دریافت: ۱۱ خرداد ۹۵ پذیرش: ۳۰ مرداد ۹۵

مطالعه پارامترهای موثر بر سرعت پرتابه‌ها با استفاده از نیروی الکترومغناطیس

ساسان امینیان دهکردی[۱]، امین کلاه‌دوز*[۲]، محسن لوح‌موسوی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی‌شهر، **دانشگاه آزاد اسلامی**، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی‌شهر، **دانشگاه آزاد اسلامی**، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، **دانشگاه آزاد اسلامی**، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

* Aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

چکیده

نیروی الکترومغناطیس یکی از نیروهای بنیادی و پرکاربرد در صنعت می‌باشد . در صورت افزایش و متمرکز ساختن آن، این نیرو می‌تواند در صنعت‌های شکل دهی ، مونتاژ کاری ، جوشکاری و شتاب‌دهی مورد استفاده قرار گیرد . شتاب اجسام و سرعت گرفتن آنها یکی از کاربردهای دیگر نیروی الکترومغناطیس است. با قرار گرفتن جسمی در میدان مغناطیسی شدید و لحظه ای، باعث شتاب گرفتن و افزایش سرعت آن می‌شود. با توجه به اینکه نیروی الکترومغناطیس نسبت به سایر نیروهای پاک‌تر و بدون صدا می‌باشد از این رو از شتاب دهی جهت پرتاب هواپیماها جهت جایگزین نیروی فنر ، پرتاب پرتابه ها به جای استفاده از نیروی باد و یا باروت استفاده نمود . هدف اصلی در این تحقیق استفاده از نیروی الکترومغناطیس در پرتاب پرتابه‌ها می‌باشد. جهت انجام این کار ابتدا دستگاه تامین کننده انرژی الکترومغناطیس ساخته می‌شود. در ادامه کار با مطالعه و انتخاب پارامترهای قطر سیم سیم‌پیچ ، طول سیم‌پیچ ، تعداد لایه ، جنس لوله ، ولتاژ و وزن و طول پرتابه، تاثیر هر یک از پارامترها بر روی سرعت پرتابه‌ها بررسی می‌شود. جهت تشخیص سرعت پرتابه‌ها دستگاه سرعت سنج لیزری طراحی و ساخته شده است تا بتوان سرعت پرتابه‌ها را اندازه گیری نمود. تست‌های شبیه سازی جهت تاثیر پارامترها در حالت تئوری و مقایسه آن با تست‌های عملی توسط نرم افزارهای جی مگ و اباکوس انجام شدند که با نتایج عملی مطابقت خوبی داشتند . جهت تحلیل نتایج و بهینه سازی آنها از روش تاگوچی استفاده شده است. نتایج نشان داد که بهترین سیم‌پیچ مربوط به سیم‌پیچ با حداکثر تعداد لایه ، طول مناسب 150 میلیمتر و سیم ۲ میلیمتر می‌باشد که منجر به دستیابی سرعت۴۳۱ متر بر ثانیه شد.

کلیدواژگان

شکل دهی الکترومغناطیس ، شتاب دهی الکترومغناطیس ، تاگوچی ، بهینه سازی

Study of Effective Parameters on Velocity of Projectile Using Electromagnetic Force

Sasan Aminian Dehkordi[1], Amin Kolahdooz [2*], Mohsen Loh-Mousavi[3]

1- MSc Student, young researchers and elite club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran
2- Assistant Professor, young researchers and elite club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran
3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran
* Aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

Abstract

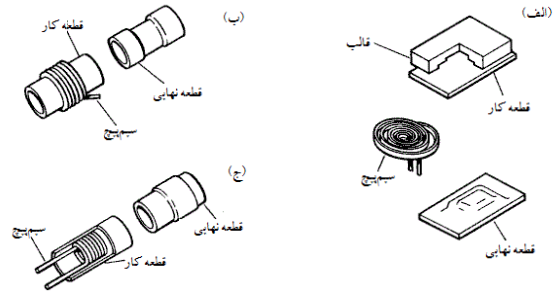
Electromagnetic force is One of the fundamental forces and it is widely used in industry . the use of the electromagnetic force is different for example it can use for Electric engine , Contactor , etc. if it increase can use electromagnetic force in Forming , assemble, welding and Acceleration . Acceleration and To speed up of thing is newest Application , when object is in intense field and magnetic moment that is causing the acceleration and speed So this energy is Clean and quite for use to acceleration of airplane , projectile and etc. to do this research at first electromagnetic source was build then with study about effective parameters, chose wire diameter , length of coil , number of layer and tube material .use final element method (J-Mag and Abaqus) for parameters impact on the theory. The final element test and experimental test had a good match. For analysis the output(velocity) use minitab program. As result the coil with maximum layer and 150 mm length with wire diameter 2 is the best coil and high speed was achive with this coil and it about 431m/s.

Keywords

Electromagnetic forming , electromagnetic acceleration , Taguchi , optimization

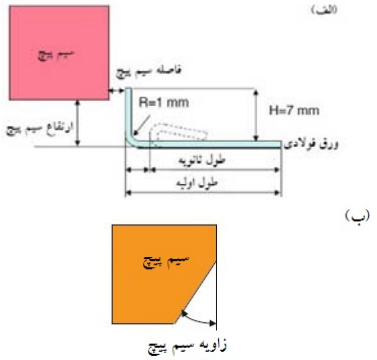
۱- مقدمه

نیروی الکترومغناطیس یک فرآیند سرعت بالا می‌باشد که از اواخر دهه ۱۹۵۰ از آن جهت شکل‌دهی لوله‌ها و ورق‌های رسانا استفاده شده است. در سال ۱۹۵۸ این فرایند توسط هروی و برور به عنوان اختراع ثبت شد. با توجه به نحوه اعمال نیرو به قطعات جهت شکل‌دهی، به سه نوع شکل‌دهی تقسیم می‌شود که عبارتند از شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق‌ها ، شکل‌دهی لوله‌ها بصورت انقباظی و شکل‌دهی لوله‌ها بصورت انبساطی تقسیم می‌شوند که در شکل(۱) نشان داده شده است[۱ تا ۳].



شکل ۱ انواع شکل‌دهی الکترومغناطیس (الف) شکل‌دهی لوله بصورت انقباضی (ب) شکل‌دهی لوله بصورت انبساطی (ج) شکل‌دهی صفحه [۱]

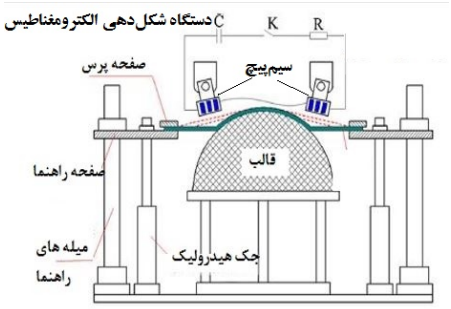
شانگ و همکارانش[۴] به بررسی ایجاد لبه برای ورق آلومینیوم با استفاده از شکل‌دهی الکترومغناطیس پرداختند. آنها با خم کاری صفحه با زاویه ۱۸۰ درجه لبه‌ای برای ورق آلومنیوم الیاژ ۶۰۶۱ ایجاد نمودند آنها فرایند را تحت سه مرحله خم کاری با زاویه ۹۰ درجه ، پیش خم کاری با زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به حالت اولیه و خم کاری با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به حالت اولیه انجام دادند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم افزار ال اس داینا[1] و تست‌های تجربی بیان کردند که با افزایش انرژی ذخیره شده در خازن میزان شعاع لبه کاهش می‌یابد بطوریکه با افزایش ۲ برابر انرژی ذخیره شده در خازن شعاع لبه ایجاد شده به میزان ۵۵/۳۸ درصد کاهش و طول لبه خم شده به میزان ۸۲/۵ درصد افزایش می‌یابد در شکل(۲) نحوه لبه دار کردن ورق نشان داده شده است



شکل ۲ لبه دار کردن ورق با استفاده از نیروی الکترومغناطیس (الف) انجام مرحله نهایی (ب) نمونه ای از سیم پیچ با زاویه [۴]

