

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (بدون استفاده از سیم بین الکترودها)

مهدی ظهور*

سید میثم موسوی

امین اشرفی تفرشی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یک فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی با سرعت بالا است که در آن دو الکترودها در محفظه‌ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین آن‌ها، فشار بالائی جهت شکل دادن ورق ایجاد می‌کند. در این تحقیق جهت بررسی پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، آزمایش‌های تجربی گسترده‌ای (با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها) طراحی و انجام شده است. انرژی تخلیه، فاصله الکترودها تا ورق، فاصله الکترودها از یکدیگر و قطر الکترودها به عنوان متغیرهای ورودی مؤثر فرآیند در نظر گرفته شده‌اند. جهت بهبود عملکرد فرآیند از نظر عمق کشش، مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ انجام گرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان اظهار داشت بیشترین عمق کشش وقتی بدست می‌آید که انرژی تخلیه بیشینه و دو فاکتور دیگر (فاصله الکترودها تا ورق و قطر الکترودها) کمینه باشند. همچنین برای فاصله الکترودها از یکدیگر یک مقدار بهینه وجود دارد که با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، عمق کشش، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ.

Optimization of effective parameters in electrohydraulic forming process (without bridge wire between electrodes)

M. Zohoor

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

S. M. Mousavi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

A. Ashrafi Tafreshi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Electrohydraulic forming (EHF) is a high velocity sheet metal forming process in which two electrodes are positioned in a water filled chamber and a high-voltage discharge between the electrodes generates a high-pressure to form the sheet metal. In this work, extensive experimental tests have been designed based on design of experiments (DOE) technique to investigate the effective parameters in EHF. Discharge energy, stand-off distance, electrode gap and electrode diameter have been considered as effective input parameters. Response surface methodology (RSM) has been used to model and optimize the EHF performance with respect to drawing depth. Base on the results, it can be stated that maximum drawing depth is obtained when discharge energy is minimum and other two factors (stand-off distance and electrode diameter) are maximum. There also exists an optimum amount of electrode gap determined according to the process conditions.

Keywords: Electrohydraulic forming process, Drawing depth, Optimization, Response surface methodology (RSM).

ایجاد موج شوک از انفجار الکتریکی استفاده می‌شود. در این فرآیند، تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکترودها (یا بیشتر) در یک محفظه پر از سیال موجب ایجاد کانال پلاسما بین آن‌ها می‌شود. انبساط این کانال پلاسما منجر به ایجاد موج شوک در سیال و شکل‌دهی ورق می‌شود. طرحواره فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

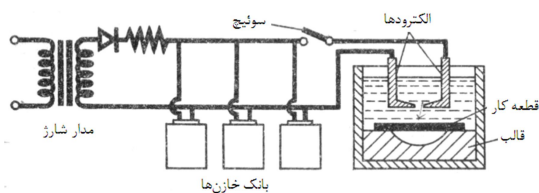
اولین استفاده از این پدیده جهت شکل‌دهی فلزات در سال ۱۹۵۳ گزارش شده است [۱]. توسعه اولیه فرآیند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین [۲] در روسیه به ثبت رسیده است. آزمایش‌های اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل‌دهی ورق‌ها برمی‌گردد به کارهای برونو در سال ۱۹۶۸ [۳]، داویس و آستین در سال ۱۹۷۰ [۴] و چاچین در

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، بعد از یک افول چند دهه‌ای دوباره، مورد توجه محققین (مخصوصاً محققین صنعت خودروسازی) قرار گرفته است. بهره‌مندی از مزایای شکل‌دهی پرسرعت و دوری از نواقص سایر روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا (شکل‌دهی الکترومغناطیسی و انفجاری) را می‌توان علت اصلی این موضوع دانست. در این روش از تخلیه الکتریکی در داخل مایع (آب، نفت و ...) برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و تغییر شکل قطعه کار استفاده می‌شود. در واقع شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مشابه شکل‌دهی انفجاری است با این تفاوت که به‌جای استفاده از مواد منفجره برای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mzohoor@kntu.ac.ir

الکترومغناطیسی وجود نداشت) بوده است. آن‌ها در پی یافتن علت افزایش شکل‌پذیری مواد، تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، به بررسی تغییر ساختار متالورژیکی ورق‌ها در اثر این فرایند پرداختند [۱۶]. ظهور و همکارانش هم با ارائه نمودار حد شکل‌دهی برنج در نرخ کرنش‌های مختلف (کم، متوسط و بالا) و بررسی ارتباط پارامترهای فرایند با افزایش نرخ کرنش ورق، به مشاهدات مشابهی دست یافتند [۱۷]. ایده گرم کردن ورق قبل کشش توسط این فرایند هم (که به‌تازگی مطرح شده است) افزایش چشمگیری در شکل‌پذیری ورق ایجاد می‌کند [۱۸].



شکل ۱- طرحواره شکل‌دهی ورق فلزی توسط فرایند الکتروهیدرولیکی

در این فرایند دو روش رایج برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی وجود دارد: تخلیه خازن از میان شکاف بین دو الکتروود (بدون استفاده از سیم بین الکترودها) و تخلیه خازن از طریق سیم بسیار نازک تعبیه شده بین دو الکتروود. در روش دوم، مسیر تخلیه الکتریکی بصورت از پیش تعیین شده است و تبدیل انرژی کارآمدتری صورت می‌گیرد و در نتیجه کنترل بهتری می‌تواند صورت گیرد؛ اما نرخ تولید پایین‌تر را نیز موجب می‌شود. تمام آزمایش‌های انجام شده در این مقاله بدون استفاده از سیم بین دو الکتروود انجام شده است.

