

Research Paper

Investigating the Electric Power Performance of the Shock Wave Device and Explosion of Aluminum Wire in a Water Environment¹

Mohammad Saleh Goodarzi², Vahid Ghafouri^{*3}, Farhad Asadian⁴, Hamid Karimi⁵, Mohammad Reza Rahimi⁶ and Nader Mazinani⁷

Received: 2023.10.18

Revised: 2023.12.20

Accepted: 2024.01.13

Abstract

The shock wave or plasma pulse method was presented for the first time in oil wells to solve the problem of worldwide pressure drop and well production. In this study, the technology of underwater electric wire explosion (UWEWE) has been investigated to generate shock waves by using a sudden discharge of very hot plasma energy at a point and then creating a shock wave. The constructed plasma emitting device consists of two electrodes, a set of high voltage capacitors with a voltage of 5 kV and a capacity of 80 microfarads, an electronic block, a Rogovsky coil installed in the electric discharge circuit, and a relay block. For aluminum wire with a diameter of 400 and 500 μm and a length of 30 mm, with a pulsed current at a discharged voltage of 3.8 kV, the total energy deposition is 400 and 500 J, with the energy conversion efficiency of 68 and 66.3%, respectively, and a maximum power of 168 MW.

Keywords: *Shock Wave, Plasma Pulse, Electric Wire Explosion, and Plasma Energy.*

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.44687.1358>

² PhD Graduated, Research Institute of Applied Sciences, Academic Center of Education, Culture and Research (ACECR), and Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. Email: msg.goodarzi@gmail.com

³ Assistant Professor, Research Institute of Applied Sciences, Academic Center of Education, Culture and Research (ACECR), Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: vahid.ghafouri5@gmail.com

⁴ Instructor, Research Institute of Applied Sciences, Academic Center of Education, Culture and Research (ACECR), Tehran, Iran. Email: farhad.asadian@gmail.com

⁵ PhD Student, Research Institute of Applied Sciences (ACECR) and K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: hamid.karimiamadabadi@email.kntu.ac.ir

⁶ M. Sc. Graduated, Research Institute of Applied Sciences and Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: mr_rahimi@shirazu.ac.ir

⁷ M. Sc. Graduated, Research Institute of Applied Sciences and Islamic Azad University of Kashan, Kashan, Iran. Email: nadermazinani@yahoo.com

<https://jap.alzahra.ac.ir>



بررسی عملکرد توان الکتریکی دستگاه موج شوک و انفجار

سیم آلومینیومی در یک محیط آبی^۱

محمد صالح گودرزی^۲، وحید غفوری^{۳*}، فرهاد اسدیان^۴، حمید کریمی^۵،

محمد رضا رحیمی^۶ و نادر مزینانی^۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۷، تابستان ۱۴۰۳

صص ۵۲ - ۷۴

چکیده:

روش موج شوک یا پالس پلاسما برای نخستین بار در چاه‌های نفت برای حل مشکل افت فشار و تولید چاه در جهان ارائه شد. در این مطالعه فناوری انفجار سیم الکتریکی زیر آب برای تولید امواج شوک با استفاده از تخلیه ناگهانی انرژی پلاسما بسیار داغ در یک نقطه و سپس ایجاد موج ضربه‌ای، بررسی شده است. دستگاه ساطع کننده پلاسما ساخته شده شامل دو الکترود، یک مجموعه خازن فشار قوی با ولتاژ ۵ کیلوولت و ظرفیت ۸۰ میکروفاراد، یک بلوک الکترونیکی، یک سیم پیچ روگوفسکی نصب شده در مدار تخلیه الکتریکی و یک بلوک رله است. برای سیم آلومینیوم به ترتیب با قطر ۴۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی‌متر با جریان پالسی در ولتاژ تخلیه شده ۳۸ کیلوولت، کل رسوب انرژی به ترتیب ۴۰۰ J و ۵۰۰ J و با بازده تبدیل انرژی به ترتیب در حدود ۶۸٪ و ۶۶٪ و بیشینه توان حدود ۱۶۸ MW بدست آمده است.

واژگان کلیدی: موج شوک، پالس پلاسما، انفجار سیم الکتریکی و انرژی پلاسما.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.44687.1358>

^۲ دانش آموخته دکترا، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی / دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. Email: msg.goodarzi@gmail.com

^۳ استادیار، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) Email: vahid.ghafouri5@gmail.com

^۴ مربی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، تهران، ایران. Email: farhad.asadian@gmail.com

^۵ دانشجوی دکترا، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی و دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. Email: hamid.karimiahmadabadi@email.kntu.ac.ir

^۶ دانش آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی و دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. Email: mr_rahimi@shirazu.ac.ir

^۷ دانش آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی و دانشگاه آزاد کاشان، کاشان، ایران. Email: nadermazinani@yahoo.com



۱. مقدمه

چاه‌های آب پس از حفر، تجهیز و بهره برداری، ظرفیت آب اولیه خود را برای مدتی حفظ می‌کنند. دلایل مختلفی سبب کاهش آب چاه به مرور زمان می‌شوند. برخی از این دلایل عبارتند از: کاهش سطح آب در سفره زیرزمینی، رسوب مواد محلول در آب در قسمت فیلتر شنی (پک شن^۱) و مسدود شدن شبکه‌های دیواره لوله، رشد باکتری‌ها و در نهایت انسداد بیولوژیکی، سنباده زدن و سایش تجهیزات چاه [۱].

کاهش جریان آب می‌تواند به دلیل رسوب و تجمع مواد آلی و معدنی بر روی دیواره لوله، صفحات و فضای بین عناصر تشکیل‌دهنده لایه آبخوان در اطراف چاه، تحت شرایط مناسب و سایر فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی در آبخوان مانند افت فشار و دما که سبب مسدود شدن منافذ می‌شود، باشد و موجب کاهش نفوذپذیری در همسایگی دیواره چاه می‌شود.

روش‌های بازیافت دینامیکی یا مکانیکی شامل پالس امواج فراصوتی (اولتراسونیک)، پالس نیتروژن، طناب انفجاری و همچنین فناوری پالس پلاسما است [۲ و ۳]. عملیات برس زدن تنها ۵ تا ۱۰ درصد در بهبود راندمان چاه موثر است، چرا که بیشتر مشکل گرفتگی چاه در پشت دیواره لوله و بین فیلتر شنی است. برس زدن با تمیز کردن داخل دیواره شرایط را برای استفاده از روش‌های دیگر فراهم می‌کند.

امواج شنیداری در محدوده فرکانسی بالاتر از محدوده شنوایی انسان (بیش از ۲۰ کیلوهرتز) فراصوت نامیده می‌شوند. قدرت امواج فراتر از محدوده شنیداری حدود ۵۱۰ وات بر سانتی‌متر مربع است. موج فراصوت توسط یک نوسانگر الکترومغناطیسی پیزوالکتریک از نوع بلوری تولید می‌شود، زمانی که ذرات بلور در معرض جریان متناوب قرار می‌گیرند، شروع به ارتعاش می‌کنند. سرعت ارتعاش آن‌ها به فرکانس جریان اعمال شده بستگی دارد [۲].

نکته مهم در استفاده از امواج فراصوت در بازیابی چاه‌ها که معمولاً به آن توجه نمی‌شود، تأثیر فشار بر بازده موج فراصوت است. آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش فشار (افزایش عمق) اثر امواج افزایش می‌یابد و در فشار کمتر از ۲ بار (عمق کمتر از ۲۰ متر) این روش کمابیش بی‌اثر است. کمترین اثر قابل قبول در عمق بیش از ۵۰ متر بدست می‌آید.

روش‌های مرسوم شکست هیدرولیکی، اسیدی کردن و کاربردهای شیمیایی کمک قابل توجهی به بهبود ازدیاد برداشت چاه کرده‌اند، اما این روش‌ها برای برخی سازندها مناسب نیستند. از ۱۰۰ سال

¹ Gravel Pack

پیش، فناوری مواد منفجره، به عنوان یک رویکرد شکستگی کمکی، برای حل این مشکلات وارد صنعت نفت شده است.

