

# تراکم پودرهای فلزی به کمک تخلیه سریع الکتریکی توجیه پدیده تراکم به وسیله تشکیل سیم‌های نازک در مسیرهای طولی و عرضی

دکتر محمود شاکری

استاد یار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

روش تراکم پودرهای فلزی به کمک تخلیه سریع الکتریکی، روشی جدید برای ساختن قطعات ساده است. محصول خام در این روش، دارای دانسیته کم، ولی مقاومت مکانیکی نسبتاً زیاد می‌باشد. در این مقاله سعی شده است، فلسفه تراکم، به کمک دستاوردهای تجربی و آزمایشی تحلیل و بررسی شود. مقاله حاضر بیانگر این است که عمل تراکم، در ۵ مرحله، بسته به مقدار انرژی تخلیه شده، انجام می‌شود. این پنج مرحله عبارتند از: هدایت، جوش بین ذرات، تراکم، محصول جامد متخلخل، و نهایتاً "جدائی یا انفجار".

## Powder Compaction by Electrical Discharge

### "Explanation of Compacting Phenomenon by Constructing Wires in Axial and Radial Directions"

M. Shakeri, Ph.D.

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

#### ABSTRACT:

*Electrical discharge, is a new method for consolidation of metal powders into simple products.*

*The green product in this method, has a low density, but with fairly high mechanical properties.*

*In this paper the philosophy of compaction is investigated, by experimental achievements. The process is shown to be completed in five stages, depending upon the amount of energy discharged through the column. These stages are; conduction, interparticle welding, consolidation, porous solid, and disintegration.*

مقدمه

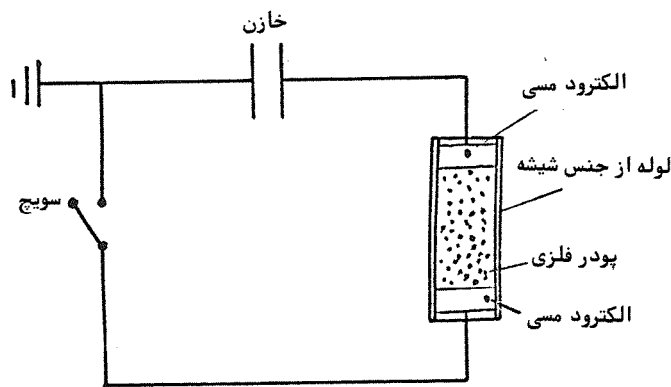
تراکم پودرهای فلزی با روش استاتیکی، روشی متداول در صنعت است. از این روش طی سالیان دراز، برای ساختن قطعات مکانیکی استفاده شده است (۱) از مزایای استفاده از پودرهای فلزی برای ساخت قطعات مکانیکی، نسبت به روشهای دیگر نظیر ریخته‌گری، می‌توان نکات زیر را یادآور شد (۲):

- ۱- قطعات ساخته شده با این روش احتیاج به عملیات پایانی، نظیر تراشکاری، صیقل و پرداخت سطح ندارند.
- ۲- ساخت قطعات از فلزات دیرگداز، نظیر تنگستن و مولیبدن،

با این روش بدمراتب ساده‌تر است.

۳- در مواردی که قطعه باید از دو یا چند فلز با درجات ذوب مختلف ساخته شود، ریخته‌گری کاری مشکل است، و حال آن که در این روش، تراکم به‌سادگی انجام می‌گیرد.

در روش استاتیکی پودر، ساخت قالب از عمده‌ترین مسائل است و با توجه به فشار زیاد تراکم، معمولاً قالب بزودی تغییر شکل داده و غیرقابل استفاده می‌شود (۲). بدین منظور، استفاده از روشهای دینامیکی برای تراکم پودرهای فلزی مورد توجه قرار گرفته است. یکی



از روشهای استفاده از انرژی دینامیکی برای تراکم پودرهای فلزی، تراکم پودرها با استفاده از بار ضربه‌ای "سقوطوزنه" می‌باشد (۳). اخیراً استفاده از تخلیه سریع الکتریکی برای ساخت قطعات ساده، از پودرهای فلزی، مورد استفاده قرار گرفته است (۴). این روش هنوز مراحل اولیه تحقیق را می‌گذراند و تحلیل پدیده‌های پیچیده‌ای که ضمن تراکم پیش می‌آید، باید مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. در این روش ستون پودر فلزی، در مسیر یک تخلیه سریع الکتریکی قرار گرفته، شکل (۱)، و پس از تخلیه، محصول خام با مقاومت کافی برای حمل جهت عملیات بعدی، مکانیکی و حرارتی، به دست می‌آید (۵). منظور از عملیات حرارتی هر محصول ساخته شده از پودرهای فلزی، سینتر کردن آن است (۶).

