

تحلیل حساسیت سوپل بر پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی نیروی پسماند زدا در فولاد کم کربن

محمدعلی سجادی هزاوه^{۱*}، محسن شاکری^۲، علی جباری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، ایران، اراک، دانشگاه اراک، mohammadali.sajadi79@gmail.com

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران، بابل، دانشگاه نوشیروانی بابل، shakeri@nit.ac.ir

۳- دانشیار، دانشگاه اراک، ایران، اراک، دانشگاه اراک، a-jabbari@araku.ac.ir

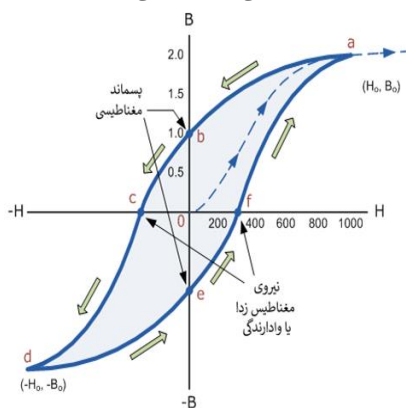
چکیده

یکی از روش‌های مدرن ماشین کاری امروزی ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی است. به دلیل اینکه قطعات تولیدی با این روش از دقت بالایی برخوردار هستند، امروزه این روش به خصوص در صنایع هوافضا بسیار مورد توجه واقع شده است. از میان پارامترهای ورودی در این روش، پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان و ولتاژ منطقه گپ ورودی‌های مهمی از نظر تأثیر بر خواص قطعات آهنی ماشین کاری شده هستند. جهت بهبود خواص قطعات تولیدی، لازم است ورودی‌ها در بهترین حالت تنظیمی خود قرار گیرند. از آنجایی که تا کنون مطالعات زیادی روی خواص مکانیکی قطعات صورت پذیرفته است، در این مقاله تمرکز روی بهبود نیروی پسماند زدای مغناطیسی قطعات فولادی کم کربن است. لازم به ذکر است از خواص مغناطیسی مهم فلزات که بسیار در راندمان کار افزارهای الکتریکی مؤثر است، مقدار نیروی پسماند زدای قطعات تولیدی است. به منظور تحلیل کیفی و کمی دقیق اثرات پارامترها در خروجی یا همان نیروی پسماند زدا برای اولین بار از تحلیل حساسیت سوپل، در این روش ماشین کاری مدرن استفاده شده است. نتایج نشان دادند که پارامتر زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر را در کاهش نیروی پسماند زدای مغناطیسی داشته، و بعد از آن به ترتیب جریان و زمان روشنی پالس مؤثر بوده‌اند. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به بی‌اثر بودن ولتاژ منطقه گپ اشاره نمود.

واژه‌های کلیدی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، تحلیل حساسیت سوپل، نیروی پسماند زدا، فولاد کم کربن

به آهن خالص اشاره کرد. از آنجایی که تولید آهن خالص بسیار گران بوده و استفاده از آن در تولیدات صنعتی مقرون به صرفه نمی‌باشد، استفاده از فولادهای بسیار کم کربن به جای آهن خالص مورد توجه است. جهت ساخت قطعات مغناطیسی از قبیل حسگرها، عملگرها و غیره مقادیری نظیر وادارندگی مغناطیسی^۱ یا همان نیروی پسماند زدا، مغناطش اشباع^۲، نفوذپذیری مغناطیسی^۳ و غیره بسیار مهم هستند [1]. در این بین جهت راندمان هرچه بیشتر این قطعات نیروی پسماند زدا اهمیت ویژه‌ای دارد. اثرات مکانیکی و حرارتی می‌توانند باعث تغییراتی در خواص مغناطیسی فولاد شوند. روش‌های سنتی مختلف تولید از قبیل فورج و ماشین کاری جهت ساخت سنسورها استفاده می‌شود و پژوهش‌های زیادی بر روی خواص قطعات تولیدی با روش‌های سنتی صورت گرفته است. از طرفی مطالعات کمتری در ارتباط با خواص مغناطیسی قطعات تولیدی با روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام گرفته است. از میان خواص مغناطیسی قطعات، مقدار نیروی کمینه پسماند زدا باعث کاهش مصرف کار افزارهای الکتریکی^۴ می‌شود [2]. شکل ۱ حلقه پسماند مغناطیسی^۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نیروی پسماند زدای مغناطیسی در حلقه پسماند.

