

# مطالعه اثر طول لوله و سیم پیچ بر روی پارامترهای فرآیند شکل دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی

بهمن قربانی<sup>۱</sup> و \*، مهدی ظهور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

\*مسئول مکاتبات: bahmanghorbani@modares.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

شکل دهی الکترومغناطیسی  
فشار مغناطیسی  
سیم پیچ  
شکل دهی سرعت بالا

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۰۸  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۲۷

شکل دهی الکترومغناطیسی یکی از روش های شکل دهی پرسرعت است. در این روش شکل دهی، از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکل دهی قطعات استفاده می شود. اتصال قطعات با استفاده از این فرآیند یک روش نوین برای مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا می باشد. ارتباط بین لوله و سیم پیچ در شکل دهی الکترومغناطیسی لوله بر تغییر شکل لوله اثر می کند. از جمله آن ها، نسبت طول لوله به طول سیم پیچ است که یک پارامتر تعیین کننده می باشد. لذا مطالعه پارامترهای فرآیند، برای تغییر شکل شعاعی همگن در طول شکل دهی الکترومغناطیسی لوله لازم و مهم است. در این مقاله ابتدا، ضرورت توسعه فناوری شکل دهی الکترومغناطیسی در تولید قطعات صنعتی مورد بحث قرار گرفته است. سپس عوامل مهمی که منجر به بهبود شکل پذیری می شود، همانند طول لوله و طول سیم پیچ در تغییر شکل شعاعی لوله توسط شکل دهی الکترومغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان می دهد که با افزایش طول سیم پیچ، دامنه جریان تخلیه شده در سیم پیچ و فرکانس جریان تخلیه شده، کاهش می یابد. به علاوه، مقدار بیشینه فشار مغناطیسی با طول سیم پیچ بصورت معکوس متناسب است و همچنین توزیع نیروی مغناطیسی اعمالی بر روی لوله هنگامی که نسبت طول لوله به طول سیم پیچ برابر ۰/۹۲ می باشد، همگن است.

## ۱ مقدمه

امروزه یکی از راه های کاهش مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست، سبک سازی خودروهاست که در این مورد بکار گیری فلزات سبک در طراحی و ساخت بدنه خودرو پیشنهاد شده است. ساختار سبک وزن در صنایع هواپیمایی، هوافضا، حمل و نقل و دیگر حوزه ها نیز خیلی مفید است. آلیاژهای منیزیم، آلومینیوم و تیتانیوم، به دلیل چگالی پایین و استحکام ویژه بالا، مزایای مفیدی در این حوزه ها دارند [۱].

شکل دهی ورق های فلزی به دلیل کاربرد وسیع که در صنایع مختلف دارند؛ همواره با مشکلاتی از قبیل بازگشت فنری زیاد، چین خوردگی، قابلیت شکل پذیری پایین ورق که منجر به پارگی آن می شود، روبروست. در فرآیندهای شکل دهی با نرخ کرنش بالا از قبیل شکل دهی انفجاری، شکل دهی الکتریکی- هیدرولیکی و شکل دهی الکترومغناطیسی، مشکلات مذکور تا حدود زیادی مرتفع می شوند [۲].

یکی از پرجاذبه ترین روش های شکل دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل دهی الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> است، که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس<sup>۲</sup> جهت شکل دهی فلزات با قابلیت هدایت الکتریکی بالا، مانند آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها استفاده می شود [۳-۵]. از مزیت های فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی می توان به عدم وجود

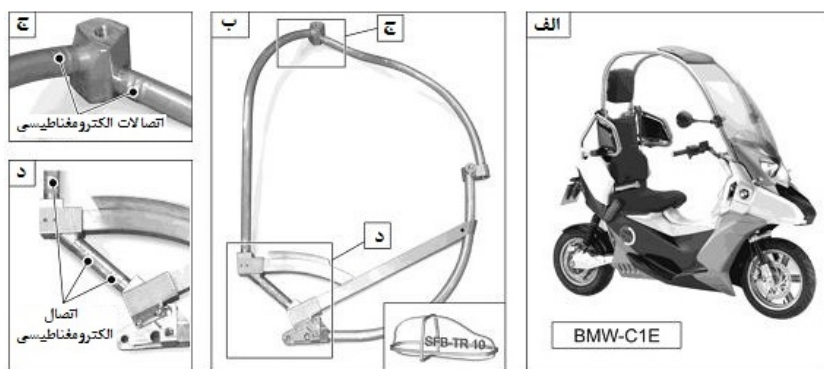
تماس فیزیکی بین سیم پیچ و قطعه کار، تماس یک طرف قالب با قطعه کار، برگشت فنری کم نسبت به فرآیندهای استاتیکی مشابه، بهبود خواص مکانیکی قطعه کار و قابلیت شکل پذیری به دلیل نرخ کرنش بالا در فرآیند اشاره کرد [۱، ۲]. از محدودیت های روش شکل دهی الکترومغناطیسی این است که قطعه کار باید رسانای جریان الکتریکی باشد.

