



## اثر هندسه قالب در استحکام اتصال ورق‌های آلومینیوم 3105 متصل شده با فرایند کلینچینگ

محمدحسین میرزایی<sup>1</sup>، علی فضلی<sup>2\*</sup>، پرویزاسدی<sup>3</sup>، مهدی سلطانیپور<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\* قزوین، صندوق پستی 3414896818، a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

پژوهش حاضر اثر هندسه قالب در فرایند کلینچینگ را بر استحکام اتصالات ایجاد شده را بررسی کرده است. ورق‌هایی از جنس آلومینیوم AI3105 با قالب‌هایی با هندسه مختلف به هم متصل شده‌اند. پس از تعیین محدوده نیروی مناسب برای ایجاد اتصال (25 تا 32 کیلو نیوتن)، اثر هندسه قالب بر استحکام اتصال با آزمون‌های برش و جدایش بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که هندسه قالب و عمق نفوذ سنبه عوامل اصلی در تعیین میزان قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی هستند. در محدوده‌ای که اتصال مکانیکی مناسبی بین دو ورق ایجاد می‌شود، هندسه قالب اثر قابل توجهی بر روی استحکام و هندسه اتصال دارد، اما تأثیر نیروی کلینچ ناچیز است. قطر سنبه های مورد بررسی 4، 4/5 و 5 میلی‌متر بوده است که قطر سنبه 5 میلی‌متر مقدار بهینه می‌باشد. در قطرهای بالاتر از مقدار بهینه، به دلیل کاهش اختلاف قطرهای سنبه و ماتریس، ضخامت گلوبی ورق بالایی کاهش یافته و منجر به ایجاد پارگی در اتصال می‌شود. از سوی دیگر در قطر سنبه کمتر از مقدار بهینه، به علت لقی بالا، خروج ماده از منطقه کف سنبه راحت‌تر بوده، در نتیجه مقدار قفل مکانیکی و استحکام اتصال کمتر می‌شود. با وجود تأثیر ناچیز نیروی کلینچ بر روی استحکام اتصال، اثر آن بر روی ظرفیت جذب انرژی اتصال قابل ملاحظه است، به گونه‌ای که در یک نیروی کلینچ بهینه، ظرفیت جذب انرژی اتصال حداکثر خواهد بود. بالاترین استحکام اتصال توسط سنبه 5 میلی‌متری و با اعمال نیروی کلینچ 30 کیلو نیوتنی بدست آمد که استحکام برشی آن 1355 نیوتن بوده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 25 مرداد 1399  
داوری اولیه: 8 شهریور 1399  
پذیرش: 3 آبان 1399

### کلیدواژگان:

هندسه اتصال  
افزایش استحکام  
آلومینیوم AI 3105  
کلینچینگ

## The effect of the die geometry on the joint strength of Al 3105 aluminum sheets joined by the clinching process

MohammadHosein Mirzaei, Ali Fazli\*, Parviz Asadi, Mahdi Soltanpour

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

\* P.O.B. 3414896818 Qazvin, Iran, a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 15 August 2020  
First Decision: 29 August 2020  
Accepted: 24 October 2020

### Keywords:

Joint geometry  
Increase strength  
Al3105 Aluminum  
Clinching

### Abstract

In this paper, the effect of the die geometry on the joint strength of the clinching process is investigated. The AA3105 aluminum sheets are joined using different die geometries. After determining the suitable range of the joining load (25-32kN), the effect of the die geometry on the joint strength is considered, using shear and peel tests. The results indicate that the die geometry and punch penetration depth are the most important parameters affecting the joint mechanical interlock and neck thickness. In the range of proper mechanical joint, the die geometry has a great effect on the strength and geometry of the joint, while the effect of clinching load is negligible. The investigated punch diameters were 4, 4.5, and 5mm, where the optimum punch diameter was 5 mm. At the diameters higher than the optimum value, due to the low clearance between the punch and die, the neck thickness is reduced, leading to the joint failure. However, at the diameters lower than the optimum value, due to the higher clearance, the material flows easily from the bottom side, leading to a weakness in the mechanical interlock and joint strength. Although a negligible effect of clinching force on the joint strength, its effect on the joint energy absorption capacity is meaningful. As the joint energy absorption capacity will be the highest at an optimum clinching load. The highest joint strength was achieved at the punch diameter and clinching force of 5mm and 30kN, which resulted in the joint shear strength of 1355N.

### 1- مقدمه

و ماتریس، با تغییر شکل پلاستیک به یکدیگر متصل می‌شوند. شماتیک این فرایند در شکل 1، نشان داده شده است. در این فرایند دو ورق توسط یک سنبه به سمت حفره ماتریس فشرده

فرایند کلینچینگ یک فرایند اتصال به‌وسیله شکل‌دهی است که در آن دو یا چند ورق همجنس یا غیرهم‌جنس توسط یک سنبه

### Please cite this article using:

M.H. Mirzaei, A. Fazli, P. Asadi, M. Soltanpour, The effect of the die geometry on the joint strength of Al 3105 aluminum sheets joined by the clinching process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 10- 23, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از نظر عمق و قطر قالب بهینه‌سازی کردند. به این ترتیب که در ورق‌های استحکام بالا، با کاهش عمق قالب از پارگی ناشی از تغییر شکل در ورق سمت سنبه جلوگیری کردند. به علاوه آنها توانستند با از بین بردن شیار قالب، از بروز ترک‌های ناشی از تنش کششی ایجاد شده در قسمت پایین شکاف به داخل شیار قالب، در ورق‌های فولادی با استحکام پایین‌تر جلوگیری کنند. چن و همکاران [6] به بررسی اتصال ورق‌های غیرهمجنس آلومینیوم و پلاستیک مستحکم شده با فیبر کربن (CFRP)، از طریق فرایند کلینچ سوراخ‌دار پرداخته‌اند. خیائوسونگ و همکاران [7] به اتصال کلینچینگ بر روی ورق‌های تیتانیوم به آلومینیوم و مس پرداخته‌اند، آنها از طریق منحنی نیرو-جابجایی، خواص مکانیکی اتصال و ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی اتصالات را مورد بررسی قرار دادند. در کار دیگر توسط ایبا و همکاران [8] از یک فشار متقابل به وسیله رینگ لاستیکی در حفره ماتریس، برای اتصال ورق‌های فولادی استحکام بالا با شکل‌پذیری پایین استفاده کردند. مقدار قفل مکانیکی اتصال را به وسیله افزایش جریان مواد با فشار متقابل از رینگ لاستیکی در حفره قالب افزایش دادند. چائوچن و همکاران [9] یک روش تغییر شکل برای کاهش ارتفاع برآمدگی کلینچینگ با ضخامت ورق‌های مختلف 2 میلی‌متر به 2/5 میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که شکستگی در گلوبی ورق اصلی‌ترین حالت خرابی در اتصالات است که با قرار دادن ورق ضخیم‌تر در سمت ماتریس می‌توان مقدار ضخامت گلوبی<sup>2</sup> را افزایش داد که موجب استحکام بالای اتصالات نیز می‌شود. لامبیسا و همکاران [10] به اتصال ورق‌های آلومینیوم به CFRP از طریق فرایند کلینچ اصطکاکی پرداختند. به این ترتیب که ورق آلومینیوم در تماس با ابزار چرخشی بوده که موجب اصطکاک بین ورق آلومینیوم و ابزار شده و شکل‌پذیری ورق آلومینیومی را افزایش می‌دهد. همچنین برای ایجاد اتصال در این مطالعه از کلینچ سوراخ‌دار استفاده شده است. قربانی و همکاران [11] به اتصال ورق‌های غیرهمجنس با شکل‌پذیری پایین (آلومینیوم به CFRP)، از طریق فرایند کلینچ سوراخ‌دار با استفاده از سیستم الکتروهیدرولیکی پرداخته‌اند. استفاده از این روش منجر به بهبود ضخامت گلوبی ورق و افزایش مقاومت اتصال شده است. بابالو و همکاران [12] از طریق فرایند الکتروهیدرو کلینچینگ، اتصال ورق‌های فولادی با ضخامت پایین را به آلومینیوم 3105 مورد بررسی قرار دادند میرزایی و همکاران [13] اثر هندسه قالب را در فرایند کلینچینگ با

می‌شوند. به‌علت حرکت شعاعی ورق‌ها در انتهای فرایند، قفل مکانیکی<sup>1</sup> بین دو ورق ایجاد می‌شود. فرایند اتصال کلینچینگ برای اولین بار در کشور آلمان و در سال 1897 معرفی شد [1].

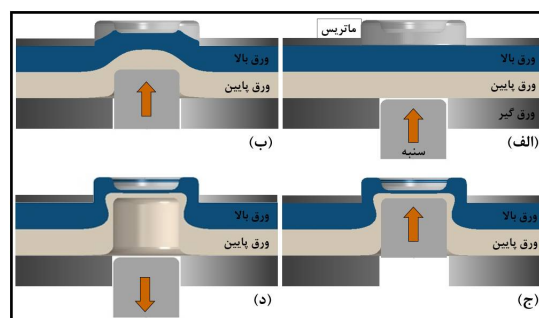


Fig. 1 Schematic of the clinching process. (a) the layout of the die and sheets before joining process, (b) Penetrating the jointing sheets into die cavity by the punch, (c) the radial movement of sheets at the end of die cavity, and (d) return of the punch and ending the process.

