



بررسی اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل پذیری و توزیع ضخامت ورق‌های فلزی در روش شکل دهی الکتروهایدرولیک آزاد

علی فضلی^{1*}، سید محمدرضا حسینی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین
2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین
* قزوین، کد پستی 34148-96818، a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 مرداد 1394
پذیرش: 11 مهر 1394
ارائه در سایت: 10 آبان 1394
کلید واژگان:
شکل دهی الکتروهایدرولیک
موقعیت الکترودها
توزیع ضخامت
شکل پذیری

چکیده

شکل دهی الکتروهایدرولیک یک فرآیند شکل دهی سریع است که در آن انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن‌ها بین دو الکترود مستغرق در آب تخلیه می‌شود. تخلیه الکتریکی با تبخیر آب در محل تخلیه موج فشاری ایجاد می‌کند که از طریق آب به ورق منتقل شده، موجب شکل دهی آن می‌گردد. یکی از پارامترهای مهم در طراحی بهینه فرآیند شکل دهی الکتروهایدرولیک تعیین محل مناسب الکترودها می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود اثر موقعیت الکترودها در فرآیند شکل دهی الکتروهایدرولیک در حالت شکل دهی الکتروهایدرولیک آزاد بررسی شده است. ابتدا چند نمونه از آزمایشات تجربی موجود در مقالات، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شده، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید که نشان‌دهنده توافق قابل قبول نتایج مدلسازی و نتایج تجربی می‌باشد. پس از صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، با تغییر محل الکترودها، اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل پذیری قطعه و توزیع ضخامت در قطعه نهایی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که امکان شکل دهی قطعه تنها در موقعیت‌های محدودی از الکترودها وجود دارد و در محفظه شکل دهی می‌توان محلی را برای الکترودها پیدا کرد که ضمن آن که توزیع ضخامت قطعه را یکنواخت‌تر می‌کند، احتمال پارگی قطعه کار را نیز کاهش می‌دهد.

Investigation of the effect of electrodes position on formability and thickness distribution of sheet metals in electrohydraulic free-forming

Ali Fazli*, Seyed Mohammad Reza Hosseini

Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* P.O.B. 34148-96818, Qazvin, Iran, a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 August 2015
Accepted 03 October 2015
Available Online 01 November 2015

Keywords:
Electrohydraulic forming
Electrodes position
thickness distribution
Formability

ABSTRACT

Electrohydraulic forming (EHF) is a high velocity forming process in which the electric energy stored in the capacitors is suddenly discharged between two electrodes submerged in a water-filled chamber. During the discharge, the water between the electrodes vaporizes and creates a shock wave that is transferred to the blank using the water and forms it. One of the key parameters in electrohydraulic forming is the determination of the suitable position of the electrodes. In this research the effect of electrodes position in electrohydraulic free-forming is investigated using the finite element simulation. First, the experiments available in the literature are simulated using the software ABAQUS/ Explicit and compared with the experimental results, which show good agreement. Then by changing the position of the electrodes, the effect of their position on the formability and thickness distribution of the blank is investigated. The results indicate that formation of a component is only possible in limited positions of the electrodes and there is a position for the electrodes that not only improves the sheet thickness but also decreases the possibility of the failure.

1- مقدمه

سنتی برای شکل دهی چنین موادی وجود ندارد. علت آن این است که روش‌های قدیمی قادر به شکل دهی ورق‌ها با ضخامت کم نمی‌باشند. علاوه بر آن روش‌های قدیمی شکل دهی که شامل دو نیمه قالب می‌باشد و بر اساس تماس فلز - فلز قالب و قطعه کار عمل شکل دهی را انجام می‌دهد، برای شکل دهی فولادهای پر استحکام به مراحل شکل دهی و قالب‌های بیشتری نیاز دارد. برای بر طرف نمودن مشکلات مذکور و بهبود شکل پذیری ورق‌های استحکام بالا که عموماً در ضخامت‌های کمتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند،

در سالیان اخیر به منظور کاهش انرژی و همین‌طور کاهش هزینه، استفاده از مواد سبک‌تر و در عین حال با استحکام بالا مانند آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای پر استحکام پیشرفته¹ در صنایع خودرو و همچنین صنایع هوافضا افزایش چشمگیری داشته است. مشکل اصلی در استفاده از این مواد شکل پذیری کمتر آن‌ها می‌باشد که در نتیجه آن، امکان استفاده از روش‌های

1- Advanced High Strength Steel (AHSS)

مورد نیاز را در زمان کوتاه مورد نظر تخلیه نمایند. عامل دیگر خوردگی الکترودهای مورد نیاز برای ایجاد جرقه بوده است. همچنین به علت این که در گذشته نه چندان دور هزینه انرژی پایین‌تر بوده است، استفاده از این روش توجیه اقتصادی چندانی نداشته است. دلیل این که امروزه مجدداً استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی سریع سرعت بیشتری گرفته است، این است که صنایع هوافضا و خودرو برای کاهش وزن وسیله‌های تولیدی نیازمند استفاده از مواد سبک‌تر و پراستحکام‌تر هستند که عموماً شکل‌پذیری کمتری نیز دارند. با توجه به شکل‌پذیری بالاتر مواد در سرعت‌های بالای شکل‌دهی، امروزه مجدداً این روش‌ها مورد توجه صنعت‌گران قرار گرفته است و در سالیان اخیر تحقیقات پیرامون شکل‌دهی الکتروهیدرولیک مورد توجه قرار گرفته است. بلنتیرام و همکارانش شکل‌پذیری سه ورق مرسوم در عملیات شکل‌دهی (آلومینیوم AA6061، مس OFHC و فولاد IF) را در فرایندهای با سرعت‌های شکل‌دهی بالا و پایین مقایسه نمودند [4]. آن‌ها برای شکل‌دهی الکترومغناطیسی استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که هر سه ماده در سرعت‌های بالای شکل‌دهی شکل‌پذیری بهتری دارند. بلک و اسکاتل برای تعیین خواص مکانیکی ورق‌های فولادی در نرخ‌های کرنش بالا، آزمون‌های کشش را در سرعت‌های بالا تا نرخ کرنش 200 بر ثانیه بر روی ورق‌های تخت از جنس فولاد دوفازی انجام دادند [5]. یو و همکاران برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک، با انجام تست‌های کشش دینامیکی در محدوده نرخ کرنش‌های 500 تا 1600 بر ثانیه رفتار مکانیکی فولاد دوفازی DP600 را بررسی کردند [6]. آن‌ها همچنین به شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک در نرخ کرنش‌های مختلف پرداختند. فرزین و منتظرالفائم شکل‌دهی قطعات مینیاتوری⁴ و ورق‌های فلزی با ضخامت کم به وسیله فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را بررسی کردند [7]. هومبرگ و برواد نشان دادند در شکل‌دهی الکتروهیدرولیک می‌توان بدون پارگی در ورق، گوشه‌های تیزتری را نسبت به روش شکل‌دهی هیدروفورمینگ⁵ ایجاد کرد [8]. نیازف و ژوناواتوک با استفاده از آزمایشات تجربی، توسط فشارسنج غشائی چند نقطه‌ای، توزیع فشار اعمالی بر روی ورق در عملیات شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را به دست آوردند [9]. از توزیع فشار بدست آمده، می‌توان در مدلسازی ساده‌تر این فرآیند استفاده نمود. صامعی و همکارانش به صورت میکروساختاری، بهبود شکل‌پذیری ورق‌های فولادی دوفازی⁶ در روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را بررسی نمودند [10]. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهبود شکل‌پذیری در فاز فریت و مارتنزیت به ترتیب 20 و 100 درصد می‌باشد. گلوواشنکو و همکارانش شکل‌پذیری ورق‌های فولادی دوفازی را در شکل‌دهی الکتروهیدرولیک بررسی کردند و بهبود شکل‌پذیری ورق در اثر سرعت بالای شکل‌دهی را به کمک نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدلسازی گزارش کردند [3]. آن‌ها بیان کردند که اگر سرعت ورق قبل از پر کردن قالب به حد شرایط شبه‌استاتیکی کاهش یابد، بهبود شکل‌پذیری در این عملیات بسیار محدود خواهد بود. ملاندر و همکارانش به صورت تجربی و المان محدود شکل‌پذیری ورق‌های فولادی در دو حالت شکل‌دهی آزاد⁷ و شکل‌دهی به درون قالب⁸ را بررسی نمودند [11]. آن‌ها تخلیه الکتریکی آب را به صورت انتشار موج از محل الکترودها مدلسازی نمودند و صحت این