روش موج شوک یا پالس پلاسما برای اولین بار در چاه‌های نفت برای حل مشکل افت فشار و تولید در جهان ارائه شد. مشکل رسوبات در دهانه‌های دیواره چاه و پک سنگریزه در چاه‌های نفت کمابیش مانند چاه‌های آب است. تنها نوع رسوبات و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن متفاوت است. در روش پالس پلاسما، با استفاده از تخلیه ناگهانی، انرژی پلاسما بسیار داغ در یک نقطه متمرکز شده و سپس با ایجاد موج ضربه‌ای (SW)^۱، تغییرات فشار موج سبب ضربه و انرژی به دیواره چاه می‌شود و رسوبات از آن جدا می‌شوند. با توجه به اینکه در این روش میزان انرژی و نقطه مورد نظر برای عملیات را می‌توان هدایت کرد، این روش در مقایسه با روش‌هایی چون طناب انفجاری و هیدروپالس دارای بازده و ایمنی بالاتری می‌باشد. از مزایای روش پالس پلاسما نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به مقرون به صرفه بودن آن به دلیل نداشتن مواد مصرفی و تجهیزات بزرگ و گسترده (چون روش اسیدشویی و تزریق گاز نیتروژن) و نیاز به نیروی انسانی کمتر اشاره کرد.

سرعت ضربه ایجاد شده در این روش حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه است. این شوک افزون بر ضربه و قدرت زیاد در فاصله نزدیک به دیواره، طیف وسیعی از فرکانس‌های مختلف از جمله فرکانس‌های طبیعی سامانه (چاه) را تحریک می‌کند. به بیانی دیگر، افزون بر حالت‌های مختلف سامانه، حالت‌های طبیعی آن نیز تحریک شده و تا حدودی پدیده تشدید رخ می‌دهد و ارتعاشات با دامنه بیشتر، جداسازی رسوبات را سرعت می‌بخشد. در این روش می‌توان شدت پالس‌ها، عرض زمانی و توالی (فرکانس اعمال پالس) را با توجه به شرایط چاه تنظیم کرد. از مزایای بارز این روش آن است که از نظر زیست محیطی بی‌ضرر است و هیچ گونه خطرات زیست محیطی، زباله‌های اضافی، مواد شیمیایی و گازهای انفجاری را منتشر نمی‌کند.

در دهه ۱۹۸۰، یک ابزار تخلیه الکتریکی برای جایگزینی مواد منفجره برای تحریک سازندهای نفت طراحی شد. این ابزار مبتنی بر اثر هیدروالکتریک است و امواج ضربه‌ای را با تخلیه الکتریکی در آب تولید می‌کند. این ابزار روشی مناسب، پایدار و قابل هدایت برای تولید SW در مقایسه با روش انفجاری است. این SWها در لایه‌های دوره‌ای از راه تحریک سوراخ‌ها روی سنگ و سیال اعمال می‌شوند و از عوامل شیمیایی یا بیولوژیکی مضر برای محیط جلوگیری می‌کنند.

¹ Shock Wave (SW)



با این حال، این فناوری نیز دارای معایب ذاتی است. جدی‌ترین مشکل، بازده انرژی کم چنین تخلیه‌ای است، انرژی SWها تنها می‌تواند به کمتر از ۸ درصد انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن‌ها برسد [۴]. برای ایجاد یک SW قوی، حجم واحد ذخیره انرژی بسیار بزرگی لازم است که استفاده از این ابزار را محدود می‌کند.

انفجار الکتریکی سیم^۱ (EWE) به تدریج در حال تبدیل شدن به یک فناوری فیزیکی و سازگار با محیط زیست به منظور افزایش برداشت نفت^۲ (EOR) در صنعت نفت است [۵]. دامنه فشار بدست آمده از این روش در فاصله معینی از هسته سیم به وجود می‌آید. فاصله‌ها به قطر لوله پوشش بستگی دارد. در مورد این SWها مطالعاتی انجام شده است. گریگوروف مداری تخلیه القایی را که بر SWها تأثیر می‌گذارد، مورد بحث قرار داده است [۶]. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار قلّه با افزایش اندوکتانس کاهش می‌یابد. بیشینه فشار تولید شده توسط انفجارهای الکتریکی زیر آب با سیم Al و Cu در مرز DC بر حسب کمیت‌های مختلف توسط گرینوکو و همکارانش مورد بحث قرار گرفت [۷].

با این حال، همبستگی خوبی با انرژی ذخیره شده در واحد طول وجود داشت. انتشار SWها در آب نیز آزمایش شده است، که به صورت نمایی از موقعیت فاصله انتشار کاهش می‌یابد [۸]. به منظور تولید امواج ضربه‌ای همگرای قوی، انفجار الکتریکی یک سیم منفرد با آرایه سیمی با ساختارهای مختلف، از جمله سیم‌های زیگزاگ [۸]، سیم‌های حلقه‌ای شکل [۹]، آرایه‌های سیمی مسطح [۱۰]، آرایه‌های سیمی استوانه‌ای و آرایه‌های سیمی کروی [۱۱، ۱۲]، جایگزین می‌شوند. اما این آرایه‌های سیمی در داخل محفظه قابل استفاده نیستند.

۱.۱ چیدمان آزمایشی

در این کار از فناوری انفجار الکتریکی سیم زیر آب^۳ (UWEWE) برای تولید امواج شوک استفاده شده است. طرح‌واره چیدمان آزمایشی در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه تولید نوسان‌های پهن نوار غیرخطی، شامل یک واحد کنترل زمین، یک کابل حمل/ارسال توان ورودی به سامانه و منبع پلاسما است. در حالی که مورد دوم شامل جزئیات زیر است: یک ساطع کننده پلاسما با دو الکتروود، یک مجموعه خازن فشار قوی با ولتاژ ۵ کیلوولت و ظرفیت ۸۰ میکروفاراد،

¹ Electric Wire Explosion

² Enhanced Oil Recovery

³ Under Water Electric Wire Explosion



یک بلوک الکترونیکی، یک سیم پیچ روگوفسکی نصب شده در مدار تخلیه الکتریکی خازن‌ها، یک بلوک رله و دستگاهی برای رساندن هادی فلزی کالیبره شده در شکاف بین الکترودها است. دستگاه تحویل رسانای فلزی کالیبره شامل قرقره‌ای با رسانای فلزی کالیبره شده و پیوست‌های مکانیکی برای رساندن رسانا است.

اجزا شامل شارژر ترانسفورماتور، بلوک‌های الکترونیکی و رله، واحد خازن، کنتاکتور، اتصالات و ساطع کننده پلازما هستند که در محفظه‌های پلاستیکی جداگانه مقاوم در برابر ضربه یا فلز مقاوم در برابر ضربه قرار گرفته‌اند.

به منظور ارزیابی اثر پالس پلاسمایی محیط شبیه‌ساز دیواره چاه با رسوب سیمانی ایجاد شده روی دیواره بیرونی با ضخامت‌های مختلف (۴، ۸ و ۱۲ میلیمتر) ساخته شد و پالس‌هایی با انرژی‌های مختلف ایجاد و اثر آن روی رسوب سیمانی بررسی شد. اطلاعات مربوط به آزمایشات در جدول (۲) خلاصه شده است. در مورد ناحیه نخست با ضخامت ۴ میلی‌متر در سطح بیرونی لوله جدار چاه، پس از ۵ پالس با انرژی ۲۰۰ ژول، فروشکست لایه سیمان سیاه انجام گرفت و ترک‌ها و روزنه‌هایی در آن ایجاد شد. در شکل (۳)، ایجاد ترک‌های جزئی در مرحله اول در قسمت پایینی با لایه بتونی به ضخامت ۴ میلی‌متر و با اجرای تعداد ده پالس با انرژی پالس ۲۰۰ ژول قابل مشاهده است. در مورد ناحیه دوم پس از ده پالس با انرژی ۵۰۰ ژول، فروشکست لایه سیمان سفید انجام نشد و ترک‌ها و روزنه‌هایی جزئی در آن قابل مشاهده بود.