ماهیت فیزیکی پیچیده این فرایند ایجاب می‌کند (جهت کنترل بهتر، افزایش تکرارپذیری و اتوماسیون آن) اثر پارامترهای مؤثر بر آن را دقیق‌تر بشناسیم. در این پژوهش، ابتدا سعی شده است با طراحی و انجام یکسری آزمایش‌های تجربی، میزان عمق کشش ورق (در مرکز آن) تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مشخص شود. در ادامه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و روش‌های آماری به تحلیل داده‌های آزمایش پرداخته شده است. در انتها با توجه به اثر پارامترهای اصلی و برهم‌کنش آن‌ها نقطه بهینه کاری فرایند ارائه شده است.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است. اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس، الکتروودها و نگه‌دارنده آن‌ها، است. کنترل زمان و میزان شارژ خازن‌ها، همچنین رسم نمودارهای ولتاژ و جریان تخلیه الکتریکی از طریق سیستم کنترل میسر است (شکل ۲). واحد تولید پالس، از چهار طبقه خازن با ظرفیت حداکثر ۲۰ میکرو فاراد (که قابلیت شارژ تا حداکثر ۵۰ کیلوولت را دارند) تشکیل شده است. اجزای جانبی واحد تولید پالس شامل شارژر، یکسو کننده، مقاومت‌های پیشانی و پشت موج و تقسیم‌کننده است (شکل ۳).



شکل ۲- تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

بخش کمی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به اثر پارامترهای مؤثر این فرایند و بهینه‌سازی آن پرداخته‌اند. از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای آیان و ماساکی [۶] در دهه ۶۰ اشاره کرد. گمان و همکارانش [۷ و ۸] در رومانی نیز تلاش‌هایی در جهت بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند انجام داده‌اند. نیازف و ژونواتوک [۹] در راستای بهینه‌سازی فرایند به بررسی میدان فشار پرداختند. آن‌ها معتقد بودند امواج شوک اولیه، جریان سیال، حباب‌های گازی، انعکاس امواج شوک از دیواره محفظه سیال و کاویتاسیون، بر توزیع فشار بر روی ورق مؤثرند؛ لذا بر آن شدند تا تغییر فشار برحسب زمان را به‌دست آورند. در ادامه، نیازف و ژونواتوک به همراه همکارانشان [۱۰] به بررسی تکرارپذیری میدان فشار در تخلیه‌های الکتریکی متفاوت پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند پارامترهای هندسی و الکتریکی نقش تعیین‌کننده‌ای در تکرارپذیری میدان فشار دارند؛ لذا با تعریف پارامترهایی که مشخصات هندسی و الکتریکی را در برمی‌گرفت مقداری را به‌عنوان بهینه (از نظر بیشینه فشار و تکرارپذیری) پیشنهاد دادند. هاسب و همکارانش [۱۱] نیز تلاش‌هایی در جهت کنترل توزیع فشار ایجاد می‌کنند توسط فرایند الکتروهیدرولیکی با روش متمرکز کردن موج، انجام دادند. روش‌های مختلف اندازه‌گیری فشار سیال در اطراف جرقه (شامل روش‌های مستقیم و غیر مستقیم)، توسط سایپین و گرینکو [۱۲] مقایسه و ارائه شده است. در این میان تعدادی از محققین با ارائه شبیه‌سازی عددی از این فرایند، سعی در بررسی پارامترهای مؤثر آن نموده‌اند [۱۳ و ۱۴].

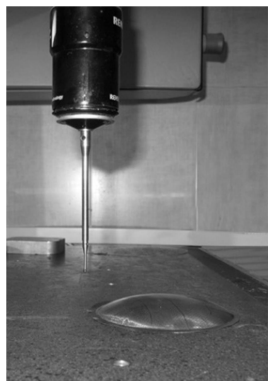
بررسی رفتار فلزات مختلف تحت فرایند الکتروهیدرولیکی، موضوع بخش عمده‌ای از تحقیقات انجام شده است. گلاوشنکو و همکارانش [۱۵] با مقایسه تجربی بیشترین کرنش به‌دست‌آمده از فرایند الکتروهیدرولیکی با بیشترین کرنش به‌دست‌آمده از روش‌های سنتی^۱ نشان دادند در فرایند الکتروهیدرولیکی امکان دسترسی به کرنش‌های بالاتری وجود دارد. بررسی‌های آن‌ها حاکی از افزایش ۶۳ تا ۱۹۰ درصدی شکل‌پذیری مواد (بسته به جنس ماده) در این فرایند بود. انگیزه اصلی گلاوشنکو و همکارانش از انجام این تحقیق در پژوهشگاه اتومبیل‌سازی فُرد^۲ بررسی امکان ساخت قطعاتی از بدنه خودرو با استفاده از آلیاژی سبک‌تر و مستحکم‌تر از قبل (که به دلیل نداشتن خاصیت مغناطیسی مناسب امکان شکل‌دهی آن‌ها به روش

^۱ LDH Test

^۲ Ford Motor Company

۲-۲- اندازه‌گیری میزان تغییر شکل نهایی ورق

پس از انجام آزمایش‌ها، جهت تعیین دقیق‌تر تغییر شکل نهایی ورق‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مختصات^۲ استفاده گردید. برای اندازه‌گیری میزان ارتفاع تغییر شکل ورق در شعاع‌ها و مقاطع مختلف، در ابتدا، لبه‌های ورق (که توسط کلمپ مقید شده بود) به‌عنوان سطح مرجع تعریف شد. در ادامه، با گذراندن حسگر دستگاه از سه مقطع موازی (شامل خط گذرنده از مرکز ورق و خطوطی با فاصله سی میلی‌متر از هر دو طرف خط مرکزی) و در دو جهت عمود بر هم، ارتفاع این نقاط از سطح مرجع محاسبه شد (شکل ۵).



