

## بررسی تغییر شکل ورق فلزی تحت شکل دهی الکتروهیدرولیکی با استفاده از مشاهدات تجربی و شبیه سازی عددی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار

مهدی ظهور\*

سید میثم موسوی

امین اشرافی 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

شکل دهی الکتروهیدرولیکی یک فرایند شکل دهی ورق فلزی با سرعت بالا است که در آن دو الکترود در محفظه ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین آن ها، فشار بالایی جهت شکل دادن ورق ایجاد می کند. در این تحقیق جهت بررسی رفتار تغییر شکل ورق برنجی در طی شکل دهی الکتروهیدرولیکی، آزمایش های تجربی گسترده ای (تا ۳٫۲ کیلوژول) انجام می شود. برای توضیح جنبه های مختلف تغییر شکل ورق، فرمولاسیون هیدرودینامیک ذرات هموار با روش اجزاء محدود در نرم افزار ال اس داینا کوپل و برای شبیه سازی مورد استفاده قرار می گیرد. در این پژوهش جهت مدل کردن فرایند تخلیه الکتریکی دو رویکرد متفاوت استفاده می گردد. در رویکرد نخست، انرژی تخلیه الکتریکی به جرم معادل از ماده منفجره تی ان تی تبدیل می شود. در رویکرد دوم، فاصله بین الکترودها با یک کانال پلاسما جایگزین و انرژی تخلیه الکتریکی درون آن تزریق می گردد. در انتها، تاریخچه تغییر شکل (تغییر مکان، سرعت، کرنش و نرخ کرنش) در نقاط مختلف ورق ها ارائه می شود. نتایج نشان می دهد (در شرایط مورد استفاده در این پژوهش)، مقدار بیشینه سرعت و نرخ کرنش به ترتیب به ۲۵۰ متر بر ثانیه و ۳۸۰۰ بر ثانیه می رسد.

واژه های کلیدی: تغییر شکل ورق فلزی، فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی، شبیه سازی عددی، هیدرودینامیک ذرات هموار.

## Investigation of Sheet metal Deformation Subjected to Electrohydraulic forming using Experimental Observations and Numerical Simulation with SPH Method

M. Zohoor

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

S. M. Mousavi

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

A. Ashrafi Tafreshi

Faculty 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 are carried out (up to 3.2 kJ) to investigate the deformation behavior of brass sheet by using EHF. To explain different aspects of sheet deformation, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) formulation is coupled with Finite Element Method (FEM) in LS-DYNA and applied for simulation. In order to model the electrical discharge process, two different approaches are implemented. In the first approach, electrical discharge energy is converted to equivalent TNT mass. In the second approach electrodes gap is replaced by a plasma channel and electrical discharge energy is leaked to it. Finally, deformation history (displacement, velocity, strain and strain-rate) at different locations of sheets are presented. The results indicate that (under the conditions used in this study) the maximum of velocity and strain-rate are reached to 250 m/s and 3800/s respectively.

**Keywords:** Sheet metal deformation, Electrohydraulic forming process, Numerical simulation, Smoothed Particle Hydrodynamics

### ۱-مقدمه

این تفاوت که به جای استفاده از مواد منفجره برای ایجاد موج شوک از انفجار الکتریکی استفاده می شود. در این فرایند، تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکترود (یا بیشتر) در یک محفظه پر از سیال موجب ایجاد کانال پلاسما بین آن ها می شود. انبساط این کانال پلاسما منجر به ایجاد موج شوک در سیال و شکل دهی ورق می شود. طرحواره فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

اولین مشاهدات از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، به گزارش لین در سال ۱۷۶۷ [۱] و پرستلی در سال ۱۷۶۹ [۲] مربوط می شود. اولین استفاده از این پدیده جهت شکل دهی فلزات در سال ۱۹۵۳ گزارش شده است [۳]. توسعه اولیه

مهم ترین مزایای شکل دهی ورق با سرعت بالا نسبت به روش های سنتی شامل افزایش شکل پذیری، توزیع یکنواخت تر کرنش، کاهش برگشت فنری، کاهش چروکیدگی و توانایی شکل دهی قطعات با اشکال پیچیده در یک مرحله می باشد. شکل دهی الکتروهیدرولیکی یکی از فرآیندهای منحصربه فرد شکل دهی با سرعت بالا است. 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 می شود. در واقع شکل دهی الکتروهیدرولیکی مشابه شکل دهی انفجاری است با

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

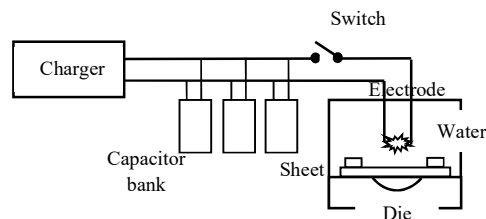
اتومبیل‌سازی فرد<sup>۵</sup> بررسی امکان ساخت قطعاتی از بدنه خودرو با استفاده از آلیاژهایی سبک‌تر و مستحکم‌تر از قبل (که به دلیل نداشتن خاصیت مغناطیسی مناسب امکان شکل‌دهی آن‌ها به روش الکترومغناطیسی وجود نداشت) بوده است. آن‌ها در پی یافتن علت افزایش شکل‌پذیری مواد، تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، به بررسی تغییر ساختار متالورژیکی ورق‌ها در اثر این فرایند پرداختند [۱۵]. با بررسی کرنش‌ها از دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی، افزایش تغییر شکل فاز فریت (۲۰ درصد) و فاز مارتنزیت (۱۰۰ درصد)، علت این امر تشخیص داده شد.

دسته دیگری از تحقیقات صورت گرفته، نحوه شبیه‌سازی این فرآیند را مورد توجه قرار داده‌اند. فرزین و منتظر القائم با طراحی و ساخت نمونه‌ی بسیار کوچکی از این دستگاه موفق به شکل‌دهی قطعات مینیاتوری شدند. آن‌ها در راستای شبیه‌سازی این فرایند به تأثیر اندازه المان و گام زمانی بر پرشدگی گوشه قالب توجه کردند [۱۶]. تبدیل انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در خازن به مقدار حساب‌شده‌ای از ماده منفجره و شبیه‌سازی شکل‌دهی انفجاری بجای شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، یکی از رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی تخلیه الکتریکی در آب است. حاجی علیزاده [۱۷] با استفاده از همین روش به شبیه‌سازی این فرایند پرداخته است. تعداد معدودی از محققین [۱۸] نیز با اعمال پالس شتاب، اثر تخلیه الکتریکی را اعمال کردند. آن‌چه در تمام این شبیه‌سازی‌ها مشترک است، استفاده از روش اجزاء محدود در آن‌ها می‌باشد.

روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۶</sup> (که برای شبیه‌سازی در این مقاله استفاده شده است) یکی از روش‌های قدیمی در میان روش‌های بدون المان است. این روش برای نخستین بار در شاخه دیگری از دانش (متفاوت با مکانیک) ارائه گردید. در سال ۱۹۷۷ میلادی در دو مقاله مجزا، این روش برای استفاده در حوزه کیهان‌شناسی، پیشنهاد گردید. نخستین مقاله توسط دو استاد بخش کیهان‌شناسی دانشگاه کمبریج به نام‌های گین‌گلد و موناکان [۱۹]، پیرامون تعریف روش هیدرودینامیک ذرات هموار و استفاده از آن در بررسی کنش و واکنش ستارگان بدون تقارن استوانه‌ای، ارائه گردید. مقاله دوم مجدداً از استاد همان بخش به نام لوسی، پیرامون تحلیل رفتار فرآیند گداخت هسته‌ای در ستارگان، است [۲۰]. گرچه روش هیدرودینامیک ذرات هموار در حوزه کیهان‌شناسی مطرح شد، اما در مدت دو دهه بعد به حوزه مکانیک وارد گردید. برخی از موارد استفاده از این روش در شبیه‌سازی فرایندهای گوناگون، شامل شبیه‌سازی پدیده انفجار [۲۱]، برش مواد [۲۲]، شکل‌دهی فلزات [۲۳]، جت سیال [۲۴]، جوشکاری [۲۵] و بسیاری موارد دیگر است.

جهت شناخت عمیق رفتار ورق فلزی طی هر فرآیند شکل‌دهی ضرورت دارد میزان جابجایی، سرعت، کرنش، نرخ کرنش و ... در نقاط مختلف آن مشخص شود. در همین راستا، در این پژوهش، سعی شده است با انجام یکسری آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، این مقادیر طی تغییرشکل ورق برنجی تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی تعیین گردد. در ابتدا، خیز و کرنش (ماندگار) نقاط مختلف ورق بطور

فرایند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین [۴] در روسیه به ثبت رسیده است. آزمایش‌های اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل‌دهی ورق‌ها به کارهای برونو در سال ۱۹۶۸ [۵]، داویس و آستین در سال ۱۹۷۰ [۶] و چاچین در سال ۱۹۷۸ [۷] برمی‌گردد.



شکل ۱- طرحواره شکل‌دهی ورق فلزی توسط فرایند الکتروهیدرولیکی

از فرایند الکتروهیدرولیکی علاوه بر شکل‌دهی ورق در شکل‌دهی لوله [۸]، برش‌کاری<sup>۱</sup>، لبه‌دار کردن<sup>۲</sup> [۹] و کالیبراسیون<sup>۳</sup> [۱۰] نیز استفاده شده است.

بخش قابل‌توجهی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، به بررسی میدان فشار حاصل از تخلیه الکتریکی و نحوه بهینه‌سازی آن پرداخته است. هاسب و همکارانش [۱۱] تلاش‌هایی در جهت کنترل توزیع فشار ایجاد شده توسط فرایند الکتروهیدرولیکی با روش متمرکز کردن موج، انجام دادند آن‌ها بررسی‌های خود را توسط منعکس‌کننده‌های بیضی‌شکل در شکل‌دهی بدون قالب ورق انجام دادند و به مقایسه شکل و ارتفاع ورق‌های تغییر شکل یافته پرداختند. نیازیف و ژونواتوک [۱۲] 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 روی ورق مؤثرند؛ لذا بر آن شدند تا تغییر فشار برحسب زمان را به دست آورند. در ادامه، نیازیف و ژونواتوک به همراه همکارانشان [۱۳] 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.

بررسی رفتار فلزات مختلف، تحت فرایند الکتروهیدرولیکی موضوع بخش دیگری از تحقیقات انجام شده است. گلوآشنکو و همکارانش [۱۴] با مقایسه تجربی بیشترین کرنش به‌دست‌آمده از فرایند الکتروهیدرولیکی با بیشترین کرنش به‌دست‌آمده از روش‌های سنتی<sup>۴</sup> 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 گلوآشنکو و همکارانش از انجام این تحقیق در پژوهشگاه

<sup>1</sup> Trimming

<sup>2</sup> Flanging

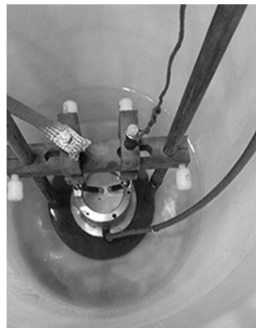
<sup>3</sup> Calibration

<sup>4</sup> LDH Test

<sup>5</sup> Ford Motor Company

<sup>6</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

(شکل ۳).



شکل ۳- سیستم الکتروفرم در محفظه آب

تجربی مشخص می‌گردد (که از این مقادیر به‌عنوان معیاری جهت صحت سنجی شبیه‌سازی عددی استفاده می‌گردد). در ادامه جهت به‌دست آوردن میزان سرعت و نرخ کرنش ورق (که پارامترهای تعیین‌کننده‌ای در شکل‌پذیری می‌باشند) با اتخاذ دو رویکرد متفاوت سعی در شبیه‌سازی عددی این فرایند با یک روش نوین می‌شود. در انتها با توجه به پیش‌بینی قابل‌قبول میزان خیز و کرنش ورق توسط شبیه‌سازی ارائه‌شده، میزان سرعت و نرخ کرنش نقاط مختلف ورق طی فرآیند تخمین زده می‌شود.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروفرم‌دهی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است. اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس، الکترودها و نگه‌دارنده آن‌ها، است. کنترل زمان و میزان شارژ خازن‌ها، همچنین رسم نمودارهای ولتاژ و جریان تخلیه الکتریکی از طریق سیستم کنترل میسر است. 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 ۲). در این تحقیق الکترودها از جنس مس (که با چندلایه عایق الکتریکی ولتاژ بالا پوشیده شده‌اند) می‌باشند. در اثر تخلیه‌های الکتریکی شدید، نوک الکتروفرم سریعاً دچار تخریب می‌شود. برای جلوگیری از اختلال در روند آزمایش‌ها؛ نوک الکتروفرم طوری طراحی شده است که به‌راحتی قابلیت تعویض داشته باشد. جهت رعایت ملاحظات عایق‌کاری، سیستم نگه‌دارنده الکترودها از فیبر استخوانی و پلی‌آمید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکترودها از هم و الکترودها از ورق، از طریق سیستم نگه‌دارنده امکان‌پذیر است.