در شکل (۴) نمایش ایجاد ترک‌های جزئی در مرحله اول در قسمت میانی با لایه بتونی با ضخامت ۸ میلی‌متر با انرژی پالس ۵۰۰ ژول و با تعداد ده پالس قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش تعداد پالس‌ها به ۱۵ پالس لایه بیان شده از ناحیه‌ای که دارای شکاف بود ترک برداشت و نهایتاً فرو ریخت. در شکل (۵)، نمایی از این نتیجه در مرحله دوم در قسمت پایینی با لایه بتونی از جنس سیمان سیاه به ضخامت ۴ میلی‌متر با انرژی پالس ۵۰۰ ژول و با تعداد ۱۵ پالس نمایش داده شده است.

با توجه به استحکام بیشتر بخش‌های بالایی نسبت به بخش‌های پایینی لوله جدار، ابتدا ترک‌های ریز در قسمت پایین لوله با آزاد سازی انرژی پایین مشاهده شد و با بالا بردن انرژی تا میزان بیشینه ۱۰۰۰ ژول، ترک‌ها در قسمت سیمانی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر مشاهده گردید. بعد از تکرار ۵ پالس در هر ناحیه، سیمان پوشش داده شده در لایه‌های ۴ و ۸ میلی‌متری از بدنه لوله و شکاف لوله فلزی جدا شد.



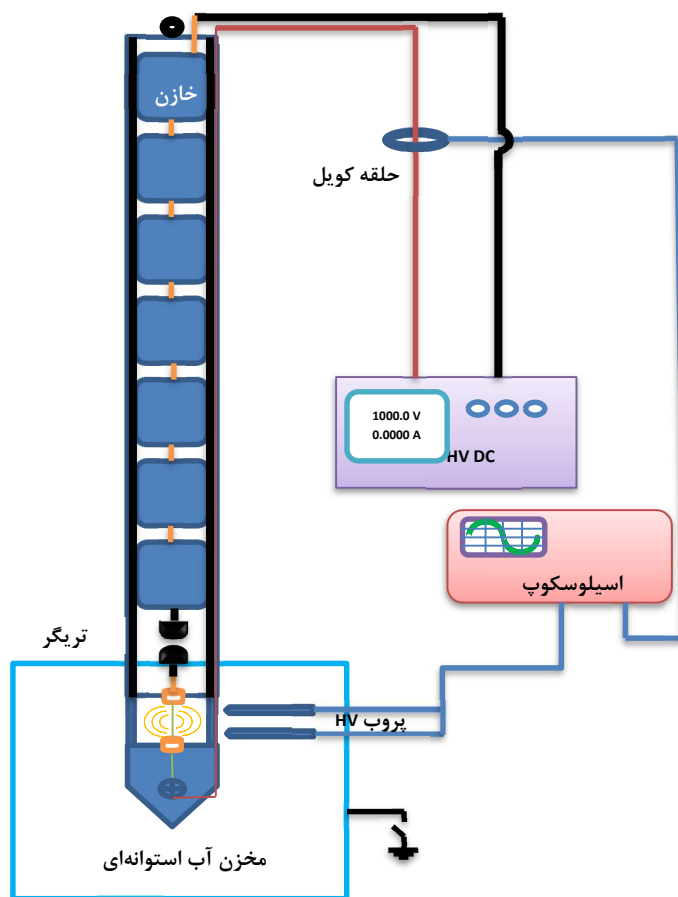
پس از اجرای آزمایش‌های تکمیلی با انرژی ۱۰۰۰ ژول با دوره پالس ۲۰ تا بی تمام قسمت سیمان سفید ناحیه دوم نیز کنده شد. در شکل (۵) تصویر فروریختن در مرحله دوم در قسمت میانی بالایه بتونی از جنس سیمان سفید نمایش داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فنی نقشه منبع پلاسما طراحی شده.

قدرت پالس	یک کیلوژول
ولتاژ شارژ خازن‌ها	تا ۵ کیلوولت
ولتاژ DC اولیه	۷۰ ولت
متوسط چرخه کار منبع پلاسما در چاه	۲۰ ثانیه
بیشینه تعداد پالس بدون بالا بردن منبع به سطح	۲۰۰۰ تکرار
طول منبع پلاسما	۲.۵ متر
قطر خارجی منبع پلاسما	۱۰ سانتی‌متر
وزن منبع پلاسما	۳۵ کیلوگرم

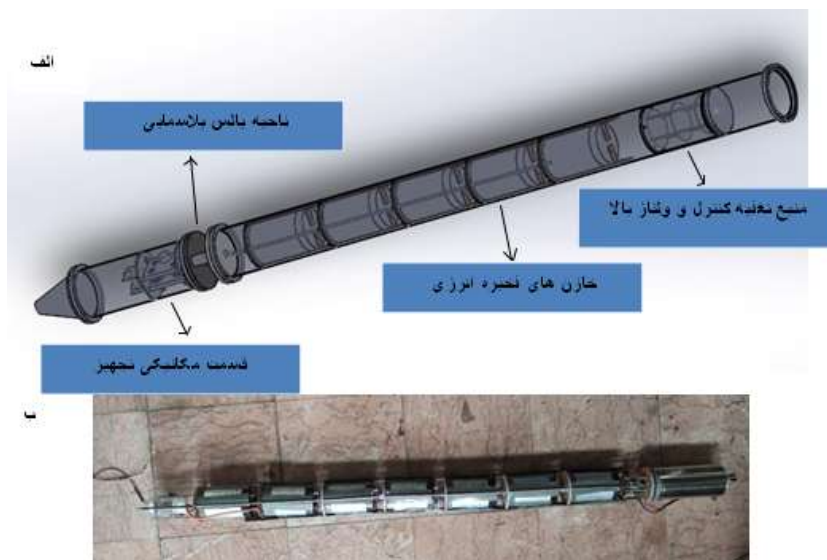
جدول ۲ داده‌های عملیاتی تست منبع پلاسما طراحی شده روی محیط شبیه‌سازی شده از چاه.

ضخامت رسوب (mm)	جنس رسوب	انرژی پالس (ژول)	تعداد پالس	نتیجه
۴	سیمان سیاه	۲۰۰	۵	تأثیر غیر مشهود
۴	سیمان سیاه	۲۰۰	۱۰	ایجاد ترک روی رسوب
۴	سیمان سیاه	۵۰۰	۱۵	شکست کامل
۸	سیمان سفید	۵۰۰	۱۰	ترک های جزئی
۸	سیمان سفید	۵۰۰	۱۵	ترک های عمیق تر
۸	سیمان سفید	۱۰۰۰	۲۰	شکست کامل
۱۲	سیمان سفید	۵۰۰	۱۵	ترک های جزئی
۱۲	سیمان سفید	۱۰۰۰	۲۰	ترک های مشهود



شکل ۱ طرحواره از چیدمان مولد موج شوک (SW) برای انفجار سیم الکتریکی زیر آب.





شکل ۲ (الف) شماتیک اجزای طراحی شده در روش پالس پلاسمایی (ب) مجموعه خازن‌ها و قطعات قرار گرفته در داخل تجهیز پالس پلاسمایی.



شکل ۳ ایجاد ترک‌های جزئی در مرحله اول در قسمت پایینی با لایه بتونی با ضخامت ۴ میلی‌متر با شدت پالس ۲۰۰ ژول و با تعداد ۵ پالس.



