



## Effect of Tool Geometry on the Tensile Strength of Clinched Joint and Tool Optimization Using Orthogonal Experimental Design Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Alavinejad S.A.<sup>1</sup> BSc,  
Ghaderi S.H.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Alavinejad S.A, Ghaderi S.H. Effect of Tool Geometry on the Tensile Strength of Clinched Joint and Tool Optimization Using Orthogonal Experimental Design Method. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1235-1243.

### ABSTRACT

Sheet metal clinching process is a forming-based method for joining sheet metal parts. To ensure sufficient joint strength, it is necessary to design the forming tool optimally. This paper deals with numerical and experimental study of the clinching process of steel sheets of dissimilar thicknesses using a fixed die in order to optimize the geometric parameters of the clinching tool. In this study, using the orthogonal experimental design (OED) method and finite element analysis in Abaqus software, the important input parameters of tool design including punch radius RP, die cavity depth Pm, die groove width Lm and punch face angle PBA were optimized in order to achieve the highest clinch strength F as the target variable. The upper and lower sheets used in this study are 1.5 and 2 mm in thickness, respectively, and made of DX51D galvanized steel, manufactured according to EN10346/00 by Mobarakeh Steel Company. After running the experiments designed based on the OED in the computer, the optimal values of RP= 2.6mm, Pm= 1.4mm, Lm= 1.2mm and PBA= 1° and F= 2319N were obtained. Next, a clinched joint tool was designed and fabricated based on the optimum geometric parameters. The evaluation and comparison of clinch geometry and tensile strength obtained from optimum design simulation and the experimental counterparts demonstrated very close correlations.

**Keywords** Sheet Metal Clinching; Orthogonal Experimental Design (OED) Method; Optimization; Finite Element Analysis; Joint Strength

<sup>1</sup>Mechanical & Mechatronics Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical & Mechatronics Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Postal Code 3619995161  
Phone: +98 (23) 32300240  
Fax: -  
s.h.ghaderi@shahroodut.ac.ir

#### Article History

Received: July 02, 2019  
Accepted: October 22, 2019  
ePublished: May 09, 2020

### CITATION LINKS

[1] Joining of Aluminium alloy and mild steel sheets using mechanical clinching [2] Joining of hot-dip coated steel sheets by mechanical clinching [3] Ensuring the integrity in clinching process [4] Clinching process for joining dissimilar materials: State of the art [5] Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies [6] Failure mode dependent load bearing characteristics of mechanical clinching under mixed mode loading condition [7] Kriging metamodel global optimization of clinching joining processes accounting for ductile damage [8] Rigid-plastic and elastic-plastic finite element analysis on the clinching joint process of thin metal sheets [9] Finite Element Analysis of Mechanical Clinching Process [10] The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint [11] Optimization of geometrical design of clinching tools in clinching process with extensible dies [12] Experimental investigation of clinch joining process [13] Optimization of the clinching tools by means of integrated FE modeling and artificial intelligence techniques [14] Multi objective optimization of clinching joints quality using Grey-based Taguchi method [15] On a reshaping method of clinched joints to reduce the protrusion height [16] Optimization of geometrical design of clinching tools in flat-clinching [17] Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting [18] Numerical and experimental investigations of extensible die clinching [19] Mechanical clinching of ultra-high strength steel sheets and strength of joints [20] Finite element modeling of clinching process for joining dissimilar materials

## مطالعه اثر هندسه ابزار بر استحکام کششی اتصال سرد و بهینه‌سازی ابزار به روش طراحی آزمایش متعامد

سیداحمد علوی نژاد BSc

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

سیدهادی قادری\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

اتصال سرد ورق فلزی، روشی مبتنی بر شکل‌دهی برای همبندی قطعات ورقی است. برای اطمینان از یک اتصال با استحکام کافی لازم است ابزار شکل‌دهی به صورت بهینه طراحی شود. این مقاله به مطالعه عددی و تجربی فرآیند اتصال سرد ورق‌های فولادی با ضخامت ناهمسان با قالب ثابت به منظور بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد می‌پردازد. در این مطالعه با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد (OED) و تحلیل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس، شعاع سنبله  $R_p$ ، عمق حفره قالب  $P_m$ ، عرض شیار کف قالب  $L_m$  و زاویه کف سنبله  $P_{BA}$ ، به عنوان پارامترهای ورودی مهم طراحی ابزار برای رسیدن به بیشترین استحکام کششی  $F$  اتصال سرد، به عنوان متغیر هدف، بهینه‌سازی شد. ورق‌های بالایی و پایینی به کار رفته در این تحقیق به ترتیب، به ضخامت  $1/5$  و  $2$  mm از جنس فولاد گالوانیزه DX51D است که براساس استاندارد EN10346/00 توسط شرکت فولاد مبارکه تولید می‌شود. پس از اجرای رایانه‌ای آزمایش‌های طراحی شده با OED، مقادیر  $R_p=2/6$  mm،  $P_m=1/4$  mm،  $P_{BA}=1^\circ$ ،  $L_m=1/2$  mm و  $F=2319$  N به عنوان مقادیر بهینه به دست آمد. پس از بهینه‌سازی هندسه ابزار براساس نتایج آزمایش‌های المان محدود، طراحی و ساخت ابزار اتصال سرد انجام گرفت. ارزیابی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی اتصال سرد برای طراحی ابزار بهینه، با نتایج تجربی به دست آمده برای هندسه اتصال استحکام کششی آن انطباق بسیار نزدیکی را نشان داد.