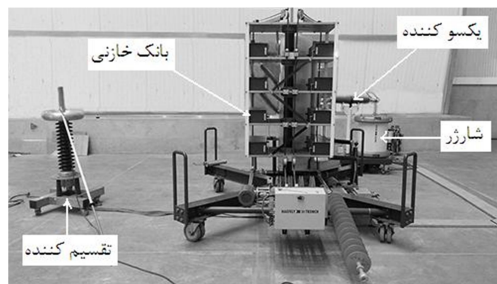
شکل ۵- اندازه‌گیری مختصات ورق تغییر شکل یافته

۳- روش آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ^۳ از جمله روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ متأثر از چندین متغیر قرار دارد، استفاده می‌شود و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. این روش قادر است نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر ارائه دهد. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی کرده و به صورت یک معادله ریاضی ارائه کند [۱۹].

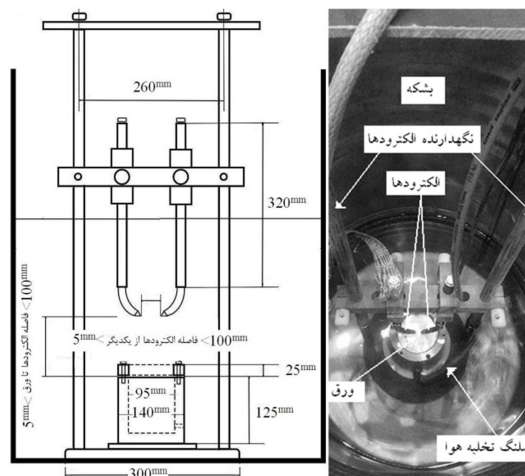
پارامترهای متعددی بر عمق کشش^۴ (DD) ورق تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مؤثرند (شکل ۶). در این مقاله (با توجه به امکانات و اهمیت پارامترها) اثر چهار پارامتر انرژی تخلیه^۵ (DE)، فاصله الکترودها تا ورق^۶ (SD)، فاصله الکترودها از یکدیگر^۷ (EG) و قطر الکترودها^۸ (ED) بر روی عمق کشش به روش سطح پاسخ بررسی می‌شود و در پایان شرایط لازم برای رسیدن به حالت بهینه مشخص می‌شود.

در این تحقیق الکترودها از جنس مس (که با چندلایه عایق الکتریکی ولتاژ بالا پوشیده شده‌اند) می‌باشند. در اثر تخلیه‌های الکتریکی شدید، نوک الکترودها سریعاً دچار تخریب می‌شود. برای جلوگیری از اختلال در روند آزمایش‌ها؛ نوک الکترودها طوری طراحی شده است که به راحتی قابلیت تعویض داشته باشد. جهت رعایت ملاحظات عایق‌کاری، سیستم نگه‌دارنده الکترودها از فیبر استخوانی و پلی آمید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکترودها از یکدیگر و الکترودها تا ورق، از طریق سیستم نگه‌دارنده امکان‌پذیر است (شکل ۴).



شکل ۳- تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

فرایند شکل‌دهی ورق در این پژوهش، در واقع، شکل‌دهی بدون قالب^۱ است. صرفاً جهت کلمپ کردن ورق، از یک استوانه توخالی از جنس فولاد ضدزنگ در زیر ورق استفاده شده است. در قسمت پائین این استوانه یک سوراخ تعبیه شده تا خروج هوا توسط یک شلنگ به بیرون سیال میسر شود. علت ایجاد این سوراخ آن است که ورق در حین تغییر شکل با مقاومت هوای محبوس داخل استوانه، مواجه نشود (شکل ۴). در این تحقیق از ورق برنجی به شکل دایره (به ترتیب با قطر و ضخامت ۱۱۰ و ۱ میلی‌متر) استفاده شده است.



شکل ۴- سیستم الکترودها در محفظه آب

² Coordinate Measuring Machine (CMM)

³ Response Surface Methodology (RSM)

⁴ Drawing Depth

⁵ Discharge Energy

⁶ Stand off Distance

⁷ Electrode Gap

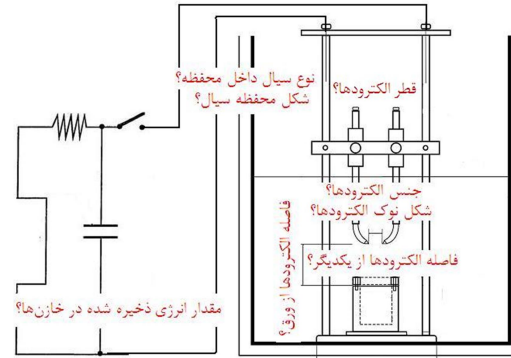
⁸ Electrode Diameter

¹ Free Forming

است. لازم به ذکر است برای جلوگیری از خطاهای احتمالی، آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده‌اند و از انجام آن‌ها به ترتیب جدول خودداری شده است.

