Journal of Police Medicine

Summer 2015; Vol. 4, No. 2: 87-96

Original Article

Biophysical Effects of Shock Waves on the Environment; a Case Study of a Hand Grenade Incident

Received: 29 Janurary 2015 **Revised:** 11 March 2015 **Accepted:** 5 April 2015

Mehdi Navidbakhsh[1]
Kambiz Kangarlou[2*]

[1]Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

[2]Postdoctoral Researcher, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Background: Trauma caused by the blast wave is one of the basic issues in military medicine. Daily reports of killed and wounded military personnel and civilians in war zones, terrorist bombings and explosive remnants of war indicate the importance of this topic. Due to the complexity of this phenomenon, there is little understanding of how the blast wave influences its surroundings, despite its importance.

Materials and Methods: The effects of an explosion are contingent upon various factors, such as: type, weight and shape of the explosive, target distance from the explosion center, geometry, nature and distribution of the target, physical environment of wave propagation and number of obstacles from the center of the explosion to the target. In this research, with the study of analytical equations of the phenomenon of blast, pressure and impulse of a blast wave were discussed.

Results: The diagram of the time - pressure wave propagation of a hand grenade with the charge equivalent to 170 grams of TNT has been shown using ANSYS software. According to lung threshold trauma, the probability of human injury at different distances depending on the severity of the explosion has been presented.

Conclusion: Assessment of the extent of primary and secondary injury (which may appear in the next few days), clinical effectiveness, enhancing protection equipment and risk analysis of important places under the blast wave require adequate and accurate understanding of this phenomenon effects on its surroundings. In this study, considering factors: the amount of force to the target and the duration of force application, the possibility of anatomical and structural damage was predicted.

Keywords: blast wave, lethality assessment, reflection, hand grenade, charge equivalent of TNT

[*]**Corresponding Author:**
Kambiz Kangarlou
Tel: (+98)9122132379

e-mail: kangarloo_kambiz@yahoo.com

تابستان ۱۳۹۴- دوره ۴ - شماره ۲- صفحات ۹۶-۸۷

مجله طب انتظامی

مقاله تحقیقی

بیوفیزیک تأثیرات موج انفجار بر محیط؛ مطالعه موردی نارنجک دستی

تاریخ دریافت: ۹ بهمن ۱۳۹۳ **تاریخ اصلاح:** ۲۰ اسفند ۱۳۹۳ **تاریخ پذیرش:** ۱۶ فروردین ۱۳۹۴

چکیده

مهدی نویدبخش[۱]
کامبیز کنگرلو[۲*]

[۱]دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
[۲]پژوهشگر پسادکترا، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

مقدمه: ترومای‌های ناشی از موج انفجار یکی از مباحث اساسی در طب نظامی است. گزارش‌های روزانه از کشته و مجروح شدن افراد نظامی و غیرنظامی در مناطق جنگی، بمب‌گذاری‌های تروریستی و مواد منفجره باقی‌مانده از دوران جنگ بیانگر اهمیت این موضوع می‌باشد. به‌دلیل پیچیدگی حاکم بر این پدیده، علیرغم اهمیت موضوع، درک کمی از چگونگی اثر موج انفجار بر محیط اطراف خود وجود دارد.

مواد و روش‌ها: غالباً اثر موج انفجار بر اهداف بر اساس: نوع، وزن و شکل ماده منفجره، فاصله هدف از مرکز انفجار، هندسه، ماهیت و پراکندگی هدف، محیط فیزیکی انتشار موج و موانع موجود بین مرکز انفجار تا هدف بیان می‌گردد. در این تحقیق با مطالعه روابط تحلیلی حاکم بر پدیده انفجار به بررسی تاریخچه زمانی پارامترهای فشار و ضربه موج انفجار پرداخته خواهد شد.

یافته‌ها: در اشکال ۶ تا ۸ دیاگرام فشار- زمان انتشار موج حاصل از نارنجک دستی با خرج معادل ۱۷۰ گرم TNT با استفاده از نرم‌افزار ANSYS استخراج شد. با توجه به حد آستانه ترومای ریه، احتمال صدمات انسانی در فواصل مختلف برحسب شدت انفجار ارائه‌شده است.

نتیجه‌گیری: ارزیابی و تخمین وسعت صدمات اولیه و ثانویه (که در طی روزهای آینده ممکن است ظاهر شوند)، اثربخشی روش‌های بالینی، ارتقاء تجهیزات محافظتی، تحلیل ریسک اماکن و غیره در اثر موج انفجار، مستلزم داشتن درک و شناخت کافی و صحیح از تأثیر این پدیده بر محیط اطراف خود می‌باشد. در این تحقیق با توجه به مقدار نیروی وارده به هدف و مدت‌زمان اعمال آن، احتمال صدمات آناتومیک و سازه‌ای پیش بینی می‌گردد.

کلید واژه‌ها: موج انفجار، ارزیابی تلفات، انعکاس، نارنجک دستی، وزن معادل TNT

***نویسنده مسئول:**
کامبیز کنگرلو
تلفن: ۹۱۲۲۱۳۲۳۷۹(۹۸+)
پست الکترونیک:
kangarloo_kambiz@yahoo.com

مقدمه

انفجار به‌صورت آزاد شدن ناگهانی و سریع حجم بسیار زیادی از انرژی تعریف می‌شود که تولید نور، گرما، صدا و موجی ضربه ای می‌نماید. این موج شامل هوای بسیار متراکمی است که به صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند. افرادی که در میدان این موج حضورداشته باشند، دچار آسیب‌های جسمی (صدمات وارد بر ریه‌ها، مغز، روده‌ها، سیستم بینایی و غیره) و روانی (موج‌گرفتگی) ناشی از آن می‌شوند که میزان و نوع آن‌ها، به‌شدت انفجار، فاصله فرد تا محل انفجار، موانع موجود در مسیر انتشار موج و چگونگی عکس‌العمل فرد بستگی دارد [۲ و ۱]. عوامل و مکانیسم‌های مؤثر در ترومای‌های ناشی از موج انفجار به چهار گروه کلی زیر تقسیم می‌شوند (شکل ۱) [۳]:

۱- ترومای‌های اولیه که در اثر فشار مستقیم موج انفجار ایجاد می‌شوند.
۲- ترومای‌های ثانویه که در اثر برخورد ترکش‌ها و انواع پرتابه ها ایجاد می‌شوند.
۳- انواع شکستگی‌ها و آسیب‌ها که در اثر پرتاب انسان تحت فشار

Journal of Police Medicine
Summer 2015; Vol. 4, No. 2: 87-96



(ب) (الف)

(ه) (د) (ج)

شکل ۱: مکانیسم‌های مؤثر در ایجاد تروماهای ناشی از انفجار، (الف) فشار مستقیم موج انفجار، (ب) برخورد ترکش‌ها، (ج) آوار، (د) پرتاب شدن، (ه) سوختگی (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/ Blast injury)

دینامیکی موج انفجار به‌صورت جسم ثابت شتابدار و برخورد با سطوح صلب ایجاد می‌شود.

۴- سایر جراحات دیگر ناشی از سوختگی، آوار، خفگی و غیره.

مواد منفجره برحسب سرعتی که تغییر شکل می‌دهند به دو دسته کندشکن[۱] (LE) و تندشکن[۲] (HE) تقسیم‌بندی می شوند [۴]. اکسیداسیون مواد منفجره HE با سرعتی بیش از سرعت صوت (بین ۱۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر در ثانیه در گازها و شش تا هشت کیلومتر در ثانیه در سیالات و جامدات) بوده و باعث افزایش فشار و دمای محیط می‌شود[۳]. از این دسته می‌توان TNT، نیتروگلیسیرین، سمتکس، C4 و آنفو را نام برد. تنها مواد منفجره HE قابلیت ایجاد موج انفجار کلاسیک[۴] را دارا می‌باشند. منفجره‌های LE موادی هستند که اکسیداسیون آن‌ها با سرعتی کمتر از سرعت صوت انجام می‌شود. این پدیده را سوزش[۵] می‌نامند که از جمله می توان بمب‌های لوله‌ای، باروت بی‌دود و باروت سیاه، بمب‌های دست‌ساز از مشتقات نفتی مانند انواع کوکتل‌مولوتف‌ها را نام برد. در این مواد خواص فیزیکی محیط مانند ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت نقش تعیین‌کننده دارند.

معمولاً جهت محاسبه قدرت انفجار که در مقاصد نظامی یا صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، TNT به‌عنوان ماده منفجره مرجع محسوب می‌شود و با استفاده از ضریب هم‌ارزی، قدرت مواد منفجره دیگر نسبت به آن محاسبه می‌گردد. در جدول ۱ فهرستی از مواد منفجره با ضرایب معادل TNT و انرژی مخصوص جرمی آن ها ارائه‌شده است.

مواد و روش‌ها

در زمینه مدل‌سازی امواج انفجاری، سابقه تحقیقات به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که برای اولین بار تئوری‌های مربوط به انتشار امواج انفجاری توسط نومن[۶] [۵] و ریاضیدان انگلیسی تیلر[۷] [۶] بیان گردید. پس از جنگ نیز نظریه‌های مشابهی توسط سدوف[۸] [۷]، لاتر[۹] [۸] و لاکوود- تیلر[۱۰] [۹] به‌طور مستقل ارائه گردید. اولین آیین‌نامه مطرح در بارگذاری انفجاری با نام TM 5-855-1 در سال ۱۹۸۶ توسط دپارتمان تحقیقات نظامی ارتش آمریکا برای انفجارهای غیر اتمی تهیه شد. پس‌ازآن آیین‌نامه TM 5-1300 [۱۰] در سال ۱۹۹۰ و آیین‌نامه TB 700-2 [۱۱] در سال ۱۹۹۹ توسط بخش مهندسی نیروی هوایی آمریکا ارائه گردید که از جامعیت بیشتری برخوردار بود و مبنای بسیاری از تحقیقات تئوری بعدی قرار گرفت. در ادامه آیین‌نامه‌های دیگری همچون DOE/ TIC11268 [۱۲] توسط دپارتمان انرژی آمریکا در سال ۱۹۹۲ و گزارش ارائه‌شده در ASCE2006 [۱۳] و آیین‌نامه‌های DAHS CWE [۱۴] و FEMA 428 [۱۵] برای کاربردهای مختلف تهیه شدند.

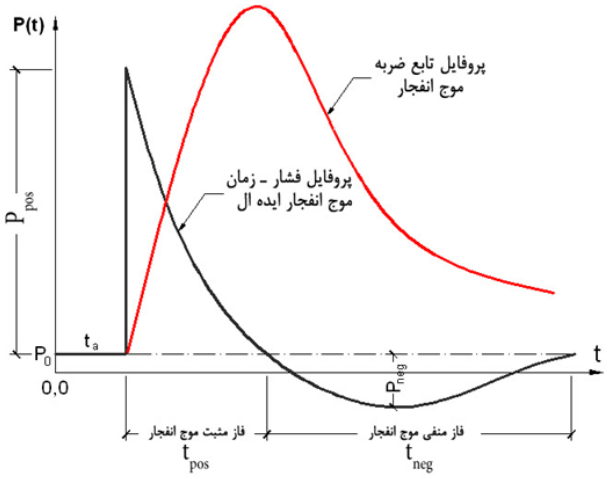
1: Low-order Explosives, 2: High-order Explosives, 3: Detonation, 4: Blast Waves, 5: Deflagration, 6: John von Neumann, 7: Geoffrey Ingram Taylor, 8: LI. Sedov, 9: R. Latter, 10: J. Lockwood-Taylor

مجله طب انتظامی
تابستان ۱۳۹۴- دوره ۴- شماره ۲- صفحات ۹۶-۸۷

جدول ۱: انرژی مخصوص و ضرایب معادل TNT مواد منفجره مختلف.