**کلیدواژه‌ها:** اتصال سرد ورق فلزی، روش طراحی آزمایش متعامد (OED)، بهینه‌سازی، تحلیل المان محدود، استحکام اتصال

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۳۰

\*نویسنده مسئول: s.h.gaderi@shahroodut.ac.ir

### ۱- مقدمه

در فرآیند اتصال سرد ورق‌های فلزی، به کمک سنبله و قالب، دو ورق در داخل یکدیگر نفوذ کرده و در اثر قفل‌شدگی، یک اتصال مکانیکی تشکیل می‌شود [1]. آبه و همکاران [2] با مطالعه اتصال‌پذیری ورق‌های فولادی گرم پوشش‌شده، با استفاده از فرآیند اتصال سرد نشان دادند که این روش می‌تواند برای اتصال سرد ورق‌های گالوانیزه استفاده شود. اتصال سرد قطعات فلزی براساس تغییر شکل موضعی فلز و بدون نیاز به اجزایی مانند چسب، پرچ و یا پیچ است. این روش برای اتصال دو یا چند ورق با ضخامت‌ها و یا جنس‌های مختلف کاربرد دارد. نیروی لازم برای شکل‌دهی

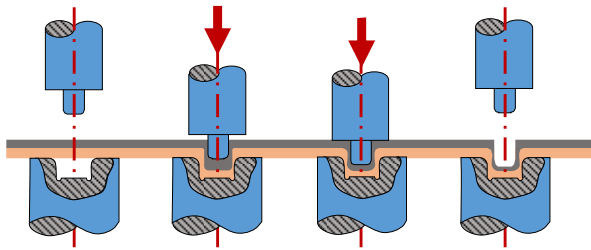
اتصال، به خواص مواد و ابعاد ابزار وابسته است. یکی از جنبه‌های متمایزکننده این فرآیند با روش جوش مقاومتی، تولیدنشدن گرما در ناحیه اتصال است [3]. شکل ۱ اصول فرآیند اتصال سرد را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر استفاده از اتصال سرد به‌عنوان اتصال جایگزین جوش نقطه‌ای افزایش قابل توجهی داشته و پژوهش‌هایی برای افزایش استحکام این نوع اتصال صورت پذیرفته است. با توجه به ماهیت این اتصال به‌عنوان محصول یک شکل‌دهی سرد، هندسه قالب و سنبله در ایجاد شکل نهایی این اتصال و همچنین کیفیت و استحکام آن نقش اساسی ایفا می‌کند. عواملی مانند قفل‌شدگی بین دو ورق، ضخامت ورق بالایی و پایینی، کاهش ضخامت ورق‌ها در قسمت کف فنجان‌ی اتصال، بر کیفیت اتصال سرد تاثیر دارد. این عوامل خود، تحت تاثیر پارامترهای هندسه ابزار مانند شکل قالب و سنبله قرار می‌گیرند [4]. پارامترهای هندسی اصلی ابزار، مانند شعاع  $R_m$  و عمق حفره قالب، عرض شیار کف قالب  $L_m$ ، شعاع سنبله  $R_p$ ، و زاویه کف سنبله  $P_{BA}$  و پارامترهای هندسی اتصال شامل تورفتگی  $t_s$  (Undercut) ورق بالایی در ورق پایینی، ضخامت گلوبی  $t_n$  و نیز ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال  $X$  است [5-8].

روش تحلیل المان محدود، می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان فلز در فرآیند اتصال سرد به کار رود و نتایجی نزدیک مشاهدات آزمون تجربی تولید نماید [11]. موج [10] با تحلیل المان محدود و روش تجربی اتصال سرد ورق‌های استحکام بالا H320LA، اثر پارامترهای قالب شامل شعاع قالب  $R_m$ ، عمق قالب  $P_m$  و عرض شیار کف قالب  $L_m$  را در فرآیند اتصال سرد مطالعه نموده، نشان داد که عرض شیار کف قالب  $L_m$ ، بیشترین تاثیر را در اندازه تورفتگی و نیروی لازم بیشینه برای شکل‌دهی اتصال سرد، دارد. راکس و بوچارد [7]، با مطالعه عددی فرآیند اتصال سرد و تحلیل حساسیت پارامترهای ابزار و هندسه اتصال سرد و فرآیند، با استفاده از الگوریتم EGO (Efficient Global Optimization) با استفاده از قالب ثابت، نشان دادند که پارامتر شعاع سنبله  $R_p$ ، بیشترین و پارامتر شعاع گوشه سنبله، کمترین تاثیر را در استحکام اتصال سرد، دارد.

استحکام مکانیکی اتصال  $F$ ، به میزان زیادی به هندسه مقطع اتصال تولیدشده، به‌ویژه ضخامت تورفتگی  $t_s$  و گلوبی  $t_n$  وابسته است. استحکام اتصال در بارگذاری کششی و برشی قابل اندازه‌گیری است. معمولاً استحکام کششی اتصال کمتر از استحکام برشی است [11]. بنابراین آزمون تجربی جدایش در کشش، یک روش مستقیم برای اندازه‌گیری استحکام اتصال در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعدد پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند، دستیابی به یک طراحی بهینه ابزار به روش تجربی، نیازمند ساخت ابزارهای متعدد و انجام آزمون‌های زیادی است، که این امر موجب صرف هزینه و زمان قابل توجهی است. با تحلیل المان محدود فرآیند شکل‌دهی اتصال و بارگذاری اتصال حاصل، می‌توان جریان فلز

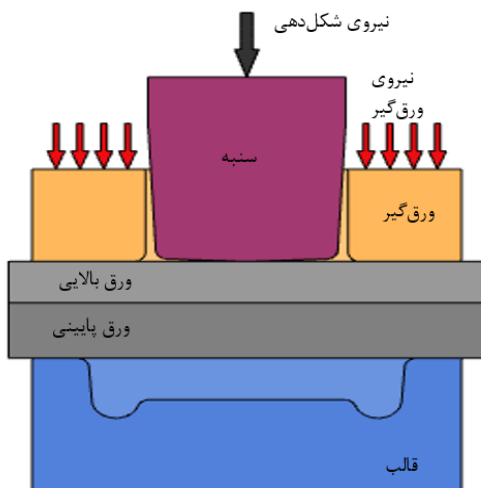
مکانیکی اتصال  $F_c$ ، بهینه‌سازی شد. ابزار براساس طراحی بهینه به‌دست‌آمده، ساخته‌شده، نمونه اتصال تجربی بین دو ورق انجام و نتایج عددی و تجربی با هم مقایسه شد.



شکل ۱) اصول فرآیند اتصال سرد

## ۲- مدل‌سازی المان محدود

در این مقاله از ابزار تحلیل پارامتریک نرم‌افزار آباکوس (نسخه ۶/۱۴) و حل‌گر دینامیک/صریح آن برای تحلیل فرآیند ایجاد اتصال و آزمون جدایش آن استفاده شده است. اجزای مدل، متقارن محوری مطابق شکل ۲، شامل سنبه، ورق‌گیر، قالب، ورق بالایی و ورق پایینی است. ورق‌ها به‌صورت جسم تغییر شکل‌پذیر و سایر اجزا از نوع صلب تحلیلی در نظر گرفته شد. گسسته‌سازی ورق‌ها با استفاده از المان‌های پیوسته متقارن محوری خطی CAX4R به ابعاد  $0.1 \times 0.05$  میلی‌متر انجام شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق فولادی گالوانیزه مورد استفاده در این مقاله مطابق جدول ۱ است.



