

## الگوریتمی برای تعیین پارامترهای سیم پیچ و بانک خازن با استفاده از روش اجزاء محدود با هدف به کارگیری در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی

مهرداد خاندانی<sup>۱</sup>، محمد صدیقی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲ - تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی مکانیک

(تاریخ وصول: ۸۷/۱۰/۱۵، تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۱۳)

### چکیده

تعیین پارامترهای سیم پیچ و بانک خازن در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی، یکی از مشکلات کاربردی این فرآیند محسوب می گردد. در این مقاله، الگوریتمی برای محاسبه شدت جریان پالسی دستگاه به ازاء پارامترهای مختلف سیم پیچ و بانک خازن ارائه می گردد. در این روش ابتدا یک حدس اولیه برای فرکانس زاویه ای جریان و مشخصات بانک خازن در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از روش اجزاء محدود و یک حلقه تکرار محاسباتی، مشخصات دقیق بخش مؤثر پالس جریان به دست می آید. در این مقاله مسأله انبساط الکترومغناطیسی استوانه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج تجربی گرفته شده از مراجع مقایسه می گردد. این مقایسه انطباق قابل قبولی را بین نتایج محاسبه شده و تجربی نشان می دهد.

واژه های کلیدی: شکل دهی الکترومغناطیسی، انبساط استوانه، بانک خازن، سیم پیچ، روش اجزاء محدود.

### ۱. مقدمه

تحلیل انواع فرآیندهای شکل دهی فلزات و استخراج نیروهای مورد نیاز آنها می کند. فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی ورق های فلزی یکی از فرآیندهای شکل دهی ورق با نرخ کرنش بالاست که نیروی مورد نیاز آن توسط یک پالس مغناطیسی تأمین می گردد. این فرآیند به سه شکل انبساط استوانه های فلزی، انقباض استوانه های فلزی و شکل دهی ورق های تخت در صنعت انجام می پذیرد. در گذشته، پیچیدگی های فیزیکی این فرآیند همواره مانعی بر سر

در طراحی تمام فرآیندهای شکل دهی فلزات، نیاز به روش هایی داریم که تغییر شکل نهایی قطعه کار را به مشخصات مورد نیاز سیستمی که نیروی وارد بر آن را تأمین می کند ارتباط دهند. به این منظور در بسیاری از فرآیندهای سنتی شکل دهی فلزات، روابط تحلیلی ساده سازی شده ای مورد استفاده قرار می گیرند. به علاوه، امروزه شبیه سازی اجزاء محدود نیز کمک شایانی به

\* E-mail: sedighi@iust.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری

۲- دانشیار

قرار گیرد. به عنوان نمونه‌ای از فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، فرآیند انبساط الکترومغناطیسی استوانه در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبار سنجی نتایج، یک مسأله انبساط الکترومغناطیسی استوانه که قبلاً در مرجع [۷] به صورت تجربی بررسی شده است، شبیه‌سازی شده و بخش مؤثر پالس جریان الکتریکی آن به دست می‌آید.

## ۲. تعیین پارامترهای دستگاه در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی

در این بخش ابتدا فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی معرفی شده و سپس با ارائه تحلیل مداری فرآیند، چگونگی تعیین پارامترهای مداری دستگاه و اهمیت بهره‌گیری از ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- معرفی فرآیند

در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، قطعه‌کار فلزی توسط نیروی حاصل از یک پالس مغناطیس، با سرعت زیاد تغییر شکل می‌دهد. اجزاء اصلی مدار دستگاه شکل‌دهی الکترومغناطیسی شامل بانک خازن، منبع تأمین کننده ولتاژ، سیم‌پیچ و سوئیچ تخلیه می‌باشد. شکل ۱ طرح شماتیکی از دستگاه فرآیند انبساط الکترومغناطیسی استوانه فلزی را نشان می‌دهد. در ابتدا، بانک خازن در اتصال سری با یک منبع تأمین ولتاژ قرار گرفته و با ولتاژ مناسب شارژ می‌شود. پس از کامل شدن شارژ با ولتاژ مورد نظر، سوئیچ ۱ باز شده و بانک خازن در مدار دستگاه شکل‌دهی الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد. سپس با بسته شدن سوئیچ ۲، یک پالس جریان سینوسی میرا شوند، با دامنه ده‌ها کیلو ولت و فرکانس ده‌ها کیلو هرتز در مدار جاری می‌گردد. عبور این پالس جریان سریع از سیم‌پیچ موجب شکل‌گیری میدان مغناطیسی قدرتمندی در محیط پیرامون سیم‌پیچ می‌شود. فرکانس این میدان مغناطیسی با فرکانس پالس جریان الکتریکی برابر بوده و همزمان با پالس جریان الکتریکی میرا می‌شود. بر اساس قانون القاء فاراده، اعمال این پالس مغناطیس به قطعه‌کار، توزیع پیوسته‌ای از جریان گردابی را در قطعه‌کار القاء می‌نماید. جریان گردابی القاء شده در قطعه‌کار نیز یک میدان مغناطیسی را در اطراف خود ایجاد می‌نماید. جهت برداری این میدان توسط قانون مداری آمپر تعیین می‌گردد. در نهایت، اثر متقابل دو میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ و قطعه‌کار موجب شکل‌گیری نیروهای قدرتمند لورنتس در قطعه‌کار و لذا تغییر شکل سریع آن در جهت دور شدن از سیم‌پیچ می‌شود.

راه توسعه صنعتی آن بوده است. در سال‌های اخیر محققین متعددی در جهت شبیه‌سازی اجزاء محدود این فرآیند تلاش کرده‌اند. فنتون<sup>۱</sup> [۱] از کد تفاضل محدود دوبعدی CALE که دارای قابلیت ALE است، برای شبیه‌سازی کویله شکل‌دهی آزاد یک ورق تخت و گرد استفاده نمود. چانفنگ<sup>۲</sup> [۲] توزیع فشار مغناطیسی در فرآیند انبساط استوانه را به صورت کیفی توسط نرم‌افزار ANSYS به صورت استاتیکی و متقارن محوری به دست آورد. البویرا<sup>۳</sup> [۳] با استفاده همزمان از دو نرم‌افزار ANSYS و LS-DYNA شکل‌دهی یک ورق تخت را با قالبهای مختلف شبیه‌سازی نمود. آنگر<sup>۴</sup> [۴] یک فرمولبندی سه‌بعدی عمومی با در نظر گرفتن وابستگی میدانهای مغناطیسی، دما و تغییر شکل برای شبیه‌سازی مسائل شکل‌دهی الکترومغناطیسی ارائه نمود. وانگ<sup>۵</sup> [۵] فرآیند شکل‌دهی یک ورق تخت را با استفاده از رفتار شبه‌استاتیکی ماده توسط نرم‌افزار اجزاء محدود ADINA، به صورت متقارن محوری و دینامیکی گذرا، شبیه‌سازی نمود. چانفنگ<sup>۶</sup> [۶] نیز اثر فرکانس جریان را بر توزیع فشار مغناطیسی در فرآیند انقباض الکترومغناطیسی استوانه بررسی نمود. در کلیه شبیه‌سازی‌هایی که در خصوص کاربردهای مختلف فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی انجام می‌شود، جریان الکتریکی جاری در سیم‌پیچ به صورت تجربی اندازه‌گیری شده و به عنوان بار خارجی به مدل اجزاء محدود اعمال می‌گردد. لذا پارامترهای مداری دستگاه مانند ظرفیت بانک خازن و ولتاژ اولیه شارژ آن در این شبیه‌سازی‌ها وارد نمی‌شوند. بدین ترتیب، شبیه‌سازی امکان تعیین پارامترهای دستگاه را فراهم نمی‌کند. از طرفی روابط تحلیلی مؤثری نیز برای این فرآیند توسعه پیدا نکرده‌اند.

