

## بررسی و تحلیل فرآیند شکل دهی انفجاری پودر تنگستن

علی مهدی پور عمرانی<sup>۱</sup>، مهدی ظهور<sup>۲</sup>، سید محمدرضا خلیلی<sup>۳</sup>، نادر پروین<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

متالورژی پودر انفجاری یکی از روشهای مکمل در فرایند متالورژی پودر می باشد که در آن فرایند فشردن و جوش خوردن ذرات پودر بطور همزمان با عبور موج شوک از پودر انجام می پذیرد. یکی از فلزاتی که روش متالورژی پودر انفجاری برای تولید قطعه از آن بسیار مرجح است فلز تنگستن می باشد. در این تحقیق، پس از مطالعه و بررسی فرایند، روشی تحلیلی برای تعیین سرعت موج شوک لازم در فرایند متالورژی پودر انفجاری بعنوان یکی از پارامترهای اساسی موثر بر فرایند با استفاده از معادله هاگونیوت پودر تنگستن ارائه شده و رابطه ای تحلیلی برای انتخاب نوع ماده منفجره بدست آمده است. همچنین، برای بررسی درستی روابط تئوری بدست آمده، آزمایشهای انفجاری برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن طراحی و اجرا شده است. چگالی و سختی نمونه های تولید شده به روش انفجاری تعیین و مقطع شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن می بایست از مواد منفجره مناسب با مشخصات معین استفاده نمود.

**واژه های کلیدی:** تنگستن، مواد منفجره، معادله هاگونیوت، خط رایلی، شکل دهی، متالورژی پودر

## Theoretical Analysis of Explosive Compaction of Tungsten Powder

A. Mehdi poor Omrani, M. Zohoor, S.M.R. Khalili

Dep't. of Mech. Eng.  
K.N. Toosi Univ. of Tech.

N. Parvin

Dep't. of Metallurgical Eng.  
Amirkabir Univ. of Tech.

### ABSTRACT

Explosive compaction is one of the complementary methods in powder metallurgy process in which the densification and sintering of powder particles is performed in one stage by passing a shock wave through the powder medium. For production of tungsten parts, it is preferred to use this method. In this research, an analytical equation is obtained for choosing the necessary explosive material. To verify the theoretical relationship, several explosive experiments were designed and performed for compaction of tungsten powder and several specimens were obtained. The density and the hardness of these specimens were measured and their fragment surfaces were analyzed, using the scanning electron microscope (SEM). The results approved the analytical relationship and indicated that a suitable explosive material must be utilized for compaction of tungsten powder.

**Key Words:** Tungsten, Explosive Material, Hugoniot Equation, Raleigh Line, Compaction, Powder Metallurgy

1 - دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): a.mehdi poor@gmail.com

2 - استادیار: mzohoor@kntu.ac.ir

3 - استاد

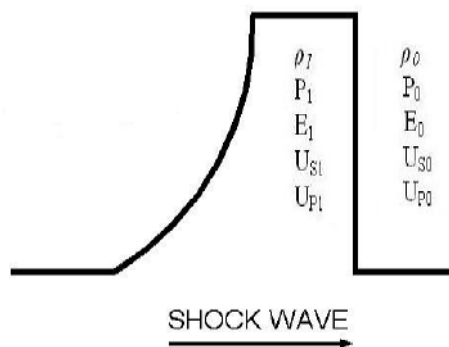
4 - استادیار

## ۱- مقدمه

متالورژی پودر انفجاری یکی از فرآیندهای شکل دهی پودر می باشد که در آن به جای استفاده از نیروی پرس از موج شوک جهت فشردن و جوش خوردن ذرات پودر استفاده می شود [۱].

هنگامیکه موجی با سرعتی بیش از سرعت صوت در یک ماده از آن عبور نماید حالت شوک<sup>۱</sup> در ماده پدید می آید. در شکل ۱، جبهه موج شوک در حال عبور از یک ماده نشان داده شده است همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، در هنگام عبور موج شوک از یک ماده متغیرهای حالت ماده مثل فشار، حجم مخصوص، سرعت ذره‌ای و غیره بصورت ناگهانی تغییر نموده و پس از عبور موج نیز به صورت تعادلی به مقدار اولیه خود برمی گردند [۲ و ۳].

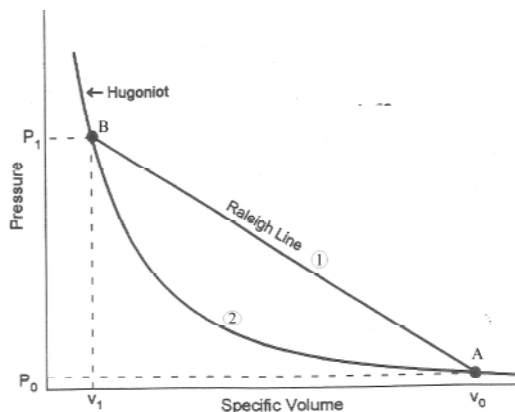
در شکل ۲، نمودار فشار-حجم مخصوص یک ماده در هنگام عبور موج شوک نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می شود، هنگامیکه جبهه موج شوک به یک نقطه می رسد شرایط ماده بطور ناگهانی از نقطه A به نقطه B تغییر یافته و این تغییر حالت نیز از روی خط رابلی<sup>۲</sup> صورت می پذیرد. پس از عبور جبهه موج شوک نیز یک موج ترقیقی<sup>۳</sup> جهت باربرداری از ماده عبور نموده و شرایط برانگیخته شده حالت ماده را به شرایط اولیه برمی گرداند که این تغییر حالت از روی نمودار هاگونیوت<sup>۴</sup> انجام می گردد.