جدول ۲- آزمایش‌های انجام شده و مقادیر عمق کشش

شماره آزمایش	DE	SD	EG	ED	عمق کشش (mm)
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱۷
۲	۱	-۱	-۱	-۱	۲۵/۲
۳	-۱	۱	-۱	-۱	۸/۶
۴	۱	۱	-۱	-۱	۱۴/۵
۵	-۱	-۱	۱	-۱	۱۸/۲
۶	۱	-۱	۱	-۱	۲۷
۷	-۱	۱	۱	-۱	۸/۹
۸	۱	۱	۱	-۱	۱۵/۸
۹	-۱	-۱	-۱	۱	۱۶/۳
۱۰	۱	-۱	-۱	۱	۲۴/۴
۱۱	-۱	۱	-۱	۱	۷/۶
۱۲	۱	۱	-۱	۱	۱۳/۸
۱۳	-۱	-۱	۱	۱	۱۷/۳
۱۴	۱	-۱	۱	۱	۲۶/۱
۱۵	-۱	۱	۱	۱	۸/۱
۱۶	۱	۱	۱	۱	۱۵/۱
۱۷	-۲	۰	۰	۰	۸/۵
۱۸	۲	۰	۰	۰	۲۲/۹
۱۹	۰	-۲	۰	۰	۲۹
۲۱	۰	۲	۰	۰	۸/۶
۲۱	۰	۰	-۲	۰	۱۲/۱
۲۲	۰	۰	۲	۰	۱۴/۶
۲۳	۰	۰	۰	-۲	۱۹/۳
۲۴	۰	۰	۰	۲	۱۷/۵
۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۸/۲
۲۶	۰	۰	۰	۰	۱۸/۵
۲۷	۰	۰	۰	۰	۱۷/۹
۲۸	۰	۰	۰	۰	۱۸/۳
۲۹	۰	۰	۰	۰	۱۸
۳۰	۰	۰	۰	۰	۱۸/۱
۳۱	۰	۰	۰	۰	۱۸/۵



شکل ۶- پارامترهای مؤثر فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (بدون استفاده از سیم بین دو الکترود)

۳-۱- طراحی آزمایش‌ها و نتایج آن

اولین گام در روش سطح پاسخ، یافتن رابطه ریاضی موجود بین پاسخ آزمایش و مجموعه متغیرهای ورودی آزمایش، به صورت تقریبی است. در این تحقیق، آزمایش‌ها بر اساس طراحی مرکب مرکزی^۱ بنا شده‌اند. متغیرهای مورد بحث در این آزمایش، مطابق جدول ۱ در ۵ سطح در نظر گرفته شده‌اند. نهایتاً مطابق با نتایجی که برای عمق کشش بدست خواهد آمد، مدل‌سازی ریاضی برای این آزمایش به شکل یک معادله رگرسیون^۲ خطی درجه دو ایجاد خواهد شد. این معادله آماری از نقاط داده‌های جدول عبور کرده و یا در نزدیکترین حالت نسبت به آن‌ها قرار می‌گیرد.

نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶، برای تحلیل نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. برای تحلیل آماری نتایج، از آنالیز واریانس^۳ استفاده می‌شود؛ لذا برای پیش‌بینی عمق کشش در هر حالت در فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، این نتایج قابل استفاده می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش

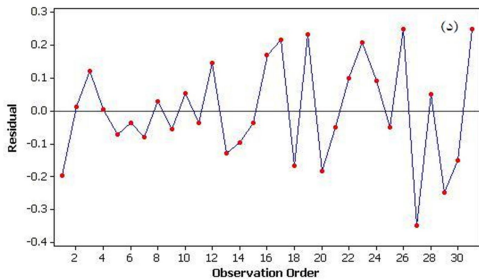
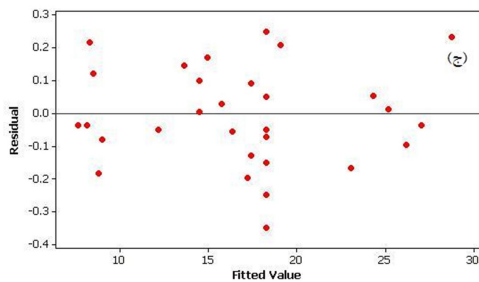
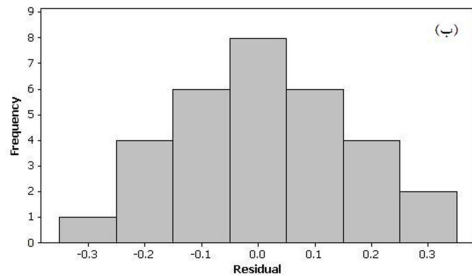
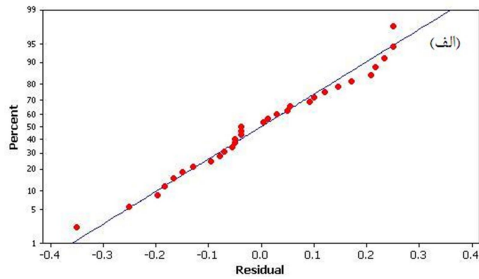
-α	-۱	۰	+۱	+α	فاکتورهای ورودی
۱/۶	۲/۴	۳/۲	۴	۴/۸	انرژی تخلیه (KJ)
۲۵	۳۷/۵	۵۰	۶۲/۵	۷۵	فاصله الکترودها تا ورق (mm)
۱۰	۱۷/۵	۲۵	۳۲/۵	۴۰	فاصله الکترودها از یکدیگر (mm)
۱۲	۱۵	۱۸	۲۱	۲۴	قطر الکترودها

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته توسط نرم‌افزار، برای تعداد ۴ فاکتور ورودی و پیش‌فرض $\alpha=2$ (که با شرایط آزمایش هم همخوانی دارد)، تعداد ۳۱ آزمایش برای رسیدن به هدف تعیین شد. آزمایش‌ها به همراه مقادیر بدست آمده برای عمق کشش در جدول ۲ ارائه شده