شکل ۴ ایجاد ترک‌های جزئی در مرحله اول در قسمت میانی با لایه بتونی به ضخامت ۸ میلی‌متر با شدت پالس ۵۰۰ ژول و با تعداد ۱۰ پالس.

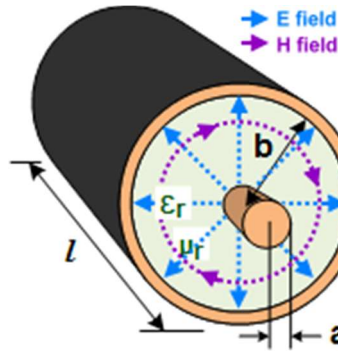


شکل ۵ فروریختن در مرحله دوم در قسمت میانی در لایه بتونی به ضخامت ۸ میلی‌متر با انرژی پالس ۱۰۰۰ ژول و با تکرار ۲۰ پالس.

۲.۱ محاسبات مقاومت خازن و سلف کابل هم محور

در ادامه کمیت‌های رسانایی در واحد طول (G) اندوکتانس خط در واحد طول (L) و ظرفیت خازنی در واحد طول (C) و مقاومت در واحد طول (R) یک کابل هم محور بدست می‌آید. خوشبختانه بیشتر ساختارهای خطوط انتقال با یک سامانه مختصات عمود بر هم هماهنگی دارند.





شکل ۶ کابل هم محور: با یک هادی داخلی به شعاع a و یک هادی بیرونی با شعاع داخلی b .

سطح مقطع یک کابل هم محور در شکل (۶) نشان داده شده است و دارای دو هادی هم مرکز است که هادی داخلی دارای شعاع a و هادی بیرونی با شعاع داخلی b است. میدان‌های بین هادی‌ها را می‌توان با بیان روابط میدان در مختصات استوانه‌ای حل کرد. ساده‌ترین توزیع میدان ممکن در شکل (۶) نشان داده شده است. اولین پارامتری که استخراج می‌شود ظرفیت خازنی (C) است. بخشی از خط به طول Δz را در نظر بگیرید، سپس با استفاده از قانون گاوس، میدان الکتریکی شعاعی عبارت است از:

$$\vec{E} = E_r(r)\hat{r} = \frac{\rho_l}{2\pi r\epsilon}\hat{r} \quad (1)$$

و \hat{r} بردار واحد در جهت شعاعی است. ولتاژ بین هادی‌ها عبارت است از:

$$V = \int_a^b E_r \cdot dr = \int_a^b \frac{\rho_l \hat{r}}{2\pi r\epsilon} \cdot dr = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2)$$

حال، ظرفیت یک بخش از خط است.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\rho_l \Delta z}{V} \quad (3)$$

و از این رو، ظرفیت در واحد طول خط (با واحدهای SI آن F/m) برابر است با:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (4)$$

استخراج عبارات L و R دارای اهمیت بیشتری است، چرا که جریانی در داخل هادی داخلی وجود خواهد داشت. سپس میدان مغناطیسی به ناحیه بین هادی‌ها محدود می‌شود. با استفاده از قانون مدار آمپر،

$$\oint \vec{H} \cdot dl = \oint H_\phi \hat{\phi} \cdot dl = I \quad (5)$$

که انتگرال مدار بسته روی دایره‌ای با شعاع ثابت گرفته می‌شود. با توجه به اینکه Hr تنها تابعی از r است، سپس برای $a < r < b$

$$2\pi r H_r(r) = I \quad \text{و} \quad B_r = \mu H_r = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (6)$$

این امکان را می‌دهد که اندوکتانس خط به عنوان کل شار مغناطیسی (سطح مقطع کابل هم محور بین شعاع a و b) در واحد جریان محاسبه شود. از این رو اندوکتانس خط در واحد طول برابر است با؛

$$L = \int_a^b \frac{\mu}{2\pi r} dr = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7)$$

که واحد SI آن H/m است. برای کابلی با $a=1 \text{ mm}$ و $b=25 \text{ mm}$ اندوکتانس برابر با 6.44 H/m است.

مقاومت خطوط با استفاده از مقاومت سطحی هادی ها، R_s محاسبه می‌شود. بنابراین مقاومت خط در واحد طول برابر است

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \quad (8)$$

که دارای واحدهای SI اهم بر متر است. امیدانس مشخصه بدون تلفات کابل هم محور عبارت است از:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (9)$$

اگر تمام کمیت‌های عبارت بر حسب واحد SI باشند، دارای واحد اهم ثانیه است. قانون آمپر برای سیم حامل جریان نامتناهی بر بزرگی میدان مغناطیسی برقرار است:

$$B = \frac{\mu_0 i r}{2\pi R^2} \quad (< R) r \quad \text{داخل سیم} \quad (10)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (\geq R) r \quad \text{خارج از سیم} \quad (11)$$

در حالی که، i جریان، B شدت میدان مغناطیسی در r ، μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد، R شعاع سیم، و r شعاع اندازه‌گیری میدان است. در داخل سیم، میدان باید روی محور به صفر برسد.

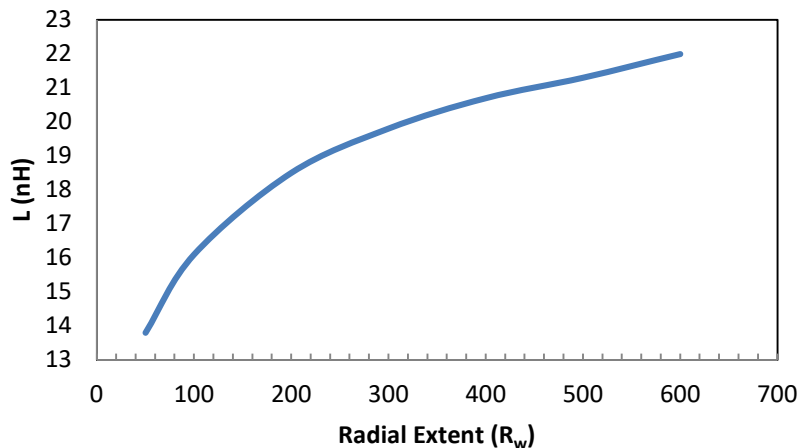
شکل (۷) اندوکتانس ولتاژ پایین و حالت پایدار را در $t = 2 \mu s$ به عنوان تابعی از گستره شعاعی در مضر شعاع سیم، R_w نشان می‌دهد. اندوکتانس ناشی از جریان در سیم، در حد dc (میدان کاملاً پراکنده) توسط ناپفل^۱ به صورت زیر داده شده است.

$$L_w = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l}{R_w}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (12)$$

¹ Knoepfel



که در آن، $l = 3$ سانتی‌متر طول و $R_w = 400 \mu m$ شعاع سیم است. با وارد کردن مقادیر l و R_w اندوکتانس ناشی از جریان در سیم برابر $L_w = 25.5 nH$ است.



شکل ۷ اندوکتانس بار به عنوان تابعی از گستره شعاعی برای شبیه‌سازی‌های ولتاژ پایین.

۳.۱ محاسبات ترانسفورماتور

در شکل (۸) طرحی از یک ترانسفورماتور نشان داده شده است.

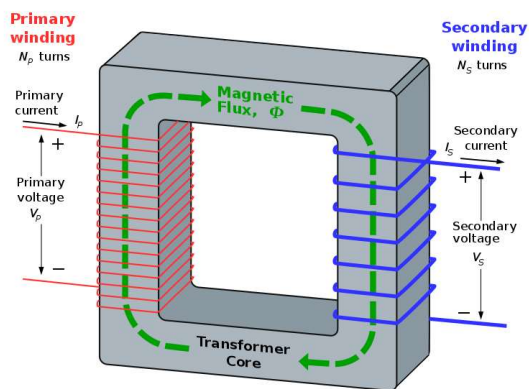
$$V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad (13)$$

$$V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (14)$$

که در آن، V ولتاژ لحظه‌ای است، N تعداد چرخش‌های یک سیم پیچ، $\frac{d\Phi}{dt}$ مشتق شار مغناطیسی Φ از راه یک دور سیم پیچ در مدت زمان (t) است، و زیرنویس‌های p و s نشان‌دهنده اولیه و ثانویه است.

$$\text{نسبت چرخش} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (15)$$

که در آن، برای ترانسفورماتور افزایشنده $a < 1$ و برای ترانسفورماتور کاهشنده $a > 1$ است.