لازم است از روش‌های دیگری برای شکل‌دهی استفاده شود. مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالای شکل‌دهی، با بالا رفتن نرخ کرنش، شکل‌پذیری این مواد به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. به منظور بالا بردن نرخ کرنش در حین فرآیند شکل‌دهی، روش‌های مختلف شکل‌دهی سریع ایجاد شده است که می‌توان به فرآیندهای شکل‌دهی انفجاری¹، شکل‌دهی الکترومغناطیسی² و شکل‌دهی الکتروهیدرولیک³ اشاره کرد.

در شکل 1 شمای کلی از فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک نشان داده شده است. تخلیه قوس الکتریکی بین دو الکتروود باعث تبخیر آب موجود در محدوده الکترودها می‌گردد. فشار در این محدوده در مدت زمان بسیار کوتاهی بالا رفته و در نتیجه شوک عظیمی ایجاد می‌شود. نیروی فشاری و شوک ایجاد شده از طریق سیال مذکور به قطعه کار منتقل می‌گردد. در اثر این فشار اعمال شده، قطعه کار شکل حفره قالب را که در شرایط خلأ می‌باشد می‌گیرد. این روش با توجه به سرعت بالای شکل‌دهی، باعث افزایش قابل توجه در شکل‌پذیری بسیاری از مواد می‌گردد.

علاوه بر سرعت بالای شکل‌دهی و امکان شکل‌پذیری بیشتر ورق در روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک می‌توان به کاهش هزینه قالب به عنوان یکی دیگر از مزایای این فرآیند اشاره کرد. زیرا در این روش تنها نیاز به ساخت یک نیمه از قالب می‌باشد. همچنین در این روش شکل‌دهی، مقدار برگشت فنری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از دیگر مزایای روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک می‌توان به امکان تولید شکل‌های پیچیده‌تر اشاره کرد.

قابلیت تخلیه الکتریکی در سیال برای ایجاد تغییر شکل در قطعه را یاتکین برای اولین بار در سال 1955 گزارش نمود [1]. در سال‌های بعد این فرآیند مورد توجه قرار گرفت به گونه‌ای که برونو در سال 1968 کاربردهای مختلفی از این فرآیند را بیان نمود [2]. اما با وجود تاریخچه 60 ساله این فرآیند، شکل‌دهی الکتروهیدرولیک تاکنون کاربردهای صنعتی محدودی داشته است و عموماً برای قطعات با ابعاد کوچک استفاده می‌شده است. علت عمده این محدودیت، نبود سیستم‌های پیشرفته‌ای بود که بتوانند ولتاژ بالای

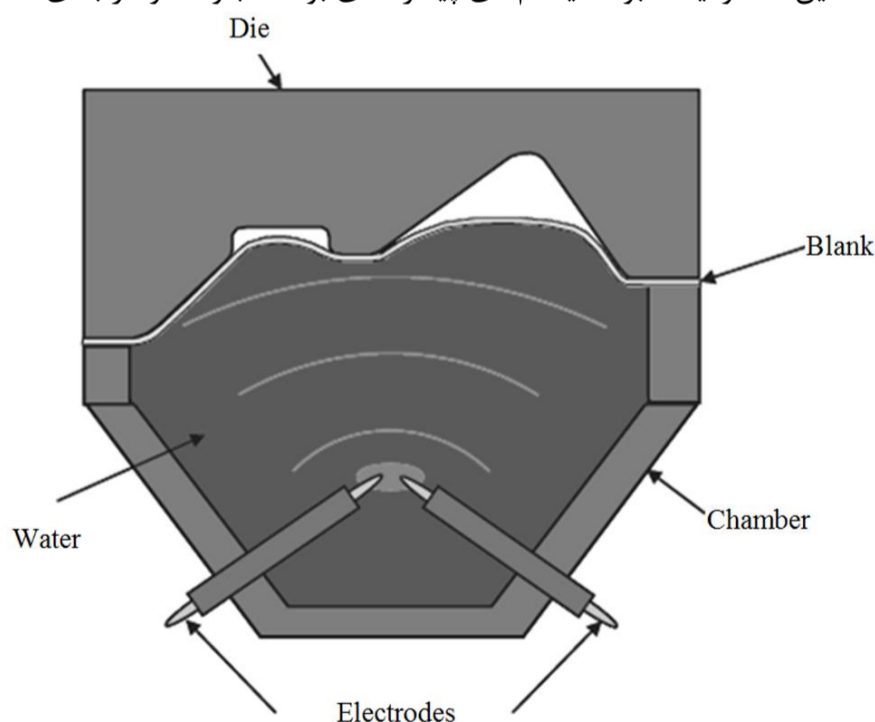


Fig. 1 A schematic of electrohydraulic forming process [3]

شکل 1 شماتیک فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک [3]

4- Miniature Parts
5- Hydro Forming
6- Dual Phase Steels
7- Electrohydraulic Free Forming (EHFF)
8- Electrohydraulic Die Forming (EHDF)

1- Explosive Forming
2- Electromagnetic Forming
3- Electrohydraulic Forming

در کار تجربی حسن‌نژاد اصل [15] در نظر گرفته شده است که در شکل 2 نشان داده شده است. محفظه آب شامل نیم کره‌ای به قطر 120 میلی‌متر و حلقه‌ای به همان قطر و ارتفاع 30 میلی‌متر در بالای آن است. قالب به کار رفته، شامل حفره‌ای به قطر 100 میلی‌متر و با شعاع انحنای 10 میلی‌متر است. ورق به کار رفته در تحقیق نیز دارای ضخامت 1.5 میلی‌متر و قطر 130 میلی‌متر می‌باشد. هندسه محفظه آب، ورق و قالب به کار رفته و چگونگی قرارگیری آن‌ها در شکل 2 نشان داده شده است. در شکل 3 تصویری از مدل ایجاد شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس به نمایش درآمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی، محفظه آب به طور کامل مدل نشده است و تنها آب درون آن در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است و برای محدود کردن جریان سیال، قیدهای لازم در ناحیه تماس آب با محفظه آن در نظر گرفته شده است. همچنین به جای مدل‌سازی تخلیه الکتریکی در سیال، موج حاصل از آن توسط شتاب حجمی که در محل انفجار اعمال شده است، مدل‌سازی شده است.

در مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک، هر 6 درجه آزادی ورق در لبه‌های آن بسته شده است. همچنین قیدهای لازم نیز برای تماس ورق با سیال و همین‌طور تماس ورق با قالب در نظر گرفته شده است. ضریب

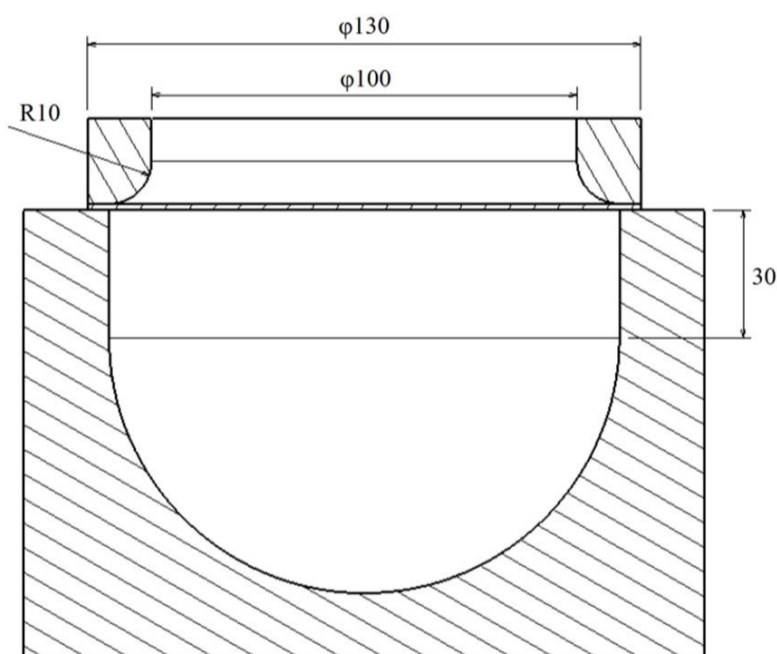


Fig. 2 The geometry of Chamber, Blank and die used in this research

شکل 2 هندسه محفظه آب، ورق و قالب به کار رفته در این تحقیق



Fig. 3 The finite element model of electrohydraulic forming process

شکل 3 مدل المان محدود فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک

نوع مدل‌سازی را با مقایسه با نتایج تجربی تأیید نمودند. گیلارد و همکارانش اثر پیش‌فرم ایجاد شده با فرآیند هیدروفرمینگ پیش از فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را برای ایجاد شکل‌های پیچیده بررسی نمودند [12]. در این روش، شکل‌دهی در دو مرحله انجام می‌گیرد که مرحله اول شامل ایجاد پیش‌فرم شبه‌استاتیکی در ورق است و در مرحله دوم نقاط تیز و همین‌طور پرعمق قالب به وسیله شکل‌دهی الکتروهیدرولیک پر می‌شود. روهاتگی و همکارانش نمودار حد شکل‌دهی¹ ورق آلومینیومی AA5182-O در فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک را به دست آوردند و بهبود قابل توجه شکل‌پذیری را به وسیله این روش شکل‌دهی گزارش نمودند [13]. آن‌ها در آزمایش‌های تجربی نمونه‌هایی را طراحی کردند که بتوان مسیرهای مختلف بارگذاری کرنشی را بر روی قطعه اعمال نمود. همچنین آن‌ها در مدل‌سازی المان محدود، برای سادگی سیال را مدل‌سازی ننموده و به جای آن فشار حاصل از سیال را با یک معادله فشار متغیر با زمان و مکان به قطعه اعمال نمودند. حسن‌نژاد اصل و همکارانش نیز به مدل‌سازی عددی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک پرداختند [14]. آن‌ها از مدل‌سازی ترکیبی اولری-لاگرانژی² برای مدل‌سازی این فرآیند استفاده کردند.

با وجود تحقیقاتی که در سال‌های اخیر در خصوص فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک انجام شده است، اما بر اساس مطالعات نگارندگان، با وجود تأثیر مهم موقعیت الکترودها در فرآیند شکل‌دهی، تاکنون تحقیقی در این زمینه گزارش نشده است. در تحقیق حاضر پس از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک و صحت‌گذاری مدل ایجاد شده به وسیله مقایسه با نتایج تجربی، اثر موقعیت الکترودها بر روی بهبود شکل‌پذیری و همچنین توزیع ضخامت ورق بررسی شده است.

2- روش تحقیق

در این تحقیق برای بررسی اثر موقعیت قرارگیری الکترودها در روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک، به مدل‌سازی عددی این فرآیند در حالت شکل‌دهی آزاد پرداخته شده است. برای این کار از نرم‌افزار المان محدود آباکوس³ استفاده شده است. در مدل‌سازی این فرآیند شکل‌دهی، به جای انرژی ورودی ناشی از تخلیه الکتریکی خازن‌ها از شتاب حجمی به عنوان پارامتر ورودی استفاده شده است که در همان محل قرارگیری الکترودها به سیال اعمال می‌شود. مقدار شتاب حجمی ورودی در نرم‌افزار برای انرژی ورودی متناظر با آن، به وسیله مطابقت با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی تعیین می‌گردد.

برای بررسی درستی نتایج مدل‌سازی، نتایج حاصله شامل کرنش‌های اصلی و فرعی و همین‌طور نحوه توزیع ضخامت ورق با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شود. پس از صحت‌گذاری، با تغییر محل اعمال شتاب حجمی به سیال، اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل‌پذیری و توزیع ضخامت ورق در حالت‌هایی که ارتفاع نهایی ایجاد شده در ورق یکسان می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته و موقعیت بهینه قرارگیری الکترودها در محفظه آب تعیین می‌شود.

2-1- مدل‌سازی المان محدود

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی، شامل مدل‌سازی سه بخش آب، ورق و قالب است. هندسه محفظه آب و قالب استفاده شده، مشابه محفظه مورد استفاده

1- Forming Limit Diagram
2- Coupled Eulerian- Lagrangian
3- Abaqus

است که کرنش آن نقطه به کرنش پارگی رسیده است و قطعه در آن ناحیه پاره شده است. ثابت‌های مدل پارگی جانسون - کوک که برای ورق DP600 مورد استفاده در تحقیق، در نظر گرفته شده‌اند در جدول 2 بیان شده است.

2-4- مدلسازی آب

در شبیه‌سازی حاضر، آب موجود در محفظه با چگالی 1000 کیلوگرم بر متر مکعب مدل شده است. همچنین مدول بالک¹⁰ در نظر گرفته شده برای آب 2.3 گیگا پاسکال مدل شده است.

2-5- مدلسازی تخلیه انرژی الکتریکی به سیال

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل نیز ذکر شد، پارامتر ورودی برای شبیه‌سازی موج ایجاد شده در آب، شتاب حجمی می‌باشد. در شبیه‌سازی، شتاب حجمی به همان نقطه ایجاد شوک یعنی محل قرارگیری الکترودها در آب داده شده است. با توجه به اینکه در نتایج تجربی استفاده شده برای صحنه‌گذاری، مدت زمان تخلیه انرژی الکتریکی خازن‌ها در آب تقریباً برابر 120 میکروثانیه بوده است [15]، دامنه تغییرات این شتاب بر حسب زمان مطابق شکل 4 و به صورت سینوسی در نظر گرفته شده است. در مدلی که برای مقایسه نتایج تجربی و المان محدود استفاده شده است، مقدار حداکثر شتاب حجمی به میزانی در نظر گرفته شده است که بیشینه ارتفاع به وجود آمده در ورق یعنی جابه‌جایی مرکز آن در شبیه‌سازی با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی یکسان گردد.

