



شبیه سازی پدیده انفجار زیر آب

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

تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشگاه امام حسین(ع)، دانشکده فنی، مرکز تحقیقات بالستیک ضربه و انفجار

Ali_ila84@yahoo.com

چکیده

موضوع پدیده انفجار زیر آب و اثر آن بر روی سازه ها، در چند دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. این موضوع در مطالعه اثر انفجار زیر آب بر بدنه کشتی ها، زیر دریایی ها و... کاربردهای متنوعی دارد. در این مقاله شبیه سازی عددی پدیده انفجار زیر آب با استفاده از مدول Undex نرم افزار ABAQUS انجام گرفته و در یک مثال عملی نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است، که انطباق خوبی را نشان می دهد. در نتیجه روش پیشنهادی کاربرد موثری در تحلیل و شبیه سازی سازه ها در مقابل بار ناشی از انفجار زیر آب خواهد داشت.

واژه های کلیدی: انفجار زیر آب، موج ضربه ای، شبیه سازی اجزاء محدود، ABAQUS

۱- مقدمه

پدیده انفجار زیر آب از موضوعاتی است که در چند دهه ی اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. حل مسائل انفجار زیر آب کاربرد های متنوعی در صنایع مختلف پیدا نموده است. شکل دهی انفجاری زیر آب، سازه های دریایی تحت بار انفجاری، اثر انفجار مین دریایی بر سازه کشتی و... نمونه هایی از کاربرد پدیده ی انفجار زیر آب می باشد. از جمله روش های عددی که در مطالعه انفجار زیر آب مورد استفاده قرار گرفته است، روش اجزا محدود می باشد. با توجه به توانایی این روش در شبیه سازی پدیده های فیزیکی در محیط های جامد و سیال بعضی از نرم افزارهای تجاری موجود که بر اساس روش اجزا محدود تهیه شده اند، پدیده انفجار زیر آب و اثر آن بر سازه ها را نیز مدل سازی می کنند. از جمله این نرم افزارها می توان از ABAQUS، AYN2D نام برد. آقای Brett در یک پروژه تحقیقاتی که برای موسسه تحقیقات و تکنولوژی دفاعی استرالیا انجام داده است با استفاده از نرم افزار DYNA2D موج ضربه ای و امواج فشاری تولید شده در اثر انفجار زیر آب را مورد مطالعه قرار داده است [5]. لازمه این تحقیقات انجام آزمون های تجربی و استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی جهت مطالعه پدیده هایی چون موج ضربه ای، امواج فشاری و جت پر سرعت آب می باشد [1]. با توجه به هزینه بالای انجام آزمون در مقیاس واقعی استفاده از محفظه استوانه ای به منظور انجام آزمون در مقیاس کوچک رایج است. بمنظور مطالعه اثر این پدیده بر روی سازه مجاور، شبیه سازی پدیده به کمک نرم افزار ABAQUS انجام شده است.

۲- تئوری پدیده

موج ایجاد شده پس از انفجار تابعی از اندازه فشار و جابجایی سیال می باشد و بصورت ضربه ای و با سرعتی چند برابر سرعت صوت در آب حرکت می کند. مدت زمان گذر موج از هر مکان سیال از مرتبه میلی ثانیه می باشد. از طرفی نوسانات حباب گاز ایجاد شده در اثر افزایش فشار ناگهانی اولیه، انتشار انرژی به فرم امواج فشاری را در پی دارد که بصورت شعاعی از محل انفجار به تمام جهات منتشر می گردد. توالی پدیده هایی که در انفجار زیر آب اتفاق می افتد، عبارتند از:

الف) انتشار موج ضربه ای اولیه با دامنه زیاد و زمان ماندگاری کم

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۲ دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۳ استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)



ب) انتشار امواج فشاری در اثر نوسانات حباب با دامنه کمتر نسبت به موج ضربه ای و با زمان ماندگاری زیادتر نسبت به زمان ماندگاری موج ضربه ای