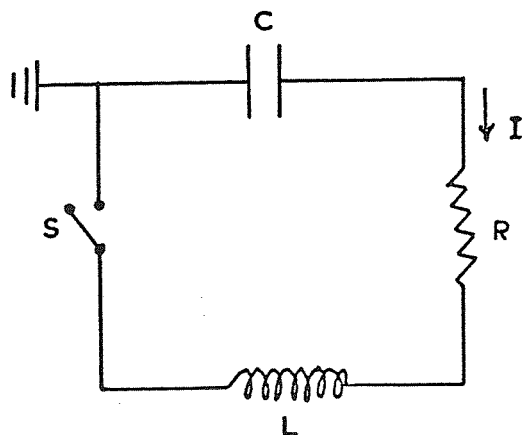
یکی از روشهای پیشنهادی برای توضیح پدیده تراکم با روش تخلیه الکتریکی، تشکیل سیمهای فلزی است (۸ و ۷). در این مقاله با بهره از نتایج یک سری کار تحقیقاتی روی پودر فلزات مختلف، سعی می‌شود فرآیند این عمل تشریح شود.

#### تجهیزات مورد استفاده:

دستگاه تخلیه سریع الکتریکی شامل ۱۵ عدد خازن با ظرفیت هرکدام  $5/32 \mu F$ ، دستگاه شارژ و تخلیه، کوپل راگوسکی آ، برای اندازه‌گیری جریان تخلیه، وسیله اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ بین دو سر نمونه، و پل یونیورسال برای اندازه‌گیری مشخصات ستون پودر و محصول خام.

#### پودرهای مورد آزمایش:

دو نوع پودر آهن با اسامی تجاری JJM, M.84 با ترکیبات نشان داده شده در جدول (۱)، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- مدار مورد استفاده برای تراکم پودر [۵]

شده است. ابتدا پودر در داخل شیار ریخته شده، پس از اعمال چند ضربه و مسطح کردن سطح پودر، صفحه پوشش، که یک صفحه پلاستیک یا شیشه‌ای است، روی آن قرار می‌گیرد. در این حالت الکترودها از جنس مس و نوع تسمه‌ای انتخاب می‌شوند، شکل (۳).

ستون آماده شده پودر (میله و تسمه) در مسیر تخلیه الکتریکی قرار گرفته، و در ولتاژهای مختلف، پدیده تراکم مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

#### مشخصه‌های مدار:

مدار کلی، شکل (۱)، شامل ستون پودر است، و مقاومت و اندوکتانس و ظرفیت کلی مدار، برابر مجموع مقاومت، اندوکتانس و

#### نحوه آزمایش:

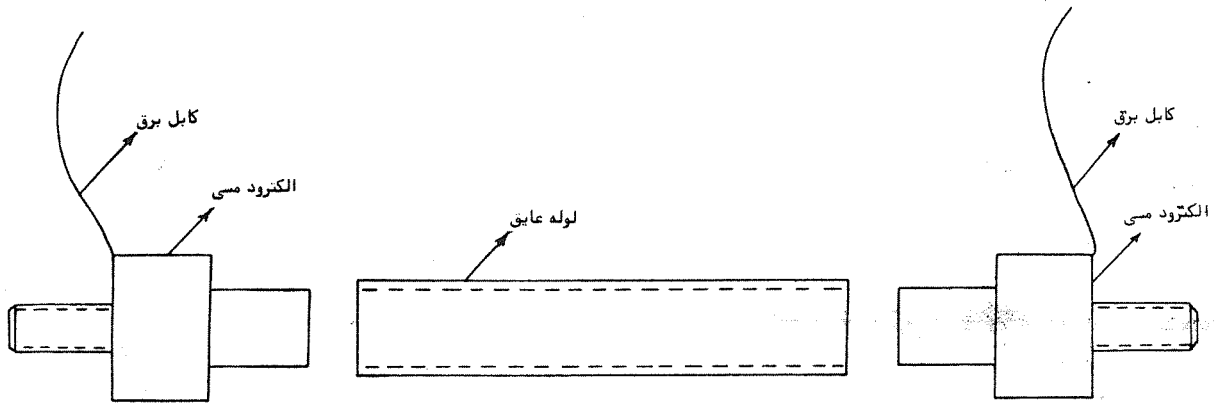
به کمک روش تخلیه الکتریکی، با قرار دادن ستون پودر فلزی در مسیر تخلیه، میله و تسمه مطابق شکل (۱)، ساخته می‌شود. ترتیب و نحوه آزمایش در هر مورد به صورت زیر است:

– برای تراکم میله، یک لوله غیرهادی (شیشه یا پلاستیک) مناسب انتخاب شده، و یک سر آن با الکترود استوانه‌ای (معمولاً از جنس مس) بسته می‌شود. سپس پودر مورد آزمایش در داخل لوله ریخته شده، و پس از اعمال چند ضربه، سر دیگر با الکترود مشابه مسدود می‌گردد، شکل (۲).