هدف از این تحقیق، ارائه الگوریتمی برای محاسبه بخش مؤثر پالس جریان الکتریکی دستگاه، در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، است. الگوریتمی که در این مقاله ارائه می‌گردد، مبتنی بر تحلیل عددی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی می‌باشد. در این روش ابتدا مقادیر اولیه‌ای برای ظرفیت بانک خازن، ولتاژ شارژ و فرکانس زاویه‌ای جریان حدس زده می‌شود. سپس با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود و یک حلقه تکرار محاسباتی، مقادیر دقیق پررود و ضریب خودالقائی معادل به دست می‌آید. بدین ترتیب، پالس جریان دستگاه محاسبه شده و می‌تواند در شبیه‌سازی فرآیند مورد استفاده

- 
- ۱- Fenton
  - ۲- Chunfeng
  - ۳- Oliveira
  - ۴- Unger
  - ۵- Wang
  - ۶- Chunfeng

۲-۲- تحلیل مداری فرآیند

اولین گام در طراحی یک فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، تعیین مشخصات مداری دستگاه مانند ظرفیت و ولتاژ اولیه بانک خازن و نیز ضریب خودالقائی سیم‌پیچ است. تحلیل مداری فرآیند، تنها روش ممکن برای استخراج پارامترهای مداری مورد نیاز برای دستگاه می‌باشد. به منظور تحلیل مداری فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، دو مدار معادل ساده‌سازی شده، مطابق شکل ۲، برای دستگاه و قطعه‌کار در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، مشخصات مداری دستگاه و قطعه‌کار به صورت متمرکز و ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند. این دو مدار روی یکدیگر اثر القائی متقابل دارند. با نوشتن قانون ولتاژ کیرشهوف برای هر یک از دو مدار شکل ۲، به دو معادله (۱) و (۲) می‌رسیم.

$$I_1 R + L \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} + V_C = 0 \quad (1)$$

$$I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$L = L_o + L_1, \quad R = R_o + R_1 \quad (3)$$

معادلات (۱) و (۲) دستگاه معادلات کوپله را تشکیل می‌دهند. اگر تمام کمیت‌های موجود در دو معادله‌ی (۱) و (۲) مشخص باشند، می‌توان با تحلیل عددی این دستگاه معادلات، تغییرات جریان الکتریکی دستگاه و تغییرات جریان گردابی قطعه‌کار را به دست آورد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در این مدل مداری ساده‌سازی شده مشخصات مداری قطعه‌کار نیز به صورت متمرکز در نظر گرفته شده‌اند. برای اکثر قریب به اتفاق کاربردهای صنعتی، تعیین پارامترهای مداری متمرکز برای قطعه‌کار تقریباً غیر ممکن است. زیرا جریان گردابی به صورت پیوسته و غیر یکنواخت در قطعه‌کار توزیع می‌گردد و لذا بیان آن به صورت یک جریان مداری متمرکز یک بعدی میسر نیست. راهکار مناسبی که می‌توان برای حل این مشکل به کار برد، استفاده از مفهوم ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار است. به کار بردن ضریب خودالقائی معادل، به این معناست که فرض می‌شود مدار معادل دستگاه به صورت یک مدار مستقل از اثر القائی قطعه‌کار عمل می‌کند. اثر القائی قطعه‌کار بر روی جریان مدار دستگاه نیز با اصلاح ضریب خودالقائی مدار دستگاه لحاظ می‌گردد. لذا ضریب خودالقائی اصلی مدار دستگاه اصلاح می‌گردد و این ضریب خودالقائی اصلاح شده، ضریب خودالقائی معادل نامیده می‌شود. در این صورت معادله‌ی (۲) در تحلیل مداری در نظر گرفته نمی‌شود و معادله‌ی (۱) نیز به صورت معادله‌ی (۴) ساده می‌شود [۸].

$$I_1 R + L_{eq} \frac{dI_1}{dt} + V_C = 0 \quad (4)$$

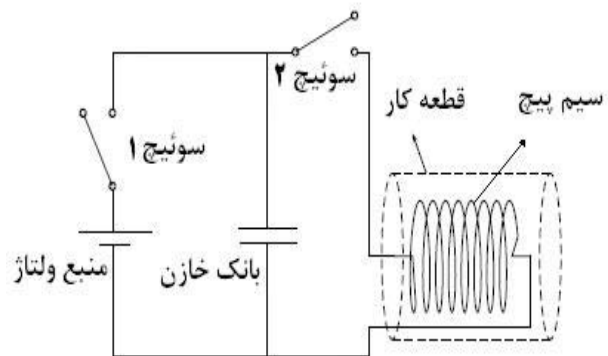
معادله (۴) یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم بوده و به صورت تحلیلی قابل حل است. حل این معادله مطابق معادله (۵) می‌باشد.

$$I_1(t) = \frac{V_C e^{-\alpha t}}{L_{eq} \omega_d} \sin(\omega_d t) \quad (5)$$

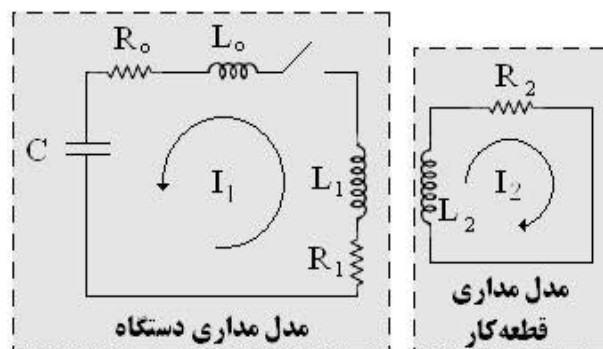
$$\alpha = \frac{R}{2L_{eq}}, \quad R = R_o + R_1 \quad (6)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2}, \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C}} \quad (7)$$

در معادلات (۵)، (۶) و (۷) سه پارامتر  $V_C$ ،  $L_{eq}$  و  $C$  که مشخص کننده مشخصات مداری اولیه دستگاه و نیز مشخصات هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار هستند مستقیماً به جریان الکتریکی دستگاه مرتبط می‌شوند. لذا با مشخص بودن ضریب خودالقائی معادل و با استفاده از معادلات فوق، می‌توان پالس جریان دستگاه را به ازاء مقادیر مختلف  $V_C$  و  $C$  به دست آورده و در شبیه‌سازی فرآیند به کار برد.



شکل ۱- تجهیزات مورد استفاده در فرآیند انبساط الکترومغناطیسی استوانه فلزی.



شکل ۲- مدل مورد استفاده در تحلیل مداری فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی.