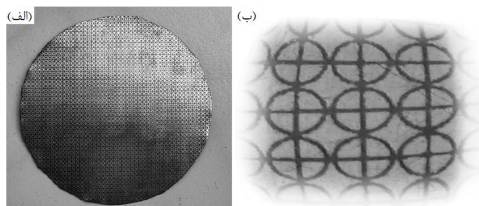
شکل ۲- تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروفرم‌دهی

### ۲-۲- اندازه‌گیری میزان تغییر شکل نهایی ورق

پس از انجام آزمایش‌ها، جهت تعیین دقیق‌تر تغییر شکل نهایی ورق‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>۲</sup> 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 بافاصله سی میلی‌متر از هر دو طرف خط مرکزی) و در دو جهت عمود بر هم، ارتفاع این نقاط از سطح مرجع محاسبه شد.

### ۲-۳- اندازه‌گیری کرنش‌ها

جهت اندازه‌گیری میزان کرنش ورق‌ها از روش تحلیل شبکه‌بندی<sup>۳</sup> استفاده گردید. بر اساس استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا<sup>۴</sup> الگویی با شبکه‌بندی دایروی به قطر ۲٫۵۴ میلی‌متر به روش الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌ها حکاکی شد. در طی فرایند شکل‌دهی، دایره‌ها به بیضی‌هایی با اندازه متفاوت تبدیل می‌شوند (شکل ۴). پس از انجام آزمایش، با اندازه‌گیری قطرهای کوچک و بزرگ بیضی‌ها و مقایسه آن‌ها با دایره‌های اولیه، کرنش‌های صفحه‌ای<sup>۵</sup> و کمینه<sup>۶</sup> محاسبه شدند (شکل ۵).



شکل ۴- شبکه دایروی روی ورق (الف) قبل و (ب) بعد از تغییر شکل

فرایند شکل‌دهی ورق در این پژوهش، در واقع، شکل‌دهی بدون قالب<sup>۱</sup> 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 موقع تغییر شکل با مقاومت هوای محبوس داخل استوانه، مواجه نشود

<sup>2</sup> Coordinate Measuring Machine (CMM)

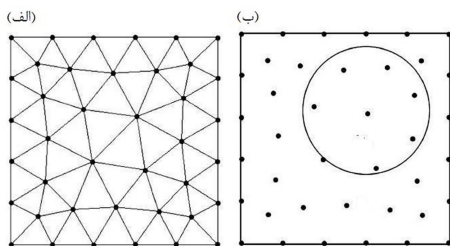
<sup>3</sup> Grid Analysis

<sup>4</sup> ASTM E2218

<sup>5</sup> Major Strain

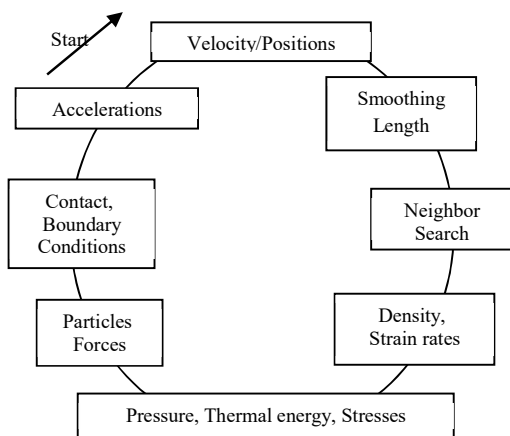
<sup>6</sup> Minor Strain

<sup>1</sup> Free Forming



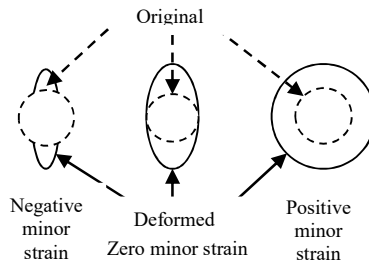
شکل ۶- نحوه گسسته سازی:  
(الف) اجزاء محدود (ب) بدون المان

تفاوت اصلی میان روش اجزاء محدود و بدون المان در ساختار تابع شکل<sup>۴</sup> است. در روش اجزاء محدود تابع شکل با استفاده از المان ساخته می‌شوند و برای المان‌ها یکسان از شکل واحدی برخوردار می‌باشند. در حقیقت اگر از دستگاه‌های مختصات طبیعی استفاده شود، تابع شکل در این دستگاه‌های مختصاتی برای المان‌هایی که از یک نوع باشند مشابه خواهند بود. معمولاً در روش اجزاء محدود، تابع شکل برای انواع مختلف المان، پیش از شروع تحلیل مشخص می‌باشند. در مقابل، در روش‌های بدون المان، تابع شکل معمولاً برای نقطه خاصی که مورد نظر است ساخته می‌شوند. با تغییر در موقعیت نقطه مورد نظر، تابع شکل مربوطه نیز تغییر می‌کند. در حقیقت ساخت تابع شکلی بدون المان به هنگام تحلیل صورت می‌پذیرد و نه قبل از آن. پس از به دست آمدن سیستم معادلات، روش بدون المان فرآیندی مشابه روش اجزاء محدود را دنبال می‌نماید [۲۶]. روند محاسبات عددی بر پایه روش هیدرودینامیک ذرات هموار در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا با مطابق شکل ۷ است.



شکل ۷- روند محاسبات در روش هیدرودینامیک ذرات هموار [۲۶]

از جمله قابلیت‌های منحصربه‌فرد نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا، امکان استفاده از دو روش بدون المان گلرکین<sup>۵</sup> و هیدرودینامیک ذرات هموار در کنار روش اجزاء محدود کلاسیک است. این بدین معناست که در یک مدل واحد می‌توان بخشی از آن را به روش اجزاء محدود و بخش دیگر را به



شکل ۵- شبکه دایروی اولیه و تغییر شکل یافته جهت اندازه‌گیری کرنش

### ۳- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا<sup>۱</sup> و اتخاذ دو رویکرد متفاوت در اعمال اثر تخلیه الکتریکی، فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی به کمک روش بدون المان هیدرودینامیک ذرات هموار شبیه‌سازی شده است. به دلیل تقارن هندسی و بارگذاری مدل، تنها یک‌چهارم آن، شبیه‌سازی شده است.