شکل ۲) اجزای مدل متقارن محوری برای تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت

حین شکل‌دهی، هندسه اتصال و استحکام آن را پیش‌بینی نمود[4]. با طراحی و انجام آزمون‌های رایانه‌ای می‌توان از هزینه و زمان سعی و خطا کم کرد و به طراحی بهینه ابزار دست یافت[5]. بالاوندر[12] با مطالعه تجربی اتصال سرد ورق‌هایی از جنس مس و فولاد کششی به ضخامت امیلی‌متر نشان داد که بیشترین استحکام اتصال سرد، با استفاده از قالب فنجان‌شکل دارای شیار کف در مقایسه با قالب فنجان‌شکل بدون شیار، حاصل می‌شود. او با مطالعه تجربی و استفاده از روانکارهای مختلف بین سطوح در تماس بین ورق‌ها نشان داد که استفاده از روانکار گرافیتی، تاثیر بسیار کمی در استحکام برشی اتصال داشته، استفاده از فیلم نازک و یا ضخیم از جنس PTFE حتی باعث کاهش استحکام برشی اتصال سرد نیز می‌شود.

مطالعه و بررسی نتایج روش‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از این روش‌ها، سبب افزایش استحکام اتصال از طریق بهینه‌سازی هندسه ابزار شکل‌دهی می‌شود[5]. لامیاس و ایلویو[13] روش شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی رفتار اتصال سرد مورد استفاده قرار دادند. روش شبکه عصبی مصنوعی نیاز به آزمون و خطای نتایج شبیه‌سازی عددی شامل طراحی آزمایش متعامد، داشت. اشتایه و هریری[14] از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی هندسه ابزار اتصال سرد با قالب ثابت استفاده کردند. ون و همکاران[15] بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد را با استفاده از استحکام کششی اتصال به‌عنوان متغیر هدف، مطالعه نموده، نشان دادند که روش طراحی آزمایش متعامد یک روش ساده و قابل اعتماد برای بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد است. هان و همکاران[16] از طریق یکپارچه‌سازی روش طراحی آزمایش متعامد و شبیه‌سازی رایانه‌ای، بهینه‌سازی پارامترهای ابزار اتصال سرد با قالب تخت را بررسی و نشان دادند که به کارگیری این روش به میزان زیادی هزینه و زمان مدل‌سازی را کاهش می‌دهد. هزینه پایین اجرای اتصال سرد مکانیکی و استحکام خستگی یکسان، در مقایسه با جوش نقطه‌ای، باعث کاربرد بیشتر آن در اتصال قطعات بدنه خودرو شده است[17]. در تحقیق حاضر، ابتدا فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت برای ورق فولادی گالوانیزه با ضخامت‌های غیرهمسان مورد استفاده در صنعت خودروسازی به روش المان محدود، مورد مطالعه قرار گرفت. در این کاربرد ویژه مورد نظر، طبق استاندارد پذیرش خودروساز، حداقل استحکام کششی در راستای محور اتصال برابر ۱ است. با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد و تحلیل پارامتری در نرم‌افزار آباکوس، متغیرهای طراحی هندسی ابزار، برای رسیدن به بیشترین استحکام

جدول ۱) ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق فولادی گالوانیزه DX51D

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	ترکیب شیمیایی (%wt.)						
			Fe	C	Si	Mn	P	S	Al
۷۸۵۰	۰/۳	۲۱۰	Balance	۰/۰۳۸۲	۰/۰۱۱	۰/۲۳۶۵	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۴۲	۰/۰۵۸۸

ماتریس جرم قطری،  $F$  بردار نیروی خارجی و  $I$  بردار نیروی داخلی در نمو  $n$  است. با داشتن  $\ddot{u}$  از نمو  $n$ ، و انتگرال گیری با استفاده از روش تفاضل مرکزی می توان بردار جابجایی  $u$  را در نمو  $n+1$ ، مطابق رابطه (۳) بروز کرد.

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t_{n+1} \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \ddot{u}_n \quad (4)$$

در روند دینامیکی صریح، نیازی به محاسبه مدول مماسی نیست. در مقابل، تعداد نموها برای حل مساله بالا است. محاسبات در صورتی پایدار خواهد بود که نمو زمانی، از یک مقدار بحرانی، کمتر باشد. با کاهش ابعاد المان ها، این نمو زمانی کاهش می یابد. از این رو برای اقتصادی شدن محاسبات، سرعت ابزار در شبیه سازی بیش از مقدار حقیقی آن و با یک دامنه تغییرات هموار در نظر گرفته شد. همواره توجه شد که این افزایش نرخ بارگذاری، موجب افزایش بیش از حد انرژی جنبشی نشود.

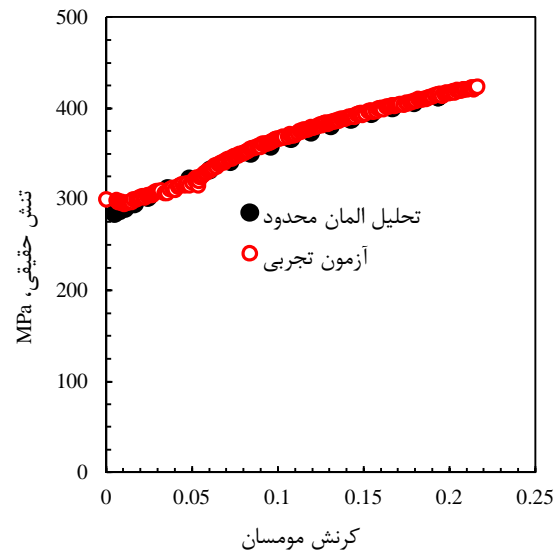


شکل ۳) مدل سازی المان محدود برای تعیین استحکام کششی اتصال سرد بعد از گام شکل دهی اتصال سرد