این پدیده به دلیل تأثیر قابل ملاحظه نیروهای ماند در تغییرشکل قطعه‌کار است و یکی از ویژگی‌های شاخص فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی می‌باشد. وجود نیروهای ماند گاهی موجب می‌شود تا قطعه‌کار پس از میرا شدن پالس مغناطیسی و لذا از بین رفتن نیروهای الکترومغناطیسی نیز به تغییرشکل خود ادامه دهد. در مرجع [۱۱] نیز نتیجه مشابهی برای فرآیند انقباض استوانه، بر مبنای مشاهدات تجربی و محاسبات تحلیلی، به دست آمده است. اثر پیک‌های جریان دوم، سوم و . . . در مقابل پیک اول قابل صرفنظر کردن است، به طوری که گاهی با قرار دادن دیود در مدار پس از پیک اول، جریان را میرا کرده و از پیک‌های بعدی صرفنظر می‌کنند. برای نمونه در مراجع [۳] و [۷] با قرار دادن دیود در مدار دستگاه، بانک خازن پس از یک چهارم پریود ابتدائی پالس جریان از مدار جدا شده و لذا از مابقی پالس جریان صرفنظر شده است. بنابراین در یک چهارم پریود ابتدائی پالس جریان در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی نیروهای مغناطیسی مؤثر بر قطعه‌کار اعمال می‌شوند، اما در این مدت زمان تغییرشکل قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد. بخش عمده تغییرشکل قطعه‌کار پس از این زمان، تحت اثر نیروهای ماند، ایجاد می‌گردد. لذا به منظور محاسبه پالس جریان دستگاه، لازم است تا یک چهارم پریود اول جریان، و به خصوص پیک اول جریان، با دقت قابل قبولی محاسبه گردد.

#### ۴. محاسبه ضریب خودالقائی معادل

در این بخش، روش محاسبه ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار شرح داده شده و میزان وابستگی این ضریب به فرکانس پالس جریان بررسی می‌گردد.

#### ۴-۱- شبیه‌سازی اجزاء محدود

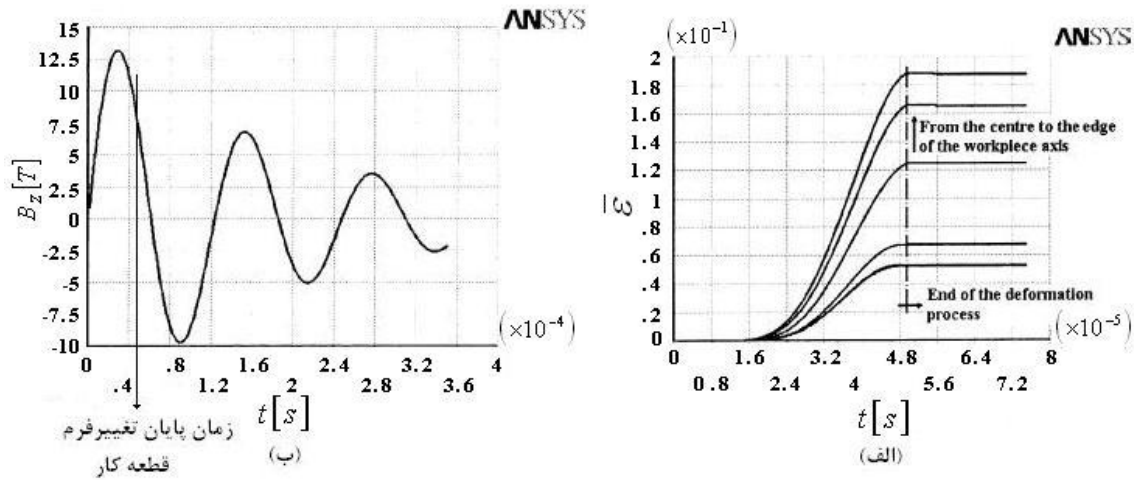
ضریب خودالقائی معادل را با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود محاسبه می‌نمائیم. جزئیات مربوط به روش مورد استفاده در مرجع [۱۲] به طور کامل شرح داده شده است. مسأله‌ای که در این مقاله بررسی می‌شود، قبلاً به صورت تجربی در مرجع [۷] بررسی شده است. لذا تمامی اطلاعات هندسی و خواص مواد مربوط به سیم‌پیچ و قطعه‌کار از مرجع [۷] استخراج شده است. جدول ۱ ابعاد هندسی و مشخصات مواد سیم‌پیچ و قطعه‌کار را نشان می‌دهد. شکل ۴ مدل اجزاء محدود شبیه‌سازی سیم‌پیچ و قطعه‌کار را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی اجزاء محدود توسط نرم‌افزار ANSYS انجام شده است.

مقایسه دو معادله (۱) و (۴) نشان می‌دهد که عبارت  $L_{eq} di_1/dt$  جایگزین عبارت  $L di_1/dt + M di_2/dt$  شده است. دو ضریب  $L$  و  $M$  تابع شکل هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار و نیز فرکانس جریان دستگاه هستند. جریان  $I_2$  نیز تابع ضرایب  $M$  و  $L_2$ ، فرکانس جریان دستگاه و مقاومت الکتریکی ویژه جنس قطعه‌کار است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب  $L_{eq}$  تابع شکل هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار، مقاومت الکتریکی ویژه جنس قطعه‌کار و فرکانس جریان دستگاه خواهد بود.

#### ۳. بررسی مکانیزم اعمال نیروی مغناطیسی

یکی از نکات حائز اهمیت در بررسی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، تعیین مدت زمان اعمال نیروی مغناطیسی بر قطعه‌کار است. اهمیت این مسأله از آن جهت است که با تعیین بخش مؤثر پالس مغناطیسی، که نیروی مغناطیسی را بر قطعه‌کار اعمال می‌نماید، امکان بهینه‌سازی فرآیند و محافظت از بانک خازن دستگاه در مقابل جریان بازگشتی فراهم می‌گردد. این مسأله توسط محققین مختلف به صورت تجربی و محاسباتی مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. برای نمونه، در مرجع [۹] نمودارهای تغییرات زمانی شدت پالس مغناطیسی سیم‌پیچ و تغییرات کرنش معادل در قطعه‌کار، در فرآیند انقباض الکترومغناطیسی استوانه، توسط شبیه‌سازی اجزاء محدود به دست آمده است (شکل ۳).