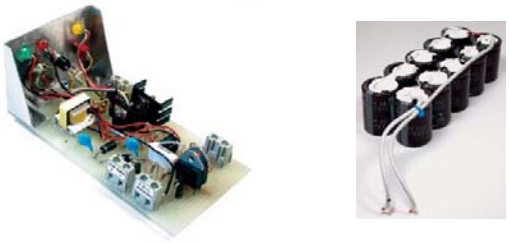
زانگ و همکاران [۵] به مشکل هندسی در خم‌کاری وی شکل فرآیند الکترومغناطیس آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ پرداختند آنها با بررسی خم کاری ورق آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ با قالب وی شکل بصورت عددی و عملی مشکلات مربوط به هندسه شکل نهایی و ولتاژ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحلیل‌های خود چهار جنبه توزیع نیروی الکترومغناطیس ، به روز رسانی توزیع نیروی الکترومغناطیس ، تاثیر برخورد بین ورق و قالب و مدت زمان پالس درون سیم‌پیچ را در نظر گرفتند و بیان کردند که با افزایش ولتاژ می‌توان شکل زینی قطعات بدست آمده را حذف نمود زیرا با افزایش ولتاژ میدان مغناطیسی قوی‌تری تشکیل می‌گردد بطوریکه با افزایش ۲۸/۲ درصدی ولتاژ نیروی الکترومغناطیس ۲ برابر و چگالی شدت جریان نیز ۲ برابر می‌شود همچنین در صورت استفاده از ورق های کوچکتر از سیم پیچ توزیع نیرو بصورت یکنواخت نبوده و باید ورق به میزان اندازه قالب باشد در شکل (۹-۲) نمونه ای از تست های عملی در ۴ ولتاژ متفاوت نشان داده شده است.

ژیاهو و همکاران[۶] به شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق پرداختند آنها با آمیختن نیروی الکترومغناطیس و نیروی کشش مطابق شکل(۳) به شکل‌دهی نیم کره پرداختند. آنها با بانک خازنی ۳۱۲ میکروفاراد و ولتاژ ۷ کیلو ولت شکل‌دهی را انجام دادند و بیان کردند که شکل‌دهی با ۳۶ بار تخلیه انرژی در سیم‌پیچ و ۶ بار کشیدگی توسط جک‌های هیدرولیک انجام می‌شود.



شکل ۳ ترکیب نیروی الکترومغناطیس و نیروی کشش در شکل‌دهی ورق‌ها[۶]

در سال‌های اخیر محققان از این نیرو جهت شتاب‌دهی پرتابه ها استفاده نمودند به طوریکه ویلیام [۷] به بررسی پروژه پرتابگر الکترومغناطیس پرداخت. او بیان کرد که پرتابگرهای گرم از نیروی انفجار باروت استفاده می-کنند و این نیرو دارای صدای بلند و آتش است. از همین جهت پرتابگر نیاز به تمیزکاری لوله‌ها و قسمت‌های مختلف دارد. از این جهت او نیروی الکترومغناطیس را جایگزین نیروی باروت ساخت و پرتابگر الکترومغناطیس آزمایشگاهی را طراحی و مورد آزمایش قرار داد. او با توضیح کلیه مدارهای الکتریکی، افزاینده ولتاژ و سیم‌پیچ‌ها ، مدار را با پرتابه‌های ۸ گرم و ولتاژهای متفاوت مورد آزمایش قرار داد و سرعت پرتابه‌های را اندازه‌گیری نمود. او بیان کرد که با افزایش ولتاژ سرعت افزایش می‌یابد در شکل (۳) بانک خازنی و شکل‌مدار پس از ساخته شده توسط ایشان را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۴ مدارهای مورد نیاز جهت ساخت پرتاب‌گر الکترومغناطیس (الف) بانک خازنی (ب) مدار کنترلی و شارژ بانک خازنی[۷]

بهمیل و همکاران[۸] به طراحی و ساخت پرتابگر الکترومغناطیسی پرداختند. آنها جهت تست‌های آزمایشگاهی خود از پرتابگری با سرعت و شتاب پایین به استفاده نمودند. آنها با استفاده از یک سیم‌پیچ به قطر سیم دو میلیمتر، بصورت ۵ لایه، و با ۱۰۶ دور و طول ۴۰ میلیمتر و پرتابه‌ای به قطر ۵ میلیمتر و طول ۱۰ میلیمتر را با استفاده از دستگاهی با بانک خازنی

1-LS Dyna

۰/۱ فاراد و ولتاژ ۶۳ ولت پرتاب کردند. آنها بیان کردند که با افزایش مقدار مقاومت سیم پیچ میزان فرکانس مدار افزایش می‌یابد بطوریکه با افزایش ۲ برابر مقاومت میزان فرکانس ۴/۵ برابر می‌شود. آنها از تریستور جهت کلید تخلیه خازن استفاده نمودند که با تخلیه بانک خازنی در سیم‌پیچ جریان ۳۴۰ آمپر در سیم پیچ اعمال می‌شود که مدت زمان پالس آن حدود ۱۵ میلی‌ثانیه می باشد.

جهت شبیه‌سازی نرم افزاری فرایند از نرم‌افزارهای بسیاری تاکنون استفاده شد. گرزن و همکارانش [۸] با استفاده از نرم افزار ماکسول و اباکوس به حل عددی فرایند شکل‌دهی لوله پرداختند روش آنها به این صورت بود که ابتدا قسمت الکتریکی مدار حل شده و سپس پاسخ‌ها به نرم افزار آباکوس منتقل شده است . ایشان بیان کردند که با یک تکه گرفتن سیم‌پیچ در نرم افزار انسیس نتایج جریان حدود ۳۰ درصد با واقعیت تفاوت داشت که با شبیه‌سازی در نرم افزار ماکسول این مقدار به ۸ درصد کاهش خواهد کرد. ایشان در نهایت بیان کردند که با افزایش ولتاژ از ۴۳۰۰ ولت به ۷۰۰۰ولت میدان مغناطیسی به میزان ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد دور از ۹ دور به ۱۳ دور، کاهش ۳۰ درصدی جریان پیک و با افزایش تعداد دور از ۱۱ دور به ۱۳ دور باعث کاهش ۷/۵ درصد جریان پیک و کاهش ۱۳ درصد میدان مغناطیسی حاصل می‌شود. علت این امر را افزایش سطح مقطع و کاهش چگالی میدان مغناطیسی بیان نمودند. همچنین اعلام نمودندکه با افزایش میزان گپ از ۱ میلیمتر به ۲/۴ میلیمتر جریان به میزان ۸ درصد کاهش می‌یابد.

فلاحی و همکاران[۹] به تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیس و تحلیل سازه‌ای شکل‌دهی فرایند الکترومغناطیس به صورت عددی پرداختند. آنها تحلیل کوپل الکتریکی و مغناطیسی را توسط نرم افزار انسیس بصورت متقارن شبیه‌سازی کرده و نتایج نیرویی را استخراج نمودند. ایشان از نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل قسمت سازه‌ای فرآیند استفاده کردند. آنها تست‌های تجربی خود را در حالت شکل‌دهی لوله آلومینیوم آلیاژ ۶۰۶۲ به طرف داخل انجام دادند. با توجه به اینکه این فرآیند یک فرایند با سرعت بالا می‌باشد برای تحلیل این ماده از ساختار وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک استفاده کردند. همچنین پارامترهای مهم فرایند نظیر انرژی تخلیه بانک خازن، مشخصات سیم‌پیچ، فاصله بین قطعه‌کار و سیم‌پیچ و جابجایی شعاعی قطعه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بخش با نتایج عددی مقایسه شدند و اعلام شد که نتایج تجربی و عددی آنها تطابق مناسبی دارند. همچنین بیان کردند که با افزایش انرژی خازن و جریان پیک، شدت میدان مغناطیسی و میزان شکل‌دهی افزایش می‌یابد. این افزایش بصورتی است که با افزایش ۳/۷۷ ولتاژ در تست‌های عملی میزان جابجایی به میزان ۲/۳۸ درصد افزایش و جریان پیک ۵/۸۷ افزایش می‌یابد.