2-6- مش بندی

در شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک برای مدلسازی ورق از المان‌های پوسته‌ای¹¹ و چهار نقطه‌ای S4R استفاده شده است. قالب شکل‌دهی با استفاده از المان‌های صلب R3D4 مدلسازی شده است. اندازه المان‌های استفاده شده برای ورق حدوداً 1 میلی‌متر می‌باشد که معادل با 15995 جدول 2 ثوابت مدل پارگی جانسون - کوک استفاده شده برای فولاد دوفازی DP600 [14]

Table 2 Parameters of Johnson -Cook fracture model used for dual phase steel DP600 [14]

پارامتر	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
مقدار	0.7	0.5	0.5	-0.006	0

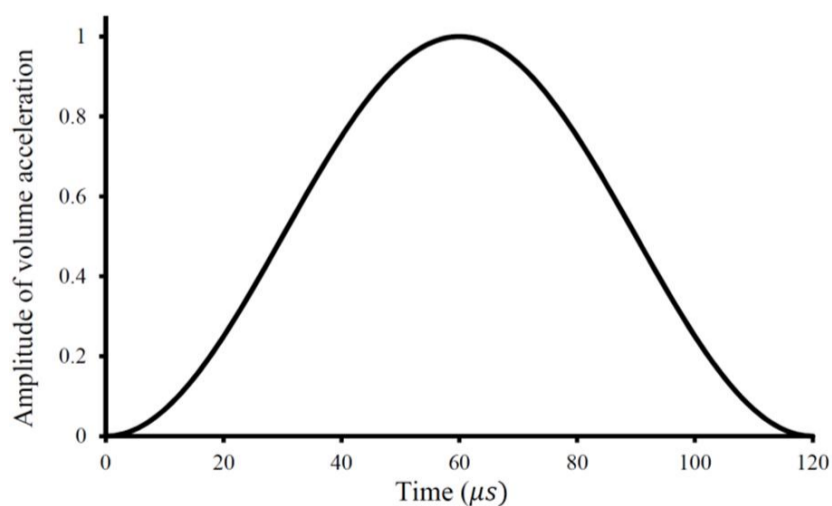


Fig. 4 The amplitude of volume acceleration applied to the fluid

شکل 4 دامنه شتاب حجمی اعمال شده به سیال

10- Bulk Modulus
11- Shell

اصطکاک بین سطح ورق با قالب برابر 0.1 فرض شده است. شایان ذکر است، در فرآیند حل مسئله به وسیله نرم افزار از روش حل صریح¹ استفاده شده است. ضمناً زمان حل مسئله حاضر نیز 1000 میکرو ثانیه در نظر گرفته شده است.

2-2- مدل خواص ماده

برای بیان خواص ورق در شبیه‌سازی از مدل جانسون - کوک استفاده شده است که رابطه تنش جریان ماده با تغییر کرنش، نرخ کرنش و تغییر دما را بیان می‌کند. معادله جانسون - کوک به صورت رابطه (1) بیان می‌شود.

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

در رابطه (1)، σ تنش و ϵ_p کرنش پلاستیک موثر² ماده است. $\dot{\epsilon}$ و $\dot{\epsilon}_0$ به ترتیب نرخ کرنش لحظه‌ای و نرخ کرنش مرجع⁴ هستند. در این رابطه، T دمای لحظه‌ای ماده، T_r دمای اتاق و T_m دمای ذوب ماده است. C ، B ، A ، n و m نیز ثابت‌های ماده بوده و تابعی از جنس آن هستند. در این پژوهش، با توجه به زمان بسیار کوتاه فرآیند شکل‌دهی، از انتقال حرارت بین آب و ورق و در نتیجه اثر تغییرات دما بر روی خواص ماده صرف نظر شده است.

ورق مورد استفاده در تحقیق حاضر از جنس فولاد دوفازی DP600 با چگالی 7800 کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته 210 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.3 است. پارامترهای جانسون - کوک استفاده شده در مدلسازی که از نتایج تجربی مرجع [15] استخراج شده است در جدول 1 بیان شده است.

2-3- مدلسازی پارگی ورق

در مدلسازی فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیک، برای تحلیل پارگی ورق از معیار شکست جانسون - کوک³ استفاده شده است. در این معیار پارگی، پارامتر شکست⁴ به صورت رابطه (2) از تجمیع نسبت کرنش‌های جزئی به کرنش شکست محاسبه می‌شود.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \quad (2)$$

که در آن کرنش شکست به صورت رابطه (3) محاسبه می‌گردد.

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right] \quad (3)$$

در رابطه (3)، η معیار سه بعدی بودن تنش⁵ می‌باشد که به صورت نسبت تنش هیدرواستاتیک⁶ به تنش معادل⁷ تعریف می‌شود. همچنین d_1 ، d_2 ، d_3 ، d_4 و d_5 پارامترهای ثابتی هستند که وابسته به جنس ماده می‌باشند. اگر پارامتر شکست D در یک ناحیه از ورق به عدد یک برسد، مفهوم آن این

جدول 1 ثوابت مدل جانسون - کوک فولاد دوفازی DP600 [15]

Table 1 Parameters of Johnson -Cook material model for [15] dual phase steel DP600

پارامتر	ϵ_0	C	n	B (MPa)	A (MPa)
مقدار	0.001	0.015	0.33	614	335

1- Explicit
2- Equivalent Plastic Strain
3- Instantaneous Strain Rate
4- Reference Strain Rate
5- Johnson - Cook Damage Criterion
6- Johnson - Cook Damage Parameter
7- Stress Triaxiality
8- Hydrostatic Stress
9- Equivalent Stress

می باشد) در راستای قطری از ورق اولیه با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده توافق قابل قبول آزمایشات تجربی و شبیه سازی المان محدود و حاکی از دقت قابل قبول مدلسازی انجام گرفته می باشد.

لازم به ذکر است که این روش مدلسازی برای هندسه دیگر موجود در مرجع [16] نیز استفاده و با نتایج تجربی مقایسه گردید که توافق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و المان محدود مشاهده گردید. به علت رعایت اختصار از ارائه نتایج مربوط به این مقایسه خودداری می شود.

3-2- تعیین محل بهینه موقعیت الکترودها

با توجه به اینکه موقعیت الکترودها در محفظه آب نقش به سزایی در فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیک می تواند داشته می باشد، در این قسمت اثر

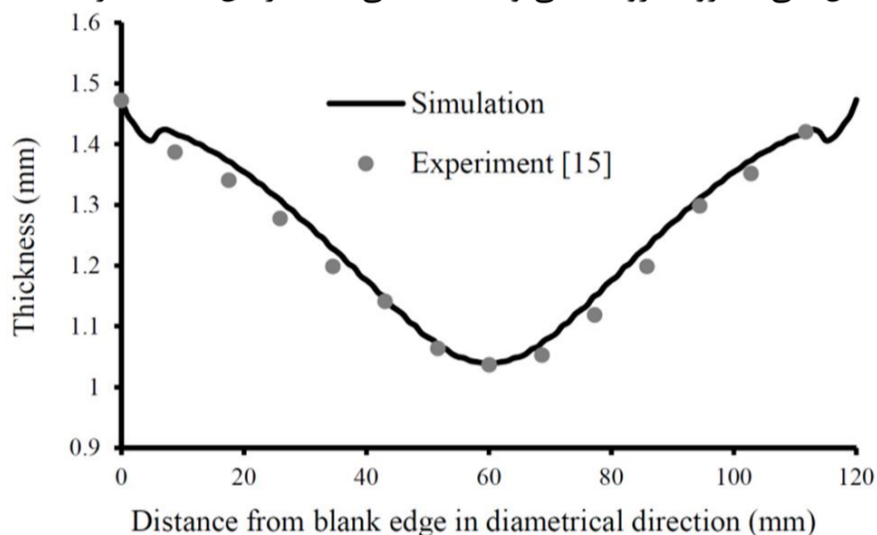


Fig. 6 The comparison of thickness distribution in numerical simulation with experimental results