#### ۳-۱- روش هیدرودینامیک ذرات هموار

اخیراً بسیاری از محققین توجه خود را به روش‌های بدون المان معطوف داشته‌اند. علت این امر عمدتاً ناشی از این است که در این روش‌ها جهت جداسازی میدان مسئله نیازی به شبکه‌بندی المانی وجود ندارد و حل عددی کاملاً برحسب اطلاعات مجموعه‌ای از نقاط پراکنده قابل حصول است. روش‌های بدون المان در مقایسه با روش اجزاء محدود کلاسیک از مزایایی به شرح زیر برخوردارند:

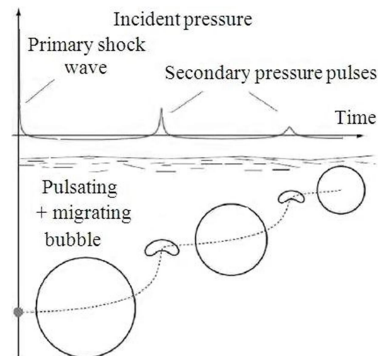
- ۱- برخورداری از نرخ‌های بالاتری از همگرایی.
  - ۲- توانایی مدل نمودن ناپیوستگی‌ها از طریق غنی‌سازی توابع پایه.
  - ۳- غیر حساس بودن به تغییر شکل در مسائلی با تغییر مکان‌های بزرگ.
- ووجه مشترک روش‌های بدون المان عبارت‌اند از:

- ۱- جهت گسسته سازی حوزه فیزیکی از ذرات و یا نقاط به‌جای المان‌ها استفاده می‌شود (شکل ۶).
- ۲- میانمایی‌ها بدون نیاز به اطلاعاتی که نحوه اتصال ذرات را بیان کنند ساخته می‌شوند.
- ۳- جهت به دست آوردن سیستم معادلات جبری روش‌های هم‌مکانی<sup>۲</sup> یا گلرکین<sup>۳</sup> به‌کاربرده می‌شود.

<sup>۴</sup> Shape Function  
<sup>۵</sup> Element Free Galerkin (EFG)

<sup>۱</sup> Ls Dyna  
<sup>۲</sup> Collocation Method  
<sup>۳</sup> Galerkin's Method

۴۱۸۳ کیلوژول به ازای یک کیلوگرم برای TNT) با انرژی ذخیره شده در بانک خازن، از سوی دیگر؛ اثر تخلیه الکتریکی با جرم معادل TNT جایگزین شده است.



شکل ۱۰- توالی رویدادها حباب انفجار در زیر آب [۲۹]

برای TNT از مدل مادی سوزش قوی ماده منفجره<sup>۱</sup> و معادله حالت جونز-ویکینز-لی<sup>۲</sup> (رابطه ۱) [۳۰] استفاده شده است (جدول ۱). در این رابطه P فشار، V نسبت چگالی ماده منفجره به محصولات احتراق و P<sub>cr</sub> فشار چاپمن-جوگت می باشد.

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) e^{R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) e^{R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

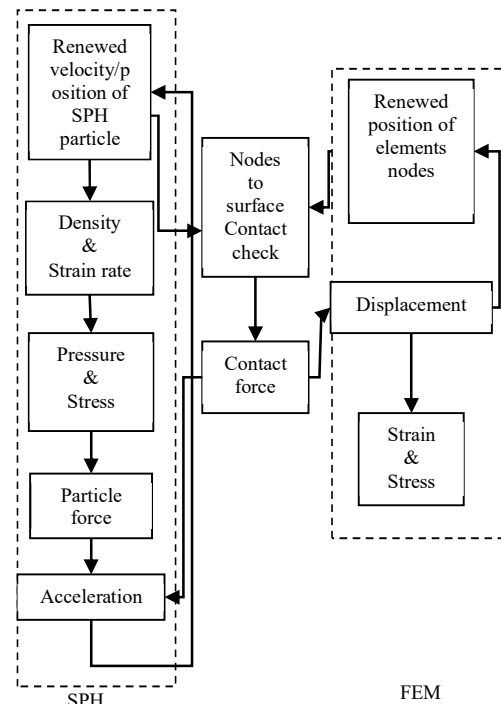
جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در مدل ماده و معادله حالت تیان تی [۳۰]

پارامتر	مقدار
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۶۳
سرعت انفجار v <sub>d</sub> (m/s)	۶۹۳۰
P <sub>cr</sub> (GPa)	۲۱
A (GPa)	۳۷۳/۷۷
B (GPa)	۳/۷۴۷
R <sub>1</sub>	۴/۱۵
R <sub>2</sub>	۰/۹
ω	۰/۳۵
V	۱
انرژی اولیه E <sub>0</sub> (KJ/M <sup>3</sup> )	۶e + ۶

در رویکرد دوم (که از این به بعد به اختصار SPH-Energy Leak نامیده می شود) با اندازه گیری مقادیر ولتاژ و جریان تخلیه در آزمایش های تجربی، میزان انرژی تزریق شده به کانال پلاسما محاسبه می گردد. توان الکتریکی تزریق شده به کانال پلاسما برابر است با:

<sup>1</sup> HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN  
<sup>2</sup> JONES\_WILKINS\_LEE

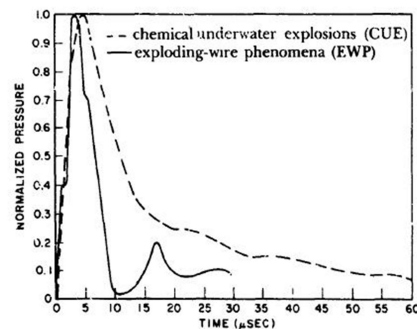
روش هیدرودینامیک ذرات هموار شبیه سازی نمود. نحوه کوپلینگ این دو روش در ال اس داینا در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸- کوپل روش های هیدرودینامیک ذرات هموار و اجزاء محدود [۲۷]

### ۲-۳- دو رویکرد متفاوت در اعمال اثر تخلیه الکتریکی

پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در سیال، از بسیاری جنبه ها مشابه یکدیگر هستند. مک گراس و همکارانش [۲۸] با انجام یک سری آزمایش نشان دادند نمودار فشار-زمان، حاصل از انفجار ماده منفجره و تخلیه الکتریکی در آب یکسان هستند (شکل ۹).



