

## بررسی تجربی پارامترهای موج بلاست در انفجار زیر آب خرج هگزوژن

احسان کوثری نیا<sup>۱</sup>، یونس علیزاده<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک

(نویسنده مخاطب: احسان کوثری نیا، [ehsankowsar@aut.ac.ir](mailto:ehsankowsar@aut.ac.ir))

### چکیده

مطالعه رفتار موج بلاست و پارامترهای آن در انفجار زیر آب موضوعی است که همواره مورد توجه جامعه علمی شکل دهی مواد و طراحان کشتی بوده است. همچنین انفجارهای زیر آب خطرات بالقوه ای برای تجهیزات زیر آب یا سکوهای استخراج نفت و گاز به شمار می رود. در این مقاله تکنیکهای محاسبه پارامترهای بلاست میدان باز مانند فشار و ایمپالس در انفجارهای زیرسطحی واقع در آب و پیش بینی پارامترهای ضریان حباب بررسی شده و با نتایج تجربی به دست آمده برای انفجارهای زیر سطحی نمونه های خرج انفجاری هگزوژن مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: موج شوک، ایمپالس، ضریان حباب، فرافشار، منحنی فشار-زمان.

### ۱- مقدمه

پاسخ سازه ها در برابر شوک زیر آب موضوعی است که توسط طراحان کشتی و جامعه شکل دهی مواد مورد مطالعه قرار گرفته تا ارتباط میان نیروهای انفجاری، تغییر شکل سازه و رفتار شکست آن شناخته شود. مطالعه اثرات انفجار زیر آب از زمانی که امکان پذیری فرآیند انفجار زیر آب مشخص گردید آغاز شد [۱]. کیل [۲] گزارش کرده که نخستین آزمایشها طی سالهای ۱۸۷۰-۱۸۸۰ انجام شد و تلاش برای اندازه گیری شدت فشار در نقاط مختلف آب صورت گرفت. در این مقاله توالی وقایع انفجار زیر آب مورد بررسی قرار گرفته و یکسری روشهایی که امکان استفاده از تمامی این پارامترهای بلاست میدان باز را با استفاده از مقیاس کردن از داده های تجربی موجود می دهد توصیف شده است.

هدف از تحلیل پدیده انفجار زیر آب عبارت است از تعیین فرافشار موج ضربه و ایمپالس مثبت برحسب توابعی از عمق هدف و فاصله شعاعی از نقطه انفجار. پارامترهای محاسبه شده مورد نیاز برای انفجارهای زیر آب شامل فرافشار و ایمپالس مثبت کل برای موج ضربه و فازهای ضریان حباب است. این پارامترها لازم است به صورت توابعی از فاصله از نقطه انفجار تعیین شوند. برای این منظور یکسری آزمونهای اندازه گیری منحنی فشار-زمان تجربی برای نمونه های خرج انفجاری هگزوژن در فواصل گوناگون به دست آمده که نتایج آنها در این مقاله مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. همچنین، این داده های تجربی با روابط تجربی موجود از خرج انفجاری تی ان تی مقایسه شده است.

### ۲- موج شوک

واکنش انفجار خرج منفجره در زیر آب سبب شکسته شدن مولکولهای خرج به مولکولهای محصولات انفجار (از قبیل گازهای CO، NO، CH<sub>4</sub>، H<sub>2</sub> و مواد جامد C، Pb و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و ایجاد مقادیر زیادی حرارت (1050 kcal به ازای

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک

۲- استادیار مهندسی مکانیک



یک کیلوگرم خرج TNT) می شود [۲-۴]. دمای گازهای حاصله در مجاورت نقطه انفجار، در مرتبه 3000 درجه سلسیوس و فشار آن حدود 5000 MPa است.