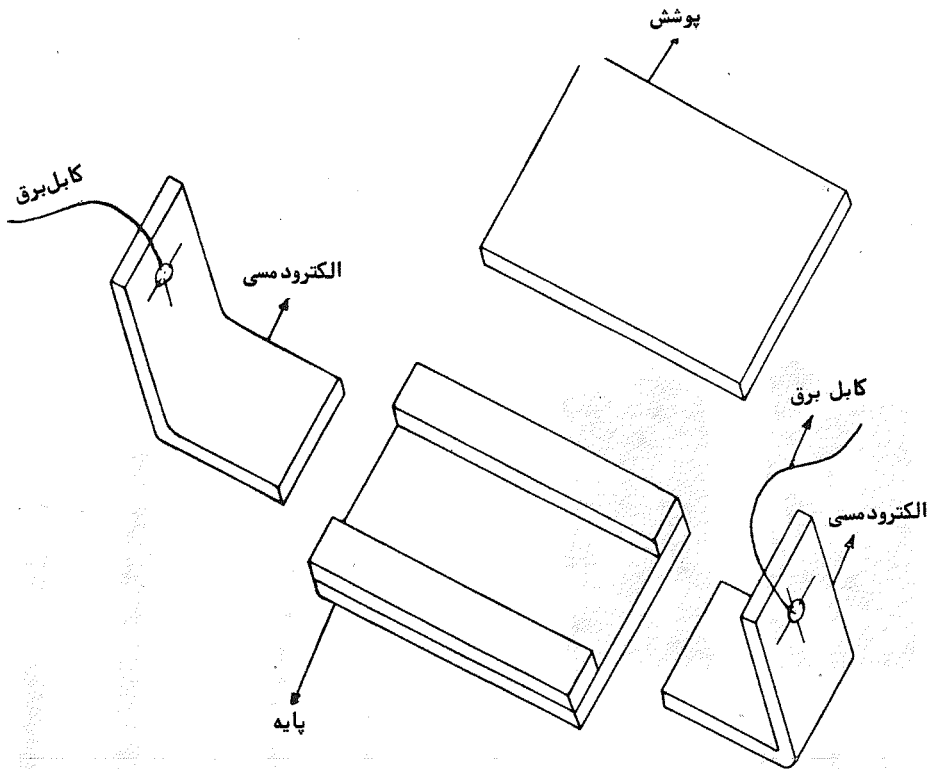
– برای تراکم تسمه، قالب از جنس پلیمر بوده و از دو قسمت پایه و پوشش ساخته شده است. پایه، صفحه‌ای است عایق از جنس پلیمر که در روی آن شیار مناسبی به اندازه تسمه مورد آزمایش ایجاد

	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Sn	Cu	B	Fe	Co
M.84	0	0.01	0.014	0.02	0.31	0.31	0.38	0.58	0.012	0.09	–	Balance	–
JJM	-0.2	0.018	0.012	0.03	0.29	–	–	–	–	–	–	–	–

جدول ۱- مشخصات پودرهای فلزی به کار رفته



شکل ۲- الکترودها و لوله عایق برای تراکم میله



شکل ۳- الکترودها و قالب عایق برای تراکم تسمه

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)^2 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2)$$

است ضریب میرایی  $\beta = \frac{R}{2L}$  را می توان با نسبت شدت جریان در دو نقطه پیک جریان به دست آورد. در این صورت با استفاده از رابطه

$$\beta = \frac{1}{T} \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (3)$$

ظرفیت ستون پودر و بقیه مدار می باشد. مشخصه های مدار، بدون ستون پودر، به سهولت با اتصال الکترودها به یکدیگر امکان پذیر است. شکل موج جریان در این حالت سینوسی میرا بوده و رابطه آن به صورت زیر است:

$$I = \frac{-E_0}{L\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t \quad (1)$$