شکل 1 شماتیک اتصال با فرایند کلینچینگ، الف- قرار گیری تجهیزات قالب و ورق‌ها جهت اتصال، ب- نفوذ ورق‌های مورد اتصال به داخل حفره ماتریس توسط سنبه، ج- حرکت شعاعی ورق‌ها در انتهای حفره قالب و د- برگشت سنبه و اتمام فرایند.

اتصال مکانیکی با کلینچینگ در دهه‌های اخیر توجه بیشتری به خود جلب کرده است. با این حال این اتصالات دارای مقاومت کمتری نسبت به اتصالات جوشی می‌باشند. فرایند اتصال کلینچینگ مزایای بسیاری نسبت به فرایندهای اتصال نظیر جوش نقطه‌ای (ذوبی و اصطکاکی)، پرچ‌کاری، چسب‌کاری و دیگر فرایندهای اتصال مشابه دارند. از جمله مزایای این روش شامل کم بودن زمان اجرا، عدم وجود حرارت، عدم تغییر در خواص فیزیکی قطعات پایه، پاکیزگی فرایند، سادگی و عدم وجود مواد افزودنی می‌باشد. اما با این حال برجستگی ایجاد شده بر روی ورق بعد از اتصال کلینچ نیز، موجب محدود بودن کاربرد این اتصالات شده است [2، 3]. چائوچن و همکاران [4] به بررسی کاهش برجستگی ایجاد شده در اتصال کلینچینگ پرداختند. آنها توانستند با استفاده از اتصال ورق‌های با ضخامت‌های مختلف برآمدگی این اتصالات را کاهش دهند. آنها همچنین تغییر شکل پلاستیک بیشتر را ارائه کردند که باعث افزایش استحکام بین دو ورق می‌شود. به این صورت که بعد از فرایند معمولی کلینچ یک مرحله فشرده سازی به فرایند اتصال اضافه کرده‌اند. با استفاده از این روش علاوه بر اینکه برآمدگی اتصال کاهش یافت، بلکه قفل مکانیکی ایجاد شده بین دو ورق نیز افزایش یافته و موجب بهبود استحکام اتصال شده است. ایبا و همکاران [5] به منظور افزایش استحکام اتصال، هندسه قالب را

<sup>2</sup> Neck thickness

<sup>1</sup> Interlock

برای بررسی اثر هندسه سنبه بر روی استحکام اتصال، سنبه‌ها با سه قطر مختلف 4/5، 5 و 5/5 میلی‌متر ساخته شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات انجام شده توسط میرزایی و همکاران [13]، هندسه ماتریس برای تمامی اتصالات یکسان در نظر گرفته شده است. جزئیات ابعادی ماتریس در شکل 3 (ب) ارائه شده است. ترکیبات شیمیایی ورق آلیاژ آلومینیوم 3105 استفاده شده در مطالعه حاضر در جدول 1 ارائه شده است.

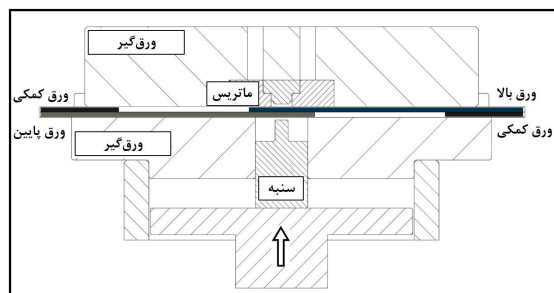
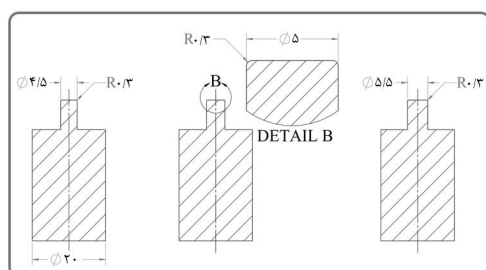
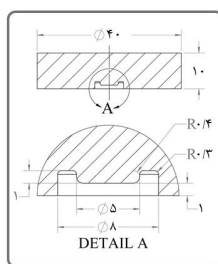


Fig. 2 schematic of the die used for joining by the clinching process

شکل 2 شماتیکی از قالب استفاده شده در این تحقیق برای ایجاد اتصال کلینچینگ.



(الف)



(ب)

Fig. 3 (a) Punch geometry and (b) die geometry used for the joining of the sheets

شکل 3 الف- ابعاد سنبه و ب- ابعاد ماتریس استفاده شده برای ایجاد اتصال

جدول 1 ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 3105 [15]

Table 1 Chemical composition of the Al3105 alloy

Element	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	Mg
Al 3105	Bal	0/343	0/439	0/015	0/044	0/147

برای آزمون‌های استحکام برشی<sup>5</sup> و استحکام جدایش<sup>6</sup> ابعاد

هندسه‌های مختلف قالب بر روی ورق‌های آلومینیوم 3105 مورد بررسی قرار دادند. نتایج داد که، اتصالات انجام شده با سنبه مخروطی با قطر سنبه 5 میلی‌متر به دلیل قفل مکانیکی بهتر همراه با ضخامت گلوبی بیشتر از استحکام برشی بالایی برخوردار هستند. آنها همچنین اذعان داشتند، وجود شیار محیطی<sup>3</sup> در حفره ماتریس، همراه با افزایش عمق نفوذ سنبه موجب جریان مواد در محیط حفره ماتریس شده و قفل مکانیکی بین دو ورق را افزایش می‌دهد. سام کوپیترز و همکاران [14] به منظور احتمال پیش بینی مقاومت برشی اتصال در برابر کشش یک مجموعه ورق فلزی با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداختند. آنها بیان داشتند که، با توجه به اینکه پایه و اساس اتصال در فرایند کلینچینگ توسط تغییر شکل پلاستیک قطعات اتصالی می‌باشد، بنابراین مقاومت مکانیکی اتصال بطور عمده به هندسه اتصال بستگی دارد.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر هندسه قالب و نیروی کلینچ بر استحکام اتصال در فرایند کلینچینگ ورق‌های آلومینیوم 3105 است. برای این منظور اثر پارامترهای فرایندی مختلف از جمله نیروی کلینچ، ابعاد سنبه و ماتریس و عمق نفوذ سنبه بر استحکام برشی و استحکام جدایش اتصال و همچنین مقدار قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی ورق‌های متصل شده بررسی شده است.

## 2- روش تحقیق

در این پژوهش، اثر هندسه قالب در استحکام اتصال ورق‌های آلومینیوم 3105 با فرایند کلینچینگ بررسی شده است. شماتیک قالب استفاده شده برای ایجاد اتصالات و نحوه قرارگیری ورق‌های مورد اتصال در شکل 2 نشان داده شده است. ورق‌های اتصالی همان‌طور که در شکل‌های (1 و 2) قابل مشاهده است، بین دو ورق گیر بسته می‌شوند. با حرکت سنبه به سمت ورق، هر دو ورق به داخل حفره ماتریس شکل داده شده و پس از پر کردن حفره ماتریس، با حرکت شعاعی ماده در انتهای فرایند قفل مکانیکی بین آنها ایجاد می‌شود. جنس ورق‌های اتصالی از آلومینیوم 3105 بوده و برای سنبه و ماتریس از SPK سخت‌کاری شده استفاده شده است. همچنین برای انجام اتصالات کلینچینگ از دستگاه آزمون‌های عمومی تعیین شکل‌پذیری ورق‌ها<sup>4</sup> استفاده شده است.

هندسه و ابعاد سنبه و ماتریس استفاده شده در آزمون‌ها در شکل 3 ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است،

<sup>5</sup> Shear test

<sup>6</sup> Peel test

<sup>3</sup> Undercut

<sup>4</sup> Universal Sheet Metal Testing Machine -A400B

استحکام برشی و آزمون استحکام جدایش، بررسی شد. میزان انرژی جذب شده اتصالات مختلف نیز از طریق مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی آزمون‌های استحکام برشی بدست آمده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در انتها برای بررسی تکرار پذیری اتصال، با مناسب‌ترین شرایط اتصال نمونه‌های جدیدی متصل شدند و 3 نمونه تحت آزمون‌های استحکام برشی و 3 نمونه نیز تحت آزمون استحکام جدایش قرار گرفتند. از نتایج این آزمون‌ها، استحکام متوسط و انحراف معیار آن به دست آمده، و تکرارپذیری این اتصالات بحث شده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تعیین محدوده مناسب نیروی کلینچ برای آزمون‌های مختلف

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف، ابتدا محدوده مناسب نیروی کلینچینگ برای ایجاد اتصال تعیین شد. برای این منظور نمونه‌های اولیه با قطر سنبه میانی (5 میلی‌متر) با نیروهای مختلف 18 تا 32 کیلونیوتن متصل شدند. با برش مقطع، هندسه اتصال نمونه‌ها از نظر قفل مکانیکی، ضخامت‌گلوبی و عمق نفوذ سنبه بررسی شدند که هندسه اتصال‌های ایجاد شده، در جدول 2 نشان داده شده است.

