

# اندازه‌گیری سرعت موج انفجار و تعیین ضریبهای معادله حالت BKW

سیامک حسین پور\* و محمد فرشچی\*\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۷۶/۴/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۶/۱۰/۱۷)

چکیده - با عبور موج ضربه‌ای از مواد منفجره جامد، این مواد در یک مرز بسیار نازک در اثر تجزیه شیمیایی به گازهای حاصل از انفجار تبدیل می‌شوند. در حقیقت ماده منفجره جامد در مقایسه با دیگر مواد موجود در طبیعت این تفاوت عمده را دارد که ساختمان شیمیایی آن طوری است که در اثر عبور موج ضربه‌ای با شدت زیاد تجزیه شده و گازهای حاصل از تجزیه آن قابلیت تأمین تلفات انرژی موج ضربه‌ای را دارا هستند. برای طراحی سیستمهایی که با مواد منفجره عمل می‌کنند لازم است اطلاعات دقیقی از نحوه ایجاد، پیشروی و گسترش موج انفجار در این مواد به دست آید. در تحلیل رفتار این سیستمها مسئله مهم مشخص نبودن معادله حالت ماده در شرایط نامتعارف حین انفجار خواهد بود. به علت فشار بسیار بالای گازهای حاصل از انفجار، تعیین مستقیم معادله حالت امکانپذیر نیست. در این مقاله روش غیر مستقیمی برای تعیین معادله حالت گازهای حاصل از انفجار معرفی می‌شود. در این روش شکلی برای معادله در نظر گرفته می‌شود که شامل چند پارامتر است و با حل عددی این معادله به همراه معادله‌های بقا، پارامترها طوری تنظیم می‌شوند که نتایج حاصل از حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت پیشروی موج انفجار برهم منطبق شوند. متداولترین شکلی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد معادله حالت BKW<sup>1</sup> است. در کار حاضر با استفاده از این معادله حالت سرعت پیشروی موج انفجار، دما و فشار گازهای حاصل در پشت جبهه موج پیش‌بینی شده و مقادیر سرعت به دست آمده با نتایج اندازه‌گیری شده برای مواد منفجره متداول مثل RDX و HMX و PETN مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

## Determination of BKW Equation of State Parameters via Measurement of the Detonation Velocity in Condensed Explosives

S. Hossain-pour and M. Farshchi

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

**ABSTRACT-** An optical system has been redesigned and used to measure detonation velocity as a function of condensed explosive density for RDX, HMX, PETN. These measurements are then used to determine and fine tune parameters appearing in the BKW (Beker-Kistiakowsky-Wilson) equation of

\* دانشجوی دکترا \*\* استادیار

|   |   |          |                        |   |  |
|---|---|----------|------------------------|---|--|
| معادله (۲).   | معادله (۹).   |          |                        |   |  |
| فشار ماده قبل از انفجار، Pa،  | متغیر میانی در معادله حالت BKW، بدون بعد، معادله (۶).       | X        | $C_1, C_2, \dots, C_n$ | ضریبهای چند جمله‌ای تابعیت انرژی داخلی از دما، معادله (۹).                        | $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}^n)$ |
| ثابت جهانی گازها، $\text{KJ}/\text{kmole K}$ .                                      | جزء مولی مربوط به گاز آذر مخلوط گازی، بدون بعد، معادله (۸). | $x_i$    | R                      | انرژی داخلی مخلوط گازهای حاصل از انفجار، بر واحد جرم، معادله (۳).                 | $\text{KJ}/\text{Kg}$                  |
| دمای مخلوط گازی حاصل از انفجار، K، معادله (۶).                                      | پارامتر معادله حالت، بدون بعد، معادله (۷).                  | $\alpha$ | T                      | انرژی داخلی ماده منفجره قبل از انفجار بر واحد جرم، معادله (۳).                    | $\text{KJ}/\text{Kg}$                  |
| دمای کاهش یافته برای معادله حالت ماده جامد گرافیت، بدون بعد، معادله (۱۰).           | پارامتر معادله حالت، بدون بعد، معادله (۶).                  | $\beta$  | $T_r$                  | متغیر میانی در معادله حالت BKW، $\text{kmole K}^{(1-\alpha)}/\text{m}^3$ .        | معادله (۷).                            |
| سرعت گازهای پشت جبهه انفجار از دیدگاه، مختصات متصل به موج، $\text{m/s}$ معادله (۱). | چگالی نسبی گرافیت، بدون بعد، معادله (۱۰).                   | $\eta$   | u                      | مقدار ماده‌ای که در واحد زمان و بر واحد سطح مقطع تبدیل به گاز می‌شود، معادله (۴). | $\text{Kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$    |
| سرعت پیشروی موج، $\text{m/s}$ ، معادله (۱).   | پارامتر معادله حالت، K، معادله (۷).                         | $\theta$ | $u_0$                  | تعداد کل اجزای گازی و جامد حاصل از انفجار، بدون بعد، معادله (۸).                  | N                                      |
| حجم مخصوص مولی گازهای حاصل از انفجار، $\text{m}^3/\text{kmole}$ معادله (۶).         | پارامتر معادله حالت، $\text{cc}/\text{kmole}$ ، معادله (۸). | $\kappa$ | V                      | فشار گازهای حاصل از انفجار، Pa،   | P                                      |
| حجم مخصوص مولی ماده منفجره قبل از انفجار، $\text{m}^3/\text{kmole}$ .               | چگالی ماده منفجره اولیه، $\text{g}/\text{cc}$ ، معادله (۱). | $\rho_0$ | $V_0$                  |   |  |

state for gases at extremely high pressures. Steady state form of conservation equations along with the BKW state equation and the Chapman-Jouquet hypothesis are used to determine the detonation velocity and the thermodynamic state of the gas behind the detonation front. An iterative scheme is used to adjust the BKW equation parameters such that the calculated detonation velocities, obtained from the solution of the above set of equations, match the measured values.

#### ۱- مقدمه

نظامی، اطلاعات مربوط در این زمینه به صورت محرمانه در صنایع نظامی کشورها نگهداری می‌شوند. همچنین به علت سرعت بسیار بالای فعل و انفعالات طی عمل یک ماده منفجره، ایجاد ابزارهایی برای مشاهدات تجربی این پدیده کاری بسیار پیچیده و مشکل خواهد بود. در این مقاله پس از مقدمه‌ای کوتاه در رابطه با فیزیک انفجار، روش انجام آزمایشهای تعیین سرعت پیشروی موج انفجار در مواد و چگالیهای مختلف ارائه می‌شود و سپس نحوه تعیین ضریبهای معادله حالت BKW برای گازهای حاصل از انفجار از طریق نتایج اندازه‌گیری سرعت ارائه شده و با نتایج مراجع موجود مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

