



مطالعه تجربی رفتار سیم‌های زودگداز و دیرگداز در سامانه تخلیه الکتریکی پالسی ۱ کیلوژول

مریم اکبری نساجی، رضا امراللهی، مرتضی حبیبی*

دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران- ایران

*Email: mortezahabibi@aut.ac.ir

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۸

چکیده

در این مقاله به مطالعه تجربی رفتار سیم‌های انفجاری زودگداز (مس-نیکل) و دیرگداز (تنگستن) در سامانه‌های تخلیه الکتریکی پالسی پرداخته شده است. انرژی سامانه ۱ کیلوژول و طول سیم ۴ سانتی‌متر و قطر آن ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. جهت مطالعه رفتار سیم‌ها، پارامترهای الکتریکی جریان و ولتاژ تخلیه الکتریکی و موج شوکی بررسی شده است. در سیم‌های زودگداز جریان به صورت پریودیک برقرار می‌شود و دارای دو قله است. در سیم‌های دیرگداز دو قله جریان به فاصله زمانی بیشتری تشکیل می‌شوند که نشان می‌دهد سطح انرژی ۱ کیلوژول برای تغییر حالت و ایجاد پلاسما در این نمونه از سیم‌ها کافی نبوده است. نهایتاً با شرایط فعلی آزمایش و مقایسه نتایج تجربی دیده می‌شود که سیم‌های زودگداز نسبت به نمونه‌های دیرگداز موج شوکی قوی‌تری را ایجاد می‌کنند. مقدار این فشار در سیم زودگداز (مس-نیکل) ۸٫۵ مگا پاسکال و در سیم دیرگداز (تنگستن) ۶ مگا پاسکال است. همچنین جریان تخلیه الکتریکی برای سه سیم مس-نیکل با قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر را با هم مقایسه کردیم و از لحاظ تجربی مشاهده کردیم جریان تخلیه الکتریکی در سیم با قطر ضخیم‌تر بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: سامانه پلاسمای پالسی، موج شوکی، سیم انفجاری، تخلیه الکتریکی

Experimental study of the behavior of refractory and non-refractory metals in the 1kJ pulse electric discharge system

M. Akbari Nasaji, R. Amrollahi, M. Habibi*

Department of Physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 11.3.2023, Revised: 4.9.2023, Accepted: 9.9.2023

Abstract

We are studying the experimental behavior of non-refractory and refractory wires in the 1 kJ pulsed electrical system. This article discusses the experimental study of non-refractory (copper-nickel) and refractory (tungsten) explosive wires in pulsed electric discharge systems. The system energy is 1 kJ, the wire length is 4 cm, and its diameter is 200 μm . To study the behavior of the wires, the electrical parameters of current and voltage of electric discharge and shock waves have been investigated. In non-refractory wires, the current is periodic and has two peaks. In refractory wires, two current peaks are formed at a longer time interval. This shows that the energy level of 1 kJ was not enough to change the state and create plasma in this sample of wires. Finally, under the current test conditions and comparison of the experimental results, it can be seen that the non-refractory wires create a more substantial shock wave than the refractory samples. This pressure is 8.5 MPa in non-refractory wire (copper-nickel) and 6 MPa in refractory wire (tungsten). Also, we compared the electrical discharge current for three copper-nickel wires with diameters of 100, 200, and 300 micrometers and experimentally observed that the electrical discharge current is higher in the wire with a thicker diameter.

Keywords: Pulse plasma system, Shockwave, Wire explosion, Electrical discharge



۱. مقدمه

شده است. برای این مطالعه از پارامترهای ولتاژ و جریان و تصویر موج شوکی استفاده شده است [۱۰]. لیو و همکاران با مطالعه انواع چیدمان‌های سیم‌های انفجاری شکل موج شوکی منتشر شده را بررسی کردند و اثرات این موج بر روی اهداف را مطالعه کرده‌اند. همچنین آن‌ها اثرات مختلف ژنراتورهای تخلیه را بر روی سیم‌ها مطالعه کرده‌اند و نتایج موج شوکی حاصل را باهم مقایسه کرده‌اند [۱۱]. مقالات عنوان شده در بالا رفتار سیم را در سیال آب بررسی کرده‌اند که ما در این کار تجربی با توجه به کاربرد سامانه پلاسمای پالسی در صنعت نفت رفتار این سیم‌ها را در هوا و فشار اتمسفر بررسی کرده‌ایم. همچنین سیم‌های مورد نظر مقایسه سیم تنگستن و مس-نیکل در سامانه پلاسمای پالسی با انرژی تخلیه ۱ کیلوژول به صورت پالس‌های میکروثانیه است بوده است که در کارهای قبلی انجام نشده بود. به این ترتیب این مقاله می‌تواند مرجع خوبی در مطالعه و بهینه‌سازی سامانه‌های تخلیه الکتریکی پالسی و کاربرد آن در صنعت باشد. در نهایت موج شوکی این دو سیم را به دست آورده و باهم مقایسه کردیم. جریان تخلیه در سیم مس-نیکل را برای سه ضخامت ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر مطالعه کردیم.