در دهه اخیر تمرکز بر روی خواص مغناطیسی قطعات بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. امروزه اعتقاد بر این است فلزات مورد استفاده در صنایع پیشرفته بدون در نظر گرفتن خواص مغناطیسی آنها غیر قابل تصور

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد فلزات با خواص هم‌زمان مکانیکی و مغناطیسی مناسب تأثیر اقتصادی بسیار بالایی در تولیدات صنعتی پیشرفته به‌ویژه در صنایع هوافضا دارد. از میان فلزات با کارکردهای بالای مغناطیسی می‌توان

4 Electrical Applications

5 Hysteresis Loop

1 coercivity

2 Magnetization saturation

3 permeability

- ✓ بررسی تحلیل حساسیت آماری سوبل
- ✓ طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی

۱-۲- بررسی تحلیل حساسیت آماری سوبل

تحلیل حساسیت ابزاری مهم و حیاتی جهت بهبود کیفیت است. این ابزار چه در زمانی که مدل یا دستگاه وظیفه خود را به خوبی انجام می‌دهد و چه در زمانی که دستگاه یا مدل دارای عملکرد مطلوب نمی‌باشد بسیار مؤثر است. اهداف عمده آنالیز حساسیت عبارت‌اند از:

- الف- یافتن پارامترهایی که دارای اثر متقابل هستند. همچنین تأثیر هر یک از آنها بر روی خروجی‌ها مدنظر است.
- ب- کاهش پارامترها و ساده‌سازی مدل به وسیله یافتن پارامترهای حساس و غیرحساس.

ج- به حداقل رساندن میزان عدم قطعیت [10].

روش تحلیل حساسیت سوبل یک روش آماری بوده که بر پایه واریانس پارامترهای ورودی سیستم روی متغیرهای خروجی سیستم شکل گرفته است. به کمک این روش می‌توان اثر پارامترهای ورودی را بر خروجی سیستم مورد آزمایش محاسبه نموده و از آن برای استفاده در معادلات حاکم بر سیستم، بهینه‌کردن و همچنین مشخص کردن میزان تأثیرگذاری جمعی پارامترهای ورودی استفاده نمود. روش سوبل در مقایسه با روش‌های آماری دیگر روشی بسیار دقیق محسوب می‌شود و به همین دلیل در این پژوهش از این روش استفاده شده است. جهت شرح این روش، ابتدا فضای متغیرهای ورودی Ω تعریف می‌شود:

$$\Omega^k = (X | 0 \leq x_i \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

این دیدگاه برگرفته از تابع $f(X)$ است که از مجموع توابع معادله (۲) محاسبه می‌شود. در سال ۱۹۹۰ یک فرمول کلی بر اساس تفکیک‌ها در انتگرال‌های چندبعدی استفاده شده است که در معادله (۳) آمده است.

$$f(x_1, \dots, x_k) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,k}(x_1, \dots, x_k) \quad (2)$$

$$\int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_k} = 0, \quad \text{if } 1 \leq k \leq s \quad (3)$$

f_0 عدد ثابت و انتگرال هر مجموع بر حسب متغیرهای خودش صفر است. و می‌توان اثبات کرد که مجموع‌های فوق، متعامد بوده و حاصل ضرب هر جفت غیرمشابه آن، مطابق معادله (۴) برابر صفر است. همچنین f_0 به کمک معادله (۵) تعریف می‌شود.

$$\int_{\Omega^k} f_{i_1, \dots, i_s} f_{j_1, \dots, j_s} dx = 0 \quad (4)$$

$$f_0 = \int_{\Omega^k} f(x) dx \quad (5)$$

سوبل در سال‌های بعد نشان داد که ترکیب‌های فوق یکتا و همه ترم‌های فرمول $f(X)$ از طریق انتگرال‌های چندگانه محاسبه می‌شوند.