- 1 - Shock
- 2 - Raleigh Line
- 3 - Rarefaction Wave
- 4 - Hugoniot Curve

## شکل ۱: جبهه موج شوک [۳].

با در نظر گرفتن نمودار و مسیرهای شماره ۱ و ۲ این نتیجه بدست می آید که با عبور موج شوک از یک قطعه مقداری انرژی، برابر با اختلاف سطح زیر منحنی دو نمودار شماره ۱ و ۲ به ماده افزوده می شود. این انرژی معمولاً بصورت انرژی جنبشی، انرژی کرنش یا تغییر شکل پلاستیک، انرژی داخلی یا تغییر دما در جسم ظاهر می شود [۳].



شکل ۲: نمودار هاگونیوت و خط رابلی [۳].

در فرآیند شکل دهی انفجاری پودر، انرژی حاصل از عبور موج شوک از پودر باعث شتاب گرفتن ذرات پودر و برخورد آنها به یکدیگر می شود. از سوی دیگر افزایش انرژی داخلی ذرات پودر باعث ایجاد یک لایه ذوب شده سطح پودر شده و تراکم و جوش خوردن ذرات پودر تحت مکانیزی شبیه جوشکاری انفجاری به سهولت انجام می شود [۴].

فرآیند شکل دهی انفجاری پودر یا اصطلاحاً متالورژی پودر انفجاری همانند سایر فرآیندهای تولید انفجاری از نیمه دوم قرن بیستم مورد توجه محققان قرار گرفته است [۵]. از ابتدای شروع تحقیقات بر روی این فرایند، روشهای مختلفی توسط محققان جهت شکل دهی پودر مواد مختلف به کار گرفته شده است. یکی از روشهای مورد استفاده، روش شکل دهی شعاعی پودر است که نمونه ای از آن در شکل ۳ ملاحظه می شود. در این روش، پودر داخل لوله فلزی قرار گرفته و استوانه ای از ماده منفجره دور لوله را می پوشاند با آغاز گری ماده منفجره از یک سر لوله، موج انفجار باعث شکل دهی لوله و فشرده شدن و

در ایران نیز فعالیتهای تحقیقاتی مختلفی با استفاده از روشهای ذکر شده جهت شکل دهی پودر مواد فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی به انجام رسیده است [۲۳ و ۲۴].

## ۲- تعیین سرعت موج شوک و روش انتخاب ماده منفجره

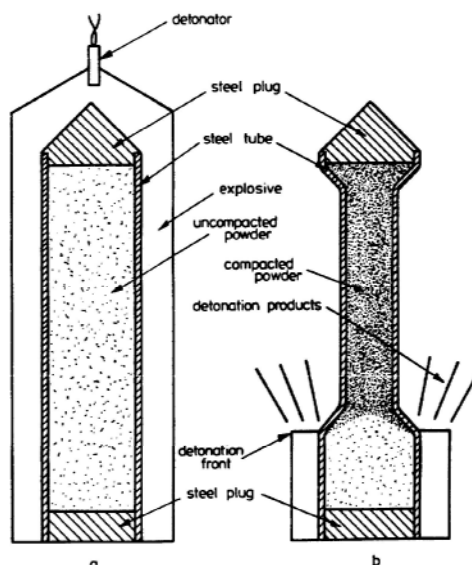
سرعت موج شوک عبوری از یک ماده با شیب خط رایلی که در شکل ۲ نشان داده شده است ارتباط مستقیم دارد. از سوی دیگر می توان شیب خط رایلی را با توجه به مختصات نقاطی که خط رایلی از آن عبور می کند محاسبه نمود. بدین ترتیب رابطه زیر بین مقادیر فشار و حجم مخصوص در حالت قبل از عبور موج شوک و بعد از عبور موج شوک و سرعت موج شوک برقرار است [۱ و ۳]:

$$\frac{P_1 - P_0}{V_1 - V_0} = -(\rho_0 U_s)^2 \quad (1)$$

در رابطه فوق  $P_0$  و  $P_1$  مقادیر فشار اولیه و ثانویه،  $V_0$  و  $V_1$  حجم مخصوص اولیه و ثانویه،  $\rho_0$  چگالی اولیه و  $U_s$  سرعت موج شوک ایجاد شده در ماده می باشد. بنابراین برای دستیابی به شرایط نقطه B شکل ۲ تحت عبور موج شوک می بایست ماده منفجره ای انتخاب گردد که از انفجار آن موج شوکی با سرعت  $U_s$  در جسم ایجاد شود. برای تعیین سرعت موج شوک لازم در فرآیند شکل دهی انفجاری پودر تنگستن به معادله هاگونیوت تنگستن و پودر تنگستن در صفحه فشار- حجم مخصوص نیاز می باشد. با استفاده از یک روش تئوری تقریبی که توسط میرزا<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است، معادله هاگونیوت پودر تنگستن از روی دانسیته ظاهری پودر و معادله هاگونیوت فلز تنگستن به صورت زیر به دست می آید [۱]:

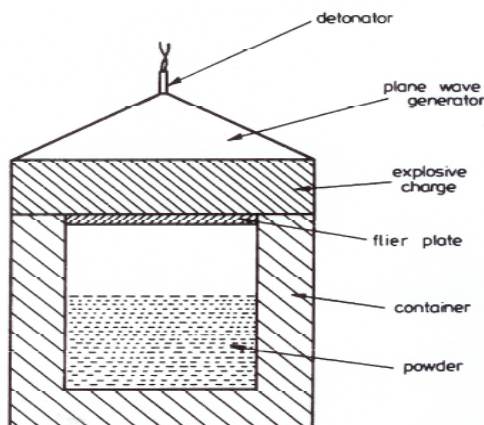
$$P = \frac{[2V - \gamma(V_0 - V)]C^2(V_0 - V)}{[2V - \gamma(V_{00} - V)][V_0 - S(V_0 - V)]} \quad (2)$$

شکل دهی پودر می شود [۵-۱۰]. شکل a چیدمان آزمایش و شکل b فرآیند شکل دهی را نشان می دهد.

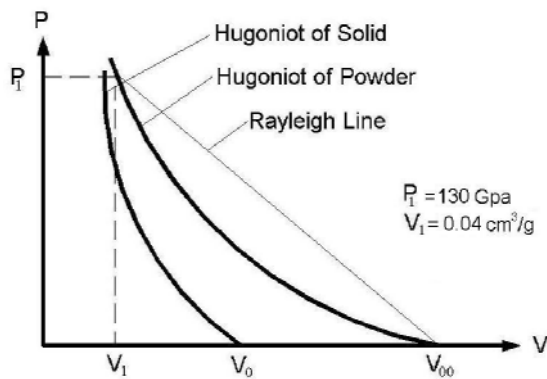


شکل ۳: شکل دهی شعاعی پودر به روش انفجاری [۱۱].

روش دیگر مورد استفاده برخی دیگر از محققان، شکل دهی محوری پودر است که در شکل ۴ نمونه ای از آن ملاحظه می شود. در این روش که شباهت بسیار زیادی به فرآیند متالورژی پودر سنتی دارد پودر درون قالب فلزی قرار گرفته و موج انفجار حاصل از ماده منفجره باعث ایجاد موج شوک در سنبه و به حرکت در آمدن آن و در نهایت شکل دهی پودر می شود [۱۲-۲۲].



شکل ۴: شکل دهی محوری پودر به روش انفجاری [۴].



شکل ۵: معادله هاگونیوت پودر و فلز تنگستن.

با استفاده از شیب خط رایلی رسم شده در شکل ۵ و معادله شماره (۱) سرعت موج شوک لازم برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P_1 - P_0}{V_1 - V_{00}} = -(\rho_{00} U_s)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{130 - 0}{0.04 - 0.1282} = -(7.8 U_s)^2 \Rightarrow$$

$$U_s = 4.922 \text{ Km/S.}$$

بنابراین، برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن، حداقل سرعت موج شوک لازم جهت عبور از پودر تنگستن می‌بایست ۴۹۲۲ متر بر ثانیه باشد. با استفاده از مقدار به دست آمده جهت سرعت موج شوک عبوری می‌توان مقدار سرعت انفجار ماده منفجره را تعیین و ماده منفجره لازم جهت انجام فرآیند را انتخاب نمود. شرط لازم برای تعیین سرعت ماده منفجره از روی سرعت موج شوک در دست داشتن چیدمان آزمایش می‌باشد که در شکل ۶ چیدمان آزمایش مورد نظر جهت انجام فرآیند شکل دهی انفجاری پودر تنگستن نشان داده شده است.

در معادله فوق  $\gamma$  ثابت گرونیسن<sup>۱</sup>،  $C$  سرعت صوت در ماده،  $S$  ضریب ثابت،  $V_0$  حجم مخصوص اولیه فلز تنگستن در فشار صفر،  $V_{00}$  حجم مخصوص پودر تنگستن در فشار صفر می‌باشد. با جایگذاری مقادیر تعریف شده برای فلز تنگستن و پودر تنگستن مورد استفاده، معادله هاگونیوت تقریبی پودر تنگستن به صورت زیر به دست می‌آید:

برای فلز تنگستن:

$$C = 4.03 \text{ Km/S, } S = 1.24,$$

$$\rho_0 = 19270 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow V_0 = 5.19 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{Kg},$$

برای پودر تنگستن:

$$\rho_{00} = 7800 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow V_{00} = 1.282 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$\gamma_0 = 2S - 1 = 2 \times 1.24 - 1 = 1.48,$$