این روش برای فرم دهی و اتصال فلزات به دیگر مواد استفاده می شود. کاربرد عمده این فرآیند در کارخانجات فلزکاری شامل خودرو، هوافضا و مخصوصاً در قطعات مونتاژی می باشد [۶-۸]. تولید اقتصادی اتصالات استحکام بالا، یک چالش بزرگ برای تولید ساختار اتومبیل می باشد. امروزه تمرکز صنعت اتومبیل، استفاده از این فرآیند جهت کاهش وزن بدنه خودرو به منظور بهینه سازی قوای محرکه، می باشد. (شکل ۱)

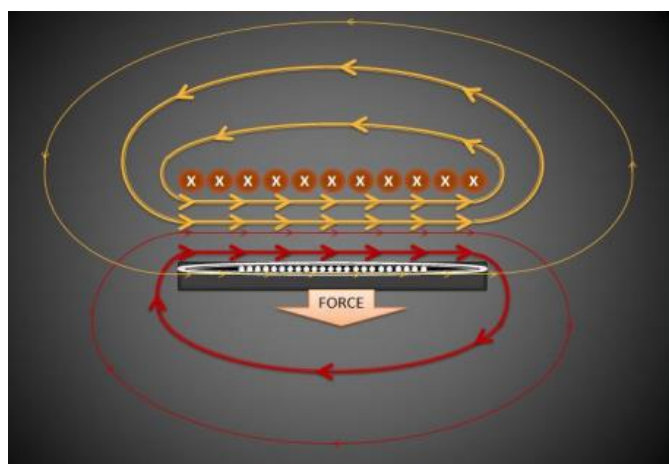
در شکل ۱ نمونه ای از کاربرد این روش برای اتصال قطعات در محصولات صنعتی که یک روش نوین می باشد، را مشاهده می نمایید. تمام اتصالات این ساختار، اتصال شکلی<sup>۳</sup> بوده که با استفاده از شکل دهی الکترومغناطیسی بوجود آمده اند. مطابق شکل ۲ در اتصالات شکلی، لوله به داخل یک شیار که بر روی ماندرل ایجاد شده، رانده می شود و اتصال در نتیجه قفل مکانیکی بوجود می آید.

شماتیک سیستم شکل دهی الکترومغناطیسی در شکل ۳ نشان داده شده

<sup>۱</sup>Electro-Magnetic Forming (EMF) <sup>۲</sup>Lorentz <sup>۳</sup>Form Fit

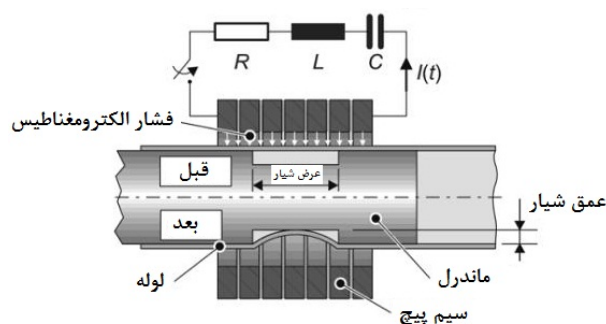


شکل ۱: الف) وسیله نقلیه BMW-C1E (ب) ساختار پیشنهادی برای BMW-C1E ساخته شده در مرکز تحقیقات SFB/TR10 ج و د) اتصالات ساخته شده با روش الکترومغناطیسی [۵]



شکل ۴: شماتیک فعل و انفعالات در شکل دهی الکترومغناطیسی [۱۴]

است که عمدتاً از یک منبع تغذیه پالسی، منبع ذخیره انرژی (خازن)، کلید آمپر بالا، یک سیم پیچ و قطعه کار تشکیل شده است.