نمونه‌های اتصال به ترتیب  $100 \times 25$  میلی‌متر و  $75 \times 25$  میلی‌متر با ضخامت 2 میلی‌متر انتخاب شده‌اند. ورق‌های مورد اتصال با همپوشانی  $25 \times 25$  میلی‌متر برای آزمون برش، و  $50 \times 25$  میلی‌متر برای آزمون جدایش، طبق شکل 4 به هم متصل شده‌اند. به‌منظور مستقیم باقی ماندن ورق‌ها و جلوگیری از خم شدن آن‌ها در هنگام گیربندی برای اتصال، مطابق شکل 2 و همچنین در آزمون استحکام برشی مطابق شکل 4(الف) از دو ورق کمکی در دو سمت نمونه‌های اتصال استفاده شده است.

ابتدا با سنبه به قطر 5 میلی‌متر (قطر میانی) و با نیروهای کلینچینگ مختلف اتصال بین نمونه‌ها ایجاد شدند. سپس نمونه‌های اتصالی از سطح مقطع اتصال برش داده شده و مطابق شکل 5، پارامترهای هندسه اتصال (قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی ورق‌ها و عمق نفوذ سنبه) بررسی شدند. از بین اتصالات با نیروهای مختلف، 4 مورد از نیروهای کلینچینگ که دارای هندسه اتصال مناسبی هستند، به عنوان مناسب‌ترین نیروهای اتصال انتخاب شدند. در مرحله بعد، اتصالات با سنبه‌های قطر  $4/5$  و  $5/5$  میلی‌متر، با مناسب‌ترین نیروهای کلینچینگ بدست آمده در مرحله قبل، بررسی شدند.

در ادامه با برش سطح مقطع نمونه‌های اتصالی، پارامترهای مقطع اتصال این نمونه‌ها نیز بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شدند. سپس استحکام اتصال نمونه‌های مختلف از طریق آزمون

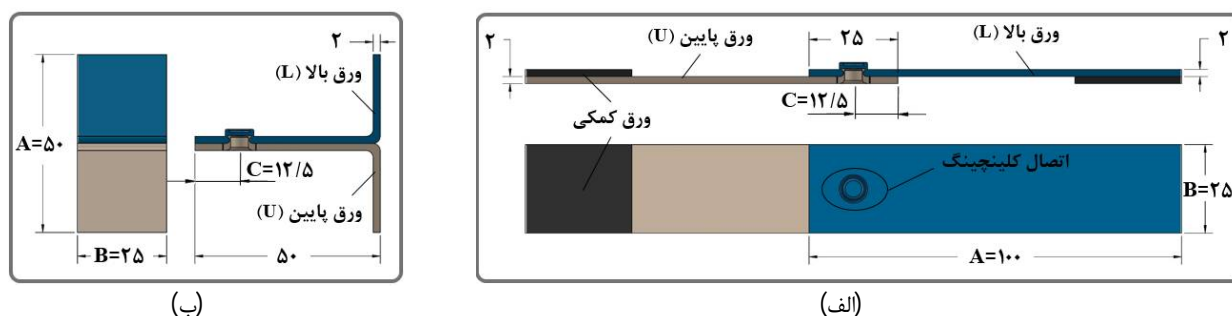


Fig. 4 The geometry of the samples prepared for a) shear test and b) Peel test.

شکل 4 هندسه نمونه‌های آماده شده برای الف- آزمایش استحکام برشی و ب- آزمایش استحکام جدایش.

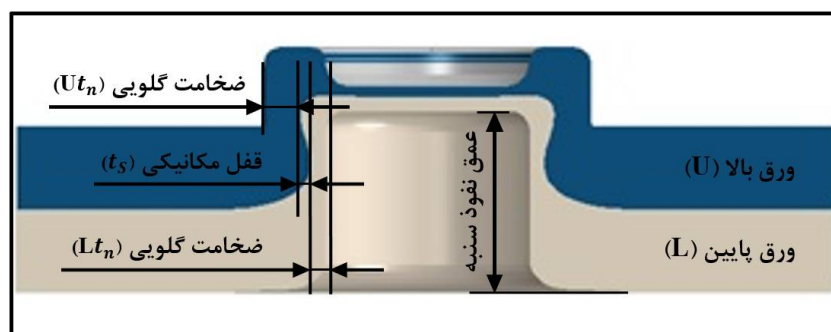


Fig. 5 Section geometry of the joint in clinching and the studied parameters.

شکل 5 هندسه مقطع اتصال و پارامترهای مورد بررسی.

جدول 2 هندسه مقطع اتصالات انجام شده با قطر سنجه 5 میلی‌متر و نیروهای مختلف جهت تعیین محدوده مناسب نیرو کلینچ

Table 2 Section geometry of the joints prepared using the 5-mm punch in different clinching loads for determining the suitable range of the clinching force.

هندسه سطح مقطع	عمق نفوذ (mm)	نیرو اتصال (kN)	ردیف	هندسه سطح مقطع	عمق نفوذ (mm)	نیرو اتصال (kN)	ردیف
	۴	۲۴	۶	اتصال برقرار نشد	--	۱۸	۱
	۴/۲۵	۲۵	۷		۲/۷۵	۲۰	۲
	۴/۷۰	۲۷	۸		۳/۰۵	۲۱	۳
	۵	۳۰	۹		۳/۴۰	۲۲	۴
	۵/۱۵	۳۲	۱۰		۳/۸۵	۲۳	۵

با ثابت در نظر گرفتن ابعاد سنجه و ماتریس، میزان عمق نفوذ سنجه (نیروی کلینچ) عامل اصلی تغییر پارامترهای قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی می‌باشد. هرچه نیروی کلینچینگ افزایش می‌یابد عمق نفوذ سنجه نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار شکل 6 نشان داده شده، نیروی کلینچ با میزان قفل مکانیکی رابطه مستقیم دارد و با افزایش نیروی کلینچ قفل مکانیکی نیز افزایش پیدا می‌کند. اما این رابطه مستقیم تا رسیدن به یک مقدار معینی وجود دارد و پس از عبور از آن، رابطه مستقیمی بین نیروی کلینچینگ و میزان قفل مکانیکی وجود ندارد. همچنین در نیروی 18 کیلو نیوتن به دلیل نفوذ کم سنجه و عدم ایجاد قفل مکانیکی، اتصال برقرار نشده است. با افزایش نیرو در محدوده‌ی 20 تا 25 کیلو نیوتن، نیرو و ضخامت گلوبی باهم رابطه غیرمستقیم دارند که دلیل آن نیز عمق نفوذ بیشتر سنجه و کشش ورق به داخل ماتریس است. بطوری که پس از عبور از نیروی 25 کیلو نیوتن و افزایش نیرو تا 30 کیلو نیوتن، نفوذ بیشتر سنجه موجب پر شدن کامل حفره ماتریس می‌شود. در این شرایط به علت فشردگی بیش از حد مواد در قسمت حفره ماتریس، جریان مواد ورق به صورت شعاعی و به سمت بیرون ماتریس رخ می‌دهد که تا حدی موجب افزایش ضخامت گلوبی ورق می‌شود (شکل 6).

مشاهده هندسه سطح مقطع اتصال نشان می‌دهد که در نیروی کلینچ 18 کیلو نیوتن، هیچ اتصالی بین نمونه‌ها ایجاد نشده است. با افزایش نیروی کلینچ، اتصال حداقلی بین نمونه‌ها بوجود آمده است. اما تا نیروی کلینچینگ 22 کیلو نیوتن، همچنان قفل مکانیکی ناچیز است و مشخص است که این اتصال در آزمون، استحکام کافی نخواهد داشت. دلیل این مسأله را با مشاهده ضخامت بالای کف نمونه اتصال می‌توان توضیح داد. همانگونه که مشاهده می‌شود، ضخامت کف نمونه‌های اتصال در این نمونه‌ها نسبتاً بالا است. در واقع به خاطر نیروی کم اتصال، ضخامت کف نمونه، چندان کاهش نیافته و حرکت شعاعی ماده برای ایجاد اتصال مکانیکی قوی انجام نشده است. با افزایش نیروی اتصال در نمونه‌های بعدی (نیروهای 24 تا 32 کیلو نیوتن)، ضخامت کف نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد و با حرکت شعاعی ماده در انتهای کورس، قفل مکانیکی مناسب بین نمونه‌ها ایجاد شده است. در آزمون‌های انجام شده مشاهده می‌شود که چهار نیروی کلینچ آخر (25، 27، 30 و 32 کیلو نیوتن) از نظر قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی و عمق نفوذ سنجه، برای اتصال ورق‌های آلومینیوم 3105 مناسب‌تر از حالت‌های دیگر هستند. نکته قابل توجهی که از جدول 2 حاصل شد این است که

قطرهای 4/5 و 5/5 میلی‌متر نیز همانند قطر سنبه 5 میلی‌متر تکرار شد و هندسه سطح مقطع اتصالات حاصله بررسی شد (جدول 3). در شکل 7 نیز پارامترهای اتصالات ایجاد شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

2-3- اثر قطر سنبه و نیروی کلینچینگ بر روی هندسه اتصالات  
 پس از تعیین محدوده مناسب نیروی کلینچینگ، اثر قطر سنبه و نیروی کلینچ بر استحکام اتصالات بررسی شد. آزمون‌های اتصال با نیروی کلینچ 25، 27، 30 و 32 کیلونیوتن توسط سنبه با