نام ماده منفجره	انرژی مخصوص جرمی (kJ/kg)	ضریب معادل‌سازی با TNT
TNT	۴۵۲۰	۱/۰۰
GDN (glycol dinitrate)	۷۲۳۲	۱/۶۰
Pyroxilene	۴۷۴۶	۱/۰۵
Torpex (42% RDX + 40% TNT + 18% Alum.)	۶۶۸۹	۱/۴۸
Dynamite	۵۸۷۶	۱/۳۰
Schneiderite	۳۱۶۴	۰/۷۰
DNT (dinitrotoluene)	۳۱۶۴	۰/۷۰
Ethylenedinitramine	۵۶۵۰	۱/۲۵
RDX (cyclonite)	۵۳۶۰	۱/۱۸
Compound B (60% RDX + 40% TNT)	۵۱۹۰	۱/۱۴
HMX	۶۵۵۰	۱/۲۵
Semtex	۵۶۶۰	۱/۲۵
Pentolite 50/50 (50% PENT + 50% TNT)	۵۱۰۳	۱/۱۳
PENT	۵۷۹۴	۱/۲۸
Nitroglycerin (liquid)	۶۷۰۰	۱/۴۸

پروفایل فشار موج انفجار معمولاً با پارامترهایی همچون زمان ورود موج انفجار (t_a)، ماکزیمم فشار فاز مثبت و منفی (P_{pos} و P_{neg})، مدت‌زمان انفجار ($t_{pos} + t_{neg}$) و طول مثبت (L_W^+) و منفی (L_W^-) موج انفجار مشخص می‌شود (شکل ۲). این پارامترها که تابعی از قدرت، شعاع ماده منفجره و محیط می‌باشند به صورت تحلیلی یا آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند.



شکل ۲: دیاگرام تاریخچه زمانی فشار موج انفجار ایده‌آل [۱۶].

این دیاگرام غالباً توسط رابطه فریدلاندر[1] بیان می‌شود [۱۷]:

$$P(t) = P_0 + (P_{pos} - P_0)\left[1 - \frac{(t - t_a)}{t_{pos}}\right] e^{-b\frac{(t-t_a)}{t_{pos}}} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $P(t)$ فشار در زمان t، P_0 فشار اتمسفر و b ثابت عددی است که طبق مطالعات تایش[2] و گبکن[3] [۱۸] به‌صورت (۳۰ $< Z <$ ۰۱) $b = ۱/۵Z^{-۰/۳۸}$ و یا از رابطه لارکر[4] [۱۹] $b = ۵/۲۷۷۷Z^{-۱/۱۹۹۷۵}$ محاسبه می‌گردد. جهت محاسبه پارامترهای انفجار روابط مختلفی بیان‌شده است که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

بروده[5] در سال ۱۹۵۵ بر پایه حل معادلات دیفرانسیل حرکت گاز در حالت لاگرانژی رابطه زیر را برای ماکزیمم فشار مثبت موج انفجار ارائه نمود [۲۰]:

$$P_{pos} = \begin{cases} \frac{6.7}{Z^3} + 1(bar) & (P_{pos} > 10bar) \\ \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019(bar) & (0.1 < P_{pos} < 10) \end{cases} \qquad (۲)$$

هنریش[6] براساس تعدادی نتایج آزمایشگاهی روابط زیر را ارائه نمود که با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه فوق تقریباً یکسان بوده و تائیدی بر صحت روابط بروده است [۲۱]:

$$P_{pos} = \begin{cases} \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4}(bar) & (0.05 < z < 0.3) \\ \frac{6.194}{z} - \frac{0.326}{z^2} + \frac{2.132}{z^3}(bar) & (0.3 < z < 1) \\ \frac{0.662}{z} + \frac{4.05}{z^2} + \frac{3.228}{z^3}(bar) & (1 < z < 10) \end{cases} \qquad (۳)$$

$$t_{pos} = e^{(-2.75+0.27logZ)+logW^{1/3}}(mS) \qquad (۴)$$

[1:] Friedlander, [2:] Teich, [3:] Gebbeken, [4:] Larcher, [5:] Brode, [6:] Henrych

Journal of Police Medicine
Summer 2015; Vol. 4, No. 2: 87-96

کینی[1] و گرام[2] بر پایه یک سری تحقیقات آزمایشگاهی گسترده روابط زیر را در سال ۱۹۸۵ ارائه نمودند [۲۲]:

(۵)

$$P_{pos} = P_0 \frac{808\left[1+\left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{\left[1+\left(\frac{Z}{0.048}\right)^2\right]}\times\sqrt{\left[1+\left(\frac{Z}{0.32}\right)^2\right]}\times\sqrt{\left[1+\left(\frac{Z}{1.35}\right)^2\right]}} \quad (bar)$$

(۶)

$$t_{pos} = W^{1/3} \frac{980\left[1+\left(\frac{Z}{0.54}\right)^{10}\right]}{\left[1+\left(\frac{Z}{0.02}\right)^3\right]\times\left[1+\left(\frac{Z}{0.74}\right)^6\right]\times\sqrt{\left[1+\left(\frac{Z}{6.9}\right)^2\right]}} \quad (milisecond)$$

(۷)

$$I_{pos} = \frac{0.067\sqrt{1+\left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2\sqrt[3]{1+\left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad (bar-ms)$$