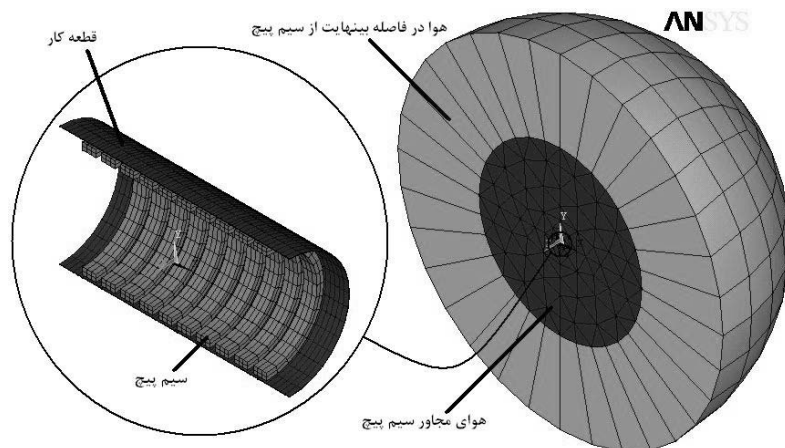
شکل ۳ الف) نشان می‌دهد که تغییرشکل قطعه‌کار در مدت زمان حدود  $49 \mu s$  خاتمه می‌یابد. نمودار شکل ۳ ب) نشان می‌دهد که این زمان در نیم پریود اول پالس مغناطیسی قرار می‌گیرد. از قوانین مداری آمپر و القاء فاراده و نیز تعریف برداری نیروی لورنتس می‌توان نتیجه گرفت که جهت نیروی مغناطیسی وارد بر قطعه‌کار در یک چهارم پریود ابتدائی پالس مغناطیسی به صورت دافعه و در یک چهارم پریود دوم پالس به صورت جاذبه می‌باشد. در مرجع [۱۰] با کاهش سرعت یک چهارم پریود اول پالس و افزایش سرعت یک چهارم پریود دوم آن در یک فرآیند شکل‌دهی، قطعه‌کار به سمت سیم‌پیچ جذب شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای مؤثر الکترومغناطیسی در یک چهارم پریود ابتدائی پالس جریان به قطعه‌کار اعمال می‌شوند. در نمودارهای شکل ۳ نیروهای دافعه‌ای مغناطیسی در مدت زمان  $30 \mu s$  به قطعه‌کار اعمال می‌شوند، اما این در حالیکه تغییرشکل قطعه‌کار تا زمان  $49 \mu s$  ادامه می‌یابد. نمودار شکل ۳ الف) نشان می‌دهد که بخش عمده تغییرشکل قطعه‌کار در فاصله زمانی  $30 \mu s$  تا  $49 \mu s$  (یعنی پس از خاتمه اعمال نیروهای دافعه‌ای) انجام شده است.



شکل ۳- (الف) تغییرات زمانی کرنش معادل در قطعه کار (ب) تغییرات زمانی شدت میدان مغناطیسی [۹].

جدول ۱- ابعاد هندسی و خواص مواد مربوط به سیم پیچ و قطعه کار (بر اساس داده‌های مرجع [۷]).

فولاد	جنس	مشخصات قطعه کار
۲۶ mm	شعاع میانگین	
۰.۲ mm	ضخامت	
۱۰۰ mm	طول	
$1/20 \times 10^{-8} \Omega m$	مقاومت الکتریکی ویژه	
۲ T	شار مغناطیسی اشباع	
مس	جنس	مشخصات سیم پیچ
۱۰	تعداد حلقه	
۲۲ mm	شعاع داخلی	
۲۵ mm	شعاع خارجی	
۸۰ mm	طول	
۸/۲۵ mm	گام سیم پیچ	
۲/۶۳ $\mu H$	ضریب خودالقائی سیم پیچ خالی	
$1/223 \times 10^{-5} \Omega$	مقاومت اهمی	



شکل ۴- مدل اجزاء محدود سیم پیچ و قطعه کار.

که در این رابطه،  $\Phi_i$  ها مقادیر شار مغناطیسی در زمان‌های مختلف و  $I_i$  ها مقادیر جریان الکتریکی در زمان‌های مختلف هستند.

#### ۴-۲- بررسی وابستگی ضریب خودالقائی معادل به فرکانس

##### جریان

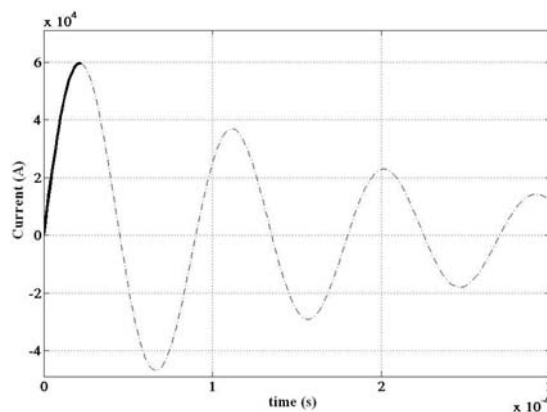
همانطور که قبلاً اشاره شد، ضریب خودالقائی معادل تابع شکل هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار، مقاومت الکتریکی ویژه جنس قطعه‌کار و فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ است. در روشی که در این مقاله و مرجع [۱۲] برای محاسبه ضریب خودالقائی معادل استفاده شده است، شکل هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار و نیز مقاومت الکتریکی ویژه قطعه‌کار به دقت در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. لذا تنها پارامتر مؤثری که باید بررسی گردد، فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ است. نمودار شکل ۶ ضرایب خودالقائی معادل را که با در نظر گرفتن فرکانس‌های مختلف برای جریان الکتریکی سیم‌پیچ به دست آمده‌اند نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که وابستگی ضریب خودالقائی به فرکانس جریان قابل ملاحظه است و باید در محاسبه این ضریب و نیز تعیین پارامترهای دستگاه مد نظر قرار گیرد. این در حالیست که در هنگام محاسبه ضریب خودالقائی معادل برای تعیین پارامترهای مورد نیاز دستگاه، فرکانس کاری دستگاه نامشخص است. لذا تنها روش ممکن، در نظر گرفتن یک حدس اولیه برای فرکانس جریان دستگاه و سپس اصلاح متوالی این حدس اولیه خواهد بود. این روش در ادامه توضیح داده خواهد شد.

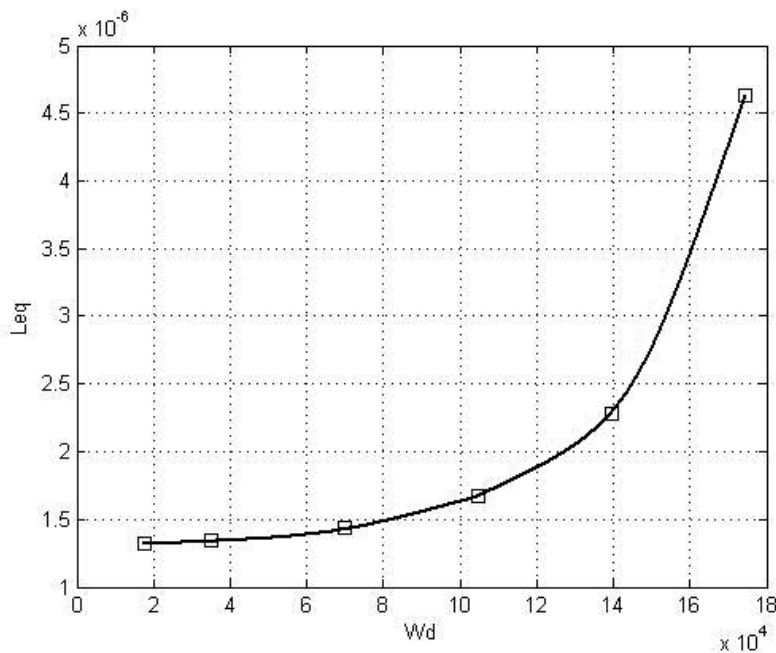
در این شبیه‌سازی، نیمی از مدل هندسی سیم‌پیچ و قطعه‌کار در نظر گرفته شده و جریان الکتریکی به صورت یکنواخت بر روی مقطع برش خورده سیم‌پیچ اعمال شده است. شرایط مرزی در کلیه سطوح خارجی مدل مطابق مرجع [۱۲] اعمال شده است. مطابق مرجع [۱۲] ابتدا برای اعتبار سنجی نتایج، سیم‌پیچ بدون قطعه‌کار شبیه‌سازی شده و ضریب خودالقائی آن برابر  $2/52 \mu H$  به دست آمد که با داده‌های جدول ۱ انطباق خوبی داشت. نمودار تغییرات جریان الکتریکی سیم‌پیچ در شکل ۵ نشان داده شده است. قبلاً اشاره شد که نتایج شبیه‌سازی‌ها و بررسی‌های تجربی نشان داده است که نیروی مؤثر مغناطیسی در یک چهارم از پریود ابتدائی پالس جریان به قطعه‌کار وارد می‌شود. به علاوه، بخش عمده‌ای از تغییر شکل قطعه‌کار نیز پس از یک چهارم از پریود ابتدائی پالس جریان ایجاد می‌گردد. به همین جهت در اینجا تنها یک چهارم از اولین پریود جریان در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