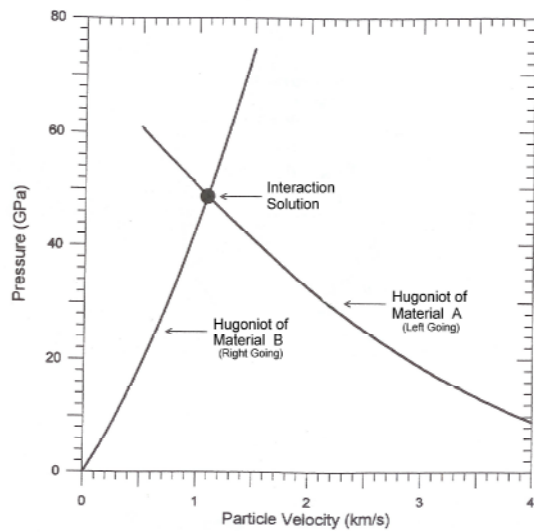
$$\frac{\gamma_0}{V_0} = \frac{\gamma}{V} = \frac{1.48}{5.19 \times 10^{-5}} = 28516.$$

بنابراین، معادله هاگونیوت پودر تنگستن عبارتست از:

$$P = \frac{(2V - 28516(5.19 \times 10^{-5} V - V^2))}{(2V - 28516(1.282 \times 10^{-4} V - V^2))} \times$$

$$\frac{(16.24 \times 10^6)(5.19 \times 10^{-5} - V)}{(5.19 \times 10^{-5} - 1.24(5.19 \times 10^{-5} - V))^2} \quad (3)$$

چنانچه معادله هاگونیوت فلز تنگستن و پودر تنگستن در یک صفحه مختصات فشار-حجم مخصوص رسم گردد مقادیر فشار و حجم مخصوص اولیه پودر تنگستن و فشار و حجم مخصوص لازم برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن تعیین می‌گردد. در شکل ۵ نمودار هاگونیوت فلز تنگستن و پودر تنگستن با دانسیته ۷/۸ گرم بر سانتی متر مکعب و خط رایلی لازم برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن که با استفاده از مقادیر تجربی موجود در مرجع [۲۵] و استفاده از رابطه (۳) ترسیم شده، نشان داده شده است.



شکل ۷: نحوه تعیین فشار و سرعت ذره‌ای موج شوک انتقالی از یک محیط به محیط دیگر [۳].

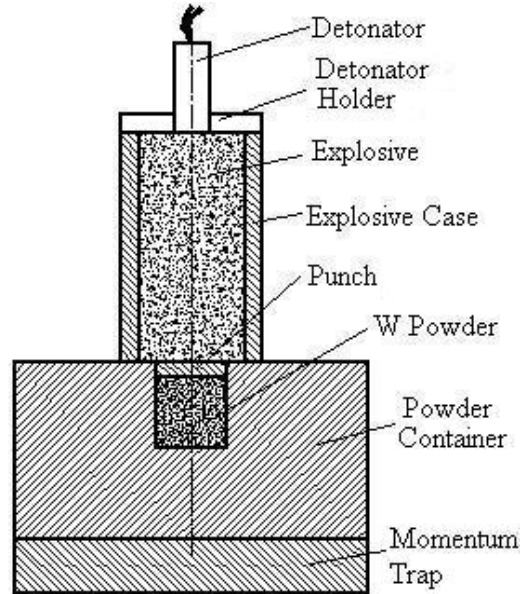
در چیدمان شکل ۶ موج شوک از فولاد وارد پودر می‌شود بنابراین دیسک فولادی محیط اول و پودر محیط دوم می‌باشد و با فرض حداقل سرعت موج شوک، حداقل سرعت ذره ای محیط دوم تعیین و حداقل سرعت موج شوک لازم در فولاد تعیین می‌گردد. سرعت ذره‌ای پودر تنگستن هنگامی که موج شوکی با سرعت ۴۹۲۲ متر بر ثانیه از آن عبور می‌کند، از رابطه (۳) به صورت زیر بدست می‌آید [۲]:

$$U_S = C + Su \Rightarrow u = \frac{U_S - C}{S} = \frac{4.922 - 4.03}{1.24} = 0.719 \text{ Km/S.}$$

با توجه به اینکه فشار حاصل از موج شوک در سطح تماس دیسک فولادی و پودر تنگستن مساوی می‌باشد. معادله فشار حاصل از موج شوک در فولاد و پودر تنگستن بر حسب سرعت ذره ای نوشته و با مساوی قرار دادن این دو معادله مقدار حداقل سرعت ذره ای لازم در دیسک فولادی به دست می‌آید [۳]:

$$P_W = \rho_{0W} C_W u + \rho_{0W} S_W u^2, \quad (4)$$

$$P_S = \rho_{0S} C_S (2u_0 - u) + \rho_{0S} S_S (2u_0 - u)^2. \quad (5)$$



شکل ۶: چیدمان آزمایش انفجاری شکل دهی پودر تنگستن.

در شکل ۶ سنبه‌ای<sup>۱</sup> به قطر ۲۰ میلی متر و به ضخامت ۶ میلی متر بین پودر و ماده منفجره قرار گرفته است که موج انفجار ماده منفجره باعث ایجاد موج شوک در این قطعه و با عبور از آن به پودر تنگستن انتقال می‌یابد. برای تعیین حداقل سرعت انفجار ماده منفجره می‌بایست ابتدا حداقل سرعت موج شوک لازم در فولاد تعیین شده و در سطح تماس فولاد و ماده منفجره از روی سرعت موج شوک در فولاد، حداقل سرعت موج انفجار لازم را تعیین نمود.