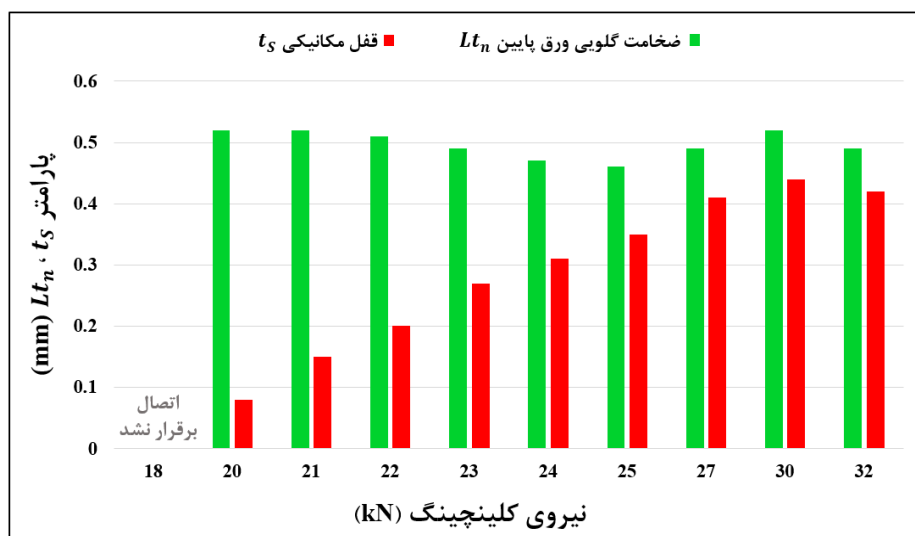


Fig. 6 Effect of the clenching force on the interlock and neck thickness

شکل 6 اثر نیروی کلینچینگ بر میزان قفل مکانیکی و ضخامت گلویی

جدول 3 هندسه سطح مقطع اتصالات انجام شده با نیروهای مختلف کلینچ و قطرهای مختلف سنبه

Table 3 Section geometry of the joints created using different clenching loads and different punch diameters.

$\text{Ø } 5/5 \text{ (mm)}$	$\text{Ø } 5 \text{ (mm)}$	$\text{Ø } 4/5 \text{ (mm)}$	سنبه / نیرو
<p>(ط)</p>	<p>(ه)</p>	<p>(الف)</p>	۲۵ (kN)
<p>(ی)</p>	<p>(و)</p>	<p>(ب)</p>	۲۷ (kN)
<p>(ک)</p>	<p>(ز)</p>	<p>(ج)</p>	۳۰ (kN)
<p>(ل)</p>	<p>(ح)</p>	<p>(د)</p>	۳۲ (kN)

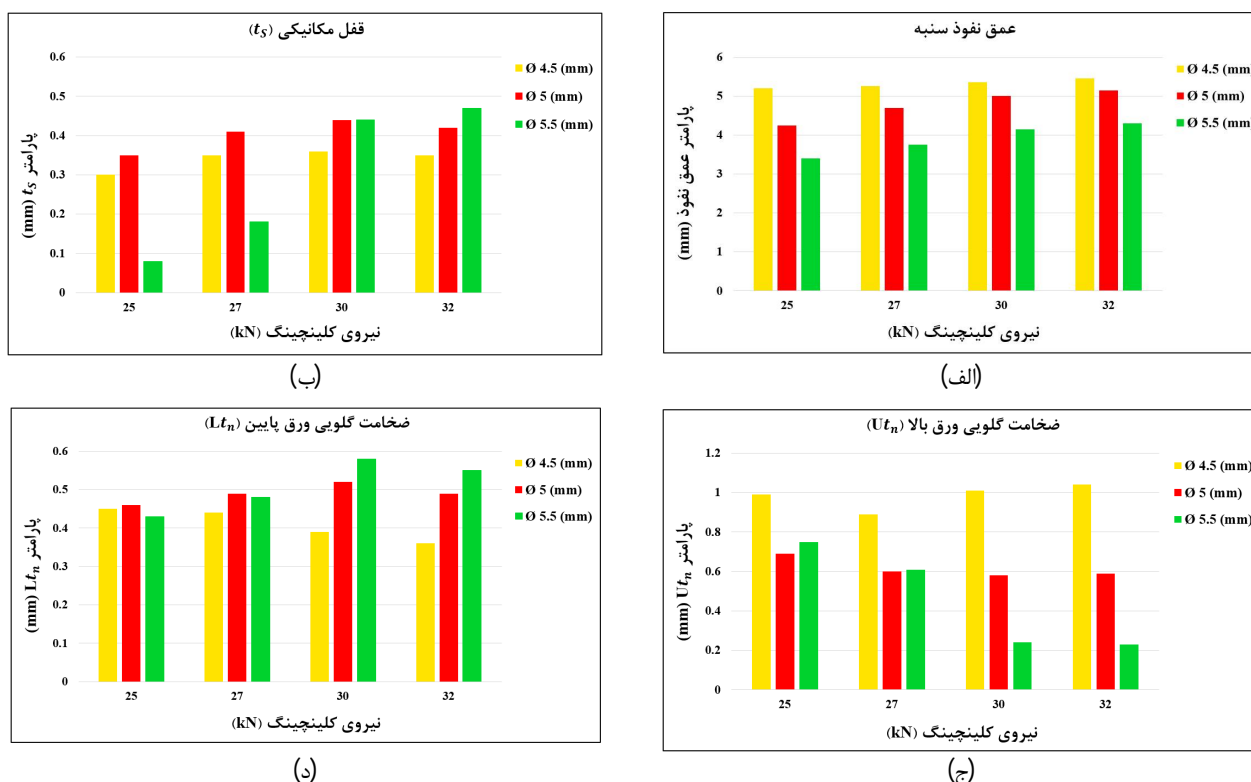


Fig. 7 Comparison of the geometry reported in table 3 for the different punch diameters (4.5, 5 and 5.5 mm) and clenching load (25, 27, 30, and 32 kN). a) Punch penetration depth b) mechanical interlock c) neck thickness of the upper sheet d) neck thickness of the lower sheet

شکل 7 مقایسه نتایج حاصل از هندسه اتصالات ارائه شده در جدول 3 شامل: الف- عمق نفوذ سنبه، ب- قفل مکانیکی، ج- ضخامت گلوبی ورق بالایی و د- ضخامت گلوبی ورق پایینی، برای قطرهای مختلف سنبه (4/5، 5 و 5/5 میلی‌متر) و نیروهای اتصال (25، 27، 30 و 32 کیلو نیوتن)

بودن قطر سنبه نسبت به سنبه‌های قطر 4/5 و 5 میلی‌متر، و فشار کمتر اعمالی در نیروی یکسان از عمق نفوذ سنبه کمتری برخوردار هستند. کم بودن عمق نفوذ سنبه موجب پایین‌تر بودن قفل مکانیکی در این اتصالات در یک نیروی یکسان شده است. با افزایش نیروی کلینچ، مطابق جدول 3- شکل‌های (ط تا ل) مقدار قفل مکانیکی نیز افزایش پیدا کرده است. مجموع ضخامت گلوبی دو ورق بعلاوه قفل مکانیکی با لقی سنبه و ماتریس برابر است و لقی بین سنبه و ماتریس در سنبه 5/5 میلی‌متر نسبت به قطرهای 4/5 و 5 میلی‌متر کمتر است. با افزایش نیروی کلینچ در سنبه قطر 5/5 میلی‌متر، به علت لقی کمتر، امکان حرکت محوری ماده در قسمت فضای بین سنبه و ماتریس وجود ندارد و ماده تمایل به حرکت شعاعی دارد که منجر به افزایش قفل مکانیکی با افزایش نیرو می‌شود. از طرف دیگر افزایش نیرو تأثیر چندانی روی ضخامت گلوبی ورق پایینی ندارد. بنابراین چون در سنبه قطر 5/5 میلی‌متر لقی کمتر است با افزایش قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی ورق بالایی بسیار کم می‌شود (شکل 7 ج))، که حتی منجر به پارگی ورق از این محل در نیروهای کلینچ بالای می‌شود.

3- اتصالات مربوط به قطر سنبه 5 میلی‌متر به دلیل مناسب

نتایج حاصل از جدول 3 و شکل 7 حاکی از آن است که: 1- در نیروی یکسان کلینچینگ، در اتصالات با قطر سنبه 4/5 میلی‌متر بدلیل اندازه قطر پایین‌تر، فشار اعمال شده بر روی ورق‌ها بیشتر شده و میزان کاهش ضخامت کف ورق‌ها نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل با افزایش قطر سنبه، در نیروی یکسان، عمق نفوذ کاهش می‌یابد. اما چون قطر ماتریس در تمامی نمونه‌ها یکسان است، در سنبه کوچک‌تر، میزان لقی بین سنبه و ماتریس بیشتر بوده و ماده راحت‌تر امکان حرکت و خروج از فضای بین سنبه و ماتریس را دارد. به همین دلیل در سنبه قطر کوچک‌تر با وجود عمق نفوذ بیشتر، قفل مکانیکی ایجاد شده پایین‌تر است.

