر وزن و فاصله خرج بر فشار بیشینه سیال به کمک نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن با نتایج و روابط تجربی موجود مقایسه شده و با دقت خوبی مورد تایید قرار گرفته است. با صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام گرفته، طراحی اولیه محفظه تست استوانه‌ای تحت اثر بار انفجار زیر آب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی

انفجار زیر آب، محفظه تست، شبیه‌سازی اجزاء محدود، ABAQUS

مقدمه

پدیده انفجار زیر آب از موضوعاتی است که در چند دهه اخیر مورد توجه محققین 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 و... نمونه‌هایی از کاربردهای پدیده انفجار زیر آب است. مطالعات تجربی و تحلیلی بر روی این موضوع از سال ۱۹۸۴ آغاز گردید. پیرامون موضوع انتشار موج فشاری در سیال، تئوری‌های کروود-برنکلی^۱، کروود-بث^۲ و پنی-داسگاپتا^۳ ارائه گردید. در این تئوری‌ها پس از حل معادله موج فرمول تاریخچه موج فشاری در سیال ارائه شده است. پس از انجام تست تجربی و اندازه‌گیری فشار سیال به صورت تجربی، نتایج تجربی با نتایج تحلیلی تئوری‌های ارائه شده، مقایسه شده است. تئوری کروود-برنکلی تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. این تئوری مبنای ارائه فرمول تجربی (۱) می‌باشد. [۱]

^۱- KIRWOOD-BRANKLEY

^۲- KIRWOOD-BETHE

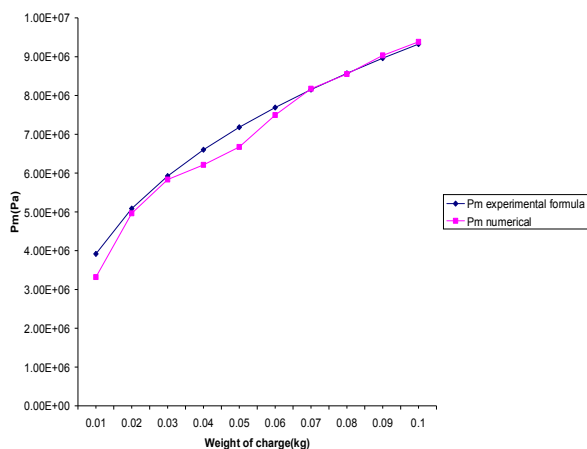
^۳- PENNEY-DASGUPTA

^۴- Brett

شکل (۱) نشان می‌دهد که فشار بیشینه (P_m) بدست آمده از حل عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج بدست آمده از رابطه تجربی دارد. بطوری که حداکثر اختلاف در حدود ۷٪ می‌باشد.

جدول ۱: مقادیر فشار بیشینه (P_m) حاصل از حل عددی و رابطه تجربی برای وزن های مختلف ماده منفجره

وزن ماده منفجره (W) TNT (گرم)	فشار بیشینه عددی (P_m) (پاسکال)	فشار بیشینه فرمول تجربی (P_m) (پاسکال)
۱۰	$3/32 \times 10^6$	$3/92 \times 10^6$
۲۰	$4/96 \times 10^6$	$5/09 \times 10^6$
۳۰	$5/83 \times 10^6$	$5/92 \times 10^6$
۴۰	$6/21 \times 10^6$	$6/60 \times 10^6$
۵۰	$6/67 \times 10^6$	$7/18 \times 10^6$
۶۰	$7/49 \times 10^6$	$7/69 \times 10^6$
۷۰	$8/17 \times 10^6$	$8/15 \times 10^6$
۸۰	$8/55 \times 10^6$	$8/57 \times 10^6$
۹۰	$9/03 \times 10^6$	$8/96 \times 10^6$
۱۰۰	$9/38 \times 10^6$	$9/32 \times 10^6$



شکل ۱: مقایسه فشار بیشینه (P_m) حاصل از حل عددی و رابطه تجربی به ازاء وزن های مختلف خرج

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 با مقادیر حاصل از رابطه تجربی (۲) در جدول (۲) مقایسه شده است.

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 θ مطابق روابط (۲) و (۳) داده شده‌اند. لازم به ذکر است که W وزن ماده منفجره معادل TNT و S فاصله هر نقطه از محل انفجار می‌باشد [۳].

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

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

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

با توجه به انعکاس موج انفجار از روی صفحه، فشار کلی اعمالی بر صفحه با توجه به تعامل سازه و سیال از رابطه‌ی (۴) با توجه به 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 ϕ زاویه حمله‌ی موج ضربه‌ای، مطابق روابط زیر می‌باشد.

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

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

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

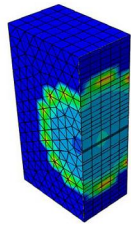
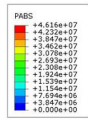
همچنین ρ چگالی سیال و m جرم بر واحد سطح سازه می‌باشد. P_t در واقع فشار کلی اعمال شده به مرکز سطح سازه در طول مدت انفجار می‌باشد که در تحلیل اجزا محدود از آن استفاده شده است [۴].