شکل ۲: شماتیک اتصال توسط فرآیند الکترومغناطیسی [۵]

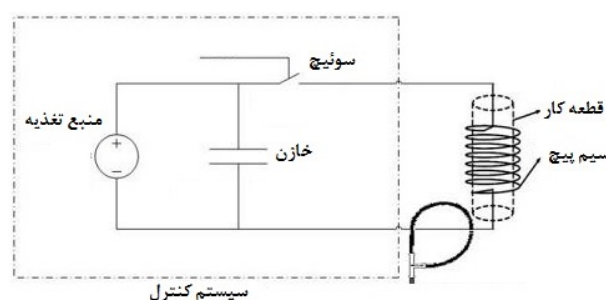
اجزاء شکل دهی الکترومغناطیسی:

- سیم پیچ (قهوه ای)
- میدان حاصل از سیم پیچ (طلایی)
- قطعه کار (مشکی)
- جریان های گردابی (سفید)
- میدان ناشی از جریان های گردابی (قرمز)

همواره شناخت و درک فرآیندها و همچنین تاثیر پارامترهای فرآیند در بهینه سازی پارامترها کمک شایانی خواهد نمود. تغییر شکل شعاعی همگن در حین شکل دهی الکترومغناطیسی لوله بسیار مهم و کارآمد خواهد بود. در سال های اخیر، محققین زیادی [۱۳-۱۶] بر روی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی مطالعه کرده اند. لذا در این نوشتار سعی شده است با توجه با کارهای پژوهشی صورت گرفته، تعامل اثر بین لوله و سیم پیچ که بر توزیع میدان و همچنین نیروی مغناطیسی در حین تغییر شکل لوله تاثیر گذار است، مورد مطالعه قرار گیرد.

## ۲ تحلیل مداری

مدل مداری شماتیک فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی در شکل ۵ نشان داده شده است.



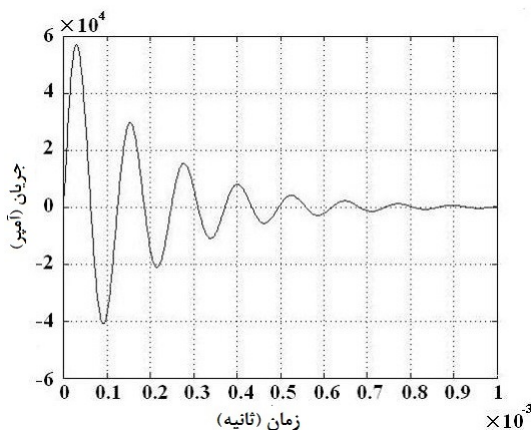
شکل ۳: شماتیک اجزاء شکل دهی الکترومغناطیسی [۸]

مطابق شکل ۳، با تخلیه خازن و بسته شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میرا در سیم پیچ می شود. به این ترتیب در اطراف سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان ایجاد می شود. طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی پالسی شکل ایجاد شده جریان الکتریکی ثانویه ای در قطعه کار (لوله) القا کرده که جهت آن خلاف جهت سیم پیچ ابزار است. این جریان بوجود آمده یک میدان مغناطیسی دیگری تشکیل می دهد. دو میدان مغناطیسی موجود، نیروهایی بوجود می آورند که مخالف یکدیگر می باشند (نیروی الکترومغناطیسی لورنتس)؛ نیروی دافعه به میزانی است که منجر به تغییر شکل پلاستیک لوله می شود [۹-۱۳]. شکل ۴ شماتیک شکل دهی آزاد به سمت داخل یک لوله با استفاده از سیم پیچ فشاری را نشان می دهد.

