

بررسی اثر فشار تراکم و دانه‌بندی بر روی خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودرهای فلزی

دکتر محمود شاکری

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمدعلی صادقی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندس حمیدرضا داغیانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تراکم پودرهای فلزی به روش استاتیکی، روشی متداول برای ساخت انواع قطعات مکانیکی است. محصول به دست آمده پس از تراکم و تف‌جوشی، یا به صورت معمولی، و یا پس از عملیات حرارتی و مکانیکی، در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، تحقیقاتی روی دو نوع پودر آهن و برنز انجام شده است. با استفاده از مقاومت محصول خام نمونه استوانه‌ای، فشار اپتیمم به دست آمده، و تحت این فشار، اثر دانه‌بندی روی دانسیته خام و مقاومت خام بررسی شده است، در ضمن رابطه فشار - حجم در محدوده الاستیک مورد تحلیل قرار گرفته است.

The Effect of Pressure and Powder Particles Sizes on the Mechanical Properties of Green Products

M. Shakeri, Ph. D.

M. A. Sadeghi, Ph. D.

H. R. Daxhyani, M. Sc.

Mech. Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

ABSTRACT:

Die pressing of metal powders has been in use for many years, for the production of mechanical components. The product is used, either after compaction and sintering, or after subsequent heat or mechanical treatment.

In this paper, some research has been done on iron and bronze powders. The green strength of cylindrical product is used to find the optimum pressure, and under this pressure, the effect of powder particle size on green density and strength is found. Finally, the pressure volume relation in elastic range is examined.

نمود. در مرحله اول تغییر حجم ستون پودر با نرخ زیادی صورت می‌گیرد. در مرحله دوم، تراکم نسبی حاصل شده، و عملاً "ذرات پودر شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌نمایند. در این مرحله نرخ تغییر حجم کم است و رابطه فشار دانسیته با مرحله اول متفاوت می‌باشد. هنگام تراکم پودر، در ابتدا تغییر حجم نسبت به فشار اعمال شده زیاد بوده (مرحله اول)، و می‌توان رفتار پودر را شبیه گاز کامل فرض نمود، در نتیجه (۱):

$$pV\gamma = cte \quad (1)$$

که در آن P فشار اعمال شده، V حجم قطعه، و γ ضریب ثابت است. در پودرهای مورد آزمایش، طی چندین آزمایش رابطه (۱) بررسی شده و ضریب γ به دست آمده است.

در مرحله پلاستیک (مرحله دوم)، برای توجیه رفتار پودر، روابط زیادی توسط محققین ارائه شده، که هر یک با تقریب‌هایی با نتایج تجربی قابل مقایسه است (۴).

یکی از روابط به دست آمده، توسط شاپیرو (Shapiro) به صورت زیر ارائه شده است (۵):

$$P = A + B \ln \frac{1}{1 - D_a} \quad (2)$$

که در آن P فشار، D_a دانسیته ظاهری (دانسیته تئوری) پودر، و A و B مقادیر ثابت هستند.

تر (Torre) با استفاده از رابطه (۲) برای پودرهای کروی مینای تئوری یافته و با آنالیز آن در حالت صلب - کامل پلاستیک (rigid perfectly plastic)، رابطه زیر را به دست آورده است:

$$P = A + \frac{2}{3} Y_0 \ln \frac{1}{1 - D_a} \quad (3)$$

که در آن Y_0 تنش تسلیم جسم صلب است. نتایج به دست آمده از آزمایش روی پودرهای مختلف فلزی نشان می‌دهد که رابطه (۳) با تقریب زیادی صادق بوده و برای به دست آوردن نتایج دقیقتر باید مقدار ثابت A را به دست آورد.

طراحی قالب

در مرحله تراکم، پودر بایستی در داخل قالب متراکم شود. بدون قالب (جز در موارد اکتروژن پودر و نورد صفحات نازک) نمی‌توان قطعه مورد نیاز را از تراکم پودر به دست آورد. یک قالب باید دارای خواص زیر باشد:

- ۱- بتواند شکل مطلوب را به پودر بدهد.
- ۲- به قدر کافی استحکام داشته باشد.
- ۳- قالب باید طوری طراحی شود که قطعه تراکم شده به راحتی از آن بیرون آید (سیستم بیرون‌انداز قالب).
- ۴- ساختمان قالب باید اجازه کار سریع را بدهد.
- علاوه بر موارد فوق، طرح صحیح یک قالب بستگی به نوع پودر دارد. از جمله عوامل پودری مؤثر در طراحی قالب عبارتند از:
 - ۱- قابلیت تراکم پودر.
 - ۲- قدرت سایشی پودر.
 - ۳- استفاده از مواد روغنکاری در مخلوط پودر
- علاوه بر موارد فوق، با توجه به اینکه قالب در اثر قرار گرفتن تحت فشار، تغییر شکل می‌دهد، باید ابعاد آن از ابعاد قطعه نهایی

امروزه در صنعت، متالورژی پودر برای ساخت قطعات ساده و پیچیده کاربرد زیادی دارد. متالورژی پودر عمدتاً "در دو شاخه وسیع علمی، ساخت پودرهای فلزی، و تراکم آن، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ساخت پودرهای فلزی و غیرفلزی با روشهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی عملی است. تراکم پودرها نیز با سه روش استاتیکی، ایزواستاتیکی و دینامیکی متداول است. (۱) به طور کلی از جمله مزایای این روش تولید، نسبت به سایر روشها می‌توان موارد زیر را یادآوری کرد: (۱)

- ۱- تولید قطعات از فلزات دیرگداز، نظیر تنگستن، مولیبدوم و ... با این روش ساده‌تر است.
- ۲- تولید آلیاژهایی که به طریق ذوبی قابل تولید نمی‌باشند (نظیر آلیاژ آلومینیم لیتیم)، با این روش ممکن است.
- ۳- محصولات به دست آمده از این روش احتیاج به عملیات نهایی نظیر تراشکاری، پرداخت و ... نداشته و در نتیجه ضایعات بسیار کم است.
- ۴- ساخت قطعاتی از دو یا چند فلز با درجات ذوب متفاوت، و غیرقابل حل در یکدیگر با این روش ممکن است.
- ۵- تولید قطعات متخلخل مثل فیلترها و یاتاقانهای خودروغنکار با این روش امکان پذیر است.
- در مقابل در این روش، ساخت قالب مساله عمده‌ای است و در ضمن دقت لازم برای جلوگیری از نفوذ ناخالصیها همواره ضروری است.

هرچند متالورژی پودر در جهان از سالها قدمت برخوردار است، در کشور ما صنعتی جدید و نوپا است. در این مقاله که بر مبنای یک سری کار تحقیقاتی در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهیه شده است، تراکم دو نوع پودر فلزی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. ابتدا سعی شده است مقاومت خمشی محصول خام به عنوان مبنایی برای سنجش کیفیت تراکم مورد استفاده قرار گرفته، و در نهایت با ایجاد ترکیبهای دانه‌ای مختلف، ساخت قطعات مورد مطالعه قرار گرفته و رابطه "حجم - فشار" بررسی شده است.

تراکم پودرهای فلزی با روش دینامیکی (۲)، و تفجوشی قطعات ساخته شده از پودرهای فلزی (۳)، طی دو مقاله جداگانه ارائه خواهد شد.

مبنای تراکم در روش استاتیکی

برای تراکم پودر به روش استاتیکی از پرسهای هیدرولیکی با ظرفیت‌های مختلف استفاده می‌شود. در هنگام تراکم رعایت برخی نکات ضروری است.

- ۱- فشار اعمال شده توسط پرس باید مساوی مقدار محاسبه شده باشد.
- ۲- جهت فشار باید کنترل گردد، و سعی شود تا حد امکان به طور یکنواخت و در جهت‌های مختلف انجام پذیرد.
- ۳- سرعت اعمال فشار باید کنترل شود.
- عمده‌ترین مساله، در بحث تئوری تراکم پودر، ارائه رابطه مناسب فشار - دانسیته است. تراکم پودر، در دو مرحله مشخص و متفاوت صورت می‌گیرد، و باید برای این دو مرحله دو رابطه جداگانه منظور

بیشتر باشد. انتخاب تولرانس مناسب برای قالب باید با توجه به تغییراتی که برای قطعه در عملیات تفجوشی پیش می‌آید، انجام شود (۱).

به طوری که قبلاً گفته شد، برای بررسی مشخصات محصول خام، دو نوع آزمایش انجام شد.

بدین منظور، برای مطالعه مقاومت خمشی محصول خام، از میله‌های استوانه‌ای استفاده گردید، و قالب برای ساخت میله استوانه‌ای مطابق شکل (۱) طراحی شد. در ضمن برای مطالعه اثر مشخصه‌های پودر برای ساخت بوش برنزی، از قالب طرح شده طبق شکل (۲) استفاده گردید.