۲. مبانی نظری مسئله

در سامانه پلاسمای پالسی فلزی، تنها منبع انرژی بانک خازنی است. توان ورودی کل به سامانه پلاسما برابر است با:

$$P_{total} = I_p V = I_p L_p \frac{dI_p}{dt} + I_p^2 (R_p + \frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt}) \quad (1)$$

با توجه به اینکه انرژی ذخیره شده در ستون پلاسما برابر با

$$\frac{1}{2} L_p I_p^2 \quad \text{است توان منتقل شده به پلاسما برابر است با:}$$

$$P_{total} = P_{total} - \frac{d}{dt} (\frac{1}{2} L_p I_p^2) = I_p^2 (R_p + \frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt}) \quad (2)$$

در این معادلات P_{total} ، L_p و R_p به ترتیب توان الکتریکی کل، خود القا و مقاومت پلاسما و جریان تخلیه است. جمله نخست نشان‌دهنده گرمایش ژولی است که پلاسما را مستقیماً گرم می‌کند و جمله دوم مؤثر در دینامیک سامانه می‌باشد. در واقع عبارت $\frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt}$ همانند مقاومت دینامیکی پلاسما در نظر گرفته می‌شود. بنابراین انرژی کل منتقل شده به پلاسما برابر است با [۱۲-۱۴].

$$E_{imp} = \int_0^t I_p^2 (R_p + \frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt}) dt \quad (3)$$

انفجار سیم‌های الکتریکی با تولید موج شوکی این موضوع را برای اهداف مختلف علمی و فناوری جذاب می‌کند. با توجه به توسعه روزافزون سامانه‌های تخلیه پالسی ولتاژ بالا در صنایع بزرگی همچون صنایع نظامی مانند لیزرهای پرتوان پالسی، صنایع بهبود فراوری نفت خام صنایع تولید انرژی مانند نیروگاه‌های گداحت هسته‌ای، امروزه تمرکز اغلب مراکز تحقیقاتی و توسعه علوم کاربردی در جهت طراحی و ساخت شارژرها و بانک‌های خازنی ولتاژ بالا/توان بالا با قابلیت عملکرد بسیار سریع و انفجاری و بهبود مشخصه‌های الکتریکی و فیزیکی آن‌ها منعطف شده است. یکی از این ادوات تخلیه پالسی ولتاژ بالا، مولدهای پلاسمای فلزی پالسی، هستند. مولدهای پلاسمای فلزی پالسی که با استفاده از منبع تغذیه پالسی ولتاژ بالا هدایت می‌شود یکی از نمونه‌های قابل توجه منابع پالسی هستند که در آن با عبور ولتاژ بالا در زمان میکروثانیه، باعث تولید ناحیه پلاسمایی داغ (۱-۲ eV) و چگال (10^{16} m^{-3}) در سیم و در فشار اتمسفری (۰/۱ MPa) می‌شود. استفاده از آرایه‌ای از سیم‌های نازک و عبور جریان حدود مگا آمپر در زمان کوتاه نانو ثانیه یکی از روش‌های دستیابی به پلاسمای چگال Z پینچ است. در این روش می‌توان از سیم‌های پوشیده شده از دوتریم برای تولید نوترون استفاده کرد که نسبت به دیگر روش‌ها ساده‌تر است [۱-۴]. پدیده انفجار سیم که ناشی از تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا در زمان کوتاه در سیم است، همراه با تغییر حالت سیم از جامد تا پلاسمای غیرایده‌آل و ایجاد موج شوکی و نور تابشی است. زمان هر کدام از این تغییر حالت‌ها، به مشخصات دستگاه و میزان انرژی تزریق شده به سامانه بستگی دارد. انفجار سیم با آزاد شدن انرژی در سیم نازک اتفاق می‌افتد. برای چندین میکروثانیه پلاسما تشکیل می‌شود و تا زمانی ادامه دارد که امپدانس پلاسما باعث قطع جریان شود. بخش مهمی از تحقیقات اخیر به کاربردهای سیم‌های انفجاری و مطالعه و تحقیق بر روی آن‌ها، تعلق گرفته است [۵-۸]. از آنجایی که کاربرد سیم‌های انفجاری بسیار وسیع است محققان زیادی در خارج از کشور به این حوزه پرداخته‌اند. دیسلوا و همکارانش بر روی پلاسمای‌های فلزی مس و آلومینیم مطالعه کرده‌اند. آن‌ها سیم‌ها را در محفظه آب منفجر کرده‌اند و دما و چگالی پلاسمای تولید شده از این فلزات را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [۹]. بارباگلیا و همکاران بر روی انفجار سیم مسی در هوا در ولتاژهای بالا مطالعه کرده‌اند. در این مقاله رفتار الکتریکی سیم انفجاری مس در انرژی‌های کمتر از ۷۰۰ ژول با هم مقایسه



