

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

Received: 29 January 2015

Revised: 11 March 2015

Accepted: 5 April 2015

## ABSTRACT

Mehdi Navidbakhsh<sup>1</sup>  
Kambiz Kangarlou<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Postdoctoral Researcher, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

**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.

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

e-mail: kangarloo\_kambiz@yahoo.com

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

## 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<sup>۱</sup>

کامبیز کنگرلو<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.  
<sup>۲</sup>پژوهشگر پسادکتر، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

**مقدمه:** تروماهای 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. به دلیل 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 ارائه شده 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 آناتومیکی و سازه‌ای پیش‌بینی 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

محل انفجار، موانع موجود در مسیر انتشار موج و چگونگی عکس‌العمل فرد بستگی دارد [۲ و ۱]. عوامل و مکانیسم‌های مؤثر در تروماهای ناشی از موج انفجار به چهار گروه کلی زیر تقسیم می‌شوند (شکل ۱) [۳]:

۱- تروماهای اولیه که در اثر فشار مستقیم موج انفجار ایجاد می‌شوند.

۲- تروماهای ثانویه که در اثر برخورد ترکش‌ها و انواع پرتابه‌ها ایجاد می‌شوند.

۳- انواع شکستگی‌ها و آسیب‌ها که در اثر پرتاب انسان تحت فشار

انفجار به‌صورت آزاد شدن ناگهانی و سریع حجم بسیار زیادی از انرژی تعریف می‌شود که تولید نور، گرما، صدا و موجی ضربه‌ای می‌نماید. این موج شامل هوای بسیار متراکمی است که به‌صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند. افرادی که در میدان این موج حضور داشته 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



(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](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/Blast_injury))

دیگر نسبت به آن محاسبه می‌گردد. در جدول ۱ فهرستی از مواد منفجره با ضرایب معادل TNT و انرژی مخصوص جرمی آن‌ها ارائه شده 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<sup>۵</sup> [۵] و ریاضیدان انگلیسی تیلر<sup>۶</sup> [۶] بیان گردید. پس از جنگ نیز نظریه‌های مشابهی توسط سدوف<sup>۷</sup> [۷]، لاتر<sup>۸</sup> [۸] و لاکوود-تیلر<sup>۹</sup> [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. پس‌از آن 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.

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<sup>۱</sup> (LE) و تندشکن<sup>۲</sup> (HE) تقسیم‌بندی می‌شوند [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<sup>۳</sup>. از این دسته می‌توان TNT، نیتروگلیسرین، سمتمکس، C4 و آنفو را نام برد. تنها مواد منفجره HE قابلیت ایجاد موج انفجار کلاسیک<sup>۴</sup> را دارا می‌باشند. منفجره‌های LE موادی هستند که اکسیداسیون آن‌ها با سرعتی کمتر از سرعت صوت انجام می‌شود. این پدیده را سوزش<sup>۵</sup> می‌نامند که از جمله می‌توان بمب‌های لوله‌ای، باروت بی‌دود و باروت سیاه، بمب‌های دست‌ساز از مشتقات نفتی مانند انواع کوکتل مولوتف‌ها 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

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

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

در رابطه فوق  $P(t)$  فشار در زمان  $t$ ،  $P_0$  فشار اتمسفر و  $b$  ثابت عددی است که طبق مطالعات تایش<sup>۱</sup> و گبکن<sup>۲</sup> [۱۸] به صورت (۳۰)  $[۱۹]$   $(۰.۱ < Z < ۱۰)$   $b = ۱/۵Z^{-۰.۳۸}$  و یا از رابطه لارکر<sup>۳</sup>  $[۱۹]$   $b = ۵/۲۷۷۷Z^{-۱/۱۹۹۷۵}$  محاسبه می‌گردد. جهت محاسبه پارامترهای انفجار روابط مختلفی بیان شده است که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

بروده<sup>۴</sup> 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]:

(۲)