روابط سادوسکی[3] که در مهروموم‌های اخیر به‌عنوان روابط پایه جهت محاسبه فشار ماکزیمم و مدت‌زمان فاز مثبت انفجار استفاده می‌شود [۲۳]:

(۸)

$$P_{pos} = 0.085\frac{W^{1/3}}{R} + 0.3\left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^2 + 0.8\left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^3 \quad (MPa)$$

(۹)

$$t_{pos} = 1.2\sqrt[6]{W}\sqrt{R}\ (ms)$$

(۱۰)

$$I_{pos} = 200\frac{W^{2/3}}{R}\ (Pa-s)$$

همان‌طور که در روابط فوق ملاحظه می‌شود، کلیه پارامترهای مربوط به انفجار وابسته به دو پارامتر R (فاصله مرکز انفجار تا نقطه اثر برحسب متر) و W (جرم معادل TNT ماده منفجره برحسب کیلوگرم) می‌باشد. به‌منظور تجمیع این دو متغیر پارامتری به نام فاصله مقیاس شده (Z) به‌صورت قراردادی تعریف گردیده که به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۷]:

(۱۱)

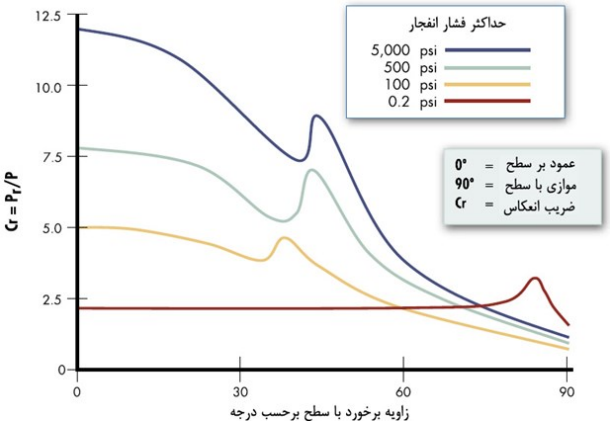
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}\ (m/kg^{1/3}), \quad R_2 = R_1\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{1/3}$$

در روابط ۷ و ۱۰، $I^t_{pos} = \int_{t_a}^{t_a+t}[P(t)-P_0]dt$ ضربه ناشی از فاز مثبت موج انفجار می‌باشد.

موانع موجود در محیط انتشار موج انفجار با انعکاس امواج همواره باعث تشدید آن‌ها از دو تا هشت برابر با توجه به انرژی آزادشده، زاویه و ماهیت سطوح برخورد می‌شوند. امواج منعکس‌شده به دلیل قدرت بیشتر و حرکت در محیط گرم و فشرده‌شده توسط امواج اولیه، دارای سرعت بیشتری می‌باشند. فشار موج انعکاس یافته (p_r) توسط رابطه رانکینه [۲۴] و هوگونیوت [۲۵] به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_r = 2P\frac{7P_0+4P}{7P_0+P} \qquad (۱۲)$$

جهت محاسبه فشار موج منعکس‌شده از سطوح مایل ($p_{r\alpha}$) می‌توان از نمودارهای شکل ۳ استفاده نمود [۲۶].