است [3]. تا کنون پژوهش‌های زیادی در ارتباط با اثر پارامترهای مختلف فرایندهای ساخت و پست پردازش^۶ بر خواص مغناطیسی مواد فرومغناطیس مورد مطالعه قرار گرفته است. یآوری و همکاران اثر پارامترهای ورودی ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی فولاد بسیار کم کربن را مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که مقادیر ۱۰۰ میکروثانیه برای پالس آن تایم و ۹۰ میکروثانیه برای پالس آف تایم، ۱۲ آمپر برای شدت جریان و مقدار ۸۰ ولت برای گپ ولتاژ کمترین مقدار نیروی پس ماند زدا را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند [4]. چونگان هو و همکاران اثر عملیات آنیل بر خواص مغناطیسی فولاد کم کربن را مورد پژوهش قرار دادند. دانه‌بندی خوب و منحنی هیستریزس با پسماند کم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد و تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه خواهد داشت. با افزایش سرعت سرد کردن می‌توان به خواص مغناطیسی خوبی برای فولاد کم کربن دست‌یافت [5]. تاکاهاشی و همکارانش ارتباط خواص مکانیکی و مغناطیسی را در عملیات نوردکاری سرد فولاد کم کربن را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که با انجام این عملیات، استحکام و سختی بالاتر رفته و در نتیجه موجب کاهش نیروی پسماند زدا در نمونه‌های نورد شده می‌شود [6]. ایروداک و همکارانش رفتار مغناطیسی یک فولاد غیر جهت‌دار حاوی سیلیسیوم را در تغییر فرم کششی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش خواص مغناطیسی پس از تغییر فرم کششی اندازه‌گیری شد. با استفاده از تغییرات حلقه پسماند می‌توان اثر اعمال تنش کششی در نمونه‌ها را مشاهده کرد. همچنین کاربرد این روش برای آزمایش‌های غیر مخرب مورد بحث قرار گرفت [7]. بلاندت و همکارانش طراحی عددی آزمایش‌ها را جهت بهبود طراحی و کیفیت محصول مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از تحلیل حساسیت نشان دادند فرآیندهایی که نیاز به حجم محاسباتی زیادی برای اجرای شبیه‌سازی داشته‌اند با استفاده از طراحی عددی آزمایش‌ها با کاهش حجم محاسبات مواجه شده است [8]. آنتونی و همکارانش توسعه روش طراحی آزمایش‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان نشان دادند که طراحی آزمایش‌ها یک رویکرد پیشرو برای محاسبات و مطالعات مهندسی است. همچنین شبیه‌سازی با کامپیوتر امری ضروری بوده و در فرایند طراحی آزمایش‌ها بسیار حیاتی است [9]. سباستین روکس و همکاران روش فیلتر مبتنی بر آنالیز حساسیت جهانی طراحی کردند. این روش با توجه به متغیرهای ورودی و نحوه عملکرد آنها، تأثیر ورودی‌ها را بر بسیاری از فاکتورها از قبیل ساختمان انرژی و مطالعات محیطی بررسی کرده است. در این پژوهش برای اولین بار تحلیل حساسیت سوبل جهت مشخص کردن اثر پارامترهای ورودی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر نیروی پس‌ماند زدا نمونه‌ها به صورت تکی و جمعی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص کردن دقیق اثر متغیرهای ورودی بر خروجی، می‌تواند باعث کاهش آزمایش‌ها یا تمرکز بیشتر روی پارامترهای مهم‌تر شود. بعد از مدل‌سازی مجدد پژوهش انجام شده توسط یآوری و همکاران معادله رگرسیون مربوط به نیروی پسماند زدا استخراج و تحلیل حساسیت سوبل روی آن انجام گرفت.