شکل ۸ طرحی از یک ترانسفورماتور.

بر اساس قانون بقای انرژی، توان ظاهری، حقیقی و راکتیو هر کدام در ورودی و خروجی حفظ می شوند:

$$S = I_p V_p = I_s V_s \quad (16)$$

که در آن، S توان ظاهری و I جریان است. ترکیب رابطه های (۱۵) و (۱۶) با این یادداشت پایانی هویت ترانسفورماتور ایده آل را نتیجه می دهد:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} = a \quad (17)$$

درحالی که، L خود القایی سیم پیچ است. با استفاده از قانون اهم و هویت ترانسفورماتور ایده آل:

$$Z_L = \frac{V_s}{I_s} \quad (18)$$

$$Z'_L = \frac{V_p}{I_p} = \frac{a V_s}{I_s / a} = a^2 \frac{V_s}{I_s} = a^2 Z_L \quad (19)$$

که در آن، Z_L امپدانس بار مدار ثانویه است و Z'_L بار ظاهری یا امپدانس نقطه محرکه مدار اولیه است، بالانویس، نشان دهنده اصلی است.

ترانسفورماتورهای حقیقی شامل تلفات هسته، که مجموعاً تلفات جریان مغناطیسی نامیده می شوند، شامل تلفات هیستریزس ناشی از اثرات مغناطیسی غیرخطی در هسته ترانسفورماتور و تلفات جریان گردابی ناشی از گرمایش ژول در هسته (که متناسب با مربع ولتاژ اعمالی ترانسفورماتور است) می باشند [۱۳]. بر خلاف الگوی ایده آل، سیم پیچ ها در یک ترانسفورماتور حقیقی دارای مقاومت ها و اندوکتانس های غیرصفری هستند که با تلفات ژول به دلیل مقاومت در سیم پیچ اولیه و ثانویه [۱۳]، شار نشتی که از هسته فرار می کند و از یک سیم پیچ عبور می کند و تنها منجر به امپدانس واکنشی



اولیه و ثانویه می‌شود. شبیه به یک سلف، ظرفیت سربار و پدیده خود رزونانس به دلیل توزیع میدان الکتریکی رخ می‌دهد.

۴.۱ شار نشستی

در الگوی ایده آل ترانسفورماتور فرض می‌شود که تمام شار تولید شده توسط سیم‌پیچ اولیه، تمام چرخش‌های هر سیم‌پیچ، از جمله شار خودش به هم ربط دارد. در عمل، مقداری شار از مسیرهایی عبور می‌کند که خارج از سیم‌پیچ‌ها است [۱۴]. چنین شاری، شار نشستی نامیده می‌شود و منجر به اندوکتانس نشستی به صورت سری با سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور جفت شده متقابل می‌شود [۱۵]. شار نشستی سبب تخلیه انرژی ذخیره شده متناوب در میدان‌های مغناطیسی با هر چرخه منبع تغذیه می‌شود. این رخداد به صورت مستقیم به معنای از دست دادن توان نیست. اگرچه منجر به تنظیم ولتاژ پایین‌تر می‌شود، که سبب متناسب نبودن ولتاژ ثانویه به صورت مستقیم با ولتاژ اولیه، به ویژه در بارهای بیشتر، می‌گردد [۱۴].

در برخی از کاربردها، همچون مورد انفجار الکتریکی سیم، روند افزایشی نشستی مورد نظر است. مسیره‌های مغناطیسی طولانی، شکاف‌های هوا، یا شنت‌های میانبر مغناطیسی^۱ ممکن است بیشتر اوقات در طراحی ترانسفورماتور ایجاد شوند تا جریان اتصال کوتاه را محدود کند [۱۵]. در ادامه به نوعی از رله که در این ابزار بکار گرفته شده است اشاره خواهد شد.

۵.۱ مدار سوئیچ رله

رله‌ها افزاره‌های الکترومکانیکی هستند که از یک آهنربای الکتریکی برای عملکرد یک جفت ارتباط متحرک از حالت باز به حالت بسته استفاده می‌کنند. مزیت رله‌ها این است که برای کار کردن سیم‌پیچ رله انرژی نسبتاً کمی مصرف می‌شود.

طراحی و انواع مدارهای کلیدزنی رله بسیار زیاد است، اما بسیاری از پروژه‌های الکترونیکی کوچک از ترانزیستورها و ماسفت‌ها به عنوان افزاره کلیدزنی خود استفاده می‌کنند، زیرا ترانزیستور می‌تواند هدایت سریع کلیدزنی سیم‌پیچ رله را از منابع ورودی مختلف فراهم کند.

¹ Magnetic Bypass Shunts

۶.۱ مدار کلیدزنی رله NPN

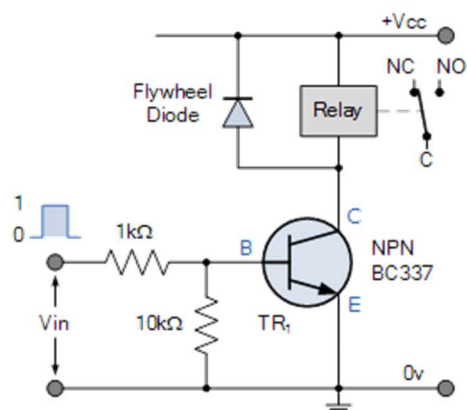
یک مدار کلیدزنی رله معمولی دارای سيم پیچی است که توسط یک کلید ترانزیستور NPN هدایت می‌شود. هنگامی که ولتاژ بیس ترانزیستور صفر (یا منفی) باشد، ترانزیستور قطع است و به عنوان یک کلید باز عمل می‌کند. در این شرایط هیچ جریان کلکتوری عبور نمی‌کند و سيم پیچ رله بدون انرژی است. چرا که به عنوان افزاره‌های عبور دهنده، اگر جریانی به بیس نرسد، جریانی از سيم پیچ رله عبور نخواهد کرد. اکنون اگر یک جریان مثبت مناسب به بیس وارد شود تا ترانزیستور NPN اشباع شود، جریانی که از بیس به امیتر (B تا E) جریان می‌یابد، جریان سيم پیچ بزرگتر را که از کلکتور به امیتر ترانزیستور می‌گذرد، کنترل می‌کند. مدار کلیدزنی رله NPN در شکل (۹) نشان داده شده است.

۷.۱ مدار کلیدزنی رله ماسفت کانال N

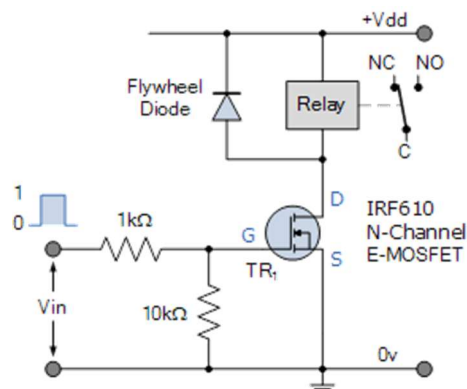
عملیات کلیدزنی رله ماسفت بسیار شبیه عملکرد سوئیچ ترانزیستور اتصال دوقطبی (BJT) است که در شکل (۹) نشان داده شده است. با این حال، تفاوت‌های فراوانی در عملکرد مدارهای ماسفت وجود دارد. بیشترین آن‌ها این است که ماسفت‌ها افزاره‌هایی هستند که با ولتاژ کار می‌کنند، و از آنجایی که گیت به صورت الکتريکی از کانال منبع تخلیه جدا شده است، امپدانس‌های ورودی بسیار بالایی دارند، بنابراین جریان گیت برای ماسفت صفر است. از این رو، مقاومت بیس غیر ضروری است.