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

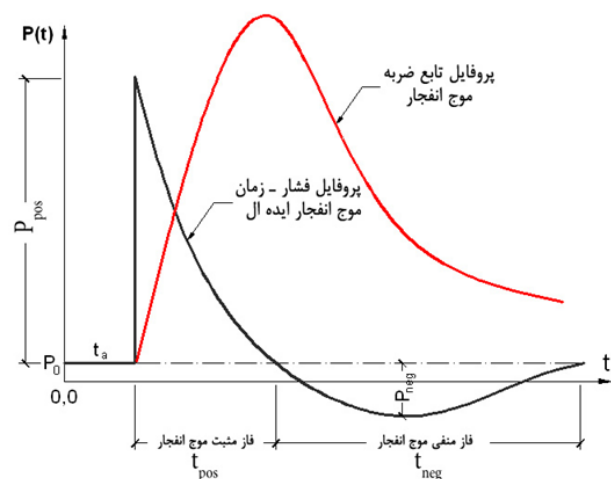
هنریش<sup>۶</sup> براساس تعدادی نتایج آزمایشگاهی روابط زیر را ارائه نمود که با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه فوق تقریباً یکسان بوده و تأییدی بر صحت روابط بروده است [۲۱]:

(۳)

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

$$t_{pos} = e^{(-2.75+0.27\log Z)+\log W^{1/3}} (mS) \quad (۴)$$

پروفایل فشار موج انفجار معمولاً با پارامترهایی همچون زمان ورود موج انفجار ( $t_a$ )، ماکزیمم فشار فاز مثبت و منفی ( $P_{pos}$  و  $P_{neg}$ )، مدت زمان انفجار ( $t_{pos} + t_{neg}$ ) و طول مثبت ( $LW^+$ ) و منفی ( $LW^-$ ) 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<sup>۱</sup> بیان می‌شود [۱۷]:

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

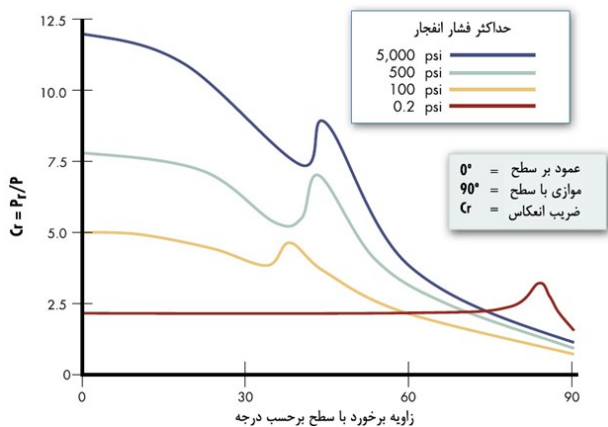
<sup>1</sup>: Friedlander, <sup>2</sup>: Teich, <sup>3</sup>: Gebbeken, <sup>4</sup>: Larcher, <sup>5</sup>: Brode, <sup>6</sup>: Henrych

در روابط ۷ و ۱۰،  $I_{pos}^t = \int_{t_a}^{t_b} [P(t) - P_0] dt$  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 آزاد شده، زاویه و ماهیت سطوح برخورد می‌شوند. امواج منعکس شده به دلیل قدرت بیشتر و حرکت در محیط گرم و فشرده شده توسط امواج اولیه، دارای سرعت بیشتری می‌باشند. فشار موج انعکاس یافته ( $P_r$ ) توسط رابطه رانکینه [۲۴] و هوگونیوت [۲۵] به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_r = 2P \frac{7P_0 + 4P}{7P_0 + P} \quad (12)$$

جهت محاسبه فشار موج منعکس شده از سطوح مایل ( $P_{ra}$ ) می‌توان از نمودارهای شکل ۳ استفاده نمود [۲۶].



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

#### یافته‌ها

در شکل ۴ دیگرام 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 می‌شود. قدرمطلق فشار در فاز منفی موج انفجار نسبت به فاز مثبت به مراتب 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 ( $Z = 50 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) 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.

کینی<sup>۱</sup> و گرام<sup>۲</sup> بر پایه یک سری تحقیقات آزمایشگاهی گسترده روابط زیر را در سال ۱۹۸۵ ارائه نمودند [۲۲]:

(۵)

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

(۶)

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

(۷)

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

روابط سادوسکی<sup>۳</sup> که در مهر و موم‌های اخیر به‌عنوان روابط پایه جهت محاسبه فشار ماکزیمم و مدت زمان فاز مثبت انفجار استفاده می‌شود [۲۳]:

(۸)

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

(۹)