تجهیزات مورد استفاده

- ۱- پرس هیدرولیک ۳۰ تن
- ۲- قالب دوطرفه برای نمونه‌های استوانه‌ای و بوش، شکل‌های (۱) و (۲).
- ۳- دستگاه خمش انیسترون،
- ۴- وسایل اندازه‌گیری ابعاد قطعه
- ۵- الک برای دانه‌بندی پودر،

پودرهای مورد آزمایش:

- ۱- پودر برنز
- ۲- پودر آهن
cox - w - 4037

نتایج به دست آمده و بحث درباره نتایج:

(i) تعیین فشار مناسب برای تراکم نمونه‌ها:

برای تعیین فشار مناسب و انتخاب فشار اپتیمم از نتایج آزمایش خمشی استفاده شد. به طور کلی برای بررسی مقاومت قطعه خام، آزمایش خمش نسبت به آزمایش کشش، ساده‌تر و در عین حال دقیقتر است. برای تعیین فشار تراکم مناسب، پودر برنز در دو نوع دانه‌بندی، جدول (۱)، مورد آزمایش قرار گرفت.

نتایج به دست آمده در جدول (۲) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در فشار تراکم بالاتر از 634 N/mm^2 تغییرات دانسیته و بار حد گسیختگی ناچیز است. نتایج داده شده در جدول (۲)، برای تغییرات فشار دانسیته خام، در شکل (۳)، و فشار، بار حد گسیختگی در شکل (۴) نشان داده شده است.

واضح است که فشار اپتیمم به دست آمده، 634 N/mm^2 ، نشان دهنده محدوده فشار اپتیمم است. به عبارت دیگر در این محدوده فشار، شکل‌های (۳) و (۴) مشخصات محصول خام، دانسیته و بار حد گسیختگی، تقریباً در حد بالا و مورد قبول قرار دارند. حال که فشار اپتیمم (مناسب) به دست آمد، می‌توان اثر دانه‌بندی مناسب را بررسی کرد.

(ii) تعیین دانه‌بندی مناسب با استفاده از مقاومت محصول خام

برای دانه‌بندی پودر موجود، از سه الک با $230, 170, 100 \text{ mesh}$ استفاده شده است بدین ترتیب پودر در اندازه‌های $100 < \text{mesh} < 170, 170 < \text{mesh} < 230, \text{mesh} > 230$ دانه‌بندی شده، و تحت فشار اپتیمم تراکم گردیده است. محصول

خام به دست آمده تحت آزمایش خمش قرار گرفته، و بار حد گسیختگی همراه با خیز میله اندازه‌گیری شده است. نتایج در جدول (۳) آورده شده است. در ضمن تغییرات بار حد گسیختگی نمونه با افزایش درصد دانه‌بندی درشت در شکل (۵) نشان داده شده است.

چنانچه از نتایج پیداست، بیشترین مقاومت حد گسیختگی را نمونه شماره ۹ داراست. علت این امر این است که این نمونه از دانه‌های درشت تشکیل شده است و در اثر اعمال فشار، درگیری مکانیکی بین ذرات بیشتر بوده و امکان تشکیل پیوندهای بین‌اتمی بالا می‌رود. از طرفی پودر با دانه‌بندی $100 +$ تنها $8/5\%$ کل وزن پودر موجود را تشکیل می‌دهد و طبیعی است که ساخت قطعه از این دانه‌بندی مقرون به صرفه نیست.

نمونه شماره ۴ که از دانه‌بندی پودر موجود منهای ریزترین دانه ($230-$) تشکیل شده است، از مقاومت خمشی بالایی برخوردار است و می‌تواند به عنوان پودر مناسب مورد استفاده قرار گیرد. برای تولید انبوه، با توجه به این‌که ریزترین دانه‌بندی ($230-$) ترکیب وزنی $27/0$ کل وزن پودر را تشکیل می‌دهد، باید مورد ارزیابی اقتصادی تولیدکننده قرار گیرد.

نمونه شماره ۱۰ که از دانه‌بندی موجود تشکیل شده است، از مقاومت نسبتاً مناسبی برخوردار است و می‌تواند برای تولید انبوه بوش به کار رود. با توجه به این‌که بوش‌های برنزی، حساسیت به خوردگی داشته و سختی سطوح مورد توجه است (۳)، مقاومت خمشی آنها از اهمیت کمتری برخوردار است و پودر موجود برای تولید آن مناسب به نظر می‌رسد.