ایجاد انفجار و استفاده از مواد منفجره به عنوان روشی برای شکل دهی، برش و جوشکاری فلزات در موارد خاص و حفاری تونلها و چاهها کاربرد گسترده‌ای دارد. مواد منفجره به عنوان منبع بسیار متراکمی از انرژی که به سادگی قابل حمل و نقل بوده و آزادسازی انرژی آن به سهولت انجام می‌پذیرد از اوایل کشف مورد توجه انسان بوده است. مسئله مهم در استفاده از این مواد و طراحی سیستمهایی که با این مواد سروکار دارند، شناخت مکانیزم عمل آنها طی آزاد سازی انرژی و در نتیجه هدایت مناسب این انرژی در جهت مطلوب است. به علت استفاده گسترده از این مواد در سلاحهای

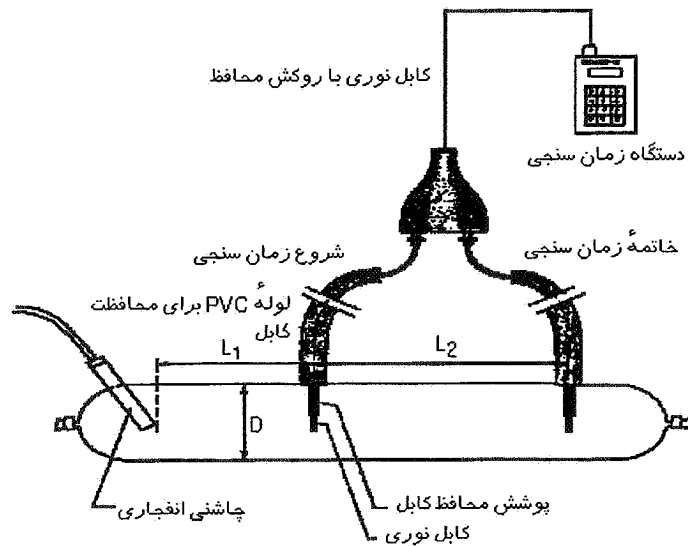
از دیدگاه کلی، مکانیزم پیشروی موج انفجار در مواد منفجره جامد یا مایع مشابه مکانیزم پیشروی موج در مخلوطهای گازی قابل اشتعال است. در مخلوطهای گازی سرعت پیشروی موج و فشار گازهای حاصل، تابعی از فشار مخلوط اولیه یا به عبارتی چگالی مخلوط بوده و با افزایش آن سرعت پیشروی موج و فشار گازهای حاصل افزایش می‌یابد. در مورد مواد منفجره جامد یا مایع به علت چگالی اولیه بالاتر ماده، سرعت پیشروی موج و فشار گازهای حاصل به مراتب بالاتر خواهد بود (سرعت پیشروی در حدود  $8000 \text{ m/sec}$  در مقایسه با سرعت  $2000 \text{ m/sec}$  و فشار  $200000 \text{ atm}$  در مقایسه با فشار  $50 \text{ atm}$ ). تحت چنین فشار بالایی دیگر نمی‌توان از فرض معادله حالت گاز ایده‌آل استفاده کرد و در حقیقت معادله حالت مخلوط معین نخواهد بود.

فرق عمده‌ای که بین انفجار مخلوطهای گازی قابل اشتعال و مواد منفجره وجود دارد در ساختمان شیمیایی و مولکولهای این مواد است. در مخلوطهای گازی با عبور موج انفجار دو مولکول مجزای سوخت و اکسیدکننده در اثر افزایش فشار و نفوذ گرما از ناحیه پشت موج، تجزیه شده و پس از رسیدن رادیکالهای مناسب به یکدیگر ترکیبات جدیدی به وجود آمده و انرژی آزاد می‌شود و به علت پایداری نسبی هر کدام از مولکولهای اولیه، انرژی تحریک‌زایی برای شکستن پیوندهای اولیه لازم است. در مورد مواد منفجره اتمهای اکسیدکننده و اکسید شونده در یک مولکول قرار دارند و به علت ناپایداری شدید خود مولکول، انرژی لازم برای شکستن پیوندها کمتر است. همچنین رادیکالهای به وجود آمده از شکستن پیوندهای قبلی در فاصله نزدیکی از هم قرار داشته و خیلی سریع پیوندهای جدید به وجود می‌آیند. مجموعه این عوامل باعث می‌شوند تا سرعت پیشروی موج در مواد منفجره نسبت به مخلوطهای گازی افزایش یافته و ضخامت ناحیه فعل و انفعالات شیمیایی پشت جبهه موج شدیداً کاهش یابد. (این فاصله در مواد منفجره در حد چند مولکول تا چند دهم میلی‌متر است

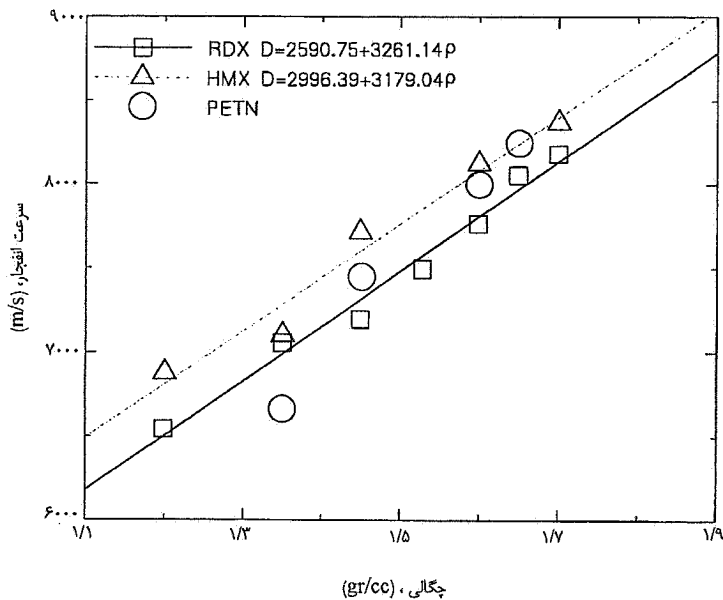
در حالی که در مورد مخلوطهای گازی این فاصله در حدود چند میلی‌متر خواهد بود). کاهش ضخامت ناحیه فعل و انفعالات شیمیایی به صورت نسبی باعث سادگی تحلیل نظری رفتار مواد منفجره در مقایسه با رفتار مخلوطهای گازی در حال انفجار می‌شود ولی در مقابل مسئله معادله حالت گازهای حاصل از انفجار باعث پیچیدگی شدید آن خواهد شد.

۳- تعیین تجربی سرعت پیشروی موج در مواد منفجره سه نوع ماده منفجره متداول در صنعت برای تعیین سرعت پیشروی موج انفجار در نظر گرفته شده و سرعت موج انفجار به عنوان تابعی از چگالی ماده منفجره در این مواد صورت پودر بوده و در صنعت آنها رازیر پرس متراکم می‌کنند تا به شکل مطلوب درآیند. برای تعیین سرعت پیشروی موج در هر کدام از این مواد در چگالیهای مختلف، ابتدا پودر تا چگالی مورد نظر متراکم شده و سپس سرعت پیشروی موج در آنها اندازه‌گیری می‌شود.

روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری سرعت حرکت موج انفجار وجود دارد. در روش مورد استفاده، برای ثبت سرعت حرکت موج انفجار در حرکت دائمی، از دو حس کننده نوری در دو نقطه از ماده منفجره با فاصله معین استفاده شده و زمان رسیدن موج از یک حس کننده به حس کننده دیگر اندازه‌گیری می‌شود. این سیستم دارای دو دیود حساس به نور مادون قرمز است که کنترل مدار الکترونیکی زمان سنج را به عهده دارند. مدت زمان لازم برای رسیدن پالس نوری از اولین دیود به دومین دیود توسط سیستم زمان سنج ثبت شده و یا معلوم بودن فاصله دو دیود از یکدیگر، سرعت متوسط به دست می‌آید. دیوهای استفاده شده از بین چند نوع دیود موجود در بازار انتخاب شده است. برای انتخاب دیود مناسب زمان عملکرد آن اندازه‌گیری می‌شود. زمان عملکرد دیوهای انتخاب شده در حد یک نانو ثانیه ( $10^{-9} \text{ sec}$ ) بوده است. در دستگاه مذکور برای انتقال نور از ماده منفجره به دیودها از دو رشته کابل نوری استفاده شده است، شکل (۱). طی استفاده از این سیستم با هر بار اندازه‌گیری،



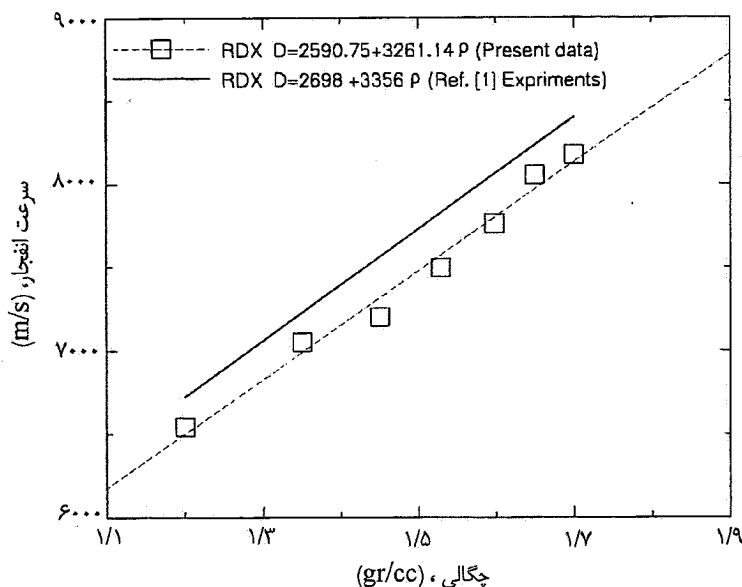
شکل ۱- شکل شماتیک دستگاه اندازه گیری سرعت حرکت دائمی موج



شکل ۲- سرعتهای اندازه گیری شده برای مواد RDX, HMX, و PETN در چگالیهای مختلف

انتهای هر رشته سیم یک دیود جدید تعبیه شده است. این دیودها بر روی ماده منفجره و در محل گذر موج انفجار نصب می شوند و به جای کابل نوری عمل می کنند. روش جدید امکان آزمایش و حصول اطمینان از کارکرد و عدم قطعی در کابلهای اطلاع رسان به دستگاه زمان سنج اصلی را نیز فراهم می کند در حالی که این کار در روش استفاده از کابلهای نوری امکانپذیر نیست. البته در این روش در هر انفجار دو دیود از بین می رود که در مقایسه با کابل نوری سیستم اقتصادیتر است.

مقداری از طول کابلها در اثر انفجار از بین می رفت تا در نهایت طول باقیمانده از کابل نوری به اتمام رسید. به علت آنکه کابل نوری مورد استفاده در داخل کشور قابل تهیه نبوده و تهیه آن از خارج از کشور به زمان زیادی نیاز داشت، سیستم الکترونیکی ساده ای طراحی شد که هم اکنون به جای کابل نوری به همراه دستگاه اندازه گیری مورد استفاده قرار می گیرد. در روش جدید برای انتقال پالسهای نوری از جبهه موج انفجار به دو دیود در مدار زمان سنج، از یک سیستم الکترونیکی استفاده شده که شامل دو رشته سیم معمولی است و در



شکل ۳- مقایسه نتایج تجربی مرجع [۱] و کار حاضر برای ماده RDX

چگالیهای مختلف یکسان است یا به عبارتی شیب تغییرات سرعت نسبت به چگالی برای هر دو تجربه یکی است. اختلاف عرض از مبدا این دو نتیجه تجربی می تواند علل مختلفی از قبیل فرایند ساخت، دانه بندی، درصد مواد افزودنی مانند موم<sup>۲</sup> و کربن و یا قطر لوله مواد منفجره داشته باشد و با تکرار آزمایشها می توان علت این موضوع را بررسی کرد. با انجام این آزمایشهای تجربی اطلاعات لازم برای تعیین دقیق ضریبهای معادله حالت گازهای حاصل از انفجار فراهم شده و علاوه بر این، نتایج به دست آمده به عنوان مرجع اطلاعاتی مناسب برای مقایسه بین مواد مختلف می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در تجربیات مذکور سرعت موج برای شش چگالی مختلف RDX و پنج چگالی HMX و چهار چگالی PETN به دست آمده است. برای حصول اطمینان از مقدار خطای دستگاه اندازه گیری، در چند چگالی خاص اندازه گیریها چندین بار تکرار شده است و مقدار خطای مشاهده شده همواره کمتر از ۱٪ بوده و قابل ارائه در شکل (۲) نیست. با در نظر گرفتن تکرارپذیری نتایج آزمایش و خطی بودن رابطه چگالی با سرعت، در شکل (۲) برای دو ماده RDX و HMX خطی از مقدار نتایج تجربی عبور داده شده است و معادله هر خط در شکل نشان داده شده است. به علت محدودیت دسترسی به ماده

برای انطباق نتایج اندازه گیری سرعت با نتایج حل عددی می بایستی آزمایشهای مورد نظر طوری طراحی شوند که سرعت اندازه گیری شده تا حد امکان به سرعت حرکت موج یک بعدی و دائمی نزدیک باشد تا فرضیات مسئله رانکین - هوگنیوت ارضا شود. برای این منظور مواد منفجره درون لوله هایی به قطر ۲۲ mm و طول ۱۷۰ mm و ضخامت تقریبی ۲ mm فشرده می شود. این مواد در چگالیهای مختلف از ۱/۲ تا ۱/۸ gr/cc در داخل لوله های فوق فشرده می شوند. برای ایجاد چگالی یکنواخت در طول لوله، پر شدن لوله در چند مرحله توسط حلقه های متوقف کننده با ارتفاع معین که بر روی قالب قرار می گیرند، انجام می شود. با معلوم بودن سطح مقطع لوله، حجم هر مرحله از تراکم مشخص است و برای رسانیدن ماده منفجره به چگالی مورد نظر کافی است در هر مرحله به اندازه کافی ماده در داخل لوله ریخته شود. بدون استفاده از روش متراکم سازی مرحله ای، ایجاد چگالی یکنواخت میسر نخواهد بود. در شکل (۲) نتایج حاصل از اندازه گیری سرعت برای مواد در چگالیهای مختلف ارائه شده است.