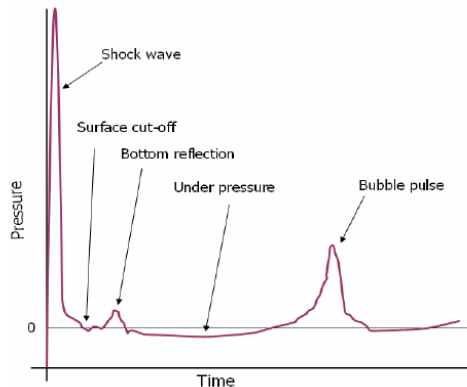
پ) پدید آمدن جت بر سرعت سیال که به سازه مجاور برخورد می کند.

مطالعات انجام شده هر کدام بنا بر کاربرد مورد نظر به یک دو یا سه مورد فوق پرداخته اند.

این واقعیت که آب یک سیال دارای قابلیت تراکم پذیری می باشد باعث می شود که فشار ایجاد شده در یک نقطه از آن بصورت موج منتشر گردد.

در این حالت اگر امواج بصورت امواج تخت در نظر گرفته شوند دامنه امواج نسبتاً ثابت می ماند، اما اگر امواج در تمامی جهات بصورت کروی پخش شوند دامنه امواج نسبت به فاصله از منبع تولید موج کاهش یافته و اصطلاحاً موج میرا می گردد.

مطابق شکل ۱ پس از تکمیل پدیده انفجار فشار ایجاد شده (که در حدود چند هزار اتمسفر است) به آب اعمال می شود و باعث ایجاد موج ضربه ای در آب و حرکت آب در تمامی جهات به سمت مخالف محل انفجار می شود. فشار زیاد اولیه ناشی از انفجار پس از انتشار موج ضربه ای بصورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد، اما این فشار هنوز خیلی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک محل وقوع انفجار است. همین فشار بالا باعث می شود که به آب سرعتی در جهت خلاف محل انفجار بدهد. در اثر این حرکت آب شعاع کره گازی (حباب) با نرخ نسبتاً زیادی افزایش می یابد.



شکل ۱: نمودار توزیع فشار-زمان در پدیده انفجار زیر آب [1]

انبساط حباب و افزایش شعاع آن تا زمان نسبتاً زیادی (نسبت به مقیاس زمانی حرکت موج ضربه ای) ادامه می یابد و فشار داخلی حباب در اثر افزایش حجم کاهش می یابد. انبساط حباب حتی بعد از زمانی که فشار داخل آن به فشار هیدرواستاتیک آب و فشار اتمسفر می رسد (به علت اینرسی) ادامه می یابد و در نتیجه فشار داخل حباب از فشار تعادل اطراف آن کمتر می شود. در اثر این کاهش فشار داخل حباب حرکت میان اطراف حباب عکس شده و حجم حباب شروع به کاهش می کند و در نتیجه فشار درون آن افزایش می یابد. همینکه حباب تا حد قابل فشردن فشرده شده فشار بالا موجب انفجار و انبساط مجدد آن شده و موج شوک دوم منتشر می گردد. این موج شوک دوم پاس حباب نامیده می شود.

لازم به ذکر است فشارهای ماکزیمم در پالس های فشاری در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشار ماکزیمم در موج ضربه ای اولیه هستند. اما زمان ماندگاری آنها بیشتر از زمان ماندگاری موج ضربه ای اولیه است. در رابطه با پالس های فشاری این نکته قابل ذکر است که دوری و یا نزدیکی محل وقوع انفجار، تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی شکل پالس دارد. که علت این امر انعکاس و برگشت پالس های فشاری از روی سطوح در مجاورت محل انفجار و ترکیب آنها با پالس های ناشی از نوسانات می باشد [2].