برای یک خرج منفجره معین با ابعاد مشخص، بازدهی انتقال انرژی حاصل از انفجار تا حد زیادی به خواص محیط ناقل انرژی بستگی دارد. آب به دلیل ماهیت تراکم ناپذیری آن، بازدهی انتقال انرژی انفجاری بسیار بالاتری نسبت به هوا دارد. در فرآیند انفجار زیر آب، با انفجار خرج منفجره، حباب گاز پرفشاری تولید می شود. در اثر تشکیل حباب گاز، یک موج شوک اولیه در آب مجاور حباب تشکیل می شود. این شوک در فاصله کوتاهی از منبع آن حدود ۵۰ درصد از انرژی کل خرج را دربر دارد. حباب گاز منبسط می شود تا فشار درون آن به زیر فشار آب اطراف کاهش پیدا کند. در نهایت فرآیند انبساط متوقف شده و حباب شروع به منقبض شدن می کند تا به ابعاد کمینه خود برسد. هنگامی که فشار به اندازه کافی افزایش می یابد کوچک شدن حباب متوقف می گردد. با توجه به اینکه فشار حباب از فشار محیط بیشتر شده مجدداً انبساط حباب انجام می شود. در ابتدای انبساط دوم، موج شوک ثانویه ای در آب ایجاد می شود. موج شوک ثانویه هرگاه که حباب به اندازه کمینه برسد آزاد می شود که تنها بخش کوچکی از کل انرژی را حمل می کند. برای آنکه بارگذاری مجدد رخ دهد، ارتفاع آب روی خرج باید بیش از دو برابر فاصله از محل انفجار باشد. در غیر این صورت حباب گاز در سطح آب می ترکد و فرآیند انتقال انرژی متوقف می شود.

برای فرآیند پیچیده انتقال انرژی از انفجار زیر آب هنوز توصیف ریاضی کاملی ارائه نشده است. روشهای تقریبی برای برآورد انرژی کل اعمال شده به سازه موجود بوده که سه روش متداول آن عبارتند از:

۱. روش هندسی، که اساساً مبتنی بر انرژی مخصوص خرج و آرایش آن نسبت به خرج است. تاثیر محیط ناقل انرژی به طور نسبی با ضریب تجربی بیان می شود.
۲. روش انرژی، مبتنی بر فرمول چگالی انرژی تجربی است که از اندازه گیریهای انفجار زیر آب حاصل شده و شامل اثر بارگذاری مجدد است. چگالی انرژی روی مساحت قطعه انتگرال گیری می شود. کاربرد این روش محدود به خرجهایی است که ثوابت تجربی انرژی آنها تعیین شده است.
۳. روش ایمپالس، نیز مبتنی بر روابط تجربی به دست آمده از اندازه گیریهای فشارهای شوک ناشی از انفجار زیر آب است و تنها هنگامی می تواند به کار رود که محیط ناقل انرژی آب بوده و پدیده بارگذاری مجدد وجود نداشته باشد. روشهای اول و دوم، برآورد حد بالایی از انرژی منتقل شده به قطعه حاصل از موج شوک اولیه و پدیده بارگذاری مجدد به دست می دهد. روش سوم برآورد حد پایینی مبتنی بر روابط تجربی فشار و ایمپالس تجربی داده و انرژی مربوط به فاز بارگذاری مجدد را در نظر نمی گیرد. عامل مهم در تعیین فرافشار (بیشینه فشار پالس بلاست)، تراکم پذیری محیط ناقل انرژی و امپدانس آکوستیک آن که حاصل ضرب چگالی در سرعت صوت در آن محیط است می باشد.

سرعت انتشار موج شوک، در محدوده ۱۰ برابر شعاع خرج سریعاً به سرعت صوت در آب (حدود 1440 m/s) افت می کند [۳]. موج شوک ایجاد شده زیر آب با فشار هیدرواستاتیک ترکیب می شود. تابع فشار برحسب زمان،  $p(t)$ ، در یک نقطه ثابت با افزایش ناگهانی فشار به مقدار بیشینه،  $P_m$ ، (در مرتبه  $10^{-7}$  S) آغاز شده و با افتی که بخش اول آن با رابطه نمایی زیر تقریب زده می شود همراه است [۴]

$$p(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (1)$$

که در آن  $\theta$  زمان افت بوده و رابطه فوق برای  $0 < t < \theta$  معتبر است. فرافشار و ثابت افت بستگی به اندازه خرج و فاصله توقف اندازه گیری فشار از آن دارد [۱].