کاشانی و همکاران[۱۰] به بررسی شکل‌دهی لوله توسط نرم افزارهای انسیس و ال اس داینا پرداختند. آنها با شبیه‌سازی مدارهای الکتریکی توسط نرم افزار انسیس میزان نیرو و تغییر شکل سیم‌پیچ را در هر لحظه بدست آورند. همچنین با انتقال نتایج به نرم افزار ال اس داینا به بررسی تغییر شکل ورق پرداختند. آنها نیز بیان کردند که به دلیل اینکه فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا انجام می‌شود لذا در شبیه‌سازی این فرایند شکل‌دهی، باید سرعت بالای جریان مواد لحاظ شود بنابراین خواص مواد بر اساس مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک مورد بررسی قرار می‌گیرد. ایشان همچنان اعلام کردند که با افزایش مقدار ولتاژتخلیه، مدار جابجایی قطعه کار نیز افزایش می‌یابد بطوریکه با افزایش ۲۷ درصد ولتاژ در تست‌های تجربی جابجایی ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. که در شبیه‌سازی غیر کوپل میزان جابجایی ۳ برابر افزایش و در شبیه‌سازی کوپل جابجایی به میزان ۶۴ درصد افزایش را نشان می‌داد.

در این پژوهش به بررسی پارامترهای موثر در سرعت پرتابه ها با استفاده از نیروی الکترومغناطیس پرداخته می‌شود. در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های عملی ، شبیه‌سازی و روش‌های آماری جهت معرفی پارامترهای موثر بررسی آنها در شتاب‌دهی با استفاده از نیروی الکترومغناطیس پرداخته می‌شود.

۲- آزمایش

۲-۱- تعریف پارامترهای آزمایش

الف) ولتاژ

ولتاژ یکی از پارامترهای مهم در دستگاه‌های الکترومغناطیس می‌باشد با توجه به معادله (۱) که قانون اهم می‌باشد، با افزایش ولتاژ و ثابت در نظر گرفتن مقاومت سیم‌پیچ میزان شدت‌جریان بیشتری از سیم‌پیچ عبور می‌کند که باعث تشکیل میدان مغناطیسی قوی‌تر و اعمال نیروی لورنتس بیشتری می‌شود، به همین جهت ولتاژ یکی از پارامترهای مهم دستگاه می‌باشد [۱۲ و ۳-۱].

$$I = \frac{V}{R} \qquad (۱)$$

در معادله فوق (V) ولتاژ ، (R) مقاومت و (I) شدت جریان الکتریکی می-باشد.

ب) قطر سیم

با افزایش قطر سیم میزان مقاومت سیم کاهش می‌یابد و با توجه به معادله(۱) مشاهده می‌شود که با کاهش مقاومت و ثابت بودن ولتاژ میزان شدت جریان افزایش می‌یابد که با افزایش ولتاژ مطابق معادله (۲) میزان شار مغناطیسی افزایش می‌یابد[۱۲ و ۳-۱].

$$R\phi=NI \qquad (۲)$$

ج) تعداد لایه

تعداد لایه با افزایش تعداد دور اتفاق می‌افتاد با این تفاوت که در این حالت طول ثابت می‌باشد. این امر باعث افزایش میدان مغناطیسی به دلیل تعداد لایه‌ها و دورها بیشتر و یا کاهش میدان مغناطیسی در اثر افزایش مقاومت سیم پیچ در اثر افزایش طول می‌باشد[۱۲ و ۳-۱].

د) جنس لوله

در شتاب‌دهی پرتابه‌ها با استفاده از نیروی الکترومغناطیس یکی از پارامترهای تاثیر گذار میزان ترواییِ مغناطیسی می‌باشد. هر چقدر مقدار این ضریب کمتر باشد شار عبوری از محیط بیشتر می‌باشد. از همین جهت جنس لوله‌های سیم‌پیچ باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نه تنها دارای کمترین تراوایی باشند بلکه از اشباع شدن پرتابه در معرض میدان مغناطیسی آنی ایجاد شده جلوگیری کنند[۱۲ و ۳-۱].

ه) جنس

جنس پرتابه یکی از پارامتر های اساسی در شتاب دهی می‌باشد زیرا اگر ماده ای خاصیت مغناطیس شدن را نداشته باشد باعث شتاب‌دهی آن نمی-

شود. همچنین در صورت اینکه خاصیت مغناطیس بودن آن ضعیف باشد باعث می‌شود پرتابه شتاب و سرعت کمتری از میدان مغناطیسی دریافت کند. از همین جهت جهت شتاب‌دهی مناسب پرتابه‌ها، از مواد فرومغناطیس استفاده می‌شود[۱۲ و ۳-۱].

و) هندسه

هندسه پرتابه باید به گونه‌ای باشد که با افزایش سرعت بتواند در هوا نفوذ کند و هوا مانع حرکت و یا اصطکاک آن نشود به همین جهت معمولا با نوک تیز و با انتهای چند پره جهت حفظ حرکت مستقیم الخط بودن خود ساخته می‌شود[۱۲].

ز) وزن

یکی دیگر از پارامترهای مهم وزن پرتابه می‌باشد با توجه به فرمول (۳) با افزایش وزن(m) نیروی(F) بیشتری جهت یکسان ثابت بودن شتاب (a) نیاز است .از همین جهت وزن پرتابه باید به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر اینکه به نیروی کمتری برای غلبه بر وزن خود نیاز داشته باشد در صورت قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی نیز اشباع نشود[۱۲].

$$F = ma \qquad (۳)$$

با توجه به تعاریف مربوط به پارامترها، در این پژوهش پارامترها و سطوح آن بصورت جدول(۱) تعریف می‌شوند.

جدول ۱ سطوح و پارامترهای تعریف شده تحقیق

سطح ها / پارامتر ها	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
قطر سیم	۲ میلیمتر	۳ میلیمتر	۴ میلیمتر
طول سیم پیچ	۱۰۰ میلیمتر	۱۵۰ میلیمتر	۲۰۰ میلیمتر
تعداد لایه سیم پیچ	۱ لایه	۲ لایه	۳ لایه
جنس لوله سیم پیچ	پلاستیک	فیبر استخوانی	برنج
ولتاژ	۵۰۰ ولت	۱۰۰۰ولت	۱۵۰۰ ولت
وزن پرتابه	۵ گرم	۸ گرم	-
طول پرتابه	۱۸ میلیمتر	۲۸ میلیمتر	-

با توجه به جدول فوق قطر سیم با توجه به مقادیر استاندارد تولید شده انتخاب شده است. طول سیم‌پیچ یکی از عوامل موثر بر تعداد دور می‌باشد همچنین مسیر تشکیل میدان مغناطیسی را نیز افزایش می‌یابدکه باعث افزایش و یا کاهش شتاب پرتابه می‌شود .

تعداد لایه‌های سیم پیچ نیز همانند طول سیم‌پیچ در طول‌های متفاوت تعداد دور ها را بیشتر می‌کند و می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش شتاب پرتابه شود .

جنس لوله با توجه میزان تروایی مغناطیسی آن اهمیت زیادی دارد که باعث می‌شود شار مغناطیس از آن عبور کند که با توجه به جداول استاندارد در رفرنس [۱۳-۱۹] پلاستیک کمترین تروایی و بیشتر عبور شار مغناطیسی از خود را دارد که برابر۱ می باشند ولی برنج و فیبر استخوانی به ترتیب برابر ۱/۰۰۰۰۲۲و۱/۰۰۰۰۷۴ می‌باشد. اگر چه این اعداد بسیار کوچک هستند ولی بر روی میدان مغناطیسی و شتاب حاصل از آن تاثیر می‌گذارن. در شکل(۳۰-۳) نمونه ای از این لوله ها نشان داده شده است.