^۱ Central Composite Design (CCD)

^۲ Regression

^۳ ANOVA



شکل ۷- نمودارهای مربوط به توزیع باقیمانده‌ها
الف) احتمال نرمال باقیمانده‌ها (ب) تعداد تکرار باقیمانده‌ها
ج) باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازیده
د) باقیمانده‌ها به ترتیب زمان

۳-۳- اثر پارامترهای مؤثر بر عمق کشش ورق

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در فرایند انجام شده می‌بایست اثر فاکتورهای اصلی و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها را به دقت مورد تحلیل قرارداد. در این بخش در ابتدا به اثر هر یک از فاکتورهای اصلی و در ادامه به اندرکنش آن‌ها پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است در تحلیل نمودارهای اثر برهم‌کنش فاکتورهای مؤثر، سایر

۲-۳- مدل‌سازی ریاضی و بررسی کفایت آن

نتایج تحلیل و اصلاح مدل‌سازی (از طریق حذف عوامل غیر مؤثر)، جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسأله به صورت کد شده برای عمق کشش، در جدول ۳ آمده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرایند مؤثر هستند که مقدار P آن‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۵ درصد از ۰/۰۵ کمتر باشد. همچنین مقادیر $R-Sq=99.93\%$ و $R-Sq(adj)=99.89\%$ بدست آمده، نشان دهنده دقت بسیار خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد. نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقیمانده‌ها در شکل ۷ آمده است که روند بسیار مناسبی دارند.

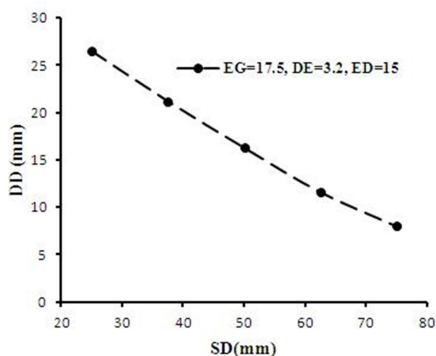
جدول ۳- ضرایب معادله رگرسیون در مدل اولیه و اصلاح شده

مدل اصلاح شده		مدل اولیه		
مقدار P	ضریب معادله رگرسیون	مقدار P	ضریب معادله رگرسیون	ترم‌ها
۰/۰۰۰	۱۸/۲۵۰۰	۰/۰۰۰	۱۸/۲۱۴۳	ثابت
۰/۰۰۰	۳/۶۹۵۸	۰/۰۰۰	۳/۶۹۵۸	DE
۰/۰۰۰	-۴/۹۹۵۸	۰/۰۰۰	-۴/۹۹۵۸	SD
۰/۰۰۰	۰/۵۸۷۲	۰/۰۰۰	۰/۵۸۷۵	EG
۰/۰۰۰	-۰/۴۲۰۸	۰/۰۰۰	-۰/۴۲۰۸	ED
۰/۰۰۰	-۰/۶۴۳۷	۰/۰۰۰	-۰/۶۴۰۰	DE.DE
۰/۰۰۱	۰/۱۳۱۲	۰/۰۰۳	۰/۱۳۵۰	SD.SD
۰/۰۰۰	-۱/۲۳۱۳	۰/۰۰۰	-۱/۲۲۷۵	EG.EG
---	---	۰/۳۷۶	۰/۰۳۵۰	ED.ED
۰/۰۰۰	-۰/۴۹۳۷	۰/۰۰۰	-۰/۴۹۳۷	DE.SD
۰/۰۰۱	۰/۱۹۳۸	۰/۰۰۳	۰/۱۹۳۸	DE.EG
---	---	۰/۷۲۰	۰/۰۱۸۸	DE.ED
۰/۰۰۶	-۰/۱۴۳۷	۰/۰۱۳	-۰/۱۴۳۷	SD.EG
---	---	۰/۹۰۵	۰/۰۰۶۳	SD.ED
---	---	۰/۹۰۵	-۰/۰۰۶۲	EG.ED

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیرکد شده برای عمق کشش بر حسب متغیرهای ورودی فرآیند به صورت زیر خواهد بود:

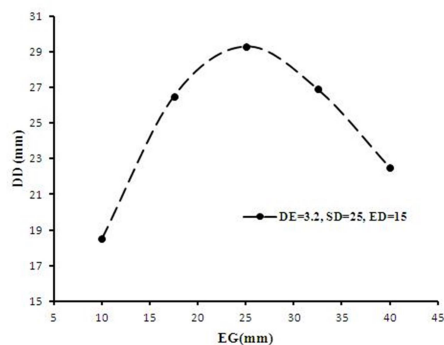
$$DD = -5.0972 + 12.7187DE - 0.2873SD + 1.1461EG - 0.1403ED - 1.0059DE^2 + 0.0008SD^2 - 0.0219EG^2 - 0.0494DE \times SD + 0.0323DE \times EG - 0.0015SD \times EG \quad (1)$$

شوک حاصل از انفجار شیمیایی [۲۰] و رابطه معکوس محل انفجار با فشار بیشینه [۲۱] این شیب منفی قابل توجه است.