### ۳- طراحی آزمایش متعامد

بهینه سازی پارامترهای هندسی طراحی ابزار نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت اتصال دارد. در این مقاله برای بهینه سازی پارامترهای ابزار از روش طراحی آزمایش متعامد، استفاده شده است. این روش شامل طرح ریزی شرایط آزمایش با استفاده از جدول های خاص است که آن را جدول آرایه های متعامد می نامند. استفاده از این جدول تضمین می کند که طراحی آزمایش ها از روایی و پایایی لازم برخوردار است. با استفاده از این روش، تعداد بررسی های تحلیلی لازم برای توسعه یک طراحی مهندسی به صورت قابل توجهی کاهش یافته، زمان و هزینه های آزمایش کمینه می شود. در روش طراحی آزمایش متعامد، مسایل بهینه سازی به دو گروه، استاتیکی و دینامیکی طبقه بندی می شود. اگر متغیر زمان در تابع هزینه مساله بهینه سازی نباشد، مساله بهینه سازی، استاتیکی است. ولی اگر زمان نیز وارد تابع هزینه شود مساله بهینه سازی، دینامیکی یا پویا است. در این مطالعه با توجه به

نمودار تنش حقیقی- کرنش مومسان، که از نتایج آزمون کشش تک محوره در آزمایشگاه به دست آمد، در نمودار ۱ آورده شده است. این نتایج با مدل سازی آزمون کشش به کمک حل گر ضمنی آباکوس صحت گذاری شد.



نمودار ۱) منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان استخراج شده آزمون کشش تک محوره در آزمایشگاه و تحلیل المان محدود متناظر آن برای ورق فولادی گالوانیزه DX51D

فرآیند اتصال سرد شامل تغییر شکل های بزرگی است که به همراه مقادیر بالای کرنش های مومسان در ناحیه کوچکی از ورق بالایی و پایینی، باعث ایجاد تغییر شکل خیلی زیاد المان ها در آن ناحیه می شود. برای جلوگیری از این پدیده، از تکنیک شبکه بندی تطبیقی لاگرانژی- اویلری اختیاری (ALE) استفاده شد. اصطکاک کلومی برای مدل سازی برهم کنش تماسی اجزا در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک بین ورق ها با سطوح ابزار ۱/۸ و بین دو ورق ۲/۵ در نظر گرفته شد. فرآیند شکل دهی اتصال سرد شامل دو گام اعمال نیروی ورق گیر و جابجایی سنبه به سمت قالب به میزان مشخص است. برای تعیین استحکام کششی اتصال، در گام سوم با ثابت کردن ورق ها تماس ابزار حذف شد. سپس، در گام چهارم مطابق شکل ۳، با مقید کردن لبه ورق پایینی، ورق بالایی در جهت محوری، به سمت بالا حرکت می کند. بیشینه نیروی لازم جهت جدا کردن ورق ها از هم، به عنوان استحکام اتصال  $F$  در نظر گرفته می شود.

در حل صریح دینامیکی، معادله کار مجازی در رابطه (۱) آمده است.

$$\int_V \sigma \nabla(\delta u) dV = \int_A t \delta u dA - \int_V \rho \ddot{u} \delta u dV \quad (1)$$

و معادله به صورت (۲) گسسته سازی می شود.

$$M \ddot{u}_n = F_n - I_n \quad (2)$$

در معادلات بالا،  $\sigma$  تنسور تنش کوشی،  $u$  جابجایی،  $\ddot{u}$  شتاب،  $t$  بردار ترکشن،  $\rho$  چگالی،  $V$  حجم و  $A$  سطح است. همچنین  $M$

ستون‌های آرایه و معرف تعداد فاکتورهای موثر بر فرآیند، انتخاب شد. مطابق جدول ۲ مقادیر سطوح ۳-۱، از مقاله‌های مشابه [2, 10, 18, 19] استخراج، و براساس فواصل مساوی تعیین شد. براساس این جدول آرایه، تعداد ۹ آزمون شبیه‌سازی فرآیند اتصال با قالب ثابت طراحی شد. برای طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ استفاده شد. مینی‌تب یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری است که به‌وسیله آن می‌توان با تجزیه و تحلیل داده‌های آماری به طراحی آزمایش پرداخت.

**جدول ۲) پارامترهای هندسی موثر ابزار و مقادیر سطوح برای طراحی آزمایش متعامد در فرآیند اتصال سرد**

سطح	شعاع سنبه (mm)	عمق قالب (mm)	عرض شیار قالب (mm)	زاویه کف سنبه
۱	۲/۴	۱/۴	۱/۲	۱
۲	۲/۵	۱/۵	۱/۴	۳
۳	۲/۶	۱/۶	۱/۶	۵

#### ۴- روش تجربی

##### ۴-۱- ورق فولادی

ورق‌های مورد استفاده در این مقاله از جنس فولاد DX51D با پوشش گالوانیزه است که براساس استاندارد EN10346/00 توسط شرکت فولاد مبارکه، برای صنعت خودروسازی تولید می‌شود. ضخامت ورق‌های بالایی (سمت سنبه) و پایینی (سمت قالب) به ترتیب ۱/۵ و ۲ میلی‌متر است. ترکیب شیمیایی فولاد، گزارش شده توسط تولیدکننده در جدول ۱ آمده است.

برای تعیین رفتار مومسان ماده و استخراج منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان برای استفاده در تحلیل المان محدود، آزمون کشش تک‌محوره انجام شد. برای این منظور، نمونه آزمون کشش براساس استاندارد ASTM-E8/E8M به تعداد سه عدد برای افزایش دقت نتایج، آماده‌سازی شد. آزمون کشش شبه استاتیکی با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک، با سرعت ۰/۳۲ میلی‌متر بر ثانیه انجام پذیرفت. برای اندازه‌گیری تغییر طول در ناحیه سنبه، از افزایش طول‌سنج (Extensometer) استفاده شد. منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان استخراج شده در نمودار ۱ نشان داده شده است.

