



## بررسی تجربی اثر الکتروپلاستیک بر رفتار کرنش ورق آلومینیومی 6061-T6 از طریق آزمایش کشش تک محوره

سید حسین اسلامی<sup>۱</sup>، حمید گرجی<sup>۲\*</sup>، محمد بخشی جویباری<sup>۳</sup>، امیرحسام فرخنده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: hamidgorji@nit.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۴ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۸ دی ۱۴۰۲

### کلیدواژگان:

اثر الکتروپلاستیک

آزمایش کشش تک محوره

آلومینیوم ۶۰۶۱

شکل دهی فلزات با الکتریسیته

### چکیده

نتایج پژوهش‌های صورت گرفته از سوی محققان نشان داده است که اعمال جریان الکتریکی به فلز در حین تغییر شکل می‌تواند منجر به بهبود شکل‌پذیری ماده شود. این روش، موسوم به شکل‌دهی به کمک الکتریسیته است. در این مقاله، به صورت تجربی اثر الکتروپلاستیک بر رفتار کرنش ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به کمک آزمایش کشش تک‌محوره مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، نمونه‌های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M از ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۱ میلی‌متر برش داده شدند. سپس در حالت بدون جریان و در شدت جریان‌های ۲۶۰، ۳۶۰ و ۴۶۰ آمپر مورد بررسی قرار گرفته تا شدت جریان مناسب به دست آید. نتایج نشان داده است که در شدت جریان ۳۶۰ آمپر، مقدار کشش در نمونه نسبت به حالت بدون جریان، افزایش می‌یابد. به علاوه، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از دو شکل موج مربعی و سینوسی انجام شد و نشان داده که شکل موج سینوسی اثر بیشتری بر افزایش شکل‌پذیری دارد. زمان خاموشی و روشنی پالس نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که، در زمان خاموشی ۲۰ میلی‌ثانیه و زمان روشنی ۱۲۰ میکروثانیه بیشترین کشش ایجاد می‌شود. در نهایت نمونه آنیل گردید و با پارامترهای به دست آمده، آزمایش تکرار شد. نتایج نشان داد که با اعمال پالس الکتریکی با پارامترهای مناسب بر روی نمونه آزمایش کشش، شکل‌پذیری نمونه‌های آلومینیوم 6061-T6 بهبود ۲۳ درصدی می‌یابد.

## Experimental investigation of electro plastic effect on strain behavior of 6T-6061 aluminum sheet through uniaxial tensile test

Seyed Hossein Eslami<sup>1</sup>, Hamid Gorji<sup>2\*</sup>, Mohammad Bakhshi-Jooybari<sup>2</sup>, Amirhesam Farkhondeh<sup>3</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\* Corresponding Author's Email: hamidgorji@nit.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 25 December 2023

Accepted: 18 January 2024

### Keywords:

Electro Plastic Effect

Uniaxial Tensile Test

Aluminum 6061

Metal Forming With Electricity

### Abstract

The results of the research conducted by the researchers have shown that the application of electric current to the metal during deformation can lead to the improvement of the plasticity of the material. This method is known as forming with the help of electricity. In this article, the electro plastic effect on the strain behavior of a 6061-T6 aluminum alloy sheet has been investigated experimentally through the uniaxial tensile test. For this purpose, tensile test samples were cut from a 6061-T6 aluminum alloy sheet with a thickness of 1 mm according to ASTM E8/E8M standard. Then it was examined in the state of no current and in the intensity of currents of 260, 360 and 460 amperes until the appropriate intensity of current is obtained. The results have shown that at a current intensity of 360 amps, the amount of extension in the sample increases compared to the state without current. In addition, a comparison was made between the results of two square and sinusoidal waveforms and it was shown that the sinusoidal waveform has a greater effect on increasing formability. The on and off time of the pulse was also investigated and it was determined that the maximum extension is created in the off time of 20 ms and the on time of 120 μs. Finally, the sample was annealed and the test was repeated with the obtained parameters. The results showed that by applying an electric pulse with appropriate parameters, the formability of 6061-T6 aluminum samples is improved by 23%.

### Please cite this article using:

Eslami SH, Gorji H, Bakhshi-Jooybari M, Farkhondeh A. Experimental investigation of electro plastic effect on strain behavior of 6T-6061 aluminum sheet through uniaxial tensile test. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):1-9. doi: 10.22034/IJME.2024.432255.1890 [In Persian]

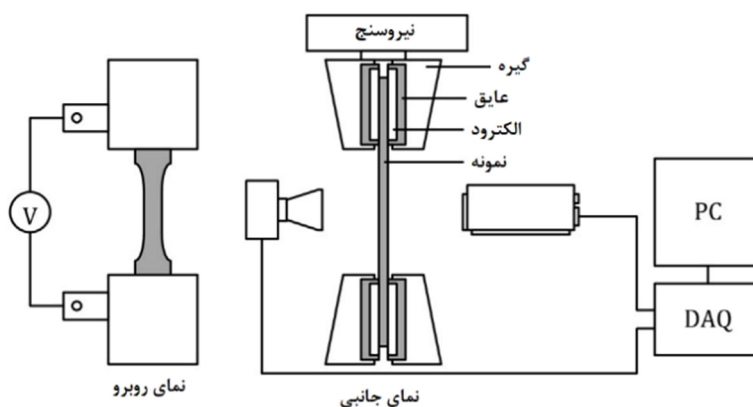
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