هنگامی که موج شوک از یک محیط به محیط دیگر انتقال می‌یابد مقادیر سرعت و فشار موج شوک در محیط دوم را می‌توان از روی امپدانس<sup>۲</sup> دو محیط و شرایط فشار و سرعت ذره ای محیط اول با تقاطع نمودار هاگونیوت دو محیط در صفحه فشار- سرعت ذره‌ای مطابق شکل ۷ تعیین نمود [۳].

1 -Punch  
2 -Impedance

دیسک فولادی، رابطه زیر بین پارامترهای  $P_{CJ}$ ،  $\rho_0$  و  $D$  ماده منفجره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_S = P_E, u = 0.715 \text{ Km/S} \Rightarrow$$

$$7.85 \times 3.574 \times 0.715 + 7.85 \times 1.92 \times 0.715^2 =$$

$$2.412 P_{CJ} - (1.7315 P_{CJ}) \times 0.715 + (0.3195 \frac{P_{CJ}}{u_{CJ}^2})$$

$$\times 0.715^2 \Rightarrow$$

$$2.412 P_{CJ} - 1.238 \rho_0 D + 0.16 \frac{(\rho_0 D)^2}{P_{CJ}} = 27.7 .$$

با توجه به اینکه حداقل سرعت موج شوک لازم در معادلات در نظر گرفته شده بود چنین به نظر می‌رسد که سمت چپ رابطه باید بزرگتر یا مساوی مقدار عددی سمت راست تساوی باشد. بنابراین، نامساوی زیر بین مقادیر عددی مواد منفجره به صورت زیر بدست می‌آید:

$$2.412 P_{CJ} - 1.238 \rho_0 D + 0.16 \frac{(\rho_0 D)^2}{P_{CJ}} \geq 27.7 . \quad (۹)$$

در فرایند شکل دهی انفجاری پودر تنگستن با چگالی اولیه  $7/8$  گرم بر سانتی متر مکعب باید ماده منفجره ای انتخاب گردد که مقادیر  $\rho_0$ ،  $D$ ، و  $P_{CJ}$  مربوط به آن نامساوی فوق را ارضاء نماید.

### ۳- شرح آزمایشهای انفجاری انجام شده

برای بررسی درستی رابطه شماره (۹) تستهای انفجاری مختلفی با مواد منفجره سی<sup>۴</sup>، پتن<sup>۳</sup> و آنفو<sup>۴</sup> با چیدمان نشان داده شده در شکل ۶ و پودر تنگستن بی شکل با متوسط اندازه ذره ۴۰ میکرون انجام گرفت. در جدول ۱ لیست انواع مواد منفجره مورد استفاده و خواص آنها آورده شده است.

در دو معادله فوق  $\rho_{0S}$  چگالی فولاد در فشار محیط،  $\rho_{0W}$  چگالی پودر تنگستن در فشار محیط،  $C_S$  سرعت صوت در فولاد،  $C_W$  سرعت صوت در تنگستن،  $u_0$  سرعت ذره‌ای فولاد و  $u$  سرعت ذره‌ای پودر تنگستن و فولاد پس از اینکه موج به سطح تماس پودر و فولاد می‌رسد می‌باشد. با تساوی  $P_S = P_W$  و قرار دادن مقادیر زیر در معادله، مقدار حداقل  $u_0$  در فولاد به صورت به دست می‌آید [۳]:

$$u = 0.719 \text{ Km/S}, P_S = P_W \Rightarrow ,$$

$$7.85 \times 3.574 (2u_0 - 0.719) + 7.85 \times 1.92 (2u_0 - 0.719)^2 =$$

$$7.8 \times 4.03 \times 0.719 + 7.8 \times 1.24 \times 0.719^2 \Rightarrow$$

$$u_0 = 0.715 \text{ Km/S} \Rightarrow$$

$$U_S = C + S u = 4.95 \text{ Km/S} .$$

بنابراین جهت شکل دهی انفجاری پودر تنگستن باید ماده منفجره ای انتخاب شود که از انفجار آن موج شوکی با سرعت حداقل ۴۹۵۰ متر بر ثانیه در فولاد ایجاد شود. هنگامی که موج انفجار ماده منفجره به سطح تماس فولاد و ماده منفجره می‌رسد موج شوک در فولاد ایجاد شده و فشار بین این دو از روابط زیر به دست می‌آید [۳]:

$$P_S = \rho_{0S} C_S u + \rho_{0S} S_S u^2 , \quad (۶)$$

$$P_E = 2.412 P_{CJ} - (1.7315 P_{CJ}) u + (0.3195 \frac{P_{CJ}}{u_{CJ}^2}) u^2 . \quad (۷)$$

در معادله فوق  $P_{CJ}$  فشار چاپمن جاگوت<sup>۱</sup> ماده منفجره بوده و برای هر ماده منفجره مقدار ثابت می‌باشد.  $u_{CJ}$  نیز سرعت ذره ای ماده منفجره تحت فشار  $P_{CJ}$  بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱]:

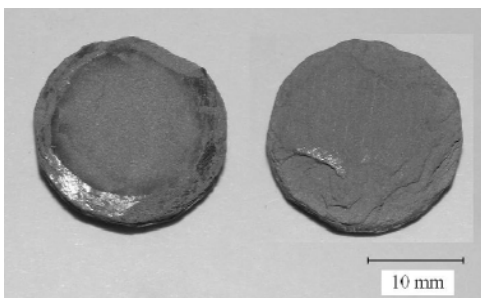
$$u_{CJ} = \frac{P_{CJ}}{\rho_0 D} . \quad (۸)$$

$D$  سرعت انفجار ماده منفجره و  $\rho_0$  چگالی ماده منفجره می‌باشد. با تساوی فشار در سطح تماس ماده منفجره و

2 - C4  
3 - PETN  
4 - ANFO

1 - Chapman-Jouguet

همانگونه که در جدول ۲ ملاحظه می شود در تستهای انفجاری که با مواد منفجره آنفو و پتن نوع دوم انجام گردید جوش خوردن ذرات پودر تحت عبور موج شوک انجام نشده و در اثر فشار حاصل از انفجار تنها چگالی ظاهری پودر افزایش یافت و پس از باز شدن قالب، پودر تنگستن متراکم شده و بدون استحکام از قالب خارج گردید که سریعاً به پودر تبدیل شد. در شکل ۸ نمونه‌ای از قطعات شکل داده شده به روش انفجاری نشان داده شده است.



شکل ۸: دو نمونه از قطعات تنگستنی تولید شده به روش شکل دهی انفجاری پودر.

علاوه بر تعیین چگالی و سختی نمونه های تولید شده به روش متالورژی پودر انفجاری، سطح مقطع شکست نمونه ها نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شکست نمونه تنگستنی شکل داده شده با استفاده ماده منفجره پتن نوع اول و در شکل ۱۰ نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع یک نمونه بدون استحکام نشان داده شده است.

تصویر نشان داده شده در شکل ۹ جوش خوردن ذرات تنگستن و شکل گیری قطعه تحت عبور موج شوک حاصل از ماده منفجره پتن را تأیید می کند حال آنکه شکل ۱۰ فقط تراکم (کاهش حجم) ذرات پودر را نشان داده و جوش خوردن ذرات پودر در این تصویر ملاحظه نمی شود.

با توجه به اینکه چگالی مواد منفجره ذکر شده در جدول ۱ مختلف می باشد، چیدمانهای تست به گونه ای طراحی گردید که نسبت جرم ماده منفجره به جرم پودر در همه آزمایشها مساوی و برابر با ۱/۵ باشد [۲۶].

پس از ساخت قطعات قالب، بدنه ماده منفجره و سایر قطعات لازم، کلیه قطعات با استفاده از چسب مونتاژ شده و آزمایش انفجاری انجام گرفت. پس از انجام آزمایش انفجاری نمونه های شکل داده شده، به کمک فرایند ماشینکاری از انتهای قالب خارج شده و سختی و چگالی آنها اندازه گیری و مقطع شکست نمونه ها نیز به کمک میکروسکوپ الکترون روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

جدول ۱: خواص مواد منفجره مورد استفاده در آزمایشهای انفجاری.

ردیف	نام ماده منفجره	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	سرعت انفجار ( $\text{Km/S}$ )	فشار چاپمن-جاگوت ( $\text{GPa}$ )
۱	سی ۴	۱/۶	۸/۰۴	۲۳/۵
۲	پتن نوع ۱	۱/۴۵	۷	۲۰/۱۷
۳	پتن نوع ۲	۱/۲	۵/۶	۱۰
۴	آنفو	۰/۸۲	۴/۵۵	۵/۵

#### ۴- بحث و بررسی نتایج به دست آمده

پس از انجام آزمایشهای انفجاری مختلف با مواد منفجره مختلف ذکر شده در جدول ۱ و تعیین خواص نمونه های به دست آمده، مقادیر متوسط حاصل از آزمایش انفجاری مختلف در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: چگالی و سختی نمونه های تولید شده به روش متالورژی پودر انفجاری.

شماره آزمایش	نوع ماده منفجره	چگالی نمونه ( $\text{g/cm}^3$ )	سختی نمونه ( $\text{Hv}$ )
۱	سی ۴	۱۸/۵۵	۴۱۲
۲	پتن نوع ۱	۱۸/۴۰	۳۶۵
۳	پتن نوع ۲	-----	-----
۴	آنفو	-----	-----

ماده منفجره پتن نوع ۱:

$$2.412 \times 20.17 - 1.238 \times (1.45 \times 7) + 0.16 \frac{(1.45 \times 7)^2}{20.17} = 36.9 > 27.77$$

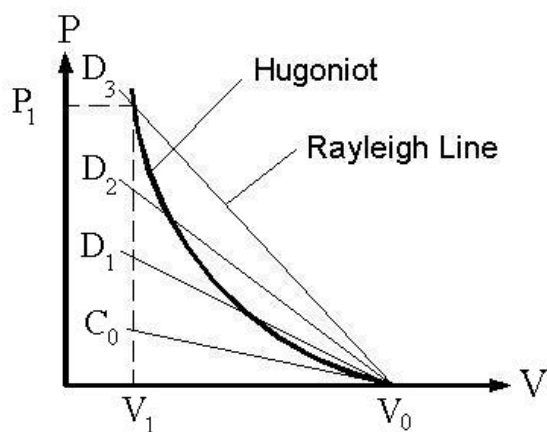
ماده منفجره پتن نوع ۲:

$$2.412 \times 10 - 1.238 \times (1.2 \times 5.6) + 0.16 \frac{(1.2 \times 5.6)^2}{10} = 16.52 < 27.77$$