با توجه به بالا بودن تعداد سطوح و پارامترهای تعریف شده جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش آماری تاگوچی (L9) استفاده شده است. که به صورت جدول(۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ آزمایش‌های مشخص شده بوسیله روش تاگوچی

شماره آزمایش	قطر سیم	تعداد لایه	طول سیم پیچ	جنس لوله
۱	۲ میلیمتر	۱۰۰ میلیمتر	۱ لایه	پلاستیک
۲	۲ میلیمتر	۱۵۰ میلیمتر	۲ لایه	فیبر
۳	۲ میلیمتر	۲۰۰ میلیمتر	۳ لایه	برنج
۴	۳ میلیمتر	۱۰۰ میلیمتر	۲ لایه	برنج
۵	۳ میلیمتر	۱۵۰ میلیمتر	۳ لایه	پلاستیک
۶	۳ میلیمتر	۲۰۰ میلیمتر	۱ لایه	فیبر
۷	۴ میلیمتر	۱۰۰ میلیمتر	۳ لایه	فیبر
۸	۴ میلیمتر	۱۵۰ میلیمتر	۱ لایه	برنج
۹	۴ میلیمتر	۲۰۰ میلیمتر	۲ لایه	پلاستیک

با توجه به بالا بودن هزینه‌های ساخت سیم‌پیچ‌ها، در روش آماری تاگوچی جهت کاهش هزینه‌ها پارامترهای مربوط به سیم‌پیچ وارد شده است و سایر پارامترهای ولتاژ و وزن پرتابه می‌باشد بصورت گسترده و با تکرار روش تاگوچی انجام شده است.

۲-۲- نحوه آزمایش‌های عملی

با توجه به پارامترهای تعریف شده در جدول(۳) آزمایش‌ها در شش گروه مطابق جدول(۲) انجام می‌شود.

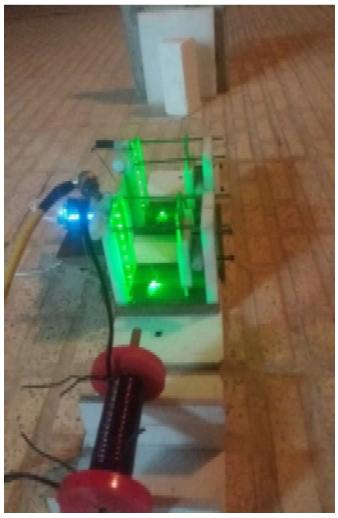
جدول ۳ گروه‌های مشخص شده برای انجام آزمایش‌ها

شماره گروه	پارامترهای ولتاژ و پرتابه
۱	ولتاژ ۵۰۰ ولت و پرتابه ۵ گرم
۲	ولتاژ ۵۰۰ ولت و پرتابه ۸ گرم
۳	ولتاژ ۱۰۰۰ ولت و پرتابه ۵ گرم
۴	ولتاژ ۱۰۰۰ ولت و پرتابه ۸ گرم
۵	ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و پرتابه ۵ گرم
۶	ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و پرتابه ۸ گرم

با توجه به گروه‌های مشخص شده و جهت کاهش خطای ممکن آزمایش هر آزمایش با ۳ بار تکرار انجام می‌شود. جهت انجام آزمایش‌ها سیم‌پیچ‌ها مطابق با دسته بندی تاگوچی ساخته می‌شوند.

جهت انجام آزمایش‌های عملی از سرعت سنج لیزری به منظور اندازه-گیری سرعت و دستگاه تامین کننده نیروی الکترومغناطیس با قدرت ۳ کیلوژول و ولتاژ ۲۰۰۰ ولت استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها و

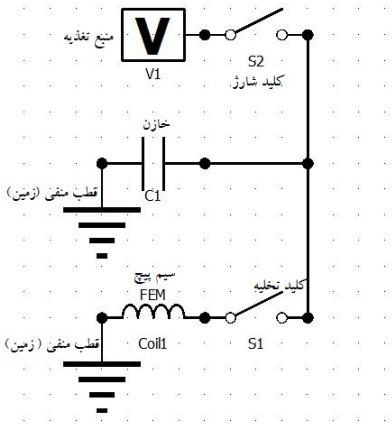
جلوگیری از هر گونه ایجاد ارتعاش و خطا کلیه سیم‌پیچ‌ها و دستگاه سرعت سنج بر روی زمین کاملا بسته می‌شوند تا در لحظه پرتاب پرتابه باعث ایجاد خطا نشود در شکل (۵) نمونه ای از آزمایش‌ها نشان داده شده که مربوط به سیم‌پیچ ۴ میلیمتر، طول ۲۰۰ میلیمتر با دولایه سیم می‌باشد.



شکل ۵ انجام آزمایش‌های عملی و سنجش سرعت با سرعت سنج لیزری

۳-۲- شبیه‌سازی فرآیند

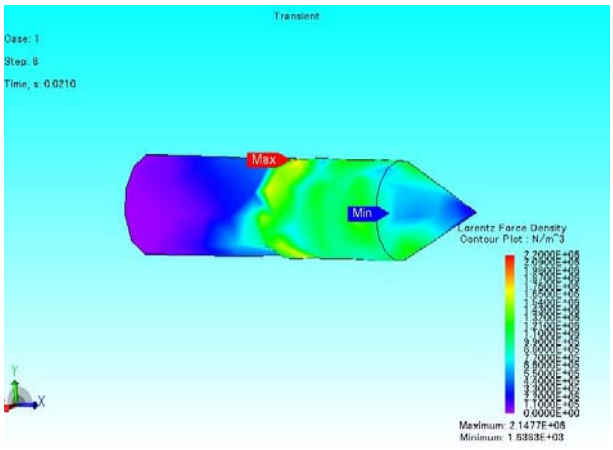
در این تحقیق شبیه‌سازی‌ها با کوپل نرم افزار جی مگ و نرم افزار اباکوس انجام شده است. برتری نرم افزار جی‌مگ نسبت به سایر نرم‌افزارها در این حوزه، انتقال داده ها به نرم افزار اباکوس به صورت کوپل می‌باشد. همچنین می‌توان با استفاده از قابلیت مدارهای الکتریکی در این نرم افزار خازن‌ها، فاصله هوایی، کلید تخلیه را شبیه سازی نمود.



شکل ۶ مدار الکتریکی رسم شده در نرم افزار جی مگ

پس از رسم شدن مدار الکتریکی مطابق شکل(۶) قطعات مدار رسم شده را به مدل‌های سه بعدی رسم شده نسبت داده می‌شود و تعداد دور، ولتاژ، مقاومت در قسمت مدارهای الکتریکی مشخص می‌شود.

پس از معرفی شرایط حل و مشخص نمودن پارامترها، تحلیل قسمت الکترومغناطیس انجام می‌شود و مقدار نیروی لورنتس مطابق شکل(۷) بصورت گراف بر روی پرتابه مشخص می‌شوند. با توجه به شکل، در زمان پرتاب مقدار نیروی لورنتس در نوک پرتابه بیشترین مقدار می‌باشد و با گذشت زمان و وارد شدن پرتابه به داخل سیم‌پیچ نیرو بر قسمت‌های دیگر پرتابه نیز اعمال شده و باعث افزایش سرعت آن می‌شود.



شکل ۷ نیرو های وارد شده برپرتابه در نرم افزار جی مگ

با انتقال این مقدار نیرو با استفاده از کوپل بین دو نرم افزار سرعت پرتابه و مسافت طی شده آن بدست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌های انجام شده در هر گروه با توجه به پارامترهای تعیین شده انجام می‌شود و سپس سرعت‌های اندازه‌گیری شده بصورت میانگین در سه آزمایش نشان داده می‌شوند.

۳-۱- گروه اول و دوم

گروه اول و دوم مربوط به ولتاژ ۵۰۰ ولت و پرتابه ۵ و ۸ گرم می‌باشد که با انجام آزمایش‌ها مقدار سرعت و سیگنال به نویز مربوط به هر یک از سیم‌پیچ‌ها بدست می‌آید که بصورت جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است.