۳. چیدمان آزمایش

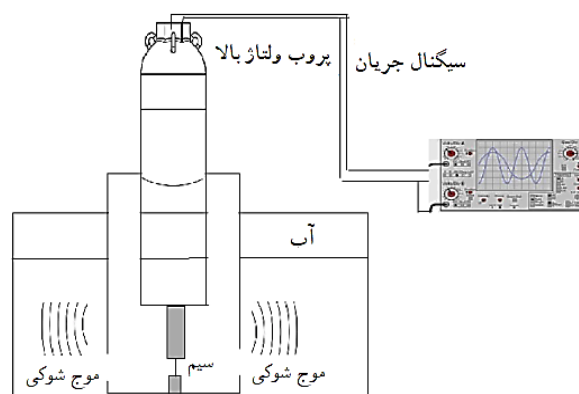
در طراحی منبع پلاسمایی که در مد تخلیه تکراری کار می‌کند، باید به مشخصات اجزای دستگاه، پارامترهای عملیاتی تخلیه و معادلات الکتروپلاسمیک حاکم بر پلاسمایک توجه شود تا بتوان موج‌های شوکی قوی متوالی را به دست آورد. سامانه‌های پلاسمای پالسی فلزی ولتاژ بالا از چهار بخش اصلی زیر تشکیل می‌شوند.

- منبع تغذیه ولتاژ بالای DC
 - بانک خازنی خود القای پایین
 - سوئیچ/رله‌ی راه‌انداز
 - واحد کنترل فرایندهای شارژ/راه‌انداز
- در جدول ۱ مشخصات فنی دستگاه پلاسمای پالسی آورده شده است.

در شکل ۱ طرح و اجزای تشکیل‌دهنده سامانه پلاسمای پالسی نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی دستگاه پلاسمای پالسی

پارامترها	مقادیر
ولتاژ ورودی	۲۱۰ تا ۲۳۰ ولت
فرکانس ولتاژ ورودی	۴۸ تا ۵۵ هرتز
بیشینه انرژی شارژ	۱ کیلوژول
زمان هر سیکل	۱۵-۲۰ ثانیه
عایق‌سازی	۵ کیلو ولت
تعداد ترانسفورمرها	۴ عدد با ولتاژ خروجی ۱۰۰۰ ولت
ظرفیت خازن	۳۶۰ میکروفاراد



شکل ۱. طرح و اجزای تشکیل‌دهنده سامانه پلاسمای پالسی [۱۵].

به‌طور کلی اساس فیزیکی عملیات پالس پلاسمای استفاده از پالس‌های متوالی با قدرت یکسان است که در بازه‌های زمانی برابر (دوره تناوب ثابت) اقدام به تخلیه‌ی جریان الکتریکی بسیار زیاد از یک هادی فلزی با قطر مشخص می‌نماید. با عبور این جریان بسیار زیاد از درون سیم، سیم فلزی به ناگهان گداخته و دچار انفجار می‌شود. زمان انفجار در این سامانه‌ها میکروثانیه است. انرژی این انفجار به صورت بخار فلزی با چگالی، دما و فشار بسیار بالا در فضای اطراف پخش می‌شود. جبهه موج تولید شده توسط انفجار، با سرعت فراصوت، به صورت شعاعی پخش شده و منجر به ایجاد اثرات فشرده‌گی و کششی الاستیک در محیط می‌شود. امواج هیدروپلاسمایی تولید شده که دارای دامنه بالایی هستند به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که با ایجاد نوسانات تشدید در سیال و جامد کارایی صنعتی بالایی دارند [۱۶، ۱۷]. چیدمان آزمایشگاهی سامانه تخلیه پالسی سیم انفجاری با تخلیه میکرو ثانیه و قابلیت تعویض جنس و ضخامت و طول سیم‌های مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. این مجموعه در پژوهشکده فیزیک و انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر وجود دارد. در شکل ۱ طرح چیدمان آزمایشگاهی سامانه تخلیه الکتریکی نشان داده شده است. سامانه‌های تشخیصی که در این چیدمان استفاده کردیم:

۱. کوپل روگوفسکی اندازه‌گیری جریان،
 ۲. پروپ ولتاژ بالا اندازه‌گیری ولتاژ تخلیه خازن،
 ۳. حسگر فشار برای اندازه‌گیری فشار موج شوکی در سیال.
- حسگر فشار فرکانس بالا از مدل JC۹۰ با قابلیت اندازه‌گیری فشار در بازه‌ی ۱ تا ۶۰۰ بار می‌باشد. این پروپ آب‌بند است و قابلیت قرارگیری در سیال‌های خورنده را دارد.

