

ماهنامه علمى پژوهشى

ی مکانیک مدر س



کی افادیندس منابع میں دوروسی میکانیک مدرسی میں دوروس

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

على فضلى^{1*}، سيد محمدرضا حسينى²

1 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوين، كد پستى a.fazli@eng.ikiu.ac.ir ،34148-96818

چکیدہ	اطلاعات مقاله
شکلدهی الکتروهیدرولیک یک فرآیند شکلدهی سریع است که در آن انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازنها بین دو الکترود مستغرق در آب	مقاله پژوهشی کامل
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	دریافت: 31 مرداد 394 ا بزیرش : 11 مور 1394
میگردد. یکی از پارامترهای مهم در طراحی بهینه فرآیند شکلدهی الکتروهیدرولیک تعیین محل مناسب الکترودها میباشد. در این تحقیق با	پدیرس. ۲۰۱ مهر ۲۰ ق. ارائه در سایت: 10 آبان 1394
استفاده از شبیهسازی المان محدود اثر موقعیت الکترودها در فرایند شکلدهی الکتروهیدرولیک در حالت شکلدهی الکتروهیدرولیک آزاد بررسی	کلید واژگان:
شده است. ابتدا چند نمونه از آزمایشات تجربی موجود در مقالات، با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شده، نتایج شبیهسازی	شكلدهي الكتروهيدروليك
با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید که نشاندهنده توافق قابل قبول نتایج مدلسازی و نتایج تجربی میباشد. پس از صحهگذاری نتایج	موقعيت الكترودها
شبیهسازی، با تغییر محل الکترودها، اثر موقعیت الکترودها بر روی شکلپذیری قطعه و توزیع ضخامت در قطعه نهایی بررسی شده است. نتایج	توزيع ضخامت
نشان میدهد که امکان شکلدهی قطعه تنها در موقعیتهای محدودی از الکترودها وجود دارد و در محفظه شکلدهی میتوان محلی را برای	شکل پذیر <i>ی</i>
الکترودها پیدا کرد که ضمن آن که توزیع ضخامت قطعه را یکنواختتر میکند، احتمال پارگی قطعهکار 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.

آ- مقدمه	سنتی برای شکلدهی چنین موادی وجود ندارد. علت آن این است که
ر سالیان اخیر به منظور کاهش انرژی و همینطور کاهش هزینه، استفاده از	روشهای قدیمی قادر به شکلدهی ورقها با ضخامت کم نمیباشند. علاوه بر
واد سبکتر و در عین حال با استحکام بالا مانند آلیاژهای آلومینیوم و	آن روشهای قدیمی شکلدهی که شامل دو نیمه قالب میباشد و بر اساس
، <i>ا</i> لادهای پراستحکام پیشرفته ¹ در صنایع خودرو و همچنین صنایع هوافضا	تماس فلز – فلز قالب و قطعهکار عمل شکلدهی را انجام میدهد، برای
زایش چشمگیری داشته است. مشکل اصلی در استفاده از این مواد	شکلدهی فولادهای پراستحکام به مراحل شکلدهی و قالبهای بیشتری نیاز
کلپذیری کمتر آنها میباشد که در نتیجه آن، امکان استفاده از روشهای	دارد. برای بر طرف نمودن مشکلات مذکور و بهبود شکلپذیری ورقهای
1- Advanced High Strength Steel (AHSS)	استحکام بالا که عموما در ضخامتهای کمتر نیز مورد استفاده قرار میگیرند،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Fazli, S. M. R. Hosseini, Investigation of the effect of electrodes position on formability and thickness distribution of sheet metals in electrohydraulic free-forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 311-318, 2015 (In Persian)

لازم است از روشهای دیگری برای شکل دهی استفاده شود. مطالعات انجام شده در سالهای اخیر نشان می دهد که در سرعتهای بالای شکل دهی، با بالا رفتن نرخ کرنش، شکل پذیری این مواد به طور قابل توجهی افزایش پیدا می کند. به منظور بالا بردن نرخ کرنش در حین فرآیند شکل دهی، روشهای مختلف شکل دهی سریع ایجاد شده است که می توان به فرآیندهای شکل دهی انفجاری¹، شکل دهی الکترومغناطیس² و شکل دهی الکتروهیدرولیک³ اشاره کرد.