نکته دیگری که در هندسه اتصال با قطر سنبه 4/5 میلی‌متر مشاهده می‌شود آن است که با وجود لقی بیشتر، بدلیل بیشتر بودن ضخامت گلوبی ورق بالایی ( $Lt_n$ )، ضخامت گلوبی ورق پایینی ( $Ut_n$ ) نسبتاً پایین است. از آنجا که در استحکام اتصال، ضخامت حداقل تعیین کننده خواهد بود، بنابراین در اتصال با این قطر سنبه بدلیل پایین بودن ضخامت گلوبی ورق پایینی، لقی بیشتر منجر به افزایش استحکام نخواهد شد.

2- اتصالات مربوط به قطر سنبه 5/5 میلی‌متر به دلیل بزرگ

مکانیکی بهتر، نمونه معیوب محسوب می‌شوند. به این ترتیب، می‌توان گفت که از نظر هندسه اتصال سنبه قطر 5 میلی‌متر نسبت به سنبه‌های قطر 4/5 و 5/5 میلی‌متر سنبه بهینه‌تری می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در سنبه بهینه، اتصال مناسب را در محدوده بازتری از نیروی کلینچ می‌توان بدست آورد.

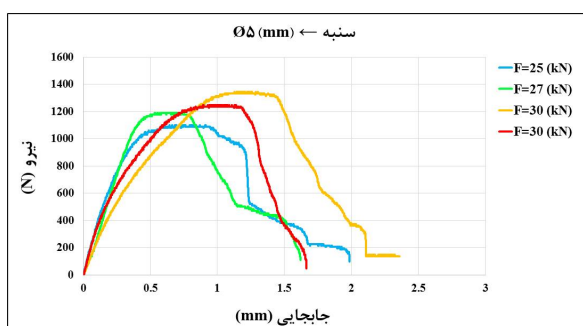
### 3-3- اثر قطر سنبه و نیروی کلینچ بر استحکام اتصالات

به منظور بررسی استحکام برشی اتصالات، نمونه‌ها جهت آزمون کشش با هندسه نشان داده شده در شکل 4 (الف) آماده شدند. نمونه‌های مختلف توسط سنبه‌ها با قطر 4/5، 5 و 5/5 میلی‌متر در چهار نیروی کلینچینگ 25، 27، 30 و 32 کیلو نیوتن ایجاد شدند و تحت آزمون استحکام برشی قرار گرفتند. نتایج این آزمون در شکل 8 نشان داده شده است.

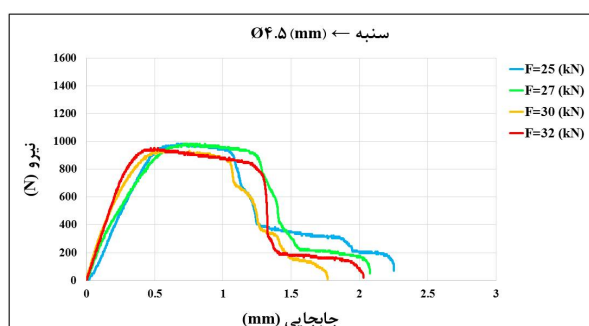
از شکل 8 (د) مشخص است که با افزایش قطر سنبه‌ها از 4/5 تا 5/5 میلی‌متر، استحکام اتصالات افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در تمامی اتصال‌ها، نمونه‌های ایجاد شده با سنبه 4/5 میلی‌متر، کمترین استحکام و نمونه‌های ایجاد شده با سنبه قطر 5/5 بیشترین استحکام را دارند.

بودن اندازه لقی بین سنبه و ماتریس از نظر قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی و شکل ظاهری، اتصالات بهتری نسبت به اتصالات با قطرهای سنبه 4/5 و 5/5 میلی‌متر حاصل می‌شود.

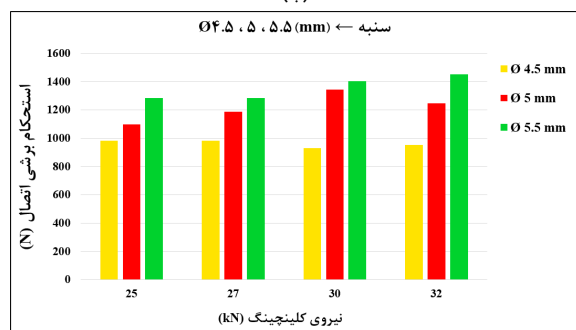
نکته‌ای که از تغییر پارامتر قطر سنبه مشاهده می‌شود آن است که، در محدوده نیروی اتصال 25 تا 32 کیلو نیوتن با قطر سنبه 4/5 میلی‌متر، پارامترهای اتصال تا حد زیادی مستقل از نیروی اتصال است. به گونه‌ای که مطابق جدول 3- شکل‌های (الف تا د) با افزایش نیروی اتصال، میزان قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی ورق بالایی و ضخامت گلوبی ورق پایینی، چندان تغییر نمی‌کنند. در این محدوده نیروی کلینچ، با افزایش قطر سنبه به 5 میلی‌متر مطابق جدول 3- شکل‌های (ه تا ح) با افزایش نیروی کلینچ میزان قفل مکانیکی نسبت به سنبه 4/5 میلی‌متر بیشتر شده و تا حدودی بهبود یافته است. همچنین در اتصالات ایجاد شده با سنبه قطر 5/5 میلی‌متر با افزایش نیروی کلینچ مطابق جدول 3- شکل‌های (ط تا ل) قفل مکانیکی افزایش می‌یابد. بطوریکه اتصالات مربوط به شکل‌های (ک و ل) از نظر قفل مکانیکی، بهترین حالت را بخود اختصاص می‌دهند. اما به علت پایین بودن زیاد ضخامت گلوبی ورق بالایی، از محل گلوبی ورق بالایی دچار شکست شده‌اند و با وجود داشتن اتصال و قفل



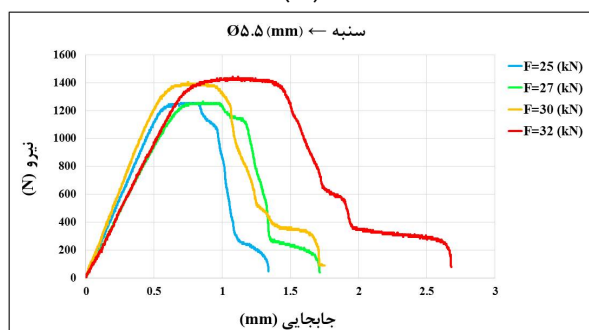
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

**Fig. 8** Comparison of the joint shear test for the different punch diameters (4.5, 5, and 5.5 mm) and clinching loads (25, 27, 30, and 32 kN). Punch dia: a) 4.5 mm b) 5 mm c) 5.5 mm.

شکل 8 نتایج استحکام برشی اتصالات با قطرهای الف - 4/5 میلی‌متر، ب - 5 میلی‌متر، ج - 5/5 میلی‌متر، د - مقایسه قطرهای سنبه (4/5، 5 و 5/5 میلی‌متر)، با نیروهای اتصالی (25، 27، 30 و 32 کیلو نیوتن)



اتصال به نیروی کلینچ دارد. البته اتصالات مربوط به نیروی 30 و 32 هم از نظر قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی، و هم از نظر استحکام برشی، تا حدی نسبت به اتصالات با نیروی 25 و 27 کیلونیوتن شرایط بهتر و مناسب‌تری دارند.

### 3-4- نوع شکست در اتصالات پس از انجام آزمون‌های برش و جدایش

به طور کلی در تست کشش ورق‌های متصل شده با فرایند کلینچینگ دو نوع مد شکست وجود دارد: 1- پارگی از ضخامت گلوبی ورق<sup>1</sup> 2- جدایش از کف<sup>2</sup>. شماتیکی از این دو مد شکست اتصال در شکل 9 نشان داده شده است [12-16]. در مد پارگی از ضخامت گلوبی ورق، یکی از ورق‌های متصل شده از ناحیه گلوبی ورق پاره می‌شود که دلیل آن کم بودن ضخامت گلوبی است. در مد جدایش از کف، قفل مکانیکی ضعیف بین دو ورق باعث خارج شدن برآمدگی ایجاد شده در یک ورق از فرورفتگی ایجاد شده در ورق دیگر می‌شود.

با توجه به نوع مدهای شکست بیان شده می‌توان دریافت که لازمه اتصالی با استحکام بالا، داشتن ضخامت گلوبی و قفل مکانیکی مناسب است.

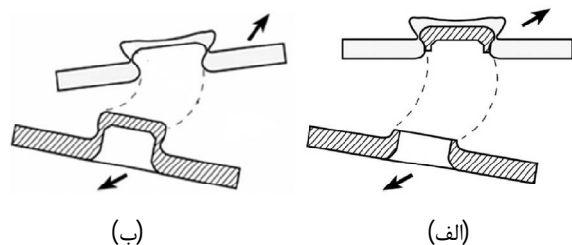


Fig. 9 Fracture mechanisms in the joints produced by clinching a) fracture from neck thickness and b) separation from the bottom [15]

شکل 9 مدل‌های جدا شدن ورق‌های متصل شده توسط فرایند کلینچینگ (الف) پارگی از ضخامت گلوبی، (ب) جدایش از کف [15]

در شکل 10 انواع مدل‌های جدا شدن در آزمون استحکام جدایش نشان داده شده است. همان گونه که در نشان داده شده، در شکل 10 (ب) جدا شدن ورق‌ها با شکست از قسمت گلوبی اتصال رخ داده است که عامل اصلی این رخداد پایین بودن بیش از حد ضخامت گلوبی ورق پایینی است. در نمونه نشان داده شده در شکل 10 (ج) نیز جدایش ورق‌ها همانند آزمایش قسمت (ب) با شکست از ضخامت گلوبی رخ داده است. با این تفاوت که در این آزمایش به دلیل بالا بودن ضخامت

در نیروی کلینچینگ 25 کیلونیوتن، افزایش قطر سنبه از 4/5 به 5/5 میلی‌متر، استحکام اتصال را 23 درصد افزایش می‌دهد در حالی که در نیروی کلینچینگ 30 و 32 کیلونیوتن، همین افزایش قطر سنبه، استحکام اتصال را به ترتیب 33 و 35 درصد افزایش می‌دهد.