که در آن  $L$  اندوکتانس،  $E_0$  ولتاژ شارژ،  $R$  مقاومت، و

که در آن T پریود بین I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub> بوده و برابر با  $\frac{2\pi}{\omega}$  است .  
در نتیجه با دانستن T و ظرفیت خازن C ، اندوکتانس L و مقاومت R به دست می آید .  
نتایج به دست آمده برای مدار مورد استفاده به صورت زیر است :

$$C = 79.8 \text{ F}, \beta = 6.95 \times 10^3 / \text{sec}, \omega = 9.25 \times 10^4 \text{ rad/sec}$$

$$L_c = 1.434 \text{ H}, R = 1.994 \times 10^{-2} \Omega$$

مشخصه های ستون پودر :

ترتیب قرار گرفتن ذرات پودر فلزی در داخل قالب ، بستگی به :  
اندازه ذرات ، شکل ذرات ، نحوه اعمال ضربه ضمن پر کردن دارد . رفتار ستون اولیه در مسیر جریان ، عملاً " ترکیبی از یک مقاومت ، یک خازن و یک سلف است (RLC) . با استفاده از " پل یونیورسال ۳ " می توان مقاومت و ظرفیت ستون پودر را به دست آورد .  
(۹)

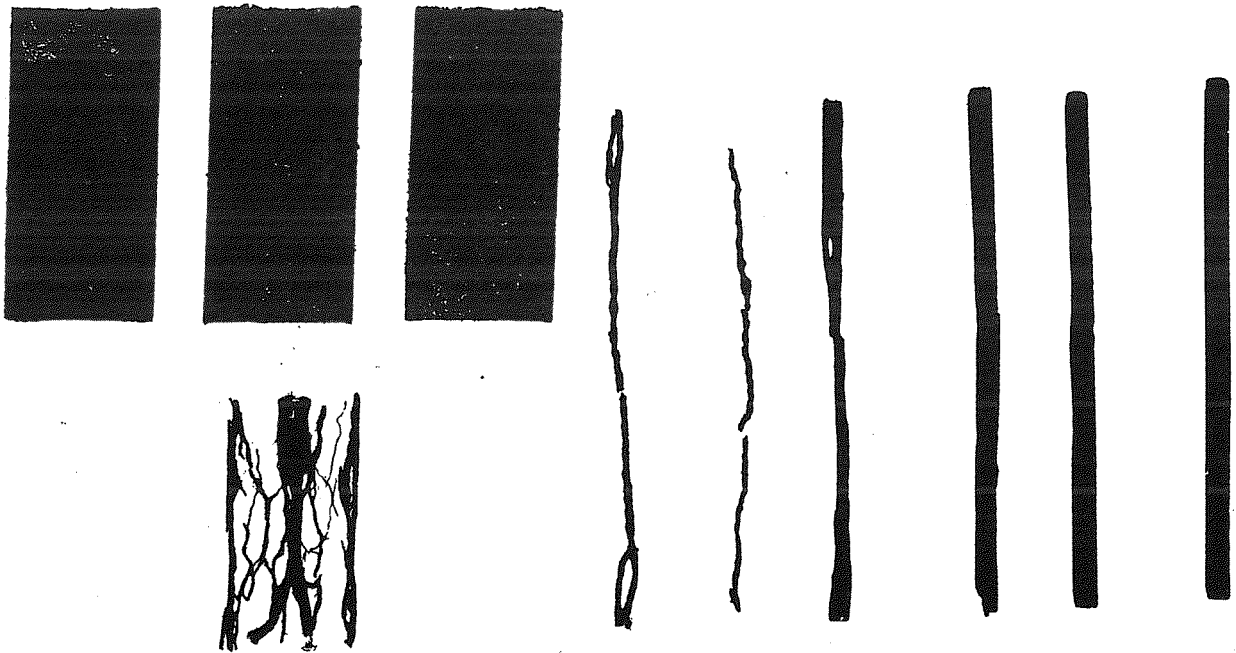
وقتی خازن در مسیر ستون تخلیه می شود ، اکسید پودرهای فلزی ابتدا در مسیر جریان می شکنند و ذرات در این مسیر به هم جوش می خورند . با ازدیاد ولتاژ شارژ خازن ، بین ذرات در مسیرهای عرضی نیز اتصال برقرار شده ، و نهایتاً " همراه با ذرات پودر حبس شده بین شبکه سیمها ، ستون پودر متراکم می شود .

شکل های (۴) و (۵) ، نمونه های متراکم شده میله و نوار ، تحت تاثیر ولتاژهای مختلف ، و پدیده تشکیل سیمهای طولی و عرضی را به وضوح نشان می دهد .

مقاومت نهائی ستون نیز ، پس از قرار گرفتن تحت چند مرتبه تخلیه الکتریکی ، اندازه گیری می شود . این نتایج در شکل (۶) نشان داده شده است . این شکل مبین تشکیل سیمها در شکل های (۴) و (۵) می باشد . اندوکتانس ستون نیز برای چند نمونه اندازه گیری شده است ، جدول (۲) .