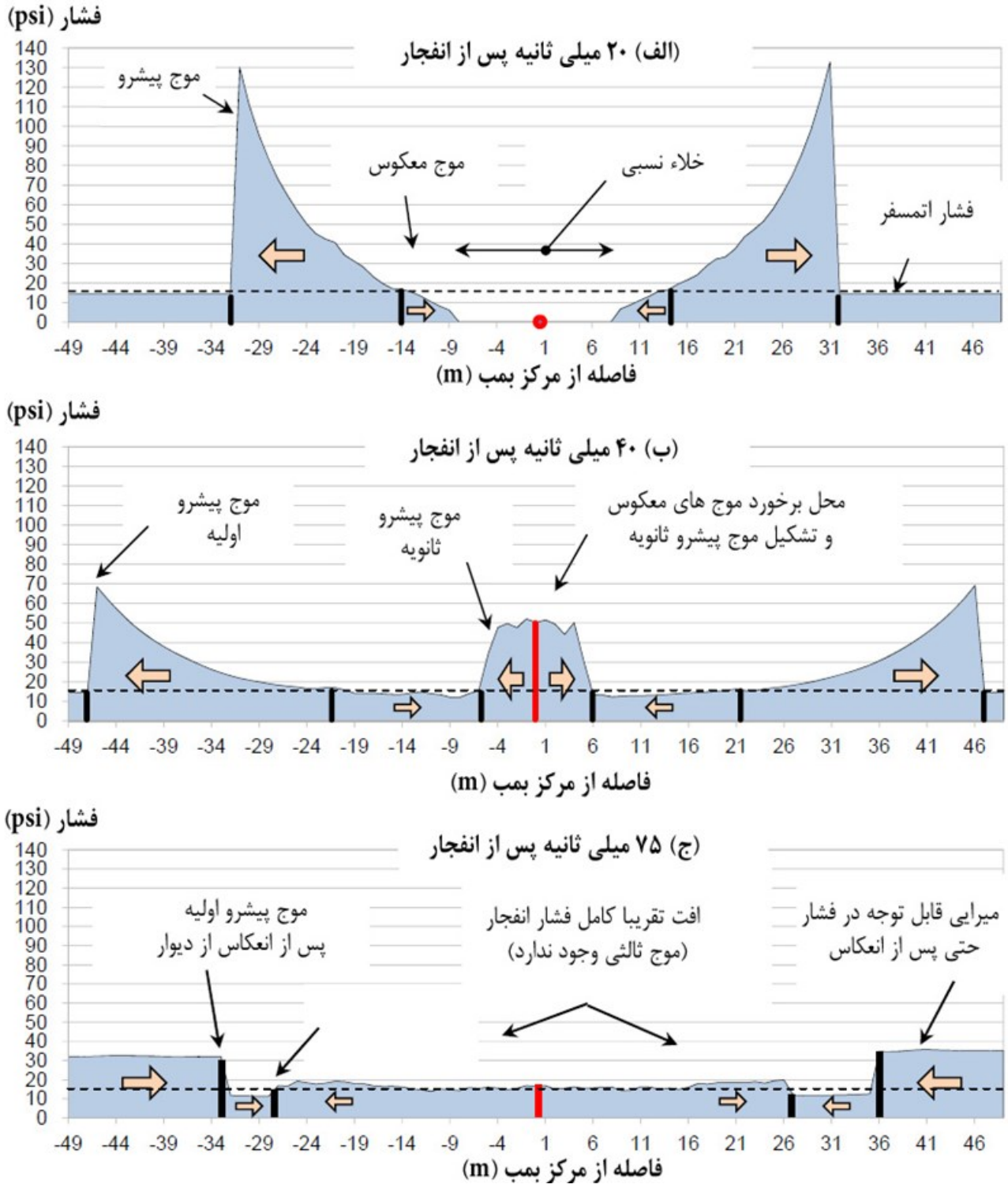


شکل ۳: ضریب فشار موج منعکس‌شده از سطوح مایل [۲۶].

یافته‌ها

در شکل ۴ دیاگرام فشار در فواصل زمانی ۲۰، ۴۰ و ۷۵ میلی‌ثانیه پس از انفجار بمبی معادل ۲۸۱ کیلوگرم TNT نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از طی مسافتی معین، فشار استاتیکی در پشت موج انفجار منفی (کمتر از فشار محیط) می‌گردد و یک خلأ نسبی به سمت مرکز انفجار ایجاد می شود. قدرمطلق فشار در فاز منفی موج انفجار نسبت به فاز مثبت به‌مراتب کمتر می‌باشد ولی برای سازه‌های خاص که در برابر کشش مقاومت کمی دارند مانند پنجره‌ها با تکیه‌گاه‌های ضعیف به سمت خارج و روکش‌های آجری و گچی خصوصاً در بازه‌های مسافتی طولانی ($Z = ۵۰\ m/kg^{1/3}$) می‌تواند نقش تعیین‌کننده داشته باشد. بازه زمانی فاز منفی معمولاً سه تا سه‌ونیم برابر فاز مثبت بوده و فشار منفی به‌ندرت از چهار پوند بر اینچ مربع تجاوز می‌نماید.

مجله طب انتظامی
تابستان ۱۳۹۴- دوره ۴- شماره ۲- صفحات ۹۶-۸۷



شکل ۴: نحوه گسترش موج انفجار ناشی از ۲۸۱ کیلوگرم TNT در هوا.

طبق روابط کراتامر و آلتنبرگ حداکثر فشار و مدت‌زمان فاز منفی انفجار به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۷].

$$P_{neg} = \begin{cases} \frac{0.35}{Z} 10^5\ Pa & (Z > 3.5) \\ 10^4 Pa & (Z < 3.5) \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$t_{neg} = \begin{cases} 0.0104 W^{1/3} s & (Z < 0.3) \\ (0.003125 log Z + 0.01201) W^{1/3} s & (0.3 < Z < 1.9) \\ 0.0139 W^{1/3} s & (Z > 1.9) \end{cases} \quad (۱۴)$$

Journal of Police Medicine
Summer 2015; Vol. 4, No. 2: 87-96

جدول ۲: اثر موج انفجار بر سازه‌ها و بدن انسان [۲۹ و ۲۸].

حداکثر فشار موج انفجار (Psi)	حداکثر سرعت موج (ft/s)	تأثیر بر روی ساختمان‌ها	تأثیر بر بدن انسان
۱	۳۸	شکست شیشه	جراحات ضعیف در اثر برخورد پرتابه‌ها
۲	۷۰	خسارات متوسط به خانه‌ها (شامل شکست درها و آسیب به سقف)	تروماهای ثانویه در اثر برخورد ترکش‌ها و پرتابه‌ها
۳	۱۰۲	خسارات گسترده در ساختمان‌های مسکونی	جراحات عمیق و احتمال مرگ
۵	۱۶۳	ویرانی کامل ساختمان‌ها	جراحات شدید و عمیق و مرگ
۱۰	۲۹۴	تخریب سازه‌های بتن آرمه	مرگ حتمی
۲۰	۵۰۲	تخریب کامل سازه‌های بتن آرمه	مرگ حتمی

تایش و گبکن روابط زیر را جهت محاسبه حداکثر ضربه و زمان رسیدن فشار به ماکزیمم مقدار خود در فاز منفی پروفایل انفجار ارائه نمودند [۱۸]:

$$t_{neg-peak} = \frac{b+1}{b} t_{pos} \qquad (۱۵)$$

$$I_{neg} = \frac{P_{pos} t_{pos}}{b^2} e^{-b} \qquad (۱۶)$$

در جدول ۲ بر اساس مطالعات گلاستون و دولان (۱۹۷۷) و سارتوری (۱۹۸۳) نتایج حاصل از اثر موج انفجار بر سازه‌ها و بدن انسان نشان داده‌شده است [۲۹ و ۲۸]. داده‌های جدول مذکور در سال ۱۹۹۰ توسط دپارتمان وزارت دفاع آمریکا در آیین نامه TM 5-1300 منتشر گردید.