تحلیل اثر فاصله محل انفجار و مقدار خرج بر فشار بیشینه سیال

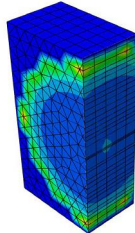
فشار بیشینه‌ی حاصل از موج ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب تحت اثر دو عامل مهم مقدار خرج و فاصله از محل انفجار R قرار دارد. برای بررسی این دو عامل و تعیین نقش آن در طراحی محفظه‌ی تست، مدل سازی یک محیط سیال به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $1/5 \times 1/5 \times 1/5$ متر در نظر گرفته شده است.

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 نرم افزار ABAQUS با مقدار بدست آمده از رابطه (۲) برای نقطه‌ای از سیال به فاصله ۲ متر از محل انفجار بدست آمده و در جدول (۱) ارائه شده است.

^۱Standoff



R= 2/0.5 m



R= 2/11 m

شکل ۳: کانتور فشار سیال در لحظات اولیه پس از انفجار به ازاء فواصل مختلف R

تطابق مناسب نتایج عددی با تجربی پیرامون چگونگی تغییر فشار سیال در پدیده انفجار زیر آب، نشان می دهد، اولاً این نرم افزار در تحلیل مسائل انفجار زیر آب قابلیت خوبی دارد. ثانیاً روش مدل سازی و حل عددی انجام شده نیز مورد تایید می باشد. لذا با انجام مراحل صحت سنجی فوق، از این نرم افزار در تحلیل و طراحی محافظه تست انفجار زیر آب استفاده شده است.

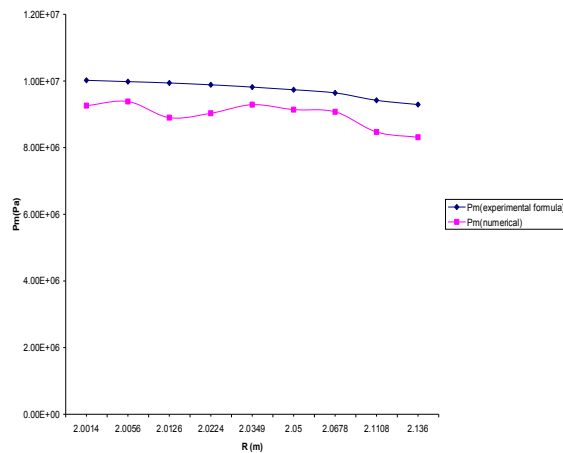
ارزیابی طراحی اولیه محافظه تست انفجار زیر آب

با تحلیل صورت گرفته و شناخت اثرات مقدار و فاصله محل خرج بر فشار حاصل از انفجار زیر آب و صحت سنجی تحلیل های صورت گرفته با نتایج و روابط تجربی موجود و اطمینان حاصل شده نسبت به روند مدل سازی و پارامترها و ضرایب بکار گرفته شده در شبیه سازی عددی انفجار زیر آب، می توان از تجربیات حاصل شده در طراحی و تحلیل محافظه تست انفجار کمک گرفت. بدین منظور بر اساس نیازمندی موجود، ابتدا طراحی اولیه استاتیکی محافظه استوانه ای فولادی به قطر ۴ و ارتفاع ۳ متر، بر مبنای فشار حاصل از انفجار ۱۰۰ گرم TNT انجام گردید و با تعیین ضخامت لازم برای تحمل فشار وارده، مدل سازی محافظه در نرم افزار ABAQUS انجام گرفته و طراحی اولیه ابتدا بدون تقویت و سپس با اضافه کردن تقویت های طولی، 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 (مرکز صفحه) تا دیواره محافظه، از رابطه تجربی (۲) فشار بیشینه حاصل از انفجار تقریباً ۷/۷ مگاپاسکال بدست می آید. با انتخاب جنس فولاد T۶-۲۰۱۴ با مقاومت تسلیم دینامیکی ۴۳۸ مگاپاسکال و با اعمال ضریب اطمینان ۲، با استفاده از تئوری ون میزس ضخامت لازم برای محافظه در طراحی استاتیکی معادل ۵ سانتی متر بدست می آید.

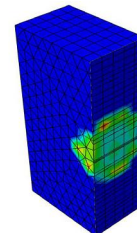
فاصله Standoff (متر)	فشار بیشینه عددی (P _m) (پاسکال)	فشار بیشینه فرمول تجربی (P _m) (پاسکال)
۲/۰۰۱۴	۹/۲۶×۱۰ ^۶	۱/۰۰۹×۱۰ ^۷
۲/۰۰۵۶	۹/۳۸×۱۰ ^۶	۹/۹۸×۱۰ ^۶
۲/۰۱۲۶	۸/۹۰×۱۰ ^۶	۹/۹۴×۱۰ ^۶
۲/۰۲۲۴	۹/۰۳×۱۰ ^۶	۹/۸۹×۱۰ ^۶
۲/۰۳۴۹	۹/۲۹×۱۰ ^۶	۹/۸۲×۱۰ ^۶
۲/۰۵	۹/۱۴×۱۰ ^۶	۹/۷۴×۱۰ ^۶
۲/۰۶۷۸	۹/۰۸×۱۰ ^۶	۹/۶۴×۱۰ ^۶
۲/۱۱۰۸	۸/۴۷×۱۰ ^۶	۹/۴۲×۱۰ ^۶
۲/۱۳۶	۸/۳۱×۱۰ ^۶	۹/۳۹×۱۰ ^۶