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

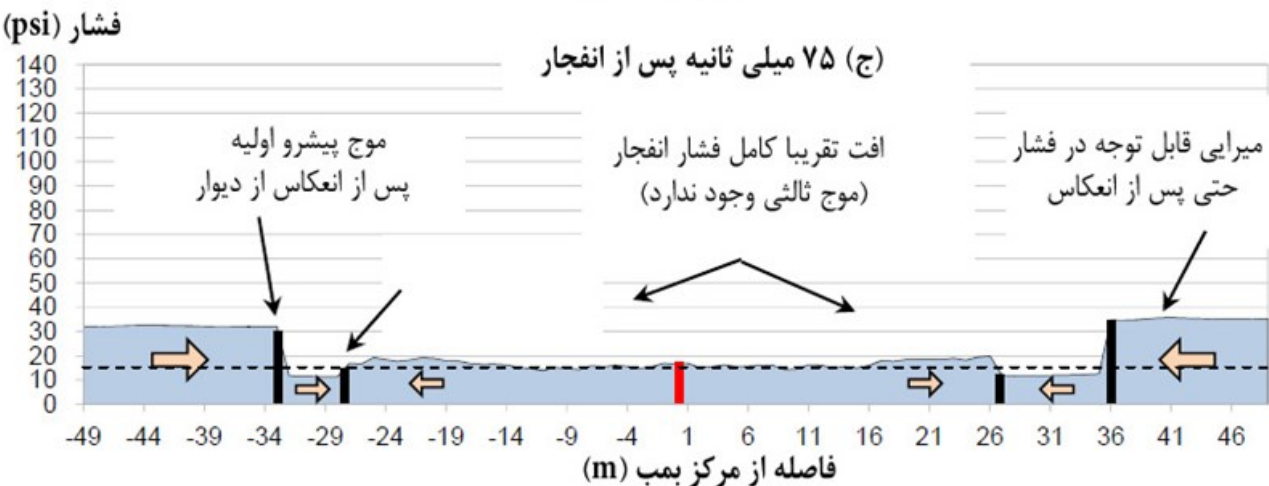
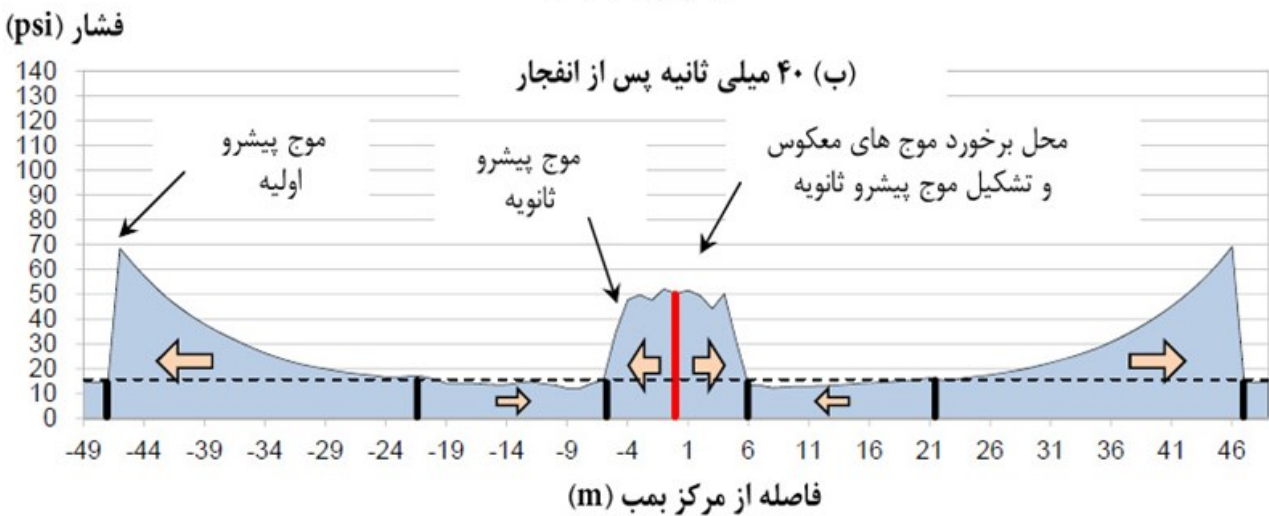
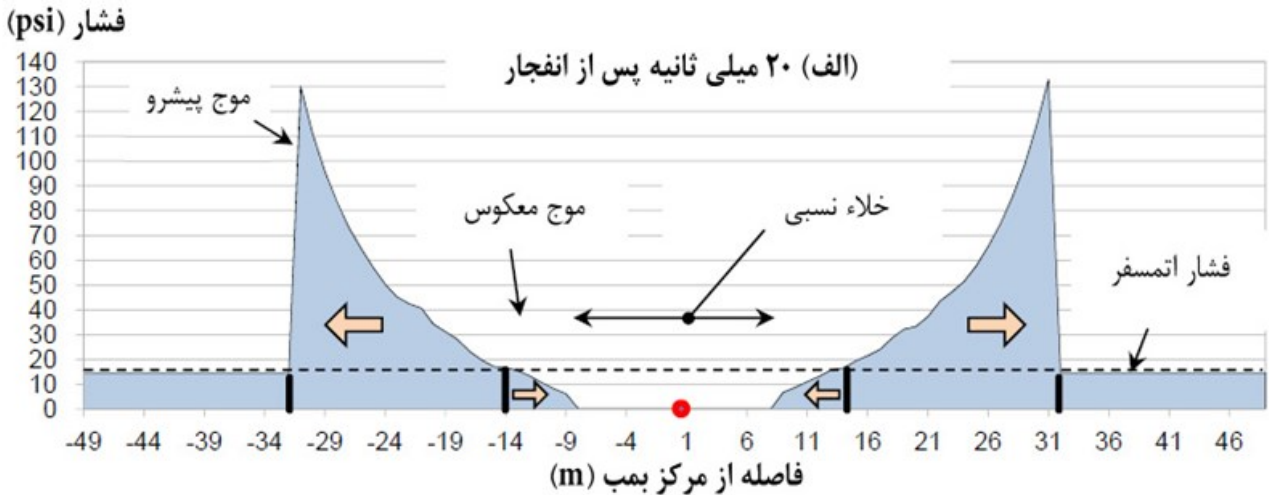
(۱۰)