شکل ۱۰- اثر فاصله الکترودها تا ورق

با توجه به نتایج به دست آمده برای فاصله الکترودها از یکدیگر (شکل ۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که در ابتدا با افزایش فاصله الکترودها از یکدیگر میزان عمق کشش بیشتر می‌شود ولی با عبور از یک حد مشخص، کم خواهد شد. در واقع شکل نمودار دارای یک اکسترمم نسبی است که محدوده‌ی فاصله الکترودها برای رسیدن به بیشترین مقدار کشش را مشخص می‌سازد. ریشه این موضوع در این است که تا قبل از نقطه بهینه، کانال پلاسمائی که بین دو الکتروود تشکیل می‌شود بشکل یک بیضی (با قطر بزرگ عمود به خط واصل دو الکتروود) است. با افزایش فاصله بین الکترودها، شکل کانال پلاسما (و در نتیجه شکل جبهه‌ی موج شوک^۳) به دایره نزدیک می‌شود. با ادامه این روند مجدداً شکل کانال پلاسما بیضوی شده (این بار با قطر بزرگ در راستای خط واصل دو الکتروود) و در نتیجه جبهه‌ی موج شوک از کروی به سمت بیضوی متمایل شده که همین امر منجر به تغییر پروفیل ورق‌های تغییر شکل یافته از حالت گنبدی به اشکالی پخ‌تر (و در نتیجه عمق کشش کمتر) می‌شود.

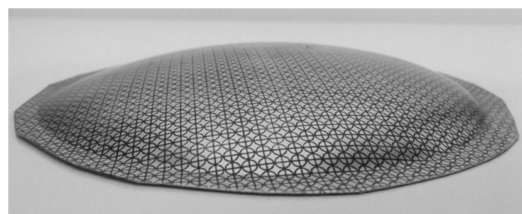


شکل ۱۱- اثر فاصله الکترودها از یکدیگر

با توجه به این که ضریب معادله رگرسیون برای فاکتور قطر الکتروود، کمترین مقدار (از نظر قدر مطلق) است؛ می‌توان نتیجه گرفت

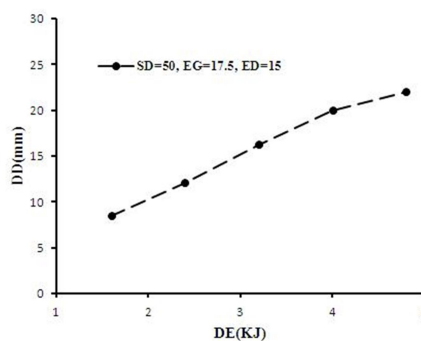
متغیرها در حالت تعادل آزمایش‌ها (نقطه مرکزی^۱) در نظر گرفته شده‌اند.

آزمایش‌های اولیه نشان داد تکرارپذیری فرایند شکل‌دهی الکترودهیدرولیکی بسیار پایین است. به نظر می‌رسد علت عمده این امر، تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی فرایند باشد. مشاهدات اولیه حاکی از وجود یک زمان تأخیر^۲ در تخلیه الکتریکی بین دو الکتروود (بعد از زدن کلید تخلیه) است. با افزایش انرژی ذخیره شده در خازن، میزان تأخیر زمانی نیز افزایش می‌یابد. در مورد فاصله بین دو الکتروود نیز روند مشابهی مشاهده شد. یک نمونه از ورق‌های تغییر شکل یافته در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکترودهیدرولیکی

با توجه به اثر فاکتور انرژی تخلیه که در شکل ۹ ارائه شده است می‌توان گفت که هرچه انرژی تخلیه بیشتر باشد عمق کشش ورق نیز بیشتر خواهد بود. این روند تا پارگی ورق از مرکز ادامه می‌یابد. علت این امر ناشی از این حقیقت است که با افزایش انرژی ذخیره شده در خازن‌ها و تخلیه آن بین الکترودها، بیشینه فشار موج اولیه حاصل از انفجار الکتریکی در سیال افزایش یافته که این خود، موجب کشش بیشتر ورق می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی انرژی ذخیره شده در خازن‌ها بین دو الکتروود تخلیه نمی‌شود و معمولاً ۲۰٪ تا ۳۵٪ (بسته به شرایط آزمایش) آن هدر می‌رود.



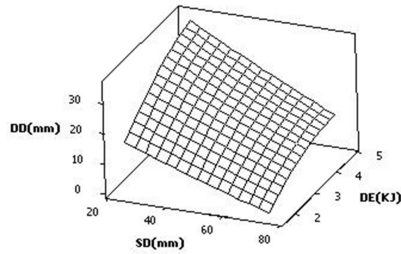
شکل ۹- اثر انرژی تخلیه

همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، یک رابطه خطی (با شیب منفی) بین فاصله الکترودها تا ورق و عمق کشش، وجود دارد. با توجه به شباهت رفتار موج شوک حاصل از انفجار الکتریکی با موج

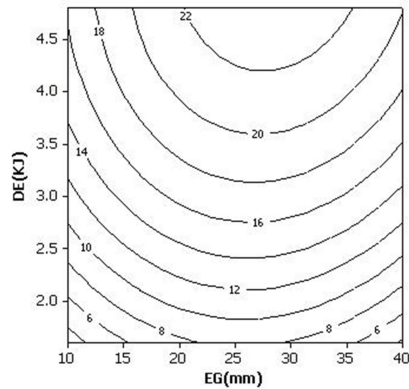
³ Shock wave front

¹ Center point

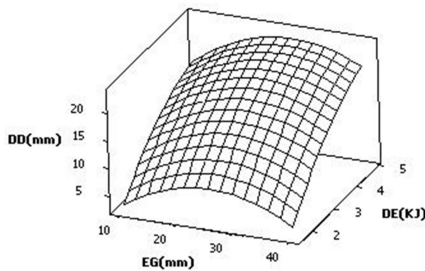
² Delay Time



شکل ۱۴- نمودار سه بعدی برهم کنش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها تا ورق