با افزایش روزافزون حساسیت به موضوعات اقتصادی و مسائل زیست محیطی، صنایع خودروسازی و هوایی توجه خود را به بهبود بهره‌وری سوخت معطوف کرده‌اند. یک راهکار اصلی برای دستیابی به این هدف، استفاده از آلیاژهای سبک‌وزن با استحکام بالا در طراحی خودروها و هواپیماها بوده است. با این وجود، این آلیاژها به دلیل شکل‌پذیری پایین و استحکام تسلیم بالا، برای استفاده در روش‌های مرسوم شکل‌دهی و روش‌های ماشین‌کاری با چالش‌هایی نظیر افزایش زمان فرآیند، استحکام ناکافی و کاهش دقت ابعادی قطعات تولید شده مواجه هستند [۱، ۲].

در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، کم کردن تعداد مراحل بسیار قابل توجه است. در صنایع خاص مانند هوافضا، به دلیل کم بودن تعداد قطعات تولیدی و شکل‌پذیری پایین آن، هزینه ساخت قالب به‌طور قابل توجهی بر قیمت تمام شده محصول تأثیرگذار است. از این‌رو، کم کردن تعداد مراحل بسیار با اهمیت است. روش شکل‌دهی به کمک الکتریسیته، برخلاف روش‌های مرسوم شکل‌دهی ورق فلزی، به دلیل عدم نیاز به زمان اضافی، کیفیت بالای قطعات تولیدی و امکان دستیابی به نسبت کشش بیشتر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این روش، برای تولید در تعداد کم و قطعات خاص که دارای شکل‌پذیری پایین هستند، در مقایسه با فرآیندهای مشابه از نظر اقتصادی می‌تواند مقرون به صرفه باشد. در این روش، جریان الکتریکی به نمونه در طول تغییر شکل اعمال می‌شود و چند پدیده به‌طور هم‌زمان در آن رخ می‌دهد که می‌تواند خواص مکانیکی فلز را اصلاح کند [۳].

به دلیل کاهش برگشت فنی، روش شکل‌دهی به کمک الکتریسیته می‌تواند باعث افزایش دقت ابعادی قطعه نیز گردد. به‌علاوه، در این روش انرژی الکتریکی می‌تواند بدون ایجاد وقفه در روند تغییر شکل، به قطعه کار اعمال شود. مزایای چندگانه حاصل از اعمال الکتریسیته در مجموع به عنوان اثر الکتروپلاستیک شناخته می‌شود [۴]. اجزای اصلی مجموعه آزمایش در این روش شامل یک منبع تغذیه قابل کنترل برای تولید الکتریسیته، یک سیستم جمع‌آوری اطلاعات و عایق‌ها به منظور جداسازی قطعه کار از گیره در برابر الکتریسیته اعمالی هستند [۳]. شکل ۱ شماتیک آزمایش کشش به کمک الکتریسیته را نشان می‌دهد. در این روش جریان الکتریکی می‌تواند از نوع مستقیم یا متناوب و به صورت پالسی به یک فرایند اعمال شود. جریان پالسی می‌تواند در شکل موج‌های مختلف مانند سینوسی، مربعی یا دندان‌اره‌ای در مدت زمان روشنی پالس به کار رود [۱].



شکل ۱ شماتیک فرایند آزمایش کشش به کمک جریان پالسی الکتریسیته

در زمینه شکل‌دهی به کمک الکتریسیته، تاکنون تحقیقات محدودی انجام گرفته است. ژو و همکاران [۵]، به بررسی تجربی فرآیند نورد نوارهای آلیاژ حافظه‌دار TiNi به کمک الکتریسیته بدون عملیات حرارتی واسطه پرداختند. هدف از پژوهش آن‌ها بررسی میزان بهبود شکل‌پذیری و تغییر شکل کلی از نظر کاهش ضخامت نوارها در پاس‌های مختلف بوده است. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش ضخامت آلیاژ TiNi به کمک پالس الکتریکی در طی یک پاس نورد می‌تواند به ۲۱٪ برسد، درحالی‌که مقدار آن در فرایندهای مرسوم نوردکاری تنها به ۱۰٪ محدود می‌شود. به‌علاوه، افت مشهود در نیروی جداکننده نورد در مقایسه با عملیات نورد ساده به عنوان اثر حرارتی و غیرحرارتی، به حرکت نابه‌جایی‌ها و انتشار اتم‌ها کمک می‌کند. آن‌ها این روش را دارای مزایای منحصر به فرد برای فرآوری مواد با مومسانی کم و سخت شکل‌پذیر معرفی کردند.

سانچزایگا و همکاران [۶]، فرآیند خم کاری به کمک الکتریسیته در قالب V شکل را برای ورق های آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ و فولاد زنگ نزن مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش آن ها تحلیل اثرات غیرحرارتی الکترومومسانی بوده است. با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که اثر پالس جریان بر فرآیند شکل دهی از یک ماده به ماده دیگر متفاوت است. به علاوه، فرآیند خم کاری به کمک الکتریسیته با پالس جریان کوتاه، فرآیندی امکان پذیر و بدون نیاز به تجهیزات پیچیده است. آنان همچنین دریافتند که نیروی خم کاری و توان مصرفی در این نوع روش به کمک الکتریسیته، در مقایسه با روش های مرسوم شکل دهی و روش خم کاری به کمک الکتریسیته با جریان پیوسته، به میزان قابل توجهی کمتر است.