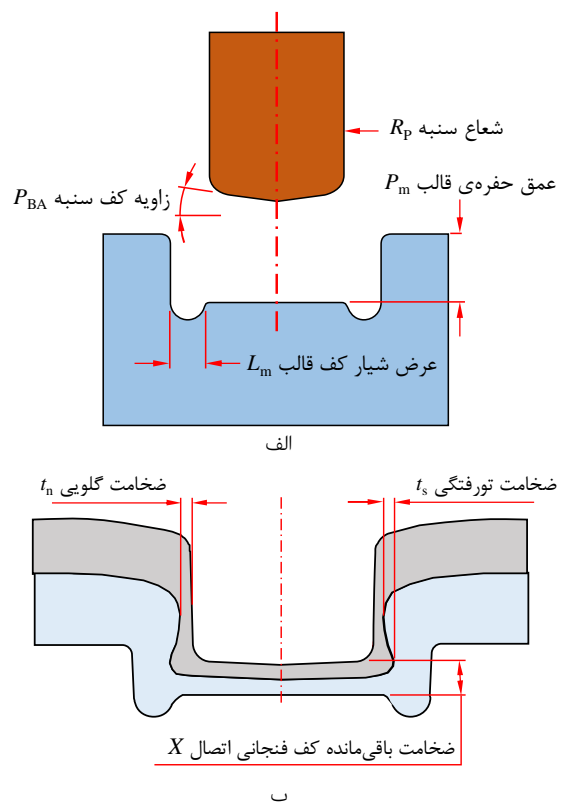
##### ۴-۲- انجام فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت

فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت، به وسیله پرس هیدرولیک و ابزار اتصال، انجام گرفت. ابزار اتصال سرد مطابق شکل ۵ شامل سنبه، فنرهای فشاری، قالب ثابت و ورق گیر است. تنظیمات فرآیند به نحوی انجام شد که ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال در آزمایش‌ها حدود ۰/۹ میلی‌متر، معادل ۲۵٪ مجموع ضخامت ورق‌های اولیه (۷۵٪ نازک‌شدن مجموع ضخامت ورق‌ها) [20] باشد.

##### ۴-۳- آزمون استحکام کششی اتصال

برای اندازه‌گیری استحکام کششی اتصال، نمونه‌هایی مستطیلی از ورق به‌صورت عمود بر راستای یکدیگر، به هم متصل شد. کیفیت

عدم حضور متغیر زمان در تابع بهینه‌سازی، مساله استاتیکی در نظر گرفته شده که شامل سه نوع "کوچکتر- بهتر"، "بزرگتر- بهتر" و "اندازه اسمی- بهتر"، است. از آنجا که هدف بهینه‌کردن استحکام اتصال است، رویکرد "بزرگتر- بهتر" برای بهینه‌سازی انتخاب شد. در این مطالعه روش طراحی آزمایش متعامد در آزمایش‌های رایانه‌ای، برای بهینه‌سازی ترکیبی از پارامترهای مهم هندسه ابزار، موثر در استحکام کششی اتصال، به کار گرفته شد. پارامترهای مهم ابزار مورد استفاده در اتصال سرد شامل: شعاع سنبه  $R_p$ ، عمق قالب  $P_m$ ، عرض شیار کف قالب  $L_m$  و زاویه کف سنبه  $P_{BA}$  است (شکل ۴- الف). پارامترهای هندسی اتصال شامل ضخامت تورفتگی  $t_s$ ، ضخامت گلوبی  $t_n$  و نیز ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال  $X$ ، در شکل ۴- ب، نشان داده شده است. هندسه اتصال به‌عنوان متغیر تعیین‌کننده استحکام آن، به‌صورت قابل توجهی متأثر از چهار پارامتر هندسی مهم ابزار است. پارامترهای فرآیندی مانند شرایط اصطکاک و نرخ تغییر شکل نیز می‌تواند روی جریان مواد و در نتیجه هندسه اتصال موثر باشد. این مقاله بر بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار برای رسیدن به اتصال با هندسه بهینه و استحکام بیشینه متمرکز است.



شکل ۴) پارامترهای هندسی: الف ابزار، ب اتصال، در فرآیند اتصال سرد

گام اول در روش طرح آزمایش متعامد، تعیین آرایه‌های متعامد مناسب براساس پارامترهای هندسی مهم ابزار است. چهار پارامتر موثر ابزار براساس مطالعه راکس و همکاران [7] تعیین شد. محدوده مناسب برای این جدول آرایه‌های متعامد  $L_9(3^4)$  که عدد ۳، تعداد سطوح آرایه و معرف سطوح آزمون و عدد ۴، تعداد

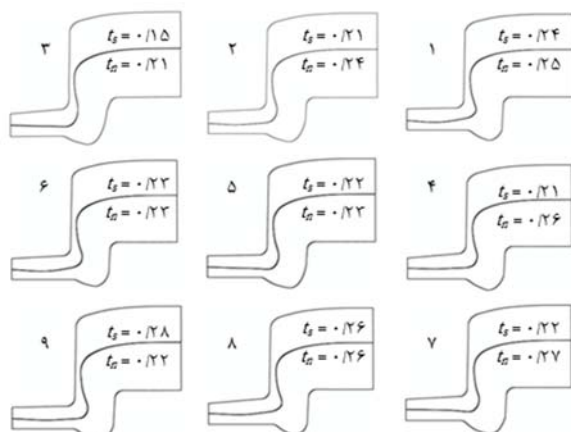


می‌شود. نتایج استحکام به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آزمون‌ها براساس تحلیل پارامتریک با نرم‌افزار آباکوس، وارد نرم‌افزار مینی‌ت‌ب شد.

پس از تحلیل نتایج آزمون‌ها و داده‌های جدول ۳ رده‌بندی پارامترهای موثر در فرآیند اتصال مطابق جدول ۴ انجام شد.

**جدول ۳** طراحی آزمایش متعامد برای تعیین هندسه بهینه ابزار اتصال سرد و استحکام اتصال به‌دست‌آمده از تحلیل المان محدود برای هر آزمایش

شماره آزمایش	شعاع سنبه (mm)	عمق قالب (mm)	عرض شیار قالب (mm)	زاویه کف سنبه	استحکام اتصال (N)
۱	۲/۴	۱/۴	۱/۲	۱	۱۸۶۵
۲	۲/۴	۱/۵	۱/۴	۳	۱۶۳۶
۳	۲/۴	۱/۶	۱/۶	۵	۱۳۸۴
۴	۲/۵	۱/۴	۱/۴	۵	۱۹۰۱
۵	۲/۵	۱/۵	۱/۶	۱	۱۸۴۹
۶	۲/۵	۱/۶	۱/۲	۳	۱۸۱۸
۷	۲/۶	۱/۴	۱/۶	۳	۲۱۲۵
۸	۲/۶	۱/۵	۱/۲	۵	۲۱۹۵
۹	۲/۶	۱/۶	۱/۴	۱	۱۹۳۳