در شکل (۳) نتایج کنونی اندازه گیری سرعت در ماده RDX با منحنی تجربی به دست آمده از تجربیات مرجع [۱] مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می شود نتایج به دست آمده حداکثر ۵٪ با نتایج مرجع [۱] اختلاف دارد و این اختلاف برای تمام

سرعت پیشروی آن ثابت بوده و مطابق شکل (۴) می توان حجم کنترلی در اطراف موج در نظر گرفت که با سرعت موج انفجار در میدان حرکت می کند. در این شرایط معادله های بقا در دو طرف موج را می توان به صورت زیر نشان داد.

$$\rho u = \rho_0 u_0 \quad (1)$$

$$\rho u^2 + P = \rho_0 u_0^2 + P_0 \quad (2)$$

$$E + \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = E_0 + \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{u_0^2}{2} \quad (3)$$

با حذف  $u$  بین معادله های بالا، این سه معادله به دو معادله خط رایلی و منحنی هوگونیوت ساده می شوند. [۲ و ۳].

$$\dot{m}^2 = (\rho_0 u_0)^2 = (\rho u)^2 = \frac{P - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}} \quad (4)$$

$$E = E_0 + \frac{1}{2} (P + P_0) \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (5)$$

برای کامل کردن این سیستم معادله ها نیاز به خواص ترمودینامیکی ماده اولیه و خواص ترمودینامیکی گازهای حاصل از انفجار خواهد بود. خواص ترمودینامیکی ماده منفجره معلوم و داده شده است. برای مشخص کردن خواص ترمودینامیکی گازهای حاصل به دو معادله حالت نیاز است. معادله حالت اول رابطه فشار، دما و حجم مخصوص را بیان می کند که برای این منظور معادله حالت BKW در نظر گرفته شده است. این معادله حالت به صورت زیر مشخص می شود [۲-۴].

$$\frac{P}{R T} = 1 + X \exp(\beta X) \quad (6)$$

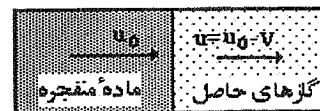
$$X = \frac{K}{V (T + \Theta)^\alpha} \quad (7)$$

$$K = \kappa \sum_{i=1}^N x_i k_i \quad (8)$$

این معادله حالت به صورت تابعی از چهار پارامتر  $\Theta, \beta, \alpha$  و  $\kappa$  بیان



از دیدگاه ناظر ساکن در آزمایشگاه



از دیدگاه ناظر در حال حرکت با موج

شکل ۴- سرعت گازهای حاصل از انفجار از دیدگاه ناظر ساکن و ناظر متصل به موج

PETN تعداد نقاط تجربی برای این ماده کم است. در نتیجه، در این شکل معادله خط مربوط به این ماده ارائه نشده است.

#### ۴- حل عددی معادله های رانکین - هوگونیوت

برای طراحی سیستمهایی که با مواد منفجره عمل می کنند لازم است اطلاعات دقیقی از نحوه ایجاد، پیشروی و گسترش موج انفجار در این مواد به دست آید. در تحلیل رفتار این سیستمها مسئله مهم مشخص نبودن معادله حالت ماده در شرایط نامتعارف حین انفجار خواهد بود. به علت فشار بسیار زیاد گازهای حاصل از انفجار، تعیین مستقیم معادله حالت امکانپذیر نیست. تحت فشار گازهای حاصل از انفجار، حس کننده فشار سالم نخواهد ماند و نیز در صورت موجود بودن چنین حس کننده ای، مدرج کردن این حس کننده ناممکن خواهد بود. همچنین به علت سرعت بسیار زیاد موج انفجار، اندازه گیری دمای گازهای حاصل نیز تقریباً ناممکن است. در نتیجه ایجاد آزمایشهایی مستقیم برای تعیین معادله حالت گازهای حاصل از انفجار ناممکن بوده و سرعت پیشروی موج انفجار تقریباً تنها پارامتری است که با دقت قابل قبولی، قابل اندازه گیری است.

در روش غیر مستقیم برای تعیین معادله حالت گازهای حاصل از انفجار، شکلی برای معادله حالت در نظر گرفته می شود که شامل یکی یا چند ضریب است و از طریق حل عددی معادله های بقا همراه با این معادله حالت، ضریبها طوری تنظیم می شوند که نتایج حاصل از حل عددی و مقادیر اندازه گیری شده سرعت پیشروی موج بر هم منطبق شوند. در صورتی که حرکت موج به حالت دایم رسیده باشد،

$$P = P_1(\eta) + a(\eta) T_r + b(\eta) T_r^2 \quad ; \quad \eta = \frac{\rho}{\rho_0}$$

$$P_1(\eta) = -2/4673 + 6/7692 \eta - 6/9555 \eta^2$$

$$+ 3/0405 \eta^3 - 0/3869 \eta^4$$

$$a(\eta) = -0/2267 + 0/2712 \eta$$

$$b(\eta) = 0/08316 - 0/07804 \eta^{-1} + 0/03068 \eta^{-2} \quad (10)$$

که در آن  $\rho_0 = 2/25 \text{ gr/cc}$  چگالی گرافیت در شرایط متعارف بوده و  $T_r$  به صورت  $T/1160.5$  تعریف شده و با ضریبهای مذکور مقدار فشار بر حسب Mbar تعیین می شود.

حال با فرض مقادیری برای ضریبهای معادله حالت BKW می توان از طریق حل عددی سیستم معادله ها، سرعت پیشروی موج انفجار را تعیین کرد. سرعت پیشروی موج حاصل از حل عددی بالا با نتایج اندازه گیری سرعت در آزمایشگاه مورد مقایسه قرار می گیرند و ضریبهای معادله حالت طوری تنظیم می شوند که سرعت به دست آمده از حل عددی با سرعت تجربی تطابق کنند.