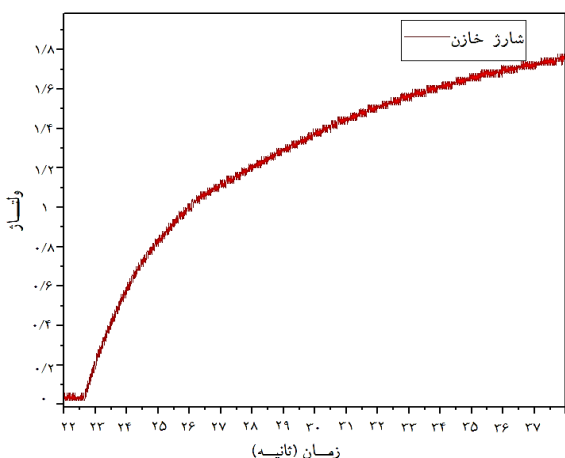
حداکثر ولتاژ شارژ ۲/۵ کیلو ولت، بیشینه جریان تخلیه ۱۲ کیلو آمپر. زمان تخلیه جریان ۲۵۰ میکروثانیه است. ظرفیت خازن ۳۶۰ میکروفاراد است. توان دستگاه حداکثر ۱۰۰۰ ژول است. اندوکتانس مدار ۱۴۰ نانو هانری است. وابستگی زمانی یکی از ویژگی‌های سامانه‌های انفجاری است که هر چه این تخلیه در زمان کوتاه‌تری رخ دهد موج شوکی قوی‌تری تولید می‌کند. در این حالت نسبت di/dt بیشتر خواهد بود. اسیلوسکوپ چهار کاناله تکترونیکس ۳۵۰ مگاهرتز مورد استفاده قرار گرفته است.

۴. الزامات فنی منبع پلاسمای پالسی

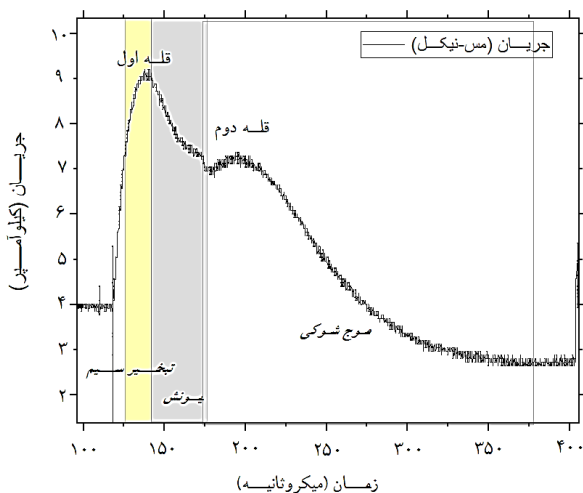
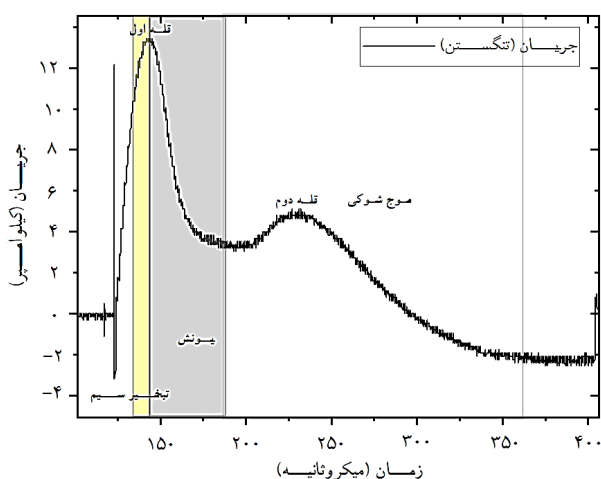
به‌طور کلی اساس فیزیکی عملیات پلاسمای پالسی استفاده از پالس‌های متوالی با قدرت یکسان است که در بازه‌های زمانی



تخلیه در آن‌ها متفاوت است. در این نمودارها انرژی رسوب کرده در این سیم‌ها آورده شده است. همچنین قدرت موج شوکی سیم‌ها را به دست آوردیم و از مقایسه آن‌ها متوجه شدیم که قدرت موج شوکی در همه آن‌ها یکسان نیست.



شکل ۲. شارژ بانک خازنی در ۱۵ ثانیه.



شکل ۳. مراحل تخلیه برای سیم‌های تنگستن و مس-نیکل.