۲-۱- معادلات تجربی حاکم بر پدیده انفجار زیر آب

هنگامی که موج ضربه ای از نقطه ای از سیال عبور می کند. در این نقطه فشار بطور ناگهانی به مقدار بیشینه خود P_m افزایش می یابد (در زمانی کمتر از ۷-۱۰) و بطور تقریبی با تابعی نمایی میرا می شود، که همان فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه ای است و با نماد $P(t)$ نشان داده می شود. رابطه فشار بر حسب زمان معمولاً بشکل رابطه تجربی (۱) بیان می شود، که P_m و θ مطابق روابط (۲) و (۳) داده شده اند. لازم به ذکر است که W وزن ماده منفجره معادل TNT و S فاصله هر نقطه از محل انفجار می باشد [3].



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

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

$$\theta = 96.5 \left(W^{1/2}\right) \left(\frac{W^{1/2}}{S}\right)^{-0.22} \quad (3)$$

در هر لحظه سیال با سرعت $v(t)$ در راستای انتشار موج و متناسب با انتقال فشار تحت تاثیر قرار می‌گیرد:

$$P(t) = \rho c \cdot v(t) \quad (4)$$

میدان سرعت القاء شده برای موج ضربه‌ای کروی عبارتست از:

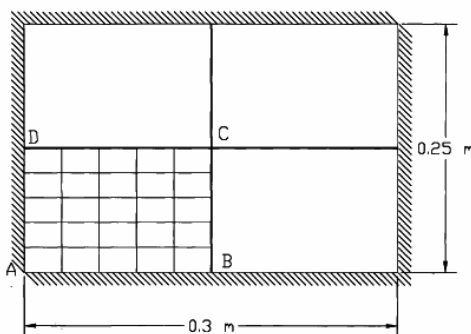
$$v(t) = \frac{p(t)}{\rho c} + \frac{1}{\rho S} \int_0^t P(t) dt \quad (5)$$

به ازای مقادیر کم ماده منفجره، تغییر فرم صفحه در ناحیه الاستیک می‌باشد.

۴- شبیه سازی پدیده ی انفجار زیر آب به کمک نرم افزار ABAQUS

به منظور صحت سنجی شبیه سازی نتایج یک تست تجربی [4] که به مطالعه ی اثر انفجار زیر آب بر روی یک صفحه ی مستطیلی می پردازد، با نتایج عددی خروجی از نرم افزار مقایسه خواهد شد.

۴-۱- تعریف مسئله



شکل ۲: صفحه ای با ابعاد $0.3 \times 0.25 \times 0.002 m^3$ از جنس فولاد

مطابق شکل ۳ در یک فریم قرار گرفته است و در عمق خاصی از دریا بارگذاری انفجار زیر آب بر روی آن انجام شده است. وزن ماده ی منفجره ی TNT انتخاب شد ۸۰ گرم می‌باشد که در فاصله ی ۱۵ سانتی متری از مرکز صفحه قرار دارد.



شکل ۳: فریم نگهداری صفحه فولادی

پس از انجام تست های مختلف، برای وزن های مختلف خرج، تغییر فرم در مرکز صفحه مطابق جدول ۱ بدست آمده است. جهت صحت سنجی عددی این پدیده، صفحه ی مذکور در محیط نرم افزار ABAQUS مدل سازی می‌شود و نتایج خروجی از آن با نتایج جدول ۱ مقایسه خواهد شد.



جدول ۱: نتایج تست

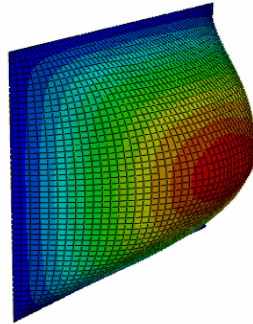
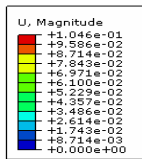
Permanent central deformation (experimental)							
Sl.no.	Test no.	Charge weight (W) ($\times 10^{-3}$ kg)	Stand-off distance (R) (m)	SF ($0.45 \times W^{1/2}/R$) ($\text{kg}^{1/2}/\text{m}$)	Permanent deformation (m)	Deformation-thickness ratio	Failure mode
1	TS1	10	0.15	0.300	0.040	20.0	Mode I
2	TS2	20	0.15	0.424	0.0578	28.9	Mode I
3	TS3	30	0.15	0.520	0.0677	33.85	Mode I
4	TS4	40	0.15	0.600	0.0864	43.2	Mode II*
5	TS5	50	0.15	0.671	0.1078	53.9	Mode IIa
6	TS6	60	0.15	0.735	0.125	62.5	Mode IIc
7	TS7	70	0.15	0.794	a	a	Mode IIc
8	TS8	80	0.15	0.849	a	a	Mode III
9	TS9	80	0.15	0.849	a	a	Mode III