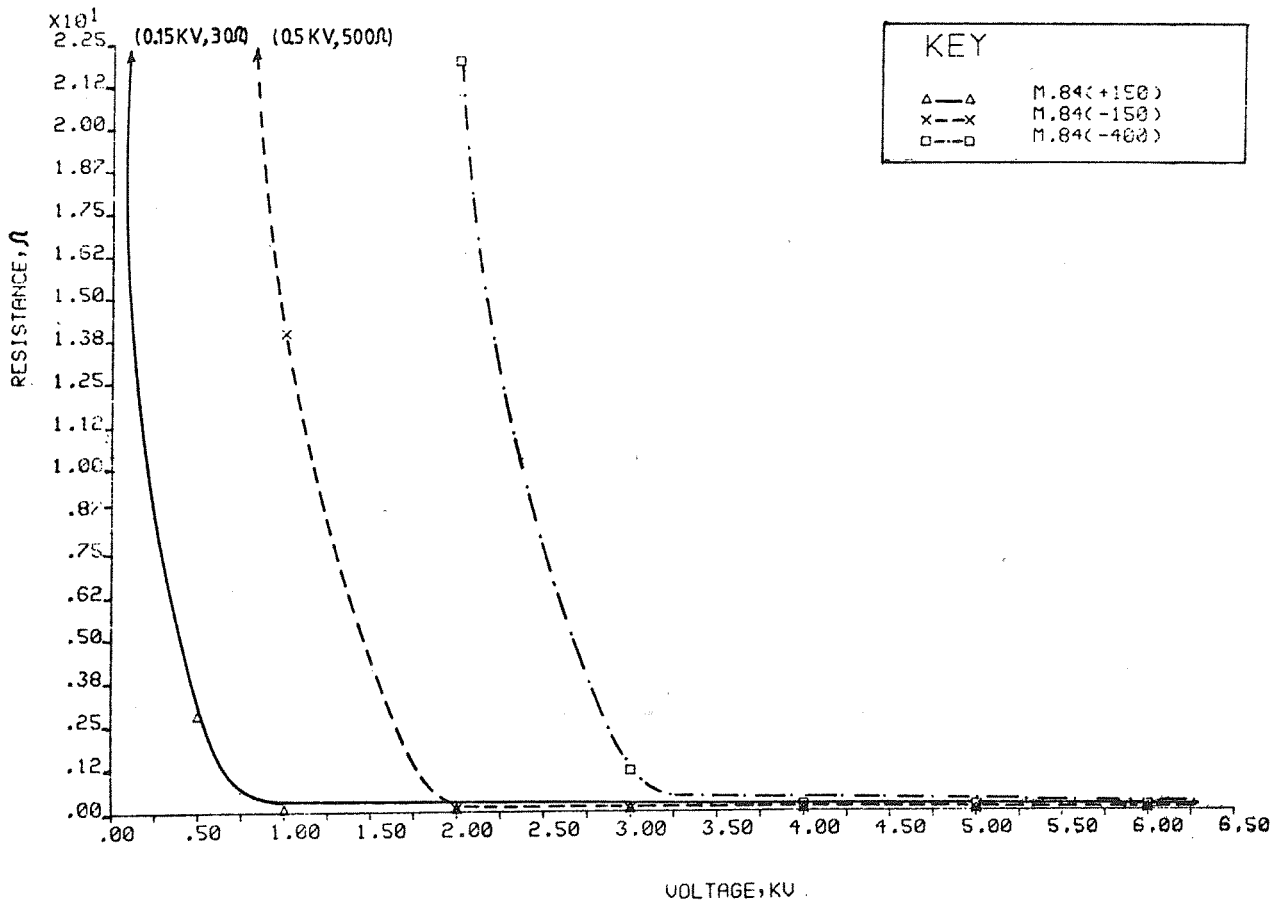
Compacting voltage Kv						
Material	Mesh size	2.5	3	4	5	6
		Inductance x 10 <sup>-4</sup> /MH				
JJM	- 150	1309	728	871	966	844
	-100+150	958	862	856	825	798
M.84	- 150	972	886	821	798	886
	-100+150	892	856	840	830	848

جدول ۲- اندوکتانس نهائی میله های فولادی متراکم شده به قطر ۷/۴ میلیمتر و طول ۱۰۰ میلیمتر



شکل ۵- تسمه های متراکم شده تحت ولتاژهای مختلف

شکل ۴- میله های متراکم شده تحت ولتاژهای مختلف



شکل ۶- مقاومت نهائی ستون (بقطر ۳/۷ میلیمتر و طول ۸۰ میلیمتر) پس از تراکم تحت ولتاژهای مختلف

ازدیاد مقاومت مشاهده می‌شود. علت این ازدیاد مقاومت احتمالاً " در اثر بالا رفتن درجه حرارت است. در دانه‌بندیهای درشت‌تر، یک افت مقاومت ثانوی مشاهده می‌گردد. این افت را می‌توان با شکست لایه‌های اکسید در مسیرهای عرضی توجیه نمود.