شکل ۹- تاریخچه فشار حاصل از انفجار تیان تی و تخلیه الکتریکی در آب [۲۸]

نحوه ایجاد موج شوک در اثر انفجار زیر آب در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در رویکرد اول (که از این به بعد به اختصار SPH-TNT نامیده می شود) با در نظر گرفتن تشابه پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در سیال، از یک سو، و مقایسه میزان انرژی آزاد شده توسط ماده منفجره

مجازی و تعریف شرایط تقارن توسط دستوری<sup>۴</sup> که به همین منظور در نرم‌افزار قرار داده شده است انجام می‌شود.

در این تحقیق از ورق برنجی ۲۶۰ به شکل دایره (به ترتیب با قطر و ضخامت ۱۱۰ و ۱ میلی‌متر) استفاده شده است. مدل توصیف‌کننده رفتار ورق، نقش بسزایی در کیفیت شبیه‌سازی دارد. ناهمسانگردی و نرخ کرنش، در رفتار ورق تحت فرایند شکل‌دهی الکترومکانیکی بسیار مؤثر هستند. در این تحقیق از ناهمسانگردی در مقابل نرخ کرنش صرف‌نظر شده است. ورق به روش المان محدود و به صورت پوسته<sup>۵</sup> با المان‌های مربعی (به طول ضلع تقریبی ۱/۳ میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. در نهایت برای توصیف رفتار ورق مدل جانسون-کوک<sup>۶</sup> (معادله ۵) [۳۳] در نظر گرفته شده است (جدول ۲). در این رابطه  $\sigma$  تنش و  $\epsilon$  کرنش پلاستیک مؤثر ماده است.  $\epsilon_0$  و  $T_0$  به ترتیب نرخ کرنش لحظه‌ای و نرخ کرنش مرجع هستند.  $T$  دمای لحظه‌ای ماده،  $T_0$  دمای اتاق و  $T_m$  دمای ذوب ماده است.

$$\sigma = \left[ A + B(\epsilon)^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدل برنج ۲۶۰ [۳۳]

پارامتر	مقدار
(MPa)A	۹۰
(MPa)B	۴۰۴
C	۰/۰۰۹
m	۱/۶۸
n	۰/۴۲
(°C) T <sub>0</sub>	۲۵
(S <sup>-1</sup> ) ε <sub>0</sub>	۰/۱

برای مدل‌سازی رفتار آب، از مدل ماده بلاثر و معادله حالت گرونینز<sup>۷</sup> (رابطه ۶) [۳۴] استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز جهت مدل کردن رفتار آب در جدول ۳ آورده شده است که در آن P فشار،  $\mu$  نسبت تراکم، C سرعت صوت و E انرژی داخلی است.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (6)$$

<sup>4</sup> BOUNDARY\_SPH\_SYMMETRY\_PLANE

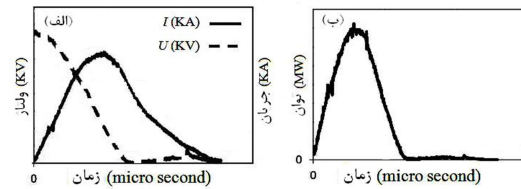
<sup>5</sup> SHELL

<sup>6</sup> JOHNSON\_COOK

<sup>7</sup> GRUNEISEN

$$N(t) = I(t) \cdot U(t) \quad (2)$$

که در آن  $I(t)$  و  $U(t)$  به ترتیب جریان و ولتاژ تخلیه اندازه‌گیری شده بین دو الکتروود است. نمودارهای  $I(t)$ ،  $U(t)$  و  $N(t)$  که از آزمایش به دست می‌آید، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمونه‌ای از نمودارهای به‌دست‌آمده برای (الف) جریان، ولتاژ (ب) توان الکتریکی

در این رویکرد کانال پلاسما به‌عنوان حباب گاز ایده‌آلی که منبسط می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. امکان استفاده از حباب گاز ایده‌آل برای مدل کردن رفتار کانال پلاسما در تحقیقات بسیاری اثبات شده است [۳۱]. انرژی الکتریکی محاسبه‌شده از (۲) به‌طور یکنواخت در کل حجم کانال پلاسما (که برابر حجم ماده منفجره در رویکرد اول است) وارد شده است. فشار هر یک از المان‌های کانال پلاسما با استفاده از معادله حالت (۳) (که در واقع تعادل انرژی برای گاز ایده‌آل در حال انبساط آدیاباتیک است) محاسبه می‌شود.

$$P_{ch} = (\gamma - 1) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) E \quad (3)$$

که در آن  $P_{ch}$  فشار،  $\rho$  چگالی جرمی لحظه‌ای،  $\rho_0$  چگالی جرمی اولیه و  $E$  انرژی تولیدشده در گاز درون کانال است.  $\gamma$  شاخص آدیاباتیک پلاسما است که برابر ۱/۲۶ است [۳۲]. برای کانال پلاسما از ماده بلاثر<sup>۱</sup> و معادله حالت خطی چندجمله‌ای همراه نشت انرژی<sup>۲</sup> (رابطه ۴) [۳۷] استفاده شده است.

$$P_{ch} = C_0 + C_1 \mu^2 + C_2 \mu^3 + C_3 \mu + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E' \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

$C_0$  الی  $C_6$  ضریب‌های ثابتی هستند که با انجام یک محاسبه ساده می‌توانند طوری تعیین شوند که رابطه (۳) را به (۴) تبدیل کند.