$$P_m = 52.16 \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{1.13} \quad (2)$$

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

که در آن  $P_m$  برحسب MPa،  $\theta$  برحسب میکروثانیه،  $W$  برحسب kg ماده منفجره TNT و فاصله توقف،  $S$ ، برحسب متر است. این روابط برای هر نوع اندازه خرج، از ابعاد کوچک تا انفجارهای مهیب که در هر عمقی منفجر شده باشد به کار می رود و به غیر از منطقه مجاور خرج (تا ۱۰ برابر شعاع خرج)، که در آن فرافشار بیشتر از مقداری است که این رابطه پیش بینی می کند، موج شوک را به خوبی توصیف می کند. همچنانکه موج شوک از موقعیت ثابتی عبور کرده و مایع آن نقطه را در معرض فشار گذار  $p(t)$  قرار می دهد، مایع به صورت لحظه ای در معرض جریانی با سرعت  $v(t)$  در جهت موج قرار می گیرد که رابطه آن با فشار گذار به صورت زیر است [۱]:

$$p(t) = \rho c v(t) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن جریان کروی، رابطه فوق اصلاح شده و به صورت زیر در می آید

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

عبارت نخست، سرعت موج تخت و عبارت اصلاحی، مربوط به «پس-جریان» است. عبارت پس-جریان در نزدیکی انفجار و نیز در بازه های زمانی بزرگ قابل توجه است. انرژی موج شوک انفجار متشکل از دو مولفه یکسان است، یکی مربوط به تراکم آب و دیگری مربوط به جریان ناشی از آن است. چگالی انرژی موج شوک  $E_{sh}$  برای موج شوک صفحه ای عبارت است از [۴]

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^\alpha p^2(t) dt \quad (6)$$

برای یک موج شوک کاملاً نمایی

$$E = \frac{1}{\rho c} P_m^2 \theta \quad (7)$$

کارایی موج شوک بیشتر بستگی به انتگرال زمانی فشار، یا همان ایمپالس داشته تا شکل دقیق منحنی فشار برحسب زمان. ایمپالس واحد سطح جبهه موج شوک در زمان  $t$  از ورود آن با رابطه زیر بیان می شود [۴]

$$I = \int_0^t p(t) dt \quad (8)$$

به صورت دقیق، فشار  $p(t) - p_0$  که بدون اثر فشار هیدرواستاتیک است باید در این رابطه به کار رود. اما برای بسیاری از موارد، فشار موج شوک  $p(t)$  به اندازه ای بزرگ است که این اختلاف اهمیتی ندارد. انرژی برای کل طول موج شوک برآورد شده و ایمپالس تا زمان  $t = 6.7 \theta$  انتگرال گیری شده و با رابطه زیر بیان می شوند

$$E_{sh} = 98000(W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{2.1} \quad (9)$$

$$I = 5760(W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{S} \right)^{0.891} \quad (10)$$

که در آن  $E$  برحسب  $J/m^2$  و  $I$  برحسب  $Ns/m^2$  است.

### ۳- حساب گاز

فشار گاز اولیه پس از انتشار بخش اصلی موج شوک به نحو چشمگیری کاهش می یابد، ولی همچنان بیشتر از فشار هیدرواستاتیک تعادلی است [۵]. در اثر انفجار یک چاشنی به عنوان خرج، تا ۱۲ مرتبه ضریب حساب گاز مشاهده شده است [۲]. نخستین پالس حساب می تواند فرافشاری در حدود ۱۰-۱۵ درصد از فرافشار موج شوک داشته باشد. طی فرآیند ضریب،



حباب در اثر تاثیر گرانش به سمت بالا حرکت می کند که بیشترین سرعت حرکت آن موقعی است که حباب حداقل ابعاد را داشته باشد [۶].