در شکل 1 شمای کلی از فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیک نشان داده شده است. تخلیه قوس الکتریکی بین دو الکترود باعث تبخیر آب موجود در محدوده الکترودها می گردد. فشار در این محدوده در مدت زمان بسیار کوتاهی بالا رفته و در نتیجه شوک عظیمی ایجاد می شود. نیروی فشاری و شوک ایجاد شده از طریق سیال مذکور به قطعه کار منتقل می گردد. در اثر این فشار اعمال شده، قطعه کار شکل حفره قالب را که در شرایط خلاً می باشد می گیرد. این روش با توجه به سرعت بالای شکل دهی، باعث افزایش قابل توجه در شکل پذیری بسیاری از مواد می گردد.

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 فرایند مورد توجه قرار گرفت به گونهای که برونو در سال 1968 کاربردهای مختلفی از این فرایند را بیان نمود [2]. اما با وجود تاریخچه 60 ساله این فرآیند، شکلدهی الکتروهیدرولیک تاکنون کاربردهای صنعتی محدودی داشته است و عموما برای قطعات با ابعاد کوچک استفاده می شده است. علت عمده این محدودیت، نبود سیستمهای پیشرفته ای بود که بتوانند ولتاژ بالای Die



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 مجددا 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 عموما شکلپذیری کمتری نیز دارند. با توجه به شکل پذیری بالاتر مواد در سرعتهای بالای شکل دهی، امروزه مجددا این روشها مورد توجه صنعت گران قرار گرفته است و در سالیان اخیر تحقيقات پيرامون شكلدهي الكتروهيدروليك مورد توجه قرار گرفته است. بلنتیرام و همکارانش شکل پذیری سه ورق مرسوم در عملیات شکل دهی (آلومینیوم AA6061، مس OFHC و فولاد IF) را در فرایندهای با سرعتهای شکلدهی بالا و پایین مقایسه نمودند [4]. آنها برای شکلدهی با سرعت بالا از فرایندهای شکلدهی الکتروهیدرولیک و شکلدهی الكترومغناطيسي استفاده نمودند. نتايج نشان ميدهد كه هر سه ماده در سرعتهای بالای شکل دهی شکل پذیری بهتری دارند. بلک و اسکائل برای تعیین خواص مکانیکی ورقهای فولادی در نرخهای کرنش بالا، آزمونهای کشش را درسرعتهای بالا تا نرخ کرنش 200 بر ثانیه بر روی ورقهای تخت از جنس فولاد دوفازی انجام دادند [5]. یو و همکاران برای شبیهسازی فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیک، با انجام تستهای کشش دینامیکی در محدوده نرخ کرنش،های 500 تا 1600 بر ثانیه رفتار مکانیکی فولاد دوفازی DP600 را بررسی کردند [6]. آنها همچنین به شبیهسازی فرآیند شکل دهی الکتروهیدرولیک در نرخ کرنشهای مختلف پرداختند. فرزین و منتظرالقائم شکل دهی قطعات مینیاتوری⁴ و ورقهای فلزی با ضخامت کم به وسيله فرآيند شكل دهي الكتروهيدروليك را بررسي كردند [7]. هومبرگ و برواد نشان دادند در شکل دهی الکتروهیدرولیک می توان بدون پارگی در ورق، گوشههای تیزتری را نسبت به روش شکلدهی هیدروفرمینگ^د ایجاد کرد [8]. نیازیف و ژوناواتوک با استفاده از آزمایشات تجربی، توسط فشارسنج غشائی چند نقطهای، توزیع فشار اعمالی بر روی ورق در عملیات شکلدهی الكتروهيدروليك را به دست آوردند [9]. از توزيع فشار بدست آمده، مي توان در مدلسازی سادهتر این فرآیند استفاده نمود. صامعی و همکارانش به صورت میکروساختاری، بهبود شکلپذیری ورقهای فولادی دوفازی $^\circ$ در روش شكلدهى الكتروهيدروليك را بررسى نمودند [10]. اين بررسىها نشان مىدهد كه بهبود شكل پذيرى در فاز فريت و مارتنزيت به ترتيب 20 و 100 درصد می باشد. گلوواشنکو و همکارانش شکل پذیری ورقهای فولادی دوفازی را در شکلدهی الکتروهیدرولیک بررسی کردند و بهبود شکلپذیری ورق در اثر سرعت بالای شکل دهی 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 در آب را به صورت انتشار موج از محل الكترودها مدلسازی نمودند و صحت این

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

شكل 1 شماتيك فرآيند شكلدهي الكتروهيدروليك [3]