ژی و همکاران [۷]، فرآیند کشش عمیق استوانه ای به کمک الکتریسیته را برای ورق آلیاژ منیزیم AZ31B بررسی و اثرات حرارتی الکتریسیته بر خواص مکانیکی ماده را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها پارامتر عمق کشش حدی را به عنوان یک معیار برای مقایسه بین نتایج در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که افزایش فرکانس جریان و پیک جریان در دمای یکسان (۴۰۰ کلوین) منجر به افزایش عمق کشش حدی می شود. آنان همچنین دریافتند که دما نقش مهمی در بهبود عمق کشش حدی ورق منیزیم در فرآیند کشش عمیق به کمک الکتریسیته ایفا می کند و موفق به افزایش عمق کشش از ۳ میلی متر در دمای اتاق به ۱۱/۵ میلی متر در دمای ۴۵۰ کلوین برای این آلیاژ شدند.

جونز و میرز [۸]، فرآیند شکل دهی انبساطی به کمک جریان الکتریسیته را برای نمونه های ورقی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بررسی کردند و اثرات اعمال الکتریسیته را بر روی خواص مکانیکی آن فلز مورد ارزیابی قرار دادند. آن ها با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که اعمال جریان الکتریکی به فرآیند شکل دهی انبساطی، تنش سیلان را کاهش می دهد. همچنین، با مدیریت حرارت نمونه در طول آزمایش، مشاهده کردند که با اعمال پالس الکتریکی، کاهش شکل پذیری نیز امکان پذیر است. به علاوه، آن ها دریافتند که محل اعمال جریان الکتریکی (از سنبه به ماتریس و از دو طرف ماتریس) و جهت جریان بر روی شکل پذیری و نیروی شکل دهی تأثیری نداشته است.

خلیلی و همکاران [۹]، تأثیر پارامترهای فرآیندی شامل مقدار جریان، فرکانس پالس و شکل موج پالس سینوسی و مربعی را بر نیروی شکل دهی، توزیع ضخامت و عمق کشش در فرآیند کشش عمیق مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، نمونه هایی به ابعاد ۳۰×۳۰ میلی متر با استفاده از ورق هایی از جنس آلومینیوم ۵۰۵۲ به ضخامت ۱ میلی متر و به کمک جریان پالسی، شکل داده شدند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار جریان، منجر به کاهش حداکثر مقدار نازک شدگی و نیرو در فرآیند کشش عمیق قطعات شکل داده شده می شود. به علاوه مشخص شد که در فرکانس بیشتر، نیروی شکل دهی کاهش قابل توجهی یافته و توزیع ضخامت یکنواخت تر می شود.

محمدتبار و همکاران [۱۰]، در سال ۲۰۲۰ اثر جریان الکتریکی پالسی را بر میزان برگشت فنری ورق آلیاژ آلومینیوم AA۲۰۲۴ در جریان پالسی سینوسی و مربعی بررسی کرده اند. نتایج آزمایش کشش در جریان های متناوب سینوسی و مربعی نشان داده است که تنش تسلیم و تنش نهایی با اعمال جریان متناوب کاهش و میزان شکل پذیری تا شکست نمونه افزایش پیدا کرده است که این میزان کاهش و افزایش در جریان متناوب سینوسی به میزان بیشتری بروز نموده است.

زو و همکاران [۱۱]، در سال ۲۰۲۲ اثر الکتروپلاستیک را بر فویل های منیزیم AZ31 از طریق آزمایش کشش تک محوره بررسی کرده اند. نتایج نشان داده است که در اثر اعمال جریان الکتریکی، انعطاف پذیری نمونه به صورت چشمگیری زیاد شده است که با بررسی های ریز ساختاری علت این امر افزایش سرعت حرکت نابجایی ها در اثر اعمال جریان الکتریکی عنوان شده است.

پاخومو و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۲۳ اثر الکتروپلاستیک را بر رفتار پلاستیک فولاد زنگ نزن دو فازی از طریق آزمایش های کشش و خمش بررسی کرده اند. با مقایسه نتایج آزمایش انجام شده به کمک اعمال جریان الکتریکی پالسی و نتایج آزمایش انجام شده به کمک بالابردن حرارت، مشاهده شده است که در هر دو حالت، شکل پذیری افزایش پیدا می کند و این میزان افزایش در اثر اعمال جریان الکتریکی پالسی بیشتر از حالت دوم است که نشان دهنده موثرتر بودن شکل پذیری به کمک جریان الکتریکی است.