برای حل عددی سیستم معادله های بالا از یک روش تکرار استفاده شده است. در این روش ابتدا مقداری برای ترکیب شیمیایی، دما و فشار گازهای پشت جبهه فرض می شود. در سه حلقه تکرار تودرتو مقادیر بالا تصحیح می شوند. در مرحله اول با استفاده از معادله حالت BKW مقدار  $V$  به دست می آید. سپس با معلوم بودن دما و فشار از طریق کاهش انرژی آزاد گیبس<sup>4</sup> ترکیب دقیقتر تعادل شیمیایی مخلوط معین می شود. سپس با ترکیب جدید دوباره مقدار  $V$  از معادله حالت BKW محاسبه می شود و این عمل آن قدر ادامه می یابد تا مقدار  $V$  با دقت قابل قبولی ثابت شود. در مرحله دوم از طریق معادله های (5) و (9) دمای مخلوط محاسبه می شود. در صورتی که دمای محاسبه شده با دمای فرض شده تفاوت داشته باشد قدمهای بالا، شامل مرحله اول، مجدداً تکرار می شود تا مقدار دما نیز ثابت شود. در مرحله سوم از طریق معادله (4) سرعت پیشروی موج برای فشار فرض شده  $P$  به دست آمده و برای اعمال شرط C-J مقدار فشار را کمی تغییر می دهیم و با

می شود که با تنظیم این پارامترها می توان رفتار معادله حالت را در نواحی فشار و دمای مورد نظر تنظیم کرد. در این معادله ها  $N$  تعداد اجزای شیمیایی موجود در مخلوط گازی و  $k_i$  ها ضریبهای ثابتی برای هر جزء بوده و به عنوان هم حجم<sup>3</sup> آن جزء معرفی می شوند. به علت آنکه گازهای حاصل از انفجار در فشار بسیار بالایی قرار دارند، رفتار گازها غیر ایده آل بوده و انرژی داخلی سیال علاوه بر دما به چگالی مخلوط گازی نیز بستگی دارد. با استفاده از معادله های ترمودینامیکی و معین بودن معادله حالت سیال می توان انرژی داخلی سیال را در چگالیهای بالا تعیین کرد. در نتیجه، معادله حالت دوم به صورت زیر ارائه می شود

$$E = \sum_{i=1}^N x_i ( C_{e,i} + C_{v,i} T + C_{p,i} T^2 + \dots + C_{e,i} T^6 + \int_{V_0}^V (T \frac{\partial P}{\partial T} - P) dV )_i \quad (9)$$

که در آن، عبارت اول انرژی داخلی تشکیل و عبارتهای دوم تا هفتم وابستگی انرژی داخلی به دما و عبارت آخر وابستگی انرژی به چگالی را نشان می دهند. ضریبهای  $C_{e,i}$ ,  $C_{v,i}$ ,  $C_{p,i}$ ,  $C_{e,i}$  از پوشه اطلاعاتی نرم افزار CEC استخراج شده اند [6]. معادله های (4)، (5)، (6) و (9) شامل 5 مجهول  $P$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $E$ ,  $u_0$  هستند. برای کامل کردن سیستم معادله های بالا از فرض چاپمن - ژوکوت استفاده می شود. این فرض بیان می دارد که در حرکت دائمی موج انفجار، سرعت حرکت گازهای حاصل در پشت جبهه موج برابر سرعت صوت در این مخلوط گازی است. با اعمال این رابطه جدید، سیستم معادله های بالا کامل بوده و می توان از طریق حل عددی برای شرایط اولیه معین، شرایط بعد از عبور موج را تعیین کرد. در اکثر مواد منفجره، مخصوصاً TNT، مقدار اکسیژن موجود در مولکول برای اکسید شدن کامل تمامی کربن موجود در آن کافی نیست، لذا یکی از محصولات اصلی انفجار کربن آزاد خواهد بود که در فشار بسیار بالای موجود در حین انفجار، به صورت گرافیت آزاد می شود. برای این جزء شیمیایی جامد، دیگر نمی توان از معادله حالت BKW استفاده کرد و از معادله حالتی که توسط کوان [5] پیشنهاد شده استفاده می شود. این معادله حالت را می توان به صورت زیر بیان کرد.

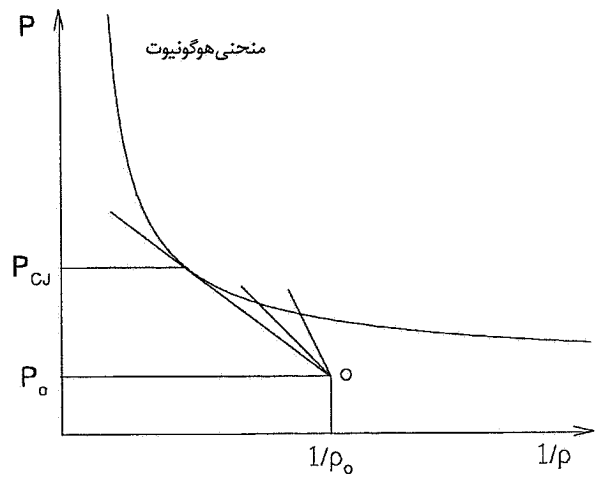
جدول ۱- ضریبهای معادله حالت BKW، مرجع [۴]

| ضریب        | $\alpha$ | $\beta$ | $\kappa$ | $\theta$ |
|-------------|----------|---------|----------|----------|
| خانواده RDX | ۰/۵      | ۰/۱۶۰   | ۱۰/۹۱    | ۴۰۰      |
| خانواده TNT | ۰/۵      | ۰/۰۹۶   | ۱۲/۶۸    | ۴۰۰      |

مرجع [۴]، ضریبهای معادله حالت برای محاسبه مقادیر سرعت در دو خانواده مختلف مواد منفجره داده شده‌اند. این مقادیر در جدول (۱) آورده شده‌اند. در برنامه ایجاد شده امکان وجود ۱۰ جزء شیمیایی در محصولات انفجار در نظر گرفته شده است که یکی از آنها ماده جامد کربن (گرافیت) بوده و ۹ جزء دیگر در جدول (۲) به همراه ضریبهای هم حجم مربوطه، که مطابق ضریبهای مورد استفاده در مرجع ذکر شده هستند، ارائه شده است (این ضریبها برای هر دو خانواده یکسان‌اند).

ابتدا برنامه رایانه‌ای تهیه شده با ضریبهای داده شده در مرجع ذکر شده اجرا شد. در جدول (۳) نتیجه اجرای برنامه با این ضریبها برای دو چگالی مختلف از RDX و یک چگالی از HMX ارائه شده است. در جدول (۴) ترکیب تعادلی شیمیایی گازهای حاصل از انفجار در یک چگالی ماده RDX به همراه نتایج مرجع [۳] ارائه شده است. در جدول (۵) نتیجه اجرای برنامه برای مواد منفجره مختلف با چگالیهای متفاوت ارائه شده است. این نتایج با نتایج ارائه شده در مراجع [۳ و ۴] مطابقت مناسبی دارند.