جدول ۴ پارامترهای خروجی بدست آمده برای آزمایش گروه اول

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۳/۳۲۷۲	۱۰/۴۴۱۶
۲	۱۷/۶۴۳۹	۲۴/۹۳۱۹
۳	۱۱/۲۹۴۳	۲۱/۰۵۷۲
۴	۱	۰
۵	۱۶/۸۰۳۷	۲۴/۵۰۸۱
۶	۱	۰
۷	۹/۳۵۶۵	۱۹/۴۲۲۴
۸	۱	۰
۹	۴/۲۱۷۲	۱۲/۵۰۰۵

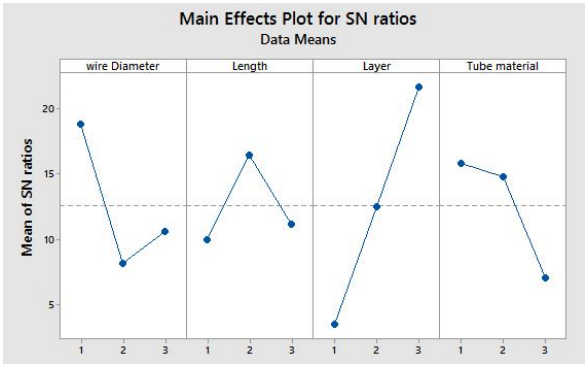
جدول ۵ پارامترهای خروجی بدست آمده برای آزمایش گروه دوم

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۳/۱۰۲۱	۹/۸۳۳۱
۲	۱۳/۵۶۵۸	۲۲/۶۴۸۹
۳	۱۸/۰۱۲۵	۲۵/۱۱۱۵
۴	۶/۳۸۹۱	۱۶/۱۰۸۸
۵	۱۳/۷۸۵۰	۲۲/۷۸۸۱
۶	۱	۰
۷	۷/۲۳۴۰	۱۷/۱۸۷۶
۸	۱	۰
۹	۴/۴۹۳۷	۱۳/۰۵۲۱

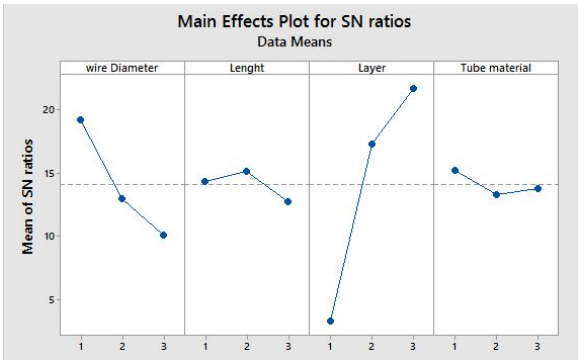
با توجه به جدول‌های گروه اول و دوم مشاهده می‌شود که سرعت برای بعضی سیم‌پیچ‌ها ۱ در نظر گرفته شده است. پرتابه در این سیم‌پیچ‌ها شتابی ندارد و سرعت آنها معادل با صفر می‌باشد. با توجه به اینکه خروجی صفر دارای مقدار سیگنال به نویز بی نهایت می‌باشد، مقدار سرعت برای این پرتابه‌ها معادل ۱ درنظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه خروجی‌ها سرعت می‌باشد از فرمول محاسبه سیگنال به نویز (۴) که تحت عنوان بزرگتر بهتر است استفاده شده است.

$$S/N = -10 \times \log(\sum_{i=0}^{n}(Y_i^2)/n) \qquad (۴)$$

با وارد کردن مقادیر بدست آمده از آزمایش در نرم افزار تحلیل آماری مینی تب، نمودارهای سیگنال به نویز بر هر گروه بصورت زیر رسم می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۸ نمودار سیگنال به نویز (الف) گروه اول (ب) گروه دوم

با توجه به نمودارهای بدست آمده، مشاهده می‌شود که تعداد لایه بر پرتابه ۸ گرم بیشترین تاثیر را نسبت به پرتابه ۵ گرم دارد بطوریکه تاثیر آن به میزان۲۹/۸۶ درصد بیشتر می‌باشد. قطر سیم در پرتابه ۵ گرم بیشترین تاثیر را داشته است بطوریکه تاثیر آن به میزان۱۰/۷۰ درصد افزایش یافته است.

میزان تاثیر طول سیم‌پیچ و جنس لوله در پرتابه ۵ گرم به ترتیب برابر ۶/۱۶ برابر و ۱۷/۴۶ برابر شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که برای پرتابه ۵ گرم، قطر سیم، طول سیم‌پیچ و جنس لوله از اهمیت بالاتری نسبت به تعداد لایه برخوردار است زیرا در صورت رعایت نکردن این پارامترها پرتابه اشباه شده و سرعت آن کاهش می‌یابد. با توجه به سیم‌پیچ جدید طراحی شده می‌توان تاثیر پارامترها را مشاهده نمود بطوریکه میزان سرعت در این سیم‌پیچ با پرتابه ۵ گرم به میزان ۱۹/۲۴ درصد بیشتر از سیم‌پیچ سیم ۲میلیمتر، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۲ لایه ، جنس لوله فیبر شده است. همچنین سرعت پرتابه ۸ گرم توسط سیم‌پیچ جدید به میزان۳/۸۵ درصد بیشتر از سیم‌پیچ سیم ۲ میلیمتر، ۳ لایه، طول ۲۰۰ میلیمتر و جنس لوله برنج شده است.

۳-۲- گروه سوم و چهارم

گروه سوم و چهارم مربوط به ولتاژ ۱۰۰۰ ولت و پرتابه ۵ و ۸ گرم می-باشد که با انجام آزمایش‌ها مقدار سرعت و سیگنال به نویز مربوط به هر یک از سیم‌پیچ‌ها بصورت جداول (۶) و (۷) بدست می‌آیند.

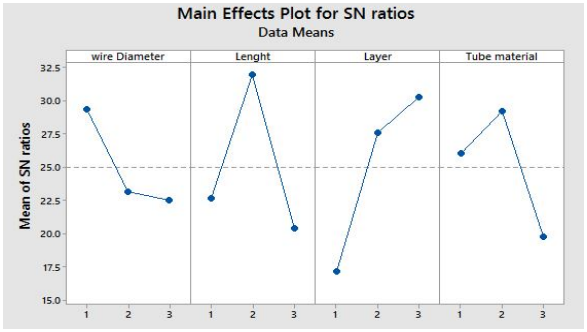
جدول ۶ پارامترهای خروجی بدست آمده برای آزمایش گروه سوم

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۱۰/۲۵۰۱	۲۰/۲۱۴۶
۲	۱۴۳/۸۳۰۹	۴۳/۱۵۷۰
۳	۱۷/۳۰۲۹	۲۴/۷۶۲۴
۴	۸/۱۱۲۶	۱۸/۱۸۳۲
۵	۶۶/۱۷۶۴	۳۶/۴۱۴۱
۶	۵/۵۴۴۱	۱۴/۸۷۶۶
۷	۳۰/۲۸۹۳	۲۹/۶۲۵۸
۸	۶/۶۱۸۵	۱۶/۴۱۵۲
۹	۱۱/۹۶۸۶	۲۰/۲۱۴۶

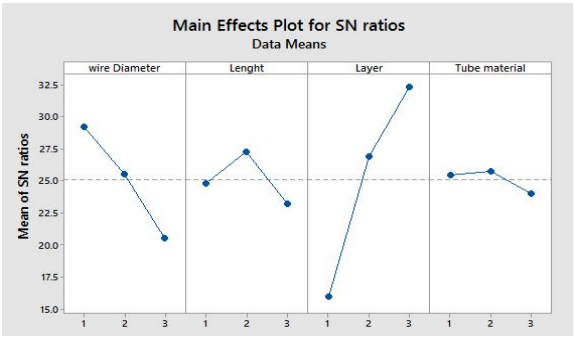
جدول ۷ پارامترهای خروجی بدست آمده برای آزمایش گروه چهارم