حباب گاز ایجاد شده در اثر انفجار طی فرآیند انبساط و انقباض اولیه تقریباً کروی است [۷، ۸]. دو پارامتر مشخصه عبارتند از شعاع بیشینه  $R_{max}$  در نخستین ضربان و مدت زمان ضربان  $T$  (از لحظه انفجار تا نخستین انقباض بعدی). هر دو پارامتر با اندازه خرج انفجاری و عمق به صورت زیر تغییر می کند.

$$R_{max} = 3.3 \left( \frac{W}{Z} \right)^{1/3} \quad (11)$$

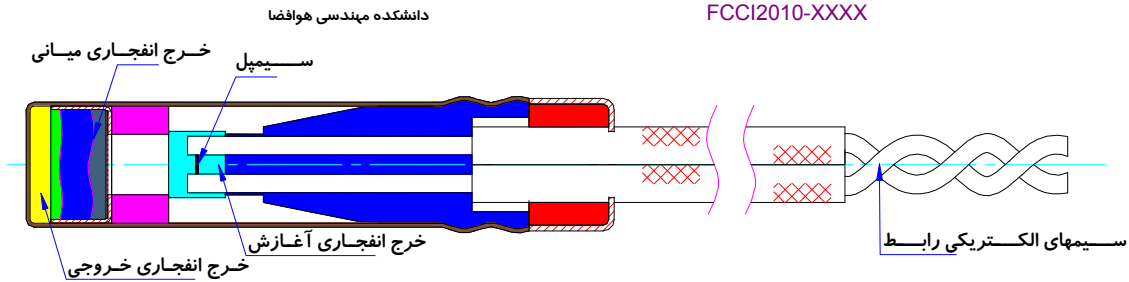
$$T = 2.08 \frac{W^{1/3}}{Z^{5/6}} \quad (12)$$

که در آن  $Z = D + 10$  بیانگر فشار استاتیکی کل در موقعیت خرج است. در اینجا  $D$  عمق انفجار برحسب متر است. نموداری توسط کیل [۲] بر اساس داده های تجربی برای تعیین بیشینه شعاع حباب گاز و مدت زمان نخستین ضربان حباب تهیه شده است.

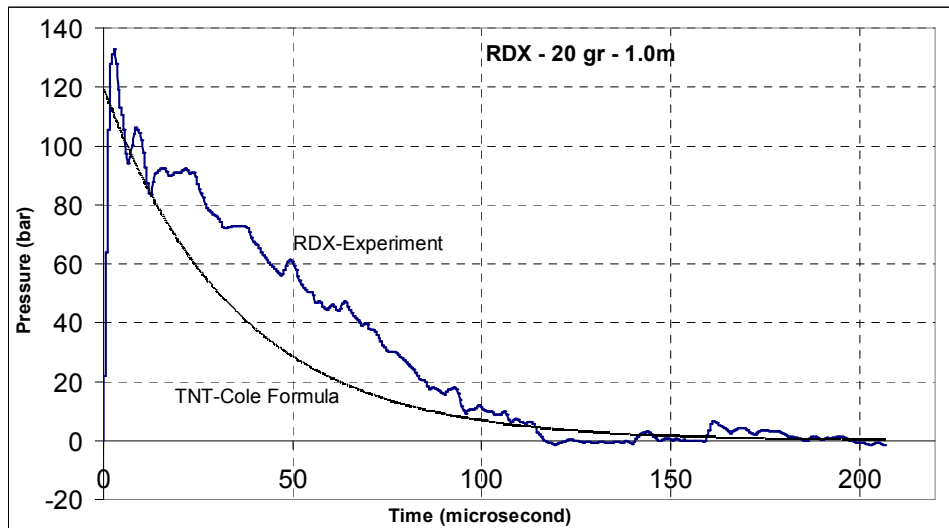
## ۵- اندازه گیری تجربی موج بلاست برای خرج هگزوزن