شکل 6 مقایسه توزیع ضخامت ورق در مدلسازی عددی با نتایج تجربی

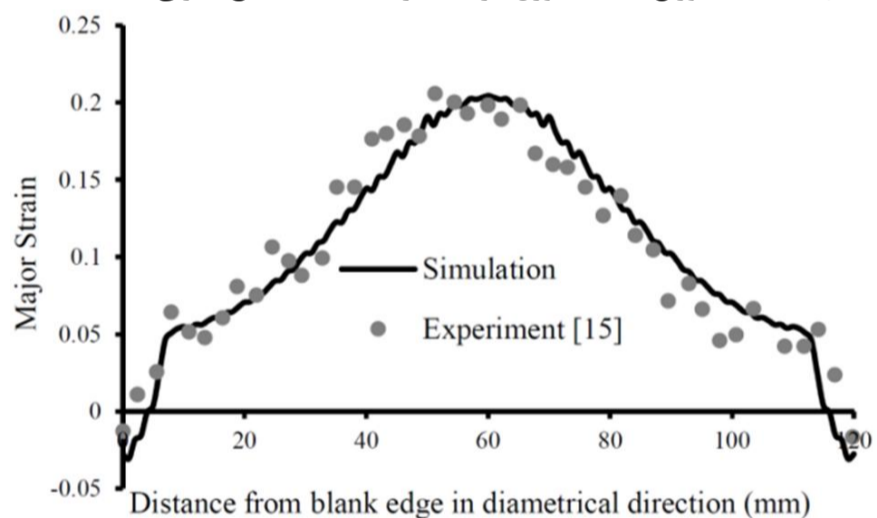


Fig. 7 The comparison of major strain in numerical simulation with experimental results

شکل 7 مقایسه توزیع کرنش اصلی در مدلسازی عددی با نتایج تجربی

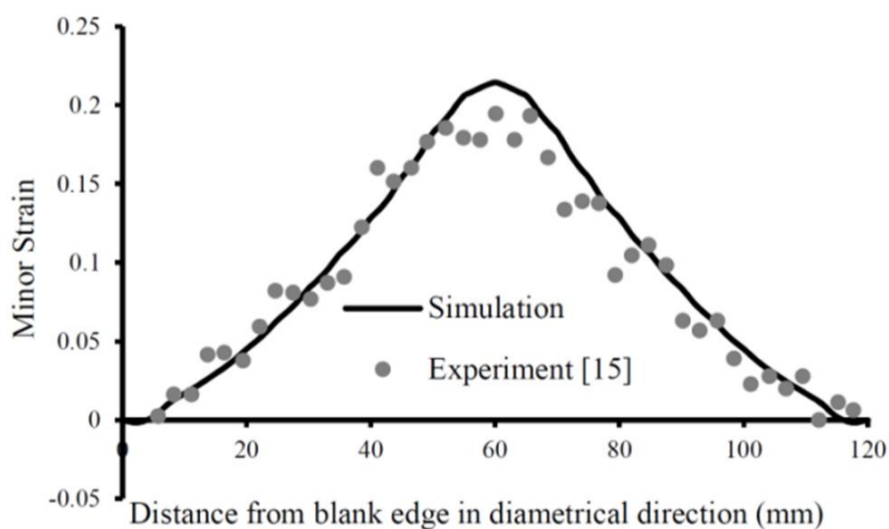


Fig. 8 The comparison of minor strain in numerical simulation with experimental results

شکل 8 مقایسه توزیع کرنش فرعی در مدلسازی المان محدود با نتایج تجربی

المان برای ورق است. برای مدلسازی آب موجود در محفظه نیز از المان های آکوستیک¹، دارای 8 نود و آجری AC3D8R استفاده شده است. علت استفاده از المان های آکوستیک برای آب این است که سرعت بالای جریان آب، تغییر حجم آب و در نتیجه تغییرات فشار در محدوده الکترودها و ورق در اثر موج عظیم ایجاد شده، در شبیه سازی فرآیند در نظر گرفته شوند. اندازه المان های استفاده شده برای آب نیز حدوداً 2.5 میلی متر می باشد که معادل با 63768 المان برای آب است.

برای بررسی وابستگی یا عدم وابستگی نتایج مدلسازی المان محدود به اندازه المان ها، اندازه المان های ورق از یک میلی متر به 0.5 میلی متر و اندازه المان های آب نیز از 2.5 میلی متر به 1.5 میلی متر تغییر یافت و تغییری در نتایج حاصل نشد که نشان دهنده استقلال نتایج مدلسازی عددی از اندازه المان ها می باشد.

3- نتایج

3-1- صحنه گذاری مدلسازی المان محدود

همان طور که در قسمت های قبل نیز ذکر شد، پارامتر ورودی در شبیه سازی فرآیند شکل دهی شتاب حجمی می باشد، در حالی که پارامتر ورودی در نتایج تجربی انرژی تخلیه شده در محل الکترودهاست. با توجه به اینکه رابطه مشخصی بین انرژی تخلیه شده در بین الکترودها و شتاب حجمی ایجاد شده، به دست نیامده است، شتاب حجمی ورودی در شبیه سازی المان محدود، درست به اندازه ای در نظر گرفته می شود که مقدار بیشینه ارتفاع ایجاد شده در ورق یعنی جابه جایی مرکز آن با نتیجه حاصل از کار تجربی در شکل دهی آزاد یکسان گردد. بیشینه ارتفاع ایجاد شده در ورق در نتایج تجربی با مقدار انرژی ورودی 4.3 کیلوژول برابر با 27.6 میلی متر بوده است [15]. به کمک سعی و خطا و تکرار فرآیند مدلسازی المان محدود مسئله با مقادیر مختلف شتاب حجمی، در نهایت مشخص شد که با مقدار شتاب حجمی 31300 متر بر مجذور ثانیه، مقدار ارتفاع حاصل از مدلسازی نیز 27.6 میلی متر می گردد. بنابراین مدل المان محدود با شتاب حجمی ورودی 31300 متر بر مجذور ثانیه، معادل با آزمایش تجربی با انرژی ورودی 27.6 کیلوژول در نظر گرفته شد. در شکل 5 تصویری از شکل نهایی ورق در شبیه سازی به نمایش درآمده است.

برای بررسی درستی مدلسازی المان محدود، نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. در شکل 6 نتایج حاصل از مدلسازی در رابطه با نحوه توزیع ضخامت ورق در راستای قطری از ورق اولیه، با نتایج حاصل از کار تجربی [15] مقایسه شده است. همان طور که در این شکل نیز ملاحظه می شود نتایج حاصل از مدلسازی و کار تجربی انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در شکل های 7 و 8 نیز به ترتیب کرنش اصلی² (که همان کرنش شعاعی قطعه است) و کرنش فرعی³ (که همان کرنش محیطی قطعه

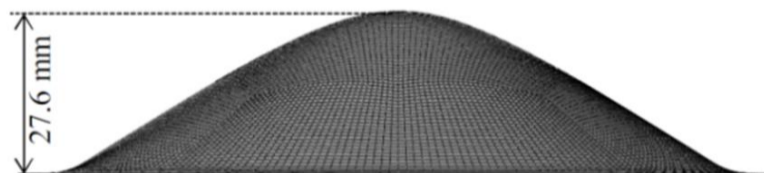


Fig. 5 The final shape of the part in finite element simulation corresponding to the experimental condition