بوده و فرکانس نوسانات میرا شونده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (11)$$

پاسخ مدار به صورت یک موج سینوسی میرا خواهد بود که دامنه آن رفته رفته کم شده و به صفر می‌رسد. (شکل ۶)



شکل ۶: تغییرات جریان تخلیه مدار در سیم پیچ ماریچ

با حل معادله (۵) جریان تخلیه شده در سیم پیچ ماریچ با فرض صرف نظر از تغییرات ضریب خودالقائی معادل در حین فرآیند شکل دهی، با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$I(t) = \frac{V}{L\omega_d} e^{-t/\tau} \sin \omega_d t \quad (12)$$

که در آن  $\tau$  ضریب میرایی مدار و  $\omega_d$  فرکانس زاویه ای می‌باشد، که با استفاده از روابط ذیل بدست می‌آیند [۱۵]:

$$\tau = \frac{1}{\gamma} = \frac{2L}{R} \quad (13)$$

در روابط فوق،  $V$  ولتاژ اولیه ذخیره شده در بانک خازن،  $C$  ظرفیت کلی مدار،  $L$  ضریب القاء مغناطیسی کلی مدار و  $R$  مقاومت کلی مدار می‌باشد. اندوکتانس معادل مدار تخلیه توسط معادله زیر که شامل اندوکتانس ذاتی ( $L_i$ ) مدار و اندوکتانس شکل دهی (سیم پیچ و لوله) می‌تواند بیان شود.

$$L = L_i + L_c \left(1 - \frac{a^2}{c^2}\right) \quad (14)$$

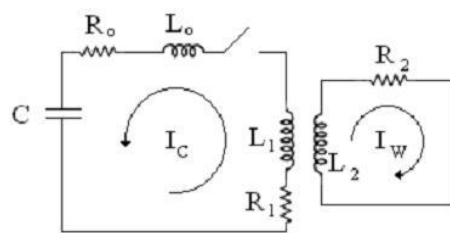
که  $a$  شعاع میانی لوله (متر) شعاع داخلی سیم پیچ (متر)  $L_c$  اندوکتانس سیم پیچ از معادله،

$$L_c = \lambda \mu_0 \pi c^2 T^2 l \quad (15)$$

### ۳ معادلات الکترو دینامیک

موازنه انرژی در مدار معادل در هنگام تخلیه ولتاژ در حین فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی، بصورت زیر است.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \right) + i^2 R + \dot{w} = 0 \quad (16)$$



شکل ۵: مدل مداری شماتیک فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی

با توجه به قانون ولتاژ کریشف<sup>۱</sup> دو معادله (۱) و (۲) از تحلیل مداری، مدار شماتیک به دست می‌آیند.

$$(L_o + L_1) \frac{dI_c(t)}{dt} + M \frac{dI_w(t)}{dt} + (R_o + R_1) I_c(t) + \frac{1}{C} \int I_c(t) dt = 0 \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_w(t)}{dt} + M \frac{dI_c(t)}{dt} + R_2 I_w(t) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $M$  ضریب القاء متقابل،  $R$  مقاومت اهمی،  $C$  ظرفیت خازن،  $L$  ضریب خودالقائی،  $I_c$  جریان سیم پیچ،  $I_w$  جریان گردابی قطعه کار می‌باشد. همچنین شرایط اولیه برای معادلات (۱) و (۲) به صورت زیر می‌باشد:

$$I_w = 0; \quad I_c = 0; \quad (L_o + L_1) \frac{dI_c(t)}{dt} = V \quad (3)$$

پس از ساده سازی مدار فرآیند به یک مدار  $RLC$  سری که از نوع مدارهای مرتبه دوم بوده، معادله دیفرانسیل جریان آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\gamma \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (4)$$

$$L \frac{dI_c(t)}{dt} + R I_c(t) + \frac{1}{C} \int I_c(t) dt = 0 \quad (5)$$

معادله پاسخ پس از مشتق گیری از معادله (۵) بصورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$L \frac{d^2 I_c(t)}{dt^2} + R \frac{dI_c(t)}{dt} + \frac{I_c(t)}{C} = 0 \quad (6)$$

با استفاده از معادلات (۴) و (۶) داریم:

$$2\gamma = \frac{R}{L} \quad (7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (8)$$

معادله مشخصه معادله (۴) و ریشه های آن به صورت زیر می‌باشد:

$$S^2 + 2\gamma S + \omega_0^2 = 0 \quad (9)$$

$$S_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \quad (10)$$

در معادله (۱۱) با فرض  $\frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}} < \omega_0$  معادله مشخصه دو ریشه مزدوج مختلط دارد. شکل سیگنال خروجی در این حالت میرای ضعیف<sup>۲</sup>

<sup>1</sup>KVL <sup>2</sup>Under Damped

جریان پالسی عبوری از سیم پیچ در شکل دهی الکترومغناطیسی براحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین ملاحظه شده که اولین دوره تناوب جریان پالسی، برای تعیین نیرو در فشردن لوله معتبر می‌باشد.