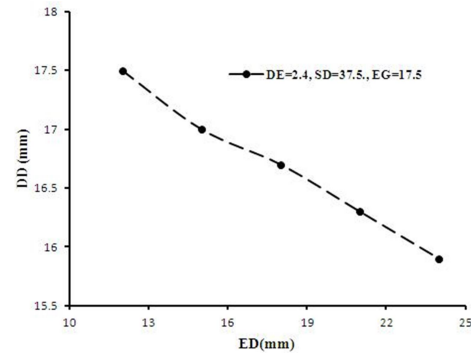
شکل ۱۵- کانتور برهم کنش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها از یکدیگر



شکل ۱۶- نمودار سه بعدی برهم کنش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها از یکدیگر

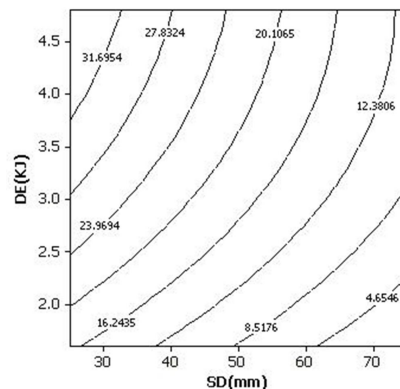
در ارتباط با اندرکنش فاکتور فاصله الکترودها تا ورق با فاصله آن‌ها از یکدیگر شکل‌های ۱۷ و ۱۸، لازم است (از لحاظ عملی) به این نکته اشاره شود که حداقل به دو دلیل، فاصله الکترودها تا ورق باید از فاصله آن‌ها از یکدیگر، بیشتر باشد. دلیل اول آن، این است که در غیراینصورت تخلیه الکتریکی بین یکی از الکترودها و ورق رخ خواهد داد. دلیل دیگر آن که، جهت بهره‌مندی حداکثر از فشار ثانویه (که در اثر حباب گاز ایجاد می‌شود) باید فاصله ورق تا الکترودها بیشتر از فاصله الکترودها از یکدیگر باشد.

که اثر این متغیر در عمق کشش نسبت به دیگر فاکتورهای اصلی فرایند کمتر است. شکل ۱۲ این نکته را نشان می‌دهد که هر چه قطر الکترودها بیشتر باشد، عمق کشش کمتر خواهد بود. دلیل آن این است که با افزایش قطر الکترودها در واقع قطر کانال پلاسما که بین دو الکترودها تشکیل می‌شود افزایش می‌یابد (در حالی که چگالی انرژی کانال، ثابت است). این افزایش حجم کانال پلاسما به معنی صرف انرژی بیشتر برای شکست حجم بیشتر آب بین دو الکترودها و در نتیجه اتلاف انرژی بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۲- اثر قطر الکترودها

با توجه به مقدار Pvalue جدول آنالیز واریانس برای اندرکنش فاکتورهای مختلف، می‌توان نتیجه گرفت برهم کنش انرژی تخلیه با فاصله الکترودها تا ورق، اثر بیشتری (نسبت به برهم کنش سایر فاکتورها) روی فرایند دارد. همانطور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است با افزایش انرژی تخلیه و کاهش فاصله الکترودها تا ورق، میزان عمق کشش افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشهود است با افزایش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها تا ورق، مقدار بهینه برای فاصله الکترودها از یکدیگر، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- کانتور برهم کنش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها تا ورق

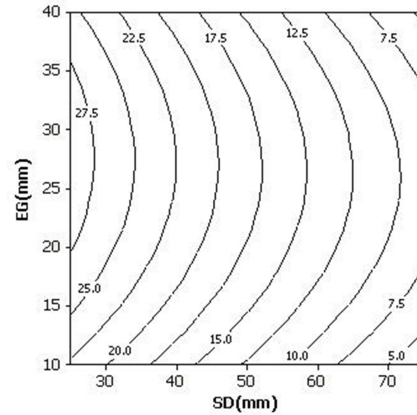
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های تجربی و تحلیل آماری آن‌ها، اثر پارامترهای مختلف فرایند الکتروهایدرولیکی بر عمق کشش ورق، مطالعه و بررسی گردید.

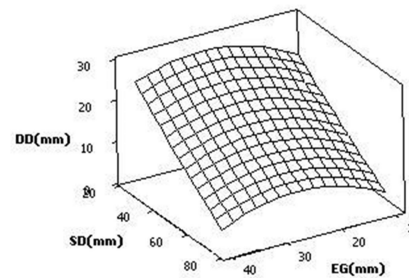
- با افزایش انرژی تخلیه، عمق کشش ورق افزایش می‌یابد.
- با کاهش فاصله الکترودها تا ورق، عمق کشش افزایش می‌یابد.
- با وجود اینکه قطر الکترودها کمترین اثر را نسبت به سایر فاکتورهای اصلی فرایند دارند، با کاهش آن، عمق کشش افزایش می‌یابد.
- جهت افزایش عمق کشش، یک مقدار بهینه برای فاصله الکترودها از یکدیگر وجود دارد (که با توجه به شرایط آزمایش بدست می‌آید). این مقدار بهینه با افزایش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها تا ورق، افزایش می‌یابد.
- برهم‌کنش انرژی تخلیه با فاصله الکترودها تا ورق، بیشترین اثر را نسبت به برهم‌کنش سایر فاکتورها روی فرایند دارد.
- برهم‌کنش فاصله الکترودها تا ورق با فاصله آن‌ها از یکدیگر، کمترین اثر را نسبت به برهم‌کنش سایر فاکتورهای حاضر در مدل اصلاح شده دارد.
- در محدوده‌ی آزمایش‌های این مقاله، با انتخاب بهینه پارامترهای فرایند، می‌توان عمق کشش را (از ۷٫۶ به ۳۶٫۷۲ میلی‌متر) تا ۴٫۸ برابر افزایش داد.