(iii) تعیین تغییرات حجم قطعه برحسب فشار تراکم:

به طوری که در قسمت منای تراکم در روش استاتیکی، گفته شد، در محدوده الاستیک رابطه $PV^\gamma = cte$ به کار می‌رود. برای بررسی صحت این رابطه، تغییرات حجم قطعه برحسب فشار تراکم، مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری تغییرات حجم پودر در اثر افزایش فشار تراکم، با نصب یک ساعت اندازه‌گیری بر روی پرس، تغییر مکان سنبه بالا نسبت به سنبه پائین اندازه‌گیری شده و از آنجا تغییرات حجم به دست آمده است.

نتایج به دست آمده برای پودر برنز در جدول (۴)، و برای پودر آهن در جدول (۵) آورده شده است. در ضمن این نتایج در شکل‌های (۶) و (۷) رسم شده است.

علاوه بر این تغییرات حجم نمونه با افزایش فشار تراکم، برای دو نوع پودر مورد آزمایش، در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. با توجه به منحنی‌های به دست آمده، شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان نتیجه گرفت که رابطه $PV^\gamma = cte$ ، با دقت زیادی برای پودرهای فلزی قابل استفاده است.

برای به دست آوردن مقدار تقریبی ضریب γ ، داریم:

$$PV^\gamma = cte$$

$$\ln P = -\gamma \ln V + \ln C$$

با به دست آوردن $\ln P$ و $\ln V$ در دو نمونه مورد آزمایش، جدول (۶) و رسم آنها، شکل‌های (۱۵) و (۱۱)، ضریب γ برای دو نوع پودر به صورت زیر به دست آمد:

$$6.95 \approx \gamma \text{ برای پودر آهن} \quad 7 \approx \gamma \text{ برای پودر برنز}$$

جدول ۱

نوع پودر	-۱۰۰ mesh	۱۷۰ تا ۱۰۰ mesh	۲۳۰ تا ۱۷۰ mesh	+۲۳۰ mesh
برنز تجارسی (دانه بندی موجود)	۸/۵%	۴۱/۵%	۲۲/۵%	۲۷/۵%
دانه بندی موجود	۱۱%	۵۷/۵%	۳۱/۵%	
منه های ۲۳۰				

جدول ۲

p فشار $\frac{N}{mm^2}$	۳۹۰	۴۸۸	۵۸۵	۶۳۴	۶۸۳	۷۳۲
L طول نمونه mm	۴۱/۲	۳۹/۵	۳۸/۳۵	۳۸	۳۸/۷	۳۸/۲
D دانسیته $\frac{g}{cm^3}$	۶/۷۶	۷/۰۵	۷/۲۹	۷/۳۳	۷/۳۸	۷/۴۸
N بار حد گسیختگی P_u	۱۵	۲۲	۲۷/۵	۲۸	۲۸/۳	۲۸/۵

جدول (۴) تغییرات تغییر مکان با افزایش فشار تراکم (پودر برنز)

فشار تراکم $\frac{kg}{mm^2}$	تغییر مکان mm		تغییر مکان متوسط mm
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	
۰	۰	۰	۰
۱/۹۹	۱۳	۱۳/۷	۱۳/۳۵
۳/۹۸	۱۸/۴	۱۹/۲	۱۸/۸
۴/۹۶	۲۰/۵	۲۱/۵	۲۱
۹/۹۵	۲۷	۲۷/۸	۲۷/۹
۱۴/۹۲	۳۱/۲	۳۲	۳۱/۶
۱۹/۹۱	۳۴/۲	۳۵/۳	۳۴/۷
۲۴/۸۷	۳۶/۵	۳۷/۶	۳۷
۲۹/۸۴	۳۸/۲	۳۹/۴	۳۸/۸
۳۹/۷۸	۴۱	۴۲	۴۱/۵
۴۹/۷۳	۴۳	۴۳/۷	۴۳/۳۵
۵۹/۶۸	۴۴	۴۵/۱	۴۴/۵
۶۴/۶۵	۴۴/۵	۴۵/۷۵	۴۵/۱