در این پژوهش در استخر آبی به ابعاد  $4*4*4$  متر، یکسری آزمون انفجاری برای اندازه گیری پارامترهای موج بلاست خرج انفجاری هگزوزن (با نام شیمیایی سیکلوتتری متیلن-تری نیترامین) یا RDX با فرمول شیمیایی  $C_3H_6N_6O_6$  انجام شد. همانگونه که پیشتر نیز اشاره شد، داده های تجربی پارامترهای موج بلاست تنها برای خرج انفجاری TNT در منابع گزارش شده است. در عین حال این داده ها عمدتاً در حدود ۶۰ سال پیش توسط کول [۳] یا ۴۰ سال پیش توسط سویسک [۹] تهیه شده که با توجه به فناوری قدیمی مورد استفاده در آن زمان دارای یکسری محدودیتها و کاستی هایی می باشد. از جمله این محدودیتها، می توان به عدم ثبت دقیق نمودار فشار-زمان خرج انفجاری اشاره کرد. لازم به ذکر است که طبق گزارش مرجع [۴]، به دلیل پیچیدگیهای بسیار زیاد این مساله، هنوز نمی توان با نتایج شبیه سازی از هیدروکدها جزئیات پالس موج بلاست را به دست آورد. خرج هگزوزن یکی از مواد منفجره شدیدالانفجار بوده که کاربرد صنعتی و نظامی زیادی دارد. خواص انفجاری این خرج، همانند سایر مواد منفجره، وابسته به پارامترهایی چون جرم، چگالی، شکل هندسی، نوع دانه بندی و درصد ترکیب شیمیایی آن است.

برای این منظور از خرجی استوانه ای شکل با نسبت طول به قطر یک و وزن ۲۰ گرم که به صورت پرسی شکل داده شده استفاده شد. چگالی خرج هگزوزن مورد استفاده، برابر ۱.۶۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و حاوی ۲ درصد جرمی واکس و ۹۸ درصد RDX است. خرج در عمق دو متری آب قرار گرفته و در فواصل ۱، ۱.۱، ۱.۲۵، ۱.۳۵، ۱.۵ و ۱.۶ متری از آن سه عدد حسگر اندازه گیری فشار پیزوالکتریک ساخت شرکت Kistler به ظرفیت ۱۰۰۰ بار توسط فیکسچرهای مخصوصی تعبیه شد. با استفاده از چاشنی دتوناتور الکتریکی استاندارد 08 که تصویر آن در شکل ۱ آورده شده، خرج منفجر شده و داده های فشار برحسب زمان با نرخ داده برداری ده میلیون نمونه بر ثانیه توسط سیستم داده برداری و مبدل A/D شرکت زیمنس ثبت شد. برای حصول اطمینان از تکرارپذیری نتایج، آزمون پنج مرتبه تکرار گردید.

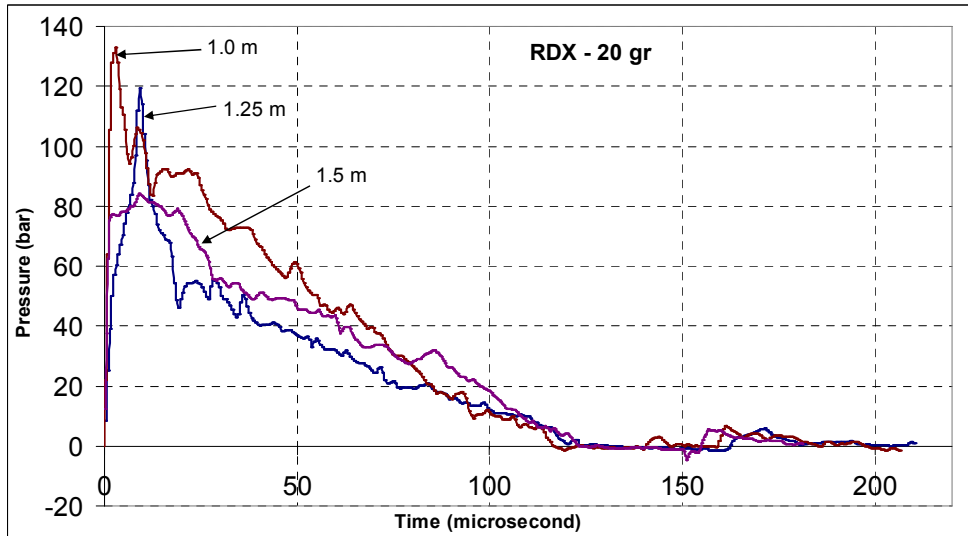


شکل ۱ تصویر چاشنی دتوناتور الکتریکی استاندارد 08 و اجزای آن.