نتایج به‌دست آمده و بحث درباره نتایج: عکس‌العمل ستون در مقابل تخلیه سریع ولتاژ را می‌توان به ۵ مرحله تقسیم کرد:

۱- مرحله هدایت:

دانه‌های پودر در داخل قالب، در تماس با یکدیگر هستند. روی هر دانه پودر، لایه‌های اکسید قرار دارد که مقاومت الکتریکی آن خیلی زیاد است. در ضمن در ستون پودر بین دانه‌ها فضای خالی موجود است. با توجه به عکس‌العمل ستون در مقابل جریان الکتریکی، می‌توان ستون پودر را به‌صورت یک دی‌الکتریک فرض کرده و مدار معادل آن را

در هر آزمایش می‌توان جریان و اختلاف پتانسیل دو سر ستون را به‌دست آورد (۹). با اندازه‌گیری ایندو، مقاومت ستون برابر می‌شود با:

$$R_1 = \frac{V_1 - V_2 - L_T \frac{dl}{dt}}{I} \quad (4)$$

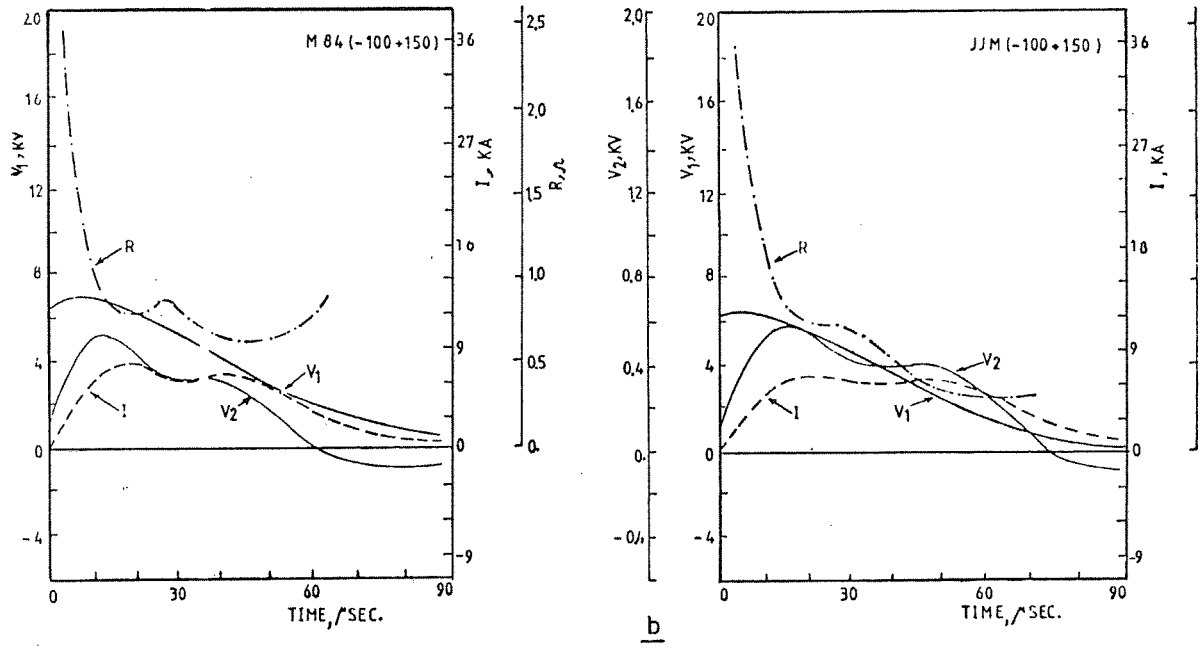
مقدار  $L_T$  خیلی کوچک است و در نتیجه:

$$R_1 = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad (5)$$

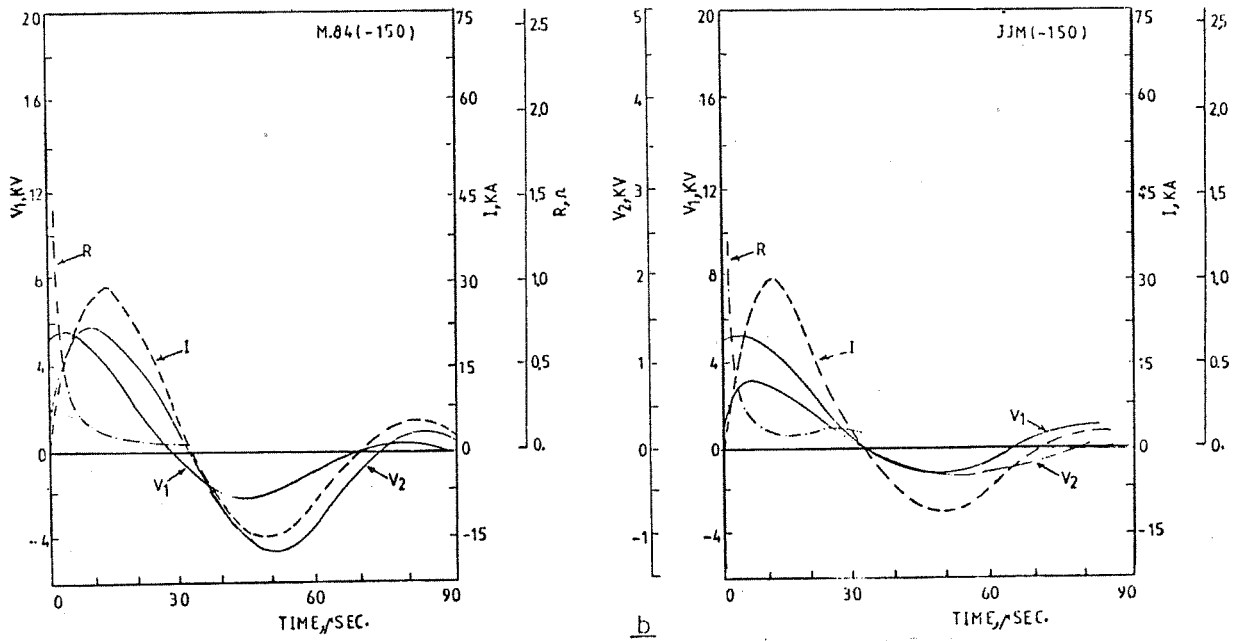
مقاومت  $R_1$  از دو رابطه (۴) و (۵) محاسبه شده، و نتایج به‌دست آمده بسیار بهم نزدیک است.

با استفاده از رابطه (۵) مقاومت آنی ستون پودر، با استفاده از فرم موجی جریان و ولتاژ به‌دست آمد. این نتایج در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

نمونه‌های ساخته شده از پودر با دانه‌بندی ریز، در ابتدا افت مقاومت خیلی زیاد نشان می‌دهد. این عامل را می‌توان در اثر شکست لایه‌های اکسید دانه‌ها دانست. پس از این افت، در بعضی از نمونه‌ها،



شکل ۷- تغییر مقاومت لحظه‌ای ستون (به قطر ۳/۷ میلیمتر و طول ۱۰۰ KV میلیمتر) وقتی تحت ولتاژ ۷ kv قرار می‌گیرد.



شکل ۸- تغییر مقاومت لحظه‌ای ستون (به قطر ۷/۴ میلیمتر و طول ۱۰۰ KV میلیمتر) وقتی تحت ولتاژ kv قرار می‌گیرد.

شناخت .

با قرار دادن اختلاف ولتاژ زیاد در دو سر ستون ، لایه‌های اکسید شکسته شده و اجازه می‌دهد ، جریان در مسیر با مقاومت کمتر برقرار شود . شکست لایه‌های اکسید باعث افت سریع مقاومت ستون می‌شود . این پدیده تقریباً "آنی اتفاق می‌افتد .

## ۲- مرحله جوش بین ذرات :

ضمن این که ستون جریان را هدایت می‌کند ، ذرات به هم جوش خورده ، شبکه سیمی در مسیر جریان ایجاد می‌نماید . جوش ذرات عمدتاً " در مسیر جریان اتفاق می‌افتد و علت آن سینریک سریع ذرات و رشد neck بین آنها است . این پدیده باعث افت بیشتر مقاومت می‌گردد . بهر حال در اثر گرم شدن ، مقاومت الکتریکی سیمها زیاد می‌شود . این عامل در مقابل افت مقاومت قرار دارد ، و در آزمایش ستون با ذرات درشت ، شکل (۷) ، باعث بالا رفتن تقریبی مقاومت می‌شود . در آزمایش ستون با ذرات ریز ، شکل (۸) ، عامل درجه حرارت اثر زیادی ندارد ، و بالا رفتن مقاومت مشاهده نمی‌شود .