جدول (۳) : نتایج دانه بندی های مختلف در فشار: $\frac{N}{mm^2}$ ۶۳

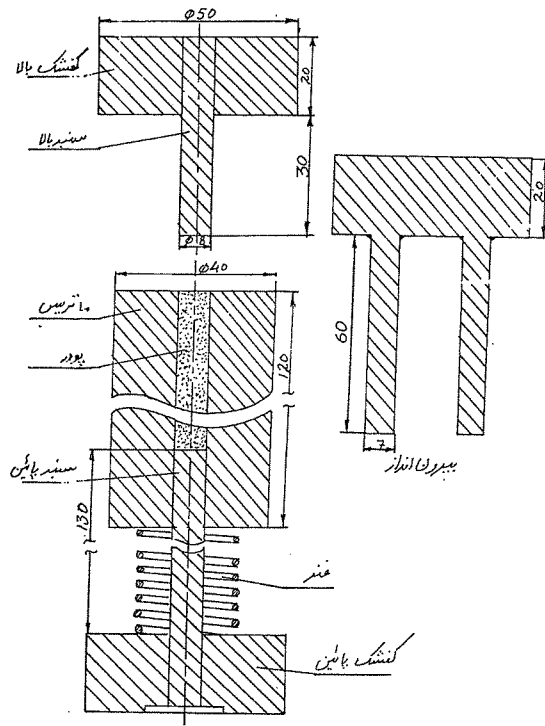
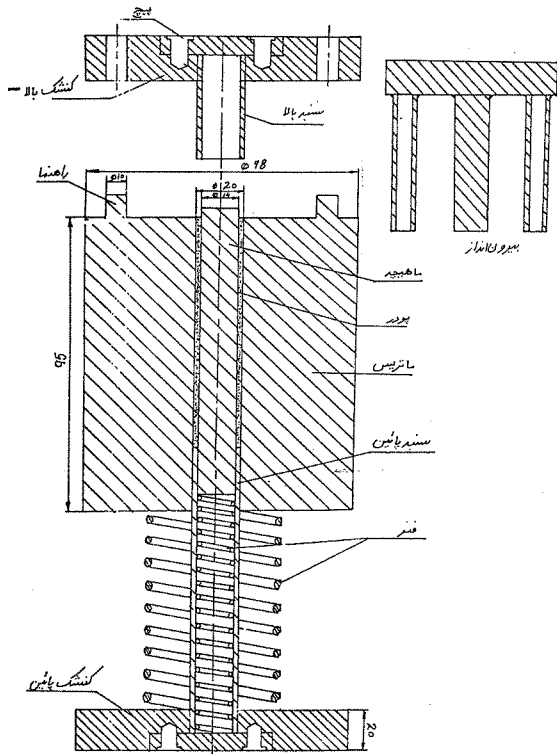
شماره نمونه	درصد دانه بندی %				خیز بار حد گسیختگی $\frac{N}{mm}$
	+۱۰۰ mesh	۱۰۰-۱۷۰ mesh	۱۷۰-۲۳۰ mesh	۲۳۰ mesh	
۱	۷۱	۱۹	۱۰	۰	۱۳/۳
۲	۴۷	۳۶	۱۷	۰	۷/۸
۳	۲۴	۴۷	۲۹	۰	۱۱/۱
۴	۱۱	۴۷/۵	۳۱/۵	۰	۱۳/۳
۵	۱۲	۴۵	۳۳	۱۰	۷/۸
۶	۱۰	۴۰	۲۵	۲۵	۷
۷	۰	۱۰۰	۰	۰	۱۳/۷
۸	۰	۰	۱۰۰	۰	۳/۷
۹	۱۰۰	۰	۰	۰	۲۰/۷
۱۰	۸/۵	۴۱/۵	۲۲/۵	۲۷/۵	۵