برابر (دوره تناوب ثابت) اقدام به تخلیه‌ی جریان الکتریکی بسیار زیاد از یک هادی فلزی با قطر مشخص می‌نماید. انرژی این انفجار به صورت بخار فلزی با چگالی، دما و فشار بسیار بالا در فضای اطراف پخش می‌شود. در این مرحله سیم‌های نازک بین دو سر آند-کاتد قرار می‌دهیم که ولتاژ از بالای آن تزریق می‌شود. محفظه از جنس استیل و در فشار ۰/۱ مگا پاسکال است. این تست‌ها را برای سیم‌های فلزی با جنس تنگستن و مس - نیکل انجام دادیم. اگرچه فیزیک تخلیه شناخته شده است اما مطالعه و شناخت بیشتر پدیده‌های سیم انفجاری در علوم مختلف کاربردهای زیادی دارد. همان‌طور که در بخش طراحی بیان شد مبدل ولتاژ این دستگاه از چهار ترانسفورمر افزایش‌دهنده تشکیل می‌شود. در خروجی ترانسفورمرها از پل دیودی تمام موج استفاده می‌شود به گونه‌ای که در خروجی هر ترانس، یک ولتاژ dc بدون ریبیل با دامنه‌ی ۶۵۰ ولت به دست می‌آید. تحت این شرایط، ولتاژ خروجی شارژر می‌تواند تا ۲۵۰۰ ولت DC افزایش یابد. با استفاده از پروب ولتاژ بالا نمودار ولتاژ در زمان شارژ. خازن در شکل ۲ نشان داده شده است. خازن در زمان ۱۵ ثانیه تا ولتاژ ۲/۵ کیلو ولت شارژ شده است. تحت این شرایط، بانک خازنی مذکور دارای انرژی ۱۰۰۰ ژول خواهد بود.

۵. نتایج و بحث‌ها

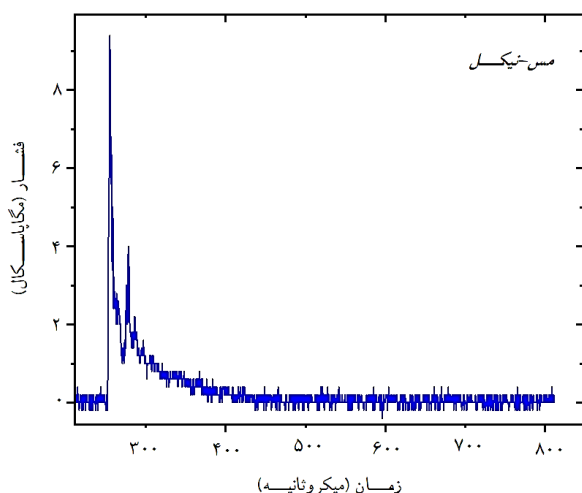
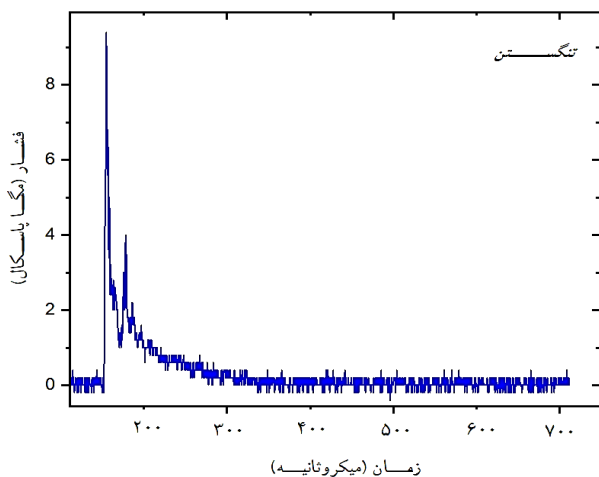
هدف از انجام این آزمایشات بررسی قدرت موج شوکی دستگاه تولید پلاسمای پالسی و بهینه‌سازی این سامانه جهت کاربردهای صنعتی است. از جمله الزامات قابل بررسی در این چیدمان انرژی سامانه و پارامترهای الکتریکی مدار است. یکی از پارامترهای قابل بررسی در مدار جنس و ضخامت و طول سیم‌های انفجاری است. این عوامل با تغییر در اندوکتانس مدار، زمان انفجار و قدرت موج شوکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این مجموعه از آزمون دو رویکرد مطالعه شده است. در بخش اول موج شوکی دو سیم زودگذاز (مس-نیکل) و دیرگذاز (تنگستن) با طول ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۲۰۰ میکرومتر برای انرژی ۱ کیلو ژول مطالعه شده است. در بخش بعدی اثر ضخامت مطالعه شده است و موج شوکی سیم (مس-نیکل) با ضخامت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر طول ۴ سانتی‌متر باهم مقایسه شده‌اند. نمودار جریان برحسب زمان برای این سیم‌ها در شکل ۳ آورده شده است. طبق این نمودارها در بخش اول تبخیر سیم و دوره بعد یونش و تشکیل پلازما و تولید موج شوکی اتفاق می‌افتد. چیزی که روشن است با توجه به جنس‌های مختلف سیم، و میزان مقاومت آن‌ها، اندازه جریان



مقدار انرژی بیشتری را صرف تغییر حالت خود می‌کنند و در نهایت میزان انرژی کمتری، تبدیل موج شوکی می‌شوند و قدرت موج شوکی در آن‌ها کمتر است مانند تنگستن. از طرفی در فلزاتی که زودگداز هستند با میزان انرژی کمتری تغییر حالت می‌دهند و انرژی بیشتری تبدیل به موج شوکی می‌شود. مانند مس-نیکل. همان‌طور که در جدول ۲ هم آمده است فشار اندازه‌گیری شده در سیم مس-نیکل بیشتر از تنگستن است. در شکل ۴ نمودارهای فشار-زمان برای دو فلز تنگستن و مس-نیکل نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات تخلیه الکتریکی در سیم‌های گوناگون