### ۳-۳- مشخصات مدل

مشخصات هندسی مورد استفاده در شبیه‌سازی، دقیقاً مطابق آزمایش‌های تجربی در نظر گرفته شده است. تعریف صفحات تقارن در روش هیدرودینامیک ذرات هموار به‌سادگی روش اجزاء محدود نیست. بهترین راهکار برای این کار عبارت است از ایجاد یکسری ذرات در نزدیکی مرز (که در واقع تصویر ذرات واقعی می‌باشند). ایجاد ذرات

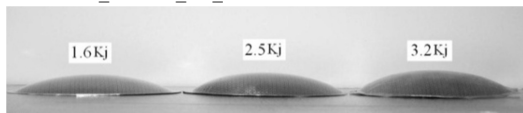
<sup>1</sup> NULL

<sup>2</sup> LINEAR\_POLYNOMIAL\_WITH\_ENERGY\_LEAK

<sup>3</sup> Ghost Particles

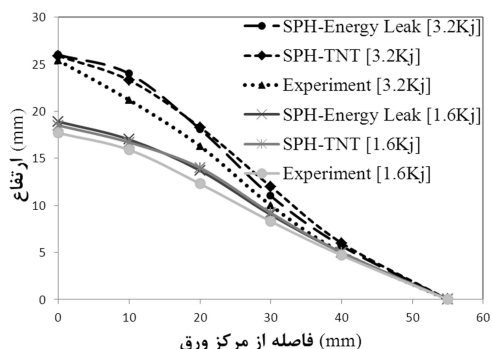
میلی‌متر و فاصله الکترودها از هم ۱۵ میلی‌متر) است مگر تغییر در آن ذکر شده باشد.

<sup>1</sup> CONTACT\_NODES\_TO\_SURFACE



شکل ۱۳- نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکتروهیدرولیکی

در شکل ۱۴ میزان تغییر شکل نهائی در شعاع‌های مختلف ورق نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج آزمایش‌های تجربی انطباق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی (هر دو رویکرد) دارد؛ هرچند تقریباً در اکثر موارد تغییر شکل حاصل از آزمایش‌های تجربی در مقایسه با شبیه‌سازی عددی، کمتر است. دلیل این امر عمدتاً به این خاطر است که کل انرژی ذخیره شده در خازن، بین دو الکتروده تخلیه نمی‌شود و مقداری از آن تا قبل از رسیدن به الکترودها هدر می‌رود. با افزایش مقدار انرژی تخلیه (از ۱٫۶ به ۳٫۲ کیلوژول)، ارتفاع تغییر شکل ورق نیز افزایش می‌یابد.



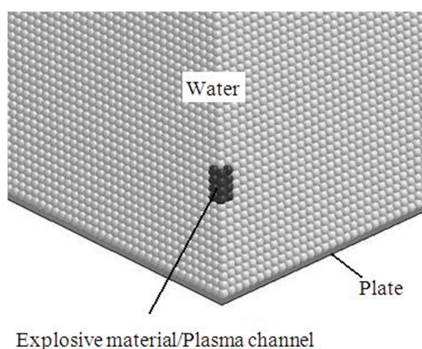
شکل ۱۴- ارتفاع نهائی ورق در شعاع‌های مختلف از مرکز ورق

در شکل ۱۵ جابجایی مرکز ورق بر حسب زمان نمایش داده است. در اکثر موارد، نتایج حاصل از رویکرد دوم کمی بیشتر از رویکرد اول است. علت این اختلاف ناچیز را می‌توان ناشی از تزریق تدریجی انرژی (در طول زمان) در روش دوم و وابستگی شاخص آدیاباتیک پلاسما (استفاده شده در معادله حالت کانال) به شرایط آزمایش دانست. شکل ۱۶ نحوه تغییر شکل ورق در طول فرایند را نمایش می‌دهند. پیش‌بینی کرنش‌های صفحه‌ای بیشینه (که در واقع کرنش شعاعی ورق است) و کمینه (که در واقع کرنش محیطی ورق است) حاصل از شبیه‌سازی (با هر دو رویکرد)، انطباق خوبی با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل شبکه‌بندی دارد. به‌عنوان نمونه نتایج حاصل برای حالت پایه در شکل ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در ماده و معادله حالت آب [۲۴]

پارامتر	مقدار
چگالی اولیه $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۰۰۰
سرعت صوت C (m/s)	۱۴۸۰
ضریب گرونیزن $\gamma_0$	۰٫۵
ضریب تصحیح حجم a	۰
ضریب ثابت $S_1$	۲/۵۶
ضریب ثابت $S_2$	۱/۹۸۶
ضریب ثابت $S_3$	۱/۲۲۸۶

برای انتقال موج شوک از آب به ورق (کوپل ذرات SPH آب و المان‌های ورق) از نوع خاصی از قیود<sup>۱۱</sup> که در ال‌اس‌داینما به همین منظور تعبیه شده است استفاده گردید. همچنین تماس ماده منفجره و آب که هر دو از نوع ذرات SPH هستند به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار انجام می‌شود. لبه‌های ورق، مطابق شرایط آزمایش تجربی کاملاً کلمپ شد. مدل ایجاد شده در شکل ۱۲ ارائه شده است.



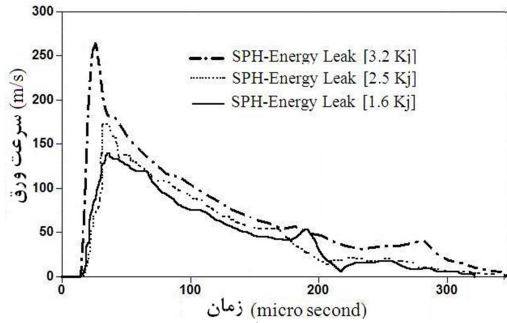
شکل ۱۲- مدل هیدرودینامیک ذرات هموار

عوامل متعددی (از جمله تعداد ذرات و پارامترهای موجود که در دستورات مختلف ال‌اس‌داینما استفاده می‌شوند) بر نتیجه شبیه‌سازی مؤثرند. با در نظر گرفتن نتیجه سه آزمون تجربی و انجام شبیه‌سازی-های مقدماتی (با تعداد ذرات متفاوت و پارامترهای تنظیمی مختلف)، سعی در انتخاب بهترین تعداد ذرات و پارامترهای مؤثر، شد. پس‌از آن در دیگر شبیه‌سازی‌ها از همان تعداد ذرات و پارامترها استفاده گردید.