ملاحظه می‌شود که مقادیر محاسبه شده با نرم‌افزار فعلی کاملاً در محدوده نتایج مرجع [۳] و نتایج تجربی‌اند و این موضوع تاکید بر صحت عملکرد نرم‌افزار دارد. لیکن نتایج فعلی حداکثر ۰.۴٪ با محاسبات مرجع [۳] و نتایج تجربی مرجع [۴] تفاوت دارند. در طراحی سرجنگیها و سیستمهایی که با انفجار عمل می‌کنند، تعیین دقیق سرعت پیشروی موج انفجار و فشار گازهای حاصل، تاثیر زیادی در پیش بینی نحوه عملکرد انفجار (به عنوان مثال سرعت و شکل جت خرج گود) خواهد داشت. نظر به صحت عملکرد نرم‌افزار فعلی می‌توان نتیجه گرفت که تنها راه برای بهبود نتایج عددی استفاده از نتایج تجربی ایجاد شده در کار حاضر و بهبود ضریبهای معادله حالت است. با مطالعاتی که در مرجع [۱] بر روی رفتار معادله حالت BKW به ازای مقادیر مختلف ضریبها انجام گرفته



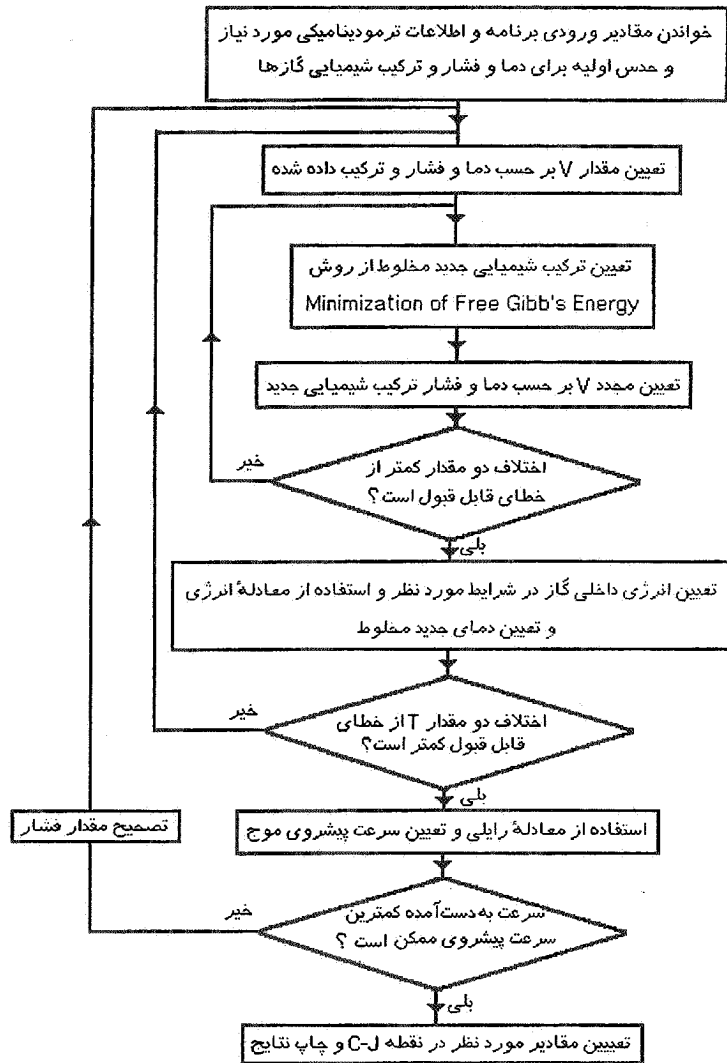
شکل ۵- حداقل کردن سرعت پیشروی موج انفجار معادل اعمال شرط C-J (سرعت حداقل معادل حداقل شیب خط واصل از نقطه O است)

تکرار مراحل بالا سرعت جدیدی را به دست می‌آوریم و با مقادیر قبلی مقایسه می‌کنیم. این عمل آن قدر تکرار می‌شود تا سرعت به حداقل مقدار خود برسد. با بررسی شکل (۵) می‌توان نشان داد که این عمل معادل اعمال شرط C-J است و در نتیجه سرعت پیشروی موج و خواص ترمودینامیکی گازهای پشت جبهه موج به دست خواهد آمد. روند کلی اجرای برنامه را می‌توان به صورت شکل (۶) نمایش داد.

## ۵- نتایج

منظور از ایجاد نرم‌افزار حاضر، حل عددی معادله‌های رانکین-هوگونیوت برای مواد منفجره و به دست آوردن ضریبهای صحیح معادله حالت BKW از طریق مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی است. لیکن قبل از هر چیز باید از صحت منطق و برنامه ریزی نرم‌افزار اطمینان حاصل کرد. به این منظور در مرحله اول ضریبهای پیشنهاد شده توسط دیگران استفاده شده و نتایج عددی حاصل با نتایج عددی ارائه شده توسط آنها مقایسه خواهد شد. در مرحله دوم از نتایج تجربی موجود برای به دست آوردن مقادیر دقیق ضریبهای معادله BKW برای مواد منفجره موجود، استفاده خواهد شد و بار دیگر نتایج عددی حاصل از به کار بردن ضریبهای دقیق با نتایج عددی و تجربی دیگران مقایسه می‌شود. در





شکل ۶- روند اجرای برنامه

جدول ۲- ضریبهای هم حجم مورد استفاده در معادله حالت BKW، مرجع [۴]

| H <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CO  | NH <sub>3</sub> | CH <sub>4</sub> | NO  | N <sub>2</sub> | CoVol |
|------------------|----------------|----------------|-----------------|-----|-----------------|-----------------|-----|----------------|-------|
| ۲۵۰              | ۱۸۰            | ۳۵۰            | ۶۰۰             | ۳۹۰ | ۴۷۶             | ۵۲۸             | ۳۸۶ | ۳۸۰            |       |

اندازه گیری شده آن در دو چگالی مختلف برای ماده منفجره خاصی، به نزدیکترین حالت ممکن برسند. برای این منظور مقدار ضریب  $\alpha$  طوری تنظیم می شود که در یک چگالی معین مقدار حاصل از حل عددی برای سرعت با نتیجه تجربی آن منطبق شود. سپس با همان ضریبهای در چگالی دیگر ماده، سرعت محاسبه شده و در صورت اختلاف، با تصحیح مقدار  $\beta$  این دو سرعت بر هم منطبق

است، مشاهده می شود که با تغییر مقدار  $\beta$  و با ثابت بودن دیگر ضریبها شیب منحنی سرعت بر حسب چگالی مواد منفجره تغییر می کند و در صورتی که با ثابت بودن بقیه ضریبها مقدار  $\alpha$  تغییر داده شود این منحنی تقریباً به موازات خود جابه جا خواهد شد. در نتیجه با تکرار اجرای برنامه می توان مقادیر  $\beta, \alpha$  را طوری تنظیم کرد که مقدار سرعت پیش بینی شده توسط حل عددی و مقدار

جدول ۳- مقایسه نتایج کار حاضر و نتایج مرجع [۳]

| نوع ماده | $\rho$ (gr/cc) | D (m/Sec)<br>سرعت موج انفجار<br>عددی<br>تجربی | T (K) | P (GPa) | $\gamma$ |
|----------|----------------|---|-------|---------|----------|
| کار حاضر | RDX            | ۸۸۴۷  | ۲۷۷۴  | ۲۵/۰    | ۳/۰۳     |
| مرجع [۳] | RDX            | ۸۷۵۴  | ۲۵۸۷  | ۳۴/۷    | ۲/۹۸     |
| کار حاضر | RDX            | ۶۱۴۳  | ۳۸۲۴  | ۱۱/۲    | ۲/۳۸     |
| مرجع [۳] | RDX            | ۶۱۲۸  | ۳۶۰۰  | ۱۰/۸    | ۲/۴۸     |
| کار حاضر | HMX            | ۹۲۷۴  | ۲۵۳۹  | ۳۹/۷    | ۳/۱۱     |
| مرجع [۳] | HMX            | ۹۱۵۹  | ۲۳۶۴  | ۳۹/۵    | ۳/۰۳     |