پس از تحلیل اجزاء محدود تغییرات شدت میدان مغناطیسی توسط نرم‌افزار، تغییرات شار مغناطیسی در ازاها مقادیر مختلف جریان به دست می‌آید. سپس مطابق مرجع [۱۲] با استفاده از روش حداقل‌سازی مربعات می‌توان ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار را توسط رابطه (۸) به دست آورد.

$$L_{eq} = \frac{\sum_i \phi_i}{\sum_i I_i} \quad (8)$$



شکل ۵- نمونه‌ای از نمودار جریان مورد استفاده در بارگذاری سیم‌پیچ. (بخشی از نمودار که با خط پررنگ رسم شده، در بارگذاری سیم‌پیچ به کار رفته است)



شکل ۶- ضرایب خودالقائی معادل محاسبه شده به ازاء فرکانس‌های مختلف

نامعلوم است، یک حدس اولیه دلخواه  $\omega_d = 104600 \text{ (rad/sec)}$  را در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از معادله (۵)، یک پالس سینوسی میرا شونده با فرکانس  $\omega_d = 104600 \text{ (rad/sec)}$  و ولتاژ اولیه دلخواه را در تحلیل اجزاء محدود به عنوان بار خارجی به مدل سیم‌پیچ اعمال می‌نمائیم. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در این شبیه‌سازی تنها یک چهارم پریود ابتدائی از پالس جریان در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، مقدار اولیه غیر دقیقی برای ضریب خودالقائی معادل ( $L_{eq}$ ) به دست می‌آید. سپس این ضریب در روابط (۶) و (۷) قرار داده شده و مقدار جدیدی برای  $\omega_d$  به دست می‌آید. مجدداً مقدار جدید  $\omega_d$  در شبیه‌سازی وارد شده و مقدار اصلاح شده‌ای برای  $L_{eq}$  به دست می‌آید. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که مقادیر  $L_{eq}$  و  $\omega_d$  همگرا شوند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب دینمودار مربوط به همگرایی مقادیر  $\omega_d$  و  $L_{eq}$  را نشان می‌دهند.

جدول ۲- مشخصات مداری دستگاه [۷].

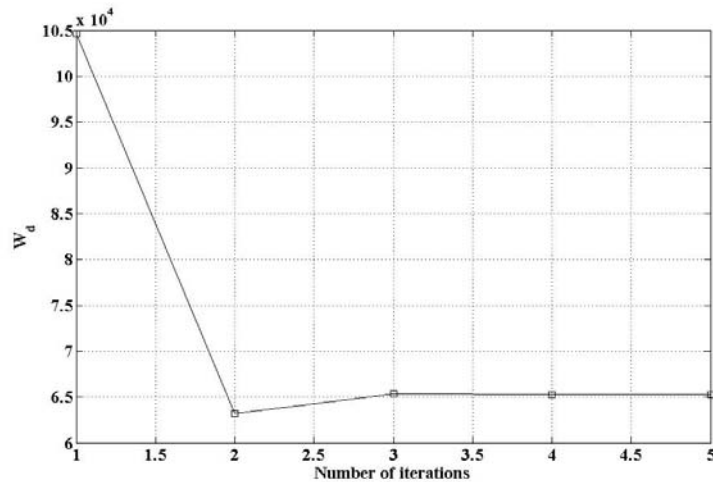
پارامتر	مقدار تجربی
$L_0$	$215 (\mu H)$
$R_0$	$15 (m\Omega)$
$C$	$6025 (\mu F)$
$V_C$	$14 (kV)$

## ۵. تعیین پارامترهای فرآیند

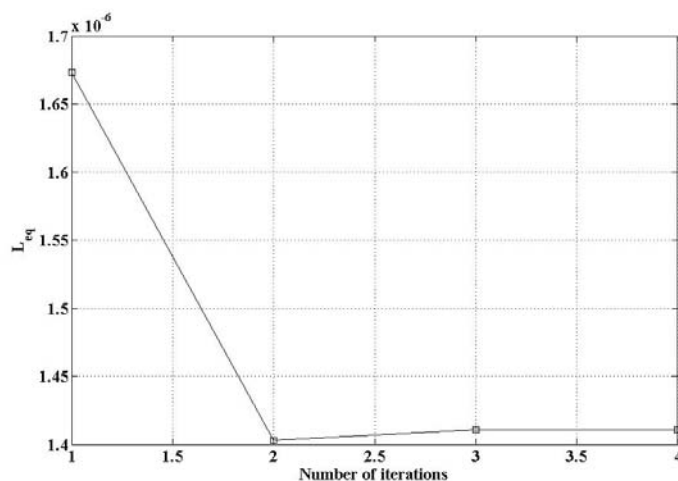
در اینجا ابتدا مشخصات بانک خازن در یک فرآیند انبساط استوانه با پارامترهای معلوم، که اطلاعات تجربی آن در مراجع موجود است، تعیین می‌شود. سپس روش مورد استفاده گسترش داده شده و یک الگوریتم عمومی جهت تعیین پارامترهای فرآیند ارائه می‌گردد.

### ۵-۱- تعیین پارامترهای بانک خازن و مقایسه با نتایج تجربی

در این قسمت، بر اساس اطلاعات مربوط به تست تجربی که در مرجع [۷] ارائه شده است، ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار محاسبه می‌شود. سپس به منظور اعتبار سنجی نتایج، با استفاده از داده‌های مربوط به مشخصات مداری دستگاه، ظرفیت و ولتاژ اولیه شارژ بانک خازن، پالس جریان الکتریکی دستگاه تخمین زده می‌شود. نتیجه حاصله با پالس جریان الکتریکی که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول ۲ ضریب خودالقائی و مقاومت اهمی معادل دستگاه را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شده، در محاسبه ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه‌کار، سه عامل شکل هندسی سیم‌پیچ و قطعه کار، مقاومت الکتریکی ویژه قطعه کار و فرکانس جریان دستگاه تأثیر عمده‌ای دارند. دو عامل شکل هندسی و مقاومت الکتریکی ویژه قطعه‌کار در شبیه‌سازی اجزاء محدود در نظر گرفته می‌شوند. برای وارد نمودن اثر فرکانس جریان دستگاه که در ابتدا



شکل ۷- روند همگرایی فرکانس زاویه‌ای  $(\omega_d)$ .