سیم	جریان kA	نشست انرژی (ژول)	فشار MPa	انرژی موج شوکی (ژول)
تنگستن	۱۲٫۲۵	۳۵۰	۶٫۳	۲۱۲
مس-نیکل	۹٫۱۸	۳۴۰	۸	۳۴۲



شکل ۴. نمودارهای فشار-زمان برای دو فلز تنگستن و مس-نیکل.

در سیم مس-نیکل این تغییر حالت خیلی سریع اتفاق می‌افتد که این مسئله کمک می‌کند اتلاف در انفجار سیم خیلی کم شود و بیشتر انرژی آزاد شده تبدیل به موج شوکی شود. برای بهینه شدن شرایط تخلیه بهتر است، قله دوم خیلی به قله اول نزدیک باشد. این به این معنی است که همه انرژی بعد از ذوب سیم بلافاصله برای یونش سیم استفاده می‌شود و اتلاف کمتر می‌شود. از طرفی بلندتر بودن قله دوم به این معنی است که پلاسمای کامل‌تری تشکیل شده است و جریان بیشتری نسبت به حالت جامد و ذوب شده دارد. وقتی سیم تبخیر می‌شود، مقاومت آن به طور ناگهانی بالا می‌رود و جریان افت می‌کند در این حالت اگر یونش اتفاق بیفتد، پلازما تشکیل می‌شود و جریان به یک‌باره بالا می‌رود. زمان تشکیل پلازما در سیم‌های مختلف متفاوت است و هر چه این زمان کوتاه‌تر باشد و به قله اولی نزدیک‌تر باشد حالت بهینه است در این حالت قدرت موج شوکی هم بالاتر است. شدت هر موج شوکی بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$E_{shock} = 4\pi l^2 \int_0^{t_p} \frac{p(t)^2}{\rho_0 c_0} dt \quad (4)$$

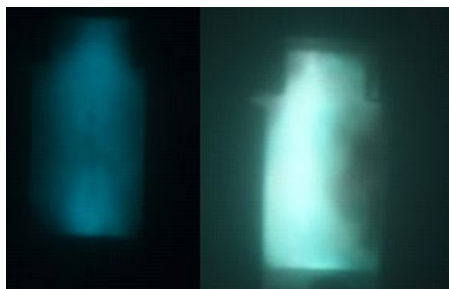
در رابطه بالا $p(t)$ فشار برحسب زمان است. ρ_0 چگالی محیط است و c_0 سرعت موج شوکی در محیط است. l فاصله پروب فشار از نقطه انفجار است. همچنین انرژی انباشت شده در سامانه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \int I \times V dt \quad (5)$$

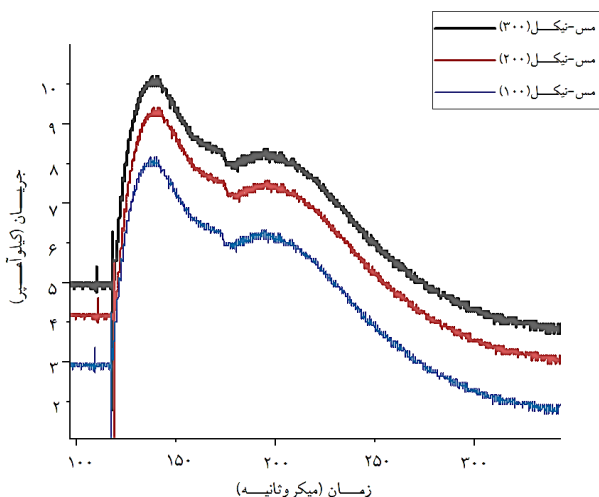
در رابطه ۵، I جریان تخلیه و V ولتاژ تخلیه است. در جدول ۲ مشخصات مربوط به جریان و زمان تشکیل قله‌های جریان و همچنین انرژی آزاد شده برای تولید موج شوکی محاسبه شده است. منظور از قله اول زمان تبخیر سیم و منظور از قله دوم زمان تشکیل پلاسمای سیم است. اگر تغییر حالت در سیم‌ها خیلی سریع اتفاق بیفتد میزان هدر رفتگی انرژی کمتر است و قدرت موج شوکی بالاتر است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است با شرایط تخلیه تعریف شده در بالا سیم مس-نیکل سریعتر تغییر فاز می‌دهد و در نهایت موج شوکی قوی‌تری تولید می‌کند. با استفاده از روابط ۴ و ۵ و فشار اندازه‌گیری شده مقادیر مربوط به نشست انرژی در مدار و موج شوکی در جدول ۲ آمده است [۱۱-۱۵].