ماسفت‌های تقویت کننده کانال N (NMOS) متداول‌ترین نوع ماسفت هستند که ولتاژ مثبت در ترمینال گیت را روشن می‌کند و ولتاژ صفر یا منفی روی درین آن را خاموش می‌کند و به عنوان رله ماسفت ایده‌آل عمل می‌کند. شکل (۱۰)، مدار کلیدزنی ماسفت کانال N را نشان می‌دهد که در پیکربندی منبع مشترک وصل شده است.





شکل ۹ مدار کلیدزنی رله NPN.



شکل ۱۰ مدار کلید زنی رله ماسفت کانال N.

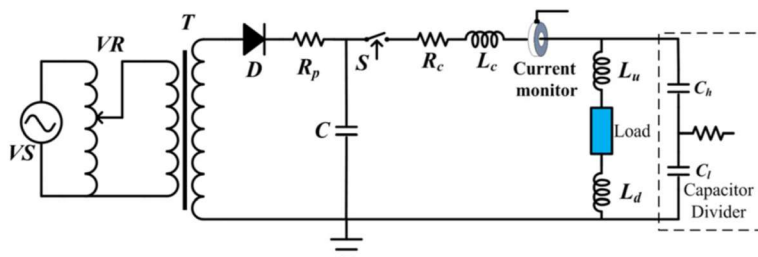
شکل (۱۱) مدار تخلیه را نشان می دهد که در آن، R_c (~ 77.6 میلی اهم) و L_c (~ 238.1 nH) مقاومت ذاتی و اندوکتانس مدار بدون بار هستند. L_u (~ 59.58 nH) و L_d (~ 18.45 nH) قسمت های بالایی و پایینی اندوکتانس های ساختار هم محور هستند. اندوکتانس سیم (طول ۳۰ میلی-متر و قطر ۴۰۰ میکرومتر) ~ 24.4 nH است. ولتاژ القایی یک سیم الکتریکی را می توان با رابطه (۲۰) محاسبه کرد.

$$UL_w = L_w d I/dt + I dL_w/dt \quad (20)$$

در تخلیه مقیاس زمانی میکروثانیه ای، محاسبه ولتاژ القایی را می توان در محدوده خطای قابل قبول ساده کرد [۱۶] و ولتاژ مقاومتی U_R بار را می توان با رابطه (۲۱) بدست آورد.

$$U_R = U_C - U_L = U_C - (L_u + L_d + L_w) d I/dt \quad (21)$$

در این مطالعه، اندوکتانس کل L_u ، L_d و L_w برابر 104 nH است.



شکل ۱۱ طرحواره بخش‌های الکترونیکی دستگاه پالس پلاسمایی طراحی شده.

همانطور که انرژی الکتریکی در سیم ذخیره می‌شود، انبساط سریع حجم ناشی از انفجار فاز و انبساط کانال تخلیه پلاسمای می‌تواند SWهای قوی ایجاد کند. فناوری تخلیه الکترونیکی که به پالس‌های پلاسمای معروف است از دو فرآیند الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده است [۱۷]. فرآیند الکتریکی شامل ذخیره و تخلیه انرژی الکتریکی از خازن‌ها به الکترودها است. در نتیجه این تخلیه الکتریکی، قوس پلاسمایی پرا انرژی ایجاد می‌شود و این انرژی در کسری از ثانیه به انرژی حرارتی، صدا و امواج فشار تبدیل می‌شود. آزمایش‌ها در یک مخزن آب استوانه‌ای به ابعاد 990×1200 میلی‌متر انجام شد. منبع SW در فاصله ۲۵۰ میلی‌متری (D_{sw}) از دیواره داخلی مخزن قرار گرفت.

۲. نتایج و بحث

در این مطالعه، روش UWEWE برای تولید SWها زیر آب به کار گرفته شده است. در بین آزمایش‌های مختلف، کمیت‌های سیم فلزی و ولتاژ شارژ خازن نمی‌توانند کاملاً یکسان باشند. بنابراین فرآیند تخلیه و SWهای تولید شده نیز ممکن است با یکدیگر کمی متفاوت باشند. برای اطمینان از تکرارپذیری اندازه‌گیری، یک پایایی اندازه‌گیری کامل لازم است. اول اینکه منبع SW باید در طول کل آزمایش بسیار پایدار باشد، به صورتی که SWهای تولید شده در آزمون‌های مختلف از قابلیت مقایسه و تکرارپذیری خوبی برخوردار باشند. با حفظ شرایط آزمایشی (ساختار مدار، ولتاژ شارژ، کمیت‌های سیم انفجاری و سامانه اندازه‌گیری) بدون تغییر، ۱۰ آزمایش تکرار می‌شود.

شکل موج جریان و ولتاژ نوعی بدست آمده در شکل (۸) نشان داده شده است. در این کار، خازن‌ها به ترتیب به ۳، ۴ و ۵ کیلوولت شارژ می‌شوند که در نتیجه کل انرژی ذخیره شده ۳۶۰، ۶۴۰ و ۱۰۰۰ ژول بدست می‌آید.



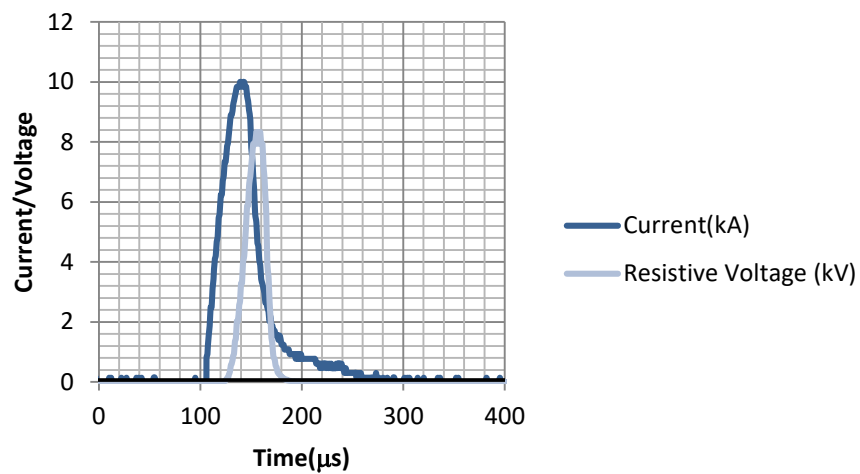
جریان و ولتاژ توسط یک سیم پیچ روگوفسکی خودمجموع با یک تضعیف کننده^۱ ۲۰ دسی بل و یک تقسیم کننده ولتاژ خازنی اندازه گیری می شوند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، تقسیم کننده ولتاژ خازنی سیگنال ولتاژ قسمت مرکزی هادی داخلی ساختار کابل هم محور را اندازه گیری می کند. پروفایل ولتاژ بدست آمده شامل ولتاژ مقاومتی بار و ولتاژ القایی کابل هم محور است. شکل موج جریان و ولتاژ مقاومتی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. هنگامی که خازن تا ولتاژ ۴ کیلو ولت شارژ می شود و بار تخلیه یک سیم آلومینیوم به طول ۳۰ میلی متر، قطر ۴۰۰ میکرومتر است، جریان پالسی با دامنه ۱۰ کیلو آمپر و زمان افزایش ۳۵ ~ میکرو ثانیه را می توان بدست آورد. ولتاژ مقاومتی را می توان با کم کردن ولتاژ القایی از ولتاژ اندازه گیری شده بدست آورد و روش محاسبه را می توان در منابع یافت [۱۸]. اسیلوسکوپ دیجیتال ضبط کننده جریان تخلیه را به عنوان منبع تحویل (Trigger Source) اتخاذ می کند، نه سیگنال تحویل سوئیچ (switch's trigger signal)، از این رو نبود قطعیت فرآیند تحویل (Trigger Process) بر اندازه گیری زمان رسیدن SW تأثیری نخواهد داشت.