جدول (۶) نتایج آزمایش برای پودر آهن و برنز

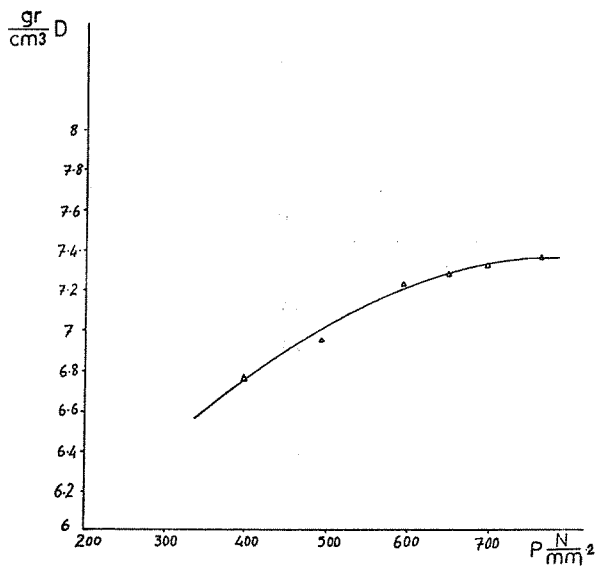
فشار تراکم $\frac{Kg}{mm^2}$	حجم V mm^3		BZ		Fe	
	BZ	Fe	Ln p	Ln V	Lnp	LnV
۰/۰۱	۸۴/۴×۱۶۷	۷۲×۱۶۷	-/۶۴	۸/۳۵	۶۴/۶	۸/۲۰
۳/۹۹	۶۵/۶×۱۶۷	۶۶×۱۶۷	۱/۳۸	۸/۱	۱/۳۸	۸/۱
۴/۹۹	۶۳/۴×۱۶۷	۶۴×۱۶۷	۱/۶	۸/۰	۱/۶	۸/۰
۹/۹۶	۵۷×۱۶۷	۵۹/۵×۱۶۷	۲/۳	۷/۹۶	۲/۳	۷/۹۶
۱۴/۹۲	۵۲/۸×۱۶۷	۲۶/۲×۱۶۷	۲/۷	۷/۸۸	۲/۷	۷/۹
۱۹/۹۹	۴۹/۷×۱۶۷	۵۳/۵×۱۶۷	۳	۷/۸۲	۳	۷/۸۷
۲۴/۸۸	۴۷/۴×۱۶۷	۵۱×۱۶۷	۳/۲	۷/۷۷	۳/۲	۷/۸۲
۲۹/۸۵	۴۵/۶×۱۶۷	۴۹/۴×۱۶۷	۳/۴	۷/۷۳	۳/۴	۷/۷۵
۳۹/۷۹	۴۲/۹×۱۶۷	۴۷×۱۶۷	۳/۶۸	۷/۶۷	۳/۶۸	۷/۷۲
۴۹/۷۴	۴۱/۰×۱۶۷	۴۵×۱۶۷	۳/۹	۷/۶۳	۳/۹	۷/۷
۵۹/۶۹	۳۹/۹×۱۶۷	۴۴×۱۶۷	۴	۷/۶	۴	۷/۶۹
۶۴/۶	۳۹/۳×۱۶۷	۴۳/۵×۱۶۷	۴/۱۷	۷/۵۸	۴/۱۷	۷/۶۷

جدول (۵) نتایج آزمایش تغییر مکان پودر هنگام تراکم برای پودر آهن

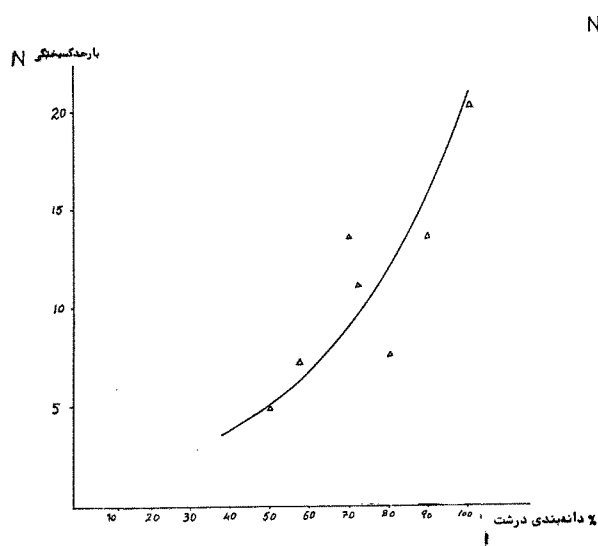
فشار $\frac{Kg}{mm^2}$	تغییر مکان (دانه بندی موجود) mm			تغییر مکان متوسط mm	تغییر مکان mm
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳		
۴/۹	۷/۴	۷	۷/۷	۷/۳۶	۷/۸
۹/۹۵	۱۱/۴	۱۱	۱۲/۱	۱۱/۵	۱۲/۳
۱۴/۹	۱۴/۵	۱۴/۴	۱۵/۴	۱۴/۷۶	۱۵/۷
۱۹/۸۹	۱۷/۱	۱۷	۱۸/۴	۱۷/۵	۱۸/۷
۲۴/۸۶	۱۹/۵	۱۹/۲	۲۰/۸	۱۹/۸۳	۲۱/۱۵
۲۹/۸۴	۲۱/۴	۲۰/۹	۲۲/۲	۲۱/۵	۲۳/۲
۳۹/۷۹	۲۴/۶	۲۳/۲	۲۴/۱	۲۳/۹	۲۶/۴
۴۹/۷	۲۵/۳	۲۴/۹	۲۵/۶	۲۵/۲۶	۲۸
۲۹/۶	۲۶/۳	۲۶/۱	۲۶/۶	۲۶/۳	۲۹
۶۴/۶	۲۶/۶۵	۲۶/۶	۲۷	۲۶/۷۵	۲۹/۵
۶۹/۶	-	-	-	-	۲۹/۹