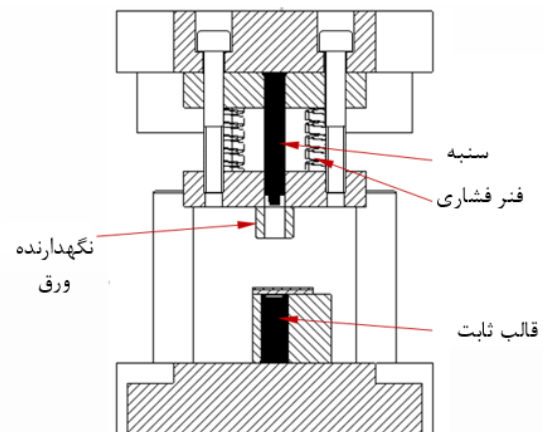
**شکل ۷** مقایسه هندسه اتصال سرد حاصل از شبیه‌سازی براساس پارامترهای طراحی آزمایش متعامد و شماره آزمون مطابق جدول ۳

**جدول ۴** نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌ت‌ب برای رده‌بندی پارامترهای موثر در فرآیند اتصال

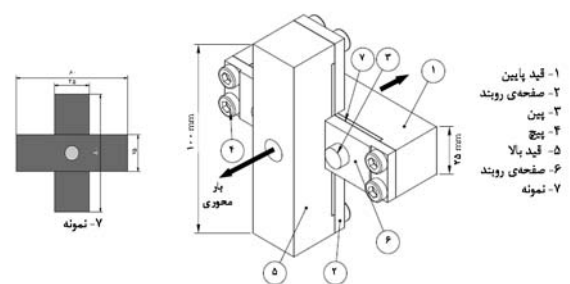
مراحل	شعاع سنبه (mm)	عمق قالب (mm)	عرض شیار قالب (mm)	زاویه کف سنبه
۱	۱۶۲۸	۱۹۶۴	۱۹۵۹	۱۸۸۲
۲	۱۸۵۶	۱۸۹۳	۱۸۲۳	۱۸۶۰
۳	۲۰۸۴	۱۷۱۲	۱۷۸۶	۱۸۲۷
دلتا	۴۵۶	۲۵۲	۱۷۳	۵۶
رده‌بندی	۱	۲	۳	۴

نرم‌افزار مینی‌ت‌ب براساس میانگین استحکام اتصال در هر سطح از چهار پارامتر اصلی، میزان اختلاف (Delta) مقدار بیشینه و کمینه هر پارامتر را محاسبه و آنها را براساس این اختلاف رده‌بندی (Rank) می‌کند. هرچه میزان این اختلاف بیشتر باشد، پارامتر مربوطه تاثیر بیشتری در متغیر هدف (استحکام اتصال)

اتصال به وسیله شکل مقطع و اندازه‌گیری استحکام کششی آن، ارزیابی می‌شود. مقطع اتصال توسط دستگاه سایه‌نگار و استحکام کششی اتصال با دستگاه کشش با نرخ بارگذاری ۳۳/۰ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. ورق‌های متصل‌شده به هم داخل قیدوبندی که برای همین منظور طراحی و ساخته شد، قرار گرفته و محکم شد به نحوی که مطابق شکل ۶، نمونه ۷ در داخل بدنه پایینی ۱ قرار گرفته و ورق پایینی اتصال توسط صفحه‌های ۶ و پیچ‌های ۴، مقید شد. سپس در جهت عمود بر ورق پایینی، ورق بالایی اتصال داخل بدنه شماره ۵ قرار گرفته و توسط صفحه‌های شماره ۲ و پیچ‌های شماره ۴، ثابت شد. مجموعه اتصال و قیدوبند به دستگاه کشش بسته و با جازدن پین‌های شماره ۳، از سرخوردن ورق در داخل شیار قیدوبند، جلوگیری شد. اعمال نیرو تا جدا شدن ورق‌ها از یکدیگر ادامه یافت و در طی فرآیند جدا کردن ورق‌ها در ناحیه اتصال، از یکدیگر بیشترین نیروی جداسازی به‌عنوان بیشینه استحکام اتصال در نظر گرفته شد.



**شکل ۵** ابزار طراحی شده برای انجام فرآیند اتصال سرد



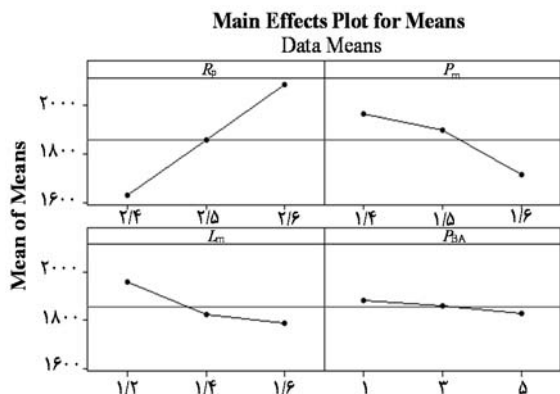
**شکل ۶** قیدوبند طراحی شده برای انجام آزمون استحکام کششی اتصال سرد

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱-۲- نتایج طراحی آزمایش متعامد

نتایج طراحی آزمایش متعامد در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ و جدول ۳، کمینه استحکام کششی اتصال مربوط به آزمون شماره ۳ است که ضخامت تورفتگی و گلوپی کمتری داشته و بیشینه استحکام کششی مربوط به آزمون‌های شماره ۷ و ۸ است که در آنها ضخامت تورفتگی یا گلوپی بیشتری دیده

استحکام آن در مقایسه با نتایج تجربی، مطابق جدول ۶ است. نتایج نشان داد که ضخامت تورفتگی  $t_s$  اتصال سرد حاصل از نتیجه شبیه‌سازی به میزان جزئی بیشتر از نتیجه حاصل از آزمون تجربی است. در مقابل ضخامت گلوپی  $t_n$  حاصل از شبیه‌سازی اتصال سرد کمتر از نتیجه حاصل از آزمون تجربی است.



نمودار ۲) وابستگی بین استحکام اتصال سرد و هر پارامتر در سه سطح براساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تپ مطابق آزمون‌ها و داده‌های جدول ۳

جدول ۵) مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد براساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تپ به روش طراحی آزمایش متعامد

زاویه کف سنبه	عرض شیار کف قالب (mm)	عمق قالب (mm)	شعاع سنبه (mm)
۱°	۱/۲	۱/۴	۲/۶

دارد. مطابق جدول ۴ شعاع سنبه  $R_p$ ، عمق حفره قالب  $P_m$  و عرض شیار کف قالب  $L_m$ ، به ترتیب، تاثیر بیشتر و زاویه کف سنبه  $P_{BA}$ ، تاثیر کمتری بر استحکام اتصال دارد.