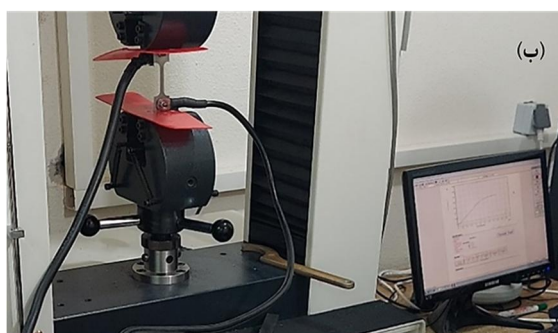
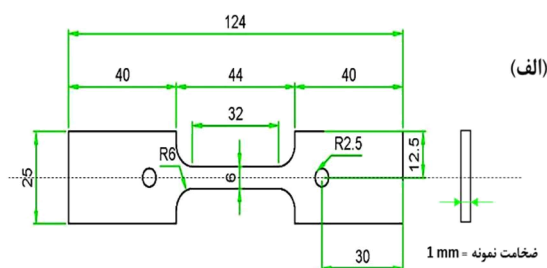
همان طور که در مطالعات اخیر مشاهده شده است، استفاده از جریان الکتریسیته هنگام تغییر شکل پلاستیک منجر به کاهش نیروی مورد نیاز شکل دهی، کاهش برگشت فنری، افزایش شکل پذیری و کاهش هزینه و ظرفیت ماشین آلات مورد نیاز می شود. همچنین می تواند محدودیت های ناشی از کار گرم را کاهش دهد. در فرآیندهای کشش عمیق و خم کاری و نیز در آزمایش کشش پژوهش هایی در گذشته انجام شده و نتایج مثبتی هم داشته است، اما نکته مهمی که وجود دارد تمامی این نتایج صرفاً در همان فرآیند و فرایندهای

مشابه قابل استفاده است، نمونه کاملاً استاندارد استفاده نشده و جریان بهینه و تأثیر دقیق الکتروپلاستیک بر خواص مکانیکی ماده قابل مشاهده نیست. ضمن اینکه در این پژوهش‌ها نحوه انتقال جریان الکتریسیته به ماده بسیار سخت و پیچیده است. در این مقاله، به صورت تجربی تأثیر پارامترهای پالس الکتریکی بر رفتار کرنش نمونه ورق آلومینیومی به وسیله آزمایش کشش تک محوره مورد بررسی قرار می‌گیرد که تاکنون پژوهشی در این زمینه گزارش نشده است. نمونه آزمایش کشش استاندارد از جنس آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته می‌شود. به دلیل ویژگی‌های خاص این آلیاژ در صنعت مدرن، هدف به دست آوردن پارامترهای بهینه پالس الکتریکی (مقدار جریان، زمان پالس و شکل موج پالس) بر تغییر طول نمونه استاندارد بوده است. در این پژوهش با طراحی و ساخت یک منبع تغذیه که قابلیت اعمال هر دو شکل موج پالس مربعی و سینوسی را دارا است، امکان مقایسه نتایج حاصل از اعمال هر دو نوع پالس جریان فراهم شده است، نتایج حاصل از لحاظ تغییر طول در حالت بدون جریان و با اعمال پالس الکتریکی و همچنین در حالت آنیل مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## ۲- روش تحقیق

به منظور بررسی اثر جریان الکتروپلاستیک، نمونه‌های آزمایش کشش مطابق شکل ۲ و بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M تهیه شده‌اند. این آزمایش در حالت بدون جریان و با استفاده از پالس الکتریکی و تغییر پارامترهای آن شامل شدت جریان، مدت زمان پالس و شکل موج انجام شد، که هر آزمایش سه مرتبه تکرار گردید.

نحوه انجام آزمایش کشش تک محوره به کمک الکتریسیته، به این شرح بوده است که در ابتدا در دو سمت نمونه‌ها جهت نصب کابل‌های دستگاه مولد جریان، با استفاده از یک دستگاه مته عمودی سوراخ‌کاری انجام شد. پس از آن، جهت جلوگیری از انتقال جریان به فک‌های دستگاه آزمون کشش قسمت‌های گیره‌گیر نمونه توسط نوار پلاستیکی عایق گردید. در نهایت نمونه عایق شده بر روی دستگاه آزمون کشش اونیورسال قرار داده شد. در مرحله بعد، کابل‌های دستگاه مولد جریان توسط پیچ‌های مسی تعبیه شده در دو سمت نمونه آزمایش کشش قرار داده شدند تا اتصال دستگاه به نمونه ایجاد شود. به علاوه، جهت جلوگیری از جریان یافتن الکتریسیته از طریق کابل‌ها به فک دستگاه، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، یک صفحه عایق بین کابل‌ها و فک دستگاه قرار داده شده است. برای اندازه‌گیری شدت جریان و تنظیم آن به مقدار موردنظر، از یک کلمپ آمپر متر دیجیتال و همچنین برای اندازه‌گیری ضخامت، طول و عرض نمونه‌های ساخته شده که به عنوان داده نرم‌افزار دستگاه آزمایش کشش در این پژوهش است، از یک کولیس دیجیتال استفاده گردید.