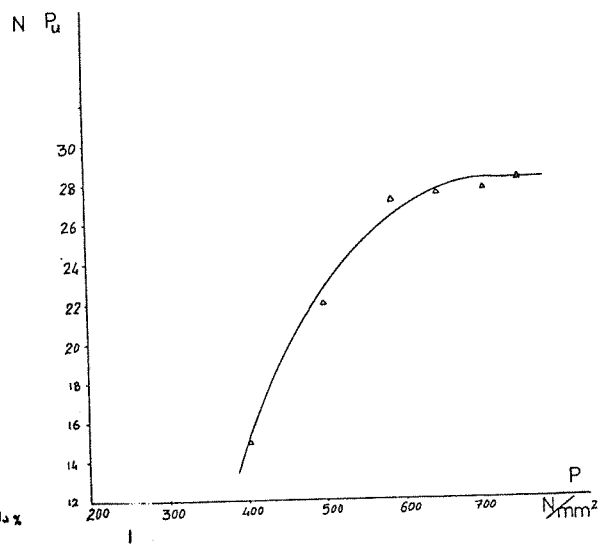
شکل ۱- قالب دو طرفه برای ساخت نمونه‌های آزمایشی استوانه‌ای



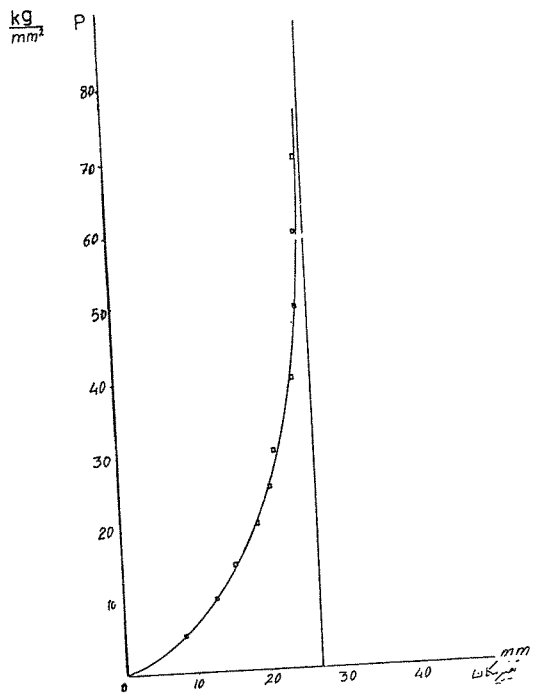
شکل ۳- تغییرات فشار - دانسیته



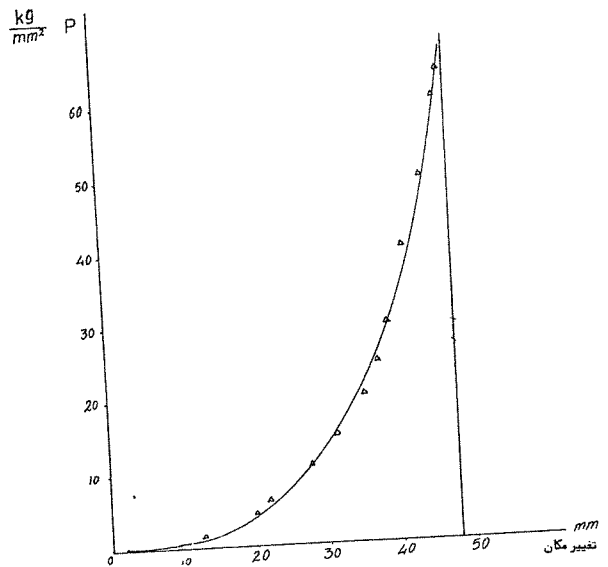
شکل ۵ - تغییرات بارحداگسیختگی نمونه با افزایش درصد دانه بندی درشت