نکته دیگری که در شکل 8 (د) می‌توان مشاهده کرد آن است که با وجود اثر قابل ملاحظه قطر سنبه بر استحکام برشی اتصال، تأثیر نیروی کلینچ بر استحکام اتصال کمتر است. به گونه‌ای که در قطر سنبه 4/5 میلی‌متر، با تغییر نیروی کلینچینگ از 25 تا 32 کیلونیوتن، استحکام اتصال تنها به میزان 0/04 درصد تغییر می‌کند. در قطر سنبه 5/5 نیز که بیشترین وابستگی به نیروی کلینچ را در سه قطر سنبه دارد، با افزایش نیروی کلینچ از 25 کیلونیوتن به 32 کیلونیوتن، نیروی کلینچینگ به میزان 12 درصد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت در محدوده‌ای که اتصال مناسبی بین ورق و سنبه به وجود می‌آید، افزایش بیشتر نیروی کلینچینگ تأثیر چندانی بر روی استحکام اتصال ندارد و استحکام اتصال بیشتر به هندسه قالب وابسته است.

با توجه به جدول 3 و نتایج حاصل از نمودارهای آزمون‌های استحکام برشی (شکل 8)، اتصالات ایجاد شده با قطر سنبه 4/5 میلی‌متر به دلایلی که توضیح داده شد از کمترین قفل مکانیکی و استحکام برشی برخوردار بودند. در حالی که اتصالات مربوط به قطر سنبه 5/5 میلی‌متر به ویژه در نیروهای کلینچینگ 30 و 32 کیلونیوتن، از بیشترین استحکام برشی برخوردار هستند. اما نکته‌ای که در خصوص اتصالات با سنبه‌های با قطرهای 5/5 میلی‌متر در نیروهای کلینچ 30 و 32 کیلونیوتن مشاهده می‌شود آن است که مطابق جدول 3 شکل‌های (ک و ل)، قسمت کف ورق بالایی در این اتصالات جدا شده است که می‌تواند به عنوان یک عیب اتصال مطرح باشد. بنابراین هندسه اتصال در این قطر سنبه به نیروی کلینچ وابسته است. نتیجه‌ای که حاصل می‌شود، حاکی از آن است که اتصالات مربوط به قطر سنبه 5 میلی‌متر هم از نظر هندسه اتصال و هم از نظر استحکام کششی اتصال، مناسب‌ترین اتصال در بین قطرهای مختلف می‌باشد. با مقایسه اتصالات مربوط به قطر سنبه 5 میلی‌متر با نیروهای مختلف همان گونه که در شکل‌های جدول 3 و شکل 7 قابل مشاهده است، می‌توان نتیجه گرفت که در تمام اتصالات ایجاد شده با نیروهای 25 تا 32 کیلونیوتن، اتصالات ایجاد شده از نظر ضخامت گلوبی، قفل مکانیکی و استحکام اتصال شرایط مناسبی دارند که نشان از وابستگی ناچیز

<sup>1</sup> Neck fracture mode

<sup>2</sup> Button separation mode

مستحکم اتصالی است که هر دو پارامتر قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی را یکجا دارا باشد [13].

نوع شکست در نمونه تست‌های انجام شده پس از آزمون‌های استحکام برش برای نیروهای 25، 27، 30 و 32 کیلونیوتن با قطرهای سنبه 4/5، 5 و 5/5 میلی‌متر در جدول 4 ارائه شده است. در مطالعات انجام شده در مورد افزایش استحکام اتصالات توسط دیگر پژوهشگران، دلیل اصلی استحکام اتصالات، قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی بالا می‌باشد [4-9]. بطوریکه چاؤچن و همکاران [9] ادعا داشتند که در تمامی نمونه‌ها، به دلیل بالا بودن ضخامت گلوبی نمونه‌ها طبق حالت اصلی شکست، یعنی شکست از گلوبی ورق رخ داده است.

گلوبی، شکست در استحکام بالاتری رخ داده است. اما در آزمایش نشان داده شده در شکل 10 (د) به دلیل پایین بودن مقدار قفل مکانیکی، شکست طبق مد جدایش از کف رخ داده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد شکل 10 و با توجه به نتایج ارائه شده در پژوهش میرزایی و همکاران [13]، می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین و مستحکم‌ترین اتصال، اتصالی است که پارامترهای قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی را یکجا دارا باشد. به این معنی که بالا بودن ضخامت گلوبی ورق به تنهایی نمی‌تواند عامل اتصالی مستحکم باشد. همچنین قفل مکانیکی مناسب نیز به تنهایی عامل اتصال قوی نیست. بنابراین اتصال

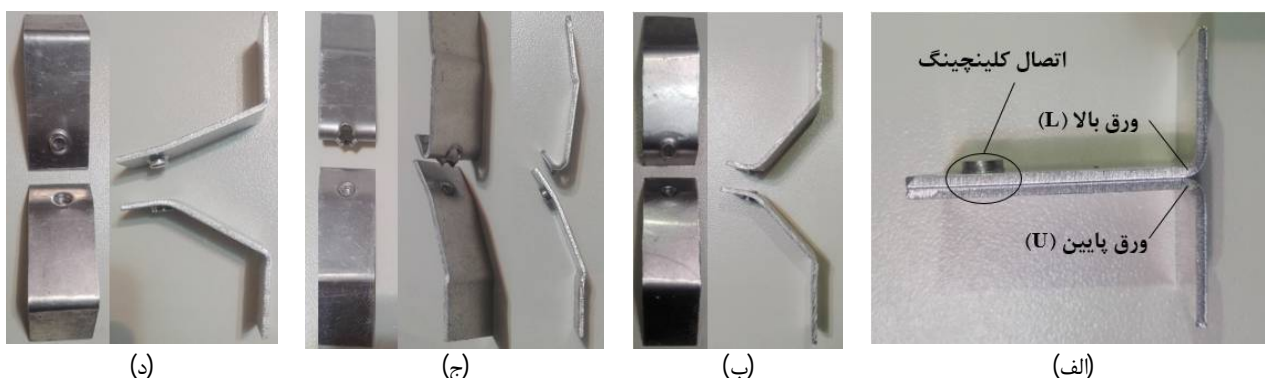


Fig. 10 a) Prepared samples for the peel test. Fracture modes: b) and c) fracture form neck thickness, and d) separation from the bottom.

شکل 10 الف) نمونه آماده شده برای انجام آزمون استحکام جدایش. مدل‌های جدایش ورق‌های متصل شده: ب) و ج) پارگی از ضخامت گلوبی و د) جدایش از کف.

جدول 4 نوع شکست اتصالات انجام شده با نیروهای کلینچ و قطرهای مختلف سنبه

Table 4 Comparison of the joint failure mode in different clinching loads and punch diameters

Ø 5/5 (mm)		Ø 5 (mm)		Ø 4/5 (mm)		سنبه نیرو
ورق بالا (U)	ورق پایین (L)	ورق بالا (U)	ورق پایین (L)	ورق بالا (U)	ورق پایین (L)	
						25 (kN)
						27 (kN)
						30 (kN)
						32 (kN)

دو ویژگی مهم در تجزیه و تحلیل سازه اتصالات کلینچینگ هستند [7، 16، 17]. بررسی ظرفیت جذب انرژی اتصال برای جذب انرژی قبل از شکست اتصال در شرایط بارگذاری غیر استاتیکی حائز اهمیت بوده و ضروری است. ظرفیت جذب انرژی هر اتصال برشی با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مشخص می‌شود [11-12]. سطح زیر منحنی به دوزنقه‌های بسیار کوچک تقسیم می‌شود و مساحت هر دوزنقه با فرمول زیر محاسبه می‌شود: [11].

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i + Y_{i+1})}{2} (X_{i+1} - X_i) \quad (1)$$

بنابراین، ظرفیت جذب انرژی یک اتصال را می‌توان مطابق شکل 11 (الف) با محاسبه مساحت زیر نمودار نیروی-جابجایی تا نقطه شکست بدست آورد. همچنین ظرفیت جذب انرژی تا حداکثر نیرو را نیز می‌توان مطابق شکل 11 (ب) با محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی تا نیروی حداکثر تعیین کرد. ظرفیت جذب انرژی تا نقطه شکست و تا نقطه حداکثر نیرو در آزمون برش برای تمام نمونه‌های بیان شده در جدول 3 از نتایج تست کشش نشان داده شده در شکل 8 بدست آمد که در شکل 12 با یکدیگر مقایسه شده اند.