شکل 5 شکل نهایی قطعه در مدلسازی المان محدود با شرایط متناظر با نتایج تجربی

1- Acoustic
2- Major Strain
3- Minor Strain

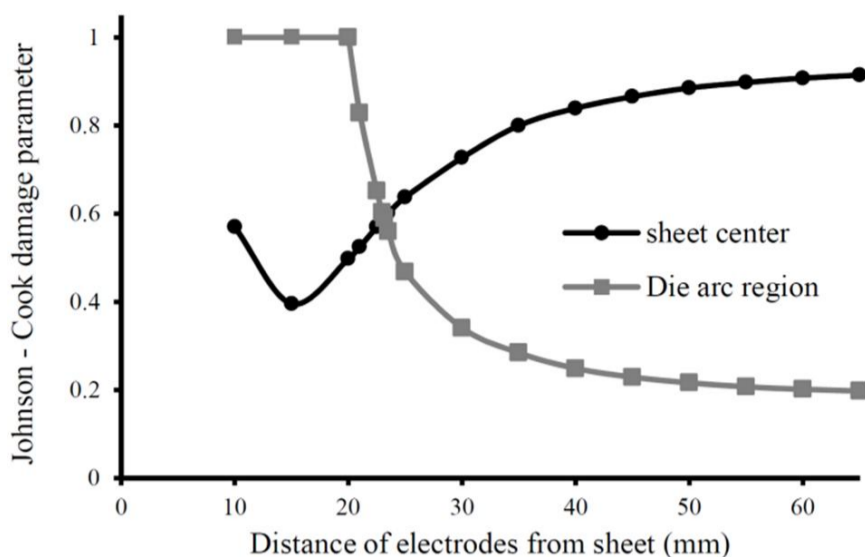


Fig. 10 Effect of electrodes position on Johnson – Cook damage parameter in center and die arc region of the parts with mm the same height of 34

شکل 10 اثر موقعیت الکترودها بر روی پارامتر شکست در مرکز و شعاع انحنای قالب در قطعات با ارتفاع نهایی یکسان 34 میلی‌متر

پارامتر شکست D در منطقه شعاع انحنای قالب به ازای فواصل کمتر از 20 میلی‌متر الکترودها از ورق به یک رسیده است. یعنی اگر فاصله الکترودها از 20 میلی‌متر کمتر باشد، قطعه از منطقه شعاع انحنای قالب پاره می‌شود. با افزایش فاصله الکترودها از ورق، مقدار پارامتر شکست در منطقه شعاع انحنای قالب به شدت کاهش یافته و احتمال پارگی از این منطقه از بین می‌رود. مقدار پارامتر D در مرکز قطعه روندی کاملاً معکوس دارد، به نحوی که وقتی فاصله الکترودها از ورق کمتر از 20 میلی‌متر است، مقدار D در حدود 0.5 بوده و با افزایش فاصله، مقدار آن افزایش و به عدد یک نزدیک می‌شود. البته با وجود این که مقدار D در مرکز به یک نرسیده است، اما با تغییر جزئی در خواص ورق اولیه، امکان عبور این مقدار از یک و پارگی قطعه در فواصل زیاد الکترودها از ورق وجود خواهد داشت. بنابراین می‌توان گفت که در فواصل نزدیک الکترودها به ورق احتمال شکست از منطقه شعاع انحنای قالب زیاد بوده و در فواصل زیاد الکترودها احتمال شکست از مرکز قطعه افزایش می‌یابد. بهینه‌ترین حالت، نقطه تلاقی دو منحنی بیان شده است که احتمال پارگی قطعه در مرکز و شعاع انحنای قالب حداقل می‌باشد. برای تعیین نقطه برخورد دو منحنی، مدل‌سازی فرآیند به ازای چند فاصله دیگر الکترودها از ورق در بازه 20 تا 25 میلی‌متر نیز انجام شد که نتایج حاصله به ازای آنها نیز در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فاصله 23.2 میلی‌متری الکترودها از ورق، پارامتر شکست جانسون-کوک در مرکز و شعاع انحنای قالب یکسان و برابر 0.59 و در سایر نقاط قطعه کمتر از این مقدار می‌باشد. بنابراین از نظر شکل‌پذیری، بهترین موقعیت الکترودها برای تولید این قطعه، فاصله 23.2 میلی‌متری از ورق می‌باشد.

برای بررسی اثر موقعیت قرارگیری الکترودها بر روی توزیع ضخامت ورق، در شکل 11 نمودار توزیع ضخامت در راستای شعاعی از قطعه نهایی برای سه موقعیت الکترودها با فاصله 25، 40 و 60 میلی‌متری از ورق نشان داده شده است. در بررسی شکل‌پذیری، مشاهده شد که در هر سه حالت بیان شده، قطعه بدون پارگی شکل می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با وجود ارتفاع نهایی یکسان در ورق با تغییر موقعیت الکترودها توزیع ضخامت در ورق تغییر می‌کند، به گونه‌ای که از بین این سه موقعیت، حالتی که فاصله الکترودها از ورق 25 میلی‌متر می‌باشد، نسبت به دو فاصله دیگر در قسمت‌های میانی قطعه توزیع ضخامت یکنواخت‌تری دارد. لازم به ذکر است قسمتی از نمودار که همان ضخامت اولیه 1.5 میلی‌متر را دارد بخشی از ورق است که بین

موقعیت الکترودها بر روی شکل‌پذیری ورق و توزیع ضخامت آن بررسی می‌گردد. برای بررسی این موضوع، الکترودها در فواصل مختلفی از ورق قرار گرفته‌اند و به ازای هر موقعیت قرارگیری الکترودها، شتاب حجمی اعمالی به روش سعی و خطا مقداری در نظر گرفته می‌شود که در تمامی حالت‌ها یک ارتفاع یکسان در ورق ایجاد شود. فرض شده است که هدف ایجاد ارتفاع 34 میلی‌متر در ورق است.

برای بررسی اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل‌پذیری ورق، چگونگی توزیع پارامتر شکست جانسون-کوک (D) در راستای شعاعی از قطعه نهایی برای موقعیت‌های مختلف الکترودها بدست آمد. شکل 9 نمودار توزیع پارامتر شکست جانسون - کوک برای سه فاصله الکترودها 15، 25 و 60 میلی‌متر از ورق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با وجود ایجاد ارتفاع نهایی یکسان در ورق، توزیع پارامتر شکست D با تغییر محل الکترودها تغییر کرده است. در قطعه‌ای که فاصله الکترودها از ورق زیاد می‌باشد (60 میلی‌متر) مقدار پارامتر D در مرکز قطعه به عدد یک نزدیک می‌باشد، بنابراین مرکز این قطعه کاملاً در مرز پارگی می‌باشد. با فاصله گرفتن از مرکز قطعه مقدار پارامتر شکست به تدریج کاهش یافته، به حدود 0.2 در شعاع 50 میلی‌متر می‌رسد. در صورتی که الکترودها در فاصله 15 میلی‌متر از ورق بگیرند، پارامتر شکست D در تمام نقاط داخلی قطعه یکنواخت و حدود 0.4 خواهد بود، اما در شعاع انحنای قالب، مقدار D به صورت ناگهانی افزایش یافته و به عدد یک می‌رسد. بنابراین این قطعه از محل شعاع انحنای قالب پاره می‌شود. در قطعه‌ای که با فاصله الکترودهای 25 میلی‌متر تهیه شده است، حداکثر مقدار D در مرکز است که برابر با 0.64 بوده و به طور قابل توجهی از نقطه شکست قطعه فاصله دارد. همچنین توزیع پارامتر شکست در این قطعه نسبت به قطعه‌ای که با فاصله الکترودهای 60 میلی‌متر تولید شده است، بسیار یکنواخت‌تر است.