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۱۰/۲۷۳۰	۲۰/۲۳۳۹
۲	۴۹/۵۶۵۰	۳۳/۹۰۳۵
۳	۴۷/۶۴۲۳	۳۳/۵۵۹۹
۴	۱۹/۸۶۰۱	۲۵/۹۵۹۶
۵	۵۸/۷۸۷۱	۳۵/۳۸۵۶
۶	۵/۸۰۲۳	۱۵/۲۷۲۰
۷	۲۵/۶۲۰۵	۲۸/۱۷۱۸
۸	۴/۲۰۸۴	۱۲/۴۸۲۳
۹	۱۱/۰۶۱۷	۲۰/۸۷۶۴

نمودارهای سیگنال به نویز برای هر پارامتر و هر سطح آن بصورت شکل(۹) رسم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹ نمودار سیگنال به نویز (الف) گروه سوم (ب) گروه چهارم

با توجه به نمودار پرتابه ۵ گرم و ۸ گرم مشاهده می‌شود که بیشترین تاثیر مربوط به تعداد لایه‌های سیم‌پیچ است که در پرتاب پرتابه ۸ گرم تاثیر تعداد لایه‌ها به میزان ۱/۹۰ از تاثیر تعداد لایه‌ها بر پرتاب پرتابه ۵ گرم بیشتر می‌باشد. همچنین تاثیر پارامتر قطر سیم در پرتاب پرتابه ۸ گرم نیز بیشتر از پرتاب پرتابه ۵ گرم است بطوریکه در پرتابه ۸ گرم به میزان۴۳/۱۲ درصد بیشتر می‌باشد.

با توجه به درصد سایر پارامترها مشاهده می‌شود که تاثیر پارامترها بر روی پرتابه ۵ گرم بیشتر از پرتابه ۸ گرم است بطوریکه تاثیر طول سیم‌پیچ به میزان ۶/۹۸ برابر و جنس لوله به میزان ۱۹/۸۱ بیشتر می‌باشد.این مقادیر نشان می‌دهد که برای پرتابه ۵ گرم، طول سیم‌پیچ و جنس لوله از اهمیت بالاتری نسبت به قطر سیم و تعداد لایه‌ها برخوردار است و در صورت رعایت نکردن این پارامترها پرتابه اشباه شده و سرعت آن کاهش می‌یابد. با توجه به سیم‌پیچ جدید طراحی شده می‌توان تاثیر پارامترها را مشاهده نمود بطوریکه میزان سرعت در این سیم‌پیچ با پرتابه ۵ گرم به میزان۵/۸۰ درصد کمتر از سیم‌پیچ سیم ۲میلیمتر، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۲ لایه ، جنس لوله فیبر شده است. علت آن اشباه شدن پرتابه ۵ گرم می‌باشد و این نشان دهنده این است که هر پرتابه تا یک حد می‌توان انرژی را جذب کند و شتاب بگیرد و در صورت افزایش انرژی پرتابه نه تنها افزایش سرعت ندارد بلکه دچار کاهش سرعت آن نیز می‌شود.

همچنین سرعت پرتاب پرتابه ۸ گرم توسط سیم‌پیچ جدید به میزان۴۱/۵۸ درصد بیشتر از سیم‌پیچ سیم ۲ میلیمتر، ۳ لایه، طول ۲۰۰ میلیمتر و جنس لوله برنج شده است. این افزایش سرعت نشان می‌دهد پرتابه همچنان در حال شتاب گرفتن می‌باشد و هنوز اشباه نشده است.

جهت جلوگیری از اشباه شدن باید عوامل ایجاد میدان مغناطیسی قوی حذف شوند بطوریکه با افزایش ولتاژ پرتابه دچار اشباه نشود. همچنین می-

توان از پرتابه‌های بزرگتر استفاده نمود که استفاده از پرتابه‌های بزرگتر نیازمند نیروی بیشتر می‌باشدکه فراهم کردن این نیرو نیازمند تعداد لایه و ولتاژ بالاتر می‌باشد. که در کل می‌توان بیان کرد هر پرتابه تا یک حد، سرعت آن افزایش می‌یابد.

۳-۳- گروه پنجم و ششم

گروه پنجم و ششم مربوط به ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و پرتابه ۵ و ۸ گرم می-باشد که با انجام آزمایش‌ها مقدار سرعت و سیگنال به نویز مربوط به هر یک از سیم‌پیچ‌ها بدست می‌آید که بصورت جدول (۸) و جدول (۹) نشان داده شده است.

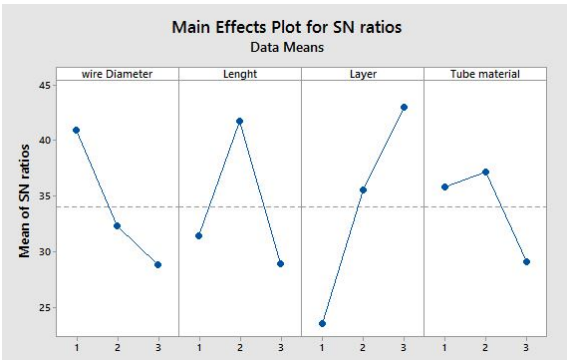
جدول ۸ پارامترهای خروجی بدست آمده برای آزمایش گروه پنجم

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۳۰/۲۹۷۹	۲۹/۶۲۸۳
۲	۴۶۱/۲۲۶۴	۵۳/۲۷۸۳
۳	۹۷/۸۵۲۲	۳۹/۸۱۱۴
۴	۲۰/۸۳۹۵	۲۶/۳۷۷۷
۵	۳۴۲/۹۲۲۳	۵۰/۷۰۳۹
۶	۹/۷۴۹۹	۱۹/۷۸۰۰
۷	۸۲/۶۰۴۵	۳۸/۳۴۰۱
۸	۱۱/۴۸۶۲	۲۱/۲۰۳۵
۹	۲۲/۴۹۵۶	۲۷/۰۴۲۰

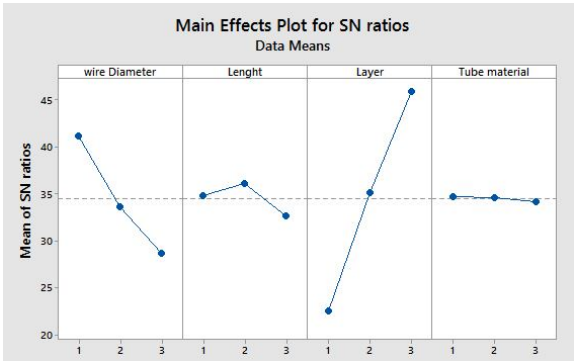
جدول ۹ پارامترهای خروجی بدست آمده برای نتایج گروه ششم

شماره آزمایش	پارامتر خروجی	
	میانگین سرعت اندازه گیری شده	مقدار سیگنال به نویز برای سرعت
۱	۳۰/۷۳۷۰	۲۹/۷۵۳۲
۲	۱۴۸/۷۹۳۹	۴۳/۴۵۱۷
۳	۳۳۲/۲۱۶۶	۵۰/۴۲۸۶
۴	۵۱/۷۷۸۲	۳۴/۲۸۲۹
۵	۲۲۱/۸۶۳۵	۴۶/۹۲۱۷
۶	۹/۸۵۰۵	۱۹/۸۶۹۲
۷	۱۰۴/۸۰۴۶	۴۰/۴۰۷۸
۸	۷/۸۶۳۷	۱۷/۹۱۲۵
۹	۲۴/۰۸۰۹	۲۷/۶۳۳۵

نمودارهای سیگنال به نویز برای هر پارامتر و هر سطح آن بصورت شکل(۱۰) رسم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ نمودارهای سیگنال به نویز (الف) گروه پنجم (ب) گروه ششم

با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که تعداد لایه سیم‌پیچ و قطر سیم در پرتاب پرتابه ۸ گرم بیشتر از پرتابه ۵ گرم تاثیر دارد، بطوریکه مقدار تاثیر تعداد لایه‌های آن به میزان ۳۶/۶۴ درصد و ۱۲/۶۸ درصد بیشتر می‌باشد. تاثیر طول سیم‌پیچ و جنس لوله آن نیز در پرتاب پرتابه ۵ گرم بیشترین تاثیر را نسبت به پرتابه ۸ گرم دارد بطوریکه تاثیر طول سیم‌پیچ به میزان ۱۶/۷۳ برابر و تاثیر جنس لوله به میزان ۱۸۲/۴ برابر بیشتر می‌باشد.