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده است، فلزاتی که دیرگداز هستند و به عبارتی گرمای بیشتری برای ذوب شدن نیاز دارند





شکل ۵. تصویر تابش گسیلی از انفجار سیم مس- نیکل و تنگستن با استفاده از دوربین دیجیتال و فیلتر پولاروید.



شکل ۶. نمودار جریان- زمان برای سه سیم مس- نیکل با قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر.

انرژی انباشت شده در مدار، یک متغیر غیرمستقل است که به پارامترهای الکتریکی مدار و قطر سیم وابسته است و تعیین کننده اصلی بزرگی موج شوکی است. انباشت انرژی در سیم های نازک نسبت به سیم های ضخیم تر کار سخت تری است در انرژی های یکسان، سیم های نازک چون مقاومت بالاتری دارند برای ایجاد جریان مشابه انرژی ذخیره بیشتری نیاز دارند و به همین ترتیب موج شوکی بزرگتری تولید می کنند.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله بررسی سیم های انفجاری مس- نیکل و تنگستن برای سامانه پلاسمای پالسی با انرژی ۱ کیلوژول انجام شده است. طول سیم ها ۴ سانتی متر و قطر آن ها ۲۰۰ میکرومتر است. قدرت موج شوکی و انرژی آن و موج تخلیه الکتریکی در آن ها نشان داده شده است. همان طور که در محاسبات و نتایج تجربی دیده می شود قدرت موج شوکی در سیم مسی از سیم تنگستنی بیشتر است. در سیم تنگستن مقدار زیادی انرژی قبل از یونش دریافت می کند. اما بخش زیادی از انرژی در آن صرف

قدرت موج شوکی مس- نیکل از تنگستن بیشتر است. در این سیم یک دو قله فشار دیده می شود که هر کدام فشار موج شوکی مربوط به تغییر حالت سیم است.

انفجار دو سیم (مس- نیکل و تنگستن) با استفاده از دوربین عکس برداری Canon EOS ۹۰D و فیلتر پولاروید ثبت گردیده است. در این روش به دلیل شدت نور بالای گسیلی ناشی از سیم انفجاری با تنظیم فیلتر پولاروید شدت نور کنترل می گردد. همچنین از تکنیک دریچه باز برای ثبت تصویر پلاسمای ناشی از انفجار سیم استفاده شده است. در این روش دریچه دید دوربین در هنگام انفجار سیم کاملاً باز بوده و نور ناشی از تمام مراحل انفجار در یک فریم ذخیره می گردد. پدیده انفجار سیم در زمانی حدود ۲۰۰ میکروثانیه اتفاق می افتد. در شکل ۵، لحظه تشکیل پلاسمای سیم مس- نیکل و تنگستن در محفظه نشان داده شده است.

از مقایسه دو شکل بالا متوجه می شویم که در فلزات دیرگداز که انرژی بیشتری برای تغییر حالت سیم مورد نیاز است (تنگستن) پلاسمای پرنورتری تشکیل می شود و موج شوکی ضعیف تری می دهد و در فلزات زود گداز (مس- نیکل) این تابش اپتیکی ضعیف تر است و موج شوکی قوی تر می دهد. این روش هم می تواند برای مقایسه فشار موج شوکی در دو سیم مؤثر باشد [۱، ۲].

فرایند انفجار وابسته به جنس سیم است. این جنس تأثیر مستقیم در نمودار جریان و تشکیل پلاسمای و تولید موج شوکی دارد. انفجار از نقطه کاهش شدید جریان شروع می شود. سیم مس- نیکل زودتر از سیم تنگستن منفجر می شود. میزان انرژی مورد نیاز برای انفجار سیم وابسته به رسانش سیم و ویژگی های ترمودینامیکی سیم است. سیم تنگستن نقطه ذوب بالا دارد و انرژی مورد نیاز برای یونش آن بالاتر از سیم مسی است. به همین دلیل برای تغییر حالت از جامد به فاز مایع و تغییر حالت به گاز و یونش به زمان بیشتر و انرژی بالاتری نیاز دارد. همین توقف در جریان الکتریکی موجب کاهش قدرت موج شوکی می شود. در شکل ۶ نمودار جریان برای سه سیم مس- نیکل با قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر آورده شده است. هرچه سیم نازک تر باشد مقاومت سیم بیشتر می شود و جریان گذرنده از مقطع سیم کمتر می شود. زمان رسیدن به قله جریان نیز دیرتر اتفاق می افتد.