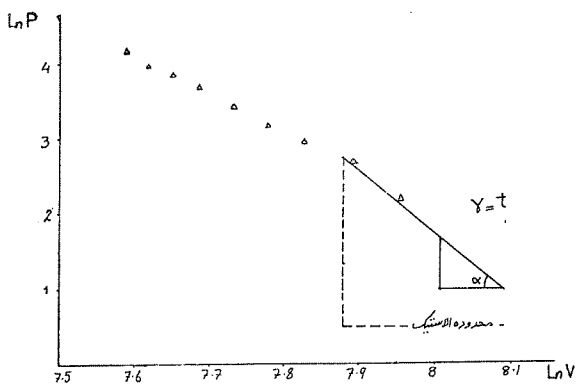
شکل ۴ - تغییرات فشار - بار حد



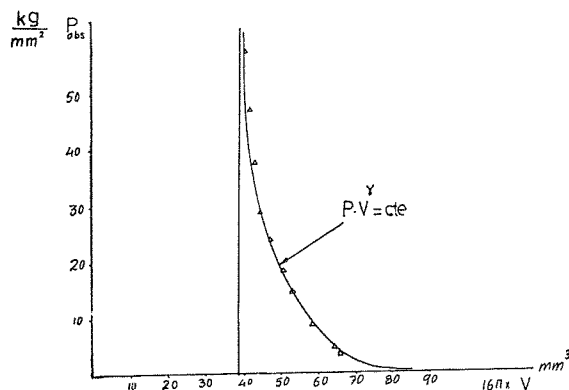
شکل ۷ - تغییرات تغییر مکان با افزایش فشار برای پودر آهن



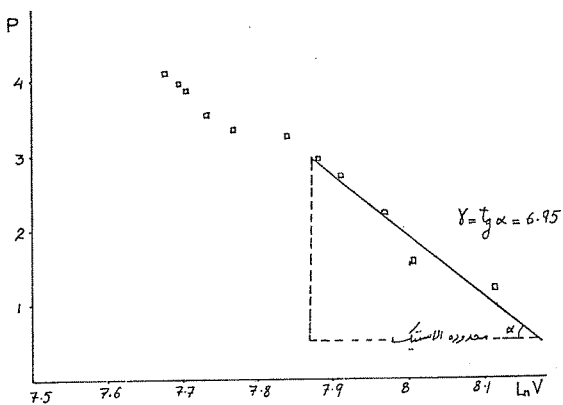
شکل ۶ - تغییرات تغییر مکان با افزایش فشار برای پودر برنز



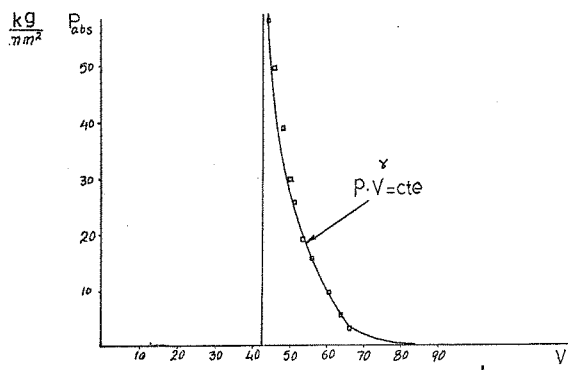
شکل 9 - تغییرات $\ln P$ بر حسب $\ln V$ برای پودر برنز



شکل 8 الف - تغییرات حجم نمونه برنزی با افزایش فشار تراکم



شکل 10 - تغییرات $\ln P$ بر حسب $\ln V$ برای پودر آهن



شکل 8 ب - تغییرات حجم نمونه آهنی با افزایش فشار تراکم

منابع:

- 1- ASM, "Source book on Powder metallurgy", 1979
- 2- دکتر محمد علی صادقی، دکتر محمود شاکری، مهندس حمیدرضا داغیانی "تراکم پودرهای فلزی با روش دینامیکی" در دست چاپ.
- 3- دکتر محمود شاکری، دکتر محمد علی صادقی و مهندس حمیدرضا داغیانی "تفجوشی قطعات ساخته شده از پودرهای فلزی" در دست چاپ.
4. M. M. Carol and M. T. Kim, "pressure - density equations for porous metals and metal powders," powder metallurgy, Vol. 27, No.3, 1984
5. I. Shapiro, and I. M. Koltooff, J. Phys. colloid chem., 1974