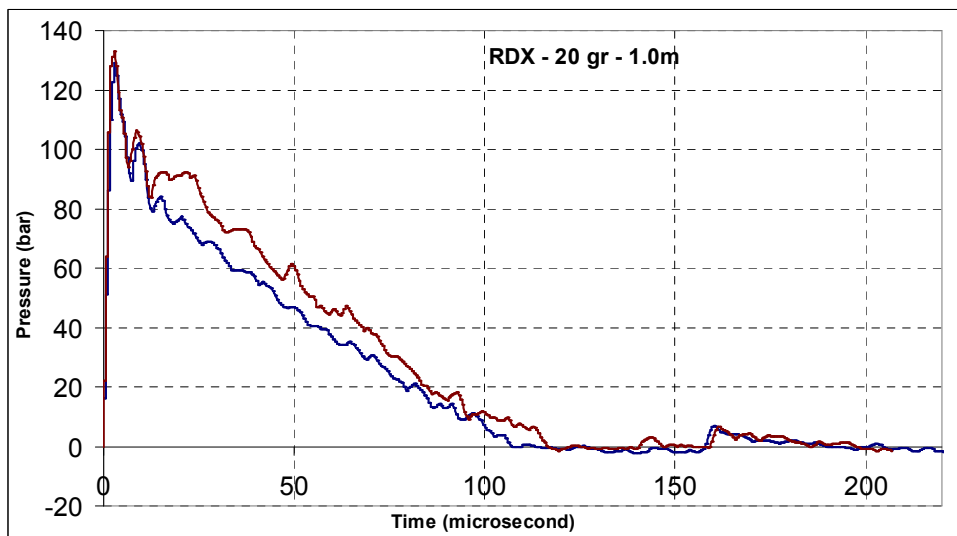


شکل ۲ نمودار منحنی پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوژن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فاصله ۱ متری. همزمان برای مقایسه، منحنی پالس فشار-زمان خرج TNT بر اساس رابطه کول نیز ترسیم شده است.

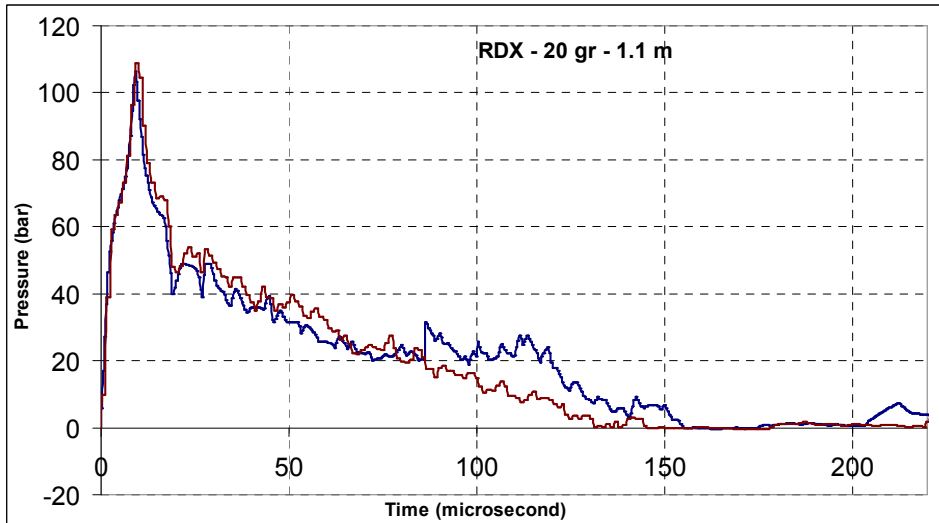
در شکل ۲ نمونه ای از نمودار نتایج تجربی پالس فشار-زمان موج بلاست در فاصله ۱ متری از محل انفجار آورده شده است. برای مقایسه، نمودار رابطه کول (۱) برای خرج TNT نیز در این شکل ترسیم شده است. همانگونه که انتظار می رود، به دلیل انرژی انفجار بالاتر خرج هگزوژن (RDX) نسبت به TNT، منحنی پالس فشار آن نیز بالاتر از TNT قرار می گیرد. در شکل ۳ نیز نمودار نمونه های منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوژن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فواصل ۱، ۱.۲۵ و ۱.۵ متری برای مقایسه ترسیم شده است. در این نمودار، افت پالس فشار نسبت به افزایش فاصله از محل انفجار به خوبی نمایان است. اگرچه رفتار منحنی های پالس را می توان تا حدودی با منحنی نمایی تقریب زد، ولی جزئیات منحنی ها تغییرات پیچیده ای داشته و شکل دقیق آنها را نمی توان با یکدیگر مقایسه کرد. در شکل های ۴، ۵، ۶ و ۷، نمودار مقایسه منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوژن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و به ترتیب در فاصله های ۱، ۱.۱، ۱.۵ و ۱.۶ متری با تکرار آزمایش ترسیم شده است. مشابهت شکل کلی این منحنیها در تکرار آزمایش درخور توجه است.