با توجه به اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل‌پذیری، برای تعیین مناسب‌ترین موقعیت الکترودها بر اساس شکل‌پذیری قطعه، عملیات مدل‌سازی در موقعیت‌های مختلف با اختلاف فواصل 5 میلی‌متر از همدیگر انجام شد. با توجه به اینکه بررسی‌ها نشان می‌دهد که پارگی ورق در عملیات شکل‌دهی الکتروهیدرولیک آزاد، یا در مرکز قطعه یا در منطقه شعاع انحنای قالب اتفاق می‌افتد، حداکثر مقدار پارامتر شکست D در مرکز و شعاع انحنای قالب برای موقعیت‌های مختلف الکترودها بدست آمده و در شکل 10 بر حسب فاصله الکترودها از ورق رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار

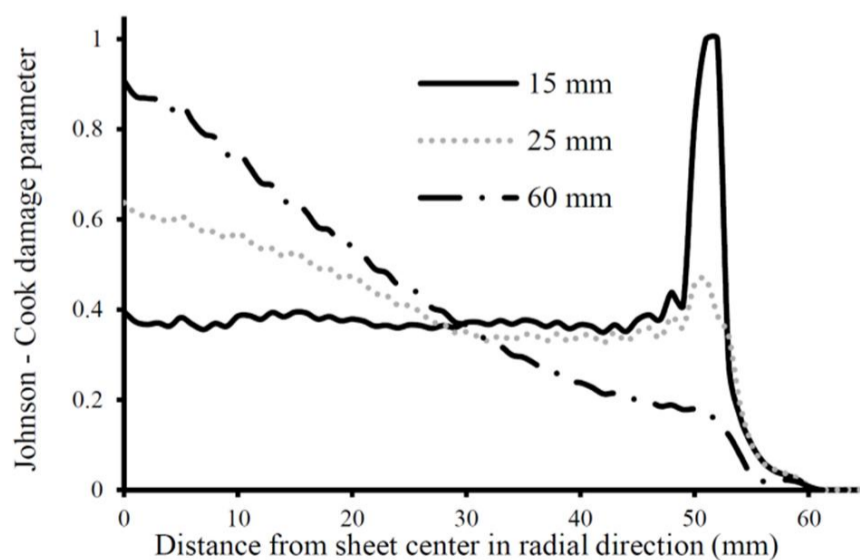


Fig. 9 Distribution of Johnson – Cook damage parameter of the mm parts with the same height of 34

شکل 9 نحوه توزیع پارامتر شکست جانسون - کوک در ورق‌هایی با ارتفاع یکسان 34 میلی‌متر

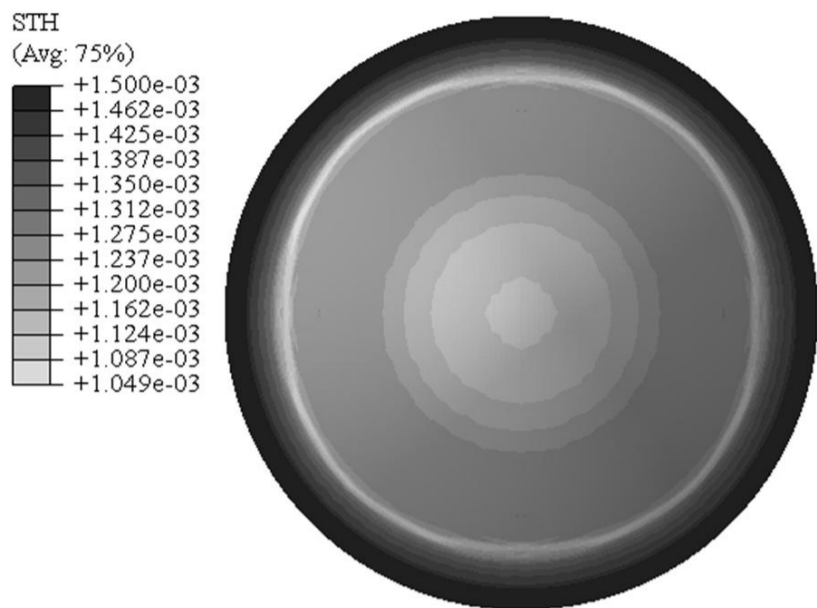


Fig. 13 Thickness distribution of the part formed with electrodes distance of 23.5 mm from blank

شکل 13 توزیع ضخامت ورق در قطعه ایجاد شده با فاصله الکترودهای 23.5 میلی متر از ورق

فاصله 23.5 میلی متری الکترودها از ورق را از نظر توزیع ضخامت و احتمال پارگی قطعه، مناسب ترین موقعیت برای شکل دهی این قطعه در نظر گرفت. در شکل 13 چگونگی توزیع ضخامت قطعه نهایی برای حالتی که فاصله الکترودها از ورق برابر 23.5 میلی متر می باشد، نشان داده شده است.

4- جمع بندی و نتیجه گیری

عملیات شکل دهی الکترو هیدرولیک آزاد با استفاده از نرم افزار المان محدود مدلسازی شده، با نتایج تجربی صحت گذاری گردید. پس از تأیید صحت مدلسازی، اثر موقعیت الکترودها بر روی توزیع ضخامت و شکل پذیری قطعه به دست آمد. نتایج حاصله به شرح زیر است:

- مدلسازی المان محدود نشان می دهد که در داخل محفظه آب می توان نقطه ای را برای موقعیت الکترودها پیدا کرد که ضمن اینکه توزیع ضخامت قطعه بهینه ترین حالت ممکن باشد، احتمال پارگی قطعه نیز کاهش یابد.
- با افزایش یا کاهش فاصله الکترودها از ورق نسبت به نقطه بهینه، توزیع ضخامت قطعه غیر یکنواخت تر شده و احتمال پارگی قطعه نیز افزایش می یابد.
- با افزایش فاصله الکترودها از ورق نسبت به نقطه بهینه، احتمال پارگی ورق از مرکز افزایش می یابد و با کاهش فاصله الکترودها از ورق، احتمال پارگی آن از محل شعاع انحنای قالب افزایش می یابد.
- می توان محدوده ای را برای موقعیت الکترودها تعیین کرد که شکل دهی قطعه تنها در آن محدوده امکان پذیر است.

5- فهرست علائم

A	ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک (Pa)
B	ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک (Pa)
C	ثابت مدل پلاستیک جانسون کوک
d_1, d_2, d_3, d_4, d_5	ثابت های مدل پارگی جانسون - کوک
D	پارامتر شکست جانسون - کوک
m	ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک
n	ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک

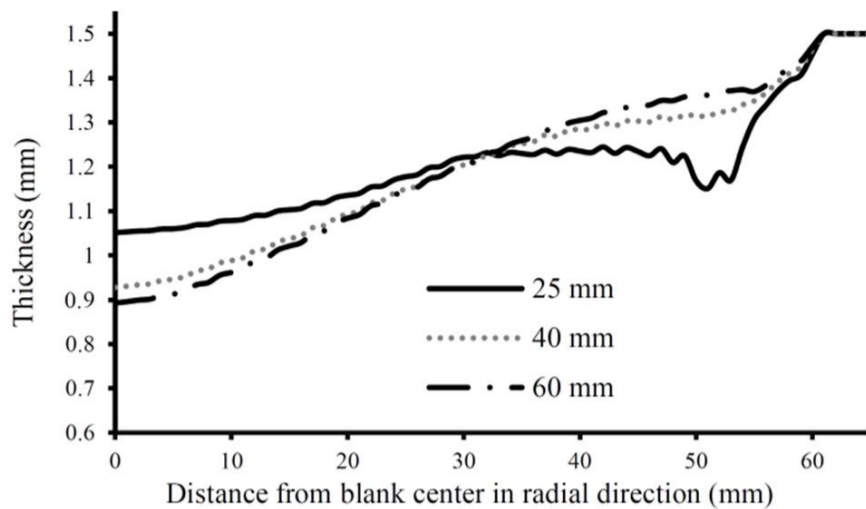


Fig. 11 Thickness distribution of the parts with the same height of 34 mm

شکل 11 توزیع ضخامت ورق در قطعات با ارتفاع یکسان 34 میلی متر

قالب و محفظه ثابت بوده و تغییر شکل نداده است. در حالتی که فاصله الکترودها از ورق زیاد می باشد (60 میلی متر)، حداقل ضخامت قطعه در مرکز آن است که کمتر از 0.9 میلی متر می باشد. با کاهش فاصله گرفتن از مرکز قطعه، ضخامت افزایش می یابد و به 1.5 میلی متر در فلنج قطعه می رسد. در فاصله الکترودهای 40 میلی متر نیز، توزیع ضخامت با اندکی اختلاف مشابه حالتی است که فاصله الکترودها 60 میلی متر است. اما با کاهش فاصله الکترودها به مقدار 25 میلی متر، مشاهده می گردد که توزیع ضخامت حالت یکنواخت تری پیدا کرده است و حداقل آن نیز به مقدار 1.05 افزایش یافته است.