شکل ۲ الف) تصویر ابعاد نمونه ساخته شده ب) تصویر نمونه و عایق قرار گرفته بر روی دستگاه آزمایش کشش جهت اعمال جریان پالس الکتریکی

### ۳- ارائه نتایج و بحث

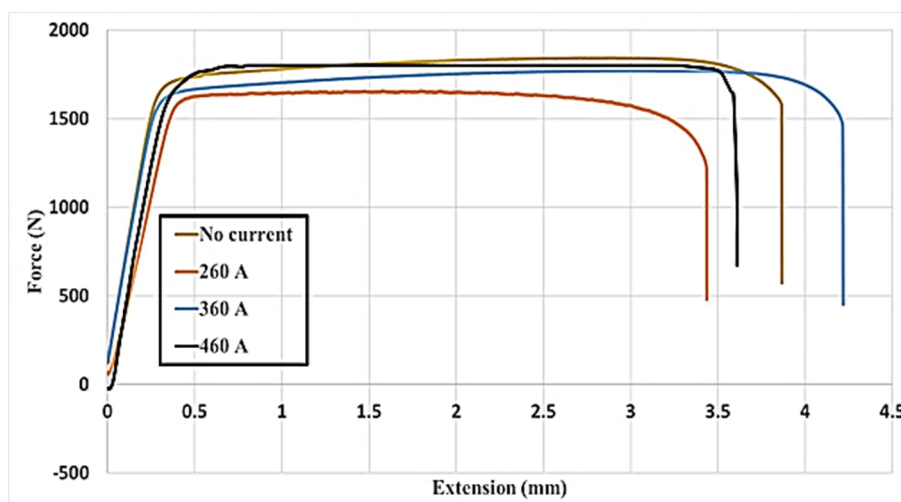
#### ۳-۱- بررسی تأثیر مقدار جریان بر تغییر طول

در این آزمایش، جهت به دست آوردن شدت جریان مناسب، ابتدا در حالت بدون جریان آزمایش کشش انجام گردید. سپس سه شدت جریان مختلف ۲۶۰، ۳۶۰ و ۴۶۰ آمپر، شکل موج سینوسی و زمان پالس ثابت بر اساس (مقدار مطلوب به دست آمده از آزمایش‌های قبلی) مورد استفاده قرار گرفت. شرایط آزمون در جدول ۱ درج شده است. نتایج به دست آمده با حالت بدون جریان مقایسه گردید تا اثر شدت جریان بر تغییر طول نمونه‌های آزمایش کشش بررسی شود. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، شدت جریان ۳۶۰ آمپر سبب کشش بهتر نمونه شده است. در حالت بدون جریان، بیشترین افزایش طول به صورت میانگین ۳/۸۶ میلی‌متر بوده، در حالی که در شدت جریان ۳۶۰ آمپر، افزایش طول به صورت میانگین به ۴/۲۴ میلی‌متر رسیده که ۷٪ بهبود داشته است، اما در شدت جریان‌های ۲۶۰ و ۴۶۰ آمپر تغییر طول نمونه کمتر از حالت بدون جریان شده است. در حالی که، خلیلی و همکاران [۹] که تأثیر پارامترهای فرآیندی بر نیروی شکل‌دهی، توزیع ضخامت و عمق کشش در فرآیند کشش عمیق مورد بررسی قرار داده بودند به این نتیجه رسیدند که هرچه قدر شدت جریان افزایش یابد باعث بهبود در شکل‌دهی می‌شود.

جدول ۱ شرایط آزمون برای بررسی شدت جریان اعمالی به نمونه آزمایش کشش با مدت زمان روشنی پالس ۱۲۰ میکروثانیه، زمان خاموشی ۲۰ میلی‌ثانیه و

شکل موج سینوسی

شماره	تکرار	شدت جریان (A)
۱	۳ مرتبه	بدون اعمال جریان
۲	۳ مرتبه	۲۶۰
۳	۳ مرتبه	۳۶۰
۴	۳ مرتبه	۴۶۰



شکل ۳ نمودار مقایسه آزمایش با شدت جریان‌های متفاوت

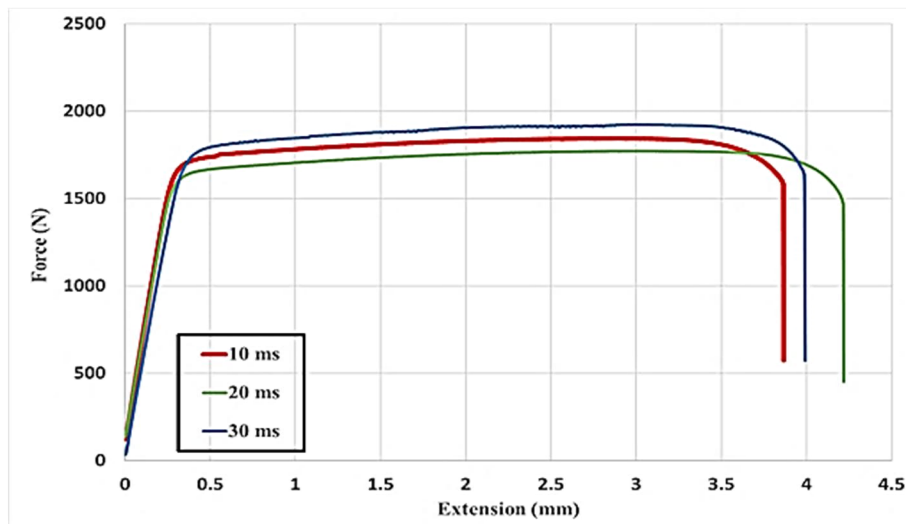
#### ۳-۲- بررسی تأثیر فرکانس پالس بر تغییر طول