۲- مدل‌سازی

در این قسمت مدل‌سازی از دو بخش تشکیل شده است:

⁶ Post processing

پارامتر باشد، تأثیر مقدار حساسیت پارامتر ۱ که با $TS(1)$ نشان داده می‌شود، برابر است با:

$$TS(i) = s_1 + s_{1,2} + s_{1,3} + s_{1,2,3} \quad (14)$$

در اینجا S_1 اندیس حساسیت درجه یک برای فاکتور اول بوده و S_{ij} که در آن ز مخالف یک است، اندیس حساسیت درجه ۲ فاکتور اول است و این اندیس اثر برهم‌کنش فاکتور اول و فاکتورهای دیگر را مشخص می‌کند. کلیه محاسبات فوق بر اساس اندیشه‌های سوبل است. همچنین اگر به تعداد k فاکتور وجود دارد که این دو فاکتور در ۲ زیرمجموعه قرار می‌گیرند، می‌توان هر زیرمجموعه را به طور مشخص به‌عنوان یک فاکتور جدید فرض کرد. نهایت ترکیب کلی $f(x)$ در معادله شماره (۱۵) بیان می‌گردد:

$$f(x) = f_0 + f_1(V) + f_2(w) + f_{12}(V, W) \quad (15)$$

$$\int f_1 dV = \int f_2 dW = \int f_{12} dV = \int f_{12} dW = 0 \quad (16)$$

$$D_v = \int f_1^2 dV \quad D_w = \int f_2^2 dW \quad (17)$$

$$D_{vw} = \int f_{12}^2 dV dW \quad (17)$$

واریانس مجموع خروجی‌ها برابر است با:

$$D_v^{total} = D_v + D_{Wv} = D - D_w \quad (18)$$

$$D = D_v + D_w + D_{Wv} \quad (19)$$

در اینجا اگر اثر واریانس V روی واریانس خروجی 0.8 و یا بیشتر باشد، در این صورت w را ثابت فرض می‌کنیم. به این دلیل که می‌خواهیم تأثیر حساسیت کل V را محاسبه کنیم [11].
اندیس حساسیت کل برای V به‌صورت زیر است:

$$TS(V) = \frac{D_v^{total}}{D} \quad (20)$$

۲-۲ - طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی

یکی از روش‌های مناسب و ساده در بهینه‌سازی مهندسی روش تاگوچی است. این روش مقادیر انحراف را در یک فرایند از طریق یک طراحی آزمایش قوی کاهش داده و هدف کلی آن تولید باکیفیت بالا و کمترین هزینه برای است. تاگوچی روشی را برای بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر میانگین و واریانس یک فرایند توسعه داده به‌وسیله آن می‌توان کیفیت تابع پذیری یک فرایند را نشان داد [12]. جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها و همچنین بررسی اثرات متقابل پارامترها بر خروجی، از روش آزمایش تاگوچی (L9) استفاده شده است [4]. پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایش به روش تاگوچی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

❖ زمان روشنی پالس برحسب میکروثانیه (ON Time)

❖ زمان خاموشی پالس برحسب میکروثانیه (OFF Time)

❖ شدت جریان جرقه برحسب آمپر (Ip)

❖ ولتاژ منطقه گپ (Gap Voltage)

سطوح پارامترها باتوجه به جدول ۱ مشخص و نتایج مطابق شکل ۲ توسط نرم‌افزار مینی تب استخراج شده است:

$$f_i(x_i) = -f_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) dx_{\sim i} \quad (6)$$

$$f_{ij}(X_i, X_j) = -f_0 - f_i(x_i) + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) X_{\sim ij} \quad (7)$$

$$D = \int_{\Omega^k} f^2(x) dX - (f_0)^2 \quad (8)$$

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_{\Omega^k} f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dX - (f_0)^2 \quad (9)$$

به‌نحوی که $dx_{\sim i}$ انتگرال روی کلیه متغیرها به جز X_i و $dx_{\sim ij}$ انتگرال روی کلیه متغیرها به جز X_i و X_j می‌باشد (معادلات ۷). به همین شکل می‌توان فرمول پیوسته برای درجات بالاتر را دست آورد. همچنین اندیس حساسیت بر پایه واریانس به‌صورت معادله (۸) بیان می‌شود که D معادل واریانس $f(X)$ است. واریانس‌های جزئی نیز از معادله (۹) محاسبه می‌شوند.