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

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) به صورت قراردادی تعریف گردیده که به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۷]:

(۱۱)

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



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

طبق روابط کراتامر و آلتنبرگ حداکثر فشار و مدت زمان فاز منفی انفجار به صورت زیر محاسبه می گردد [۲۷].

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

(۱۴)

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

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

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

### 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 تعریف شده نارنجک) می‌باشد که توسط محفظه 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 انعکاس یافته به ترتیب در فواصل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ متر و ۰/۵، ۱/۰ متر نشان داده شده است.

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]:

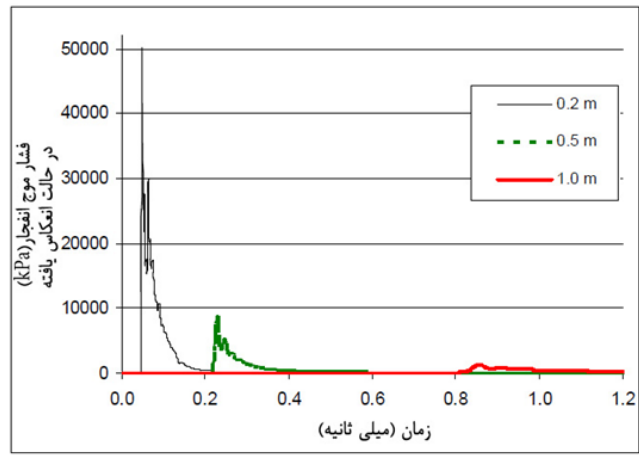
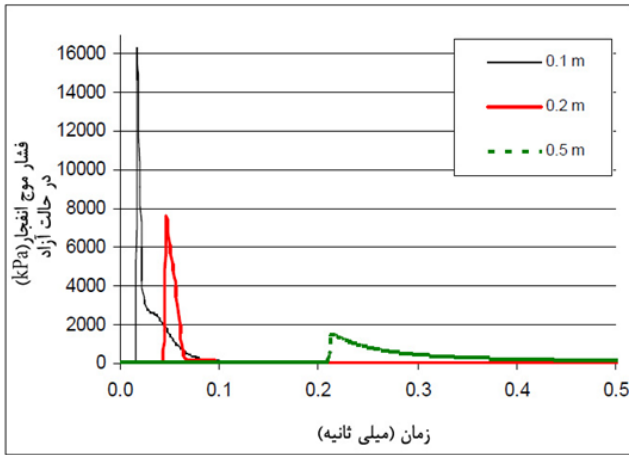
$$t_{neg-psak} = \frac{b+1}{b} t_{pos} \quad (15)$$