برای بررسی اثر فرکانس پالس (زمان خاموشی پالس) بر تغییر طول، سه فرکانس پالس ۳۲۲، ۴۸۶ و ۸۳۰ هرتز (زمان خاموشی ۳۰، ۲۰ و ۱۰ میلی‌ثانیه) انتخاب شد. این آزمایش، در بهترین شدت جریانی که در بخش قبل تعیین گردید یعنی ۳۶۰ آمپر، انجام شد. شرایط آزمون در جدول ۲ قابل مشاهده است. شایان ذکر است که در دستگاه مولد پالس الکتریکی استفاده شده در این پژوهش، به صورت مستقل امکان تنظیم فرکانس وجود نداشته و از طرفی فرکانس با مجموع زمان روشنی و خاموشی پالس رابطه عکس دارد. با این توضیح، با ثابت نگه داشتن زمان روشنی پالس بر روی ۱۲۰ میکروثانیه و تغییر در زمان خاموشی پالس، فرکانس پالس تغییر

می‌کند و می‌توان تأثیر فرکانس پالس را بر تغییر طول بررسی کرد. نتایج در شکل ۵ نشان می‌دهد که در فرکانس ۴۸۶ (زمان خاموشی ۲۰ میلی‌ثانیه)، نمونه آزمایش کشش بیشترین تغییر طول را می‌یابد.

جدول ۲ شرایط آزمون برای بررسی فرکانس پالس، مدت زمان روشنی پالس ثابت ۱۲۰ میکروثانیه، شدت جریان ۳۶۰ آمپر و شکل موج سینوسی

شماره	تکرار	فرکانس پالس (Hz)	زمان خاموشی پالس (ms)
۱	۳	۸۳۰	۱۰
۲	۳	۴۸۶	۲۰
۳	۳	۳۲۲	۳۰



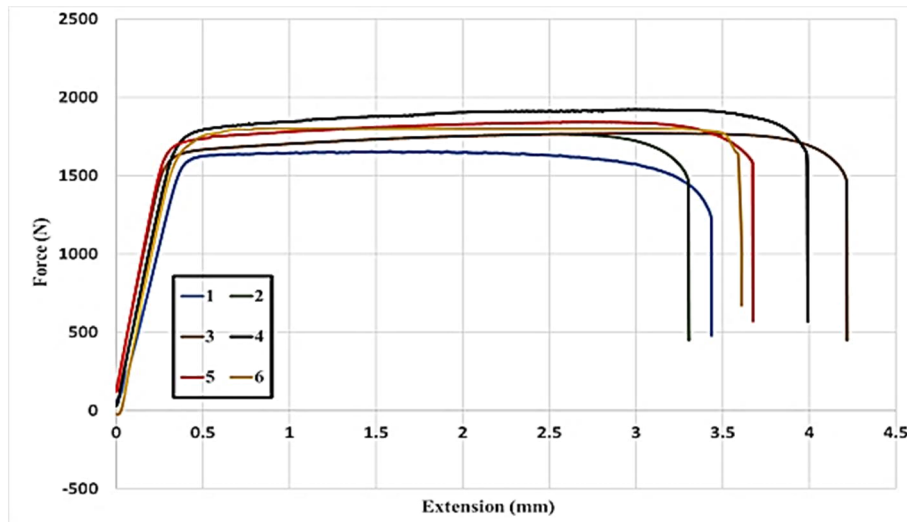
شکل ۴ مقایسه آزمایش‌ها با فرکانس پالس متفاوت

### ۳-۳- بررسی تأثیر شکل موج بر تغییر طول

برای مقایسه اثر شکل موج بر تغییر طول در آزمایش کشش، از دو شکل موج سینوسی و مربعی استفاده شده است. شرایط آزمون در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ نتایج نشان می‌دهد که اعمال پالس الکتریکی با شدت جریان ۳۶۰ آمپر، زمان خاموشی پالس ۲۰ میلی‌ثانیه، زمان روشنی پالس ۱۲۰ میکروثانیه و شکل موج سینوسی در مقایسه با حالت بدون جریان باعث بهبود کشش ۷٪ می‌شود، در صورتی‌که با اعمال شکل موج مربعی در همان پارامترها، کشش نمونه نشان دهنده بهبود ۳٪ در مقایسه با حالت بدون جریان است. نتایج این بخش را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در شکل موج سینوسی، الکترون‌ها با شیب موج بهتری به شبکه ماده اعمال می‌شوند که باعث می‌شود اثر بهتری بر میزان کشش داشته باشد [۱۳].

جدول ۳ شرایط آزمون برای بررسی شکل موج‌های متفاوت

شماره	تکرار	شکل موج	شدت جریان (A)	زمان خاموشی پالس (ms)	زمان روشنی پالس (μs)
۱	۳	سینوسی	۲۶۰	۲۰	۱۲۰
۲	۳	مربعی	۲۶۰	۲۰	۱۲۰
۳	۳	سینوسی	۳۶۰	۲۰	۱۲۰
۴	۳	مربعی	۳۶۰	۲۰	۱۲۰
۵	۳	سینوسی	۴۶۰	۲۰	۱۲۰
۶	۳	مربعی	۴۶۰	۲۰	۱۲۰



شکل ۵ تأثیر شکل موج بر منحنی نیرو-جابجایی

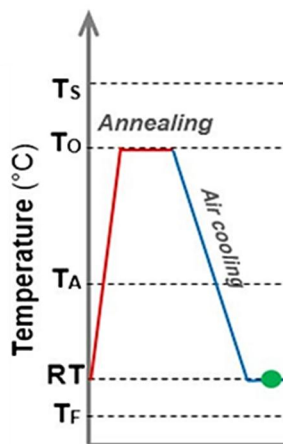
### ۳-۴- بررسی اثر الکتروپلاستیک بر نمونه آلومینیوم T6-6061 آنیل شده

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، شرایط مناسب جهت اعمال پالس الکتروپلاستیک برای انجام آزمایش کشش نمونه آلومینیومی T6-6061 مشخص گردید (جدول ۴).