^aPermanent deformation could not be measured.

۴-۲-مدل سازی

ابتدا صفحه‌ای مستطیلی با ابعاد مذکور به شکل مستطیل مدل سازی می شود، سپس سیال جلوی سازه به تنهایی مدل سازی می شود. به منظور مدل سازی سیال جلوی سازه، باید یک سیال مکعب مستطیل به ابعاد $2.2 \times 2.5 \times 2m^3$ در نظر گرفته شده است. دلیل بزرگی ابعاد مکعب مستطیل نسبت به ابعاد صفحه این است که پدیده شباهت نزدیکی با پدیده انفجار در زیر آب دریا را داشته باشد. چون در این مسئله در پشت صفحه هوا می باشد، در پشت سازه قطعه ای طراحی نمی گردد. پس از تعریف خواص صفحه فولادی برای نرم افزار و ایجاد Section مربوطه، باید قطعات ایجاد شده اسمبل شوند پس از این مرحله، باید قطعات ایجاد شده شبکه بندی شوند. سیال با سایز مش 0.1 و صفحه با سایز مش 0.1 شبکه بندی می گردد. در ایجاد مدل step، لازم به ذکر است که زمان 0.1 ثانیه، و در قسمت خروجی های وابسته به مکان، Set مربوطه و خروجی Displacement انتخاب شده است.

برای ایجاد Interaction پس از انتخاب نقاط Source و Standoff، سطوح جلو و عقب سیال با نرمال های $(0,0,1)$ و $(0,0,-1)$ مشخص شده است. وزن خرج 0.06 کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در قسمت Bubble Model، در گزینه‌ی Time duration همان عدد 0.1 و در منوی اصلی تعامل در قسمت Reference Magnitude عدد 1 تایپ شده است. برای ایجاد اتصال بین سیال و صفحه، سطح خارجی صفحه با نرمال $(0,0,1)$ را به عنوان Slave Surface و سطح بزرگ خارجی سیال با نرمال $(0,0,-1)$ به عنوان Master Surface انتخاب شده است. جهت ایجاد شرایط مرزی، باید درجات آزادی حرکت در سه جهت اصلی ($U1$ و $U2$ و $U3$) مرز صفحه بسته شود. پس از مدل سازی و تحلیل، کانتور های تغییر فرم صفحه فولادی به ازاء وزن های مختلف بدست آمد. در شکل های ۴ و ۵ کانتور تغییر فرم صفحه فولادی به ازاء وزن خرج 60 گرم در زمان های 0.012 و 0.1 ثانیه و 0.1 ثانیه نشان داده شده است.



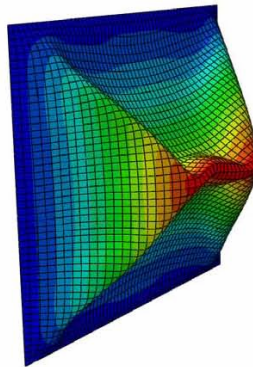
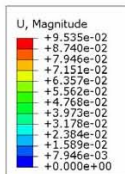
Index
ODB: PLatedormation1234617.odb Abaqus/Explicit Version 6.8-1 Wed Sep 23 12:53:36 Iran Standard Time 2009



Step: Step-1, Under
Increment: 2304; Step Time = 1.2002E-03
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