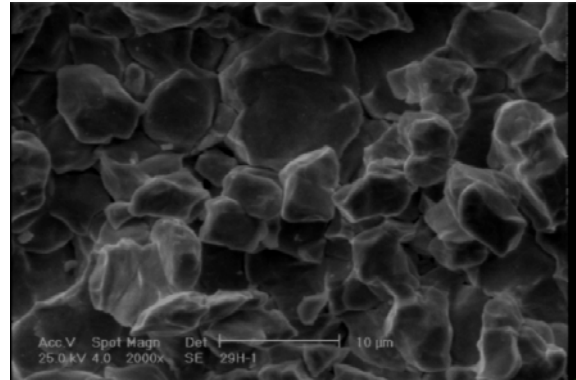
ماده منفجره آنفو:

$$2.412 \times 5.5 - 1.238 \times (0.82 \times 4.55) + 0.16 \frac{(0.82 \times 4.55)^2}{5.5} = 9.05 < 27.77$$

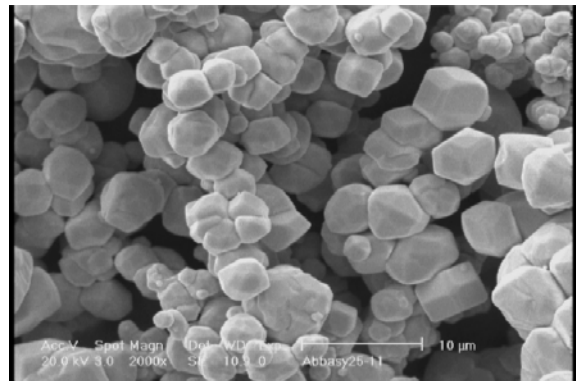
نتایج حاصل از محاسبات فوق و مقادیر جدول شماره ۲ درستی رابطه شماره (۹) را تأیید می نماید. برای درک بهتر از خواص مواد منفجره مختلف مورد استفاده، خط رایلی موج شوک حاصل از سه نوع ماده منفجره D1، D2 و D3 نسبت به معادله هاگونیوت تنگستن در شکل ۱۱ بطور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نمودار هاگونیوت و خط رایلی موج شوک حاصل از سه نوع ماده منفجره مورد استفاده.



شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از مقطع شکست نمونه تولید شده با استفاده از ماده منفجره پتن نوع اول.



شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از مقطع نمونه فاقد استحکام حاصل از آزمایش با استفاده از پتن نوع دوم.

برای بررسی علت عدم موفقیت شکل دهی انفجاری پودر تنگستن با استفاده از مواد منفجره آنفو و پتن نوع اول مقادیر مربوط به خصوصیات مواد منفجره مورد استفاده که در جدول ۱ آمده است در رابطه (۹) قرار داده شده و درستی رابطه بررسی می گردد.

ماده منفجره سی ۴:

$$2.412 \times 23.5 - 1.238 \times (1.6 \times 8.04) + 0.16 \frac{(1.6 \times 8.04)^2}{23.5} = 41.88 > 27.77$$



6. Hamada, T., Nakamura, Y., Murata, K., Kato, Y., and Itoh, S., "Shock Consolidation System of Metallic Powder, Using Concentric Cylindrical High Explosive", The ASME Pressure Vessels and piping Conf., USA, Vol. 406, pp. 313-317, 2003.
7. Carton, E.P., Stuiyinga, M., and Verbeek, H.J., "A New Arrangement for Dynamic Compaction in the Cylindrical Configuration", The Metallurgical and Material Application of Shock Wave and High Strain Rate Phenomena, pp. 29-35, 1995.
8. Stuiyinga M., Verbeek, H.J., and Carton E.P., "The Double Explosive Layer Cylindrical Compaction Method", J. Materials Processing Technology, Vol. 85, pp. 115-120, 1999.
9. Carton E.P., Verbook, H.J., and Stuiyinga M., "Dynamic Compaction of Powders by an Oblique Detonation Wave in The Cylindrical Configuration", J. App. Phys., Vol. 81, pp.3038, 1997.
10. Carton, E.P., Verbeek, H.J., Stuiyinga M., and Verbeek, H.J., "Crack Prevention in Shock Compaction of Powders", The AIP Conf., pp. 549, USA, 1998.
11. Blazynski, T.Z., "Explosive Welding Forming and Compaction", Applied Science J., New York, 1983.
12. Sawaoka, A.B., "Possibilities of Dynamic Compaction Technology in Ceramic Industrial Processing", The Metallurgical Application of Shock Wave and High Strain Rate Phenomena, pp. 221-229, 1986.
13. Tomoshige, R., Tanaka, H., Kato A., and Imamura, K., "Preparation of Functionally Graded Materials, Utilizing Hot Shock Compaction Technique", The 22nd Int. Sym. on Shock Waves, London, pp. 577-582, 1999.
- ۱۴- ظهور، م. و مهدی پور عمرانی، ع.، "نقش تله اندازه حرکت در متالورژی پودر انفجاری"، چهارمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشرفته، ۱۳۸۳.
- ۱۵- عربیان، ع.، لیاقت، غ. و قضاوی، م.، "تراکم انفجاری پودرهای فلزی و سرامیکی" دهمین کنفرانس مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۸۱.
16. Kecskes, L.J., "Refractory Alloy Fabrication by a Hot Explosive Compaction Technique", The Metallurgical and Materials Applications of Shock Wave and High-Strain -Rate Phenomena, pp.75-82, USA, 1995.
17. Chiba, A., and Kamura, S., "Fabrication of HAP-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Bio- Composite by Shock Compaction", The Symposium on High Speed Plastic Deformation, Japan, 2002.