312

Explosive Forming
 Electromagnetic Forming
 Electrohydraulic Forming

4- Miniature Parts5- Hydro Forming6- Dual Phase Steels7- Electrohydraulic Free Forming (EHFF)

8- Electrohydraulic Die Forming (EHDF)

نوع مدلسازی را با مقایسه با نتایج تجربی تأیید نمودند. گیلارد و همکارانش اثر پیشفرم ایجاد شده با فرایند هیدروفرمینگ پیش از فرآیند شکلدهی الکتروهیدرولیک را برای ایجاد شکلهای پیچیده بررسی نمودند [12]. در این روش، شکلدهی در دو مرحله انجام می گیرد که مرحله اول شامل ایجاد پیش فرم شبهاستاتیکی در ورق است و در مرحله دوم نقاط تیز و همینطور پرعمق قالب به وسیله شکلدهی الکتروهیدرولیک پر میشود. روهاتگی و همكارانش نمودار حد شكلدهي¹ ورق آلومينيومي O-AA5182 در فرآيند 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. حسن نژاد اصل و همکارانش نیز به مدلسازی عددی فرآیند شکلدهی الکتروهیدرولیک پرداختند [14]. آنها از مدلسازی ترکیبی اولری-لاگرانژی 2 برای مدلسازی این فرایند 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 صحهگذاری 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 تحقيق

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 آباکوس ³ 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 می گردد.

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 صحه گذاری، 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.

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 پر 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 درآمده است. همان طور که در این شکل مشخص است، در شبیهسازی فرآیند شکل دهی، محفظه آب به طور کامل مدل نشده است در شبیهسازی فرآیند 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 همین طور تماس ورق با قالب در نظر گرفته شده است. ضریب



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

شكل 2 هندسه محفظه آب، ورق و قالب به كار رفته در اين تحقيق



Fig. **3** The finite element model of electrohydraulic forming process

شکل 3 مدل المان محدود فرآیند شکلهی الکتروهیدرولیک

2-1-مدلسازی المان محدود

شبیه سازی فرآیند شکل دهی، 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

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

313

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 صریح¹استفاده شده است. ضمنا زمان حل مسئله حاضر نیز 1000 میکرو ثانیه در نظر گرفته شده است.

2-2- مدل خواص ماده

برای بیان خواص ورق در شبیه سازی از مدل جانسون – کوک استفاده شده است که رابطه تنش جریان ماده با تغییر کرنش، نرخ کرنش و تغییر دما را بیان می کند. معادله جانسون – کوک به صورت رابطه (1) بیان می شود.

 $\sigma = \left[A + B(\varepsilon_{\rm p})^n\right] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\rm r}}{T_{\rm m} - T_{\rm r}}\right)^m\right]$ (1)

در رابطه (1)، σ تنش و $_{\rm p}^{3}$ کرنش پلاستیک موثر² ماده است. \dot{s} و $\dot{\sigma}$ به T در رابطه، T ترتیب نرخ کرنش لحظهای 8 و نرخ کرنش مرجع 4 هستند. در این رابطه، T دمای لحظهای ماده، $T_{\rm r}$ دمای اتاق و $T_{\rm m}$ دمای ذوب ماده است. A، B، G، C, B, A دمای لحظهای ماده است. $T_{\rm r}$ دمای اتاق و $T_{\rm m}$ دمای ذوب ماده است. $T_{\rm r}$ و G مرو m و m و مرو n نیز ثابتهای ماده بوده و تابعی از جنس آن هستند. در این پژوهش، با توجه به زمان بسیار کوتاه فرآیند شکل دهی، 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 شکل دهی الکتروهیدرولیک، برای تحلیل پارگی ورق از معیار شکست جانسون – کوک⁵ استفاده شده است. در این معیار پارگی، پارامتر شکست⁶ به صورت رابطه (2) از تجمیع نسبت کرنشهای جزیی به کرنش شکست محاسبه می شود.

$$D = \sum_{\epsilon_{\rm f}} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{\rm f}} \tag{2}$$

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

 d_{2} ، d_{3} ، d_{2} 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

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.

5-2- مدلسازی تخلیه انرژی الکتریکی به سیال

همان گونه که در قسمتهای قبل نیز ذکر شد، پارامتر ورودی برای شبیه سازی موج ایجاد شده در آب، شتاب حجمی می باشد. در شبیه سازی، شتاب حجمی به همان نقطه ایجاد شوک یعنی محل قرار گیری الکترودها در آب داده شده است. با توجه به اینکه در نتایج تجربی استفاده شده برای صحه گذاری، مدت زمان تخلیه انرژی الکتریکی خازنها در آب تقریبا 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. مقدار حداکثر آمده در ورق یعنی جابه جایی مرکز آن در شبیه سازی با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی یکسان گردد.