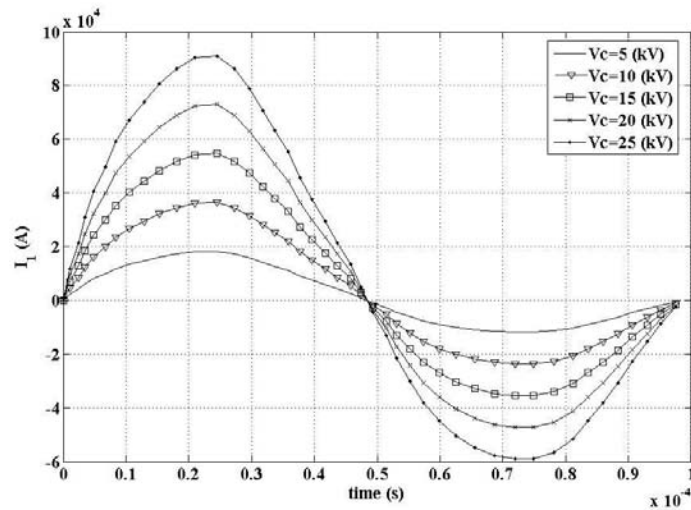
شکل ۸- روند همگرایی ضریب خودالقائی معادل  $(L_{eq})$

پارامتر  $\omega_d$  و  $L_{eq}$  نیست و فقط با تغییر مقدار  $V_C$  می‌توان منحنی‌های مختلف مربوط به پالس‌های جریان را به دست آورد. شکل ۹ نمودارهای مختلف مربوط به پالس جریان با ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد، به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصله، پالس جریان برآورد شده به ازاء  $C = 60/25 (\mu F)$  و  $V_C = 14 (kV)$  را با پالس جریانی که به صورت تجربی در مرجع [۷] اندازه‌گیری شده است مقایسه می‌کنیم. شکل ۱۰ مقایسه دو نمودار را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پالس جریان حاصل از محاسبات و پالس جریان اندازه‌گیری شده در مرجع [۷] در نیم پریود اول انطباق قابل قبولی با هم دارند.

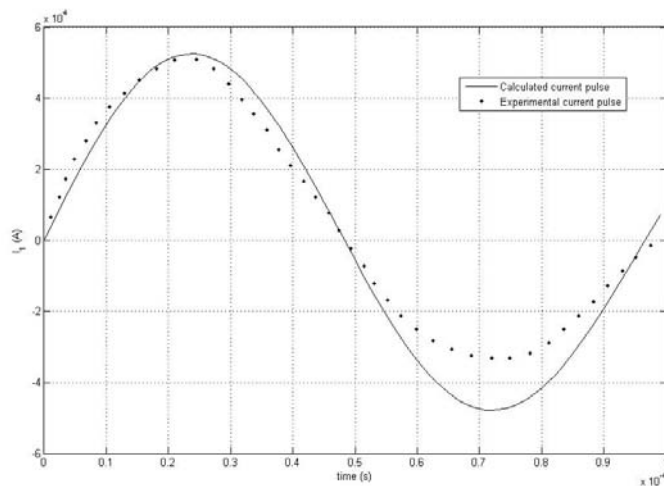
دو نمودار شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر  $\omega_d = 65583 (rad/sec)$  و  $L_{eq} = 1/418 (\mu H)$  را به دست می‌دهند. اکنون با استفاده از این مقادیر و داده‌های جدول ۲ می‌توان توسط معادله (۵)، پالس جریان الکتریکی دستگاه را برآورد نمود. روابط (۶) و (۷) نشان می‌دهند که مقدار  $\omega_d$  وابستگی زیادی به ظرفیت خازن دارد. قبلاً اشاره شد که مقدار  $L_{eq}$  نیز به مقدار  $\omega_d$  وابسته است. لذا چنانچه بخواهیم پالس جریان را به ازاء مقدار جدید ظرفیت خازن به دست آوریم، باید مجدداً  $\omega_d$  و  $L_{eq}$  را با روندی که در این قسمت شرح داده شد محاسبه نماییم. اما مقادیر این دو پارامتر به ولتاژ شارژ بانک خازن وابسته نیست. لذا چنانچه بخواهیم پالس جریان دستگاه به ازاء ولتاژهای مختلف برای بانک خازن به دست آید، نیازی به محاسبه مجدد دو





شکل ۹- پالس‌های جریان دستگاه به ازاء ولتاژهای مختلف بانک خازن.

$$(L_{eq} = 1/418 (\mu H) \text{ و } C = 6.025 (\mu F))$$



شکل ۱۰- مقایسه پالس جریان محاسبه شده با پالس اندازه‌گیری شده در مرجع [۷].

شبهه‌سازی به دلیل در نظر نگرفتن این تغییرشکل، خطای زیادی پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که پریود زمانی پالس واقعی برابر  $97/6 (\mu s)$  اندازه‌گیری شده، در حالیکه در محاسبات پریود برابر  $96/5 (\mu s)$  به دست آمده است. لذا پریود زمانی با خطای  $1/1\%$  محاسبه شده است. ماکزیمم دامنه جریان در پالس واقعی برابر  $5/1 \times 10^4 (A)$  و در پالس محاسبه شده برابر  $5/25 \times 10^4 (A)$  می‌باشد. بنابراین ماکزیمم دامنه جریان نیز با خطای  $2/9\%$  محاسبه شده است. ماکزیمم دامنه جریان یکی از مهمترین و تأثیر گذارترین کمیت‌ها در میزان

قبلاً اشاره شد (شکل ۲) که یک چهارم پریود اول پالس جریان سیم‌پیچ در اعمال نیروی مغناطیسی به قطعه کار مؤثر است. همانطور که قبلاً ذکر شد، در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، بخش اعظم تغییرشکل قطعه کار پس از یک‌چهارم پریود اول پالس جریان ایجاد می‌شود. در شبهه‌سازی اجزاء محدود برای محاسبه ضریب خودالقائی معادل نیز، تنها یک چهارم از پالس جریان به سیم‌پیچ اعمال شد. از آنجا که در این شبهه‌سازی از تغییرشکل قطعه کار صرف‌نظر شده است، لذا نتایج حاصل از این تحلیل در نیم پریود اول، دقت بالایی دارد. در نیم‌پریود دوم که قطعه تغییرشکل زیادی دارد، نتایج

خازن وابسته هستند. برای تغییر دادن مشخصات سیم‌پیچ نیز باید کل پروسه شبیه‌سازی و محاسبات را از ابتدا با در نظر گرفتن شکل هندسی جدید سیم‌پیچ تکرار نمود. اثرات مربوط به تغییر در هر یک از سه پارامتر فوق را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود.

#### تغییرات ولتاژ اولیه شارژ بانک خازن:

افزایش ولتاژ، انرژی اولیه ذخیره شده در بانک خازن را افزایش داده، دامنه پالس جریان را به صورت مستقیم افزایش می‌دهد و در فرکانس پالس جریان تأثیری ندارد. لذا افزایش ولتاژ سبب افزایش نیروهای مغناطیسی و لذا افزایش میزان تغییرشکل قطعه‌کار می‌گردد. اما تجهیزاتی مانند بانک خازن، سوئیچ‌های تخلیه و... دارای دامنه ولتاژ و جریان کاری معینی هستند و لذا ولتاژ نباید از حد قابل تحمل این تجهیزات بیشتر شود.