نتایج طراحی آزمایش متعامد در این مقاله با نتایج مطالعه راکس و همکاران [7]، که پارامترهای ابزار اتصال سرد با قالب ثابت را به ترتیب تاثیرگذاری بر استحکام اتصال، رده‌بندی کردند کاملاً منطبق است. آنها نشان دادند که شعاع سنبه  $R_p$ ، عمق قالب  $P_m$  و عرض شیار کف قالب  $L_m$ ، به ترتیب، بیشترین تاثیر و زاویه کف سنبه  $P_{BA}$ ، کمترین تاثیر را بر استحکام اتصال دارد.

وابستگی بین استحکام اتصال سرد و هر پارامتر در سه سطح براساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تپ، مطابق نمودار ۲ است. نقاط روی نمودار، میانگین مقدار استحکام اتصال مربوط به هر پارامتر در سطح است. مقدار سطح مربوط به بیشترین استحکام اتصال در هر پارامتر، مقدار بهینه آن پارامتر است.

بر این اساس، مطابق جدول ۵، شعاع سنبه  $R_p$ ، در سطح سوم و عمق حفره قالب  $P_m$ ، عرض شیار کف قالب  $L_m$ ، و زاویه کف سنبه  $P_{BA}$ ، در سطح اول، ترکیب بهینه پارامترهای ابزار اتصال سرد را تشکیل می‌دهد.

### ۲-۵- نتایج تجربی

در این مطالعه، نتایج پارامترهای بهینه‌شده هندسه ابزار اتصال سرد که از روش طراحی آزمایش متعامد و تحلیل المان محدود به دست آمد براساس نتایج تجربی ارزیابی شد. ضخامت گلوپی و ضخامت تورفتگی که از پارامترهای هندسی اتصال هستند از طریق اندازه‌گیری مقطع مرکزی اتصال با دستگاه سایه‌نگار به دست آمد. نتایج آزمون‌های تجربی برای پارامترهای هندسه اتصال و

جدول ۶) مقایسه پارامترهای هندسی اتصال سرد به دست آمده از تحلیل المان محدود و آزمون تجربی

شماره آزمایش	ضخامت گلوپی (mm)		ضخامت تورفتگی (mm)		ضخامت باقی‌مانده کف فنجان اتصال (mm)		استحکام اتصال (N)
	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی	
۱	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۲۲۷۴
۲	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۹۲	۰/۹۰	۲۳۰۰
۳	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۸۸	۰/۹۰	۲۲۹۰
میانگین	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۲۲۸۸
انحراف (%)	-۹/۲۰	۰	۳/۴۵	۰	۰	۰	۱/۳۰

مقطع اتصال سرد تولیدشده و شبیه‌سازی شده که براساس طرح بهینه‌شده هندسی ابزار اتصال حاصل از طراحی آزمایش متعامد است، در شکل ۸ مقایسه شده است. براساس شکل ۸، بین نمونه شبیه‌سازی شده با رایانه و نمونه تجربی سازگاری قابل قبولی وجود دارد که نشان می‌دهد مدل المان محدود از دقت کافی برای پیش‌بینی پارامترهای اتصال برخوردار و نیز روش طراحی آزمایش متعامد می‌تواند به‌عنوان روشی کارا برای بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار به کار گرفته شود. مطابق نمودار ۳، استحکام کششی اتصال سرد حاصل از نتایج

### ۳-۵- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای طراحی بهینه

استحکام مکانیکی اتصال سرد به پارامترهای هندسی مانند ضخامت گلوپی و تورفتگی وابسته است. با مقایسه نتایج عددی و تجربی برای پارامترهای هندسی فوق، مدل المان محدود، صحت‌گذاری می‌شود. مطابق جدول ۶، خطای ضخامت گلوپی و تورفتگی کمتر از ۱۰٪ است که اختلاف کم و قابل قبول بین نتایج عددی شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد، مدل المان محدود به اندازه کافی دقیق هست که برای مطالعه پارامترهای اتصال و در نتیجه طراحی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت، استفاده شود.

انجام آزمون‌های تجربی است. در این مقاله، چهار پارامتر اصلی طراحی ابزار اتصال در سه سطح، بررسی و مشخص شد که شعاع سنبه بیشترین و زاویه کف سنبه کمترین اثر را در استحکام اتصال سرد داشته و میزان تاثیر چهار پارامتر به ترتیب عبارتند از: شعاع سنبه، عمق قالب، عرض شیار کف قالب و زاویه کف سنبه.

**تشکر و قدردانی:** نویسنده این مقاله از شرکت "کابل خودرو سبزوار" برای همکاری در انجام آزمون جدایش و اندازه‌گیری ابعادی پروفیل اتصال سرد توسط سایه‌نگار کمال تشکر را دارد. همچنین از آزمایشگاه تعیین خواص مکانیکی مواد دانشگاه صنعتی شاهرود برای همکاری در انجام آزمون کشش با دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ قدردانی می‌شود.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** سیداحمد علوی نژاد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سیدهادی قادری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

**۷- علایم**

A	سطح (m <sup>2</sup> )
E	مدول یانگ (Pa)
F	بردار نیروی خارجی در نمو n ام (N)
I	بردار نیروی داخلی در نمو n ام (N)
L <sub>m</sub>	عرض شیار کف قالب
M	ماتریس جرم قطری (kg)
OED	طراحی آزمایش متعامد
P <sub>BA</sub>	زاویه کف سنبه
P <sub>m</sub>	عمق حفره قالب
R <sub>p</sub>	شعاع سنبه
T	بردار ترکشن (Pa)
t <sub>s</sub>	ضخامت تورفتگی
t <sub>n</sub>	ضخامت گلوبی
U	بردار جابجایی (m)
V	حجم (m <sup>3</sup> )
X	ضخامت کف فنجان
α	زاویه تورفتگی با محور اتصال سرد (°)
σ	تنسور تنش کوشی (Pa)