$$I_{neg} = \frac{P_{pos} t_{pos}}{b^2} e^{-b} \quad (16)$$

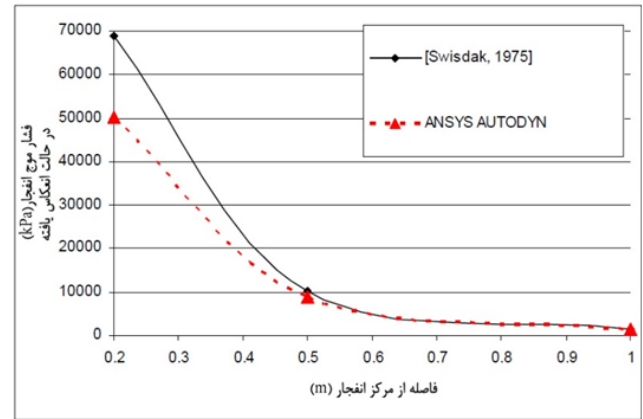
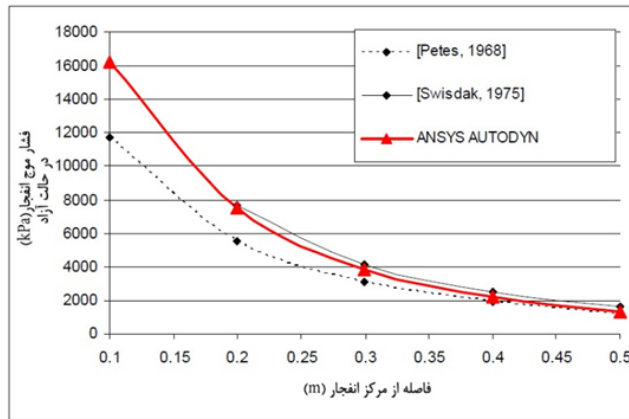
در جدول ۲ بر اساس مطالعات گلاستون و دولان (۱۹۷۷) و سارتوری (۱۹۸۳) نتایج حاصل از اثر موج انفجار بر سازه‌ها و بدن انسان نشان داده شده است [۲۸ و ۲۹]. داده‌های جدول مذکور در سال ۱۹۹۰ توسط دپارتمان وزارت دفاع آمریکا در آیین نامه TM 5-1300 منتشر گردید.



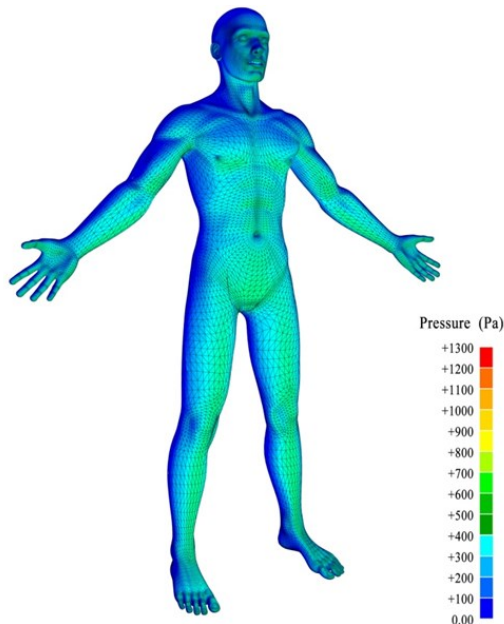
شکل ۵: اجزاء تشکیل دهنده ساختمان نارنجک [۳۰].



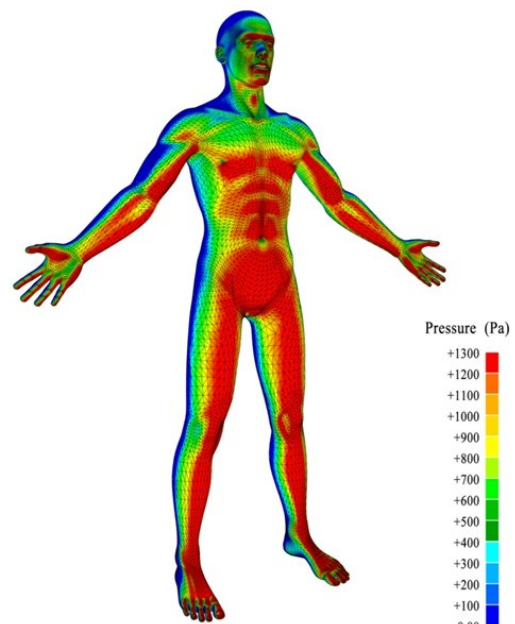
شکل ۶: فشار موج انفجار حاصل از ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته بر حسب زمان در فواصل مختلف.