5. Krasik Y.E, Fedotov A, Sheftman D, Efimov S, Sayapin A, Gurovich V.T, Oreshkin V.I. Underwater electrical wire explosion. *Plasma Sources Science and Technology*. 2010;19(3):034020.
6. Dennen R.S, Wilson L.N. Exploding Wires, Edited by WG Chace and HK Moore. 1962.
7. Karioris F.G, Fish B.R, Royster G.W. Aerosols from exploding wires. In *Exploding Wires*. Springer, Boston, MA. 1962;299-311.
8. Lakhani E. Design of exploding wire system. *University of California, San Diego*. 2018.
9. DeSilva A.W, Katsouros J.D. Electrical conductivity of dense copper and aluminum plasmas. *Physical Review E*. 1998;57(5):5945.
10. Barbaglia M.O, Rodriguez Prieto G. Electrical behavior of exploding copper wire in ambient air. *Physics of Plasmas*. 2018;25(7):072108.
11. Liu B, Wang D, Guo Y. Influence of water conductivity on shock waves generated by underwater electrical wire explosion. *Physics Letters A*. 2018;382(1):49-54.
12. Jafari H, Habibi M. High-voltage charging power supply based on an LCC-type resonant converter operating at continuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;35(5):5461-5478.
13. Jafari H, Habibi M, Eta'ati G.R. Design and construction of a very low energy plasma focus, operating at repetitive discharge mode and pinching evidences. *Physics Letters A*. 2017;381(34):2813-2820.
14. Jafari H, Habibi M. Stability assessment and operating parameter optimization on experimental results in very small plasma focus, using sensitivity analysis. *Physics Letters A*. 2018;382(15):1031-1039.
15. Nasaji M.A, Amrollahi R, Habibi M. Experimental and numerical investigation on electrical wire explosion in pulse plasma systems. *Physica Scripta*. 2023;98(2):025611.
16. Han R, Wu J, Qiu A, Zhou H, Wang Y, Yan J, Ding W. A platform for exploding wires in different media. *Review of Scientific Instruments*. 2017;88(10):103504.
17. Yu Qing, Hui Zhang, Ruizhi Yang, Zhixiang Cai, Kerou Liu. Experimental and numerical study on the effect of electrohydraulic shock wave on concrete fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022:110685.

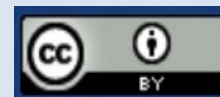
تغییر فاز سیم می‌شود و به صورت تابش اپتیکی هدر می‌رود و در نتیجه موج شوکی ضعیف‌تری تولید می‌کند. در سیم مس-نیکل دو برابر انرژی بیشتر صرف تبخیر سیم می‌شود و همین باعث تولید موج شوکی قوی‌تر می‌شود. زیرا در سیم مسی به دلیل رسانایی بالای سیم، جریان در زمان کوتاه‌تری باعث تغییر فاز سیم می‌شود و انرژی بیشتری در سیم ذخیره می‌شود و در زمان گاز یونیزه شده و پلاسما تشکیل می‌شود. موج شوکی که از پلاسما به وجود می‌آید هم قوی‌تر تشکیل می‌شود که نتیجه این محاسبات را در نتایج تجربی و عدد مربوط به فشار موج شوکی نیز می‌بینیم. در سیم تنگستن فشار ۶/۳ مگا پاسکال و در سیم مسی ۸ مگا پاسکال است. سطح زیر نمودار تابشی در سیم‌های زودگداز کمتر از سیم‌های دیرگداز است زیرا سیم‌های زودگداز با توجه به نقطه ذوب پایینی که دارند سریع‌تر تغییر حالت می‌دهند و انرژی تابشی کمتری ایجاد می‌کنند. اما در سیم‌های دیرگداز این تغییر حالت با مکث زمانی ایجاد شده باعث دریافت انرژی تابشی بالاتر و موج شوکی کمتر می‌شود. نتایج ارایه شده در جدول ۲ برای انرژی موج شوکی و نتایج فشار با داده‌های تجربی مراجع ۱ و ۲ در توافق کامل است.

مراجع

1. Han R, Wu J, Qiu A, Ding W, Zhang Y. Electrical explosions of Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo, Ag, Ta, W, W-Re, Pt, and Au wires in water: A comparison study. *Journal of Applied Physics*. 2018;124(4):043302.
2. Han R, Wu J, Zhou H, Zhang Y, Qiu A, Yan J, Ouyang J. Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation. *Matter and Radiation at Extremes*. 2020;5(4):047201.
3. Lee Y.S, Bora B, Yap S.L, Wong C.S. Effect of ambient air pressure on synthesis of copper and copper oxide nanoparticles by wire explosion process. *Current Applied Physics*. 2012;12(1):199-203.
4. Lebedev S.V, Mitchell I.H, Aliaga-Rossel R, Bland S.N, Chittenden J.P, Dangor A.E, Haines M.G. Azimuthal structure and global instability in the implosion phase of wire array Z-pinch experiments. *Physical Review Letters*. 1998;81(19):4152.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

اکبری نساجی، مریم، امرالهی، رضا، حبیبی، مرتضی. (۱۴۰۳)، مطالعه تجربی رفتار سیم‌های زودگداز و دیرگداز در سامانه تخلیه الکتریکی پالسی ۱ کیلوژول. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۱۷۴-۱۸۰. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1600> URL: https://jonsat.nstri.ir/article_1600.html