شکل ۴: کانتور تغییر فرم صفحه فولادی به ازاء وزن خرج ۶۰ گرم در زمان ۰/۰۱۲ ثانیه

Printed using Abaqus/CAE on: Wed Sep 23 14:14:44 Iran Standard Time 2009



Index
ODB: PLatedormation1234617.odb Abaqus/Explicit Version 6.8-1 Wed Sep 23 12:53:36 Iran Standard Time 2009



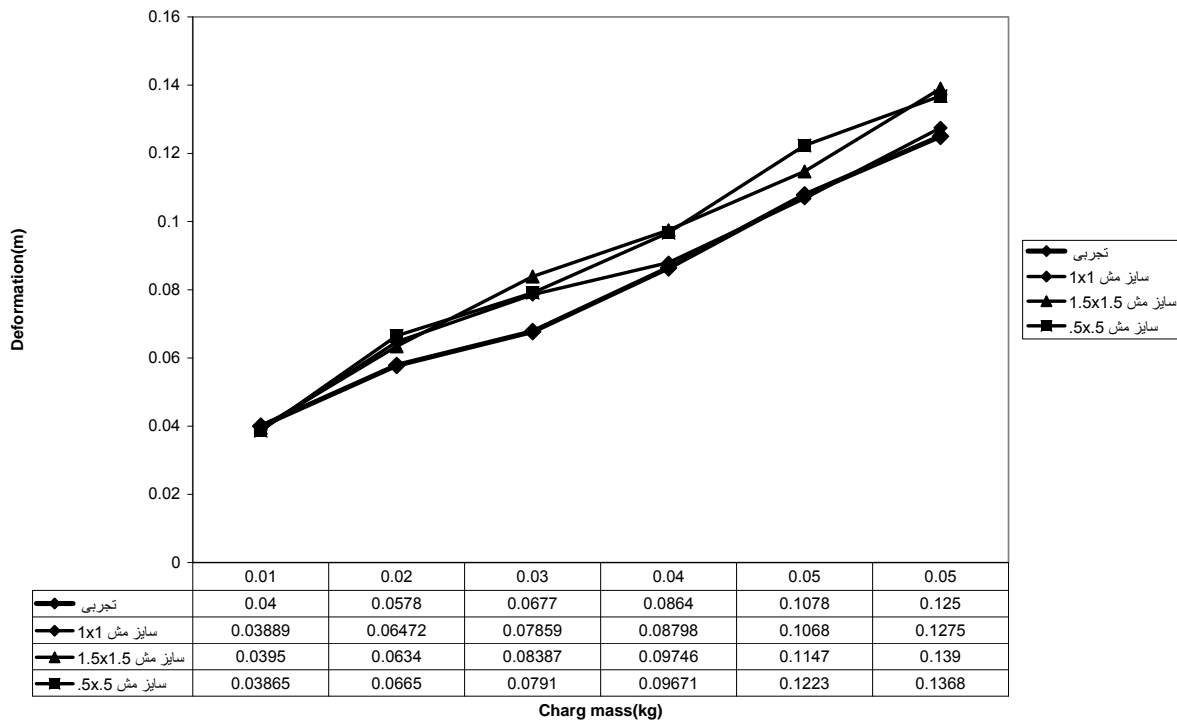
Step: Step-1, Under
Increment: 21568; Step Time = 1.0000E-02
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

شکل ۵: کانتور تغییر فرم صفحه فولادی به ازاء وزن خرج ۶۰ گرم در زمان ۰/۰۱ ثانیه

با توجه به نوع خروجی میتوان بیشینه تغییر فرم صفحه فلزی را برای وزن های مختلف خرج و همچنین سایز مختلف مش بدست آورد. جهت مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی، تغییر فرم بر حسب شاک فاکتور و تغییر فرم بر حسب وزن خرج در نمودار های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی با ۳ نوع سایز مش مختلف با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است، که مقادیر عددی بدست آمده تطابق خوبی با مقادیر تجربی نشان می دهد.