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

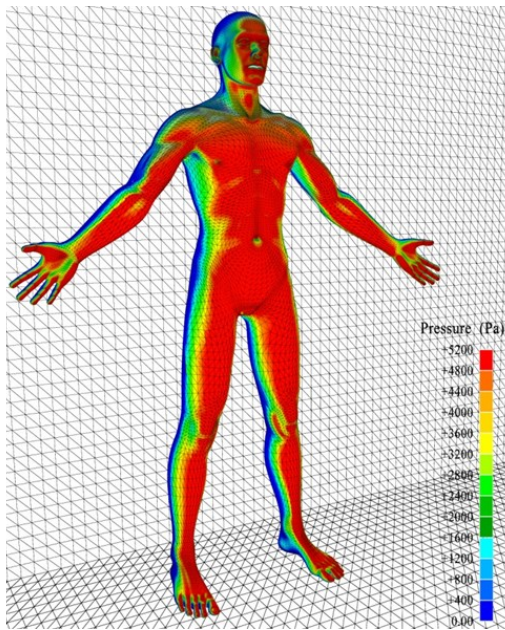


ب) توزیع فشار در فاصله ۱/۸ متر در حالت آزاد.

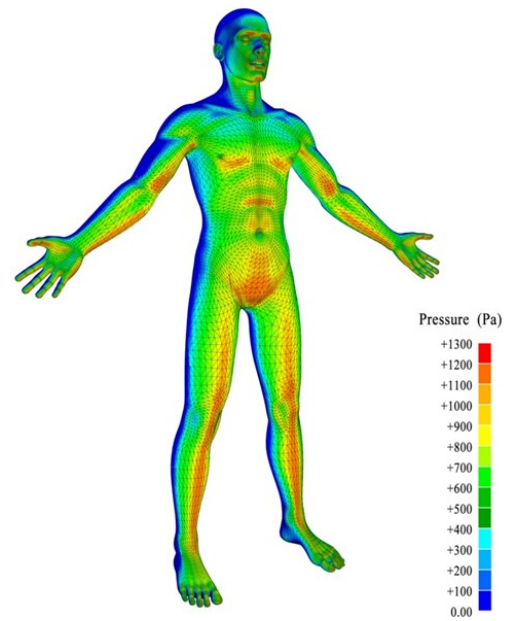


الف) توزیع فشار در فاصله ۱/۶ متر در حالت آزاد.

شکل ۸: توزیع فشار موج انفجار با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته بر بدن انسان در فواصل ۱/۸ و ۱/۶ و ۱/۴ متر.



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



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

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

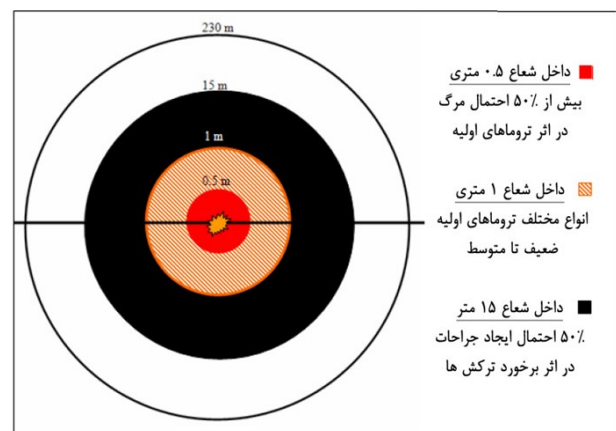
آستانه ترومای ریه استفاده می‌گردد [۳۳]. شعاع خطر مؤثر نارنجک، در مقایسه با شعاع خطر مؤثر یک خمپاره، کوچک و در انواع نارنجک‌ها این شعاع متفاوت است. برای نارنجک‌های کلاسیک معمولی نتایج شکل ۹ انتظار می‌رود.

#### 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. 13<sup>th</sup> 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.

در شکل ۷ نتایج مدل رایانه‌ای (نرم‌افزار ANSYS) فشار موج انفجار نارنجک با خرجی معادل ۱۷۰ گرم TNT در حالت آزاد و انعکاس یافته 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 ۱/۶ 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



شکل ۹: شعاع خطر مؤثر نارنجک معمولی.

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](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](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. 2<sup>nd</sup> ed. Year Date Accessed 2015. Available from: [http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/st/bips07\\_428\\_schools.pdf](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 under-pressure 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](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. 3<sup>rd</sup> 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.