بحث و نتیجه‌گیری

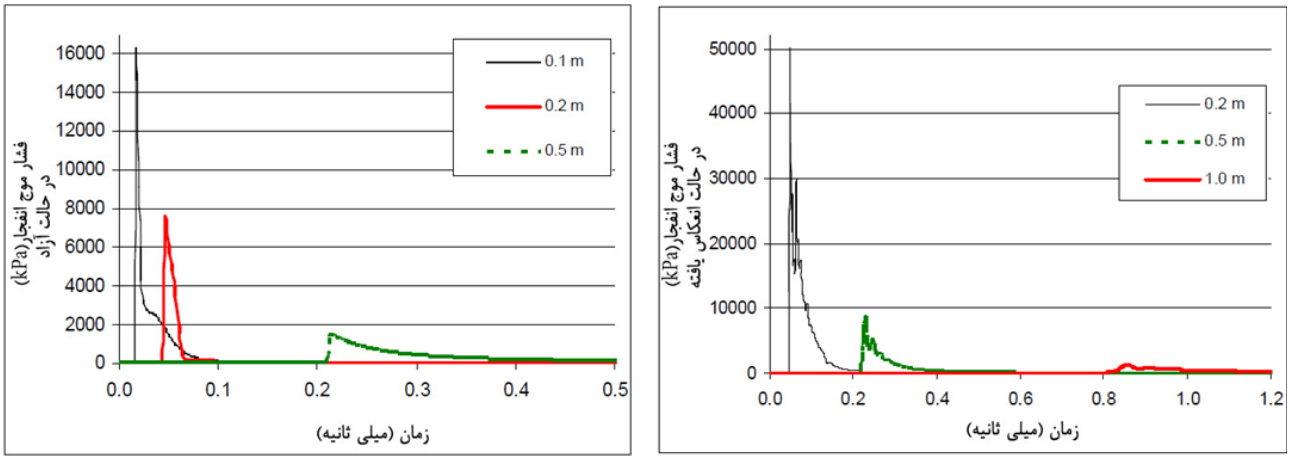
نارنجک سلاح پرتابی کوچکی است که وزن آن از یک کیلوگرم تجاوز نمی‌کند و در جنگ‌های نزدیک مثلاً پاک‌سازی سنگر دشمن یا تیربارچی یا استحکامات دشمن استفاده می‌شود. ماده منفجره (خرج) نارنجک شامل یک ماده انفجاری یا شیمیایی (متناسب با وظیفه تعریف‌شده نارنجک) می‌باشد که توسط محفظه ای فلزی احاطه شده است. محفظه فلزی معمولاً قابلیت ترکش شدن خوبی دارد تا در صورت انفجار مواد منفجره بیشترین آسیب ممکن را به نفرات دشمن وارد کند. در شکل ۵ سه قسمت اصلی ساختمان نارنجک شامل بدنه، خرج و ماسوره نشان داده شده است.

در شکل ۶ فشار موج انفجار حاصل از ۱۷۰ گرم TNT (معادل قدرت نارنجک‌های کلاسیک) نسبت به زمان در حالت آزاد و انعکاس‌یافته به ترتیب در فواصل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ متر و ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰ متر نشان داده شده است.

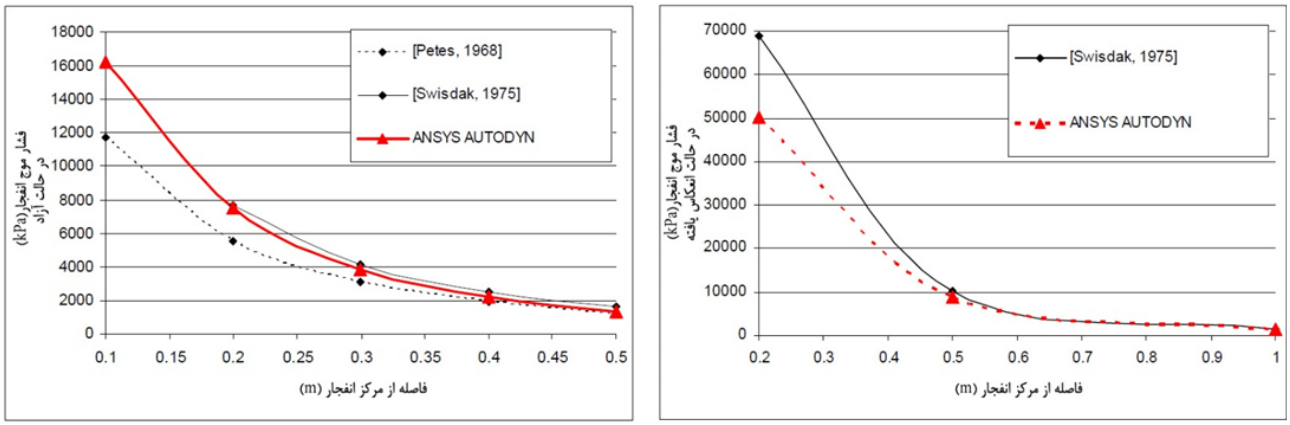


شکل ۵: اجزاء تشکیل‌دهنده ساختمان نارنجک[۳۰].