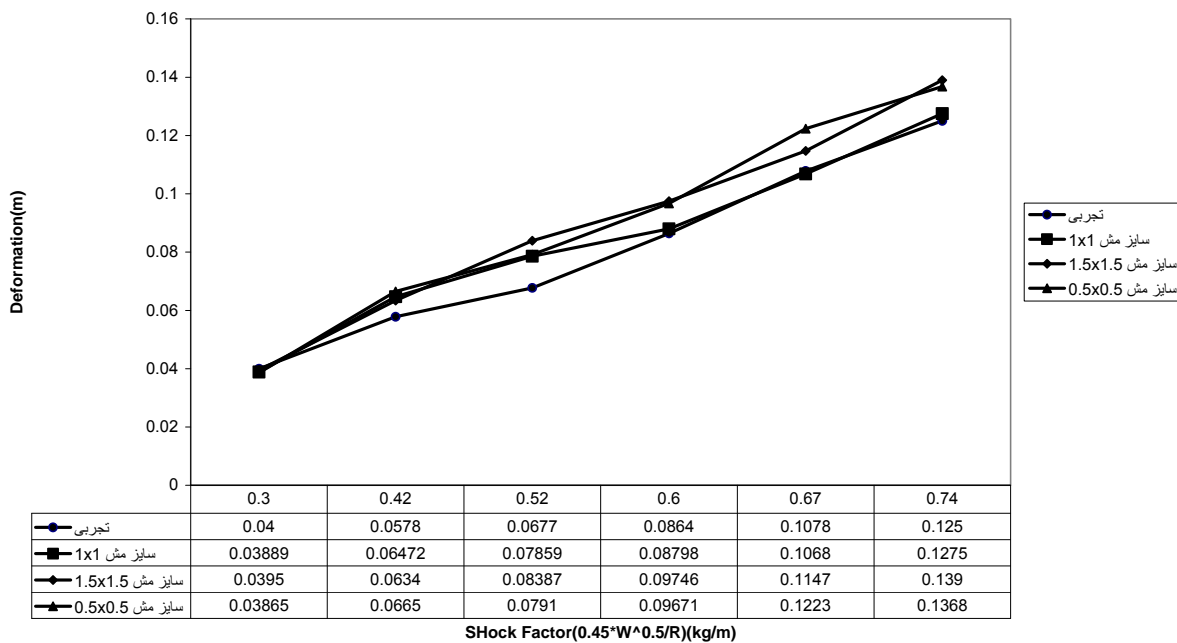


Undex Deformation of plate center VS charg mass



نمودار ۱: تغییر فرم بر حسب شاک فاکتور

Center Deformation of plate VS Shock factor



نمودار ۲: تغییر فرم بر حسب شاک فاکتور



شبیه سازی پدیده انفجار زیر آب و اثر آن بر روی یک صفحه فولادی انجام شده است و نتایج آن در مقایسه با نتایج تجربی صحت سنجی شده است. نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. این مهم بیانگر قابلیت نرم افزار ABAQUS/Undex در شبیه سازی پدیده انفجار زیر آب می باشد. لذا می توان از این نرم افزار برای تحلیل اثر انفجار زیر آب به دو منظور طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار زیر آب و همچنین طراحی انفجار لازم در تخریب سازه های خاص استفاده نمود. در مسائلی که هزینه های تست بالا و اندازه ی سازه بزرگ باشد می توان به نتایج این شبیه سازی اکتفا نمود که صرفه جویی در هزینه های تست را باعث می شود.

۵- مراجع

- [1] Cole R.H., "Underwater Explosions", Princeton University press, 1948
- [2] Keil A.H., "Introduction to underwater explosion research", UERD, Norfolk Naval ship yard, Portsmouth, Virginia, 1956
- [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"
- [5] Brett J.M., "Numerical Modelling of shock wave and pressure pulse generation by under water explosions", DSTO-TR-O677, 1998