البته فرم کلی واریانس‌ها به‌صورت رابطه (۱۰) است که قسمت دوم عبارت به دلیل صفر بودن هر انتگرال و توان ۲ آن از معادلات حذف شده‌اند.

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (10)$$

زمانی که $s = 1, \dots, k$ و $1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k$ است، بعد از مربع سای و انتگرال گیری از معادله ۲ روی Ω^k و در نظر گرفتن معادله (۴)، معادله (۱۱) به دست می‌آید:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} D_{ij} + \dots + D_{1,2, \dots, k} \quad (11)$$

۲-۱-۲ - اندیس حساسیت:

اندازه حساسیت $S_{1,2, \dots, k}$ از تقسیم واریانس هر دسته متغیر به واریانس کل به دست می‌آید:

$$S_{1,2, \dots, k} = \frac{D_{1,2, \dots, k}}{D} \quad \text{for } 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k \quad (12)$$

S_i را به‌عنوان اندیس حساسیت درجه یک برای متغیر X_i نام‌گذاری می‌کنند. این اندیس نشان‌دهنده تأثیر میزان حساسیت X_i بر روی خروجی است. کسر رابطه نیز مشارکت X_i را در واریانس $f(x)$ نشان می‌دهد. همچنین S_{ij} اندیس حساسیت درجه ۲ نامیده می‌شود که تأثیر برهم‌کنش ($i \neq j$) را روی واریانس کل بیان می‌کند [11]. می‌توان از معادله (۱۳) به دست آورد که جمع کل اندازه حساسیت‌ها برابر یک است.

$$D = \sum_{i=1}^k S_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} S_{ij} + \dots + S_{1,2, \dots, k} = 1 \quad (13)$$

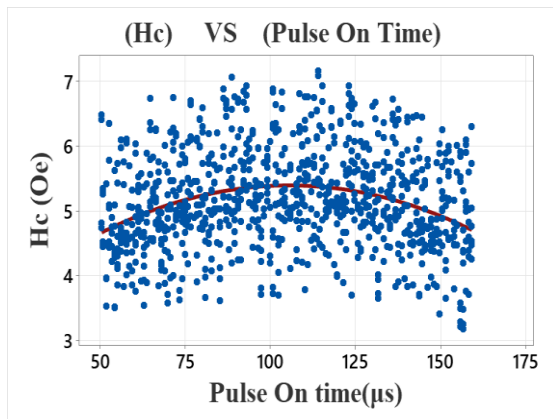
۳-۱-۲ - اندیس حساسیت کل

همان‌طور که از اسم آن پیداست از جمع همه اندیس‌های حساسیت به دست می‌آید و شامل پارامتر مورد سؤال است. به‌عنوان مثال اگر مدل دارای سه

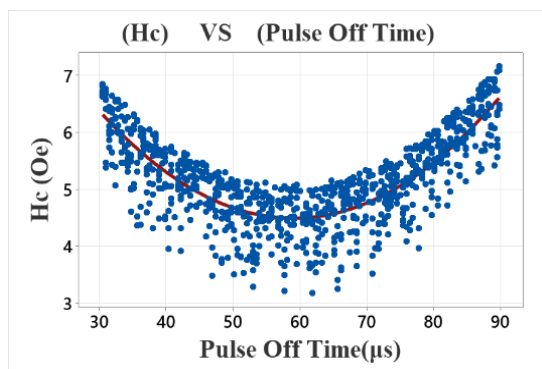
در این قسمت به بررسی نمودارهای تحلیل حساسیت پرداخته و اثرات پارامترهای ورودی را روی نیروی پسماند زدا، همچنین تأثیر کمی پارامترها را به صورت تکی و جمعی بر نیروی پسماند زدا بررسی می‌کنیم.