جدول ۲: مقایسه عددی و تجربی فشار بیشینه برای فواصل مختلف R در نمودار شکل (۲) مقدار فشار بر حسب فاصله، از حل عددی و رابطه تجربی مقایسه شده و تطابق نسبتاً خوبی را نشان می دهد. بطوری که حداکثر اختلاف در حدود ۱۰٪ می باشد.



شکل ۲: مقایسه بیشینه فشار تجربی و عددی برای فواصل مختلف به ازاء ۱۰۰ گرم TNT

در شکل (۳) با برش مقطع مدل، کانتور فشار در سیال و نحوه انتشار جبهه موج، به ازاء وزن خرج ۱۰۰ گرم در فاصله های ۲/۰۰۱۴، ۲/۰۰۵، و ۲/۱۱ متر از محل انفجار نمایش داده شده است.



R= 2/0.014 m

با مقایسه حداکثر تنش ایجاد شده با مقاومت تسلیم محفظه، می توان نتیجه گرفت که ضریب اطمینان ۲/۶ نسبت به تسلیم وجود داشته و انفجار ۱۰۰ گرم TNT نمی تواند سبب تسلیم و تغییر فرم دائمی در محفظه گردد.

نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور طراحی و ساخت یک محفظه جهت انجام تست های انفجار زیر آب، اثر فاصله و مقدار خرج بر بیشینه فشار ناشی از انفجار زیر آب به کمک نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید. در بررسی اثر مقدار و فاصله خرج بر بیشینه فشار نیز نتایج عددی بدست آمده از نرم افزار در اغلب موارد تطابق خوبی داشته و حداکثر تفاوت ۸٪ بدست آمده است. این مهم نشان می دهد روند شبیه سازی، ضرایب و پارامترهای بکار رفته مناسب بوده و می تواند مبنای طراحی محفظه قرار گیرد. با طراحی اولیه محفظه به روش استاتیکی بر مبنای فشار بیشینه بدست آمده از روابط تجربی و معیار تسلیم ون میز ضخامت محفظه تخمین زده شده است. سپس محفظه و سیال در نرم افزار مدل سازی شده و تحت فشار انفجار زیر آب طراحی اولیه مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد نسبت به تسلیم و تغییر فرم دائمی ضریب اطمینان خوبی دارد.

مراجع

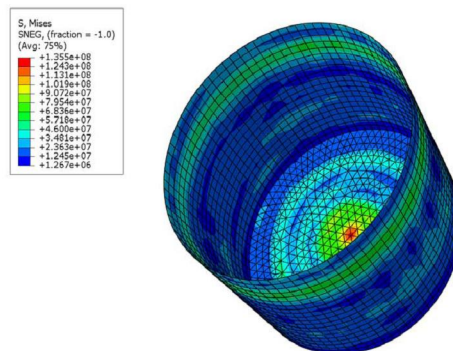
- [1] Cole R.H., "Underwater Explosions", Princeton University press, 1948.
- [2] Brett J.M., "Numerical Modelling of shock wave and pressure pulse generation by under water explosions", DSTO-TR-O677, 1998
- [3] Taylor G.J., "The Pressure and Impulse of submarine explosion wave on Plates" Keil A.H., "Introduction to underwater explosion research" UERD, Norfolk Naval ship yard, Portsmouth, Virginia, 1956.
- [4] K. Ramajeyathilagam, C.P. Vendhan, " Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock", International Journal of Impact Engineering, Vol.30, pp.699-719, 2004

با توجه به ضخامت بدست آمده از طراحی استاتیکی می توان محفظه با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) را در نرم افزار ABAQUS مدل کرد. شبیه سازی عددی محفظه تحت بار گذاری انفجار زیر آب در نرم افزار ABAQUS و به کمک بخش Undex انجام می پذیرد. مدل سازی محفظه و سیال به ترتیب با المان های AC3D4, Shell Tri (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 محیط استوانه می باشد.

جدول ۳: مشخصات محفظه

قطر	۴ متر
ارتفاع	۳ متر
ضخامت	۵/۱۷ سانتی متر
جنس	فولاد T۶-۲۰۱۴
فشار داخلی	۷/۷۱۱ مگاپاسکال
فشار خارجی	۰/۱ مگا پاسکال
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم دینامیکی	۴۳۸ مگا پاسکال
چگالی	7860 kg/m^3
مدول الاستیسیته	210×10^3 مگا پاسکال

کانتور بیشترین تنش ون میزز وارد بر محفظه در زمان $7/5 \times 10^{-3}$ ثانیه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۴: کانتور تنش ون میزز در زمان $7/5 \times 10^{-3}$ ثانیه