2-6- مش بندی

در شبیهسازی فرآیند شکلدهی الکتروهیدرولیک برای مدلسازی ورق از المان های 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 حدودا 1 میلیمتر می باشد که معادل با 15995

جدول 2 ثوابت مدل پارگی جانسون - کوک استفاده شده برای فولاد دوفازی [14] DP600

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

d_5	d_4	d_3	d ₂	d_1	پارامتر
0	-0.006	0.5	0.5	0.7	مقدار



$\dot{arepsilon}_0$	С	п	<i>B</i> (MPa)	A(MPa)	ر
0.001	0.015	0.33	614	335	
1. Explicit					
D Emulant					
2- Equivalent 3- Instantaneo	Plastic Strain Jus Strain Rate				
2- Equivalent I 3- Instantanec 4- Reference S	Plastic Strain ous Strain Rate train Rate				
2- Equivalent 3- Instantanec 4- Reference S 5- Johnson – C	Plastic Strain ous Strain Rate train Rate ook Damage Cr	iterion			
2- Equivalent 3- Instantanec 4- Reference S 5- Johnson – C 6- Johnson – C	Plastic Strain Jus Strain Rate train Rate ook Damage Cr ook Damage Pa	riterion arameter			
2- Equivalent I 3- Instantaneo 4- Reference S 5- Johnson – C 6- Johnson – C 7- Stress Triax	Plastic Strain pus Strain Rate train Rate ook Damage Cr ook Damage Pa iliaty	iterion arameter			

1.6

المان برای ورق است. برای مدلسازی آب موجود در محفظه نیز از المانهای آکوستیک¹، دارای 8 نود و آجری AC3D8R استفاده شده است. علت استفاده از المانهای 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 المانهای استفاده شده برای آب نیز حدودا 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 المانها، اندازه المانهای ورق از یک میلیمتر به 0.5 میلیمتر و اندازه المانهای آب نیز از 2.5 میلیمتر به 1.5 میلیمتر تغییر یافت و تغییری در نتایج حاصل نشد که نشاندهنده استقلال نتایج مدلسازی عددی از اندازه المانها میباشد.

3 - نتايج

3-1- صحه گذاری مدلسازی المان محدود

همان طور که در قسمتهای قبل نیز ذکر شد، پارامتر ورودی در شبیهسازی فرآیند شکلدهی شتاب حجمی میباشد، 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 شبیهسازی المان محدود، درست به اندازهای در نظر گرفته می شود که مقدار بیشینه ارتفاع ایجاد شده در ورق یعنی جابهجایی 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 میلیمتر بوده است [15]. به کمک سعى و خطا و تكرار فرآيند مدلسازي المان محدود مسئله با مقادير 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 میلیمتر مي گردد. بنابراين مدل المان محدود با شتاب حجمي ورودي 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 شبیهسازی به نمایش درآمده است.

برای بررسی درستی مدلسازی المان محدود، نتایج حاصل از شبیهسازی 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 میشود نتایج حاصل از مدلسازی و کار تجربی انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در شکلهای 7 و 8 نیز به ترتیب کرنش اصلی² (که همان کرنش شعاعی قطعه است) و کرنش فرعی³ (که همان کرنش محیطی قطعه

میباشد) در راستای قطری از ورق اولیه با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشاندهنده توافق قابل قبول آزمایشات تجربی و شبیهسازی المان محدود و حاکی از دقت قابل قبول مدلسازی انجام گرفته میباشد.

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- تعيين محل بهينه موقعيت الكترودها

با توجه به اینکه موقعیت الکترودها در محفظه آب نقش به سزایی در فرآیند شکلدهی الکتروهیدرولیک میتواند داشته میباشد، در این قسمت اثر



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











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

Acoustic
 Major Strain
 Minor Strain

موقعیت الکترودها بر روی شکل پذیری ورق و توزیع ضخامت آن بررسی می گردد. برای بررسی این موضوع، الکترودها در فواصل مختلفی از ورق قرار گرفتهاند و به ازای هر موقعیت قرار گیری الکترودها، شتاب حجمی اعمالی به روش سعی و خطا مقداری در نظر گرفته می شود که در تمامی حالتها یک ارتفاع یکسان در ورق ایجاد شود. فرض شده است که هدف ایجاد ارتفاع 34 میلی متر در ورق است.