۳-۱ اثر کیفی و کمی پارامترهای ورودی بر روی نیروی پسماند زدا

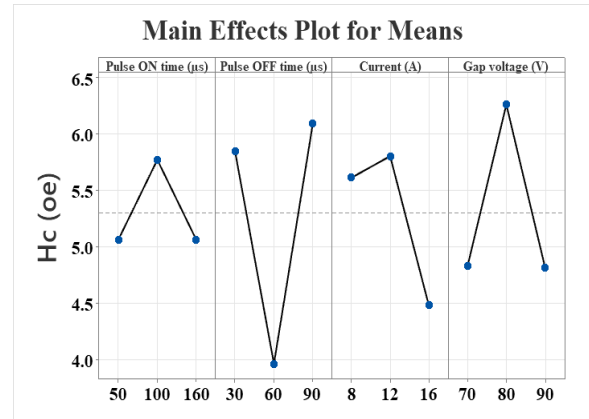
همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است با استفاده از تحلیل حساسیت سوبل رابطه نیروی پسماند زدا و زمان روشنی پالس مشخص شد. بر اساس این نمودار با زمان روشنی ۵۰ میکروثانیه مقدار نیروی پسماند زدا در کمترین مقدار خود قرار دارد. شکل ۴ نشان می‌دهد در زمان خاموشی پالس به مدت ۶۰ میکروثانیه کمترین مقدار نیروی پسماند زدا به دست می‌آید. در شکل ۵ با جریان ۱۶ آمپر نیز کمترین مقدار نیروی پسماند زدا به دست می‌آید. نکته بسیار مهم در این پژوهش مطابق شکل ۶ بی‌اثر بودن ولتاژ منطقه گپ بر نیروی پسماند زدا می‌باشد.



شکل ۳- اثر پالس روشنی بر پسماند زدا



شکل ۴- اثر پالس خاموشی بر پسماند زدا



شکل ۲- اثر پارامترها در نیروی پسماند زدا

جدول ۱: پارامترها و سطوح هریک برای استفاده در روش تاگوچی

سطح	زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	زمان خاموشی پالس (میکروثانیه)	شدت جریان (آمپر)	ولتاژ
۱	۵۰	۳۰	۸	۷۰
۲	۱۰۰	۶۰	۱۲	۸۰
۳	۱۶۰	۹۰	۱۶	۹۰

۳-۲ فاکتور خروجی

چهار متغیر ورودی به وسیله طراحی آزمایش به روش تاگوچی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و اثر هر کدام از آنها به تنهایی و جمعی بر فاکتور خروجی مورد تحلیل قرار گرفته است.

نیروی پسماند زدا (Hc):^۷

این فاکتور در واقع نیرویی است که مقدار شار مغناطیسی باقی مانده در قطعه را صفر می‌کند. جهت اکثر کار افزارها الکتریکی نیروی پسماند زدا حداقل بسیار مطلوب بوده و باعث کاهش مصرف انرژی و به تبع آن بالا رفتن راندمان دستگاه می‌شود.

$$HC = 5.02 + 0.0493N + 0.0001V - 0.262F + 0.99A - 0.000235N^2 + 0.00222F^2 - 0.0471A^2$$

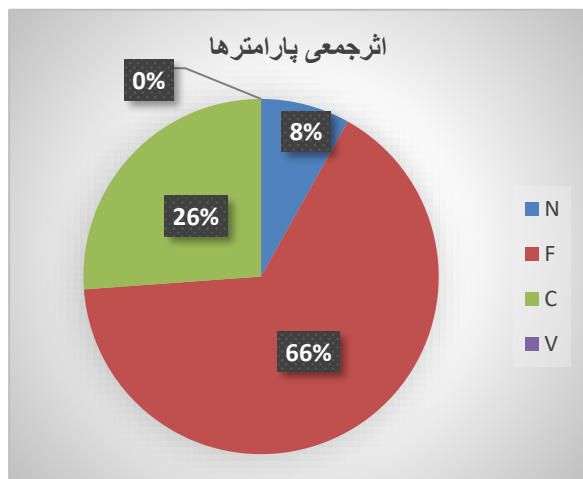
در معادله بالا N نمایانگر زمان روشنی پالس، F جهت نمایش زمان خاموشی پالس، V نشان دهنده ولتاژ منطقه گپ و A نشان دهنده جریان است. معادله فوق با کمترین مقدار عدد پی^۸ ایجاد شده است.