در هر فاصله، حداقل پنج آزمایش پی در پی با کمیت های تخلیه یکسان تولید شد. منبع SW و پروب های فشار در موقعیتی به میزان کافی عمیق (عمق آب ۴۵۰ میلی متر) قرار گرفتند تا از تأثیر احتمالی اثرات «پدیده های کاویتاسیون حجمی» جلوگیری شود. هنگامی که سیم آلومینیوم با قطر ۴۰۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی متر با جریان پالسی در ولتاژ تخلیه شده ۳/۸ کیلوولت بارگذاری می شود، شکل موج های عادی بدست آمده از ولتاژ مقاومتی، جریان، توان الکتریکی شکل (۱۲) - الف و ب) نشان داده می شود.

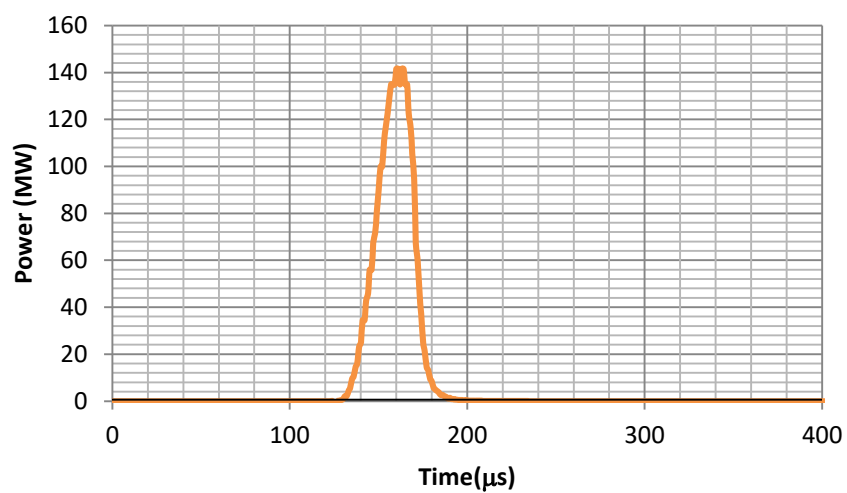
در چنین شرایطی، کل رسوب انرژی [۴۰۰ ~، با بازده تبدیل انرژی ۶۸ ~٪ است و بیشینه توان MW ۱۶۸ ~ است. وقتی سیم آلومینیوم با قطر ۵۰۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی متر با جریان پالسی در ولتاژ تخلیه شده ۹/۷۵ کیلوولت بارگذاری می شود، شکل موج های معمولی بدست آمده روی بار در شکل (۱۳) - الف و ب) نشان داده شده است. کل رسوب انرژی [۵۰۰ ~، با بازده تبدیل انرژی ۶۶.۳ ~٪ و بیشینه توان MW ۱۶۸ ~ است.

هر تخلیه با هر پیکربندی بار حداقل سه بار تکرار می شود تا خطاهای احتمالی به کمینه برسد. در هر شات، سیگنال تخلیه جریان و ولتاژ و توان به صورت جداگانه با دو اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت می شود چرا که مقیاس های زمانی متفاوتی دارند. سپس ولتاژ مقاومتی و توان محاسبه می شود.

¹ Attenuator



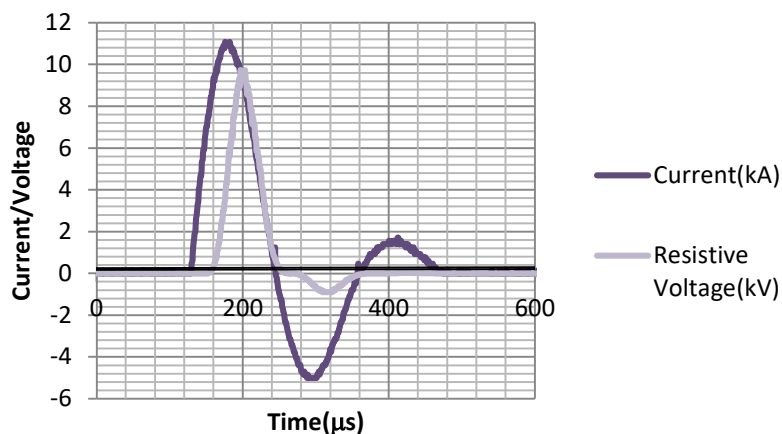
(الف)



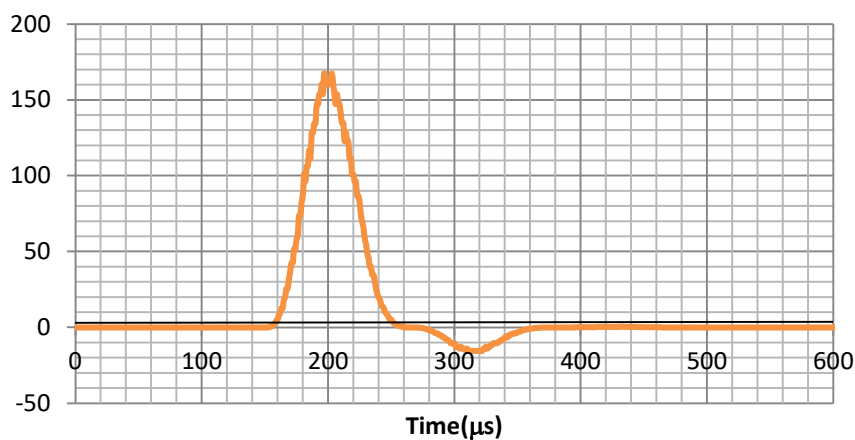
(ب)

شکل ۱۲ (الف) شکل موج جریان و ولتاژ مقاومتی. (آلومنیوم با قطر ۴۰۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی‌متر) (ب) شکل موج جریان توان.





(الف)

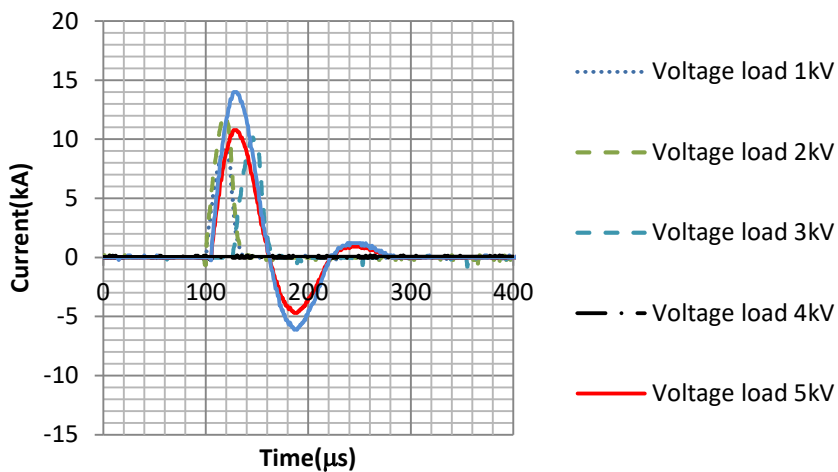


(ب)

شکل ۱۳ (الف) شکل موج جریان و ولتاژ مقاومتی و (ب) شکل موج توان، آلومنیوم با قطر ۰/۵ طول ۳۰ میلی‌متر.