برای بررسی اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل پذیری ورق، چگونگی توزيع پارامتر شکست جانسون-کوک (D) در راستای شعاعی از قطعه نهایی برای موقعیتهای مختلف الکترودها بدست آمد. شکل 9 نمودار توزیع پارامتر شكست جانسون - كوك براى سه فاصله الكترود 15، 25 و 60 ميلىمتر از ورق را نشان میدهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، با وجود ایجاد ارتفاع نهایی یکسان در ورق، توزیع پارامتر شکست D با تغییر محل الكترودها تغییر كرده است. در قطعهای كه فاصله الكترودها از ورق زیاد میباشد (60 میلیمتر) مقدار پارامتر D در مرکز قطعه به عدد یک نزدیک میباشد، بنابراین مرکز این قطعه کاملا 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 می شود. در قطعهای که با فاصله الکترودهای میلیمتر تهیه شده است، حداکثر مقدار D در مرکز است که برابر با 250.64 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 الكترودهاى 60 ميلىمتر توليد شده است، بسيار يكنواختتر است.

با توجه به اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل پذیری، برای تعیین مناسب ترین موقعیت الکترودها بر اساس شکل پذیری قطعه، عملیات مدلسازی در موقعیتهای مختلف با اختلاف فواصل 5 میلی متر از همدیگر انجام شد. با توجه به اینکه بررسی ها نشان می دهد که پارگی ورق در عملیات شکل دهی الکترو هیدرولیک آزاد، یا در مرکز قطعه یا در منطقه شعاع انحنای قالب اتفاق می افتد، حداکثر مقدار پارامتر شکست D در مرکز و شعاع انحنای قالب برای موقعیت های مختلف الکترودها بدست آمده و در شکل 10 بر حسب فاصله موقعیت های مختلف الکترودها بدست آمده و در شکل 10 بر حسب فاصله موقعیت های مختلف الکترودها بدست آمده و در شکل 10 بر حسب فاصله موقعیت های مختلف الکترودها بدست آمده و در شکل 10 بر حسب فاصله موقعیت های مختلف الکترودها از ورق رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، مقدار





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

20 پارامتر شکست D در منطقه شعاع انحنای قالب به ازای فواصل کمتر از Dمیلیمتر الکترودها از ورق به یک رسیده است. یعنی اگر فاصله الکترودها از 20 میلیمتر کمتر باشد، قطعه از منطقه شعاع انحنای قالب یاره میشود. با افزایش فاصله الکترودها از ورق، مقدار پارامتر شکست در منطقه شعاع انحنا به شدت کاهش یافته و احتمال پارگی از این منطقه از بین میرود. مقدار پارامتر D در مرکز قطعه روندی کاملا معکوس دارد، به نحوی که وقتی فاصله Dالکترودها 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 می شود. 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 الكترودها از قطعه وجود خواهد داشت. بنابراین می توان 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 مى ابد. بهينه ترين حالت، نقطه تلاقى دو منحنى بيان شده است كه 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 می شود 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 شکل پذیری، بهترین موقعیت الکترودها برای تولید این قطعه ، فاصله 23.2 میلیمتری از ورق میباشد.

برای بررسی اثر موقعیت قرار گیری الکترودها بر روی توزیع ضخامت

ورق، در شکل 11 نمودار توزیع ضخامت در راستای شعاعی از قطعه نهایی برای سه موقعیت الکترود با فاصله 25، 40 و 60 میلیمتری از ورق نشان داده شده است. در بررسی شکل پذیری، مشاهده شد که در هر سه حالت بیان شده، قطعه بدون پارگی شکل می گیرد. نتایج نشان میدهد که با وجود ارتفاع نهایی یکسان در ورق با تغییر موقعیت الکترودها توزیع ضخامت در ورق تغییر می کند، 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 توزيع ضخامت يكنواختتري دارد. لازم به ذكر است قسمتي از نمودار كه همان ضخامت اوليه 1.5 ميلىمتر را دارد بخشى از ورق است كه بين