#### تغییرات ظرفیت بانک خازن:

افزایش ظرفیت بانک خازن (با فرض ثابت باقی ماندن ولتاژ) انرژی ذخیره شده اولیه را افزایش داده، سبب افزایش دامنه پالس جریان شده (البته تأثیر آن کمتر از اثر ولتاژ است) و همچنین فرکانس پالس جریان را نیز کاهش می‌دهد. با کاهش فرکانس جریان، نیروهای مغناطیسی تا حدودی کاهش می‌یابند. لذا افزایش ظرفیت بانک خازن از طرفی باعث افزایش دامنه جریان و نیروهای مغناطیسی و از طرف دیگر موجب کاهش فرکانس جریان و کاهش نیروهای مغناطیسی می‌گردد. بنابراین اثر افزایش ظرفیت بانک خازن بر کاهش و یا افزایش تغییرشکل قطعه‌کار را باید با انجام محاسبات و شبیه‌سازی مشخص نمود.

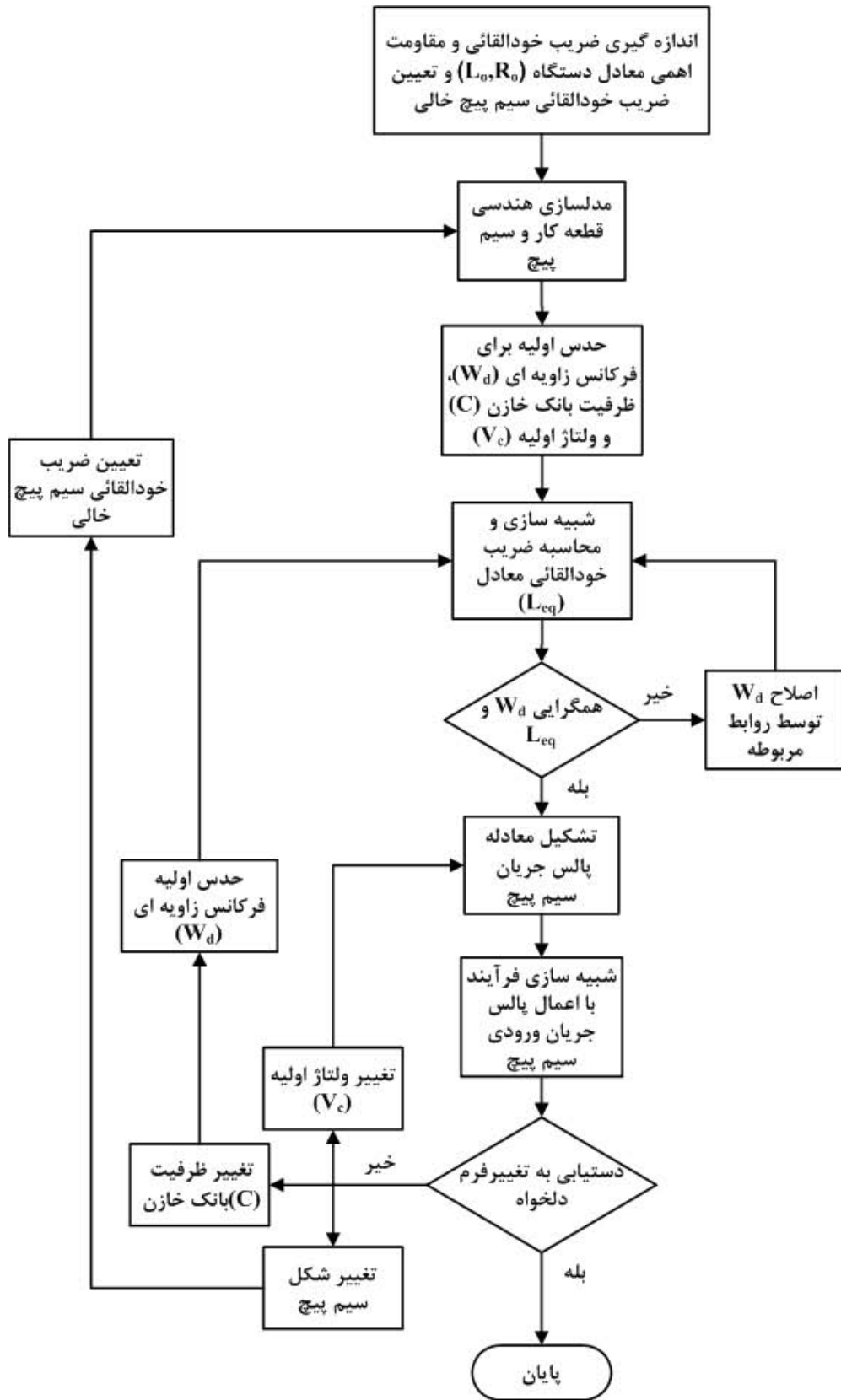
#### تغییرات شکل هندسی و تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ:

تغییرات شکل هندسی سیم‌پیچ سبب تغییر ضریب خودالقائی معادل آن خواهد شد. به ویژه افزایش تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ موجب افزایش ضریب خودالقائی معادل می‌گردد. با افزایش ضریب خودالقائی معادل، فرکانس جریان کاهش یافته و دامنه جریان نیز کاهش می‌یابد. این دو عامل سبب کاهش نیروهای مغناطیسی می‌شود. اما از طرف دیگر افزایش ضریب خودالقائی معادل موجب افزایش شدت میدان مغناطیسی و لذا افزایش نیروهای مغناطیسی نیز می‌گردد. بنابراین با توجه به پیچیدگی‌های موجود، اثر حاصل از تغییر شکل هندسی سیم‌پیچ بر افزایش یا کاهش میزان تغییرشکل قطعه‌کار را باید با انجام محاسبات و شبیه‌سازی تعیین نمود. روند کلی انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها و چگونگی ایجاد تغییر در سه پارامتر یاد شده، در فلوجارت شکل ۱۱ نشان داده شده است.

تغییرشکل است، زیرا مستقیماً مقدار ماکزیمم دامنه تغییرات شدت میدان مغناطیسی را مشخص می‌کند. در مرجع [۱۳] فشار وارد بر قطعه‌کار در فرآیند انقباض استوانه، تنها با استفاده از مقدار ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی، محاسبه شده و در یک شبیه‌سازی استاتیکی به کار رفته است. نتایج به دست آمده نیز هم‌خوانی خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی داشته‌اند. بنابراین محاسبه دامنه جریان با خطای ۲/۹٪ نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج است. لذا پالس جریان در ناحیه مؤثر آن با دقت قابل قبولی محاسبه شده است.