۳- شبیه سازی

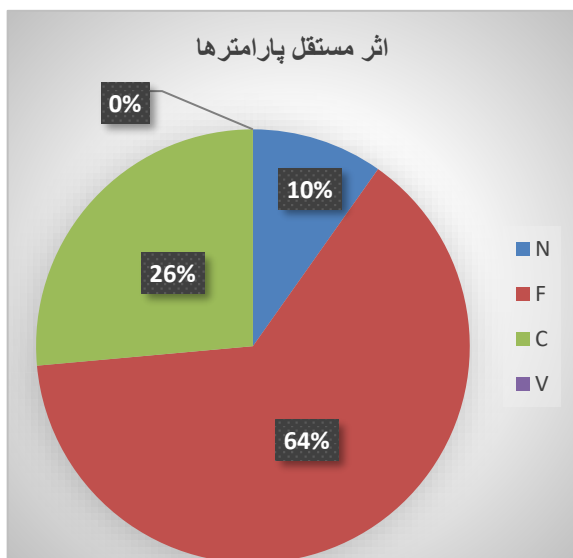
⁸ P Value

⁷ Coercivity force

در صنعت، هرچه مقدار نیروی پسماند زدا کمتر باشد قطعه داری خواص مغناطیسی مطلوب‌تری است. صورت پذیرد.



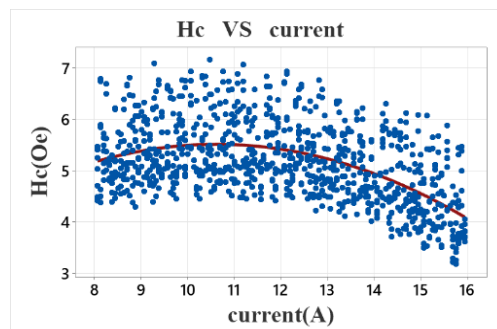
شکل ۷- اثر جمعی پارامترها



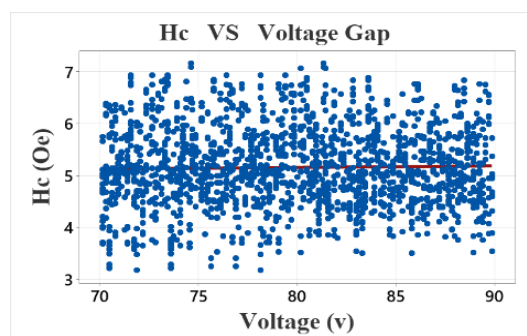
شکل ۸- اثر مستقل پارامترها

۵- مراجع

- [1] E. Ferrara, E. Olivetti, F. Fiorillo, E. Forton, L. Martino, and L. Rocchino, "Microstructure and magnetic properties of pure iron for cyclotron electromagnets," *J. Alloys Compd.*, vol. 615, no. S1, pp. S291-S295, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.217.
- [2] "Magnetic Materials," 2011, pp. 117-158. doi: 10.1201/b10979-4.
- [3] [26] NICOLA A. SPALDIN et al., "MAGNETIC MATERIALS." ISBN 13 978