با توجه به نتایج ولتاژ ۱۰۰۰ ولت برای پرتابه ۵ گرم و نتایج بدست آمده از سیم‌پیچ جدید در ولتاژ ۱۵۰۰ ، مشاهده می‌شود که پرتابه نسبت به آزمایش‌های اصلی کاهش یافته است بطوریکه مقدار آن به میزان ۶/۵۲ کمتر از سیم‌پیچ سیم ۲میلیمتر، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۲ لایه ، جنس لوله فیبر شده است. علت آن اشباه شدن پرتابه ۵ گرم می‌باشد و این نشان دهنده این است که هر پرتابه تا یک حد می‌توان انرژی را جذب کند و شتاب بگیرد و در صورت افزایش انرژی پرتابه نمی‌تواند از حداکثر انرژی استفاده کند و شتاب بگیرد.

همچنین سرعت پرتاب پرتابه ۸ گرم توسط سیم‌پیچ جدید و ولتاژ ۱۵۰۰ به میزان ۴/۹۷ درصد کمتر از سیم‌پیچ سیم ۲ میلیمتر، ۳ لایه، طول ۲۰۰ میلیمتر و جنس لوله برنج شده است. این کاهش سرعت نشان می‌دهد پرتابه ۸ گرم نیز اشباه شده است و نمی‌تواند از حداکثر انرژی بوجود آمده استفاده نماید.

با توجه به کل آزمایشات انجام شده می‌توان بیان کرد. تعداد لایه اولین پارامتر مهم برای هر دو پرتابه می‌باشد، بطوریکه هر چه تعداد لایه بیشتر

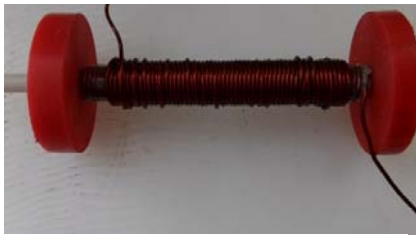
باشد بهتر است ولی با توجه به آزمایش‌ها مشاهده شد که هر پرتابه تا یک حد افزایش سرعت دارد و پس از آن اشباه می‌شود. طول سیم‌پیچ دومین پارامتر مهم برای پرتابه ۵ گرم و قطر سیم‌پیچ دومین پارامتر مهم برای پرتابه ۸ گرم می‌باشد که اهمیت هر کدام در جهت افزایش سرعت و جلوگیری از

اشباه پرتابه می‌باشد. سومین پارامتر قطر سیم برای پرتابه ۵ گرم و طول سیم‌پیچ برای پرتابه ۸ گرم می‌باشد که مجدداً جهت جلوگیری از اشباه شدن پرتابه اهمیت دارند. جنس لوله نیز آخرین پارامتر مهم می‌باشد که تاثیر کمتری نسبت به سایر پارامترها دارد ولی اهمیت کلیه پارامترها در ترکیب آنها می‌باشد بطوریکه در صورت انتخاب نشدن صحیح پرتابه نمی‌تواند از حداکثر انرژی استفاده نماید.

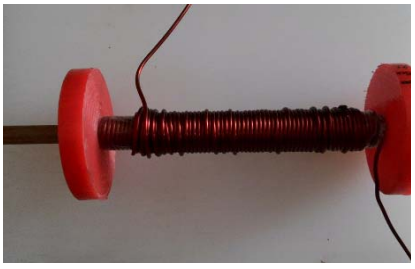
جهت جلوگیری از اشباه شدن باید عوامل ایجاد میدان مغناطیسی قوی حذف شوند بطوریکه با افزایش ولتاژ پرتابه دچار اشباه نشود. همچنین می‌توان از پرتابه‌های بزرگتر استفاده نمود که استفاده از پرتابه‌های بزرگتر نیازمند نیروی بیشتر می‌باشدکه فراهم کردن این نیرو نیازمند تعداد لایه و ولتاژ بالاتر می‌باشد که باعث افزایش هزینه می‌شود که در کل می‌توان بیان کرد هر پرتابه تا یک حد، سرعت آن افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه سیم ۲ میلیمتر بهترین سیم در سه سطح ولتاژ می‌باشد، یکی مشکلات این سیم‌پیچ‌ها، ضعیف بودن سیم‌های آن در معرض میدان مغناطیسی می‌باشد که پس از چند بار آزمایش، تغییر شکل می‌دهند.

در شکل(۱۱) سیم پیچ سیم ۲ میلیمتر ، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۳ لایه و جنس لوله پلاستیک و در شکل (۱۲) سیم پیچ سیم ۲ میلیمتر ، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۳ لایه ، جنس لوله فیبر ، بعد از انجام تست های بهینه سازی نشان داده شده است که جهت جلوگیری از این تغییر شکل سیم‌پیچ‌ها می‌توان آنها را محلول‌های اپکسی قرار داد.



شکل ۱۱ سیم پیچ جدید ساخته شده با مشخصات سیم ۲ میلیمتر ، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۳ لایه و جنس لوله پلاستیک بعد از انجام آزمایش‌ها



شکل ۱۲ سیم پیچ جدید ساخته شده با مشخصات سیم ۲ میلیمتر ، طول ۱۵۰ میلیمتر ، ۳ لایه و جنس لوله فیبر بعد از انجام آزمایش‌ها

با توجه به توضیحات داده شده و گروه‌های آزمایش شده و استفاده از نرم افزار مینی تب مقدار بهینه برای هر سیم پیچ بصورت جدول (۱۰) مشخص شده است.

با توجه به جدول، نرم افزار مینی تب ابتدا یک مقدار سرعت را بر اساس سیم‌پیچ پیشنهادی پیش‌بینی می‌کند. با ساخت سیم‌پیچ پیشنهادی و انجام آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار پیش‌بینی شده دارای خطای کمی می‌باشد.

جدول ۱۰ نتایج نهایی بدست آمده از سیم‌پیچ‌های پیشنهادی

شماره گروه	مشخصات سیم-پیچ پیشنهادی	مقدار سرعت پیش‌بینی شده	مقدار سرعت اندازه‌گیری شده	درصد خطا
اول	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۲۱/۲۹۰۹	۲۱/۸۴۳۲	۲/۵۹
دوم	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۱۸/۲۸۷۱	۱۸/۷۴۸۵	۲/۵۲
سوم	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۱۲۷/۱۱۶۴	۱۳۵/۴۸۳۸	۵/۵۸
چهارم	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۶۶/۷۵۲۷	۷۰/۱۷۷۴	۵/۱۳
پنجم	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۴۶۷/۴۹۹۰	۴۳۱/۱۳۵۳	۷/۷۸
ششم	سیم ۲ میلیمتر، ۳لایه، طول ۱۵۰ میلیمتر، جنس لوله پلاستیک	۲۹۷/۹۴۹۰	۳۱۵/۷۰۱۸	۵/۹۵

با توجه به جدول فوق علت انتخاب مشخصات سیم‌پیچ‌های پیشنهادی فوق بصورت زیر بیان می‌شود:

– تعداد لایه‌ها باعث تمرکز بیشتر میدان مغناطیسی می‌شوند هر چقدر تعداد لایه‌های سیم پیچ بیشتر باشند با توجه به جدول(۱-۵) سرعت بیشتری پرتابه می‌گیرد که علت آن مستقیم بودن رابطه میدان مغناطیسی با تعداد دور می‌باشد.

– طول سیم پیچ نیز از پارامترهای تاثیر گذار دیگری می‌باشد که با توجه به اینکه این آزمایش‌ها در سه نوع طول ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلیمتر ،

طراحی شده بودند و با توجه به پیشنهادهای تاگوچی ، طول سیم پیچ در صورت کم بودن و زیاد بودن از حد مشخص خود باعث کاهش میزان سرعت می‌شود از این جهت طول ۱۵۰ میلیمتر بهترین طول جهت افزایش سرعت می‌باشد.