طول سیم پیچ بر روی شکل موج جریان اولیه تاثیرگذار می‌باشد. با افزایش طول سیم پیچ، دامنه جریان کاهش یافته و دوره تناوب آن طولانی می‌شود. شکل ۹ وابستگی طول سیم پیچ و شکل موج جریان اولیه را نشان می‌دهد.

جهت مطالعه اثر متقابل طول لوله و سیم پیچ دو پارامتر،  $R$  (نسبت فشار شعاعی در انتهای لوله به وسط لوله) و  $l$  (نسبت طول لوله به سیم پیچ) تعریف می‌شود. مطابق شکل ۱۰ وقتی که مقدار  $l$  کمتر از عدد یک (طول لوله کوتاهتر از طول سیم پیچ) است، فشار شعاعی در انتهای لوله بیشتر از وسط لوله خواهد بود؛ و هنگامی که  $l$  بزرگتر از عدد یک باشد، میزان فشار شعاعی در انتهای لوله کمتر از وسط لوله می‌باشد.

مناسب‌ترین حالت (نقطه  $A$ ) هنگامی است که مقدار نسبت طول لوله به سیم پیچ در حدود ۰/۹۲ باشد، در این هنگام فشار شعاعی در انتهای لوله مساوی فشار شعاعی در وسط لوله و به عبارت دیگر توزیع فشار شعاعی یکنواخت خواهد بود.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که نسبت طول لوله به سیم پیچ ( $l$ ) بر روی تغییر شکل همگن لوله نیز اثر دارد. هنگامیکه  $l$  بزرگتر از میزان بحرانی باشد، لوله به شکل شپور شکل داده می‌شود. اگر  $l$  کمتر از میزان بحرانی باشد، لوله به شکل درام خواهد بود. (شکل ۱۲)

## ۶ نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی که یک رویکرد مناسب برای تولید ساختار سبک می‌باشد، انجام شد و برخی پارامترهای فرآیند مانند طول لوله و سیم پیچ بر روی فشار مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که با افزایش طول سیم پیچ دامنه جریان سیم پیچ و فرکانس جریان کاهش می‌یابد.

به علاوه، مقدار بیشینه فشار مغناطیسی بصورت معکوس متناسب است با طول سیم پیچ و توزیع نیروی مغناطیسی اعمالی بر روی لوله زمانی که نسبت طول لوله به طول سیم پیچ ۰/۹۲ است همگن می‌باشد. در نهایت می‌توان اینگونه بیان نمود، هنگامیکه طول لوله خیلی کوتاهتر از طول سیم پیچ است نمی‌توان فشار محوری را نادیده گرفت.

## ۷ قدردانی

بدین وسیله نگارندگان این مقاله از راهنمایی‌های دکتر هایپینگ از دانشگاه هاربین چین و دکتر کوریا از دانشگاه استراسبورگ فرانسه، تشکر می‌نمایند.

که  $i$  جریان در سیم پیچ،  $q$  شارژ خازن،  $\dot{w}$  نرخ انجام کار مغناطیسی در تغییر شکل لوله می‌باشد. همچنین معادله موازنه ولتاژ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{d(Li)}{dt} + \frac{Q}{C} + iR = 0 \quad (17)$$

$$\dot{w} = \frac{i^2 dL}{2 dt} \quad (18)$$

لذا فشار مغناطیسی بصورت زیر بیان می‌شود [۱۶].

$$P = P_0 \exp(-\gamma\beta t) \sin^2\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right) t \quad (19)$$

که در آن،  $P_0$  مقدار پیک نامی فشار مغناطیسی است که بصورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$P_0 = \frac{CV^2}{2\pi l(c^2 - a^2)} \quad (20)$$

## ۴ اثر طول لوله

در نتایج تجربی [۱۶] با افزایش طول لوله، میزان انرژی ذخیره شده در خازن بر روی سطح بیشتری تخلیه شده و منجر به کاهش فشار الکترومغناطیسی می‌گردد که موافق با رابطه (۲۰) و همچنین مراجع [۱] و [۷] می‌باشد. فشار مغناطیسی در وسط لوله با افزایش طول لوله کاهش یافته و هنگامی که طول لوله نزدیک به طول سیم پیچ است، فشار مغناطیسی تمایل به پایدار شدن دارد [۱۶].