مقایسه انرژی جذب شده کل اتصالات مختلف در شکل 12 (الف) نشان می‌دهد که اتصال ایجاد شده با سنبه به قطر 5 میلی‌متر و با نیروی کلینچ 30 کیلو نیوتن، بیشترین انرژی جذب شده کل را دارد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای نیز با اتصالات دیگر دارد، در حالی که استحکام این اتصال نسبت به سایر اتصالات ایجاد شده با سنبه قطر 5 میلی‌متر اختلاف ناچیزی داشته است (شکل 8 (د)). دلیل این اختلاف بالا در انرژی جذب شده این اتصال را توان در شکل پذیری بیشتر آن در حین آزمایش استحکام برشی دانست. همان‌گونه که در شکل 8 (ب) قابل مشاهده است، در این اتصال بعد از حداکثر نیرو، افت نیرو تدریجی بوده و نمونه قبل از شکست کامل، تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهد، در حالی که در نمونه‌های دیگر، نیروی کشش بعد از حداکثر نیرو به سرعت افت کرده و با تغییر شکل کمتری جدایش کامل رخ می‌دهد.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش‌های قبل، قطر سنبه 5 میلی‌متر در بین قطرهای دیگر بهینه‌ترین قطر محسوب می‌شود. همچنین با توجه به پارامترهای بررسی شده در بخش‌های قبل، با بررسی محدوده نیروی کلینچ (25، 27، 30 و 32 کیلو نیوتن) با قطر سنبه 5 میلی‌متر، از بین این 4 نیروی

در مطالعه حاضر نیز همان طور که از شکل‌های ارائه شده در جدول 4 نمایان است، با توجه به تعیین محدوده مناسب نیرو (محدوده 25 الی 32 کیلو نیوتن) در مرحله قبل، بدلیل قفل مکانیکی مناسب بین ورق‌های اتصالی در تمامی نمونه‌ها، جدایش ورق‌ها طبق مدل پارگی از ضخامت گلوبی، رخ داده است. که در زیر به توضیحات آن پرداخته شده است.

1- در شکل‌های مربوط به قطر سنبه 4/5 میلی‌متر به دلیل عمق نفوذ بیشتر سنبه ضخامت گلوبی پایین بوده و شکست از ناحیه ضخامت گلوبی ورق رخ داده و عامل پایین بودن استحکام در این اتصالات شده است.

2- در آزمایش‌های مربوط به قطر سنبه 5 میلی‌متر نیز شکست از ناحیه ضخامت گلوبی اتفاق افتاده است. اما در این قطر به دلیل لقی مناسب بین سنبه و ماتریس همان‌طور که در شکل‌های جدول 3 ارائه شد، اتصالات نسبت به قطر سنبه 4/5 میلی‌متر از قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی بالایی برخوردار بودند. بطوریکه این عامل، موجب بالا بودن استحکام برشی و بخصوص استحکام جدایش در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های متصل شده با قطر 4/5 میلی‌متر شده است.

3- در نمونه تست‌های مربوط به قطر 5/5 میلی‌متر در نیروهای 25 و 27 کیلو نیوتن بدلیل ضخامت گلوبی پایین شکست از این ناحیه رخ داده است. اگرچه این نمونه‌ها از استحکام برشی بالایی برخوردار بودند، اما بدلیل پایین بودن قفل مکانیکی بین دو ورق استحکام جدایش این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مربوط به قطر سنبه 5 میلی‌متر بسیار پایین می‌باشد. همچنین در نمونه‌های مربوط به نیروهای 30 و 32 کیلو نیوتن به دلیل لقی پایین بین سنبه و ماتریس ضخامت گلوبی بیش از حد پایین بوده و منجر به پارگی در ناحیه ضخامت گلوبی ورق بالایی در هنگام اتصال شده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌های مربوط به نیروی کلینچ 30 و 32 کیلو نیوتن در برخی موارد پارگی در گلوبی ورق بالایی ایجاد نشده است که این نشان دهنده عدم تکرار پذیری این نمونه‌ها می‌باشد.

### 3-5- اثر قطر سنبه و نیروی کلینچی بر روی ظرفیت جذب انرژی اتصالات

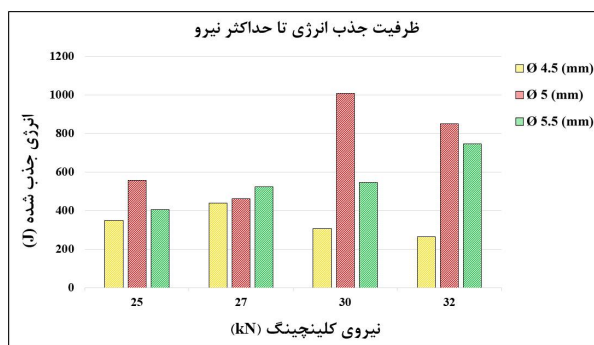
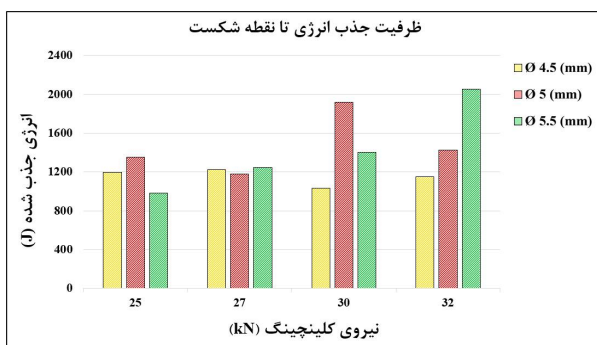
انرژی جذب اتصال، معیاری برای تحمل استحکام قبل از جدایش در بارگذاری‌های غیر استاتیکی است. با توجه به مطالعات دیگر پژوهشگران، ظرفیت جذب انرژی (EAC)<sup>1</sup> و ظرفیت تحمل بار

<sup>1</sup> Energy Absorption Capacity

اتصالات ارائه شده، انجام گرفته است. مطابق شکل 13، جهت بررسی تکرارپذیری اتصال، از هر نمونه اتصال، 3 نمونه تحت آزمون استحکام برشی (شکل 13 الف))، و 3 نمونه دیگر تحت آزمون جدایش (شکل 13 ب)) با مناسب‌ترین شرایط اتصال انجام گرفت. با بررسی نتایج این آزمون‌ها، طبق شکل 14 استحکام متوسط و انحراف معیار آن‌ها به دست آمده است.

کلینچ، نیروهای 30 و 32 کیلونیوتن مناسب‌ترین اتصال محسوب می‌شوند. بنابراین با هدف کاهش حجم اتصالات و تسریع در تعیین مناسب‌ترین اتصال، ادامه اتصالات با نیروهای 30 و 32 کیلونیوتن انجام گرفته است.

تکرارپذیری اتصالات با قطر سنبه بهینه (5 میلی‌متر)، با نیروهای بهینه کلینچ (30 و 32 کیلونیوتن)، از طریق آزمون‌های استحکام برشی و استحکام جدایشی، که در شکل 8 نتایج این

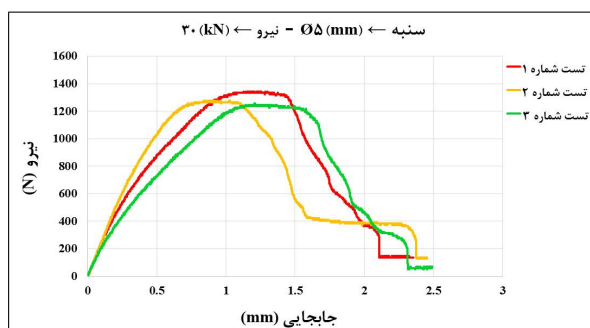
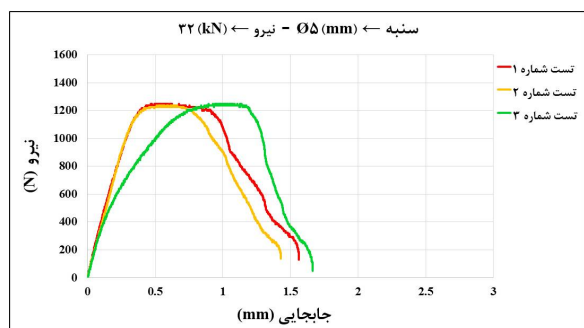


(ب)

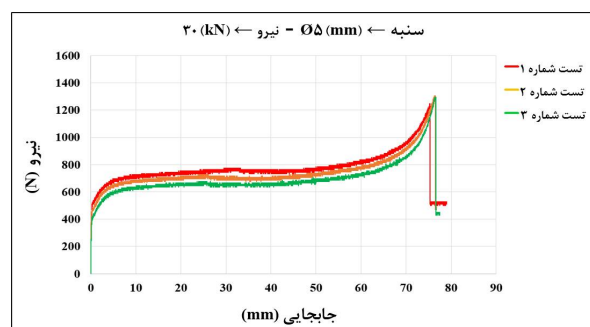
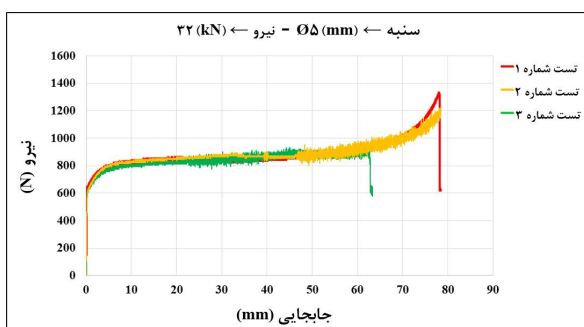
(الف)

Fig. 12 Comparison of the a) energy absorption capacity up to peak load and b) total energy absorption capacity for the different punch diameter and clinching loads.