– جنس لوله با توجه به اینکه اهمیت کمتری نسبت به سایر پارامترها دارد باید به درستی انتخاب شود به عنوان مثال در ولتاژهای ۵۰۰ ولت میدان مغناطیسی ضعیف بوده باعث اشباه شدن پرتابه‌ها نمی‌شود ولی در ولتاژ ۱۰۰۰ ولت که باعث اشباه می‌شود روش تاگوچی جنس فیبر را به منظور جلوگیری از اشباه می‌دهد که هر چند این تاثیر بسیار کم می‌باشد و باز هم پرتابه اشباه شده است. ولی در ولتاژ ۱۵۰۰ و پرتابه ۸ گرم با توجه به اینکه در ولتاژ قبلی جنس فیبر را پیشنهاد داده بود در این ولتاژ نیز می‌بایست جنس فیبر انتخاب می‌شد ولی با توجه به اینکه این دو مقدار نزدیک به یکدیگر می‌باشند و با توجه به اینکه سرعت پرتابه ۴/۵ برابر افزایش و پرتابه بزرگتر می‌باشد جنس پلاستیک ارائه می‌شود ولی در پرتاب پرتابه ۵ گرم با توجه به اینکه افزایش سرعت به میزان ۳ برابر و پرتابه کوچکتر می‌باشد جنس فیبر پیشنهاد شده است ولی در هر دو حالت پرتابه اشباه شده و سرعت آن کاهش یافته است.

با توجه به جدول(۱۰) میزان خطا در ولتاژهای ۵۰۰ ولت کمترین و میزان خطا در ولتاژ ۱۵۰۰ بیشترین مقدار می‌باشد که علت آن خطا در اندازه گیری سرعت‌های بالا می‌باشد. همچنین خطای سرعت اندازه‌گیری شده توسط پرتابه‌های ۵ گرم از خطای پرتابه‌های ۸ گرم بیشتر می‌باشد که علت آن کوچک‌تر بودن آنها می‌باشد و سنسور دستگاه سرعت‌سنج ممکن است دچار خطای بیشتری در مقابل پرتابه‌های ۸ گرم شود.

۴- نتیجه‌گیری

- با افزایش ولتاژ میزان میدان مغناطیسی به دلیل ثابت بودن مقاومت سیم‌پیچ افزایش می‌یابد و باعث می‌شود نیروی بیشتری به پرتابه اعمال شود و پرتابه به سرعت بیشتری برسد.

- با افزایش طول سیم‌پیچ به ۲۰۰ میلیمتر به دلیل اینکه نیروهای عکس العمل مانع افزایش سرعت می‌شوند سرعت در این سیم‌پیچ‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در طول ۱۰۰ میلیمتر به دلیل کوتاه بودن طول اعمال نیرو پرتابه نمی‌تواند سرعت مناسب را بگیرد به همین جهت طول ۱۵۰ میلیمتر مناسب-ترین طول می‌باشد.

- با افزایش تعداد لایه میدان مغناطیسی قوی‌تری تشکیل می‌گردد و باعث می‌شود که پرتابه تا زمانی که اشباع نشود سرعتش افزایش یابد.

- جنس لوله رابط بین سیم‌پیچ و پرتابه می‌باشد و جنس پلاستیک میدان مغناطیسی را بهتر از خود عبور می‌دهد و باعث می‌شود تمام انرژی را به پرتابه منتقل کند. ولی در صورت افزایش انرژی الکترومغناطیس باید جنس لوله به گونه‌ای انتخاب شود که از اعمال تمامی نیرو به پرتابه در لحظه نخست جلوگیری کند زیرا ممکن است پرتابه در همان لحظه ابتدایی اشباع شود.

- پرتابه های بزرگتر وزن بیشتری دارند ولی به دلیل اینکه در معرض میدان‌های قوی‌تر اشباع می‌شوند می‌توان آنها به‌وسیله میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر به شتاب بالاتری رساند. به همین منظور جهت افزایش سرعت می-بایست علاوه بر در نظر گرفتن سیم‌پیچ پرتابه را بزرگتر انتخاب نمود تا در صورت قرارگیری در میدان مغناطیسی قوی‌تر اشباع نشود و سرعت آن افزایش یابد.

- جهت حفظ آرایش سیم‌پیچ‌ها پس از شتاب‌دهی باید آنها در محلول-های اپکسی قرار داد تا در لحظه اعمال نیرو به پرتابه، آرایش آنها تغییری نکند.

۵- مراجع

[1] Herbert W. Yankee, 1979 , Manufacturing Processes, Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, ISBN0135555574 ,pp 345,528, 523.

[2] Daehn G. S., 2006 “High Velocity Metal Forming ASM Handbook” , Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming, ASM International , Materials Park, Ohio ,pp. 405-418.

[3] Psyka, V , Rischa, D , Kinseyb, B.L. , Tekkayaa, A.E. , Kleinera, M. “Electromagnetic forming-A review”, Journal of Materials Processing Technology ,volume211,2011, 787-829.

[4]Shang , J. , Wilkerson , L. , Hatkevich , S. , “ Hemming of Aluminum Alloy sheets using Electromagnetic Forming “ , Journal of materials engineering and performance , 2011 , Volume 20 , Issue 8 , pp.1370-1377.

[5]Xiong , W, Wang , W, Wan , M , Li , X , Geometric issues in V bending electromagnetic forming process of 2024 –T3 aluminum alloy , journal of manufacturing process , 2015, volume 19, pp.171-182.

[6]Xiauhui , Cui , Jianhua Mo, JianJun Li , xiaoting xiao , Bo Zhou , Jinxiu Fang , “Large-Scale Sheet deformation process by electromagnetic incremental Forming combined with stretch Forming“ , Journal Of material and processing Technology , 2016 , Volume 237 , pp.139.154.

[7] Karl P. Williams , “Electromagnetic Coil Gun Project” , Nuts & Volts Magazine , March 2008.

[8]Bohmuil, S. , Valdamir , K. , Electromagnetic Coil gun – Design and Construction , mechatronic 2013 , 2014 , pp. 87-93.

[۹] گرزن ، احسان ، " بررسی عددی و تجربی روش الکترومغناطیس در شکل دهی لوله به طرف داخل به کمک نرم افزار های اباکوس و ماکسول"،دوازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۹۰، دانشگاه تهران .

[10] Fallahi, A.R. ,Ebrahimi, H., Farzin, M. , "Numerical and experimental investigation of inward tube forming by electromagnetic forming" , Advanced Material Research ,2012, Volume 383-390,pp.6710-6716 .

[۱۱]کاشانی ، مجتبی ، خادمی ، رامین ، ابراهیمی ، حسین ،" شبیه سازی کوپل شکل دهی الکترومغناطیس لوله توسط نرم افزار های انسیس و ال اس داینا و مقایسه با نتایج تجربی " ،مجله مهندسی مکانیک مدرس ، ۱۳۹۴ ، شماره ۵ ، ۱۵۹-۱۶۴.

[۱۲] محمودی فیل آبادی ، رضا ، ۱۳۹۳ ، "شبیه سازی دو بعدی شکل دهی الکترومغناطیس ورق آلومنیوم ، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید" ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ، دانشکده فنی مهندسی – گروه مکانیک

[13] http://www.coilgun.eclipse.co.uk اخرین دسترسی ۵ تیر ۱۳۹۵

[14] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová (2009). Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley and Sons. p. 232. ISBN 0-470-69516-1

[15] Metglas.com تاریخ آخرین دسترسی ۱۸ تیر ۱۳۹۵

[16] Ee.surrey.ac.uk تاریخ آخرین دسترسی ۱۹ تیر ۱۳۹۵

[17] Nickel-alloys.net تاریخ آخرین دسترسی ۱۹ تیر ۱۳۹۵

[18] Ndt.net تاریخ آخرین دسترسی ۲۰ تیر ۱۳۹۵

[19] J-Mag Designer (2014)