همان گونه که بیان شد، حداکثر ضخامت قطعات حاصله با موقعیت های مختلف الکترودها یکسان و برابر با 1.5 میلی متر است. بنابراین برای تعیین حالتی که بهینه ترین توزیع ضخامت را ایجاد می کند، حداقل ضخامت قطعات با موقعیت های مختلف الکترودها تعیین گردید که در شکل 12 نشان داده شده است. چون قطعات با فواصل الکترود کمتر از 20 میلی متر پاره شده بودند، مقایسه برای فواصل بیشتر از 20 میلی متر انجام شده است. همان گونه که مشاهده می شود برای قالب و هندسه مشخص مدلسازی شده در این مقاله، در فاصله 23.5 تا 25 میلی متری الکترودها از ورق اولیه، قطعه کار کمترین کاهش ضخامت را داشته و با افزایش فاصله الکترودها، حداقل ضخامت قطعه کاهش می یابد. بنابراین با قرار گرفتن الکترودها در فاصله 23.5 تا 25 میلی متر از ورق توزیع ضخامت یکنواخت تری در ورق ایجاد شده است. با توجه به اینکه طبق شکل 10 حداکثر مقدار پارامتر جانسون - کوک در این بازه به تدریج از 0.6 تا 0.64 افزایش می یابد، بنابراین می توان

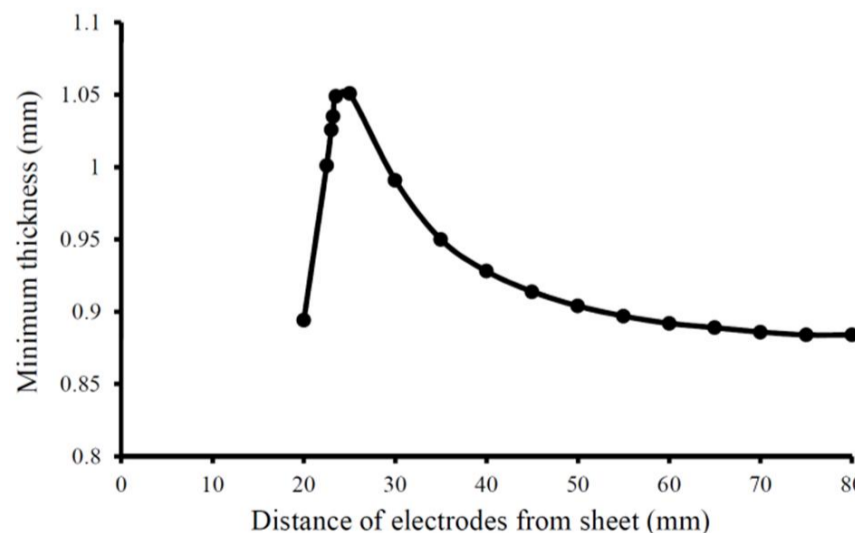


Fig. 12 Effect of electrodes position on minimum thickness of mm the parts with the same height of 34

شکل 12 اثر موقعیت الکترودها بر روی حداقل ضخامت ورق در قطعات با ارتفاع یکسان 34 میلی متر

[5] W. Bleck, I. Schael, Determination of crash-relevant material parameters by dynamic tensile tests, *Journal of Steel Research International*, Vol. 17, pp. 173-178, 2000.

[6] H. Yu, Y. Guo, X. Lai, Rate dependent behavior and constitutive model of DP600 at strain rate from 10^{-4} to 10^3 s^{-1} , *Journal of Material and Design*, Vol. 30, pp. 2501-2055, 2009.

[7] M. Farzin, H. Montazerolghaem, Manufacture of thin miniature parts using electro hydraulic forming and viscous pressure forming methods, *Archives of metallurgy and materials*, Vol. 54, pp.535-547, 2009.

[8] W. Homberg, C. Beerwald, A. Pröbsting, Investigation of the electrohydraulic forming process with respect to the design of sharp edged contours, *4th International Conference on High Speed Forming*, pp.58-64, Columbus, Ohio, USA, 2010.

[9] M. K. Knyazev, Ya. S. Zhovnovatuk, Measurement of pressure fields with multi-point membrane gauges at electrohydraulic forming, *4th International Conference on High Speed Forming*, pp.65-82, Columbus, Ohio, USA, 2010.

[10] J. Samei, D. E. Green, S. Golovashchenko, A. Hassannejadasl, Quantitative microstructural analysis of formability enhancement in dual phase steels subject to electrohydraulic forming, *Journal of Material Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 2079-2088, 2012.

[11] A. Melander, A. Delic, A. Björkblad, P. Juntunen, L. Samek, L. Vadillo, Modelling of electro hydraulic free and die forming of sheet steels, *International Journal of Material Forming*, Vol. 6, pp.223-231, 2013.

[12] A. J. Gillard, S. F. Golovashchenko, A. V. Mamutov, Effect of quasi-static prestrain on the formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 15, pp. 201-218, 2013.

[13] A. Rohatgi, A. Soulami, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. T. Smith, An investigation of enhanced formability in AA5182-O Al during high-rate free-forming at room temperature: qualification of deformation history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 722-732, 2014.

[14] A. Hassannejadasl, D. E. Green, S. F. Golovashchenko, J. Samei, C. Maris, Numerical modelling of electrohydraulic free- forming and die-forming of DP590 steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, pp. 391-404, 2014.

[15] A. Hassannejadasl, *Simulation of electrohydraulic forming using anisotropic, rate-dependent plasticity models*, PhD thesis, University of Windsor, Canada, 2014.

[16] D. Björkström, *FEM simulation of electrohydraulic forming*, Msc Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2008.

T دما (K)

علائم یونانی

ϵ کرنش

ϵ_p کرنش موثر پلاستیک

$\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش (s^{-1})

$\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع (s^{-1})

η معیار سه بعدی بودن تنش

σ تنش (Pa)

Σ نماد جمع

زیرنویس‌ها

f معرف خواص در لحظه شکست

m معرف خواص ماده در لحظه ذوب شدن

r معرف خواص ماده در شرایط اتاق

6- تقدیر و تشکر

انجام این تحقیق با حمایت دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) انجام شده است. لذا نگارندگان قدردانی خود را از مسئولین مربوطه ابراز می‌دارند.

7- مراجع

[1] L. A. Yutkin, *Electrohydraulic effect*, Moscow: Mashgiz, 1995.

[2] E. J. Bruno, *High velocity forming of metals*, Michigan: American Society of Tool and Manufacturing engineers, 1968.

[3] S. F. Golovashchenko, A. J. Gillard, A. V. Mamutov, Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 213 pp. 1191- 1212, 2013.

[4] V. S. Balenthiram, X. Hu, M. Altynova, G. S. Daehn, Hyperplasticity: enhanced formability at high rates. *Journal of Material Process Technology*, Vol. 45, pp.595-600, 1994.