در این مرحله ، ستون پودر تبدیل به یک مجموعه سیم می‌شود ، که عمدتاً " در مسیر جریان تشکیل شده‌اند . تعداد سیمها بستگی به ، اندازه و شکل ذرات ، شکل هندسی ستون ، ضخامت لایه اکسید و ولتاژ خازنها دارد .

## ۳- مرحله تراکم

عبور جریان از داخل سیمهای موازی ، باعث می‌شود سیمها بهم جذب شده ، و فشاری در جهت‌های شعاعی و محیطی اعمال گردد . (۱۰) . تنشهای تماسی هرگز آیین ذرات باعث شکسته شدن لایه‌های اکسید در جهت‌های عرضی شده ، و اجازه می‌دهد در این جهت نیز ذرات به هم جوش بخورند . این شکست دومی لایه‌های اکسید ، باعث افت بیشتر مقاومت ستون می‌گردد . این افت بخصوص در آزمایش لایه‌های درشت بیشتر مشهود است ، شکل (۷) . مشابه مرحله (۲) ، جوش بین ذرات ادامه پیدا می‌کند تا موقعی که عامل حرارت آن را متوقف نماید .

ستون در انتهای این مرحله ، شبیه یک مجموعه سیم با اتصالات طولی و عرضی است . در ضمن تعداد زیادی ذره بین آنها به صورت تراکم شده وجود دارد .

## ۴- مرحله محصول جامد متخلخل :

در این مرحله ، ستون مشابه یک جسم جامد متخلخل عمل می‌کند . اگر جریان زیاد باشد ، تراکم از نوع "Pinch effect" اتفاق می‌افتد . رفتار مکانیکی ، الکتریکی و حرارتی ستون در این حالت مشابه یک جسم جامد خواهد بود .

## ۵- مرحله جدائی یا انفجار :

در ولتاژهای بالاتر ، ستون متراکم شده به صورت‌های مختلف ، لایه لایه ، فوران فلز مایع ، یا قطعه قطعه شده ، از هم جدا شده و عملاً " منجر می‌شود . این مرحله در مقاله‌های جداگانه مورد تحلیل و بررسی ، می‌گیرد .

## پاورقی :

1. Drop Hammer
2. Rogowski Coil
3. Universal Bridge
4. Hertz

## منابع :

1. ASM, "Source Book on Powder Metallurgy", 1979
۲. شاکری ، محمود - صادقی ، محمدعلی - داغیانى ، حمیدرضا " بررسی اثر فشار تراکم و دانه‌بندی بر روی خواص مکانیکی قطعات پودرهای فلزی ". تهران . مجله علمی و فنی امیرکبیر . دانشگاه صنعتی امیرکبیر . سال چهارم . شماره ۱۴ . بهار ۱۳۶۹ . ص ۶۰-۷۱ .
۳. شاکری ، محمود - صادقی ، محمدعلی - داغیانى ، حمیدرضا . " تراکم پودرهای فلزی با روش دینامیکی ". تهران مجله علمی و فنی امیرکبیر . سال چهارم . شماره ۱۵ . تابستان ۱۳۶۹ . زیر چاپ .
4. S. Clyens, S.T.S. Al- Hassani, and W. Johnson, "The Compaction of P/M Bars, Using High Voltage Electrical Discharge", Int. Journal of Mech. SCI: 18, 1976.
۵. شاکری ، محمود . " تراکم پودرهای فلزی به کمک تخلیه سریع الکتریکی ". تهران ، مجله علمی و فنی امیرکبیر . دانشگاه صنعتی امیرکبیر . سال سوم . شماره ۱۱ . بهار ۱۳۶۸ . ص ۱۲۹-۱۳۴ .
۶. شاکری محمود - صادقی ، محمدعلی - داغیانى ، حمیدرضا . سینریک قطعات ساخته شده از پودرهای فلزی ". تهران . مجله علمی و فنی امیرکبیر . دانشگاه صنعتی امیرکبیر . سال چهارم . شماره ۱۵ . پاییز ۱۳۶۹ .
7. M. Shakery, S.T.S. Al- Hassani, and T.J. Davies, "Electrical Discharge Powder Compaction", Powder Metallurgy Int. Vol. 11, 1979.
8. S.T.S. Al- Hassani, and M. Shakery, "Consolidation of Powders by Direct Electrical Discharge", POC. 7th North American Manufacturing Research Conf. Univ. Michigan, 1979.
9. M. Shakery, Ph.D. Thesis, Umist, 1979.