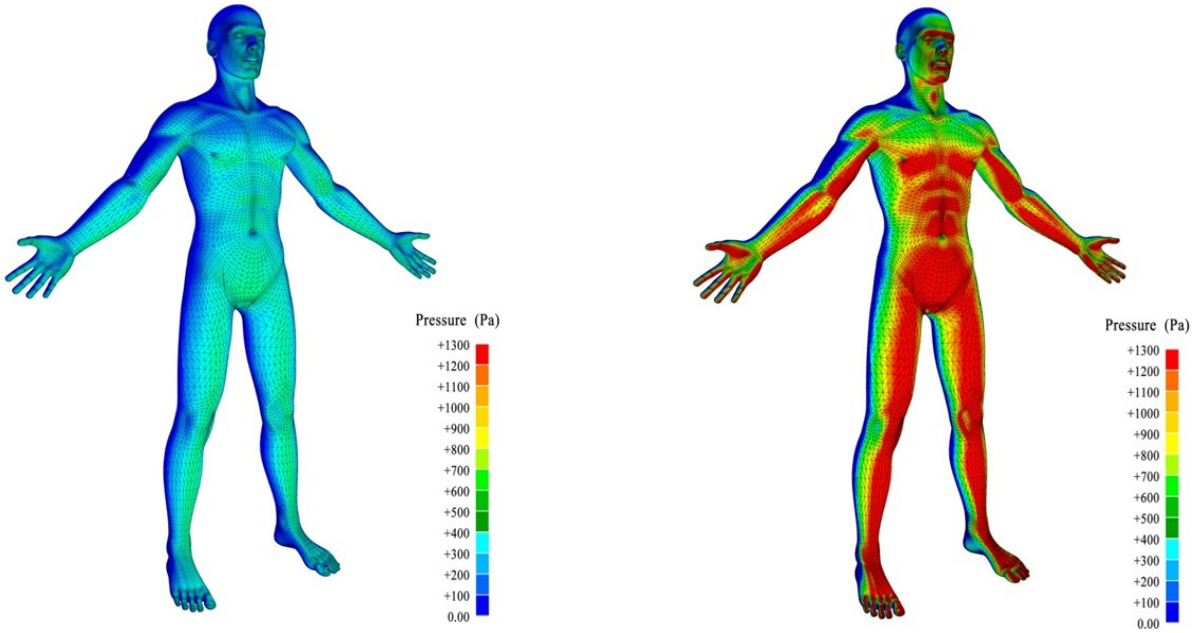
مجله طب انتظامی
تابستان ۱۳۹۴- دوره ۴- شماره ۲- صفحات ۹۶-۸۷



شکل ۶: فشار موج انفجار حاصل از ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس‌یافته بر حسب زمان در فواصل مختلف.



شکل ۷: مقایسه نتایج مدل رایانه‌ای (نرم‌افزار ANSYS) فشار موج انفجار نارنجک با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس‌یافته با مقادیر آزمایشگاهی Swisdak [۳۱] و Petes [۳۲].

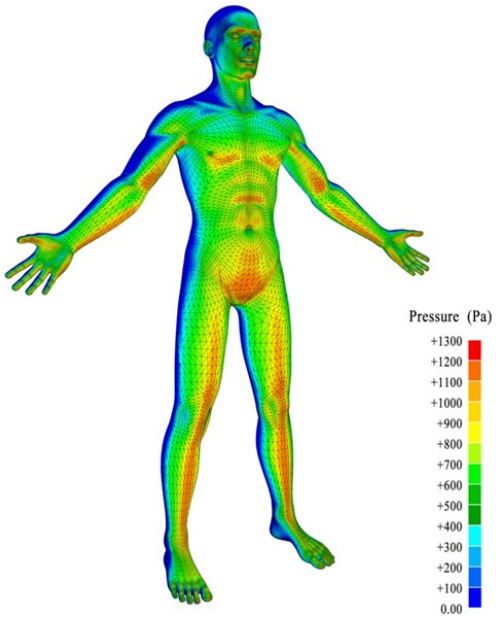


الف) توزیع فشار در فاصله ۰/۶ متر در حالت آزاد.

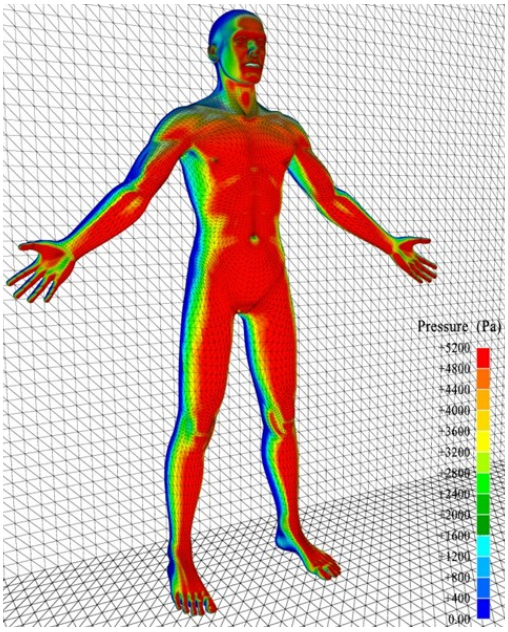
ب) توزیع فشار در فاصله ۱/۸ متر در حالت آزاد.

شکل ۸: توزیع فشار موج انفجار با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته بر بدن انسان در فواصل ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۸ متر.

Journal of Police Medicine
Summer 2015; Vol. 4, No. 2: 87-96



ج) توزیع فشار در فاصله ۱/۲ متر در حالت آزاد.



د) توزیع فشار در فاصله ۱/۲ متر در حالت انعکاس یافته.

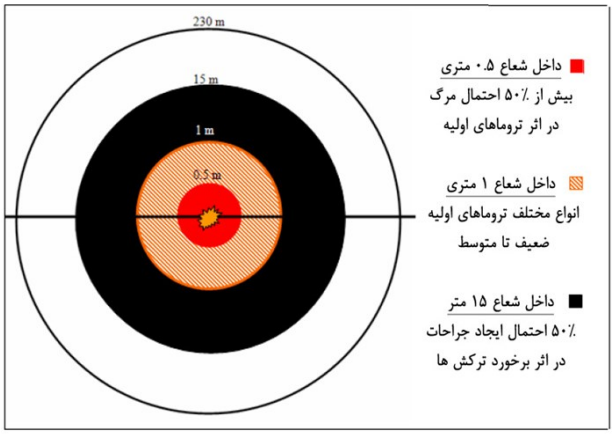
ادامه شکل ۸: توزیع فشار موج انفجار با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته بر بدن انسان در فواصل ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۸ متر.

در شکل ۷ نتایج مدل رایانه‌ای (نرم‌افزار ANSYS) فشار موج انفجار نارنجک با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس‌یافته با مقادیر آزمایشگاهی اسویسداک [۳۱] و پتس [۳۲] مقایسه شده است.