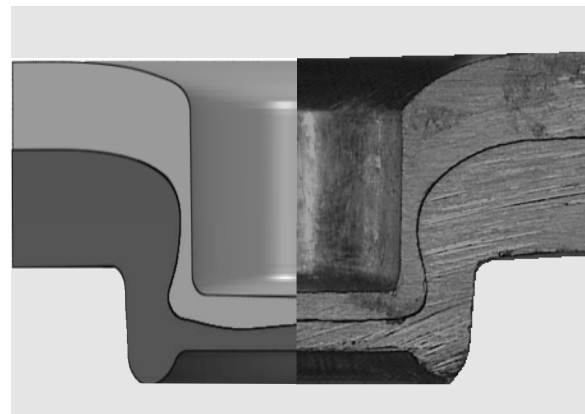
**علایم یونانی**

ν	نسبت پواسون
ρ	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )

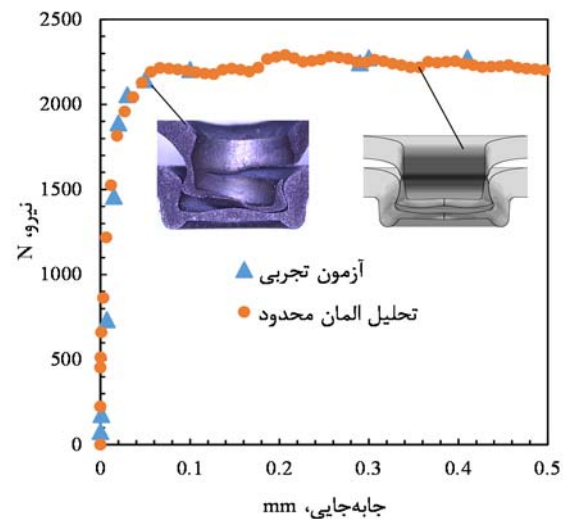
**منابع**

1- Abe Y, Kato T, Mori K. Joining of Aluminium alloy and mild steel sheets using mechanical clinching. Materials Science Forum. 2007;561-565:1043-1046.  
 2- Abe Y, Kishimoto M, Kato T, Mori K. Joining of hot-dip coated steel sheets by mechanical clinching. International Journal of Material Forming. 2009;2(S1):291-294.

تحلیل المان محدود و نتایج آزمون تجربی بر هم منطبق هستند.



شکل ۸) مقایسه مقطع اتصال سرد به دست آمده از شبیه‌سازی با نمونه تجربی برای هندسه بهینه ابزار



نمودار ۹) نمودار مقایسه استحکام کششی F اتصال سرد حاصل از تحلیل المان محدود و آزمون تجربی در ناحیه قبل از گلوبی شدن

**۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی**

در این مقاله با روش طراحی آزمایش متعامد، پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت، بهینه‌سازی شد. آزمون‌های تجربی انجام شده بر روی نمونه‌های اتصال سرد برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی براساس پارامترهای مقطع اتصال شامل ضخامت کف فنجان اتصال X، ضخامت گلوبی t<sub>n</sub> و ضخامت تورفتگی t<sub>s</sub>، نشان داد که با توجه به نتایج قابل قبول کاربرد اتصال سرد ورق‌های فولادی گالوانیزه با ضخامت غیرهمسان مورد استفاده در این مقاله، با توجه به مزیت‌ها، این نوع اتصال می‌تواند جایگزین مناسبی در صنعت خودروسازی به جای جوش نقطه‌ای، برای این کاربرد خاص و نیز در کاربردهای مشابه که سطوح، قابل دسترسی است باشد. نتایج نشان داد که کاربرد روش طراحی آزمایش متعامد در شبیه‌سازی روشی کارا برای بهینه‌سازی طراحی هندسی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت، برای کاهش چشمگیر هزینه و زمان



- 12- Balawender T. Experimental investigation of clinch joining process. *Acta Mechanica Slovaca*. 2012;16(1):52-56.
- 13- Lambiase F, Di Ilio A. Optimization of the clinching tools by means of integrated FE modeling and artificial intelligence techniques. *Procedia Cirp*. 2013;12:163-168.
- 14- Eshtayeh M, Hrairi M. Multi objective optimization of clinching joints quality using Grey-based Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(1-4):233-249.
- 15- Wen T, Wang H, Yang C, Liu LT. On a reshaping method of clinched joints to reduce the protrusion height. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;71(9-12):1709-1715.
- 16- Han X, Zhao S, Chen C, Liu C, Xu F. Optimization of geometrical design of clinching tools in flat-clinching. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017;231(21):4012-4021.
- 17- Mori K, Abe Y, Kato T. Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(9):1900-1905.
- 18- He X, Liu F, Xing B, Yang H, Wang Y, Gu F, et al. Numerical and experimental investigations of extensible die clinching. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74(9-12):1229-1236.
- 19- Abe Y, Kato T, Mori KI, Nishino S. Mechanical clinching of ultra-high strength steel sheets and strength of joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(10):2112-2118.
- 20- Eshtayeh M, Hrairi M, Dawood MS, Mohiuddin AK. Finite element modeling of clinching process for joining dissimilar materials. *Advanced Materials Research*. 2015;1115:109-112.
- 3- Varis J. Ensuring the integrity in clinching process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;174(1-3):277-285.
- 4- Eshtayeh MM, Hrairi M, Mohiuddin AK. Clinching process for joining dissimilar materials: State of the art. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;82(1-4):179-195.
- 5- Lambiase F. Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;66(9-12):2123-31.
- 6- Lee CJ, Lee SK, Kim BM, Ko DC. Failure mode dependent load bearing characteristics of mechanical clinching under mixed mode loading condition. *Procedia Engineering*. 2017;207:938-943.
- 7- Roux E, Bouchard PO. Kriging metamodel global optimization of clinching joining processes accounting for ductile damage. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213(7):1038-1047.
- 8- Jayasekara V, Min KH, Noh JH, Kim MT, Seo JM, Lee HY, et al. Rigid-plastic and elastic-plastic finite element analysis on the clinching joint process of thin metal sheets. *Metals and Materials International*. 2010;16(2):339-347.
- 9- Jagtap KR, Ghorpade SY, Chopade SE. Finite Element Analysis of Mechanical Clinching Process. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(8):8104-8110.
- 10- Mucha J. The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint. *Materials & Design*. 2011;32(10):4943-4954.
- 11- Han X, Zhao S, Liu C, Chen C, Xu F. Optimization of geometrical design of clinching tools in clinching process with extensible dies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017;231(21):3889-3897.