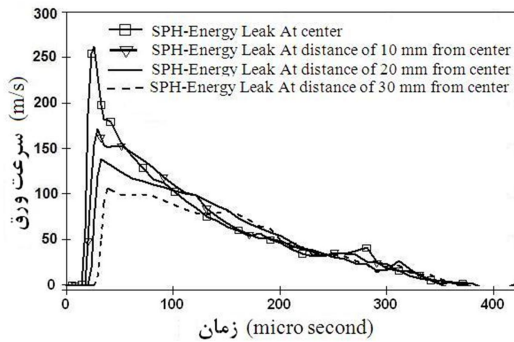
#### ۴- نتایج و بحث

چند نمونه از ورق‌هایی که تحت فرایند الکتروهیدرولیکی (در این پژوهش) تغییر شکل یافته‌اند در شکل ۱۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در این بخش مربوط به حالت پایه (انرژی ذخیره شده ۳٫۲ کیلوژول در خازن‌ها، فاصله الکتروده از ورق ۳۰

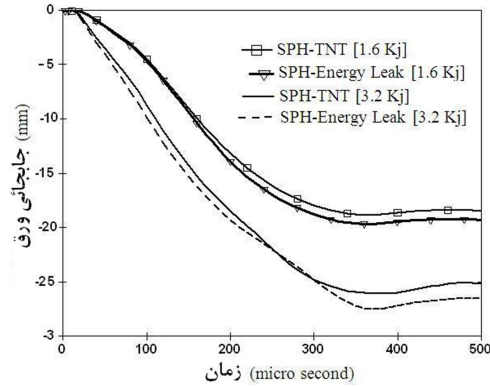
<sup>1</sup> CONTACT\_NODES\_TO\_SURFACE



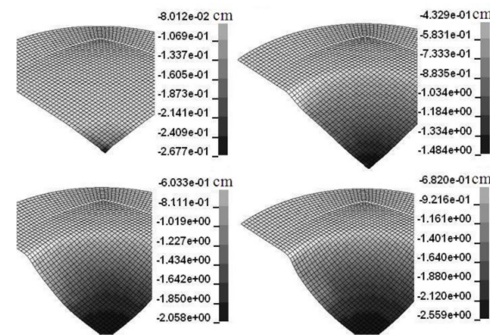
شکل ۱۸- سرعت در رأس گنبد (در جهت Z)



شکل ۱۹- سرعت در شعاع‌های مختلف از مرکز ورق (در جهت Z)



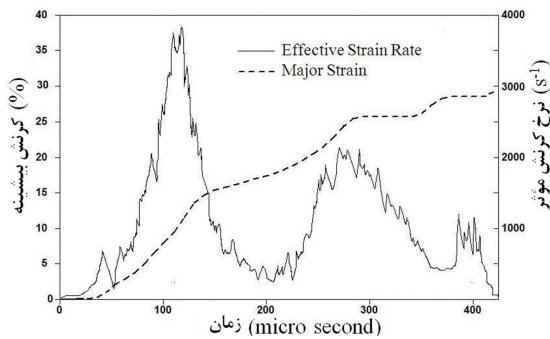
شکل ۱۵- تغییر مکان گره در مرکز ورق



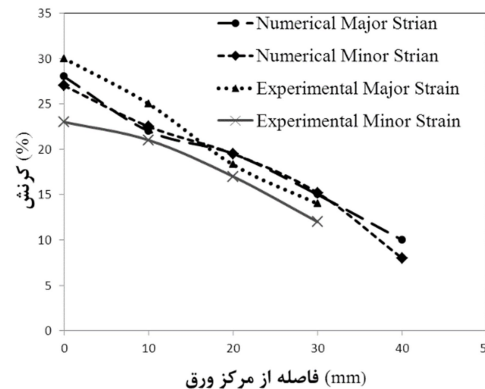
شکل ۱۶- تغییر شکل ورق طی فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

نرخ کرنش ورق تحت فرایند الکتروهیدرولیکی (که یکی از عوامل اصلی افزایش شکل‌پذیری ورق است) افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های سنتی نشان می‌دهد (شکل ۲۰). بسته به میزان انرژی ورودی (از ۱/۶ به ۳/۲ کیلوژول) نرخ کرنش‌هایی در محدوده ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ بر ثانیه به‌دست آمده است.

در شکل ۲۱ فشار حاصل از دو رویکرد در اعمال اثر تخلیه الکتریکی (در نزدیکی سطح ورق) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل و بیشینه فشار تطابق خوبی با نمودارها و روابط گزارش‌شده برای موج شوک در منابع معتبر دارد [۳۵].



شکل ۲۰- تاریخچه کرنش اصلی و نرخ کرنش مؤثر



شکل ۱۷- نتایج تجربی و عددی کرنش‌ها اصلی و فرعی

از شبیه‌سازی عددی (که انطباق خوبی با نتایج تجربی در پیش‌بینی میزان تغییر مکان نقاط مختلف ورق و کرنش‌های اصلی و فرعی نشان داده است) جهت پیش‌بینی سرعت و نرخ کرنش ورق استفاده شده است. سرعت بالای تغییر شکل ورق تحت فرایند الکتروهیدرولیکی در مقایسه با روش‌های سنتی، به‌خوبی، در شکل ۱۸ قابل‌مشاهده است (به دلیل شباهت نمودار سرعت در هر دو رویکرد تنها یکی از آن‌ها نشان داده شده است). مقایسه سرعت نقاط مختلف ورق نشان می‌دهد بیشترین سرعت در مرکز ورق اتفاق می‌افتد (شکل ۱۹).



۶-مراجع

[1] Lane T., Description of an Electrometer Invented by Mr. Lane; with an Account of Some Experiments Made by Him with It: In a Letter to Benjamin Franklin, LL. DFRS, *Philosophical Transactions*, Vol. 57, pp. 451-460, 1767.

[2] Priestley J., Experiments on the Lateral Force of Electrical Explosions. By Joseph Priestley, L LDFRS, *Philosophical Transactions*, Vol. 59, pp. 57-62, 1769.

[3] 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.

[4] Yutkin L., *Electrohydraulic Effect*, Mashgiz, Moscow, 1955.

[5] Bruno E., *High-velocity forming of metals*: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.

[6] Davies R., Austin E. R., *Developments in high speed metal forming*: Industrial Press, 1970.

[7] Chachin V., *Electrohydraulic treatment of structural materials*, Minsk, Nauka i Technika, 1978.

[8] Kenneth F. S., *Forming method and apparatus*, US Patent No. 3394569, 1968.

[9] Golovashchenko S. F., *Electrohydraulic trimming, flanging, and hemming of blanks*, US Patent No. 7810366, 2010.

[10] Golovashchenko S. F., *Pulsed electro-hydraulic calibration of stamped panels*, US Patent No. 7827838, 2010.

[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] 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.