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دورہ 15، شمارہ 11

316



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 میلیمتر

قالب و محفظه ثابت بوده و تغییر شکل نداده است. در حالتی که فاصله الکترودها از ورق زیاد میباشد (60 میلی متر)، حداقل ضخامت قطعه در مرکز آن است که کمتر از 0.9 میلی متر میباشد. با فاصله گرفتن از مرکز قطعه، ضخامت افزایش مییابد 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 موقعیتهای مختلف الکترودها یکسان و برابر با 1.5 میلیمتر است. بنابراین برای تعیین حالتی که بهینهترین توزیع ضخامت را ایجاد می کند، حداقل ضخامت قطعات با موقعیتهای مختلف الکترودها تعیین گردید که در شکل 12 نشان داده شده است. چون قطعات با فواصل الکترود کمتر از 20 میلیمتر پاره شده بودند، مقایسه برای فواصل بیشتر از 20 میلیمتر انجام شده است. همان گونه که مشاهده میشود برای قالب و هندسه مشخص مدلسازی شده در این مقاله، در فاصله 23.5 تا 25 میلیمتری الکترودها از ورق اولیه، قطعه کار ضخامت قطعه کاهش مییابد. بنابراین با قرار گرفتن الکترودها، حداقل ضخامت قطعه کاهش مییابد. بنابراین با قرار گرفتن الکترودها در فاصله مخامت قطعه کاهش مییابد. بنابراین با قرار گرفتن الکترودها در فاصله شده است. با توجه به اینکه طبق شکل 10 حداکثر مقدار پارامتر جانسون-شده است. با زوجه به اینکه طبق شکل 10 حداکثر مقدار پارامتر جانسون-





Fig. 13 Thickness distribution of the part formed with electrodes distance of 23.5 mm from blank 23.5 تشكل 13 توزيع ضخاومت ورق در قطعه ايجاد شده با فاصله الكترودهاى

میلیمتر از ورق

فاصله 23.5 میلیمتری الکترودها از ورق را از نظر توزیع ضخامت و احتمال پارگی قطعه، مناسبترین موقعیت برای شکلدهی این قطعه در نظر گرفت. در شکل13 چگونگی توزیع ضخامت قطعه نهایی برای حالتی که فاصله الکترودها از ورق برابر 23.5 میلیمتر میباشد، نشان داده شده است.

4-جمع بندی و نتیجه گیری

عملیات شکل دهی الکتروهیدرولیک آزاد با استفاده از نرمافزار المان محدود مدلسازی شده، با نتایج تجربی صحه 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 میدهد که در داخل محفظه آب
 میتوان نقطهای را برای موقعیت الکترودها پیدا کرد که ضمن
 اینکه توزیع ضخامت قطعه بهینهترین حالت ممکن باشد، احتمال
 پارگی قطعه نیز کاهش یابد.
- با افزایش یا کاهش فاصله الکترودها از ورق نسبت به نقطه بهینه، توزیع ضخامت قطعه غیریکنواختتر شده و احتمال پارگی قطعه نیز افزایش مییابد.
- با افزایش فاصله الکترودها از ورق نسبت به نقطهی بهینه، احتمال پارگی ورق از مرکز افزایش مییابد و با کاهش فاصله الکترودها از ورق، احتمال پارگی آن از محل شعاع انحنای قالب افزایش مییابد.
- می توان محدودهای را برای موقعیت الکترودها تعیین کرد که شکلدهی قطعه تنها در آن محدوده امکان پذیر است.

$$-5$$
فهرست علائم(Pa) A ثابت مدل پلاستیک جانسون – کوک (Pa) B ثابت مدل پلاستیک جانسون – کوک (Pa) B ثابت مدل پلاستیک جانسون – کوک (Pa) C ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک D ثابت مدل پارگی جانسون - کوک D ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک m ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک n ثابت مدل پلاستیک جانسون - کوک

- [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 103 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. Knyazyev, Ya. S. Zhovnovatuk, Measurmnent 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, Quantitive 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 Winsdor, Canada, 2014.
- [16] D. Björkström, *FEM simulatoion of electrohydraulic forming*, Msc Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2008.

(K) دما (K)
علائم يونانى
$$T$$
 دما (K)
علائم يونانى ε
 ε
 c_p كرنش موثر پلاستيك
 ε_p نرخ كرنش مرجع (s^{-1})
 \dot{s} نرخ كرنش مرجع (s^{-1})
 \dot{s}_0 معيار سه بعدى بودن تنش
 η معيار سه بعدى بودن تنش
 τ نماد جمع
 c_p نماد جمع
 c_p معرف خواص در لحظه شكست
m

معرف خواص ماده در شرایط اتاق

6- تقدير و تشكر

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

- L. A. Yutkin, *Electrohydraulic effect*, Moscow:Mashgiz, 1995.
 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.

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11

318