۶- مراجع

- [1] Early H., Dow W., Experimental Studies and Applications of Explosive Pressures Produced by Sparks in Confined Channels, in *Proceeding of Winter Meeting, AIEE*, January 10-14, 1953.
- [2] Yutkin L., *Electrohydraulic Effect*, Mashgiz, Moscow, 1955.
- [3] Bruno E., *High-velocity forming of metals*: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.
- [4] Davies R., Austin E. R., *Developments in high speed metal forming*: Industrial Press, 1970.
- [5] Chachin V., *Electrohydraulic treatment of structural materials*, Minsk, Nauka i Texnika, 1978.
- [6] Oyane, M., Masaki, S., Fundamental Study on Electrohydraulic Forming, *Japan Society of Mechanical Engineers*, V.29, No 205, 1963.
- [7] Coman L., Influence of Some Factors on Maximum Depth in Electrohydraulic Forming, *U.E.M. Journal*, No 2, pp. 93-98, 2010.
- [8] Coman, L., Using the Initiation System of Electrical Discharge in the Case of Electrohydraulic Forming, *U.E.M. Journal*, No 3, pp. 93-100, 2011.
- [9] Knyazyev M., Zhovnovatuk Y. S., Measurements of Pressure Fields with Multi-Point Membrane Gauges at Electrohydraulic Forming, in *Proceeding of 4th International Conference on High Speed Forming*, Ohio, USA, March 9-10, 2010.
- [10] Knyazyev M., Perez I., San José J., Zhovnovatuk Y., Pressure Fields Repeatability at Electrohydraulic Pulse Loading in Discharge Chamber with Single Electrode Pair, in *Proceeding of 5th International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, April 24-26, 2012.



شکل ۱۷- کانتور برهم‌کنش فاصله الکترودها تا ورق و فاصله الکترودها از یکدیگر



شکل ۱۸- نمودار سه بعدی برهم‌کنش فاصله الکترودها تا ورق و فاصله الکترودها از یکدیگر

۴- ارائه شرایط بهینه

با توجه نتایج بیان شده از تحلیل نمودارها و مدل‌سازی ریاضی حاکم بر آزمایش، نرم‌افزار نیز یک پیشنهاد بهینه را معرفی و مقدار بیشینه عمق کشش را پیش‌بینی می‌کند (که در جدول ۴ به آن اشاره شده است). ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از تحلیل آزمایش‌ها با دقت بسیار خوبی تأیید شده و می‌توان به عمق کشش بیش از ۳۵ میلی‌متر دست یافت. این نتیجه بیانگر آن است که با تنظیم مناسب فاصله الکترودها از هم می‌توان، بیشترین عمق کشش دست‌یافته در آزمایش‌ها (۲۹ میلی‌متر) را تا ۲۵٪ و کمترین آن (۷٫۶ میلی‌متر) را تا ۳۸۰٪ افزایش داد.

جدول ۴- عمق کشش نقطه بهینه پیشنهادی نرم‌افزار و آزمایش

عمق کشش (mm)	تجربی			
	DE	SD	EG	ED
۳۶/۷۲۳۶	۴/۸	۲۵	۲۸/۷۸۷۹	۱۲
۳۶/۷۲۳۶	+۲	-۲	۰/۵۰۵۱	-۲
۳۶/۵	۴/۸	۲۵	۲۸	۱۲

- [11] Hasebe T., Takenaga Y., Kakimoto H., Imaida Y., High strain rate forming using an underwater shock wave focusing technique, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 85, No. 1, pp. 194-197, 1999.
- [12] Sayapin A., Grinenko A., Efimov S., Krasik Y. E., Comparison of different methods of measurement of pressure of underwater shock waves generated by electrical discharge, *Shock Waves*, Vol. 15, No. 2, pp. 73-80, 2006.
- [13] Zohoor M., Mousavi S. M., Ashrafi Tafreshi A., Study of electrohydraulic forming process by using experimental observations and numerical simulation with ALE method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 301-308, 2017 (in Persian)
- [14] Woo M., Noh H., Song W., Kang B., Kim J., Experimental validation of numerical modeling of electrohydraulic forming using an al 5052-H34 sheet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 5, pp. 1819-1828, 2017.
- [15] Golovashchenko S. F., Gillard A. J., Mamutov A. V., Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 7, pp. 1191-1212, 2013.
- [16] Samei J., Green D. E., Golovashchenko S., Hassannejadasl A., Quantitative Microstructural Analysis of Formability Enhancement in Dual Phase Steels Subject to Electrohydraulic Forming, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 7, pp. 2080-2088, 2013.
- [17] Zohoor M., Mousavi S. M., Investigation of forming limit of brass alloy c260 at high strain rate by using electrohydraulic forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 207-216, 2018 (in Persian)
- [18] Zia M., Fazli A., Soltanpour M., Warm Electrohydraulic Forming: A Novel High Speed Forming Process, *International Conference on the Technology of Plasticity*, Cambridge, United Kingdom, 2017.
- [19] Montgomery C., *Design and analysis of experiments*, John Wiley and Sons, New York, 2011.
- [20] McGrath J. R., Scaling underwater exploding wires, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 12, pp. 4439-4443, 1966.
- [21] Bjørnø L., Levin P., Underwater explosion research using small amounts of chemical explosives, *Ultrasonics*, Vol. 14, No. 6, pp. 263-267, 1976.