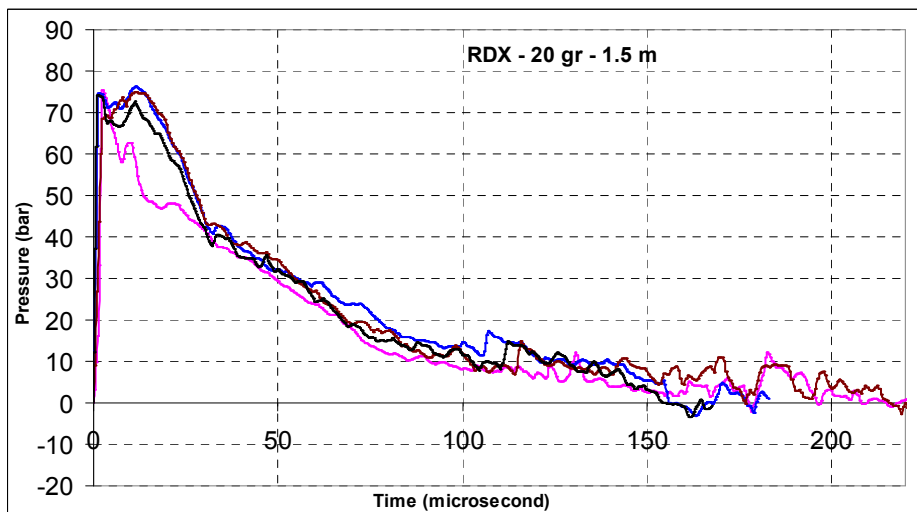
شکل ۳ نمودار منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوزن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فواصل ۱، ۱.۲۵ و ۱.۵ متری.



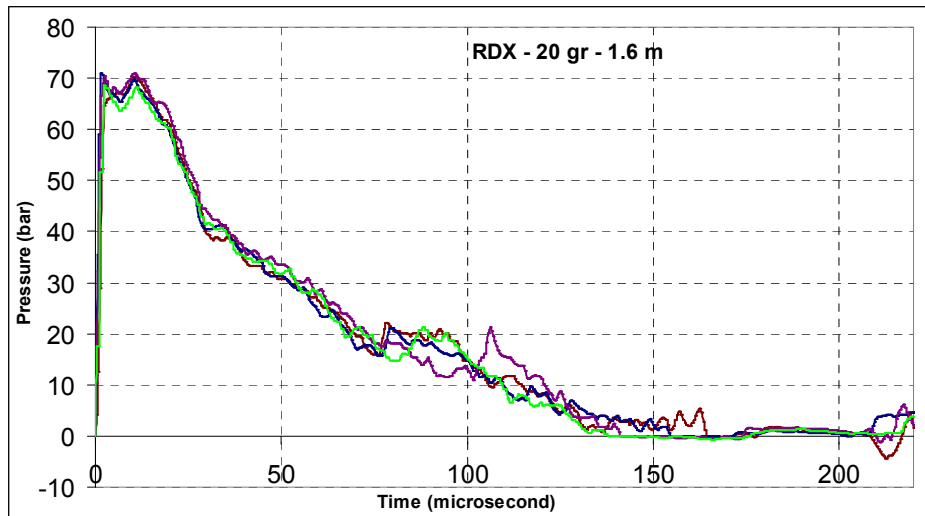
شکل ۴ نمودار مقایسه منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوزن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فاصله ۱ متری با تکرار آزمایش.