جدول ۴- مقایسه ترکیب تعادلی اجزای شیمیایی ماده RDX در چگالی ۱/۸ g/cc

| H <sub>۲</sub> O | H <sub>۲</sub> | O <sub>۲</sub> | CO <sub>۲</sub> | CO    | NH <sub>۳</sub> | CH <sub>۴</sub> | NO    | N <sub>۲</sub> | C     | مرجع [۳] |
|------------------|----------------|----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|----------------|-------|----------|
| ۱۳/۵۱            | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰          | ۶/۷۲۸           | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۰۰ | ۱۳/۵۱          | ۶/۷۲۸ | مرجع [۳] |
| ۱۳/۵۱            | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰۵         | ۶/۷۲۹           | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۰۰           | ۰/۰۱۰ | ۱۳/۵۱          | ۶/۷۵۸ | کار حاضر |

مرجع [۳] فقط تا دو رقم آورده شده‌اند. همچنین با کمی دقت در نتایج مرجع [۳] مشاهده می‌شود که در جدول نتایج این مقاله، این ضریبها برای انطباق دقیق در یک چگالی از ماده RDX تنظیم شده‌اند و این مقدار در ابتدای جدول آورده شده است در حالی که در مواد و چگالیهای دیگر چنین تطابقی مشاهده نمی‌شود. از طرفی علت اصلی تفاوت در مقدار دمای پیش بینی شده توسط برنامه حاضر و کار مرجع [۳] را می‌توان در ضریبهای ترمودینامیکی مورد استفاده توسط دو برنامه، برای بیان تابعیت انرژی داخلی محصولات حاصل از انفجار بر حسب دما دانست. همان طور که اشاره شد، در کار حاضر، به همین منظور از ضریبهای مورد استفاده در برنامه CEC استفاده شده است در حالی که برنامه رایانه‌ای مرجع [۳] از برازش اطلاعات مشابه دیگری استفاده می‌کند که این دو می‌توانند چند درصدی با هم تفاوت داشته باشند. در نتیجه با توجه به پراکندگی نتایج اندازه‌گیری سرعت برای مواد مختلف و حساسیت شدید معادله حالت BKW به مقدار ضریبها، می‌توان در جهت بالا بردن دقت نتایج برنامه، برای مواد مختلف از ضریبهای متفاوت استفاده کرد. البته مقدار این ضریبها در رقم سوم یا چهارم بعد از اعشار با یکدیگر تفاوت خواهند داشت.

می‌شوند. با تغییر مقدار  $\beta$  ممکن است مقدار سرعت در چگالی اول تغییر کرده باشد که در این صورت، مجدداً در چگالی اول مقدار  $\alpha$  تصحیح شده و این عمل تا تطابق کامل سرعتها در دو چگالی ادامه می‌یابد.

با استفاده از روش بالا، برای ماده RDX در جهت تطابق بهتر سرعت حاصل از حل عددی با نتایج تجربی مرجع [۳]، ضریبهای  $\alpha$ ،  $\beta$  به ترتیب برابر ۰/۴۹۸۸۰ و ۰/۱۵۲۴۷ تعیین شدند و با اعمال آنها، نتایج جدول (۳) به صورت مقادیر ارائه شده در جدول (۶) تغییر کردند. در صورتی که مقدار  $\alpha$ ،  $\beta$  برای تطابق سرعت پیش‌بینی شده توسط حل عددی با نتایج تجربی کار حاضر تنظیم شوند به ترتیب برابر ۰/۵۰۶۹ و ۰/۱۶۵۴ خواهند بود. با اعمال این ضریبها نتایج ارائه شده در جدولهای (۳) و (۶) به صورت مقادیر ارائه شده در جدول (۷) تغییر خواهند کرد.

با انجام اعمال بالا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سرعت حاصل از حل عددی به شدت به مقادیر ضریبهای  $\alpha$ ،  $\beta$  بستگی دارد. علت اصلی این تغییرات شدید، ظاهر شدن ضریبهای بالا به صورت نمایی در معادله حالت BKW است. بنابراین برای بیان دقیقتر این ضریبها، اعداد باید تا چهار رقم اعشار مشخص شوند در حالی که در

جدول ۵- مقایسه نتایج اجرای برنامه برای مواد و چگالیهای مختلف با نتایج عددی مرجعهای [۳ و ۴]

| چگالی<br>(gr / cc) | سرعت موج<br>(m / Sec) | فشار گازها<br>(atm) | دمای گازها<br>(K) | $\gamma$ | نوع ماده |        |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------|----------|--------|
| ۰/۷۳۲              | ۴۵۷۷                  | ۴۷۲۸۲               | ۳۲۷۴              | ۲/۲۰     | کار حاضر | TNT    |
|                    | ۴۴۳۸                  | ۴۳۴۲۵               | ۳۱۲۴              | ۲/۲۹     | [۳]      |        |
|                    | ۴۵۱۱                  | ۴۵۰۰۰               | ۳۰۸۰              | ۲/۳۱     | [۴]      |        |
| ۱/۷۱۳              | ۸۱۵۹                  | ۲۸۰۷۳۷              | ۲۹۳۴              | ۳/۰۱     | کار حاضر | COMP B |
|                    | ۸۱۱۴                  | ۲۷۵۳۵۲              | ۲۹۱۳              | ۳/۰۶     | [۳]      |        |
|                    | ۸۰۸۴                  | ۲۸۴۰۰۰              | ۲۷۶۳              | ۲/۹۴     | [۴]      |        |
| ۱/۷۸۸              | ۷۶۵۹                  | ۲۶۲۳۴۰              | ۲۸۰۳              | ۲/۹۵     | کار حاضر | DATB   |
|                    | ۷۶۳۷                  | ۲۵۸۵۷۴              | ۲۸۴۸              | ۲/۹۸     | [۳]      |        |
|                    | ۷۵۵۹                  | ۲۶۴۰۰۰              | ۲۶۶۷              | ۲/۸۶     | [۴]      |        |
| ۱/۵۹۰              | ۷۷۶۰                  | ۲۴۸۶۵۰              | ۳۴۲۴              | ۲/۸۰     | کار حاضر | NGL    |
|                    | ۷۶۴۱                  | ۲۳۸۸۳۵              | ۳۱۸۹              | ۲/۸۴     | [۳]      |        |
|                    | ۷۷۰۰                  | ۲۴۶۰۰۰              | ۳۲۱۶              | ۲/۸۳     | [۴]      |        |
| ۱/۱۲۳              | ۶۴۴۱                  | ۱۳۲۷۰۴              | ۳۳۷۴              | ۲/۴۸     | کار حاضر | NM     |
|                    | ۶۳۸۹                  | ۱۳۱۲۶۱              | ۳۲۶۵              | ۲/۵۶     | [۳]      |        |
|                    | ۶۴۶۳                  | ۱۳۰۰۰۰              | ۳۱۲۰              | ۲/۶۲     | [۴]      |        |
| ۱/۸۰۹              | ۸۶۶۳                  | ۳۲۹۳۴۶              | ۲۷۴۷              | ۳/۰۷     | کار حاضر | OCTOL  |
|                    | ۸۶۱۷                  | ۳۲۲۷۲۴              | ۲۷۳۵              | ۳/۱۲     | [۳]      |        |
|                    | ۸۵۵۵                  | ۳۳۳۰۰۰              | ۲۵۷۸              | ۲/۹۸     | [۴]      |        |
| ۱/۷۶۷              | ۸۶۰۷                  | ۳۱۵۶۲۶              | ۲۵۵۷              | ۳/۰۹     | کار حاضر | PBX    |
|                    | ۸۶۰۸                  | ۳۱۴۸۲۹              | ۲۷۰۸              | ۳/۱۶     | [۳]      |        |
|                    | ۸۴۹۶                  | ۳۱۹۰۰۰              | ۲۳۹۳              | ۲/۹۹     | [۴]      |        |