در شکل ۸ توزیع فشار موج انفجار نارنجک با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته بر بدن انسان در فواصل ۰/۶ و ۱/۲ و ۱/۸ متر از مرکز انفجار نشان داده شده است.

معمولاً برای بمب‌ها یک شعاع خطر مؤثر تعریف می‌گردد که عبارت است از شعاع منطقه مدور از مرکز انفجار که ۵۰ درصد احتمال مرگ وجود دارد که در اکثر موارد جهت ارزیابی تلفات انسانی از حد آستانه ترومای ریه استفاده می‌گردد [۳۳].

شعاع خطر مؤثر نارنجک، در مقایسه با شعاع خطر مؤثر یک خمپاره، کوچک و در انواع نارنجک‌ها این شعاع متفاوت است. برای نارنجک‌های کلاسیک معمولی نتایج شکل ۹ انتظار می‌رود.



شکل ۹: شعاع خطر مؤثر نارنجک معمولی.

منابع

1. Covey DC, Born CT. Blast injuries: mechanics and wounding patterns. J Surg Orthop Adv 2009; 19: 8-12.
2. Elsayed NM, Atkins JL. Explosion and blast-related injuries: effects of explosion and blast from military operations and acts of terrorism. Academic Press 2010.
3. Leibovici D, Gofrit ON, Stein M, Shapira SC, Noga Y, Heruti RJ, et al. Blast injuries: bus versus open-air bombings-a comparative study of injuries in survivors of open-air versus confined-space explosions. J Trauma Acute Care Surg 1996; 41: 1030-5.
4. Sochet I, Eveillard S, Piserchia P-F, Vincont J-Y, editors. Dimensioning physical protection barricades against the propagation of pressure waves following a detonation. 13th Interdisciplinary Workshop on Global Security 2010.
5. Von Neumann J. The point source solution. Bethe [Bet47] 1941.
6. Taylor G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences 1950: 159-74.

7. Sedov LI. Propagation of strong shock waves. J Appl Math Mech 1946; 10: 241-50.
8. Latter R. Similarity solution for a spherical shock wave. J Appl Phys 1955; 26: 954-60.
9. Taylor JL. XXXVII. An exact solution of the spherical blast wave problem. Philos Mag 1955; 46: 317-20.
10. USDOD. Structures to resist the effects of accidental explosions. Technical Manual TM5-1300. Department of the Army, the Navy and the Air Force, Year Date Accessed 2015. Available from: https://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_340_02.pdf.
11. TB 700-2, NAVSEAINST 8020.8C. DOD ammunition and explosives hazards classification procedures, Year Date Accessed 2015. Available from: https://www.ddesb.pentagon.mil/docs/tb700-2.pdf.
12. U.S. Department of Energy. A manual for the prediction of blast and fragment loading on structures, DOE/TIC 11268. Washington, DC, Headquarters, U.S. Year Date Accessed 2015. Available from: http://www.scribd.com/doc/103350203/A-Manual-for-the-Prediction-of-Blast-and-Fragment-Loading-on-Structures#scribd.
13. Osteraas JD. Murrah building bombing revisited: A qualitative assessment of blast damage and collapse patterns. J Perform Constr Fac 2006; 20: 330-5.
14. Defense Special Weapons Agency. design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects. Year Date Accessed 2015. Available from: https://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_340_01.pdf.
15. Federal Emergency Management Agency. 428-Primer for designing safe school projects in case of terrorist attacks and school shootings. 2nd ed. Year Date Accessed 2015. Available from: http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/st/bips07_428_schools.pdf.
16. Goel MD, Matsagar VA, Gupta AK, Marburg S. An abridged review of blast wave parameters. Defence Sci J 2012; 62: 300-6.
17. Sedov LI. Propagation of strong shock waves. J Appl Math Mech 1946; 10: 241-50.
18. Teich M, Gebbeken N. The influence of the underpressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads. Int J Protec Struct 2010; 1: 219-34.
19. Larcher M, Herrmann N, Stempniewski L. Explosionssimulation leichter Hallenhullkonstruktionen. Bauingenieur 2006; 81: 271-7. (German)
20. Brode HL. Numerical solutions of spherical blast waves. J Appl Phys 1955; 26: 766-75.
21. Henrych J, Major R. The dynamics of explosion and its use. Elsevier, Amsterdam 1979.
22. Kinney GF, Graham KJ. Explosive shocks in air. Berlin and New York, Springer-Verlag 1985.
23. Sadovskiy M. Mechanical effects of air shock-waves from explosions according to experiments. Sadovskiy MA Selected works: Geophysics and physics of explosion Nauka Press, Moscow 2004.
24. Rankine WM. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 1870: 277-88.
25. Hugoniot H. Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part). J de l'Ecole Polytechnique 1887; 57: 3-97.
26. UFC 3-340-02. Structures to resist the effects of accidental explosions. Year Date Accessed 2015. Available from: http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_340_02.pdf.
27. Krauthammer T, Altenberg A. Negative phase blast effects on glass panels. Int Impact Eng 2000; 24: 1-17.
28. Glasstone S, Dolan PJ. The effects of nuclear weapons. 3rd ed. US Department of Defense and the Energy Research and Development Administration 1977.
29. Sartori L. Effects of nuclear weapons. Physics Today 2008; 36: 32-41.
30. Harris T. How Grenades Work. Year date accessed 17 June 2015. Available from: http://science.howstuffworks.com/grenade.htm.
31. Swisdak M. Explosion effects and properties. Part I: Explosion effects in air. DTIC Document 1975.
32. Petes J. Blast and fragmentation characteristics. Ann N Y Acad Sci 1968; 152: 283-316.
33. Bowen IG, Fletcher ER, Richmond DR. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast. DTIC Document 1968.