همانگونه که در شکل ۷ مشخص است، طول لوله کوتاهتر موجب توزیع ناهموارتر فشار مغناطیسی در راستای طول لوله می‌شود. هنگامی که لوله خیلی کوتاه است، فشار شعاعی و محوری در انتهای لوله بزرگتر از وسط لوله خواهد شد.

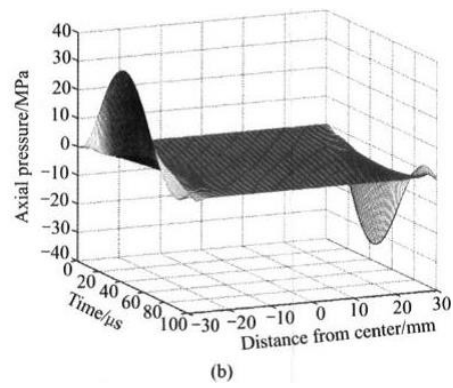
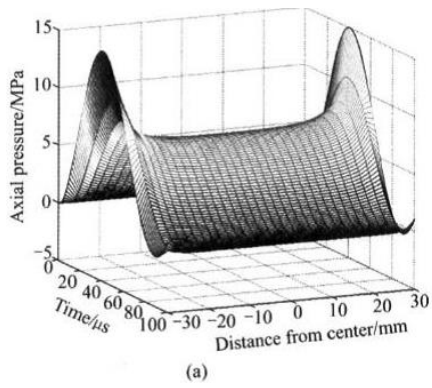
علت این امر را اینگونه می‌توان بیان نمود که، هنگامی که طول لوله کوتاهتر از سیم پیچ است، تعداد المان‌های بیشتری از سیم پیچ با المان انتهایی لوله کوپل انجام داده و در نتیجه منجر به افزایش فشار در انتهای لوله می‌گردد. سپس با افزایش طول لوله فشار مغناطیسی هموارتر شده و فشار شعاعی و محوری با یکدیگر کاهش می‌یابند.

وقتی طول سیم پیچ مشابه طول لوله است، فشار مغناطیسی شعاعی در انتهای لوله کمتر از مقدار آن در وسط لوله شده و همچنین فشار مغناطیسی محوری کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود.

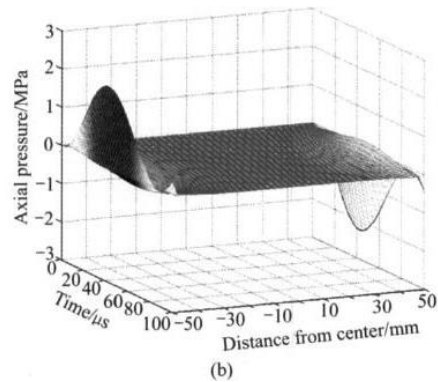
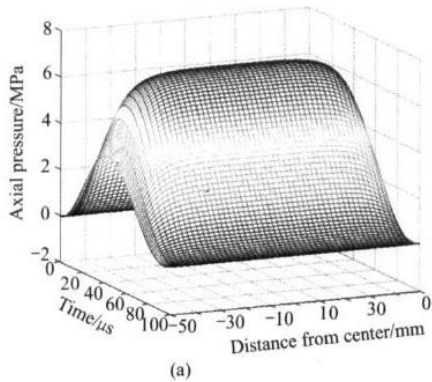
## ۵ اثر طول سیم پیچ

از معادله ۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بیشینه فشار مغناطیسی پالسی به صورت معکوس به طول سیم پیچ وابسته است. سیم پیچ کوتاهتر باعث می‌شود که مقدار بیشینه فشار مغناطیسی افزایش یافته و همچنین ناحیه اعمال فشار مغناطیسی کوچکتر می‌شود.