شکل 12 الف - مقایسه ظرفیت جذب انرژی تا حداکثر نیرو و ب - مقایسه ظرفیت جذب انرژی کل، برای قطرهای مختلف سنبه و نیروهای اتصالی در آزمون استحکام برش



(الف)



(ب)

Fig. 13 Comparison of the repeatability of the joints' a) shear test b) peel test.

شکل 13 مقایسه تکرار پذیری اتصالات، الف - آزمون استحکام برشی و ب - آزمون استحکام جدایش.

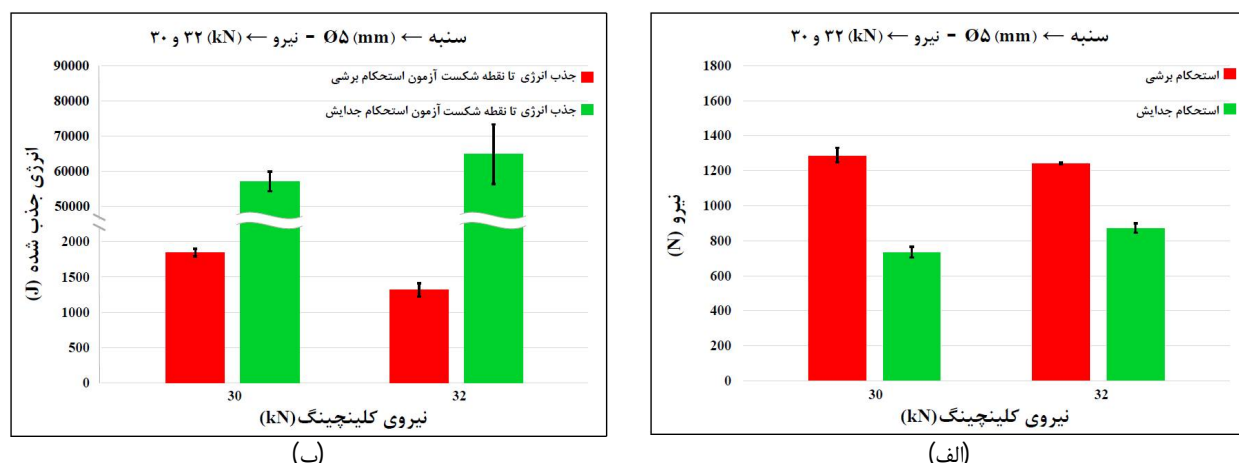


Fig. 14 Comparison of the repeatability of the shear test and peel test a) Shear strength and peel strength and their standard deviation b) Energy absorption capacity up to failure in shear test and peel test and their standard deviation

شکل 14 بررسی تکرار پذیری آزمون برشی آزمون جدایش. الف) استحکام برشی و استحکام جدایش و انحراف معیار آنها ب) جذب انرژی تا نقطه شکست در آزمون برشی و جدایش و انحراف معیار آنها

بالا بودن استحکام اتصال در برابر نیروهای برشی و جدایش می‌شود.

- از بین حالت‌های مختلف شکست، حالت شکست از ضخامت گلوبی اصلی‌ترین مد شکست می‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اتصال ورق به ورق آلومینیوم 3105 از طریق فرایند کلینچینگ با هدف افزایش استحکام اتصال با بررسی پارامترهای مختلف هندسی قالب و همچنین نیروی کلینچینگ انجام شده است. به منظور تعیین استحکام و خواص مکانیکی اتصالات، نمونه‌ها از هر هندسه اتصال از طریق آزمون‌های برش و جدایش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد:

- با مشاهده هندسه سطح مقطع نمونه‌ها با افزایش نیرو کلینچینگ تا نیرو 30 کیلو نیوتن مقدار قفل مکانیکی افزایش یافته است. بطوری‌که از بین نیروهای مختلف (18 تا 32 کیلو نیوتن) مناسبترین نیروی کلینچ برای ورق آلومینیوم 3105 محدوده 25 الی 32 کیلو نیوتن می‌باشد.

- با توجه به ثابت در نظر گرفتن ابعاد ماتریس، از بین سنبه‌های با قطرهای مختلف و محدوده نیروی کلینچ (25 الی 32 کیلو نیوتن)، سنبه با قطر 5 میلی‌متر با نیروی 30 و 32 کیلو نیوتن بهترین حالت اتصال را به خود اختصاص داده است. بطوری‌که در سنبه با قطر 5 میلی‌متر با نیروی 30 و 32 کیلو نیوتن، به دلیل لقی مناسب بین سنبه و ماتریس و عمق نفوذ مناسب سنبه، اتصالات از قفل مکانیکی، ضخامت گلوبی، استحکام اتصال، ظرفیت جذب انرژی و تکرار پذیری بهتر و بالاتری نسبت به قطرهای دیگر برخوردار شده‌اند.

- اتصالات با لقی کم بین سنبه و ماتریس، به دلیل حرکت شعاعی ماده در کف نمونه‌ها موجب افزایش قفل مکانیکی و کاهش ضخامت گلوبی ورق بالایی می‌شود.

- بالا بودن همزمان قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی، موجب

#### 5- مراجع

- [1] Deutsches Reichspatent, 1897. DRP-Nr. 97517.
- [2] Francesco Lambiasi, Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2123–2131, 2013.
- [3] Chan-JooLee, Jae-YoungKim, Sang-KonLee, Dae-CheolKo, Byung-MinKim, Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets, *Journal of Materials and Design*, 1854-1861, 2010.
- [4] C. Chen, X. Han, S. Zhao, F. Xu, X. Zhao, and T. Ishida, Comparative study on two compressing methods of clinched joints with dissimilar aluminum alloy sheets, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 5–8, pp. 1929–1937, 2017.
- [5] Y. Abea, K. Moria, T. Kato, Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow, *Journal of Materials Processing Technology*, 884– 889, 212, 2012.
- [6] Chan-Joo Lee, Jung-Min Lee, Ho-Yeon Ryu, Kyung-Hun Lee, Byung-Min Kim, Dae-Cheol Ko, Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials – Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel and carbon fiber reinforced plastic, *Journal of Materials Processing Technology*, 2169–2178, 214, 2014.
- [7] Xiacong He, Yue Zhang, Baoying Xing, Fengshou Gu, Andrew Ball, Mechanical properties of extensible die clinched joints in titanium sheet materials, *Journal of Materials and Design*, 26–35, 71, 2015.

- die geometry on the strength and join geometry of Al3105 aluminum sheets joined by clinching process, 16th National Conference and 5th International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iranian Manufacturing Engineering Association, [https://www.civilica.com/Paper-ICME16/ICME16\\_063.html](https://www.civilica.com/Paper-ICME16/ICME16_063.html), 2019. (in Persianفارسی)
- [14] Sam Coppieters, Steven Cooreman, Pascal Lava, Hugo Sol, Paul Van Houtte, and Dimitri Debruyne, Reproducing the experimental pull-out and shear strength of clinched sheet metal connections using FEA, *International Journal of Material Forming*, 429-440, 2011.
- [15] M.M. Moshksar, S. Mansorzadeh, Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 138-142, 141, 2003.
- [16] Xiaocong He, Lun Zhao, Huiyan Yang, Baoying Xing, Yuqi Wang, Chengjiang Deng, Fengshou Gu, Andrew Ball, Investigations of strength and energy absorption of clinched joints, *Journal of Computational Materials Science*, 58-65, 2014.
- [17] Xiaocong He, A review of finite element analysis of adhesively bonded joints, *Journal of International Journal of Adhesion & Adhesive*, 248-26, 2011.
- [8] Y. Abe, S. Nihsino, K.-i. Mori, T. Saito, Improvement of joinability in mechanical clinching of ultra-high strength steel sheets using counter pressure with ring rubber, *Procedia Engineering*, 2056-206, 81, 2014.
- [9] C. Chen, S. Zhao, X. Han, M. Cui, X. Zhao, T. Ishida, Experimental investigation of the mechanical reshaping process for joining aluminum alloy sheets with different thicknesses, *Journal of Manufacturing Processes*, 105-112, 26, 2017.
- [10] F. Lambiase, A. Paoletta, A. Di Ilio, Advances in Mechanical Clinching: Employment of a rotating tool, *Journal of Procedia Engineering*, 200 - 205, 183 2017.
- [11] Hossein Ghorbani Menghari, Vahid Babalo, Ali Fazli, Mehdi Soltanpour, Hamed Ziaei-poor, A study on the electro-hydraulic clinching of aluminum and carbonfiber reinforced plastic sheets, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 239-249, 2020.
- [12] Vahid Babalo, Ali Fazli, Mehdi Soltanpour, Electro-Hydraulic Clinching: A novel high speed joining process, *Journal of Manufacturing Processes*, 559-569, 35 2018.
- [13] Mirzaei. Mohammad Hussein, Fazli. Ali, Asadi Parviz, Soltanpour. Mehdi, Investigation of the effect of