#### ۵-۲- الگوریتم پیشنهادی برای تعیین پارامترهای سیم‌پیچ و بانک خازن

در قسمت قبل ملاحظه گردید که توسط شبیه‌سازی اجزاء محدود و با استفاده از حدس اولیه برای فرکانس زاویه‌ای پالس جریان، می‌توان در حلقه تکرار محاسباتی به مقادیر قابل قبولی برای فرکانس واقعی جریان و ضریب خودالقائی معادل دست یافت. با استفاده از این مقادیر می‌توان نیم‌پریود اول پالس جریان را محاسبه نمود. این پالس جریان محاسبه شده در شبیه‌سازی تغییرشکل قطعه‌کار به عنوان بار خارجی به سیم‌پیچ اعمال شده و میزان تغییرشکل به دست می‌آید. در مرجع [۱۴] یک روش شبیه‌سازی اجزاء محدود جهت تعیین میزان تغییرشکل قطعه‌کار در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی ارائه شده است. در این روش، پالس جریان الکتریکی به عنوان بار خارجی به سیم‌پیچ اعمال شده است. سه پارامتر اصلی که برای کنترل پالس جریان در اختیار طراح فرآیند قرار دارند، عبارتند از ولتاژ اولیه شارژ بانک خازن، ظرفیت بانک خازن و شکل هندسی و تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ. لذا چنانچه پالس جریانی که با مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای این سه پارامتر به دست می‌آید، تغییرشکل دلخواه را در قطعه‌کار ایجاد ننماید، باید با تغییر یک یا تعداد بیشتری از این سه پارامتر، پالس جریان را اصلاح نمود. ساده‌ترین روش برای اصلاح پالس جریان، تغییر ولتاژ اولیه بانک خازن است. زیرا تغییر ولتاژ اولیه، فرکانس جریان را تغییر نمی‌دهد و تنها سبب تغییر دامنه پالس جریان می‌شود. اما باید توجه نمود که افزایش ولتاژ به دلیل ملاحظات ایمنی کاربر و نیز محدودیت شرایط عملکردی تجهیزات دستگاه، دارای محدودیت‌هایی است. در صورتی که نتوان با تغییرات ولتاژ به تغییر شکل مورد نظر رسید، باید یکی از دو پارامتر دیگر را تغییر داد. این در حالیست که تغییر دادن ظرفیت بانک خازن مستلزم محاسبه مجدد فرکانس زاویه‌ای و ضریب خودالقائی معادل است. زیرا این دو کمیت به ظرفیت بانک



شکل ۱۱- الگوریتم تعیین پارامترهای بانک خازن و سیم پیچ در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی

- [2]. Chunfeng, L.; Zhiheng, Z.; Jianhui, L.; Yongzhi, W.; Yuying, Y. "Numerical Simulation of the Magnetic Pressure in Tube Electromagnetic Bulging"; J. Mat. Proc. Tech. 123, Elsevier, 225–228, 2002.
- [3]. Oliveira, D. A.; Worswick, M. J.; Finn, M.; Newman, D. "Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet: Free-Form and Cavity Fill Experiments and Model"; J. Mat. Proc. Tech. 170, Elsevier, 350–362, 2005.
- [4]. Unger, J.; Stiemer, M.; Svendsen, B.; Blum, H. "Multifield Modeling of Electromagnetic Metal Forming Processes"; J. Mat. Proc. Tech. 177, Elsevier, 270–273, 2006.
- [5]. Wang, L.; Chen, Z. Y.; Li, C. X.; Huang, S. Y. " Numerical Simulation of the Electromagnetic Sheet Metal Bulging Process"; Int. J. Adv. Manuf. Tech. 30, Springer-Verlag, 395–400, 2006.
- [6]. Haiping, Y. U.; Chunfeng, L.I. "Effects of Current Frequency on Electromagnetic Tube Compression"; Accepted to be published in J. Mat. Proc. Tech., 2008.
- [7]. Motoaşcă, T.E. "Electrodynamics in deformable solids for electromagnetic forming"; Ph.D. Thesis, Delft university of Technology, 2003.
- [8]. Hayt, W. H.; Kemmerly, JR. J. E. "Engineering Circuit Analysis"; Mc Graw-Hill, 5<sup>th</sup> ed., N.Y., 1993.
- [9]. Mamalis, A. G.; Manolakos, D. E.; Kladas, A. G.; Koumoutsos, A. K. "Physical Principles of Electromagnetic Forming Process: A Constitutive Finite Element Model"; J. Mat. Proc. Tech. 161, Elsevier, 294–299, 2005.
- [10]. Deng, J.; Li, C.; Zhao, Z.; Tu, F.; Yu, H. "Numerical Simulation of Magnetic Flux and Force in Electromagnetic Forming with Attractive Force"; J. Mat. Proc. Tech. 184, Elsevier, 190–194, 2007.
- [11]. Bednarski, T. " Magnetic Reducing of Thin-Walled Tubes " in: proceedings of the Third seminar on Metal Forming, Gyor, Hungary, 1985.
- [۱۲]. صدیقی، م.، خاندانی، م.، لیاقت، م.، ع. محاسبه عددی ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ در فرآیند انبساط الکترومغناطیسی استوانه، مجله علمی- پژوهشی علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱۸، قسمت الف، ص ۱۰۰-۸۶، زمستان ۱۳۸۶.
- [13]. Murakoshi, Y.; Takahashi, M.; Sano, T.; Hanada, K.; Negishi, H. "Inside Bead Forming of Aluminum Tube by Electro-Magnetic Forming"; J. Mat. Proc. Tech. 80-81, ELSEVIER, 695-699, 1998.
- [۱۴]. صدیقی، م.، لیاقت، م.، ع.، خاندانی، م.، میانی تئوری شکل‌دهی الکترومغناطیسی و تحلیل عددی- تجربی فرآیند انقباض استوانه، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، شماره پیاپی ۱۳، ص ۴۶-۲۹، آذر ۱۳۸۷.

## ۶. نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مفهوم ضریب خودالقائی معادل می‌توان یک‌چهارم پریرود ابتدائی پالس جریان دستگاه را، که بخش مهم و تأثیر گذار این پالس می‌باشد، با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمود. همچنین با استفاده از نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود در حلقه تکرار محاسباتی، کلیه پارامترهای مؤثر در ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و استوانه در محاسبه این ضریب در نظر گرفته شد. مقادیر فرکانس زاویه‌ای و ضریب خودالقائی معادل که از حلقه تکرار به دست آمده‌اند، نرخ همگرایی بسیار بالایی دارند. الگوریتم ارائه شده نیز چگونگی اعمال اثر تغییرات سه پارامتر مهم ظرفیت خازن، ولتاژ اولیه و شکل هندسی سیم‌پیچ را در محاسبه بخش مؤثر پالس جریان نشان می‌دهد و می‌تواند برای تعیین پارامترهای مناسب فرآیند مورد استفاده قرار گیرد.

## ۷. لیست علائم و نشانه‌ها

$t$ : زمان

$B$ : شار مغناطیسی

$\bar{\epsilon}$ : کرنش معادل

$I_1$ : جریان الکتریکی در دستگاه

$I_2$ : جریان الکتریکی در قطعه کار

$C$ : ظرفیت بانک خازن

$M$ : ضریب القاء متقابل

$R_0$ : مقاومت اهمی مدار دستگاه

$R_1$ : مقاومت اهمی سیم‌پیچ

$L_2$ : ضریب خودالقائی قطعه کار

$R_2$ : مقاومت اهمی در قطعه کار

$L_{eq}$ : ضریب خودالقائی معادل سیم‌پیچ و قطعه کار

$V_C$ : ولتاژ شارژ بانک خازن

$\omega_d$ : فرکانس زاویه‌ای پالس جریان دستگاه

$L_0$ : ضریب خودالقائی مدار دستگاه

$\phi$ : شار مغناطیسی در سطح داخلی سیم‌پیچ

## ۸. مراجع

- [1]. Fenton, G. K.; Daehn, G. S. "Modeling of Electromagnetically Formed Sheet Metal"; J. Mat. Proc. Tech. 75, Elsevier, 6–16, 1998.