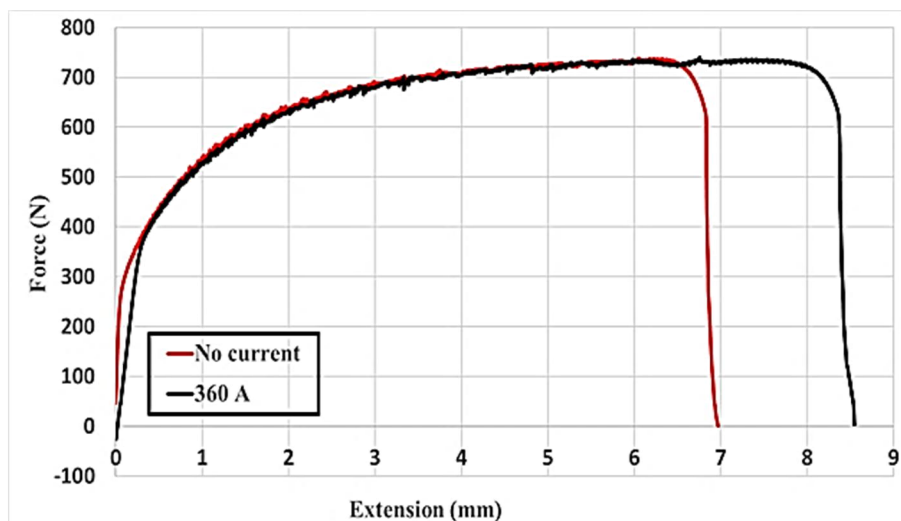
در ادامه، نمونه آلومینیومی ساخته شده، در کوره قرار گرفت و عملیات حرارتی (آنیل) طبق پژوهش‌های گذشته مطابق شکل ۷ انجام گردید [۱۴]. سپس آزمایش کشش، بدون جریان و با اعمال جریان الکتروپلاستیک در حالت مناسب انجام گردید که نتایج آن در شکل ۸ مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که در حالت بدون جریان، بیشترین کشش به صورت میانگین ۶/۸۵ میلی‌متر بوده است، در حالی که با اعمال جریان پالس الکتریکی، کشش به صورت میانگین به ۸/۴۵ میلی‌متر رسیده است که حدود ۲۳٪ بهبود در تغییر طول نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۴ مشخصات حالت مناسب جریان الکتروپلاستیک

نوع آزمایش	شکل موج	شدت جریان (A)	زمان روشنی (μs)	زمان خاموشی (ms)
الکتروپلاستیک	سینوسی	۳۶۰	۱۲۰	۲۰



شکل ۶ عملیات آنیل (دو ساعت در دمای ۴۱۵ درجه و خنک شدن در محیط)



شکل ۷ مقایسه آزمایش کشش نمونه آنیل شده بدون جریان با نمونه آنیل شده با اعمال جریان الکتروپلاستیک در حالت بهینه

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به صورت تجربی اثر جریان الکتروپلاستیک بر رفتار کرنش ورق آلومینیومی از طریق آزمایش کشش تک محوره مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از نمونه‌های آزمایش کشش با ضخامت ۱ میلی‌متر از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T۶ استفاده شد. نتایج کلی این پژوهش در ادامه بیان شده است:

- ۱- در بررسی اثر شدت جریان، مشخص شد که در شدت جریان ۳۶۰ آمپر اعمالی به نمونه، بیشترین افزایش کشش قبل از شکست ایجاد می‌شود. در حالت بدون جریان، بیشینه افزایش طول برابر با ۳/۸۶ میلی‌متر بود که با اعمال جریان ۳۶۰ آمپر به مقدار ۴/۲۴ میلی‌متر رسید که یک افزایش ۷٪ را به همراه داشت و مشخص شد که در شدت جریان‌های دیگر مقدار تغییر طول نمونه آزمایش کشش کمتر یا تفاوت چندانی در مقایسه با حالت بدون جریان ندارد.
- ۲- بررسی اثر فرکانس پالس نشان داد که در فرکانس پالس ۴۸۶ هرتز (زمان خاموشی ۲۰ میلی‌ثانیه)، افزایش کشش نمونه در بهترین حالت خود قرار دارد.
- ۳- در آزمایش مقایسه اثر شکل موج، مشخص شد که موج سینوسی در مقایسه با موج مربعی اثر بهتری بر افزایش طول نمونه کشیده شده دارد، به گونه‌ای که در یک شدت جریان و زمان پالس ثابت، موج سینوسی باعث افزایش طول ۷٪ نمونه در مقایسه با حالت بدون جریان می‌شود. در حالی که موج مربعی در همان جریان و زمان پالس، کشش را به مقدار ۳٪ در مقایسه با حالت بدون جریان افزایش می‌دهد.
- ۴- در بررسی اثر اعمال جریان الکتروپلاستیک بر تغییر طول نمونه آلومینیومی آنیل شده قبل از شکست، مشخص شد که استفاده از جریان الکتروپلاستیک پالسی نقش بسزایی در بهبود کشش نمونه آنیل شده ایفا می‌کند، به طوری که با اعمال جریان الکتروپلاستیک به نمونه آزمایش کشش در حالت مناسب پارامترهای پالس الکتریکی، نمونه در وضعیت عادی ۷٪ بیشتر از حالت بدون جریان کشیده شده تا شکست ایجاد شود، اما این فرآیند با همین پارامترها در نمونه آنیل شده، با اعمال جریان الکتروپلاستیک باعث گردید که ۲۳٪ کشش بیشتری نسبت به حالت بدون جریان در نمونه آنیل شده ایجاد گردد. از این رو، می‌توان بیان کرد که اعمال جریان الکتروپلاستیک به عنوان فرایند مکمل می‌تواند مفید باشد.
- ۵- از نتایج کلی این آزمایش مشخص شد که در یک پارامتر خاص جریان الکتروپلاستیک، مناسب‌ترین شرایط برای تغییر شکل به دست می‌آید.