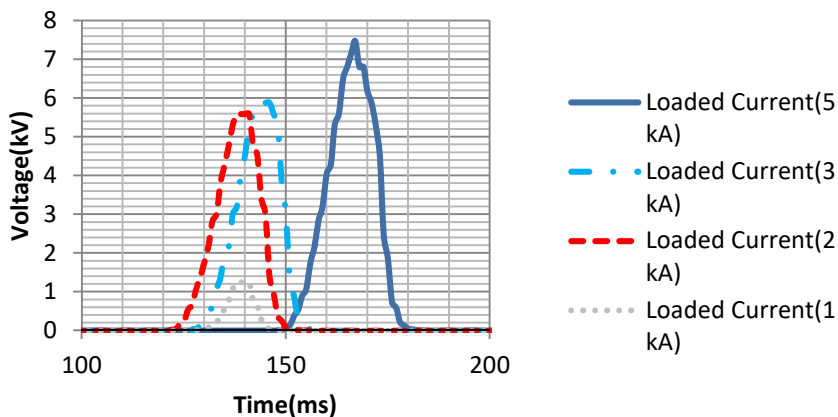
شکل (۱۴)، شکل موج تحت جریان بار ۵ تا ۱۰ کیلوآمپر را نشان می‌دهد. فرآیند تبخیر تحت ولتاژ ۳ کیلوولت دیرتر از ولتاژ ۴ و ۵ کیلوولت شروع می‌شود. این ممکن است با رسانایی بالای محصولات شیمیایی با دمای بالا نیز توضیح داده شود که مقاومت کانال تخلیه را کاهش می‌دهد. با

ولتاژ اولیه ۴ کیلوولت، کانال تخلیه نمی تواند پایدار بماند و ولتاژ معکوس روی سیم و خازن پدیدار می گردد. در این شرایط، بازده تبدیل انرژی کاهش می یابد.



شکل ۱۴ شکل موج جریان تحت ولتاژ بار ۱ تا ۶ کیلوولت. بیشینه جریان عبوری از سیم با افزایش ولتاژ افزایش می یابد.

در شکل (۱۵)، شکل موج ولتاژ تحت بار جریان ۱ تا ۵ کیلوولت نمایش داده شده است. با افزایش جریان بار قلّه ولتاژی در فاصله های زمانی مختلفی ایجاد می شود و پاسخ زمانی پالس در مدت زمانی بیشتری بدست می آید. در همین حال ولتاژ کاری با شدت بیشتری رخ می دهد و عملکرد تبخیر سیم را بهبود می بخشد.



شکل ۱۵ شکل موج ولتاژ تحت بار جریان ۱ تا ۵ کیلوولت.



۳. نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیرات ولتاژ شارژ (انرژی ذخیره شده)، و قطر سیم فلزی بر عملکرد احتراق EM تجزیه و تحلیل شد. با بررسی شکل های (۹) و (۱۰)، مشاهده شد که انفجار سیم آلومینیوم و تخلیه بار SW، EM های قوی تری با فشار اوج و ضربه بزرگ تر با جریان و ولتاژ بار شده متناسب است. برای سیم آلومینیوم به ترتیب با قطر ۴۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی متر با جریان پالسی در ولتاژ تخلیه شده ۳۸ کیلوولت، کل رسوب انرژی به ترتیب [۴۰۰] و [۵۰۰]، با بازده تبدیل انرژی به ترتیب ۶۸٪ و ۶۶.۳٪ و بیشینه توان 168 MW بدست آمده است. ولتاژ شارژ بالاتر و انرژی ذخیره شده کمیت های کلیدی برای بهبود عملکرد پالس پلاسما و تبخیر سیم و ضربه انفجار به شمار می آید. بیشینه دمای سیم، دمای نقطه جوش است. ولتاژ شارژ بالاتر، انرژی ذخیره شده بیشتری را به سیم هدایت می کند و پلاسمای قوس تشکیل شده دارای ویژگی های دمای بالا (چند ده کلوین) و تابش شدید است. این محصولات با انرژی بالا کمیت های کلیدی برای مشتعل کردن انفجار EM در حالت شروع نقطه داغ هستند.

۴. تقدیر و تشکر

لازم است از جناب آقای دکتر کمال خدایی رئیس پژوهشکده علوم پایه کاربردی و همچنین از جناب آقای دکتر حمیدرضا قمی عضو هیات علمی پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی به خاطر همکاری های مشفقانه کمال تشکر داشته باشیم.

منابع

- [1] Sophocleous, M., "Interaction between Ground Water and Surface Water: The State of the Science", *Hydrogeology Journal* 10, 52-56, 2002 <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- [2] "Well Rehabilitation with high-energetic Ultrasound", *Sonic Umwelttechnik. SONIC Information No. E1-09*. 2009, Accessed on April 2017. www.sonic-umwelttechnik.de.
- [3] Gipsou, T. C., "Method and apparatus for downhole oil well production stimulation", *US Patent*, 5297631, 1994.
- [4] Naugol'nykh Kh.A., Roy N.A. Spark discharges in water, Nauka, Moscow, Russia, 1971 (translation: Foreign Technology Division, Wright-Patterson AFB, OH, 1974).
- [5] "The qualitystocks daily newsletter", *QualityStocks*, <http://www.qualitystocks.net/newsletter/031616.html>, 2016. (Accessed 17 February 2011).



- [6] Grigoriev, A. N., and A. V. Pavlenko, "Circuit inductance influence on shock wave generation under electrical explosion of foil", In *Izvestiya vuzov. Fizika* 11, 209–211, 2006.
- [7] Grinenko, A., Ya E. Krasik, S. Efimov, A. Fedotov, V. Tz Gurovich, and V. I. Oreshkin., "Nanosecond time scale, high power electrical wire explosion in water", *Physics of Plasmas* 13(4), 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2188085>
- [8] Veksler, D., Sayapin, A., Efimov, S. and Krasik, Y.E., "Characterization of different wire configurations in underwater electrical explosion", *IEEE transactions on plasma science* 37(1), 88-98, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2006176>
- [9] Shafer, D., Toker, G.R., Gurovich, V.T., Gleizer, S. and Krasik, Y.E., "Peculiarity of convergence of shock wave generated by underwater electrical explosion of ring-shaped wire", *Physics of plasmas* 20(5), 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4804342>
- [10] Efimov S., Gurovich V.T., Bazalitski G., Fedotov A., Krasik Y.E., "Addressing the efficiency of the energy transfer to the water flow by underwater electrical wire explosion", *J. Appl. Phys.* 106, 073308, 2009 <https://doi.org/10.1063/1.3243233>
- [11] Efimov S., Fedotov A., Gleizer S., Gurovich V.T., Bazalitski G., Krasik Y.E., "Characterization of converging shock waves generated by underwater electrical wire array explosion", *Phys. Plasmas* 15, 112703, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.3023156>
- [12] Antonov O., Efimov S., Gurovich V.T., Yanuka D., Shafer D., Krasik Y.E., "Diagnos-tics of a converging strong shock wave generated by underwater explosion of spherical wire array", *J. Appl. Phys.* 115, 223303, 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4883187>
- [13] Electrical Engineering: An Introduction. Saunders College Publishing. 1984. p. 610. ISBN 0-03-061758-8.
- [14] Dalessandro L., Cavalcante F. d. S., and Kolar J. W., "Self-Capacitance of High-Voltage Transformers", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(5), 2081–2092, 2007. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.904252>
- [15] McLaren, P., "Elementary Electric Power and Machines", *Ellis Horwood*, 1984. ISBN 978-0-470-20057-5.
- [16] Sarkisov G. S., Rosenthal S. E., Cochrane K. R., Struve K. W., Deeney C., and McDaniel D. H., "Nanosecond electrical explosion of thin aluminum wires in a vacuum: Experimental and computational investigations", *Physical Review E* 71(4), 046404, 2005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.046404>
- [17] Veksler, D., Sayapin, A., Efimov, S. and Krasik, Y.E., "Characterization of different wire configurations in underwater electrical explosion", *IEEE transactions on plasma science*, 37(1), 88-98, 2008. DOI: 10.1109/TPS.2008.2006176
- [18] Orlenko, L.P., "Explosion physics", *FizMatLit. Moscow* 1, 832, 2004.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