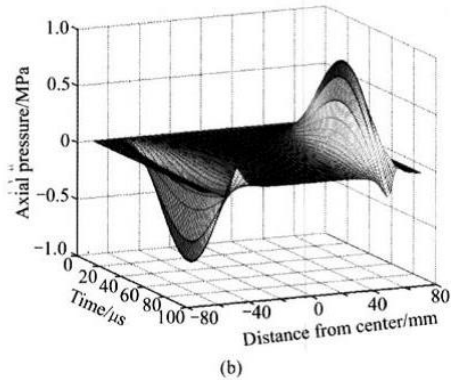
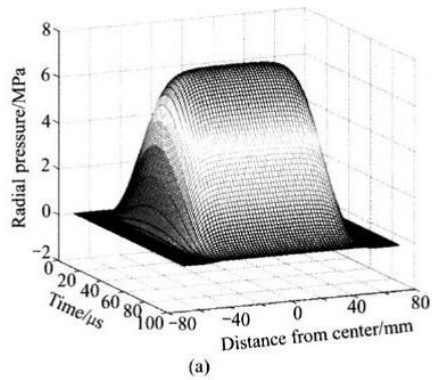
از سویی افزایش طول سیم پیچ باعث افزایش اندوکتانس معادل مدار شده؛ افزایش اندوکتانس نیز منجر به کاهش فشار مغناطیسی می‌گردد.



(الف) توزیع فشار مغناطیسی برای لوله‌ای بطول ۶۰ میلی‌متر (a) فشار مغناطیسی شعاعی (b) فشار مغناطیسی محوری

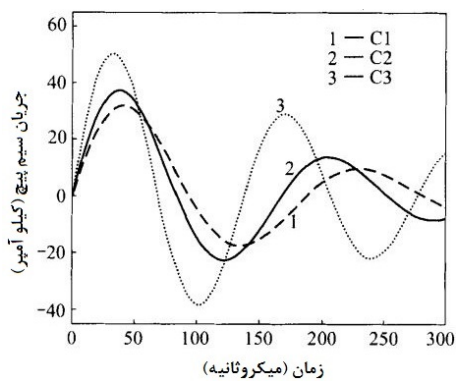


(ب) توزیع فشار مغناطیسی برای لوله‌ای بطول ۱۰۰ میلی‌متر (a) فشار مغناطیسی شعاعی (b) فشار مغناطیسی محوری

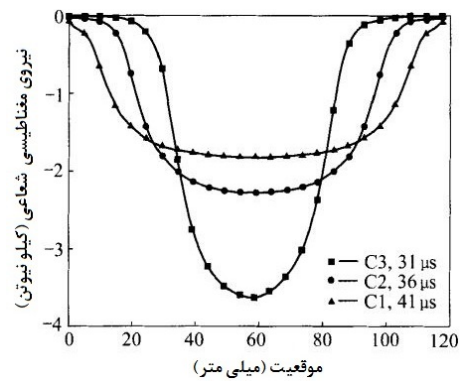


(ج) توزیع فشار مغناطیسی برای لوله‌ای بطول ۱۴۰ میلی‌متر (a) فشار مغناطیسی شعاعی (b) فشار مغناطیسی محوری

شکل ۷: توزیع فشار مغناطیسی شعاعی و محوری برای لوله با طول‌های مختلف [۱۶]