## References

- [1] Ruskiewicz BJ, Grimm T, Ragai I, Mears L, Roth JT. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing with Emphasis on Modeling and Understanding of the Electroplastic Effect. *The Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017 Nov 1;139(11). doi: [10.1115/1.4036716](https://doi.org/10.1115/1.4036716)
- [2] Salandro WA, Roth JT. Formation of 5052 Aluminum Channels Using Electrically-Assisted Manufacturing (EAM). In: *ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2*. ASME; 2009. p. 599–608. doi: [10.1115/MSEC2009-84117](https://doi.org/10.1115/MSEC2009-84117)
- [3] Salandro WA, Jones JJ, Bunget C, Mears L, Roth JT. *Electrically Assisted Forming*. Cham: Springer International Publishing; 2015. doi: [10.1007/978-3-319-08879-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08879-2)
- [4] Salandro WA, Bunget C, Mears L. Thermo-Mechanical Investigations of the Electro plastic Effect. In: *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1*. ASME; 2011. p. 573–82. doi: [10.1115/MSEC2011-50250](https://doi.org/10.1115/MSEC2011-50250)
- [5] Zhu RF, Tang G, Shi SQ, Fu MW. Effect of electro plastic rolling on the ductility and super elasticity of TiNi shape memory alloy. *International Journal of Materials in Engineering Applications*. 2013 Feb 1; 44:606–11. doi: [10.1016/j.matdes.2012.08.045](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.045)
- [6] Sanchez Egea AJ, Gonzalez Rojas HA, Celentano DJ, Travieso-Rodriguez JA, Lluma i Fuentes J. Electroplasticity-assisted bottom bending process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014 Nov;214(11):2261–7. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2014.04.031](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.031)
- [7] Xie H, Dong X, Ai Z, Wang Q, Peng F, Liu K, et al. Experimental investigation on electrically assisted cylindrical deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 Sep 5;86(1–4):1063–9. doi: [10.1007/s00170-015-8246-0](https://doi.org/10.1007/s00170-015-8246-0)
- [8] Jones JJ, Mears L. A Process Comparison of Simple Stretch Forming Using Both Conventional and Electrically-Assisted Forming Techniques. In: *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1*. ASME; 2010. p. 623–31. doi: [10.1115/MSEC2010-34144](https://doi.org/10.1115/MSEC2010-34144)
- [9] Khalili M, Bakhshi Jooybari M, Gorji H. Experimental Investigation of the Electro plastic Effect on the Deep Drawing Process of Al5052 Square Cups. *Modarres Mechanical Engineering*. 2020;20(10). doi: [10.2571-2581](https://doi.org/10.2571-2581) [In Persian]
- [10] Mohammadtabar N, Jooybari MB, Gorji H. Effect of Electric Current Pulse Type on Springback, Microstructure, Texture, and Mechanical Properties During V-Bending of AA2024 Aluminum Alloy. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020; doi: [10.1115/1.4047913](https://doi.org/10.1115/1.4047913) [In Persian]
- [11] Xu S, Xiao X, Zhang H, Cui Z. Electroplastic Effects on the Mechanical Responses and Deformation Mechanisms of AZ31 Mg Foils. *Materials*. 2022 Feb 11;15(4):1339. doi: [10.3390/ma15041339](https://doi.org/10.3390/ma15041339)
- [12] Pakhomov M, Korolkov O, Pigato M, Gennari C, Calliari I, Stolyarov V. Electro plastic Effect during Tension and Bending in Duplex Stainless Steel. *Materials*. 2023 May 31;16(11):4119. doi: [10.3390/ma16114119](https://doi.org/10.3390/ma16114119)
- [13] Xie H, Wang Q, Liu K, Peng F, Dong X, Wang J. Investigation of influence of direct-current pulses on springback during V-bending of AZ31B magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015 May; 219:321–7. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2014.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.011)
- [14] Ghaferi M, Mirnia MJ, Elyasi M, Jamshidi Aval H. Evaluation of different heat treatment cycles on improving single point incremental forming of AA6061 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Nov 30;105(1–4):83–100. doi: [10.1007/s00170-019-04167-2](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04167-2)