جدول ۶- مقایسه نتایج کار حاضر با ضریبهای ۰/۴۹۸۸۰ و ۰/۱۵۲۴۷ و نتایج مرجع [۳]

| $\gamma$ | P (GPa) | T (K) | D (m/Sec)                |      | $\rho$ (gr/cc) | نوع ماده        |
|----------|---------|-------|--------------------------|------|----------------|-----------------|
|          |         |       | سرعت موج انفجار<br>تجربی | عددی |                |                 |
| ۳/۰۰     | ۳۴/۵    | ۲۸۳۴  |                          | ۸۷۵۴ | ۱/۸            | RDX<br>کار حاضر |
| ۲/۹۸     | ۳۴/۷    | ۲۵۸۷  | ۸۷۵۴                     | ۸۷۵۴ | ۱/۸            | RDX<br>مرجع [۳] |
| ۲/۳۷     | ۱۱/۱    | ۳۸۳۵  |                          | ۶۱۲۷ | ۱/۰            | RDX<br>کار حاضر |
| ۲/۴۸     | ۱۰/۸    | ۳۶۰۰  | ۵۹۸۱                     | ۶۱۲۸ | ۱/۰            | RDX<br>مرجع [۳] |
| ۳/۰۸     | ۳۹/۱    | ۲۶۰۸  |                          | ۹۱۶۱ | ۱/۹            | HMX<br>کار حاضر |
| ۳/۰۳     | ۳۹/۵    | ۲۳۶۴  | ۹۱۰۰                     | ۹۱۵۹ | ۱/۹            | HMX<br>مرجع [۳] |

جدول ۷- نتایج کار حاضر با ضریبهای به دست آمده از نتایج تجربی کار حاضر (۰/۵۰۶۹ و ۰/۱۶۵۴)

| $\gamma$ | P (GPa) | T (K) | D (m/Sec)                |      | $\rho$ (gr/cc) | نوع ماده |
|----------|---------|-------|--------------------------|------|----------------|----------|
|          |         |       | سرعت موج انفجار<br>تجربی | عددی |                |          |
| ۲/۹۹     | ۳۳/۱    | ۲۸۷۶  |                          | ۸۵۶۹ | ۱/۸            | RDX      |
| ۲/۹۱     | ۲۹/۱    | ۳۰۷۳  | ۸۱۸۱                     | ۸۱۸۱ | ۱/۷            | RDX      |
| ۲/۵۰     | ۱۴/۷    | ۳۷۲۴  | ۶۵۴۵                     | ۶۵۴۵ | ۱/۲            | RDX      |
| ۲/۳۵     | ۱۰/۸    | ۳۸۲۱  |                          | ۶۰۱۵ | ۱/۰            | RDX      |
| ۲/۹۱     | ۲۹/۲    | ۳۰۵۹  | ۸۳۷۲                     | ۸۱۷۷ | ۱/۷            | HMX      |
| ۳/۰۷     | ۳۷/۶    | ۲۶۴۹  |                          | ۸۹۷۳ | ۱/۹            | HMX      |

## ۶- نتیجه گیری

است این گونه نرم افزارها به عنوان یکی از ابزارهای اساسی در ایجاد و توسعه یک آزمایشگاه انفجاری مورد توجه بوده و امید است در آینده نزدیک در آزمایشگاه انفجاری کشور مورد استفاده قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

از مجتمع شهید شاه آبادی سپاه پاسداران انقلاب اسلامی برای تامین اعتبار انجام این تحقیقات و در اختیار قرار دادن امکانات لازم برای آزمایشهای مربوطه قدردانی می شود.

نرم افزار ایجاد شده و نتایج تجربی حاصل، برای تعیین دقیق ضریبهای معادله حالت BKW مورد استفاده قرار گرفته است. این برنامه رایانه ای به عنوان ابزاری مناسب برای مقایسه بین مواد منفجره مختلف در چگالیهای متفاوت مورد استفاده واقع خواهد شد و به عنوان بانک اطلاعاتی بسیار وسیع، که شامل تمامی مواد منفجره مورد استفاده در خرج اصلی سرجنگیهاست می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مواردی که تغییر طراحی و جایگزینی ماده منفجره اصلی سرجنگی مورد نظر است، این نرم افزار کاربرد گسترده ای خواهد داشت و همان طور که در مراجع مختلف ذکر شده

## واژه نامه

1. Beker - Kistiakowsky-Wilson
2. wax
3. covolume
4. Gibb's Free Energy Minimization

## مراجع

1. Fickett, W., and Wood, W., "Investigation of the Detonation Properties of Condensed Explosives with Equations of State Based on Intermolecular Potentials. I. RDX With Fixed Product Composition," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 37, No. 6, PP. 1324-1329, 1957.
2. Rigos, F., "The Gibb's Energy Minimization Approach in the Estimation of Detonation, Explosion and Work Production Parameters of Confined Charges," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 19, PP. 76-81, 1994.
3. Suceska, M., "Calculation of the Detonation Properties of C-H-N-O Explosives," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 16, PP. 197-202, 1991.
4. Mader, C. L., *Numerical Modeling of Detonations*, University of California Press, 1979.
5. Cowan, R.D., and Fickett, W., "Calculation of the Detonation Properties of Solid Explosives with Kistiakowsky-Wilson Equation of State," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 24, No. 5, PP. 932-939, 1956.
6. Gordon, S., and McBride, B., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performances, Incident and Reflected Shocks and Chapman - Jouquet Detonations," NASA Lewis Research Center, NASA SP-273, 1976.