## ۵- نتیجه گیری

شکل دهی انفجاری پودر علیرغم محدودیت‌هایی نظیر نیاز به محل خاص خارج از مناطق مسکونی و نیروی متخصص در مباحث انفجاری جهت انجام فرآیند، دارای مزایای قابل توجهی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به امکان شکل دهی پودر مواد سخت و دستیابی به چگالی نزدیک به چگالی تئوری مورد نظر و همچنین وجود توجیه اقتصادی در زمانهایی که تعداد تولید از قطعه مورد نظر پایین باشد اشاره نمود. در این تحقیق وبا توجه به موارد ذکر شده فوق پودر تنگستن برای انجام تحقیق انتخاب شده و پس از بررسی نتایج حاصل از آزمایشهای انفجاری و تحلیل تئوری شکل دهی انفجاری پودر تنگستن نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- در شکل دهی انفجاری پودر مواد مختلف، سرعت موج شوک لازم از روی منحنی هاگونیوت جسم جامد و پودر مورد نظر به دست می آید،
- ۲- در شکل دهی انفجاری پودر مواد مختلف، نوع ماده منفجره از سرعت موج شوک لازم جهت شکل دهی انفجاری قابل تعیین شدن می باشد و
- ۳- برای شکل دهی انفجاری پودر تنگستن با دانسیته ۷/۸ گرم بر سانتی متر مکعب، خواص مواد منفجره می بایست در نامساوی زیر صدق نماید:

$$2.412P_{CJ} - 1.238\rho_0 D + 0.16 \frac{(\rho_0 D)^2}{P_{CJ}} \geq 27.7 \quad .$$

## مراجع

1. Meyers, M.A., "Dynamic Behavior of Materials", Wiley, USA, 1994.
2. Zhang, B.P., "Fundamentals of Detonation Theory", Beijing Institute of Technology, 1995.
3. Cooper, P.W., "Explosive Engineering", Wiley, New York, 1997.
4. Lennon, C.R.A., "An Investigation of The Mechanism and Controlling Parameters in Direct Explosive Compaction of Powder Metals", Ph.D. Dissertation, Faculty of Applied Science and Technology, Dep't. of Mech. and Industrial Eng., Queen Univ., Belfast, 1979.
5. Watanabe, T., Chiba, A., and Morizono, Y., "Fabrication of Titanium Implants With Porous Surface By Cylindrical Shock Compaction Method", The 4th Int. Symposium on Impact Eng., Kumamoto, Japan, pp. 899-904, 2001.

۲۳- درویزه، ا. و درویزه، م.، "بررسی پارامترهای کنترل کننده فرایند شکل دهی انفجاری پودرها"، دومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۳.

۲۴- لیاقت، غ.، قضاوی، م. و عربیان، ع.، "ساخت قطعات سرامیکی (آلومینا) به روش شکل دهی (تراکم) انفجاری پودر"، پنجمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۱.

25- Marsh, S.P., "LASL Shock Hugoniot Data", University of California, 1980.

۲۶- ظهور، م.، مهدی پورعمرانی، ع.، خلیلی س.م.ر. و پروین، ن.، "تولید قطعات تنگستنی به روش متالورژی پودر انفجاری"، اولین کنگره بین المللی مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۴.

18. Ando, S., Mine, Y., Takashima K., Itoh, S., and Tonda, H., "Explosive Compaction Nd-Fe-B Powder", J. Materials Processing Technology, Vol. 85, pp. 142-147, 1999.

۱۹- ظهور، م. و مهدی پورعمرانی، ع.، "بررسی و مقایسه روشهای متالورژی پودر سنتی و انفجاری در تولید قطعات تنگستنی"، نشریه علمی- پژوهشی مواد پراثرژی، شماره دوم، جلد دوم، ۱۳۸۵.

20. Stuivinga, M., Verbeek, H.J., Carton, E.P., "Planar Compaction of Ceramic Powders with Mining Explosives", The Shock Compression of Condensed Matter, pp. 745-750, 2000.

21. Hokamoto, K., Tanaka, S., and Fujita, M., "Optimization of The Experimental Condition for High-Temperature Shock Consolidation", Int. J. Impact Eng., Vol. 24, pp. 631-640, 2000.

22- Raghukandan, K., Hokamoto, K., Lee J.S., Chiba, A., and Pai, B.C., "An Investigation on Underwater Shock Consolidation carbon Fiber Reinforced AL Composites", J. Material Processing Tech., Vol. 134, pp. 329-337, 2003.