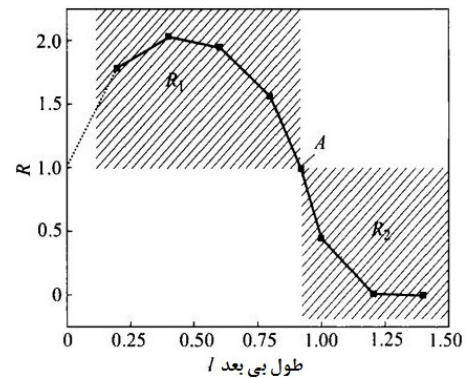


شکل ۹: اثر طول سیم پیچ بر روی جریان

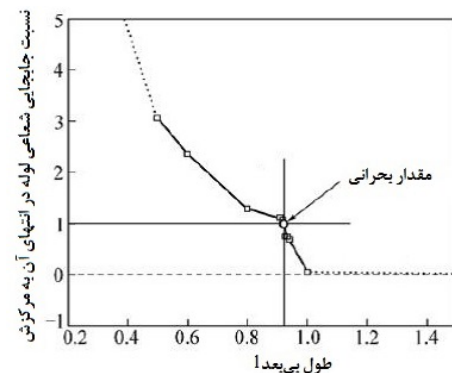


شکل ۸: بیشینه نیروی مغناطیسی با طول سیم پیچ‌های مختلف

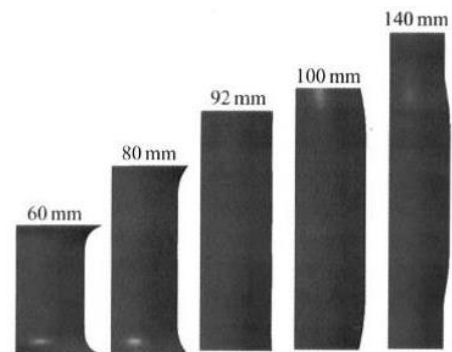
- [4] Zhong, LI, Li, Chun-Feng, Yu, Hai-Ping, and Zhao, Zhi-Heng. Effect of tube size on electromagnetic tube bulging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(4):705-710, 2007.
- [5] Weddeling, C, Woodward, S, Nellesen, J, Psyk, V, Marré, M, Brosius, A, Tekkaya, AE, Daehn, GS, and Tillmann, W. Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures. in *4th International Conference on High Speed Forming*, pp. 137-148, 2010.
- [6] Haratmeh, H Ebrahimi, Arezoodar, AR Fallahi, Farzin, M, Attaran, M, and Toroghi, S. Electromagnetic bulge forming: investigation of electrical and mechanical parameters on forming process. in *6th international conference on electromagnetic processes of materials*, 2009.
- [7] Zohoor, Mehdi and Ghorbani, Bahman. Analytical and numerical analysis of geometrical and physical significant parameters on the strength of electromagnetically joints. *Journal of Aerospace Mechanics*, 14(2):57-66, 2017 (in Persian).
- [8] Murakoshi, Yoichi, Takahashi, Masaharu, Sano, Toshio, Hanada, Kotaro, and Negishi, Hideaki. Inside bead forming of aluminum tube by electro-magnetic forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 80:695-699, 1998.
- [9] Arezoodar, Alireza Fallahi, Haratmeh, Hossein Ebrahimi, and Farzin, Mohmoud. Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming-electromagnetic study. in *Advanced Materials Research*, vol. 383, pp. 6710-6716. Trans Tech Publ, 2012.
- [10] El-Azab, Anter, Garnich, Mark, and Kapoor, Ashish. Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3):744-754, 2003.
- [11] Sedighi, Mohammad, Karimi-Nemch, H, and Khandaei, M. Effect of sheet thickness on magnitude and distribution of magnetic force in electromagnetic sheet metal forming process. in *Applied mechanics and materials*, vol. 110, pp. 3506-3511. Trans Tech Publ, 2012.
- [12] Kashani, Mojtaba, Khamedi, Ramin, and Ebrahimi, Hossein. Tube electromagnetic forming coupled simulation by ansys and ls-dyna and comparison with experimental results. *Modares Mechanical Engineering*, 15(5):159-164, 2015.
- [13] Zohoor, Mehdi and Ghorbani, Bahman. Numerical investigation of tube compression electromagnetic forming by finite element method and design of experiment. *Journal of Aerospace Mechanics*, 11(3):83-90, 2015 (in Persian).
- [14] Yu, Hai-ping and Li, Chun-Feng. Effects of coil length on tube compression in electromagnetic forming. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 17(6):1270-1275, 2007.
- [15] Li, Chunfeng, Zhao, Zhiheng, Li, Jianhui, and Li, Zhong. The effect of tube length on magnetic pressure in tube electromagnetic bulging. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3):381-386, 2005.
- [16] Zhong, LI, Li, Chun-Feng, Yu, Hai-Ping, and Zhao, Zhi-Heng. Effect of tube size on electromagnetic tube bulging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(4):705-710, 2007.



شکل ۱۰: ارتباط بین طول بی بعد  $l$  و  $R$



شکل ۱۱: اثر نسبت طول لوله به سیم پیچ بر روی تغییر شکل لوله [۱۵]



شکل ۱۲: لوله‌های آلومینیومی شکل داده شده با طول‌های مختلف [۱۶]

## مراجع

- [1] Zohoor, Mehdi, Ghorbani, Bahman, Mohammadinia, Mohammad, Arezoodar, Fallahi, and Reza, Ali. Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method. *Modares Mechanical Engineering*, 16(1):129-136, 2016 (in Persian).
- [2] Mamalis, AG, Manolakos, DE, Kladas, AG, and Koumoutsos, AK. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*, 57(4):299-324, 2004.
- [3] Correia, JPM, Siddiqui, MA, Ahzi, Saïd, Belouettar, S, and Davies, R. A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(10-11):1466-1475, 2008.