[13] Knyazyev M., Perez I., San José J., Zhovnovatyuk 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.

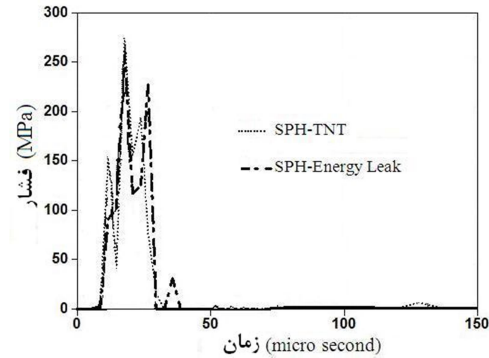
[14] Golovashchenko S. F., Gillard A. J., Mamutov A. V., Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 7, pp. 1191-1212, 2013.

[15] 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.

[16] Farzin M., Montazerolghaem H., Manufacture of thin miniature parts using electro hydraulic forming and viscous pressure forming methods, *Archives of metallurgy and materials*, Vol. 54, No. 2, pp. 535-547, 2009.

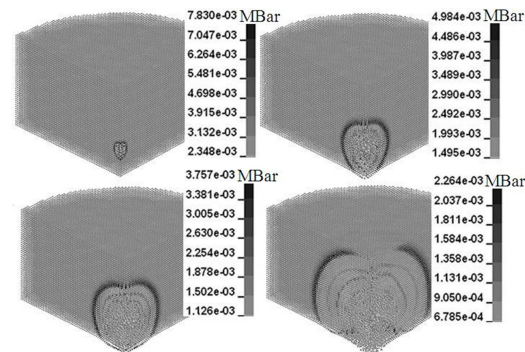
[17] Hajjalizadeh F., Mashhadi M. M., Investigation and numerical analysis of impulsive hydroforming of aluminum 6061-T6 tube, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 257-273, 2015.

[۱۸] فضلی ع. و حسینی س. م، بررسی اثر موقعیت الکترودها بر روی شکل‌پذیری و توزیع ضخامت ورق‌های فلزی در روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک آزاد، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس*، د. ۱۵، ش. ۱۱، ص ۳۱۸-۳۱۱، ۱۳۹۴.



شکل ۲۱- تاریخچه فشار موج شوک روی سطح ورق

چگونگی انتشار موج شوک حاصل از انفجار تی‌ان‌تی در آب در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۲- نحوه انتشار موج شوک در زمان‌های مختلف (رویکرد اول)

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییر شکل ورق برنجی تحت فرآیند الکتروهیدرولیکی به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. بر طبق مشاهدات تجربی (به دلیل تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی دستگاه) تکرارپذیری این فرآیند بسیار پائین است. استفاده از یک سیم نازک بین دو الکترود منجر به بهبود فرآیند تخلیه الکتریکی می‌شود و تأخیر زمانی (زمان بین اتصال مدار و تخلیه) را کاهش می‌دهد. استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (به دلیل ماهیت بدون المانی) بجای روش اجزاء محدود کلاسیک، هرچند منجر به افزایش زمان حل می‌شود ولی نتایج بهتر و واقعی‌تری در پی دارد. همچنین اعمال اثر تخلیه الکتریکی به صورت جرم معادل تی‌ان‌تی و نشت انرژی (بجای اعمال فشار، اعمال شتاب حجمی و سایر روش‌های دیگر محققین) منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر خیز و کرنش‌ها می‌شود. محاسبه سرعت و نرخ کرنش ورق (که عوامل مؤثری در توجیه افزایش شکل‌پذیری ورق می‌باشند) با استفاده از شبیه‌سازی عددی (که پیش‌بینی‌های دقیقی در مورد خیز و کرنش ورق داشت) حاکی از این است که سرعت (بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه) و نرخ کرنش (بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ بر ثانیه) ورق تحت فرآیند الکتروهیدرولیکی اختلاف چشمگیری در مقایسه با روش‌های سنتی دارد.

- [19] Gingold R. A., Monaghan J. J., Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly notices of the royal astronomical society*, Vol. 181, No. 3, pp. 375-389, 1977.
- [20] Lucy L. B., A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *The astronomical journal*, Vol. 82, pp. 1013-1024, 1977.
- [21] Liu M., Liu G., Lam K., Zong Z., Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion, *Computational Mechanics*, Vol. 30, No. 2, pp. 106-118, 2003.
- [22] Limido J., Espinosa C., Salaün M., Lacombe J. L., SPH method applied to high speed cutting modelling, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 49, No. 7, pp. 898-908, 2007.
- [23] Cleary P., Prakash M., Ha J., Novel applications of smoothed particle hydrodynamics (SPH) in metal forming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 41-48, 2006.
- [24] Shahverdi H., Zohoor M., Mousavi S. M., Numerical simulation of abrasive water jet cutting process using the SPH and ALE methods, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 43, 2011.
- [25] Bhojwani S., *Smoothed particle hydrodynamics modeling of the friction stir welding process*: ProQuest, 2007.
- [26] Liu, G. R., Liu, M. B., *Smoothed particle hydrodynamics - a meshfree particle method*. World Scientific Publishing, Singapore, 2003.
- [27] Hallquist J. O., LS-DYNA theory manual, *Livermore software Technology corporation*, Vol. 3, pp. 25-31, 2006.
- [28] McGrath J. R., Scaling underwater exploding wires, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 12, pp. 4439-4443, 1966.
- [29] Cole R. H., Weller R., Underwater explosions, *Physics Today*, Vol. 1, pp. 35, 1948.
- [30] Dobratz BM. LLNL explosive handbook. UCRL-52997. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory; 1981.
- [31] Kaklyugin A., Norman G., *Electrical conductivity of a non-Debye plasma*, Institute of High Temperatures, Academy of Sciences of the USSR, 1973.
- [32] Naugolnykh K. A., Røi N., *Electrical discharges in water. A hydrodynamic description*, DTIC Document, 1974.
- [33] Jin, X., Altintas, Y., Slip-line field model of micro-cutting process with roundtool edge effect. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp.339-355, 2011.
- [34] Steinberg DJ. Spherical explosions and the equation of state of water. Report UCID-20974, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA; 1987.
- [35] Bjørnø L., Levin P., Underwater explosion research using small amounts of chemical explosives, *Ultrasonics*, Vol. 14, No. 6, pp. 263-267, 1976.