شکل ۵- اثر جریان بر پسماند زدا



شکل ۶- اثر ولتاژ بر پسماند زدا

مشخص است که پاسخ‌های به‌دست‌آمده به‌وسیله تحلیل حساسیت سو بول با نمودار خروجی از نرم افزاری مینی تب (شکل ۴) مطابقت داشته علاوه‌بر آن کیفیت اثرگذاری پارامترهای ورودی را در جواب نهایی را به طور دقیقی نمایش می‌دهد. همچنین تحلیل کمی مطابق شکل ۷ و ۸ نمایانگر این موضوع است که زمان خاموشی پالس بیشترین تأثیر در جواب و معادل ۶۴ درصد را دارد. حدوداً به همین مقدار اثر جمعی دارد. بعد از آن بیشترین تأثیر مربوط به جریان با ۲۶ درصد و زمان خاموشی پالس با ۱۰ درصد اثر است. در شکل‌ها N زمان روشنی پالس و F زمان خاموشی پالس، C جریان و نهایتاً V ولتاژ منطقه گپ است.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تولید مواد با خواص مغناطیسی مطلوب همانند دیگر فرایندهای تولید نیاز به افزایش کیفیت و بهینه‌سازی در تولید دارد. از طرفی ماشین‌کاری با روش ذکر شده در این پژوهش از روش‌های نو محسوب می‌شود و بسیار در صنایع مدرن امروزی مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه هر چهار پارامترهای ذکر شده شامل زمان روشنی و خاموشی پالس، جریان و ولتاژ اثرات قابل‌توجهی در خواص قطعات تولیدی با این روش دارند، ولی در مورد قطعات با خواص مغناطیسی مشخص شد پارامتر زمان خاموشی پالس اثر بسیار بالایی معادل ۶۴ درصد در بهبود مقدار نیروی پسماند زدا و ولتاژ اثری در این نیرو ندارد. این مهم به ما کمک می‌کند تا تمرکز پژوهش‌های آتی تولید روی پارامترهای مؤثرتر صورت پذیرد. همچنین مقایسه بین نمودار اثر اصلی^۱ نرم‌افزار مینی تب با نمودارهای تحلیل حساسیت سو بول درستی این نمودارها را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که در مواد مغناطیس نرم باتوجه به کارکردشان

0 511 90071 6

- [4] S. Yavari, M. Modabberifar, and M. Reza Sheykholeslami, "An experimental investigation of electro discharge machining parameters effects on ferromagnetic properties of extra-low-carbon steel," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 549, May 2022, doi: 10.1016/j.jmmm.2022.169041.
- [5] C.-K. Hou, "Pro pertles Hot Band Annealing Temperature of Low-carbon Electrical Steels on the Magnetic," *ISIJ International*, vol. 36, no. 5. pp. 563–571, 1996.
- [6] S·Takahashi,a)S·Kobayashi,H·Kikuchi,andYIKamada
NondesEructiveEvaLuatz'onarzdScienceReseaTrhC
entet;FacuLtyofEngL'neeTing,IwateUniversity,Mon
loka O20-8551,Jap
- [7] V. E. Iordache, E. Hug, and N. Buiron, "Magnetic behaviour versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe-(3 wt.%)Si steel," *Materials Science and Engineering A*, vol. 359, no. 1–2. pp. 62–74, 2003. doi: 10.1016/S0921-5093(03)00358-7.
- [8] Gaëtan Blondet a , Julien Le Duigou b , *, Nassim Boudaoud A knowle dge-base d system for numerical design of experiments processes in mechanical engineering. Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, Mechanical laboratory Roberval, FRE UTC/CNRS 2012, CS 60319, 60203
- [9] G. Castagna, "Background and notation," *Object-Oriented Programming A Unified Foundation*. pp. 3–33, 1997. doi: 10.1007/978-1-4612-4138-6_1.
- [10] Moein Taheri,Mehdi modaberi far ,Seyed hasan bahtayi,reza zohrevand "using the method of stastical sensitivity analysis to determine the effective parameters on plastic deformation in angular channels"ISME 2019
- [11] Michel Tosin, Adriano Côrtes, Americo Cunha Jr "A_Tutorial_on_Sobol_Global_Sensitivity_Analysi s_A.pdf." HAL Id: hal-02967410
- [12] Chandramouli S, Shrinivas Balraj U and Eswaraiah K "optimizing of electrical discharge machining using taguchi method.pdf." *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*.

ISSN 2250-3234 Volume 4, Number 4 (2014), pp. 425-434