شکل ۵ نمودار مقایسه منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوزن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فاصله ۱.۱ متری با تکرار آزمایش.



شکل ۶ نمودار مقایسه منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوزن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فاصله ۱.۵ متری با تکرار آزمایش.



شکل ۷ نمودار مقایسه منحنیهای پالس فشار-زمان تجربی برای خرج هگزوزن (RDX) به وزن ۲۰ گرم و در فاصله ۱.۶ متری با تکرار آزمایش.

## ۶- نتیجه گیری

حوادث گذشته نشان می دهد که امکان حملات تروریستی به زیرساختها از طریق بمب گذاریهای زیر آبی وجود داشته، حال آنکه اطلاعات اندکی درباره تعیین آسیبهای احتمالی آنها موجود است. ضمن آنکه برای یکسری از کاربردهای مهندسی مانند شکل دهی انفجاری نیز وجود داده های مربوط به تحلیل موج بلاست ضروری است. شکسته شدن مولکول اولیه ماده منفجره به مولکولهای محصولات انفجار با ایجاد مقدار زیادی گرما همراه است که جبهه شوک به همراه ضربه حباب گاز در آب ایجاد می کند. هنوز برآورد پارامترهای موج شوک به روشهای تحلیلی یا عددی، به دلیل ماهیت بسیار پیچیده این مساله، معتبر نبوده و با نتایج آزمونهای تجربی سازگاری دقیقی ندارد [۴]. برای تامین داده های تجربی برای خرج انفجاری هگزوزن در مقیاس کوچک در این زمینه و دستیابی به روشهای دقیق اندازه گیری پارامترهای انفجار، یکسری آزمونهای تجربی انجام گرفته و پارامترهای موج شوک از منحنی های فشار-زمان به دست آمده استخراج شده که با استفاده از قوانین مقیاس گذاری می توان از آنها در طراحی و تحلیلهای مهندسی ابعاد واقعی و نیز صحنه گذاری پژوهشهای عددی و تئوری آتی بهره گرفت.

## مراجع

1. Keil AH. The response of ships to underwater explosions. *Trans Soc Naval Archit Mar Eng* 1961;69:366-410.
2. Keil AH. Introduction to underwater explosion research. *UERG, Norfolk Naval Ship Yard, Portsmouth, Virginia*; 1956.
3. Cole RH. Underwater explosions. NJ, USA: *Princeton University Press*; 1948.
4. Geers, T. L. and Hunter, L. S., An Integrated Wave-Effects Model for an Underwater Explosion Bubble. *Journal of Acoustical Society of America*, 2002, 4, 1584-1601.
5. John M. Brett, Michael Buckland, Terry Turner, Charles G. Killoh and Peter Kiernan An Experimental Facility for Imaging of Medium Scale Underwater Explosions, *DSTO-TR-1432, DSTO Platforms Sciences Laboratory, Australia* 2003.
6. M. ENEVA, J. L. STEVENS, B. D. KHRISTOFOROV, J. MURPHY, and V. V. ADUSHKIN, "Analysis of Russian Hydro-acoustic Data for CTBT Monitoring," *Pure and Applied Geophysics*, 158, pp 605-626, 2001.
7. Hammond, L., "Underwater Shock wave characteristics of Cylindrical Charges," *DSTO Report*, 1995, GD-0029
8. Krueger, S.R., "Simulation of Cylinder Implosion Initiated by an Underwater Explosion", *Naval Postgraduate School Thesis*, 2006 Monterey, California.





سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران  
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

FCCI2010-XXXX

دانشکده مهندسی هوافضا

9. SWISDAK, M. M., "Explosion Effects and Properties: Part II – Explosion Effects in Water," NSWC/WOL/TR 76- 116, *Naval Surface Weapons Center*, Dahlgren, VA, (February 1978).